Verformungsverhalten und Grenzflächen von Ultrahochleistungsbeton unter mehraxialer Beanspruchung

Deformation Behaviour and Hypersurfaces of Ultra High Performance Concrete under Multiaxial Loading

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden

eingereicht von
Dipl.-Ing. Robert Ritter
geboren am 17. Juni 1979 in Perleberg

Dresden 2014

Eingereicht am 16.10.2013
Verteidigt am 20.12.2013

Gutachter Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Leibniz Universität Hannover
Institut für Massivbau

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden im Rahmen meiner Bearbeitung eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Forschungsprojektes, bei der ich mich auch im Namen des Instituts herzlich bedanke.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach für das mir entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftliche Betreuung, seine wertvollen Anregungen und Kritiken sowie die in jeder Hinsicht gewährte Unterstützung.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx für die Bereitschaft zur Begutachtung meiner Arbeit und die Anfertigung des Koreferats sowie bei Prof. Dr.-Ing. habil. Zastrau, Prof. Dr.-Ing. habil. Herle und Prof. Dr.-Ing. Haller für den Beisitz in der Promotionskommission.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut bedanke ich mich für ihre Unterstützung und konstruktiven Hinweise. In besonderem Maße trugen Gregor Schacht sowie Dirk Reischl mit Anregungen, Erläuterungen und Ideen dazu bei, den positiven Blick auf manche Problemstellung nicht zu verlieren und Hürden zu überwinden. Ein großes Dankeschön gebührt weiterhin den Verwaltungsangestellten des Instituts für die Übernahme von organisatorischen Angelegenheiten und ihr stets offenes Ohr für die kleinen Probleme des Alltags.

Weiterhin bedanke ich mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Otto-Mohr-Laboratoriums für ihre tatkräftige Unterstützung, ihr Engagement und ihren Einfallsreichtum bei der Umsetzung von Ideen zum Versuchsaufbau sowie bei der Durchführung der Versuche, welche die Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden.

Außerdem möchte ich mich bei den studentischen Hilfskräften bedanken, die mir bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche, bei der Aufbereitung der Versuchsergebnisse und durch die Abnahme von vielen kleinen Tätigkeiten eine große Hilfe waren.

Ein ganz großes Dankeschön richtet sich an meine Familie und Freunde, die mich zu jeder Zeit unterstützt haben und mich motivierten den eingeschlagenen Weg weiterzugehen. Inbesondere bedanke ich mich ganz herzlich bei meiner Frau Laura, die, wann immer es nötig war, mit Rat und Tat an meiner Seite stand. Außerdem bedanke ich mich bei Laura und meinen Kindern für die vielen lebhaften Momente die den Alltag bereichern und farbiger gestalten.

Dresden, im Januar 2014 Robert Ritter

Kurzfassung

Treten im Beton mehraxiale Spannungszustände auf, führen diese gegenüber einer einaxialen Beanspruchung zu einer signifikanten Änderung des Materialverhaltens. Neben einer festigkeitssteigernden bzw. -abmindernden Wirkung ergeben sich ebenfalls große Unterschiede im Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Zur effizienten Konzipierung von Betonstrukturen unter komplexen Beanspruchungszuständen ist daher die Kenntnis des veränderten Materialverhaltens notwendig.

Zur experimentellen Bestimmung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens eines Ultrahochleistungsbetons mit einer einaxialen Druckfestigkeit von über $170\,\mathrm{N/mm^2}$ wurden mehraxiale Belastungsversuche an würfelförmigen Probekörpern durchgeführt. Die Untersuchung umfasste insgesamt 35 zwei- und dreiaxiale Spannungsverhältnisse unter proportionaler Laststeigerung mit vorrangiger Betrachtung von Zug-Druck-Druck-Beanspruchungen. Für die Einleitung der Zugbeanspruchungen in die Prüfkörper wurde eine neue Methode entwickelt, bei der mittels einbetonierter Schrauben die Belastung auf den Beton übertragen wird. Die Bestimmung des Verformungsverhaltens erfolgte im Inneren der Probekörper mit sechs tetraederförmig angeordneten Faser-Bragg-Gittern. Die somit direkt gemessenen Dehnungen ermöglichen die nachträgliche Berechnung der Komponenten des Dehnungstensors des Bezugskoordinatensystems.

Für den untersuchten Ultrahochleitsungsbeton fallen die auf die einaxiale Druckfestigkeit bezogenen mehraxialen Festigkeitswerte mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil der Beanspruchung geringer aus als bei Normalbetonen. Weiterhin weist das Verformungsverhalten eine größere Sprödigkeit gegenüber Normalbetonen auf, so dass auch unter dreiaxialen Druckspannungszuständen die Probekörper schlagartig versagen.

Aus den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien werden neben den maximalen Festigkeiten die Festigkeitswerte an der Elastizitätsgrenze, der Affinitätsgrenze sowie beim Volumenminimum der Probekörper bestimmt. Zur Approximation dieser charakteristischen Werte wurde eine Grenzflächenbeschreibung entwickelt und an den Versuchsergebnissen kalibriert.

Des Weiteren erfolgte die Zusammenstellung einer Datenbank mit in der Literatur verfügbaren mehraxialen maximalen Festigkeitswerten von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $10\,\mathrm{N/mm^2}$ bis $180\,\mathrm{N/mm^2}$ und die Kalibrierung des entwickelten Modells zur Grenzflächenbeschreibung in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit. Die bei der Kalibrierung der Grenzfläche für einzelne Betonfestigkeitsklassen bestimmten Freiwerte hängen dabei stark von den vorliegenden Versuchsdaten und speziell vom Wertebereich der hydrostatischen Spannungsanteile der maximalen Beanspruchungen ab.

Die Approximation des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der mehraxial beanspruchten Probekörper erfolgt mittels eines schädigungsbasierten Materialgesetzes. Hierbei wird für den anfänglich isotropen Beton zum einen eine lastinduzierte isotrope Schädigung und zum anderen eine lastinduzierte orthotrope Schädigung angenommen, die von den auftretenden Hauptdehnungen abhängig ist. Mit dem entwickelten Materialgesetz werden sehr gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien erreicht, so dass sich ebenfalls eine gute Vorhersage der maximalen Festigkeitswerte ergibt.

Abstract

Concrete under multiaxial stress states shows significant changes of the material behaviour compared to uniaxial loading. Besides strength increasing and decreasing effects, also great differences in the stress-strain behaviour occur. In order to design concrete structures efficiently concerning complex stress states, the knowledge about the modified material behaviour is necessary.

To determine experimentally the stress-strain behaviour of an ultra high performance concrete with a uniaxial compressive strength of about $170\,\mathrm{N/mm^2}$, multiaxial loading tests on cubic-shaped specimens were carried out. Altogether, the investigation contained 35 biaxial and triaxial stress ratios under proportionally increasing load with primarily tension-compression-compression loadings. Applying the tensile load on the specimen, a new method was developed, which uses screws embedded in the concrete to transfer the loading. The deformations were measured by using six tetrahedron-shaped arranged Fibre Bragg Gratings inside the concrete specimen. Subsequently, with the directly measured strains the components of the strain tensor of the reference coordinate system could be determined.

For the investigated ultra high performance concrete the increase of the multiaxial strength, referring to the uniaxial compressive strength, decreases compared to normal strength concrete with the increasing hydrostatic stress component of the load. Moreover, the deformation behaviour shows an increased brittleness compared to normal strength concrete, so that even under triaxial compressive stress states the specimens fail abruptly.

Besides the ultimate strength, from the measured stress-strain curves the strength at the proportional limit, at the limit of affinity as well as at the minimum volume of the specimen is determined. To approximate these characteristic values, a description of a hypersurface is developed and calibrated with the test results.

Furthermore, a database with multiaxial ultimate strength values of concretes with uniaxial compressive strengths between $10\,\mathrm{N/mm^2}$ to $180\,\mathrm{N/mm^2}$ available from literature was compiled and a calibration of the developed hypersurface model depending on the uniaxial compressive strength was carried out. Thereby, the obtained values of arbitrary parameters of individual concrete strength classes depend severely on the available test results, especially on the range of values of the hydrostatic stress component of the ultimate strength.

The approximation of the stress-strain behaviour of the multiaxial loaded specimens is carried out by means of a damage-based material law. For this purpose, concerning the initially isotropic concrete, a load-induced isotropic and orthotropic damage depending on the principle strains is assumed. With the developed material law, very good accordance with the measured stress-strain curves could be achieved, so that also results in a good approximation of the ultimate concrete strength.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Stand des Wissens **5**

2.1 Materialverhalten von Beton 5

2.1.1 Schädigungsphasen von Beton 5

2.1.2 Grenzen der Schädigungsphasen und charakteristische Punkte im Materialverhalten 9

2.1.3 Mehraxiale Festigkeit 15

2.1.4 Grenzflächen von charakteristischen Punkten im Materialverhalten 21

2.1.5 Modellierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Beton 26

2.2 Durchführung mehraxialer Belastungsversuche 34

2.2.1 Allgemeines 34

2.2.2 Möglichkeiten der Lasteinleitung 35

2.2.3 Methoden der Verformungsmessung 36

2.3 Zusammenfassung 40

3 Experimentelle Untersuchungen **43**

3.1 Allgemeines 43

3.2 Betonzusammensetzung und Probekörper 43

3.3 Festbetoneigenschaften 45

3.3.1 Einfluss der Faserverteilung 45

3.3.2 Materialverhalten unter einaxialer Zug- und Druckbeanspruchung 46

3.4 Versuchstechnik 50

3.4.1 Prüfmaschine 50

3.4.2 Lasteinleitung 51

3.4.3 Versuchsdurchführung 58

3.5 Messtechnik 60

3.5.1 Voruntersuchungen 60

3.5.2 Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gittern 61

3.5.3 Berechnung der Dehnungen in beliebigen Richtungen aus tetraederförmig angeordneten Messstellen 63

3.5.4 Einfluss einer Lageabweichung der Messstellen auf die Dehnungsmessung . . . 65

3.5.5 Herstellung des Messelementes 68

3.5.6 Verifikation der Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren im Beton 70

3.5.7 Dehnungsmessung mittels Faser-Bragg-Gitter bei ein- und mehraxialen Belastungsversuchen 78

3.6 Versuchsergebnisse der mehraxialen Belastungsversuche 81

3.6.1 Darstellung der Festigkeitswerte 81

3.6.2 Untersuchte Spannungsverhältnisse 82

3.6.3 Spannungs-Dehnungs-Verhalten 83

3.6.4 Mehraxiale Spannungswerte – Charakteristische Punkte im Materialverhalten 90

4 Beschreibung von Grenzflächen charakteristischer Festigkeitswerte 97
4.1 Vorbetrachtungen . . . 97
4.2 Mathematische Beschreibung von Festigkeitsgrenzflächen . . . 98
4.2.1 Anforderungen . . . 98
4.2.2 Beschreibung des Zugmeridians . . . 100
4.2.3 Beschreibung der Deviatorkurve . . . 101
4.2.4 Modifikations- und Erweiterungsmöglichkeiten der mathematischen Beschreibung . . . 104
4.3 Grenzflächen charakteristischer Festigkeitswerte der eigenen Versuche . . . 107
4.3.1 Vorgehensweise . . . 107
4.3.2 Grenzfläche der maximalen Festigkeit . . . 108
4.3.3 Grenzfläche der Elastizitätsgrenze, der Affinitätsgrenze und des Volumenminimums der Probekörper . . . 111
4.4 Grenzfläche der maximalen Festigkeit in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit 114
4.4.1 Allgemeines . . . 114
4.4.2 Kalibrierung der Grenzfläche in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit . 114
4.4.3 Diskussion der vorgeschlagenen mathematischen Beschreibung . . . 118
4.4.4 Anwendung von Erweiterungen der mathematischen Beschreibung . . . 123
4.5 Kalibrierung der Grenzfläche anhand einzelner Versuchswerte . . . 132

5 Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens bei mehraxialer Beanspruchung 137
5.1 Allgemeines . . . 137
5.2 Isotrope Schädigung . . . 137
5.2.1 Isotrope Schädigung mit Schädigungsbeginn während der Belastung . . . 137
5.2.2 Isotrope Schädigung mit Schädigungsbeginn zu Belastungsbeginn . . . 145
5.3 Orthotrope Schädigung . . . 151
5.4 Bewertung der vorgeschlagenen Modelle . . . 154

6 Zusammenfassung und Ausblick 159
6.1 Zusammenfassung . . . 159
6.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf . . . 162

Literaturverzeichnis 165

Symbolverzeichnis 173

A Ergebnisse der eigenen experimentellen Untersuchungen 177
A.1 Einaxiale Referenzversuche der Serie 1 bis 14 . . . 177
A.2 Übersicht der mehraxialen Belastungsversuche . . . 183
A.3 Gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien unter mehraxialer Belastung . . . 187
A.4 Mehraxiale Festigkeitswerte . . . 192
A.4.1 Versuche mit verwertbaren Festigkeitswerten . . . 192
A.4.2 Versuche mit gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien . . . 195
A.5 Konfigurationen und Festigkeitswerte der Versuche zur Zugkraftübertragung . . . 210

B Mehraxiale Festigkeitswerte aus der Literatur (Datenbank) 213
B.1 Übersicht . . . 213
B.2 Aufstellung nach Autor . . . 216

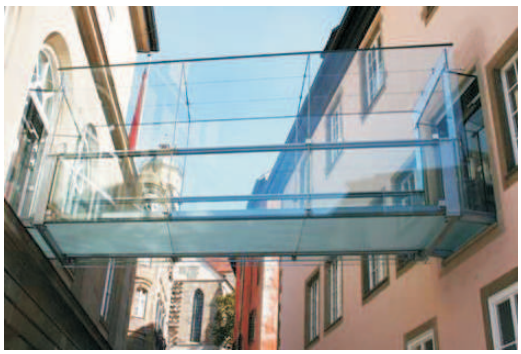
B.3 Darstellung der bezogenen maximalen Festigkeitswerte der mehraxialen Versuchswerte der einzelnen Betonfestigkeitsklassen 250

C Vergleich zwischen experimentellen und berechneten mehraxialen Festigkeitswerten 259
C.1 Festigkeitswerte der mehraxialen Referenzenversuche 259
C.2 Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit den Versuchswerten 262

D Vergleich der experimentell und rechnerisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien 269
D.1 Spannungs-Dehnungs-Linien mit weggesteuerter Beanspruchung 269
D.2 Spannungs-Dehnungs-Linien mit kraftgesteuerter Beanspruchung 274
D.3 Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen zwischen den experimentell und rechnerisch ermittelten maximalen Festigkeiten und den zugehörigen Dehnungen 279

1 Einleitung

Ein Schiff aus Beton, ein Flugzeug aus Holz, eine Brücke aus Glas oder ein Auto aus baumwollverstärktem Kunststoff? Es gibt Konstruktionen, bei denen die eingesetzten Werkstoffe ungewöhnlich erscheinen. Prinzipiell finden bei Strukturen nur Baustoffe Verwendung, deren Materialeigenschaften bei der Erstellung und unter der auftretenden Beanspruchung als gut bis optimal eingeschätzt werden. Kommt es zur Entwicklung neuer oder zur Verbesserung bekannter Materialien bzw. zum Mangel von Ressourcen, können die konventionell verwendeten Stoffe teilweise oder ganz ersetzt werden. Somit ist der Einsatz von Materialien auch immer im Kontext der Zeit ihrer Verwendung zu sehen. Dass sich viele Problemstellungen auch mit scheinbar unkonventionellen Materialien lösen lassen, zeigen immer wieder die Pionierleistungen von Ingenieuren, die in jeder Epoche hervorgebracht wurden. Speziell zu Zeiten der Verknappung von Rohstoffressourcen lassen sich Konstruktionen finden, bei denen konventionell eingesetzte Materialien durch andere verfügbare Werkstoffe ersetzt wurden. Es muss jedoch nicht immer ein Grund vorliegen, um Konstruktionen aus Materialien herzustellen, bei denen die verwendeten Werkstoffe grundsätzlich nicht zu erwarten sind. Eher geht es darum zu zeigen, was unter der Kenntnis der Materialeigenschaften des Stoffes möglich ist und gegebenenfalls die eigene Ingenieurleistung zu testen (Abbildung 1.1). Hieraus können sich neue Ideen und Anstöße für einen entsprechenden Materialeinsatz entwickeln, die das vorhandene Anwendungsfeld erweitern. Die Bewertung der Effizienz des Materialeinsatzes hängt dabei von vielen Faktoren ab, deren Wichtung, auch über kurze Zeiträume, ganz unterschiedlich ausgelegt werden kann.



a) Brücke aus Glas

b) Auto aus baumwollverstärktem Kunststoff

c) „Spuce Goose“ - Flugzeug aus Holz

d) U-Boot aus Beton

Abbildung 1.1: Funktionstüchtige Konstruktionen gebaut aus für diese Anwendungen unkonventionellen Materialien (z. T. aus [2], [3])

Auf dem Gebiet der hydraulisch gebundenen Betonwerkstoffe konnte in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Weiterentwicklungen verzeichnet werden, die es erlauben, die Eigenschaften dieses Materials in bestimmten Grenzen zu beeinflussen und einzustellen. Mit der Entwicklung von hochfesten und ultrahochfesten Betonen können einaxiale Druckfestigkeiten von über $200\,\mathrm{N/mm^2}$ erzielt werden, die sich durch eine gezielte Wärmenachbehandlung weiter steigern lassen und somit im Bereich der Druckfestigkeit von Stahl liegen. Zusätzlich kann durch eine Wärmenachbehandlung des Betons dessen Endfestigkeit bereits 24 Stunden nach der Betonage erreicht werden. Durch die Zugabe von Kurzfasern wird das Materialverhalten ebenfalls beeinflusst, wobei speziell das verbesserte Bruch- und Nachbruchverhalten als wesentliches Merkmal gegenüber Normalbeton zu nennen ist. Die mit zunehmender Festigkeit erhöhte Sprödigkeit der Betone kann infolge der Faserzugabe reduziert werden, um ein schlagartiges Versagen zu verhindern. Je nach Faserart und Menge ist es ebenfalls möglich, einen ausgeprägten Nachbruchbereich mit entsprechendem Entfestigungsverhalten einzustellen. Einhergehend mit der Entwicklung von Sonderbetonen, die zum Teil (noch) nicht als Werkstoff für großformatige Bauteile einsetzbar sind, ergeben sich neue bzw. erweitern sich bereits erschlossene Anwendungsfelder, in denen Sonderbetone konventionell eingesetzte Werkstoffe ablösen können.

Für ultrahochfeste Betone, deren Druckfestigkeiten im Bereich von Baustählen liegen, erweitern sich die Einsatzmöglichkeiten z. B. auf dem Gebiet des Maschinenbaus, wo Betone bereits seit vielen Jahren Verwendung finden. Diese werden in der heutigen Zeit hauptsächlich bei großen Maschinenteilen, Maschinenuntergestellen und Maschinenbetten eingesetzt, um u. a. das Gewicht und die Kosten im Vergleich zu reinen Stahlkonstruktionen zu senken. Entwicklungen auf diesem Gebiet gab es z. B. in den USA, Russland und China (Butterworth [11], Rohs & Kuhn [102]). Neben großen Maschinenteilen wird auch bei kleineren Werkzeugteilen wie Umformmatrizen bereits bereichsweise Beton verwendet. So berichtete Kurth [60] schon in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts von einer effizienten Herstellung einer Betonmatrize, in der bis zu 500 Blechumformungen möglich waren.

Im Maschinenbau kann je nach Aufgabe des Betons in einer Struktur die Einteilung nach der Konstruktionsart erfolgen, aus der sich unterschiedliche Anforderungen für die verwendeten Materialien ableiten lassen. Grundsätzlich sind folgende Konstruktionsarten zu unterscheiden (Neumann [85]):

Vergusskonstruktion: Es werden nachträglich Bereiche einer bestehenden Konstruktion durch das Vergießen mit einem Vergussmaterial verfüllt. Das ausgegossene Maschinenteil ist weiterhin allein ausreichend tragfähig und steif. Durch das Vergussmaterial werden die Eigenschaften des Maschinenteils verbessert, um für sein Einsatzgebiet eine höhere Lebensdauer zu realisieren. Durch das Vergießen können grundsätzlich nur die Steifigkeit erhöht und das Dämpfungsverhalten verbessert werden. Verguss kann außerdem einfach zur Vergrößerung der Masse genutzt werden. Ausgeführte Vergusskonstruktionen lassen sich z. B. im Bereich von Maschinenfundamenten finden.

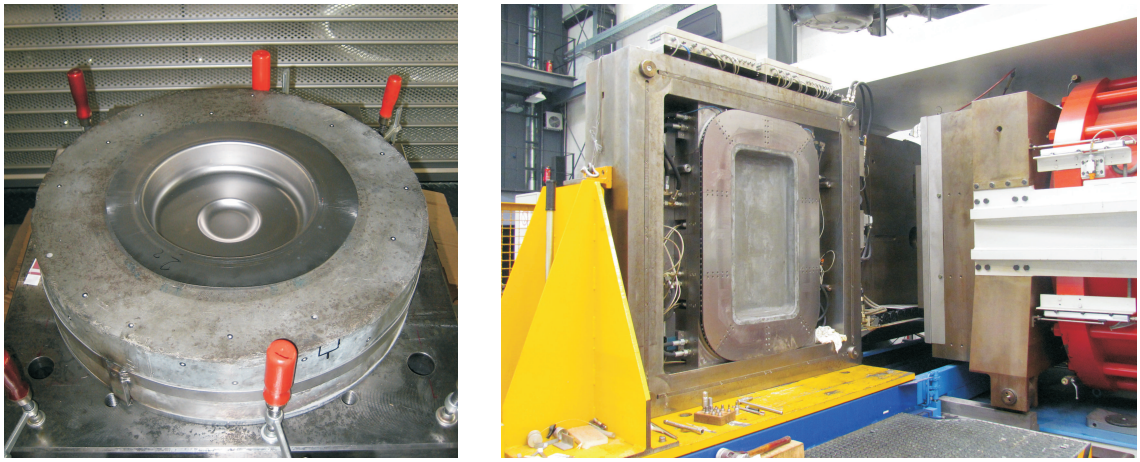
Verbundkonstruktion: Der Einsatz von Gussmaterialen und Stahlwerkstoffen wird entsprechend der Beanspruchung einzelner Bereiche der Konstruktion gewählt, wobei beide Verbundpartner die Gesamteigenschaften der Konstruktion bestimmen. Beide Komponenten können separat vorliegend nicht verwendet werden, weshalb ein hoher Anspruch an den Verbund gestellt wird. Dieser ist erreicht, wenn die Zug- und Scherfestigkeiten in der Verbundfuge größer sind als die Eigenfestigkeiten des „schwächeren“ Verbundpartners. Während im Bauwesen Verbundkonstruktionen z. B. bei Stützen oder Trägern ausgeführt werden, findet diese Konstruktionsart im Maschinenbau wenig Anwendung.

Solokonstruktion: Hierbei handelt es sich um Konstruktionen, deren Eigenschaften vom Vergussmaterial bestimmt werden. Es werden lediglich lokal Einbauteile verwendet, wenn spezielle

Anforderungen an die Festigkeit oder Nachbearbeitung gestellt sind. Einbauteile werden zum Beispiel für Bereiche mit Gewinde, Führungs- und Verankerungsschienen verwendet. Im Wesentlichen handelt es sich im Maschinenbau bei eingesetzten Solokonstruktionen aus hydraulisch gebundenem Beton um Maschinenfundamente bzw. -betten sowie Maschinengehäuse.

Für die Verwendung von Gussmaterialien stellt die Solokonstruktion das technologische Ziel dar, da somit die wirtschaftlichste Lösung bereitsteht und der Raum für neue Maschinenenkonzepte eröffnet wird, vgl. Neumann [85]. Dabei gibt es eine Vielzahl von Faktoren, die über einen erfolgreichen Einsatz eines Werkstoffs entscheiden. Dazu zählen unter anderem die Festigkeit, das zeitabhängige und zeitunabhängige Verformungsverhalten, die Oberflächenbeschaffenheit, die Maßhaltigkeit und die Herstellungsdauer.

Ein neues Anwendungsgebiet für hydraulisch gebundene Hochleistungsbetone, auf dem bisher konventionell Stahl oder Legierungen eingesetzt werden, sind z. B. Werkzeugmatrizen, wie sie bei der Blechumformung verwendet werden (Abbildung 1.2). Für einen erfolgreichen Einsatz ist vor allem die Festigkeit des Materials ausschlaggebend, da ohne ausreichende Festigkeit weitere Aspekte nicht untersucht werden brauchen, vgl. Rohs & Kuhn [101]. Umformwerkzeuge aus (ultra-)hochfestem Beton konnten u. a. von Schwartzentruber et al. [115] beim koventionellen Tiefziehen und von Kleiner et al. [50] bzw. Ritter et al. [97] bei der wirkmedienbasierten Hochdruckblechumformung erfolgreich eingesetzt werden.



a) Werkzeug mit Napfgeometrie mit Nebenformelement

b) Großformatiges Werkzeug mit Wannengeometrie

Abbildung 1.2: Umformwerkzeuge aus ultrahochfestem Beton [1]

Zur Beurteilung und Abschätzung der Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen eines Materials in einer Solokonstruktion ist es daher unerlässlich, sein Verformungsverhalten unter beliebigen Beanspruchungen beschreiben zu können. Denn je genauer das Materialverhalten bekannt ist und abgebildet werden kann, desto effizienter lässt sich ein Werkstoff einsetzen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, das Materialverhalten eines ultrahochfesten Betons mit einer einaxialen Druckfestigkeit von über $170\,\mathrm{N/mm^2}$ unter mehraxialer Beanspruchung zu beschreiben. Es sollen Berechnungsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden, mit deren Hilfe die Vorhersagequalität von Simulationsprozessen verbessert werden kann. Infolgedessen soll eine objektivere Abschätzung der grundsätzlichen Einsatzmöglichkeit des untersuchten Betons und ggf. eine Optimierung der Geometrien von Konstruktionen hinsichtlich der Beanspruchung mittels der Finiten-Elemente-Methode möglich sein.

Zur Untersuchung des Materialverhaltens des verwendeten Betons werden mehraxiale Belastungsversuche durchgeführt und die Spannungs-Dehnungs-Linien aufgezeichnet. Da die maximale Belastung von Beton unter mehraxialer Druckbeanspruchung wesentlich höher ist als unter mehraxialer Zugbeanspruchung, wird bei den durchgeführten experimentellen Untersuchungen hauptsächlich der Übergangsbereich zwischen einer reinen mehraxialen Druck- und einer reinen mehraxialen Zugbeanspruchung betrachtet. Hierbei wird angenommen, dass nicht in allen Bereichen einer Konstruktion mehraxiale Druckspannungszustände zu realisieren sind und die zum Versagen führende Beanspruchung unter dem Auftreten von wenigstens einer Zugkomponente erfolgt. Insgesamt werden 35 Spannungsverhältnisse mit überwiegend einer Zug- und zwei Druckbeanspruchungskomponenten getestet und die Versuchsergebnisse hinsichtlich charakteristischer Punkte im Verformungsverhalten ausgewertet.

Für die aus den Versuchen resultierenden Spannungen an der Elastizitätsgrenze, der Affinitätsgrenze, beim Volumenminimum der Probekörper und aus der maximalen Festigkeit werden Grenzflächen abgeleitet, die es erlauben, für jedes beliebige Spannungsverhältnis den zugehörigen Spannungswert zu ermitteln.

Für die maximale Festigkeit wird zusätzlich ein umfangreicher Datensatz aus mehraxialen Belastungsversuchen aller Betonfestigkeitsklassen aus der Literatur zusammengestellt und hinsichtlich einer mathematischen Beschreibung in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit ausgewertet.

Neben charakteristischen Spannungswerten ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von wesentlichem Interesse. Ausgehend von einem isotropen Material mit einem anfänglich linearen Verformungsverhalten wird auf der Basis einer Schädigungsevolution in Abhängigkeit der Beanspruchung ein nichtlineares Verformungsverhalten beschrieben. Hierbei wird zum einen von einer isotropen und zum anderen von einer orthotropen Schädigung in den jeweiligen Belastungsrichtungen ausgegangen.

Mit der mathematischen Beschreibung der mehraxialen Spannungswerte sowie des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens des untersuchten ultrahochfesten Betons soll das Materialverhalten realitätsnah abgebildet werden. Durch die Anwendung der aufgestellten Gesetzmäßigkeiten besteht somit die Möglichkeit einer präzisen Simulation des Materials, was eine Abschätzung von Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten sowie eine Optimierung von Konstruktionen erlaubt. Der untersuchte ultrahochfeste Beton kann daher eine Alternative zu Metallen bieten.

2 Stand des Wissens

Die Erforschung des Materialverhaltens von Beton unter mehraxialer Beanspruchung war bereits Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen. Somit ist ein umfangreiches Wissen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten sowie zur Durchführung von mehraxialen Belastungsversuchen vorhanden, aus dem im Folgenden nur auf die Aspekte näher eingegangen wird, die einen unmittelbaren Bezug zu den in dieser Arbeit behandelten Themen aufweisen.

2.1 Materialverhalten von Beton

2.1.1 Schädigungsphasen von Beton

Die Beschreibung des Materialverhaltens von Beton kann in verschiedenen Ebenen der Materialstruktur erfolgen. Diese sind nach Wittmann [128] die Mikro-, die Meso- und die Makroebene, wobei die Größe der betrachteten Strukturelemente von Mikrometern über Millimeter bis zu Dezimetern reicht (Abbildung 2.1). Mit der Abnahme der Größe der einzelnen Elemente und somit mit der Zunahme an betrachteten Elementen erhöht sich die Komplexität der gegenseitigen Wechselbeziehungen bzw. Abhängigkeiten überproportional, wobei Auswirkungen einzelner Einflüsse genauer identifizierbar sind.

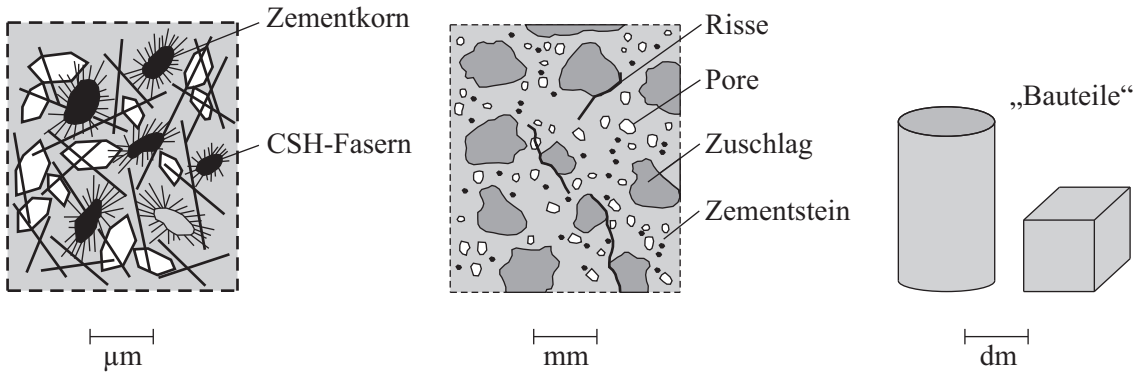


Abbildung 2.1: Betrachtungsebenen der Materialstruktur von Beton nach Zilch & Zehetmaier [129]

In experimentellen Untersuchungen wird das Materialverhalten von Beton vorrangig auf der Meso- oder der Makroebene untersucht. Dies liegt zum einen daran, dass die Anwendung von Gesetzmäßigkeiten hauptsächlich auf Strukturelemente der Makroebene erfolgt und zum anderen, dass mit vertretbarem Aufwand zuverlässige Messwerte erhalten werden.

Während auf der Makroebene alle einzelnen Bestandteile des Betons in einem Element verschmelzen und von diesem repräsentiert werden, wird auf der Mesoebene Beton als Mehrphasensystem betrachtet. Im einfachsten Fall wird von einem 2-Phasen-System ausgegangen, bei dem die Zuschlagskörner und der Zementstein unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

In experimentellen Untersuchungen konnte u. a. von Cordon & Gillespie [16], Gilkey [34], Robinson [99] sowie Vile & Sigvaldason [124] gezeigt werden, wie sich das Last-Verformungs-Ver-

halten und die Festigkeit bei einem einaxialen Belastungsversuch in Abhängigkeit vom Zuschlagsvolumen und vom Wasser-Zement-Wert (w/z-Wert) ändern. Mit der Zunahme des w/z-Wertes verringerte sich die Steifigkeit des Betons, während sich bei gleich bleibendem w/z-Wert die Steifigkeit mit der Zunahme des Anteils an Zuschlagsvolumen erhöhte. Ausschlaggebend hierfür ist die Änderung der Verbundfestigkeit zwischen den Zuschlagskörnern und der Zementsteinmatrix, die die Zuschläge miteinander verkittet.

Hsu & Slate [40] bestätigten in ihren Versuchen den Einfluss des w/z-Wertes auf die Verbundfestigkeit zwischen den Zuschlägen und dem Zementstein. Weiter konnten Darwin & Slate [20] zeigen, dass auch die Beschaffenheit der Zuschlagoberfläche einen Einfluss auf das Materialverhalten ausübt. Ein Grund hierfür kann die von Pope & Jennings [93] nachgewiesene, variierende Porosität der Grenzschicht zwischen den Zuschlagskörnern und dem Zementstein sein, die sowohl von der Betonzusammensetzung als auch vom Betonalter abhängt.

Infolge der Betonzusammensetzung stellen sich somit speziell in der Grenzschicht zwischen Zuschlag und Zementstein divergente Eigenschaften ein, die einen Einfluss auf das Materialverhalten haben. Bei der Beschreibung von Beton auf der Mesoebene finden daher vielfach die Eigenschaften der Grenzschicht auf der Basis des 3-Phasen-Systems Zuschlag-Zementstein-Grenzschicht Eingang in die Betrachtung.

Durch die Identifizierung von verschiedenen Stufen einer ablaufenden Mikrorissbildung im Beton unter zunehmender Beanspruchung wird von den in der Mesoebene sichtbaren Vorgängen auf charakteristische Punkte im Materialverhalten bei dessen Beschreibung auf der Makroebene geschlussfolgert. Als Mikrorisse werden dabei lokal auftretende, sehr kleine Risse bezeichnet, die im Einzelnen zu keinem Versagen des Betons führen (Abbildung 2.2).

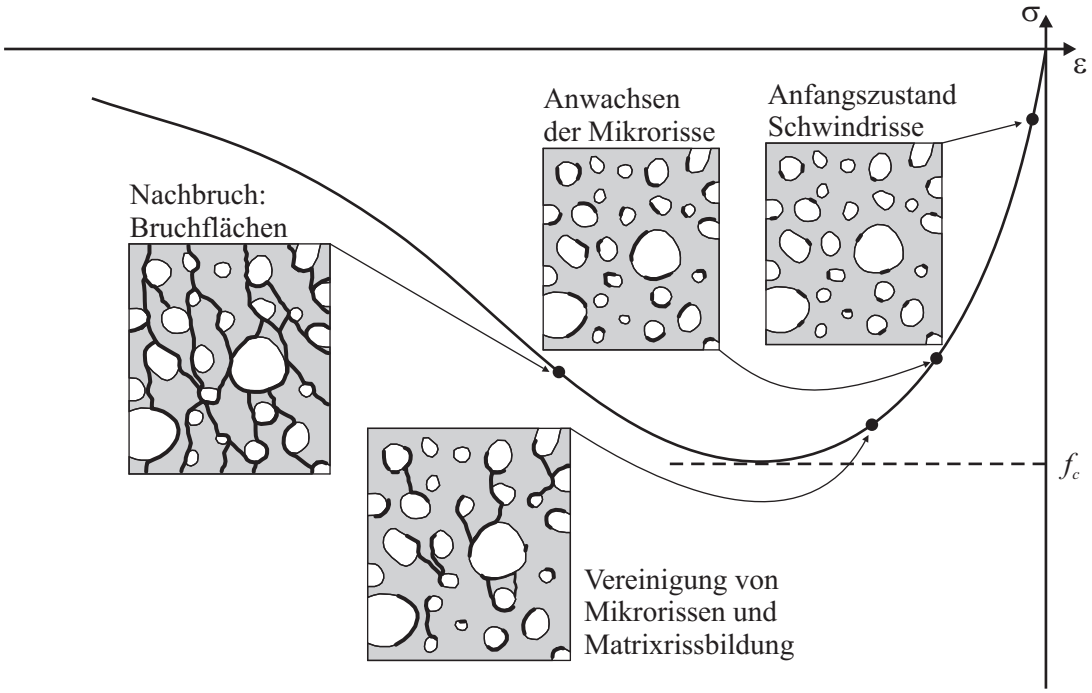


Abbildung 2.2: Mikrorissbildung in Normalbeton nach Pölling [92]

Prinzipiell werden bei der Mikrorissbildung zwei übergeordnete Hauptphasen unterschieden. In der ersten Phase des stabilen Risswachstums führen die Rissbildung und das Risswachstum bestehender Risse zu einer Gefügeauflockerung in der Materialmatrix. Beide Prozesse kommen jedoch zeitunabhängig zu einem Stillstand, wodurch die Schädigung des Gefüges begrenzt ist. In der zweiten Phase des instabilen Risswachstums hingegen ist die Schädigung des Betongefüges zeitabhängig. Das En-

de dieser Phase ist durch eine makroskopische Gefügezerstörung definiert, was gleichbedeutend mit dem Materialversagen ist. Somit ist in der zweiten Phase das Risswachstum unter einer konstant gehaltenen Last progressiv und führt unweigerlich zum Erreichen der maximalen Beanspruchung f_c unter einer äußeren Belastung. Die Grenze zwischen diesen beiden Phasen definieren u. a. Glücklich [35] und Rüsch [106] als die dauerhafte Festigkeit des Betons (Dauerstandsfestigkeit).

Eine Einteilung der Phase des stabilen Risswachstums in weitere Bereiche wird anhand der Veränderungen im Gefüge bzw. des Fortschritts der Mikrorissbildung vorgenommen. Die Grenzen der einzelnen Teilbereiche werden durch charakteristische Punkte bzw. parametrisierte Grenzwerte festgelegt, die sich im Allgemeinen direkt oder indirekt aus gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien bestimmen lassen. Die in Abbildung 2.3 von Glücklich [35] angegebenen Grenzen gelten prinzipiell für Normalbetone. Sie sind dabei jedoch nicht als starr anzusehen, da sie auch bei Betonen gleicher Festigkeit mit unterschiedlicher Zusammensetzung variieren können. Die Phase des stabilen Risswachstums kann gemäß Glücklich in die nachfolgend aufgeführten drei Bereiche unterteilt werden:

Bereich 1 – Langsames Wachsen von vernachlässigbaren lokalen Verbundrissen zwischen Zuschlag und Zementsteinmatrix, die vor Belastungsbeginn im Beton entstanden;
Bereich 2 – Langsames Wachsen der Verbundrisse und Entstehung von Matrixrissen durch den Zusammenschluss von lokalen Verbundrissen;
Bereich 3 – Langsames Wachsen der Matrixrisse und infolgedessen beginnende Gefügezerstörung.

Die Verbund- bzw. Mikrorisse treten hierbei in der Grenzschicht zwischen der Zementsteinmatrix und den Zuschlagskörnern auf. Wachsen die Verbundrisse in den Zementstein und verbinden sich mit weiteren lokalen Verbundrissen, werden die entstehenden „Risspfade“ als Matrixrisse oder Gefügerisse bezeichnet.

Bei Betonen mit sehr hohen Festigkeiten konnten Bornemann et al. [7] feststellen, dass die sich bildenden Matrixrisse sowohl durch den Zementstein als auch durch die Zuschlagskörner wachsen und diese somit zerstören. Daher ist davon auszugehen, dass bei hochfesten bzw. ultrahochfesten Betonen die Grenzen der Schädigungsphasen und speziell die Grenze zwischen dem stabilen und instabilen Risswachstum stärker von der Beschaffenheit der Zuschläge abhängt als bei Normalbeton.

In mikroskopischen Untersuchungen an Betonproben ermittelten Hsu et al. [41] und Liu et al. [73] die Länge und die Lage von Mikrorissen bei definierten Laststufen in Bezug auf die maximale Festigkeit des Betons. Ihre Ergebnisse zeigen die Abhängigkeit des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Beton von der Mikrorissbildung bzw. der Gefügeschädigung und könnten Grundlage für die von Glücklich [35] vorgeschlagene Einteilung sein.

Entgegen der Festlegung von Glücklich gibt es Forscher, die die Bereiche 1 und 2 zusammenfassen. Berg [6] definierte lediglich zwei charakteristische Punkte, die das Ende von Bereich 2 und 3 nach Glücklich beschreiben, worauf im Abschnitt 2.1.2.2 näher eingegangen wird.

Die Phase des instabilen Risswachstums wird im Allgemeinen nicht weiter untergliedert. Hinsichtlich des Verformungsverhaltens von Beton unter mehraxialer Beanspruchung könnte es jedoch sinnvoll sein, diese Phase in einen Bereich vor dem Erreichen der maximalen Festigkeit und einen Bereich nach dem Erreichen der maximalen Festigkeit, dem Nachbruchbereich, zu unterteilen. Dies erscheint zweckmäßig, da vermutet werden kann, dass am Punkt der maximalen Festigkeit ebenfalls charakteristische Änderungen im Materialverhalten auftreten.

Detaillierte Untersuchungen zu den einzelnen Phasen der Rissbildung und zu charakteristischen Punkten im Materialverhalten bei mehraxialen Belastungsversuchen sind in der Literatur nur we-

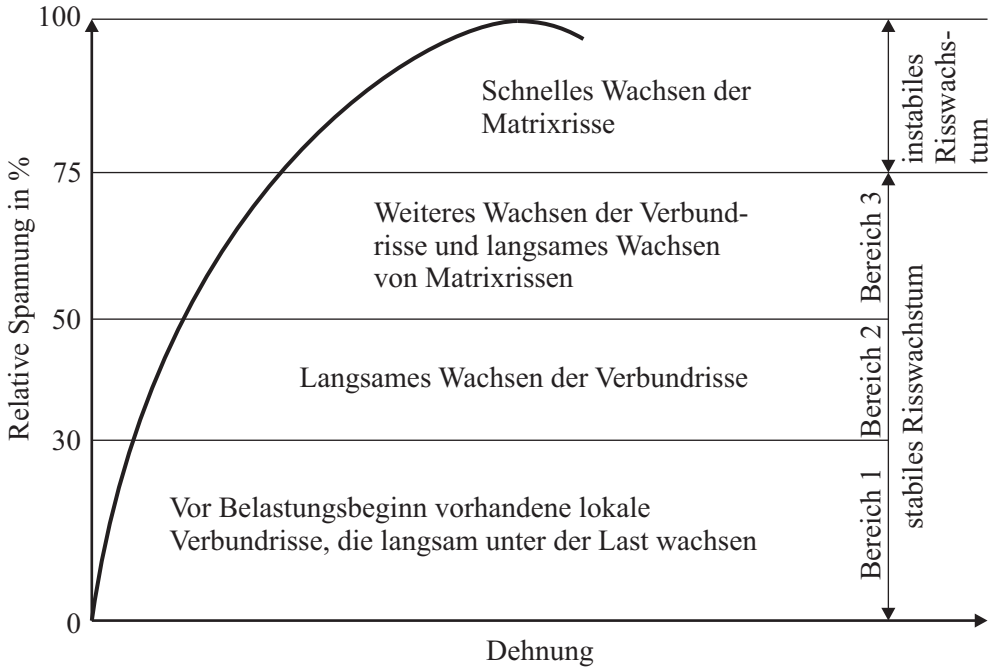


Abbildung 2.3: Bereiche unterschiedlicher Schädigungsphasen des Betongefüges nach Glücklich [35]

nige zu finden. Hauptsächlich handelt es sich bei den erforschten Spannungsverhältnissen um zwei- bzw. dreiaxiale Druckspannungszustände. Lediglich Kupfer [57] führte eine Auswertung von zweiaxialen Belastungsversuchen mit wenigstens einer Zugkomponente hinsichtlich der Schädigungsphasen durch. Für dreiaxiale Spannungszustände mit wenigstens einer Zugkomponente fehlen Angaben zu den Übergängen der einzelnen Phasen gänzlich. Auffällig ist, dass zahlreiche Versuche durchgeführt wurden, deren Auswertung lediglich hinsichtlich der maximalen Festigkeit erfolgte. Dies scheint ein Indiz dafür zu sein, dass eine exakte Dehnungsmessung und somit die Auswertung charakteristischer Punkte im Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Materials nicht ohne weiteres möglich ist.

Die Klassifizierung und Einteilung der Phasen der Gefügeschädigung von Beton infolge einer äußeren Einwirkung beruht daher hauptsächlich auf Untersuchungen an einaxialen Druckversuchen. Krishnaswamy [55] konnte jedoch zeigen, dass auch bei dreiaxialen Druckversuchen wesentliche charakteristische Vorgänge analog zur einaxialen Beanspruchung ablaufen. Für einaxiale Zugbeanspruchungen stellte Galan [32] ebenfalls die gleichen Schädigungsphasen wie bei einaxialen Druckbeanspruchungen fest, wobei der Beginn des instabilen Risswachstums mit dem Versagen des Betons zusammenfiel.

Keine Aussagen zum Auftreten der Schädigungsphasen lassen sich für Beton unter mehraxialer Beanspruchung mit wenigstens einer Zugkomponente finden. Da jedoch unter mehraxialer Druck- und unter einaxialer Zugbeanspruchung die charakteristischen Schädigungsphasen gemäß Abschnitt 2.1.2.2 und 2.1.2.3 ablaufen, wird davon ausgegangen, dass auch unter mehraxialer Beanspruchung mit wenigstens einer Zugkomponente die gleichen Vorgänge im Beton auftreten.

Bevor die Phasen der Gefügeschädigung infolge einer äußeren Belastung durchlaufen werden, existieren bereits lokale Verbundrisse zwischen Zuschlag und Zementstein. Diese entstehen durch auftretende Eigenspannungen während der Erhärtung und der Nachbehandlung des Betons, vgl. Glücklich [35]. Nach Glücklich zeigt sich das Vorhandensein von lokalen Verbundrissen vor der Erstbelastung ebenfalls zu Belastungsbeginn im Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Hierbei weisen die Kurven zu Belastungsbeginn einen nichtlinearen Verlauf auf, dessen Anstieg kleiner als

der des sich anschließenden linearen Bereichs ist, zu dem unter steigender Belastung ein Übergang stattfindet. Demgegenüber ist der Kurvenverlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie eines Betons ohne vorherige Verbundrisse bereits von Beginn an linear. Glücklich ist der Auffassung, dass diese Risse die maximale Festigkeit des Betons nicht beeinflussen, sich jedoch auf die Spannungs-Dehnungs-Linie auswirken. Bei Betonen mit vielen bestehenden lokalen Verbundrissen vor der Erstbelastung ist ein frühzeitiges Abweichen der Spannungs-Dehnungs-Linie vom ihrem linearen Verlauf zu beobachten, was ebenfalls zu einer höheren Dehnung bei der maximalen Festigkeit führt.

2.1.2 Grenzen der Schädigungsphasen und charakteristische Punkte im Materialverhalten

Zur Ermittlung der Grenzen der einzelnen Phasen im Schädigungsprozess des Betongefüges wurden bisher die Versuchsergebnisse im Wesentlichen auf zwei Arten dargestellt. Dies ist zum einen die von Brandtzaeg [8] eingeführte Darstellung der absolut größten Hauptspannung über die (bezogene) Volumenänderung[1] und zum anderen die von Newman [89] verwendete Darstellung der absolut größten Hauptdehnung über die (bezogene) Volumenänderung. Weitere in der Literatur verwendete Darstellungen, die sich aus den experimentellen Daten ableiten lassen, wie z. B. die Differentialkurve der Volumenänderung[2] über die absolut größte Normalspannung, werden ebenfalls genutzt, um charakteristische Punkte im Materialverhalten deutlicher herauszustellen, vgl. z. B. Kupfer [57]. Faktisch werden damit im Allgemeinen jedoch die gleichen Merkmale wie bei der Darstellung von Brandtzaeg bzw. Newman betrachtet.

Die zur Ermittlung der Schädigungsgrenzen verwendeten Versuchsdaten beschränken sich somit auf den Verlauf der Hauptdehnungen und Hauptspannungen, so dass diese bekannt sein müssen, um charakteristische Punkte im Materialverhalten bestimmen zu können. Die so ermittelten Punkte stehen dabei nach Schickert [109] in Übereinstimmung mit charakteristischen Erscheinungen, die sich beispielsweise bei den Ultraschallmessungen von Berg [6] ergaben, worauf im Folgenden noch näher eingegangen wird.

2.1.2.1 Phase der Entstehung vernachlässigbarer lokaler Verbundrisse und Elastizitätsgrenze

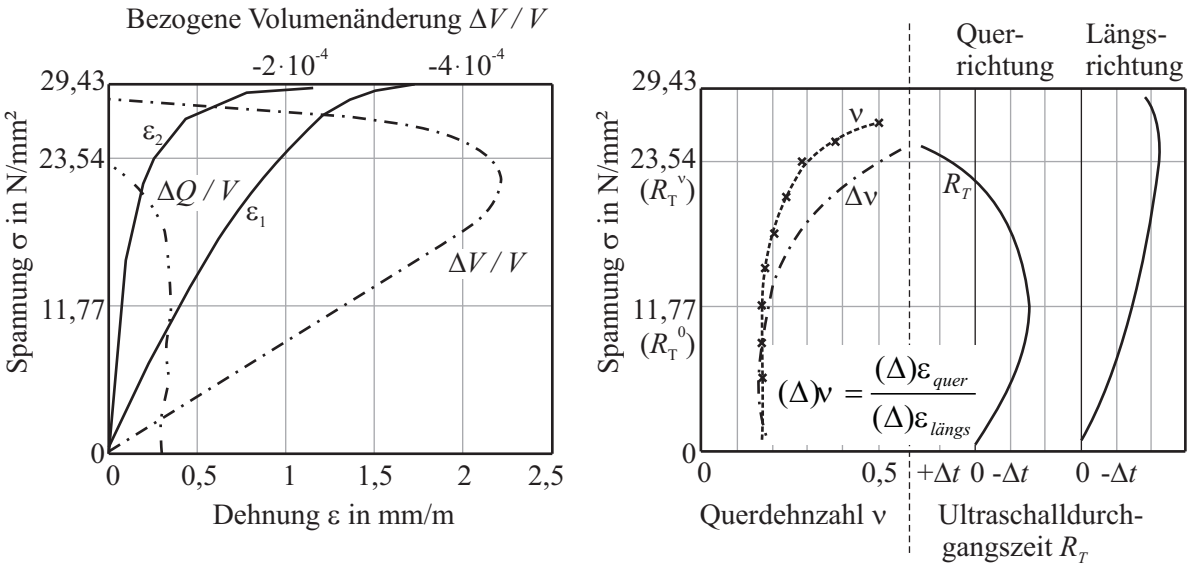
Entgegen der Interpretation und Berücksichtigung des nichtlinearen Verformungsverhaltens des Betons zu Belastungsbeginn mit anschließender linearer Verformung von Glücklich [35] wird dieser Effekt z. B. von Eibl & Iványi [28] und Hsu et al. [41] vernachlässigt, da nach ihrer Meinung bereits vorhandene Verbundrisse vor Belastungsbeginn keinen Einfluss auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten haben. Van Mier [123], der wie Glücklich ein nichtlineares Verformungsverhalten zu Belastungsbeginn beobachtet, führt dieses auf die Randbedingungen der Versuchsdurchführung zurück, weshalb er bei der Versuchsauswertung eine Korrektur der Spannungs-Dehnungs-Linien vornimmt, worauf im Abschnitt 2.2.3 näher eingegangen wird.

Unabhängig von der Behandlung des nichtlinearen Verformungsverhaltens zu Belastungsbeginn wird davon ausgegangen, dass im anschließenden Bereich mit linearer Verformung die Mikrorissentwicklung im Beton nur vereinzelt auftritt. Dabei entstehen lokale Verbundrisse in der Grenzschicht zwischen den Zuschlägen und der Zementsteinmatrix bzw. nehmen in geringem Maße zu. Somit sind in diesem ersten Bereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehung die Materialkenngrößen Elastizitätsmodul E und Querdehnzahl ν konstant und das Materialverhalten wird als linear-elastisch beschrieben. Das Ende dieser Phase – die Elastizitätsgrenze bzw. die Proportionalitätsgrenze – benennt Berg [6] auch als „ersten parametrischen Punkt“ des Verformungsverhaltens von Beton.

[1] Bezogene Volumenänderung: $\Delta V/V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$

[2] Bezogene differentielle Volumenänderung: $\Delta Q/V = (\varepsilon_{1,i} - \varepsilon_{1,i-1}) + (\varepsilon_{2,i} - \varepsilon_{2,i-1}) + (\varepsilon_{3,i} - \varepsilon_{3,i-1})$

Berg leitete diesen aus seinen Messungen der Ultraschalldurchgangszeit R_T ab, die an Betonwürfeln unter mehraxialer Belastung durchgeführt wurden. Beim Erreichen der Elastizitätsgrenze war die Ultraschalldurchgangszeit in Querrichtung minimal, da das Material hier die höchste Dichte in Querrichtung besitzt. Lockert sich das Gefüge anschließend auf, nimmt die Querdehnzahl ν zu, die Ultraschalldurchgangszeit R_T steigt an und die differentielle Volumenabnahme ΔQ verringert sich (Abbildung 2.4).



a) Volumenänderung b) Querdehnzahl und Ultraschalldurchgangszeit

Abbildung 2.4: Änderungen des Volumens ΔV, der Querdehnzahl ν und der Ultraschalldurchgangszeit R_T eines Betonwürfels unter mehraxialer Belastung nach Berg [6]

Wird die Volumenänderung ΔV über die absolut größte Normalspannung aufgetragen, endet an der Grenze zwischen den Schädigungsphasen 1 und 2 der lineare Verlauf dieser Kurve (Abbildung 2.4). Die Ermittlung des Punktes, an dem eine Versuchskurve von ihrem quasi-linearen Verlauf abweicht, ist jedoch subjektiv, da es keine einheitliche Definition hierzu gibt. Newman [88] gab als Grenze für den linear-elastischen Bereich eine 2%ige Abweichung zwischen einer Regressionsgeraden und den Messergebnissen an, wobei dieser Wert auch von anderen Forschern wie z. B. Tasuji [119] verwendet wurde. Kaplan [46] hingegen gebraucht eine wesentlich kleinere Abweichung von 2 µm/m zwischen den beiden Kurven als Grenzkriterium (Abbildung 2.5). Diese Abweichung scheint jedoch als ungeeignet, wenn man das Messrauschen der Messmittel und die generelle Unsicherheit bei der Dehnungsermittlung berücksichtigt. Andere Forscher, wie z. B. Kupfer [57], die sich ebenfalls mit der Bestimmung der Elastizitätsgrenze beschäftigten, ermittelten diese, ohne jedoch das angewendete Bestimmungskriterium zu nennen, wodurch die Bewertung und Einordnung der Ergebnisse erschwert wird.

Neben einem Kriterium zur Bestimmung der Abweichung der Versuchskurve von ihrem theoretischen linearen Verlauf, muss auch für die Bestimmung des theoretischen linearen Verlaufs mittels einer Regressionsgeraden eine objektive Vorgehensweise festgelegt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, welcher Bereich und welche Punkte der Versuchskurve für die Regression verwendet werden sollen. Für die Festlegung des Bereichs zur Bestimmung der Regressionsgeraden werden in der Literatur keine Angaben gemacht. Lediglich in den derzeit gültigen Normen wird für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls ein unterer und oberer Punkt im linearen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Linie angegeben. Der untere Punkt liegt bei einer Belastung von nahezu Null und der obere Punkt bei 30% bis 40% der einaxialen Bruchfestigkeit des betrachteten Betons, vgl. ASTM 2008 [4] und

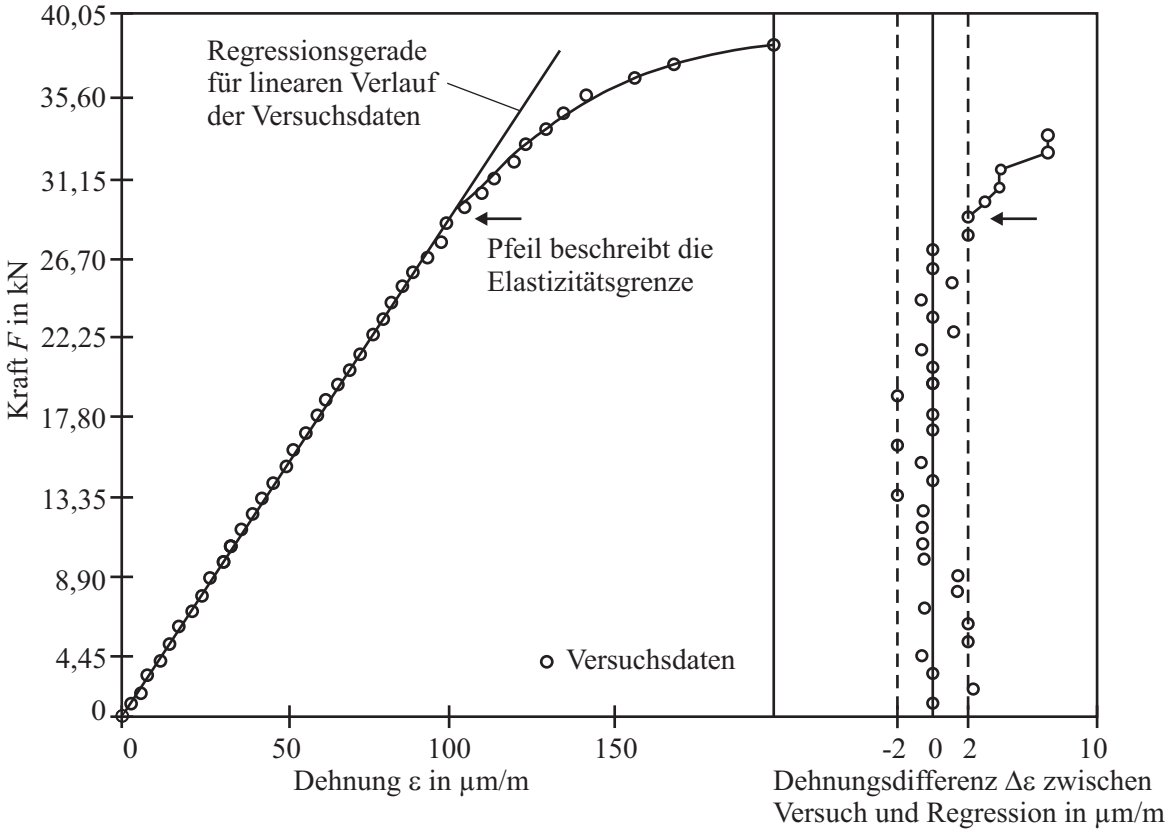


Abbildung 2.5: Bestimmung der Elastizitätsgrenze aus der Abweichung der Spannungs-Dehnungs-Linie vom linearen Verlauf nach Kaplan [46]

DIN 1048-5 [25]. Hierbei wird für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls jedoch keine Regression durchgeführt, sondern dieser an einer Sekante der Spannungs-Dehnungs-Linie bestimmt.

Bei mehraxialen Belastungsversuchen ergibt sich dabei das Problem, dass nicht geklärt ist, ob sich die oberen Punkte zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls auf die einaxiale oder mehraxiale Bruchfestigkeit beziehen. Zum einen ist es beispielsweise möglich, dass bei Druck-Druck-Zug-Beanspruchungen eine Festigkeit von 30% der einaxialen Druckfestigkeit nicht erreicht wird und somit die Bruchfestigkeit des untersuchten Spannungsverhältnisses herangezogen werden muss. Zum anderen können sich unter dreiaxialer Druckbeanspruchung die Festigkeiten derart steigern, dass bei 30% der Bruchfestigkeit des mehraxialen Versuchs der lineare Bereich der Materialverformung bereits überschritten wird und somit der Grenzwert des einaxialen Versuchs maßgebend wäre.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Bestimmung des Bereichs mit linearem Materialverhalten (Elastizitätsgrenze) bei mehraxialen Belastungsversuchen von vielen Faktoren abhängt, die zum Teil nur schwer unter rein objektiver Betrachtung ermittelbar sind. Infolgedessen ist ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Forscher nur eingeschränkt möglich, insbesondere dann, wenn die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Elastizitätsgrenze nicht eindeutig geklärt werden konnte.

2.1.2.2 Phase des stabilen Risswachstums

Die Phase des stabilen Risswachstums ist durch den Beginn eines progressiv nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens gekennzeichnet. Wird die Belastung innerhalb dieser Phase konstant gehalten, kommt das Anwachsen der Risse zu einem Stillstand und das Material kann dieser Belastung dauerhaft standhalten. Die Spannung am Ende dieses Bereiches wurde daher von Kotsovos & Newman [53] auch als kritische Spannung bezeichnet und von Berg [6], Dhir & Sang-

ha [22], Glücklich [35], Kupfer [57] und Rüsch [106] als die Dauerstandsfestigkeitsgrenze des Betons angesehen. Wird die Volumenänderung über die absolut größte Hauptspannung aufgetragen, kann die kritische Spannung, wie auch die Elastizitätsgrenze, aus dem Verlauf dieser Kurve ermittelt werden. Dabei wird angenommen, dass hier das Material ein Volumenminimum aufweist und somit der Anstieg der Kurve unendlich ist (Abbildung 2.4).

Dieser von Berg [6] auch als „zweiter parametrischer Punkt“ benannte Punkt fiel bei dessen Untersuchungen neben dem minimalen Volumen der Probe, auch mit der kürzesten Ultraschalldurchgangszeit in Hauptbelastungsrichtung und einer inkrementell bestimmten Querdehnzahl $\Delta\nu = 0{,}5$ zusammen. Die inkrementell bestimmte Querdehnzahl errechnet Berg dabei aus den auftretenden Dehnungsänderungen bei einer Lastniveauänderung als Quotient der Quer- und Längsdehnung und entspricht somit nicht der in der Mechanik verwendeten Querdehnzahl (Abbildung 2.4).

Dhir & Sangha [22] definierten die Grenze des stabilen Risswachstums ebenfalls mit einer Überschreitung der inkrementell bestimmten Querdehnzahl von 0,5. Sie wiesen jedoch ausdrücklich darauf hin, dass die Laststeigerung zur Bestimmung der inkrementellen Querdehnzahländerung erst erfolgen darf, wenn die wesentlichen Kriechverformungen abgeklungen sind. Im Gegensatz zu Berg kamen sie zu dem Schluss, dass der Beginn der Aufweitung des Probekörpers, also das Überschreiten des minimalen Volumens der Probe, vor dem Erreichen der inkrementell bestimmten Querdehnzahl von $\Delta\nu = 0{,}5$ erfolgt und somit die Grenze der Dauerstandsfestigkeit höher liegt als der Beginn der Gefügelockerung beim Volumenminimum (Abbildung 2.6).

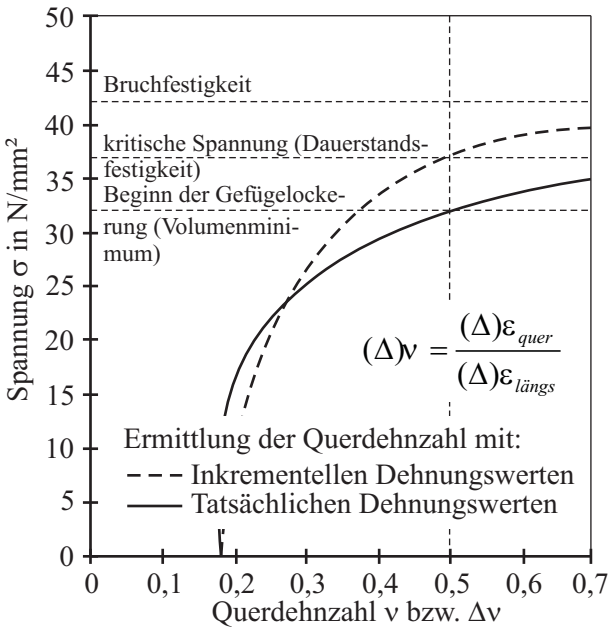


Abbildung 2.6: Beginn der Gefügeauflockerung und kritische Spannung nach Dhir & Sangha [22]

Kupfer [57] bestimmte wie Berg die Grenze der Dauerstandsfestigkeit anhand des minimalen Probekörpervolumens. Neben der Dauerstandsfestigkeitsgrenze benannte Kupfer die Affinitätsgrenze als einen weiteren charakteristischen Punkt im Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Beton innerhalb der Phase des stabilen Risswachstums. Die Affinitätsgrenze stellte für ihn die Ermüdungsfestigkeitsgrenze dar, die weit oberhalb der Elastizitätsgrenze liegt und durch das Verlassen des linearen Verlaufs der Kurve der absolut größten Hauptdehnung aufgetragen über die Volumenänderung gekennzeichnet ist (Abbildung 2.7).

Kupfer ging davon aus, dass sich aus der ablaufenden Mikrorissbildung auch auf den Bruch schließen lässt, weshalb er die ermittelten Spannungen an der Affinitätsgrenze und Dauerstandsfestig-

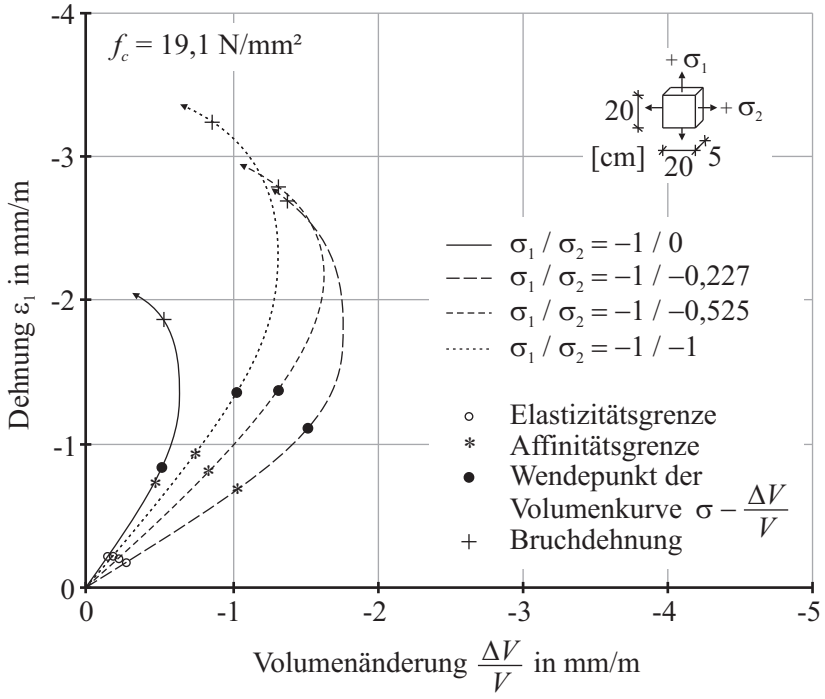


Abbildung 2.7: Charakteristische Punkte im Materialverhalten nach Kupfer [57]

keitsgrenze auf die Bruchspannungswerte bezieht. Es ergaben sich nahezu konstante Quotienten innerhalb einer Betonserie, wodurch seine Vermutungen gestützt wurden. Er wies darauf hin, dass die charakteristischen Punkte im Materialverhalten von der Zusammensetzung der Betonmatrix abhängig sind und dieser Einfluss in der Größe der ermittelten Quotienten der einzelnen von ihm untersuchten Betonserien sichtbar wird. Ob die Überlegungen Kupfer's für den gesamten Spannungsraum gelten, konnte bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht nachgewiesen werden. Es scheint ebenfalls möglich, dass die Ergebnisse auch auf den kleinen untersuchten Bereich des Spannungsraumes, d. h. auf die dicht beieinander liegenden Versuchsergebnisse zurückzuführen sind.

Die von Kupfer verwendete Darstellung, bei der die Volumenänderung über die absolut größte Hauptdehnung aufgetragen wird, wurde von Newman [89] angedacht. Newman bestimmte eine Diskontinuitätsgrenze, die durch die Abweichung dieser Kurve vom ihrem linearen Verlauf gekennzeichnet ist und somit Kupfers Affinitätsgrenze entspricht. Für Newman [87] symbolisierte die Diskontinuitätsgrenze den Übergang des Materials vom Kontinuum in eine Struktur aus Einzelkörnern. Da das Material auch Beanspruchungen oberhalb dieser Grenze widersteht, schlägt er eine Unterscheidung in eine untere und eine obere Beanspruchungsgrenze für Beton vor. In einer früheren Arbeit verglich Newman [86] die Diskontinuitätsgrenze mit der Fließgrenze von Stahl, der an dieser Stelle sein Materialverhalten signifikant ändert.

Launay & Gachon [62, 63] bezeichneten die Diskontinuitätsgrenze auch als den „Point of Dislocation" bzw. als „Crack Initiation". Für sie definiert diese Grenze den Punkt im Festigkeitsverhalten, an dem eine mehraxiale Vorbelastung zu einer Abminderung der einaxialen Festigkeit führt. Für sie ist dieser Punkt durch einen Krümmungswechsel von der ersten zur zweiten Krümmung der Spannungs-Dehnungs-Linie der dritten Hauptrichtung gekennzeichnet. Bei den von ihnen durchgeführten mehraxialen Versuchen nimmt das Verhältnis zwischen der Spannung an der Diskontinuitätsgrenze und der maximalen Festigkeit überproportional ab. Daher kommen sie zu dem Ergebnis, dass mit Zunahme des hydrostatischen Druckspannungsanteils der Beanspruchung[3] für jedes Spannungsver-

[3] Der hydrostatische Spannungsanteil einer mehraxialen Beanspruchung berechnet sich als Mittelwert aus den auftretenden Hauptspannungen

hältnis eine Diskontinuitätsgrenze existiert, was im Gegensatz dazu für die maximale Festigkeit experimentell noch nicht eindeutig geklärt ist. Die von Launay & Gachon ermittelten charakteristischen Grenzen im Materialverhalten sind in Abbildung 2.8 gezeigt, wobei hinsichtlich der Erläuterung der Darstellung auf Abschnitt 3.6.1 verwiesen wird.

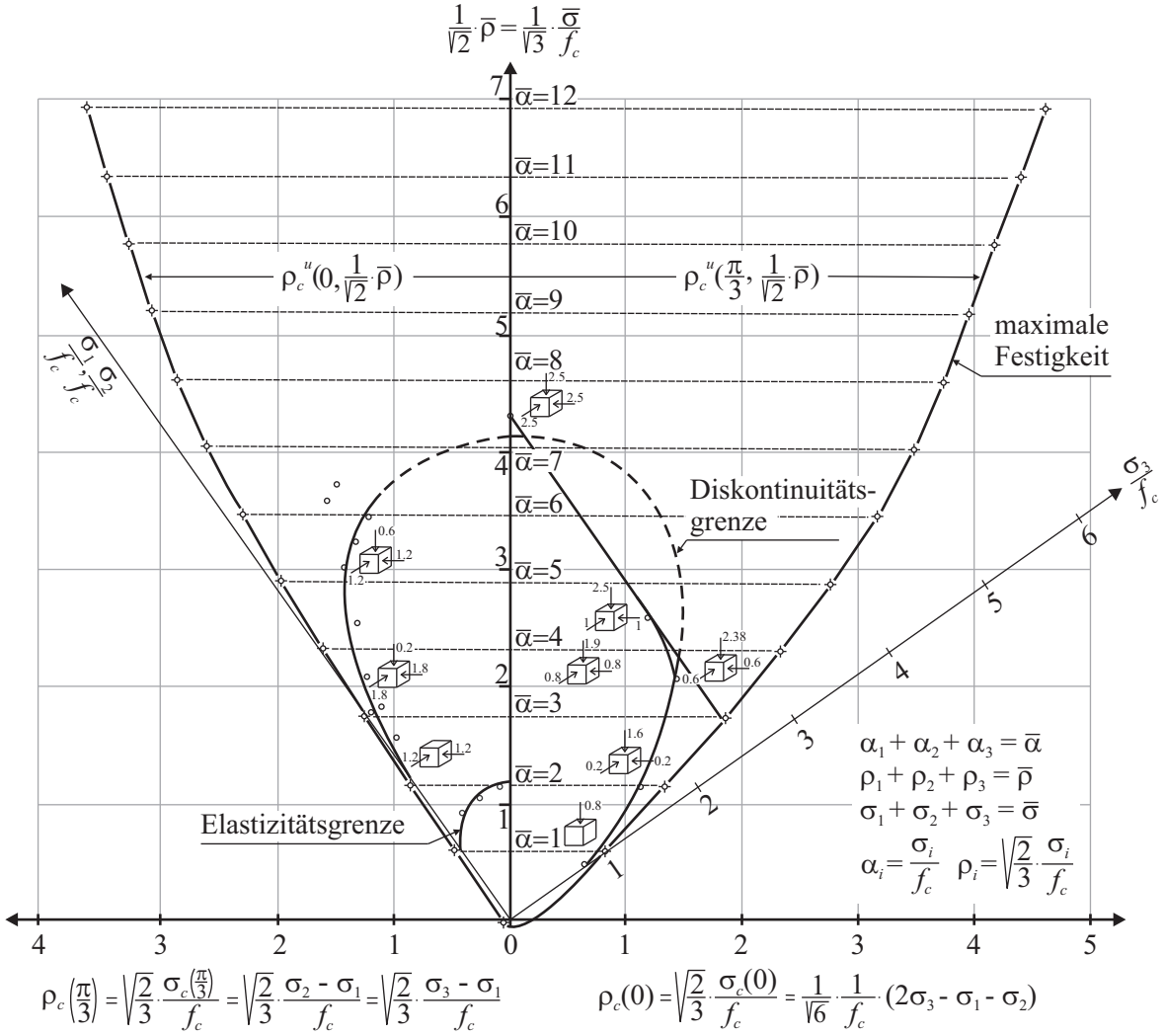


Abbildung 2.8: Verlauf der Elastizitäts- und Diskontinuitätsgrenze nach Launay & Gachon [62, 63]

McCreath et al. [80] bestimmten für ihre mehraxialen Versuche die Elastizitäts- bzw. Proportionalitätsgrenze und die Grenze der Dauerstandsfestigkeit und zeigten, dass mit größer werdendem hydrostatischen Druckspannungsanteil die Kurven zunehmend differieren. Dabei erfolgte die Steigerung der Spannung an der Elastizitätsgrenze in kleinerem Maße als die Steigerung der Spannung an der Grenze der Dauerstandsfestigkeit (Abbildung 2.9).

2.1.2.3 Phase des instabilen Risswachstums

Die Phase der Gefügeschädigung mit instabilem Risswachstum im Beton tritt nach dem Erreichen des minimalen Probekörpervolumens ein (Abbildung 2.10). Sie ist gekennzeichnet durch den schnellen Zuwachs der Mikrorisse und dem Auftreten von Gefügerissen, deren Ausbreitung unter einer konstant gehaltenen Belastung bis zum Versagen des Materials fortschreitet. Gemäß Galan [32] fällt bei einaxialen Zugversuchen die gesamte Phase des instabilen Risswachstums mit der unteren Bereichsgrenze nahezu zusammen, weshalb diese im Versuch kaum zu beobachten ist.

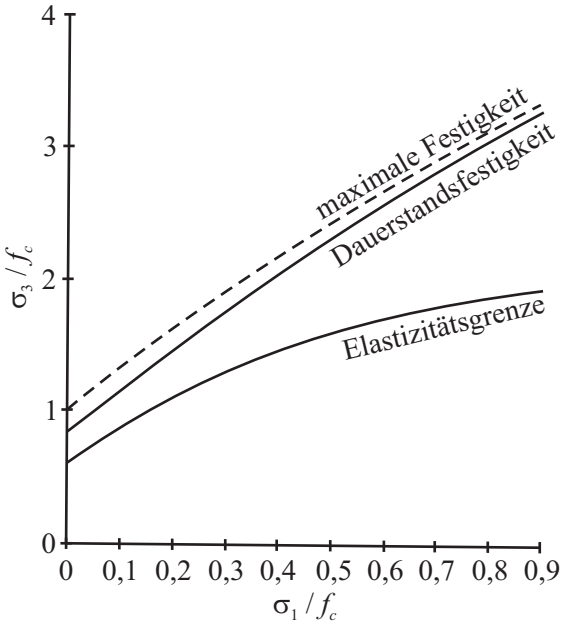


Abbildung 2.9: Verlauf der Elastizitätsgrenze und Dauerstandsfestigkeitsgrenze nach McCreath et al. [80]

Bei verformungsabhängigen Beanspruchungen weist Beton auch nach dem Erreichen der maximalen Festigkeit – im sogenannten Nachbruchbereich – einen Widerstand gegen die äußere Einwirkung auf. Dabei nimmt seine Festigkeit ab, was als Entfestigungsverhalten bezeichnet wird. Hinsichtlich möglicher Veränderungen von ablaufenden Prozessen im Betongefüge nach Überschreiten des charakteristischen Punktes der maximalen Festigkeit sind jedoch keine Untersuchungsergebnisse bekannt.

Voraussetzung für eine systematische Betrachtung des Nachbruchbereichs ist ein Kriterium, welches das Versuchsende definiert und somit vergleichende Aussagen zwischen Versuchen ermöglicht. Ein solches Kriterium könnte z. B. anhand eines absoluten bzw. prozentualen Abfalls der Beanspruchung oder einer absoluten bzw. prozentualen Änderung der Verformung festgelegt werden.

2.1.3 Mehraxiale Festigkeit

2.1.3.1 Allgemeines

Innerhalb der Phase des instabilen Risswachstums erreicht der Beton unter ein- und mehraxialer Beanspruchung seine maximale Festigkeit, die auch als Bruchspannung bzw. Bruchfestigkeit bezeichnet wird. Die Beschreibung der Grenzfläche der maximalen Festigkeit wird oftmals gesondert von der Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Linien vorgenommen. Dabei wird die betragsmäßig größte aufgebrachte Beanspruchung als Maximalwert definiert und in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses dargestellt, wobei dies zum Teil durch vorhergehende Transformation in unterschiedliche Koordinatensysteme erfolgt. Bei dreiaxialen Beanspruchungen kann die Beschreibung z. B. mittels der Invarianten des hydrostatischen bzw. des deviatorischen Spannungstensors in Haigh-Westergaard-Koordinaten vorgenommen werden (vgl. Abschnitt 2.1.4, Abbildung 2.17).

Eine sehr frühe und verhältnismäßig einfache zweiparametrige Beschreibung der Grenzfläche wurde z. B. von Drucker & Prager [26] entwickelt, wobei diese jedoch für den Beton unzureichend ist. Komplexere mehrparametrige Modelle hingegen, wie sie u. a. Ottosen [91] oder Willam & Warn-

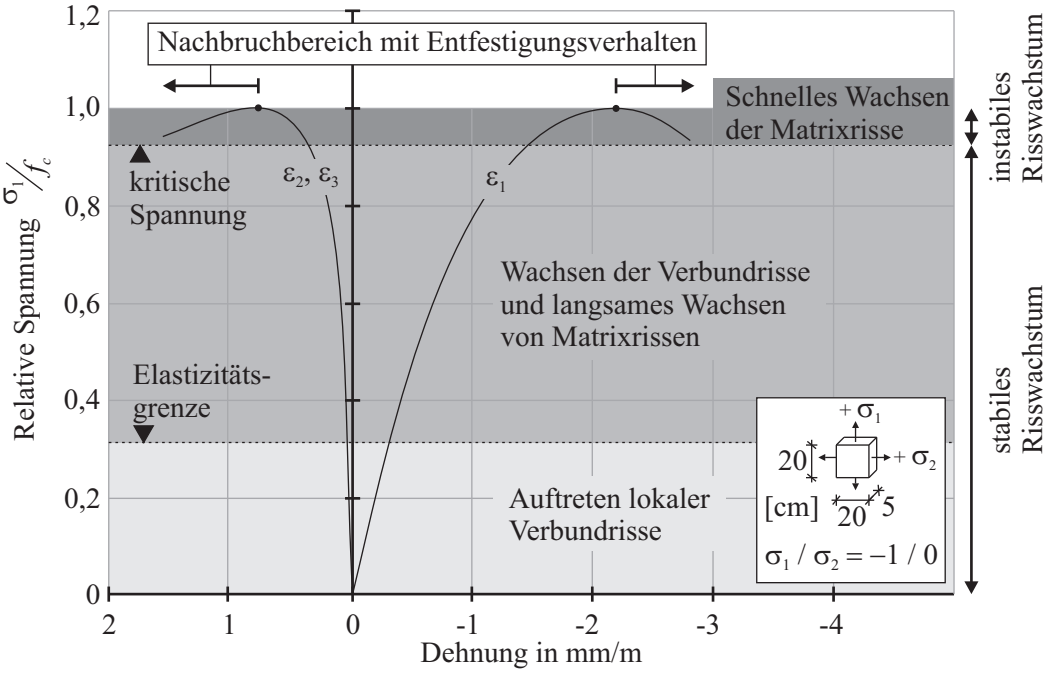


Abbildung 2.10: Schädigungsphasen im Beton und charakteristische Punkte im Materialverhalten eines einaxialen Druckversuchs nach Kupfer [57]

ke [127] entwickelten, sind grundsätzlich in der Lage, die maximale Festigkeit von Beton unter mehraxialer Beanspruchung abzubilden.

2.1.3.2 Zweiaxiale Festigkeit

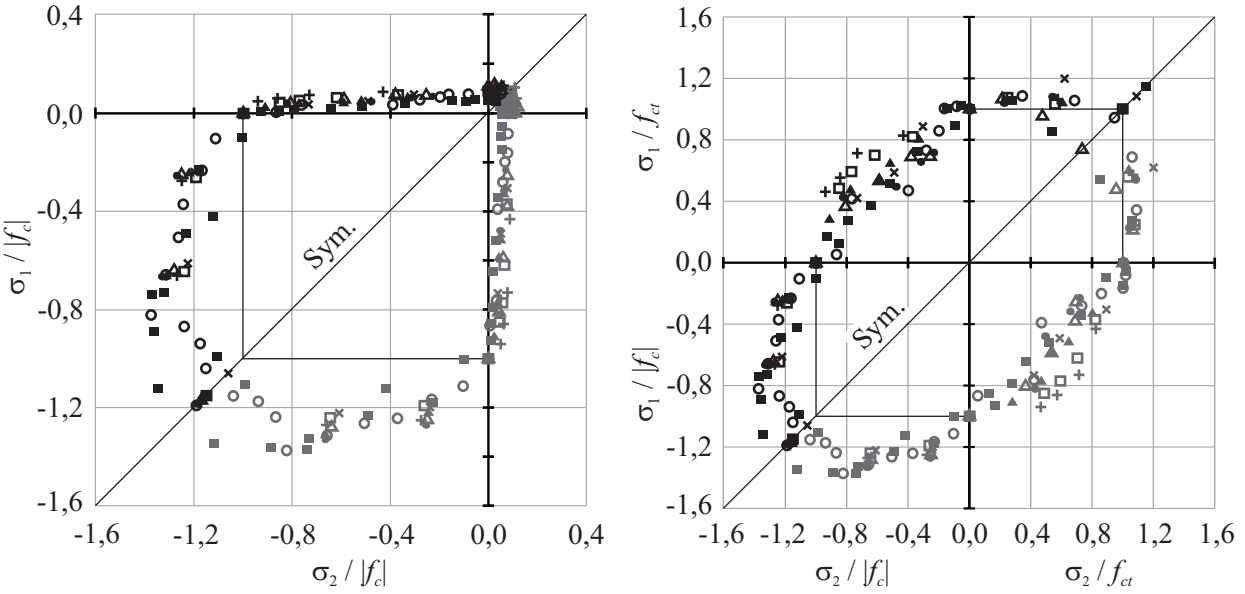
In der Vergangenheit wurden zahlreiche Versuche zur Bestimmung des zweiaxialen Materialverhaltens von Beton durchgeführt, wobei das Hauptaugenmerk auf der Erforschung der veränderten mehraxialen Festigkeit gegenüber der einaxialen Festigkeit lag. Die überwiegende Anzahl an Versuchen erfolgte für Druck-Druck-Beanspruchungen, wogegen Versuche mit einer Zug-Zug-Beanspruchung den geringsten Anteil ausmachen. Daher stehen nur wenige Forschungsarbeiten zur Verfügung, bei denen Versuchsergebnisse im Druck-Druck-, Druck-Zug- und Zug-Zug-Quadranten ermittelt wurden und die somit den gesamten Bereich der zweiaxialen Spannungsverhältnisse abdecken. Für die Untersuchungen des zweiaxialen Materialverhaltens wurden in der Vergangenheit scheiben- und würfelförmige Prüfkörper sowie Hohlzylinder verwendet. Während bei Scheiben und Würfeln die Beanspruchung an den Seitenflächen mittels Lasteinleitungsmitteln aufgebracht wurde, erfolgte die Beanspruchung von Hohlzylindern nur in axialer Richtung auf diese Weise. Die zweite Spannungskomponente in tangentialer Richtung wurde durch einen radialen Innen- oder Außendruck mittels eines Wirkmediums erzeugt, vgl. Mal'cov & Pak [78].

In Abbildung 2.11 und 2.12 sind bezogene zweiaxiale Festigkeiten von normalfestem (bis $f_c = 60\,\mathrm{N/mm^2}$) und hochfestem Beton (von $f_c = 60\,\mathrm{N/mm^2}$ bis $f_c = 115\,\mathrm{N/mm^2}$) dargestellt. Hierbei wurden nur Versuchsserien in den Datensatz aufgenommen, bei denen eine proportionale Belastung an scheibenförmigen oder würfelförmigen Prüfkörpern stattfand und bei denen Versuchswerte in wenigstens zwei Quadranten der Spannungsebene vorlagen. Auf eine Darstellung von Ergebnissen aus Versuchsserien an Hohlzylindern, wie sie u. a. von McHenry & Karni [81], Mal'cov & Pak [78] oder auch Rosenthal & Glücklich [103] durchgeführt wurden, wird an dieser Stelle verzichtet, da bei den verwendeten Hohlzylindern zum Teil Wandstärken vorlagen, bei

denen die Beanspruchung in radialer Richtung nicht vernachlässigt werden kann. Somit ist von einer dreiaxialen Beanspruchung auszugehen, die das Materialverhalten beeinflusst, vgl. Rogge [100].

Die Abbildung 2.11 zeigt die Versuchsergebnisse von Hussein & Marzouk [45, 44], Kupfer [57, 59], Lee et al. [65], Nelissen [84] und Tasuji [119] an normalfestem Beton. Dabei ist in Abbildung 2.11a die zweiaxiale Festigkeit auf die einaxiale Druckfestigkeit und in Abbildung 2.11b je nach Beanspruchung auf die einaxiale Druck- bzw. auf die einaxiale Zugfestigkeit bezogen.

Bei einer zweiaxialen Druckbeanspruchung tritt stets eine Erhöhung der Festigkeit gegenüber der einaxialen Druckfestigkeit auf. Die größte Steigerung ergibt sich bei einem Spannungsverhältnis in einem Bereich von $\sigma_1/\sigma_2 = -0{,}4/-1$ bis $\sigma_1/\sigma_2 = -0{,}8/-1$. Im Bereich der zweiaxialen Zugfestigkeit kann demgegenüber keine signifikante Festigkeitssteigerung über den gesamten Bereich festgestellt werden. Lediglich bei einem Spannungsverhältnis von $\sigma_1/\sigma_2 = 0{,}2/1$ ergibt sich bei allen Versuchen eine geringfügig höhere zweiaxiale Festigkeit im Vergleich zur einaxialen Zugfestigkeit. Bei einem Spannungsverhältnis von $\sigma_1/\sigma_2 = 1/1$ kann es dagegen auch zu einer Festigkeitsabnahme kommen. Unter einer Druck-Zug-Beanspruchung ist es schwierig, einen Bezugswert für die Festigkeit heranzuziehen und hinsichtlich einer Festigkeitssteigerung oder Abnahme zu unterscheiden. Es ist jedoch auffällig, dass in Abbildung 2.11b die Versuchsergebnisse in einer konvexen Form in allen Quadranten vorliegen.



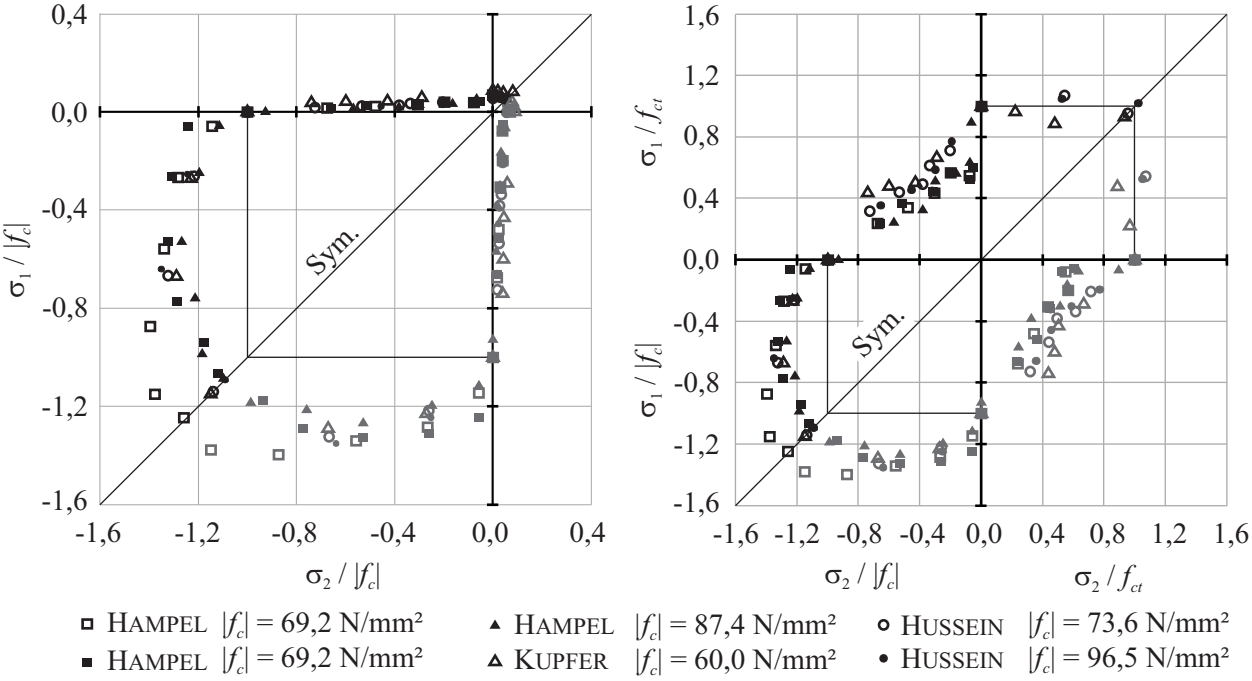
a) Bezogen auf die einaxiale Druckfestigkeit

b) Bezogen auf die einaxiale Zug- bzw. Druckfestigkeit

Abbildung 2.11: Bezogene zweiaxiale Festigkeiten von normalfestem Beton (Daten aus Hussein & Marzouk [45, 44], Kupfer [57, 59], Lee et al. [65], Nelissen [84] und Tasuji [119])

Im Gegensatz dazu weisen die Versuchsergebnisse von hochfestem Beton im Bereich einer Druck-Zug-Beanspruchung in der besprochenen Darstellung in Abbildung 2.12b eine bereichsweise konkave Form auf, was vermutlich am kleiner werdenden Verhältnis von einaxialer Zug- zu einaxialer Druckfestigkeit liegt. Weiter zeigen die an hochfestem Beton durchgeführten Versuche von Hampel [36], Hussein & Marzouk [45] und Kupfer [57], dass die erzielten Festigkeitssteigerungen unter einer Druck-Druck-Beanspruchung mit zunehmender einaxialer Festigkeit geringer ausfallen.

Für die bezogenen zweiaxialen Zugfestigkeiten hingegen entsprechen die Änderungen der bezogenen Festigkeiten denen des normalfesten Betons.



a) Bezogen auf die einaxiale Druckfestigkeit

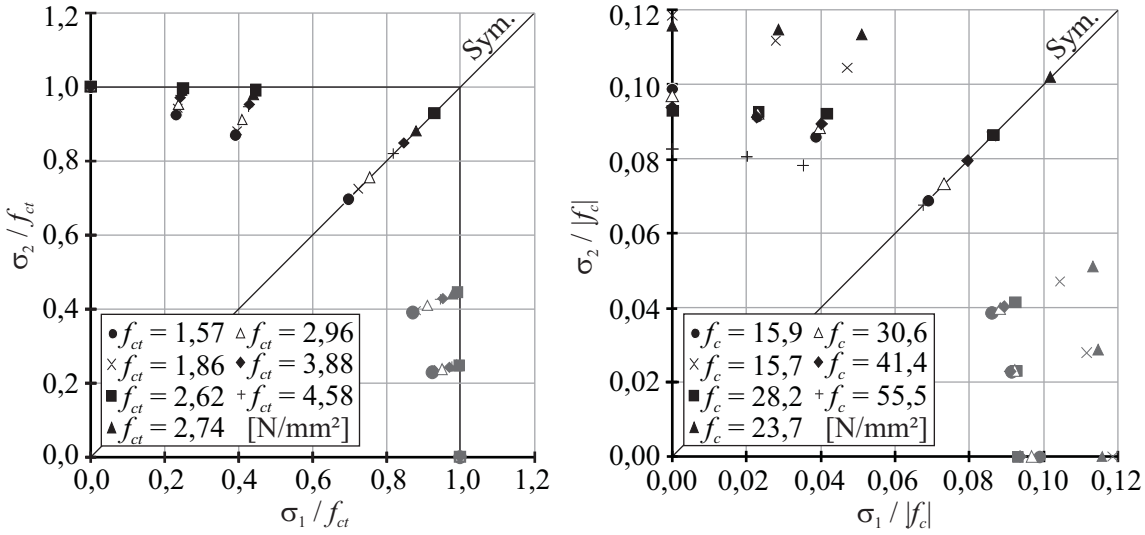
b) Bezogen auf die einaxiale Zug- bzw. Druckfestigkeit

Abbildung 2.12: Bezogene zweiaxiale Festigkeiten von hochfestem Beton (Daten aus Hampel [36], Hussein & Marzouk [45] und Kupfer [57])

Kulik [56] untersuchte die zweiaxiale Zugfestigkeit an sieben verschiedenen normalfesten Betonen mit jeweils drei Spannungsverhältnissen an würfelförmigen Prüfkörpern. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass bei einer zweiaxialen Zugbeanspruchung die Zugfestigkeit immer unterhalb der einaxialen Festigkeit lag. Dabei lässt sich jedoch kein Zusammenhang zwischen der Größe der einaxialen Festigkeit und der Abnahme der zweiaxialen Festigkeit erkennen (Abbildung 2.13a). Werden die Versuchswerte auf die einaxialen Druckfestigkeiten der Betone bezogen, ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 2.13b). Somit kann kein proportionaler Zusammenhang zwischen der zweiaxialen Zugfestigkeit und den einaxialen Festigkeiten der Betone hergestellt werden.

Traina & Mansour [122] untersuchten den Einfluss des Faservolumengehaltes sowie des Stahlfasertyps auf die zweiaxiale Druckfestigkeit. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass sich sowohl durch den Fasergehalt als auch durch den Fasertyp die zweiaxiale Druckfestigkeit beeinflussen lässt. Bei den Versuchen mit 0%, 0,5%, 1,0% und 1,5% Faservolumengehalt V_f ergaben sich mit zunehmendem Fasergehalt höhere bezogene Festigkeiten, wobei sich die größte Festigkeitssteigerung bei einem Spannungsverhältnis von $\sigma_1/\sigma_2 = -1/-1$ einstellte. Die erzielten zweiaxialen Festigkeiten des untersuchten normalfesten Betons betrugen dabei für unterschiedliche Fasertypen 160% bis 190% der einaxialen Druckfestigkeit und fielen damit deutlich höher als bei Versuchen ohne Kurzfasern aus. Curbach & Speck [17] führten ebenfalls zahlreiche Druck-Druck-Versuche mit unterschiedlichen Fasergehalten durch. Neben dem Fasergehalt wurde auch der Fasertyp variiert bzw. mehrere Fasertypen miteinander kombiniert. Prinzipiell zeigten die Ergebnisse ähnliche Tendenzen wie bei Traina & Mansour, wobei die auftretenden Effekte nicht so signifikant ausgeprägt waren.

Demeke & Tegos [21] führten Druck-Zug-Versuche mit einem normalfesten Beton und unterschiedlichen Stahlfaservolumengehalten V_f von 0%, 0,5%, 1,0% und 1,5% durch. In Abbildung 2.14



a) Bezogen auf die einaxiale Zugfestigkeit b) Bezogen auf die einaxiale Druckfestigkeit

Abbildung 2.13: Bezogene zweiaxiale Zugfestigkeiten für verschiedene Normalbetone nach Kulik [56]

ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Fasergehalt höhere einaxiale Zugfestigkeiten erzielt und generell höhere bezogenene zweiaxiale Beanspruchungen aufgebracht werden konnten. Speziell der Bereich, über den bei einer Druck-Zug-Beanspruchung annähernd die einaxiale Zugfestigkeit erreicht wird, ist bei einem Fasergehalt $V_f \geq 1{,}0\%$ deutlich größer als bei einem Beton ohne bzw. mit geringerem Faseranteil.

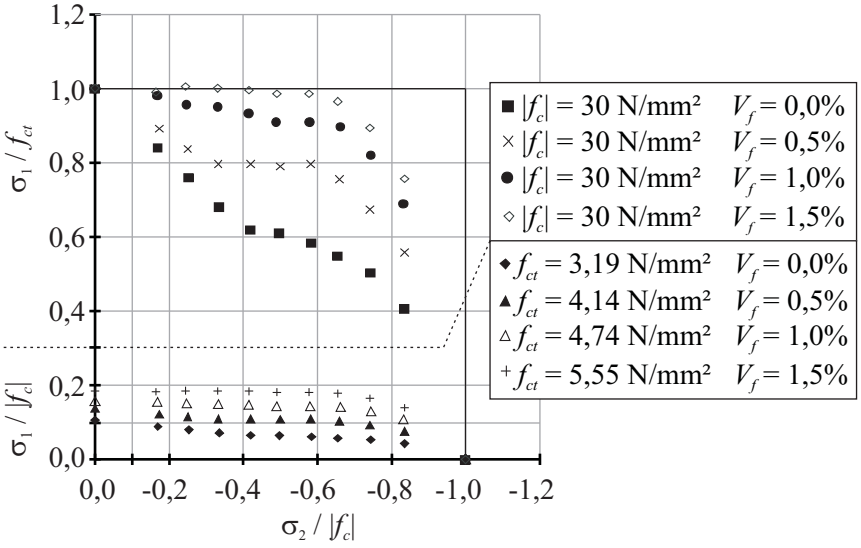


Abbildung 2.14: Zweiaxiale Festigkeit für Druck-Zug-Beanspruchungen in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt des Betons nach Demeke & Tegos [21]

Die Beschreibung der maximalen Festigkeiten unter zweiaxialer Beanspruchung erfolgte bisher entweder für den gesamten Bereich oder für die einzelnen Teilbereiche der Druck-Druck-, Druck-Zug- und Zug-Zug-Beanspruchung an separaten Kriterien. Die Festigkeiten einer Druck-Druck-Beanspruchung wurden häufig mit einer schräg in der Ebene liegenden Ellipse beschrieben, deren Hauptachse sich auf der Winkelhalbierenden der σ_1-σ_2-Spannungsebene befindet. Demgegenüber erfolgte die Beschreibung der Zug-Zug- und Druck-Zug-Festigkeiten mittels verschiedenster Ansätze, die im einfachsten Fall konstante bzw. lineare Verläufe haben. Komplexere Beschreibungen

der zweiaxialen Festigkeiten mit wenigstens einer Zugbeanspruchungskomponente wurden u. a. von Hampel [36] und Kupfer [57] vorgenommen.

2.1.3.3 Dreiaxiale Festigkeit

Zur Ermittlung des Festigkeitsverhaltens von Beton unter dreiaxialer Beanspruchung wurden überwiegend Versuche mit allseitigem Druck durchgeführt. Die Motivation, speziell im Druck-Druck-Druck-Bereich eine große Anzahl von Probekörpern zu testen, liegt vermutlich darin, dass sich der überwiegende Teil der Grenzfläche der maximalen Festigkeit in diesem Bereich befindet (siehe Abschnitt 2.1.4). Bei den Versuchen kamen zylindrische und würfelförmige Prüfkörper zum Einsatz, wobei nur Würfel das Aufbringen beliebiger Spannungsverhältnisse erlauben. Umfangreiche Untersuchungen an würfelförmigen Prüfkörpern wurden u. a. von Linse & Aschl [71], Mills & Zimmermann [82], Schickert & Winkler [110] sowie van Mier [123] für Normalbetone, von Hampel [36] für hochfeste Betone, von Curbach & Speck [17] für kurzfaserbewehrte Hochleistungsbetone und von Speck [118] für ultrahochfeste Betone durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass unter einem zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil der Beanspruchung höhere Festigkeiten erzielt werden. Die auftretenden Festigkeitssteigerungen bei einer Beanspruchung mit $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ sind dabei geringer als bei Beanspruchungen mit $\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$, wenn der hydrostatische Druckspannungsanteil bei den betrachteten Spannungsverhältnissen gleich groß ist. Die Differenz zwischen den erzielten Festigkeiten mit derartigen Spannungsverhältnissen nimmt jedoch mit Zunahme der Festigkeitssteigerung ab, so dass davon ausgegangen wird, dass diese sich angleichen. Aufgrund der sehr hohen Festigkeitssteigerungen, die ein Vielfaches der einaxialen Druckfestigkeit aufweisen können, und der begrenzten Kapazitäten der Prüfmaschinen ist es jedoch noch nicht gelungen, die Gestalt der Grenzfläche der maximalen Festigkeit im dreiaxialen Druckspannungszustand experimentell vollständig zu erfassen. Es bleibt somit vorerst ungeklärt, welche Gestalt die Grenzfläche in Richtung der hydrostatischen Druckbeanspruchung annimmt.

Für Beanspruchungen in Richtung des Zug-Zug-Zug-Bereichs der Grenzfläche sind ebenfalls nicht ausreichend Versuchswerte vorhanden, um eine eindeutige Aussage zu deren Gestalt treffen zu können. Versuche mit einer Zug-Druck-Druck-Beanspruchung, wie sie von Bremer & Steinsdörfer [9], Linhua et al. [67], Mahmood & Hannant [77], Schröder [114] und Wang & Song [125] bzw. Versuche mit einer Zug-Zug-Druck-Beanspruchung, wie sie von Kless [51], Liang [66] und Linse & Aschl [70] durchgeführt wurden, zeigten deutlich kleinere Festigkeitssteigerungen bis hin zu einer Festigkeitsabnahme gegenüber den einaxialen Festigkeiten (Abbildung 2.15) sowie ein sprödes Materialversagen. Unter einem hydrostatischen Zugspannungszustand ermittelte Liang [66] eine Festigkeit von ca. 75% der einaxialen Zugfestigkeit und konnte zeigen, dass sich die Grenzfläche an diesem Punkt schließt.

Für Betone mit einer Kurzfaserbewehrung kamen Chern et al. [14] anhand dreiaxialer Druckversuche sowie Kless [51] anhand von Zug-Zug-Druck-Versuchen zu dem Ergebnis, dass Kurzfasern keinen signifikanten Einfluss auf die maximalen Festigkeiten von Beton unter mehraxialer Beanspruchung haben. In Richtung der reinen mehraxialen Druckbeanspruchung trat mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil der Beanspruchung der Übergang von sprödem zu duktilem Versagen jedoch ausgeprägter als bei Betonen ohne Fasern auf.

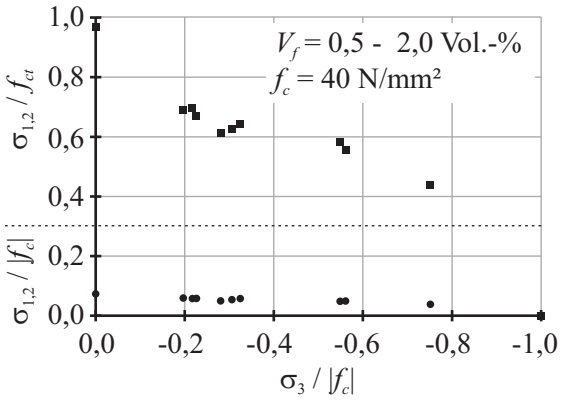


Abbildung 2.15: Festigkeiten von Stahlfaserbeton bei einer Zug-Zug-Druck-Beanspruchung mit $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$ nach Kless [51]

2.1.4 Grenzflächen von charakteristischen Punkten im Materialverhalten

Als Grenzflächen werden Flächen bezeichnet, die ein festgelegtes Merkmal eines Materials beschreiben und somit den Übergang zwischen zwei charakteristischen Phasen des Materialverhaltens definieren können. Für Beton unter mehraxialer Beanspruchung ist die Grenzfläche zur Beschreibung der maximalen Festigkeit die am häufigsten beschriebene Fläche. Dies liegt vermutlich daran, dass die maximale Beanspruchbarkeit eines Stoffes generell von großem Interesse ist und sich dieser Punkt experimentell sicher bestimmen lässt.

Bezüglich der mehraxialen maximalen Festigkeitswerte von Beton wird grundsätzlich angenommen, dass die Grenzfläche stetig und differenzierbar ist (Abbildung 2.16). Unter der Annahme eines isotropen Materialverhaltens setzt sich diese Fläche aus sechs gleichen Teilflächen zusammen, wobei jede Teilfläche ein 60 °-Segment beschreibt. Zur Aufstellung der Gesamtfläche muss das Ausgangssegment, welches durch den Zug- (0 °) und den Druckmeridian (60 °) begrenzt wird, zweifach gespiegelt, zweifach rotiert sowie einfach gespiegelt und rotiert werden. Somit ergibt sich eine dreizählig radiärsymmetrische Figur mit den Drehwinkeln 120 ° und 240 ° um die hydrostatische Achse ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, Abbildung 2.16). Treffen die sechs Segmente orthogonal auf Ebenen, die durch die hydrostatische Achse und den Zug- bzw. Druckmeridian aufgespannt werden, wird die Gesamtfläche stetig und differenzierbar. Hiervon ausgenommen werden können die beiden möglichen Punkte, die unter hydrostatischer Zug- bzw. Druckbeanspruchung auf der hydrostatischen Achse liegen und in denen sich alle Meridiane treffen. Als Meridiane werden dabei Linien auf der Grenzfläche bezeichnet, die sich aus Punkten von Spannungsverhältnissen mit gleichen Winkeln θ ergeben (Abbildung 2.17). Als Sonderfälle der mehraxialen Beanspruchung befindet sich die einaxiale Zugfestigkeit auf dem Zugmeridian (0 °) mit $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ und die einaxiale Druckfestigkeit auf dem Druckmeridian (60 °) mit $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, vgl. Abbildung 2.16.

Die Beschreibung von Grenzflächen erfolgt vielfach in Haigh-Westergaard-Koordinaten ξ, ρ und θ unter Verwendung von Invarianten des Spannungstensors bzw. des deviatorischen Spannungstensors. Somit ist die Grenzfläche invariant hinsichtlich einer Drehung des ursprünglichen kartesischen Koordinatensystems. Infolge der Koordinatentransformation kann jedoch nur eine implizite Abbildung der Grenzfläche vorgenommen werden. Unter der Vorgabe eines Spannungsverhältnisses und eines Datenpunktes in Haigh-Westergaard-Koordinaten ist eine Rückrechnung auf den Festigkeitswert des Ursprungssystems nicht möglich.

Eine schematische Darstellung einer Grenzfläche in Haigh-Westergaard-Koordinaten ist in Abbildung 2.17 gezeigt. Weiter werden zwei Ebenen abgebildet, die für eine allgemeine Beschreibung der Grenzfläche wesentlich sind. Dies ist zum einen die Deviatorebene, deren Norm die hydrosta-

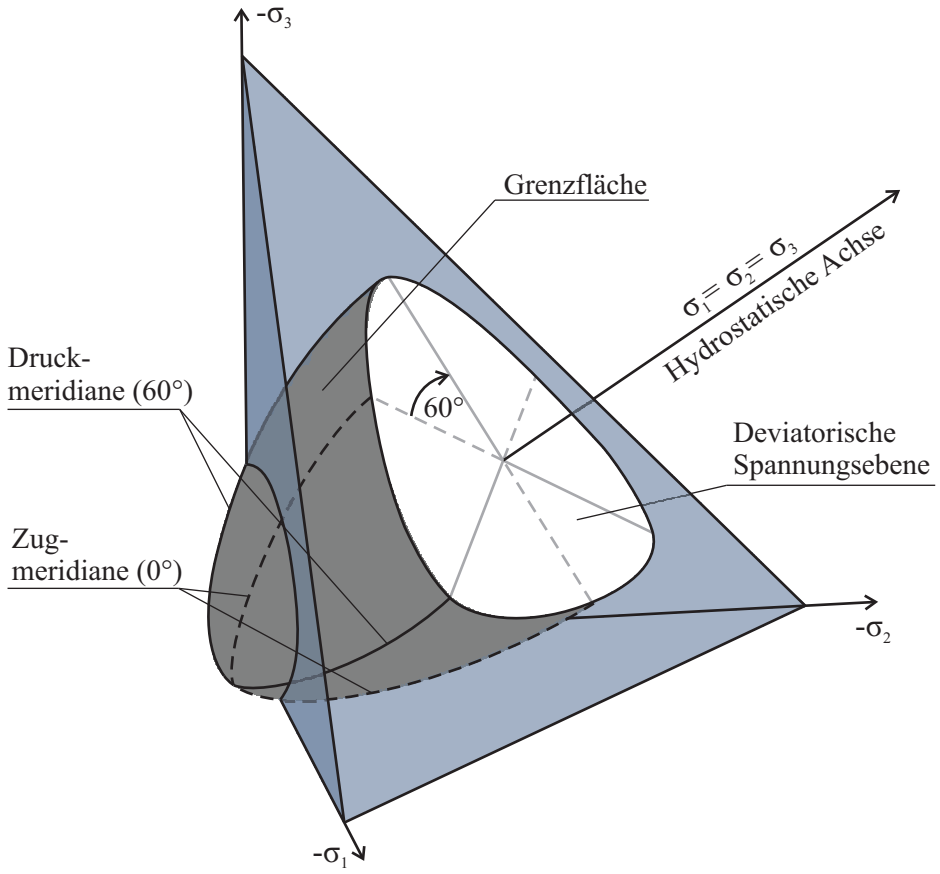


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung einer Festigkeitsgrenzfläche von Beton unter mehraxialer Beanspruchung nach Schickert [109]

tische Achse bildet, und zum anderen die Rendulic-Ebene, welche durch die hydrostatische Achse und einen Meridian der Grenzfläche aufgespannt wird.

Ottosen [91] entwickelte eine mathematische Beschreibung der Grenzfläche für die mehraxiale Festigkeit von Normalbeton und stellte anhand seiner Untersuchungen folgende prinzipielle Charakteristika für die Gestalt dieser Festigkeitsgrenzfläche auf.

- Die Grenzfläche wird durch die Form des Druck- bzw. Zugmeridians charakterisiert.
- Das Verhältnis von Zug- zu Druckmeridian in der Deviatorebene verläuft vom hydrostatischen Zug zu hydrostatischem Druck von 0,5 zu 1,0.
- Daraus folgt, dass die Form der Grenzfläche in der Deviatorebene mit zunehmenden hydrostatischen Druckbeanspruchungsanteilen der Beanspruchung von dreieckig zu rund übergeht.
- In der Rendulic-Ebene sind der Zug- und der Druckmeridian leicht konvex und öffnen sich mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil in der Belastung.
- Unter einer hydrostatischen Zugbeanspruchung treffen sich die Meridiane in einem Punkt auf der hydrostatischen Achse.

Zur Beschreibung der Grenzfläche für eine spezielle Betonfestigkeit nach Ottosen [91] muss deren allgemeine mathematische Formulierung mittels fünf Versuchswerten, die auf dem Zug- und Druckmeridian liegen, kalibriert werden. Diese fünf Werte werden von dem Modell nach Ottosen exakt abgebildet und somit genau vorhergesagt. Bei einer größeren Anzahl verfügbarer Versuchswerte ist ebenfalls eine Best-Fit-Kalibrierung möglich.

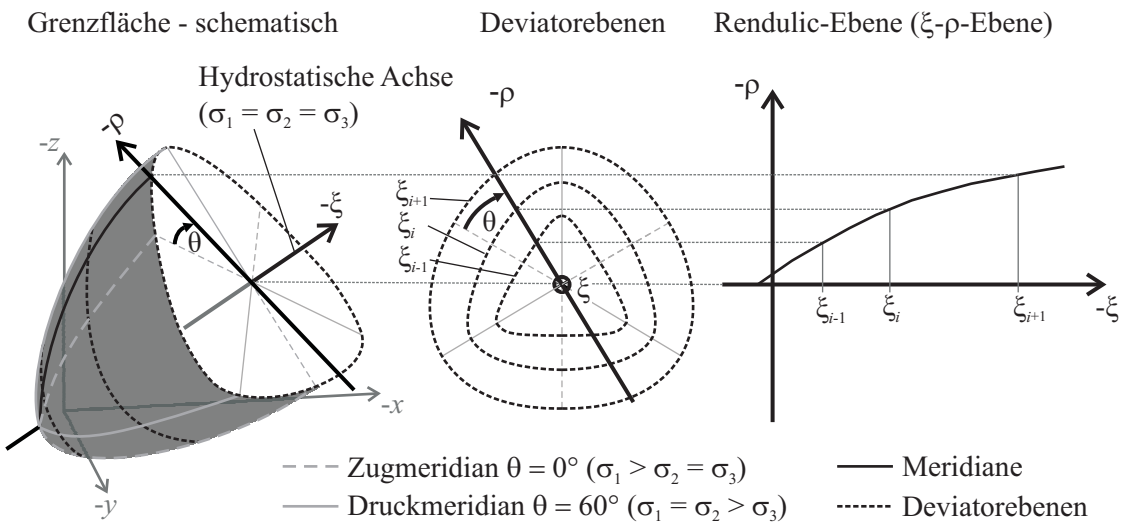


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung einer Festigkeitsgrenzfläche in HAIGH-WESTERGAARD-Koordinaten

Bei zweiaxialen Druckversuchen an ultrahochfestem Beton von SPECK [118] stellte sich das Verhältnis von Zug- zu Druckmeridian auch kleiner 0,5 ein, so dass die Anwendungsgrenzen des Kriteriums nach OTTOSEN überschritten wurden. Daher wurde von SPECK die Beschreibung der Grenzfläche modifiziert, um eine Gültigkeit für ultrahochfeste Betone zu erreichen. Hierbei wurden auch kleinere Verhältnisse als 0,5 zwischen dem Zug- und dem Druckmeridian in der Deviatorebene zugelassen, wobei jedoch die Differenzierbarkeit der Grenzfläche nicht mehr in jedem Punkt gewährleistet werden konnte.

Weiterhin führte SPECK [118] Wichtungsfaktoren ein, mit deren Hilfe aus drei für isotropes Material kalibrierten Grenzflächen eine Grenzfläche zusammengesetzt wird, die für ein orthotropes Material gilt. Hierbei kann es jedoch unter hydrostatischer Zugbeanspruchung dazu kommen, dass sich die Meridiane nicht in einem Punkt schneiden. SPECK empfiehlt daher für den Bereich mit großen Zugbeanspruchungen die Hauptspannungshypothese mit der einaxialen Zugfestigkeit als Grenzwert als Versagenskriterium anzuwenden.

Weitere vier- und fünf-parametrige Grenzflächenbeschreibungen wurden u. a. von WILLAM & WARNKE [127] und HSIEH ET AL. [39] aufgestellt. Dabei wird in analoger Weise zu OTTOSEN die Kalibrierung der allgemeinen mathematischen Beschreibungen der Flächen vorgenommen und es ergeben sich ähnliche Grenzflächen im Bereich der verfügbaren Versuchswerte.

In Richtung der hydrostatischen Druckbeanspruchung können sich die Grenzflächen hingegen grundsätzlich unterscheiden, da aufgrund fehlender Versuchswerte noch nicht abschließend geklärt werden konnte, ob sich die Grenzfläche wieder schließt oder nicht. SMITH ET AL. [117] gingen dieser Frage nach und schlossen aus Versuchsergebnissen, dass mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil ein Übergang des Materialverhaltens von spröde-entfestigend hin zu duktil-verfestigend auftritt, wodurch sich die Grenzfläche theoretisch nicht schließt und in der Deviatorebene eine kreisförmige Gestalt annimmt. Einige Versuche zur Beantwortung dieser Frage wurden ebenfalls von FÖPPL & FÖPPL [29] vorgenommen. Sie untersuchten verschiedene Stoffe, wie z. B. Sandstein, verschiedene Zementsorten und Ziegelsteinstücke, unter allseitigem Flüssigkeitsdruck bis zu einer Beanspruchung von $300\,\mathrm{N/mm^2}$, wobei sich herausstellte, dass bei den meisten Proben keine merklichen Veränderungen auftraten. Sie schlussfolgerten, dass bei isotropen Stoffen ohne Gefügestörungen bei allseitigem Druck keine Bruchgefahr besteht, auch wenn diese von geringer Festigkeit sind.

Auf den Beton, der schon im unbelasteten Beton Gefügestörungen aufweist, ist diese Erkenntnis jedoch nicht übertragbar.

Hydrostatische Druckversuche an Beton führten Chinn & Zimmermann [15] in einer Triaxialzelle durch, wofür sie ihre Prüfanlage derart modifizierten, dass das Aufbringen eines allseitigen Drucks von $500\,\mathrm{N/mm^2}$ möglich war. Es trat kein Versagen der Betonproben auf, wobei jedoch alle Prüfkörper nach der Belastung ein kleineres Volumen gegenüber ihrem Ausgangszustand aufwiesen, was auf die aufgetretene plastische Verformung im Betongefüge zurückgeführt wurde.

Dahl [19] erzielte mit seinen Versuchen an reinem Zementstein und an Mörtel Ergebnisse, die darauf hinweisen, dass sich die Grenzfläche unter einer hydrostatischen Druckbeanspruchung wieder schließt (Abbildung 2.18). Im Gegensatz dazu zeigten die Ergebnisse seiner Versuche an Beton mit der gleichen Festigkeit wie der des Zementsteins und des Mörtels diese Charakteristik nicht. Vielmehr konnte Dahl an Beton mit einer sehr geringen Festigkeit ($f_c = 9{,}79\,\mathrm{N/mm^2}$) nachweisen, dass sich der Druckmeridian wenigstens bis zu einem Spannungsverhältnis von $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3 = -0{,}27 / -0{,}27 / -1$ öffnet und der Beton dabei einer Beanspruchung von dem über Fünfzigfachen seiner einaxialen Druckfestigkeit widersteht.

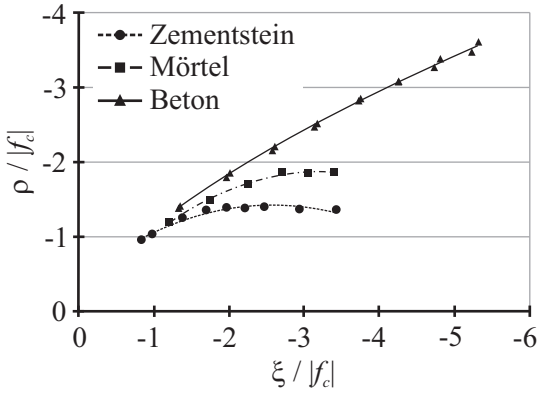


Abbildung 2.18: Mehraxiale Festigkeitswerte auf dem Druckmeridian nach Dahl [19]

Grundsätzlich gibt es Ansätze, die ein Schließen der Grenzfläche unter hydrostatischem Druck vorsehen, wie es z. B. bei Willam & Warnke [127] der Fall ist, wobei hier die Gültigkeit des Kriterium eingeschränkt ist. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, auf eine sich öffnende Grenzfläche eine abschließende Kappe aufzusetzen, wie es z. B. Sfer et al. [116] für die Beschreibung der Grenze der elastischen Beanspruchung realisierten (Abbildung 2.19).

Im Gegensatz zur Gestalt der Grenzfläche unter hydrostatischem Druck schließen sich bei allen Kriterien die Flächen unter hydrostatischer Zugbeanspruchung und die Meridiane treffen sich im Allgemeinen in einem Punkt auf der hydrostatischen Achse. Liang [66] ermittelte in seinen Versuchen einen Festigkeitswert für die hydrostatische Zugbeanspruchung von 75% der einaxialen Zugfestigkeit, wogegen andere Forscher davon ausgehen, dass die hydrostatische Zugfestigkeit der einaxialen Festigkeit entspricht. Ungeklärt hingegen ist, ob die Grenzfläche auch in diesem Punkt differenzierbar ist und für diesen Fall die Meridiane die hydrostatische Achse senkrecht schneiden müssen.

Die vorgestellten Überlegungen zur Gestalt von Grenzflächen der maximalen Festigkeit basieren auf Versuchsergebnissen, bei denen die Beanspruchung in den Belastungsrichtungen proportional aufgebracht wurde. Weitere Grenzflächen, die anhand von Versuchen mit proportionaler Laststeigerung ermittelt wurden, sind ähnlich aufgebaut, wie beispielsweise die Grenzfläche der Diskontinuitätsgrenze nach Newman [86] zeigt (Abbildung 2.20). Derartige Grenzflächen werden jedoch in der Literatur nicht so intensiv wie die maximale Festigkeitsgrenze diskutiert, was vermutlich an der

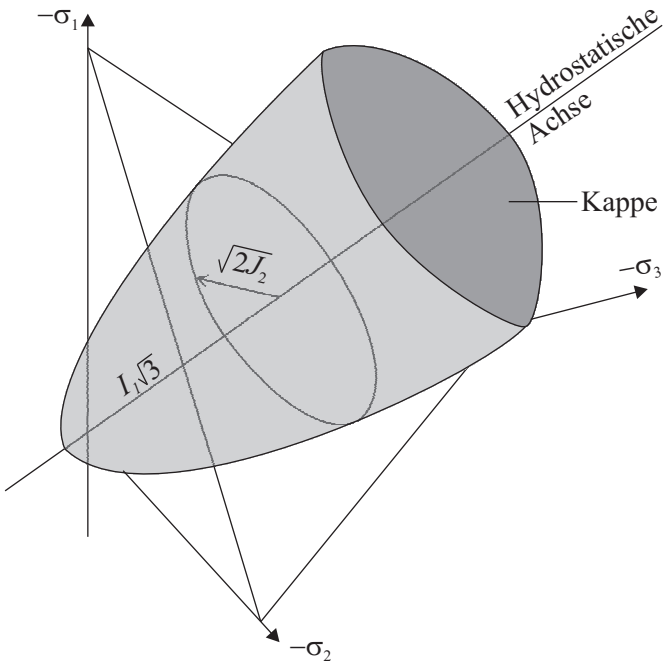


Abbildung 2.19: Grenzfläche mit aufgesetzter Kappe nach Sfer et al. [116]

erhöhten Schwierigkeit bei der Bestimmung der zugehörigen Versuchswerte liegt bzw. daran, dass deutlich weniger Versuchswerte zur Verfügung stehen.

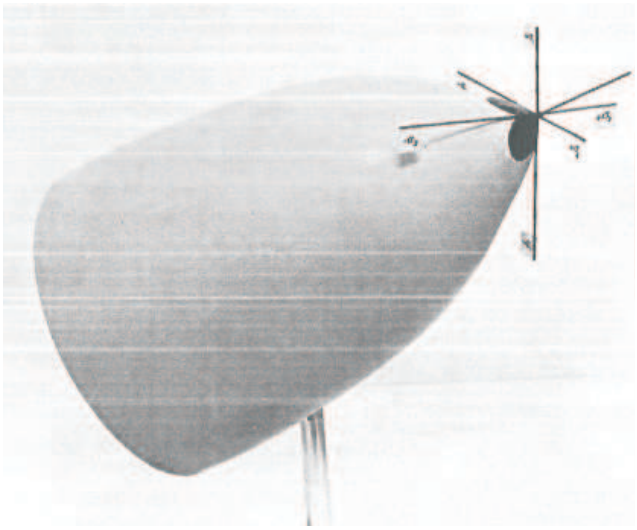


Abbildung 2.20: Grenzfläche der Diskontinuitätsgrenze von Beton aus Newman [86]

Neben einer proportionalen Laststeigerung der drei Beanspruchungsrichtungen im Hauptspannungsraum können auch andere Belastungspfade abgefahren werden, um das Versagen des Betons herbeizuführen. In verschiedenen Forschungsarbeiten konnte gezeigt werden, dass die Grenzfläche vom Belastungspfad abhängig ist, wobei jedoch keine Zusammenhänge zu Grenzflächen bei proportionaler Laststeigerung aufgezeigt wurden. Bei zweiaxialen Druckversuchen an Normalbeton erhielt Nelissen [84] je nach Spannungsverhältnis sowohl kleinere als auch größere maximale Festigkeitswerte im Vergleich zur proportionalen Laststeigerung. Für Leichtbeton zeigten Taylor et al. [120] ebenfalls, dass die maximale Festigkeit vom Belastungspfad abhängig ist. Für die von ihnen gewählte Beanspruchungsart ergaben sich kleinere maximale Festigkeitswerte als bei proportionaler Belastung.

Hampel [36] untersuchte den Einfluss einer nicht proportional aufgebrachten Belastung an zweiaxialen Druck-Zug-Versuchen. Bei den hierzu durchgeführten Versuchen wurde die Belastung zuerst nur in einer Richtung aufgebracht, bis in dieser Richtung der mittlere maximale Festigkeitswert des zum Vergleich herangezogenen Spannungsverhältnisses unter proportionaler Beanspruchungssteigerung erreicht war. Anschließend blieb die Beanspruchung in dieser Richtung konstant und in der zweiten Richtung erfolgte die Laststeigerung bis zum Bruch. Mit diesem Vorgehen ergaben sich höhere maximale Festigkeitswerte im Vergleich zur proportionalen Laststeigerung. Beim Versagen der Probekörper mit nicht proportionaler Laststeigerung traten somit jedoch andere Spannungsverhältnisse als bei den Versuchen mit proportionaler Laststeigerung auf, weshalb die beiden Festigkeitswerte nur bedingt miteinander vergleichbar sind.

Die Auswirkung unterschiedlicher Belastungspfade wurde ebenfalls von Lan & Guo [61] untersucht. Bei zweiaxialen Druckversuchen ergaben sich nur für Spannungsverhältnisse nahe $\sigma_1/\sigma_2 = -1/-1$ für die vier geprüften Lastpfade Unterschiede in den erzielten maximalen Festigkeiten. Bei allen weiteren untersuchten Spannungsverhältnissen blieb die maximale Festigkeit dagegen nahezu gleich groß. Weiterhin führten Lan & Guo dreiaxiale Druckversuche mit unterschiedlichen Lastpfaden durch. Hierbei konnten sie nur sehr geringe Abweichungen zu den erreichten maximalen Festigkeitswerten bei proportionaler Laststeigerung feststellen.

Kotsovos [52] untersuchte ebenfalls die Lastpfadabhängigkeit der Grenzfläche der maximalen Festigkeit unter dreiaxialer Beanspruchung. Aufgrund seiner Versuchsergebnisse kam er zu dem Schluss, dass die Größe der aufgebrachten Belastung vor der Richtungsänderung des Lastpfades ausschlaggebend für die Gestalt der Grenzfläche ist. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen Bresler & Pister [10], die keine Abhängigkeit der Gestalt der Grenzfläche der maximalen Festigkeit vom Lastpfad feststellen konnten, sofern während der nichtproportionalen Belastung keine Überschreitung einer kritischen Spannung erfolgte.

Wie sich Richtungsänderungen des Lastpfades auf andere charakteristische Punkte im Materialverhalten und somit auf die Form von weiteren Grenzflächen von Beton auswirken, kann an dieser Stelle nicht diskutiert werden, da hierzu keine Versuchsergebnisse bekannt sind.

2.1.5 Modellierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Beton

2.1.5.1 Allgemeines

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines Baustoffes spiegelt die wesentliche Charakteristik seines Materialverhaltens wieder, aufgrund dessen oftmals eine erste Abschätzung zur Eignung eines Werkstoffs für bestimmte Anwendungsgebiete erfolgt. Die für eine Beschreibung gewählten Ansätze können dabei in die zwei übergeordneten Kategorien der strukturell bzw. phänomenologisch orientierten Modelle unterteilt werden.

Bei einer strukturorientierten Beschreibung des Materials mittels Elementen, die sich gegenseitig beeinflussen, können Vorgänge bei hinreichend genauer Modellierung bis auf die atomare Ebene und sogar darunter abgebildet werden. Das globale Materialverhalten lässt sich aus dem Zusammenwirken der einzelnen Strukturelemente bestimmen. Strukturorientierte Beschreibungen erfolgen u. a. als Mehrphasenmodelle, Verbundmodelle, bruchmechanische Modelle und rheologische Modelle, vgl. Eibl & Iványi [28]. Problematisch gestaltet sich hierbei mit zunehmender Verfeinerung die Abbildung der Materialstruktur, da die experimentelle Untersuchung der Beziehungen zwischen einzelnen Strukturelementen und somit die Verifizierung der erdachten Modelle nur noch bedingt möglich ist, vgl. Hintze [38].

Im Gegensatz dazu erfolgt eine phänomenologische Modellbildung des Materialverhaltens durch Formulierungen, die das Verhalten eines Körpers als Kontinuum beschreiben. Bei derartigen Beschreibungen werden Charakteristika eines Körpers abgebildet, die bei Betrachtung verschieden großer Volumenelemente in gleicher Weise zu beobachten sind, vgl. FREUDENTHAL [30]. Bei der globalen Betrachtung einer heterogenen Struktur nimmt mit zunehmender Größe des Volumenelements des betrachteten Materials der Einfluss lokal auftretender Irregularitäten ab, wodurch sich ein gesamtheitliches Verhalten beobachten lässt. Dieses gesamtheitliche Verhalten wird für die mathematische Beschreibung als homogenes Verhalten angesehen. Für die experimentelle Verifizierung der Modelle ist es daher von Bedeutung, ein Volumen von der Größe zu untersuchen, welches Aussagen zum gesamtheitlichen Materialverhalten liefert. Hieraus entwickelte sich der Begriff des repräsentativen Volumenelements (RVE), dessen Abmessung ein minimales Volumen definiert, an dem ein gesamtheitliches Materialverhalten zu beobachten ist.

Da die wesentlichen Informationen des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens durch Messmittel aufgenommen werden, findet sich in der Literatur oftmals die Angabe einer minimalen Länge der Messbasis, über die die Verformungen im Mittel bestimmt werden, anstelle der Angabe eines minimalen Volumens. Für Beton gab MÜLLER [83] beispielsweise an, dass sich die prozentuale Standardabweichung σ der mittleren Dehnungsmessung zu $\sigma = {}^{d}/_{l}$ ergibt, wobei d der Durchmesser des Größtkorns des Betons und l die Basislänge der Dehnungsmessung ist. Unter der Annahme einer GAUSS'schen Normalverteilung der lokalen Dehnungen ergibt sich somit eine 99 %-ige Wahrscheinlichkeit, dass die tatsächliche mittlere Dehnung im Bereich von $\varepsilon = \varepsilon_m \pm 3 \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma$ liegt. Die optimale Wahl der Messlänge bei der Verformungsmessung ist daher wesentlich, da diese einen unmittelbaren Einfluss auf das Messergebnis und somit auf die phänomenologische Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens hat.

Da sich bei mehraxialen Versuchen strukturelle Vorgänge experimentell nur schwer bestimmen und strukturorientierte Modelle sich somit nur bedingt aufstellen lassen, erfolgt die Beschreibung des Materialverhaltens vornehmlich phänomenologisch. Daher wird im Folgenden lediglich die phänomenologische Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens näher betrachtet.

2.1.5.2 Linear-elastisches Materialverhalten

Allgemeines

Zur phänomenologischen Beschreibung des linear-elastischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens eines anisotropen Materials kann das verallgemeinerte HOOKE'sche Gesetz nach Gl. (2.1) verwendet werden. Dabei werden die Verzerrungen und Spannungen mit der Nachgiebigkeitsmatrix in Beziehung gesetzt, deren 21 unabhängige Komponenten bekannt sein müssen.

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \end{Bmatrix}}_{\text{Verzerrungen}} = \underbrace{\begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & D_{1112} & D_{1123} & D_{1131} \\ & D_{2222} & D_{2233} & D_{2212} & D_{2223} & D_{2231} \\ & & D_{3333} & D_{3312} & D_{3323} & D_{3331} \\ & & & D_{1212} & D_{1223} & D_{1231} \\ & & & & D_{2323} & D_{2331} \\ sym. & & & & & D_{3131} \end{bmatrix}}_{\text{Nachgiebigkeitsmatrix}} \underbrace{\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix}}_{\text{Spannungen}} \tag{2.1}$$

Wird für das Materialverhalten Orthotropie, transversale Isotropie oder Isotropie angenommen, treten infolge von Beanspruchungen in den Hauptrichtungen keine Schubverzerrungen bzw. infolge

von Schubbeanspruchungen keine Hauptdehnungen auf. Somit vereinfacht sich das verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz für die anisotrope Beschreibung des Materialverhaltens nach Gl. (2.1) und die Zahl der unabhängigen Komponenten reduziert sich z. B. für Orthotropie gemäß Gl. (2.2) auf neun.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{1212} & 0 & 0 \\ & & & & D_{2323} & 0 \\ sym. & & & & & D_{3131} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix} \tag{2.2}$$

Ausgehend davon, dass sich Beton auch beim Auftreten von Gefügeschädigungen bzw. Rissen orthotrop verhält und Beanspruchungen infolge der Versuchsdurchführung lediglich in den Hauptrichtungen eingetragen werden, ergeben sich die Schubverzerrungen zu Null. Die Gl. (2.2) vereinfacht sich weiter zu Gl. (2.3) und die Zahl der Unabhängigen reduziert sich auf sechs.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ & D_{22} & D_{23} \\ sym. & & D_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \tag{2.3}$$

Isotropie

Bei isotropem Materialverhalten ergeben sich die Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix aus den Materialkennwerten Elastizitätsmodul E und Querdehnzahl ν, die für alle Hauptrichtungen in diesem Fall gemäß Gl. (2.4) gleich groß sind. Beim Tauschen der Beanspruchungen in den Hauptrichtungen ergeben sich somit die gleichen Verformungszustände, wenn hierbei ebenfalls die vertauschten Richtungen betrachtet werden.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \tag{2.4}$$

Wird von einem isotropen Materialverhalten ausgegangen, erfolgt die Beschreibung nur von den zwei Unabhängigen E und ν. Für die Auswertung von Versuchen bedeutet dies, dass bei der Messung von Spannungs-Dehnungs-Linien in allen drei Hauptrichtungen für die Bestimmung dieser zwei Materialparameter drei Gleichungen zur Verfügung stehen und das zu lösende Gleichungssystem überbestimmt ist.

Orthotropie

Bei orthotropem Materialverhalten wird angenommen, dass das Material in jeder Hauptrichtung unterschiedliche Eigenschaften besitzt. Die Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix und damit die in den einzelnen Richtungen auftretenden Elastizitätsmoduli und Querdehnzahlen sind gemäß Gl. (2.5) verschieden. Einschränkend wird dabei jedoch vorausgesetzt, dass bei einem Vertauschen

einer Beanspruchung in Hauptrichtung und einer orthogonal dazu betrachteten Verformung entsprechend gleiche Ergebnisse erhalten werden, weshalb die Nachgiebigkeitsmatrix symmetrisch sein muss.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \tag{2.5}$$

Das Materialverhalten wird somit von sechs unbekannten Materialparametern beschrieben, die anhand von Versuchswerten zu bestimmen sind. Für die Auswertung von gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien bedeutet dies, dass zur Bestimmung der sechs Unbekannten nur drei Gleichungen zur Verfügung stehen und das zu lösende Gleichungssystem unterbestimmt ist.

Von van Mier [123] wurde bei einaxialen Druckversuchen an Beton mit einer Belastung in und senkrecht zur Betonierrichtung unterschiedliches Materialverhalten beobachtet. Er erklärte dies mit der Ansammlung von Wasser unterhalb einzelner Zuschlagskörner. Nach dem Austrocknen der Probe traten infolgedessen zwischen Zuschlag und Zementstein größere Verbundstörungen an den Flächen auf, an denen sich viel Wasser anlagerte. Je nach Belastungsrichtung stellte sich hierdurch ein unterschiedliches Verformungsverhalten ein, was bedeutet, dass der Beton wenigstens als transversalisotropes Material anzusehen ist, bei dem die Betonierrichtung gegenüber den beiden orthogonal dazu stehenden Richtungen ein anderes Spannungs-Dehnungs-Verhalten zeigt. Weiterführende systematische Untersuchungen zum Einfluss der Zuschlagsgröße und -form auf diesen Effekt aus der Literatur sind jedoch nicht bekannt. Vermutlich ist der von van Mier beschriebene Effekt jedoch in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung unterschiedlich stark ausgeprägt und kann ggf. bei der Beschreibung des Materialverhaltens vernachlässigt werden.

Bei kurzfaserbewehrtem Beton kann ein weiterer Effekt auftreten, der ein transversalisotropes oder orthotropes Materialverhalten begünstigt bzw. hervorruft. Infolge eines möglichen Ausrichtens der Kurzfasern im noch plastischen Beton während des Herstellungsprozesses kann eine ungleiche Verteilung des Fasergehaltes je Hauptrichtung auftreten, was in den einzelnen Hauptrichtungen ein unterschiedliches Last-Verformungs-Verhalten hervorruft. Speck [118] ermittelte beispielsweise für einen untersuchten ultrahochfesten Grobkornbeton einen Faseranteil von 20% für die Einfüllrichtung beim Betonieren und jeweils 40% für die zwei dazu orthogonal stehenden Richtungen.

Neben dem Auftreten der Orthotropie infolge des Herstellungsprozesses im noch unbelasteten Material kann sich in einem anfänglich isotropen Beton durch die ablaufende Gefügeschädigung unter einer Beanspruchung eine belastungsinduzierte Orthotropie entwickeln. Grundsätzlich konnte dieser Effekt in experimentellen Untersuchungen beobachtet werden, wobei infolge der einsetzenden Mikrorissbildung im Betongefüge eine Änderung der Materialkennwerte hervorgerufen wird. Kupfer [57] zeigte z. B. mit seinen zweiaxialen Versuchen an Normalbeton, dass unterhalb der Elastizitätsgrenze die Materialkennwerte E und ν von der Beanspruchung unabhängig sind und konstant bleiben, sich mit fortschreitender Rissbildung im Betongefüge jedoch ändern. Dies führt dazu, dass die Spannungs-Dehnungs-Linie von einem linearen in einen nichtlinearen Verlauf übergeht. Führt die Mikrorissbildung vom Belastungsverhältnis unabhängig zu einer gleichmäßigen Schädigung in allen drei Richtungen bleibt das Material isotrop, wogegen bei einer lastabhängigen Schädigung je Richtung ein orthotropes Verhalten auftritt.

2.1.5.3 Nichtlineares Materialverhalten

Ausgehend von einem isotropen Material kann die Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens unter Beibehaltung der Form des verallgemeinerten HOOKE'schen Gesetzes durch die Modifikation der Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix in Abhängigkeit der Beanspruchung erfolgen. Dabei lassen sich die Materialparameter für jedes gemessene Belastungsniveau aus experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungs-Linien mittels Regression ermitteln. Anschließend ist es möglich, den Verlauf der Änderung der Materialparameter mit einer sogenannten Schädigungsfunktion zu beschreiben und diese in das verallgemeinerte HOOKE'sche Gesetz für isotropes Materialverhalten zu implementieren.

Tritt anstelle der Isotropie eine belastungsinduzierte Orthotropie auf, kann aus den experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungs-Linien die Änderung der Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix nicht ermittelt werden, da das Gleichungssystem unterbestimmt ist. Anstelle dessen werden Ansätze für die Beschreibung der Änderung der Materialparameter verwendet, deren Freiwerte sich durch eine Regression berechnen lassen. Dabei können im Vergleich zur isotropen Schädigung mehr Freiwerte Eingang in die Berechnung finden, da ggf. auch mehrere Schädigungsfunktionen für die Beschreibung des Materialverhaltens benötigt werden. Im Folgenden wird beispielhaft ein kurzer Überblick über mögliche Beschreibungen des nichtlinearen Materialverhaltens gegeben, die grundsätzlich auf der Änderung der Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix des verallgemeinerten HOOKE'schen Gesetzes beruhen.

Für die Beschreibung des Materialverhaltens unter zweiaxialer Beanspruchung wählte KUPFER [57] einen isotropen Ansatz, der auf einem hydrostatischen und einem deviatorischen Anteil der Dehnungen beruht. Hierfür substituierte er die beiden Materialkennwerte E und ν und führte statt dessen einen von der Beanspruchung abhängigen Sekantenkompressionsmodul K_S nach Gl. (2.6) für den hydrostatischen - und einen Sekantenschubmodul G_S nach Gl. (2.7) für den deviatorischen Anteil der Verformungen ein.

$$K_S = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \tag{2.6}$$

$$G_S = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \tag{2.7}$$

Beide Größen lassen sich aufgrund des gewählten isotropen Ansatzes durch Regression aus den Versuchswerten bestimmen und wurden von KUPFER zur Auswertung auf den Kompressionsmodul K_0 bzw. Schubmodul G_0 der einaxialen Referenzversuche normiert. Die sich in Abhängigkeit der Belastung ergebenden Verläufe der beiden Größen K_S und G_S können nach Gl. (2.8) und Gl. (2.9) berechnet werden, woraus sich anschließend die Materialparameter E und ν durch Umstellen der Gl. (2.6) und Gl. (2.7) bestimmen lassen.

$$\frac{G_S}{G_0} = 1 - a \left(\frac{\tau_0}{\beta_p} \right)^m \tag{2.8}$$

$$\frac{K_S}{K_0} = \frac{\frac{G_S}{G_0}}{exp\left[-(c \cdot \gamma_o)^p\right]} \tag{2.9}$$

Die Freiwerte a, m, c und p ergeben sich dabei aus der Regression zwischen den rechnerisch und experimentell ermittelten Versuchskurven. γ_0 gibt den Wert der Oktaederschubdehnung an und

lässt sich ebenfalls mit den Freiwerten a und m beschreiben. Mittels der Oktaederschubspannung τ_0, die auf die einaxiale Prismendruckfestigkeit β_p normiert wird, stellte KUPFER die Abhängigkeit zur aufgebrachten Beanspruchung und somit zu seinem Versuchsablauf her. Bei der Nachrechnung der in den zweiaxialen Versuchen gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien ergaben sich bis zur Maximalbeanspruchung im Allgemeinen gute Übereinstimmungen zwischen den experimentellen und den rechnerischen Kurven.

Ähnliche Ansätze, jedoch für dreiaxiale Belastungen, wurden z. B. von CEDOLIN ET AL. [12] und KOTSOVOS & NEWMAN [54] verwendet. Sie beschrieben das Materialverhalten ebenfalls mit einem veränderlichen Kompressions- und Schubmodul, deren Verläufe in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses und der Beanspruchung bekannt sein mussten und aus Versuchsdaten ermittelt wurden. Bei Beschreibungen, wie von KUPFER, CEDOLIN ET AL. und KOTSOVOS & NEWMAN, treten die Schädigungsansätze der Materialparameter nicht explizit auf, weshalb eine direkte Aussage zum Maß der Schädigung nicht möglich ist.

Bei der Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens mittels Schädigungsfunktionen, die z. B. Werte zwischen 1 für ungeschädigt und 0 für voll geschädigt aufweisen, können die ursprünglichen Materialparameter E und ν mit diesen Funktionen multipliziert werden. Eine derartige Schädigungsfunktion für Beton unter einer einaxialen Zugbeanspruchung leitete BACHMANN [5] in seiner Arbeit her. Er entwickelte ein Materialgesetz gemäß Gl. (2.10) für ein auf Zug beanspruchtes Element, bei dem das nichtlineare Verformungsverhalten durch die Abnahme des Elastizitätsmoduls hervorgerufen wird.

$$\sigma(\varepsilon) \;=\; \varepsilon \cdot E \cdot exp\left[-\left(\frac{\varepsilon-\varepsilon_0}{\delta}\right)^{\gamma}\right] \tag{2.10}$$

Hierin sind δ und γ Formbeiwerte für das Schädigungsmaß und ε_0 die Dehnung, ab der eine Schädigung durch die aufgebrachte Beanspruchung erfolgt. Entsprechend den Ergebnissen von u. a. KUPFER [57] ist ε_0 die auftretende Dehnung an der Elastizitätsgrenze und berücksichtigt eventuelle Vorschädigungen, die lediglich einen Einfluss auf die ursprünglichen Materialparameter haben.

Dem Ansatz nach Gl. (2.10) liegt eine WEIBULL-Verteilung zugrunde, die häufig zur Beschreibung von Lebensdauern oder Ausfallhäufigkeiten von spröden Werkstoffen verwendet wird, bei denen zwei mögliche Schädigungsvorgänge Berücksichtigung finden. Zum einen ist dies das Versagen des schwächsten Elementes der Gesamtstruktur unter der global aufgebrachten Belastung. Zum anderen wird ein definierter Bereich um ein bereits ausgefallenes Element herum betrachtet, in dem hinsichtlich der globalen Belastung eine erhöhte Beanspruchung infolge des ausgefallenen Elementes vorherrscht, die zum Versagen des schwächsten Elements dieses Bereiches führen kann.

RIZZI & CAROL [98] stellten auf Grundlage des HOOKE'schen Gesetzes ein Materialgesetz für ein schädigungsbasiertes orthotropes Materialverhalten von Beton auf (Gl. (2.11)), bei dem in jeder Hauptrichtung eine unabhängige Schädigung auftreten kann.

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\\ \varepsilon_3\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0\cdot\phi_1^2} & -\frac{\nu_0}{E_0\cdot\phi_1\cdot\phi_2} & -\frac{\nu_0}{E_0\cdot\phi_1\cdot\phi_3} \\ -\frac{\nu_0}{E_0\cdot\phi_2\cdot\phi_1} & \frac{1}{E_0\cdot\phi_2^2} & -\frac{\nu_0}{E_0\cdot\phi_2\cdot\phi_3} \\ -\frac{\nu_0}{E_0\cdot\phi_3\cdot\phi_1} & -\frac{\nu_0}{E_0\cdot\phi_3\cdot\phi_2} & \frac{1}{E_0\cdot\phi_3^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \sigma_3\end{Bmatrix} \tag{2.11}$$

Mit dem Ansatz von RIZZI & CAROL zur Beschreibung des Materialverhaltens und der von BACHMANN hergeleiteten Schädigungsevolution entwickelten u. a. KITZIG [48] bzw. KITZIG & HÄUSSLER-

Combe [49] eine Materialbeschreibung für ein lastinduziertes orthotropes Materialverhalten von Beton, bei dem in jeder Hauptrichtung eine unabhängige Schädigung auftreten kann (Gl. (2.12)). Hierin definieren die Formbeiwerte ε_d und g_d den Verlauf der Schädigungsevolution bzw. der Änderung der Materialkennwerte und könnten somit ggf. aus experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \phi_i(\kappa_{di}) &= \sqrt{1 - D_i(\kappa_{di})} \\ D_i(\kappa_{di}) &= \begin{cases} 0 & |\kappa_{di}| \leq |\varepsilon_{d0}| \\ 1 - exp\left[- \left(\frac{|\kappa_{di}| - |\varepsilon_{d0}|}{\varepsilon_d} \right)^{g_d} \right] & |\kappa_{di}| > |\varepsilon_{d0}| \end{cases} \end{aligned} \tag{2.12}$$

Für die Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens von Beton unter mehraxialer Beanspruchung ist es daher wesentlich, aus den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien eine Vielzahl an Informationen über die Entwicklung der Materialparameter in Abhängigkeit der aufgebrachten Beanspruchung zu gewinnen. Nur hierdurch kann der Verlauf der Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix in Abhängigkeit der Beanspruchung hinreichend genau beschrieben werden.

2.1.5.4 Ermittlung des Verlaufs der Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix aus experimentellen Daten

Das nichtlineare Materialverhalten tritt infolge von Schädigungsprozessen im Betongefüge auf, die durch die Beanspruchung hervorgerufen werden. Wird eine Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen auf Grundlage des verallgemeinerten Hooke'schen Gesetzes angestrebt, müssen sich somit die Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix in Abhängigkeit der Beanspruchung ändern. Deren Verläufe sind jedoch zunächst unbekannt. Ausgehend von einer Beanspruchung in den Hauptrichtungen liegen somit drei Bestimmungsgleichungen für die Ermittlung der Materialparameter in Abhängigkeit des Belastungsniveaus aus den experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungs-Linien vor. Speziell unter der Annahme einer sich einstellenden Orthotropie ist das unterbestimmte Gleichungssystem nicht eindeutig lösbar, weshalb von verschiedenen Forschern Wege gesucht wurden, trotzdem grundlegende Kenntnisse über die Entwicklung der einzelnen Materialparameter zu erhalten.

Kupfer [57] ermittelte für zweiaxiale Zugversuche aus den an scheibenförmigen Probekörpern gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien die Materialparameter für einen quasi-orthotropen Ansatz für das Materialverhalten. Dabei nutzte er aus, dass bei zweiaxialen Belastungsversuchen eine Spannungskomponente gleich Null ist und sich die Zahl der Unbekannten der Nachgiebigkeitsmatrix in Gl. (2.5) von sechs auf vier gemäß Gl. (2.13) reduziert. Da weiterhin nur drei Bestimmungsgleichungen zu Verfügung stehen, führte Kupfer die Vereinfachungen nach Gl. (2.14) bzw. nach Gl. (2.15) ein und reduzierte somit die Zahl der Unbekannten weiter, so dass das verbleibende Gleichungssystem gelöst werden konnte.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_2} \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{Bmatrix} \tag{2.13}$$

$$\frac{\nu_1}{E_1} = \frac{\nu_2}{E_2} \tag{2.14}$$

$$\nu_1 = \nu_2 = \nu \tag{2.15}$$

Zur Bestimmung ausgewählter Materialparameter und bekannter phänomenologischer Grenzen bei mehraxialen Beanspruchungen führten Launay et al. [64] bzw. Launay & Gachon [62, 63] und Gachon [31] Versuche durch, bei denen die Belastung nur teilweise proportional aufgebracht wurde. Zwischen den Abschnitten, in denen eine proportionale Belastung erfolgte, gab es Bereiche, in denen nur eine Belastungsrichtung gesteigert wurde, um bei differentieller Betrachtung ausgewählte Materialparameter für orthotropes Materialverhalten nach Gl. (2.16) bestimmen zu können. Da sich bei der differentiellen Betrachtung unter der Vorgabe differentiell unveränderter Spannungskomponenten, wie z. B. $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3 = 0$, die Zahl der Unbekannten der Nachgiebigkeitsmatrix nach Gl. (2.5) auf drei reduzierte, konnten diese somit direkt aus den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien bestimmt werden.

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\sigma_3 \end{Bmatrix} \tag{2.16}$$

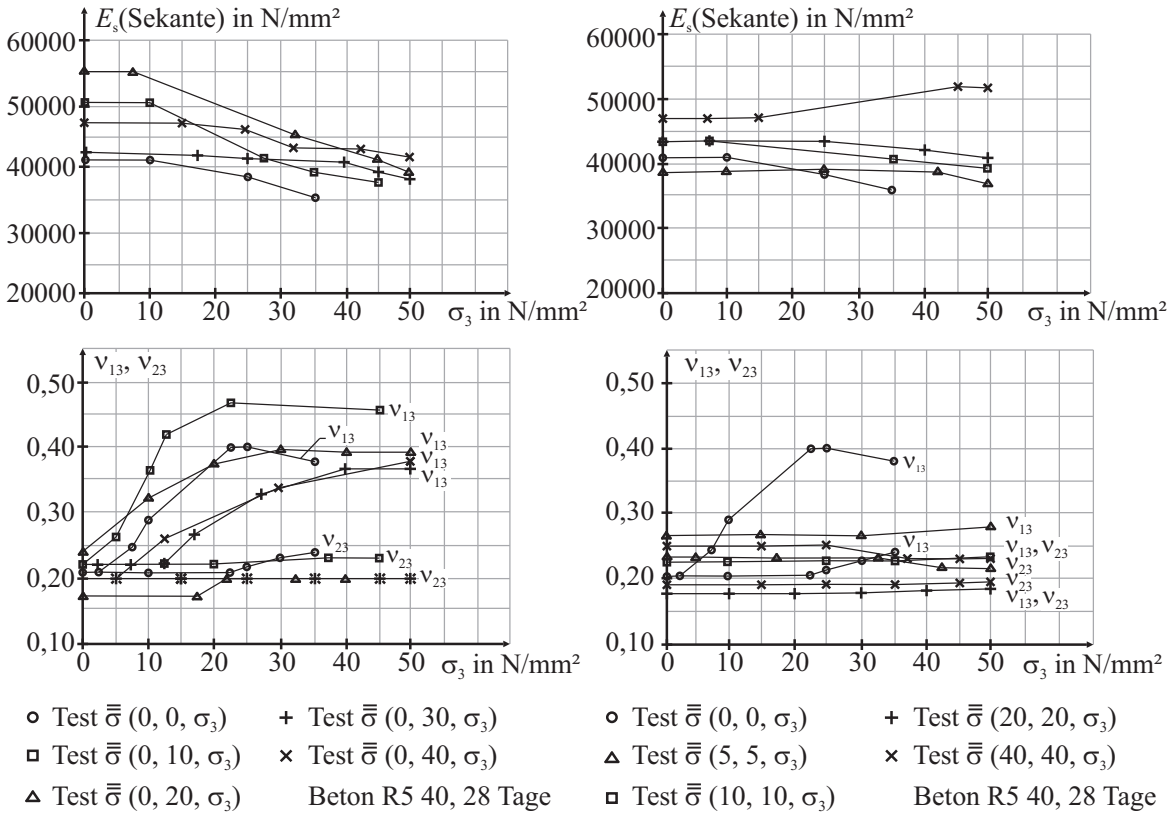
Abbildung 2.21 zeigt die ermittelten Materialparameter für zweiaxiale und dreiaxiale Belastungsversuche mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen. Die Auswertung ergab wie bei Kupfer, dass das aufgebrachte Spannungsverhältnis im linearen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Linien keinen Einfluss auf die Materialparameter hat, obwohl die Werte zum Teil sehr große Streuungen aufwiesen.

Weiterhin ist ersichtlich, dass bei den ermittelten Querdehnzahlverläufen wesentliche Unterschiede zwischen den zweiaxialen und dreiaxialen Versuchen herrschten. Während die Querdehnzahlen bei den zweiaxialen Versuchen vom Versuchsbeginn an anstiegen, blieben diese bei den dreiaxialen Versuchen bis zum Versuchsende nahezu konstant. Für die Entwicklung der Elastizitätsmoduli ergibt sich ein ähnliches Bild. Nach im Anfangsbereich konstanten Verläufen kam es bei den zweiaxialen Versuchen zu einem signifikanten Abfall der Werte, während diese bei den dreiaxialen Versuchen nur in einem sehr geringen Maße abnahmen.

Eine Bewertung dieser Vorgehensweise gestaltet sich schwierig, da die verwendeten differentiellen Spannungsänderungen und die Anzahl der bereits durchgeführten Lastpfadänderungen bei höheren Belastungsniveaus einen Einfluss auf die Materialparameter ausüben und somit ein direkter Bezug auf eine proportionale Laststeigerung in den einzelnen Richtungen nicht gegeben ist.

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass unter Annahme eines orthotropen Materialverhaltens bei mehraxialen Belastungsversuchen aus den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien nicht eindeutig auf die Materialparameter E und ν zu einem bestimmten Belastungsniveau geschlossen werden kann. Eine Möglichkeit, dennoch Materialparameter zu bestimmen, ist somit die Reduktion der Unbekannten bei der orthotropen Beschreibung des Materialverhaltens, z. B. durch Vorgabe von unbelasteten Hauptrichtungen.Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Verläufe einzelner Materialkennwerte abzuschätzen und die dabei eingeführten Freiwerte der mathematischen Beschreibungen

für die getroffenen Annahmen unter Einbeziehung der Messwerte verschiedener Belastungsniveaus eines Spannungsverhältnisses mittels Regression zu bestimmen.



a) Zweiaxiale Versuche

b) Dreiaxiale Versuche mit $\sigma_1 = \sigma_2$

Abbildung 2.21: Entwicklung des Sekantenelastizitätsmoduls und der Querdehnzahl nach Launay et al. [64]

2.2 Durchführung mehraxialer Belastungsversuche

2.2.1 Allgemeines

Zahlreiche Untersuchungen zum Materialverhalten von Beton unter mehraxialer Beanspruchung wurden bis zum heutigen Zeitpunkt an zylindrischen, scheibenförmigen und würfelförmigen Probekörpern durchgeführt. An den scheibenförmigen Proben wurden dabei zweiaxiale, an den zylindrischen und würfelförmigen Proben zwei- und dreiaxiale Spannungsverhältnisse untersucht.

Die erfolgreiche Durchführung von Versuchen mit dem Ziel, Spannungs-Dehnungs-Linien und Materialfestigkeiten zu bestimmen, stellt hohe Anforderungen an die Lasteinleitung und die Verformungsmessung. Die Lösung beider, technisch sehr anspruchsvollen Aufgaben wurde intensiv in den 1960er und 1970er Jahren diskutiert und vorangetrieben. Die gewonnenen Erkenntnisse, die bis heute zum großen Teil Bestand haben, werden in den folgenden zwei Abschnitten kurz zusammengefasst.

> *„Zu beachten ist noch, daß beim Druckversuche mit würfelförmigen Prüfkörpern die Fehlerquellen den Erfolg haben, eine größere Druckfestigkeit des zu prüfenden Stoffes vorzutäuschen, während sie beim Zugversuche umgekehrt die Zugfestigkeit zu klein erscheinen lassen.“* Föppl & Föppl [29]

2.2.2 Möglichkeiten der Lasteinleitung

Zum Aufbringen der Beanspruchung auf den Prüfkörper wurden in der Vergangenheit viele verschiedene Lasteinleitungsmittel angedacht bzw. verwendet. Die wesentliche Aufgabe besteht darin, einen homogenen Lasteintrag bei gleichzeitig unbehinderter Verformung der Probe zu gewährleisten. Hierfür wurden folgende Lasteinleitungsmittel bei Versuchen verwendet, die ausführlich u. a. von Dialer et al. [23], Linse [69] und Speck [118] beschrieben und diskutiert wurden:

- Starre Platten,
- Gleitfolien,
- Bürstensysteme,
- Stempelsysteme,
- Flüssigkeitsdruck.

Bei anfänglichen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die durch den Kontakt hervorgerufene Reibkraft parallel zur Probekörperoberfläche einen Einfluss auf die gemessene Festigkeit des Materials hat. Gerstle et al. [33] konnten zeigen, dass sich die gemessenen einaxialen Festigkeiten von würfelförmigen Probekörpern um bis zu 25% unterschieden, wenn die Lasteinleitungsmittel nahezu keine Reibung bzw. eine große Reibung an den Prüfkörperoberflächen erzeugten. Ein weiteres Ergebnis ihrer Untersuchungen ist eine Aussage über die auftretende Reibung an der Oberfläche der Probekörper bei der Verwendung unterschiedlicher Lasteinleitungsmittel, bezogen auf das System mit Flüssigkeitsdruck, welches den geringsten Einfluss hatte. Dies ist in Abbildung 2.22 grafisch dargestellt, woraus ersichtlich ist, dass mit zunehmender Steifigkeit der Lasteinleitungsmittel auch die auftretende Reibung zunimmt.

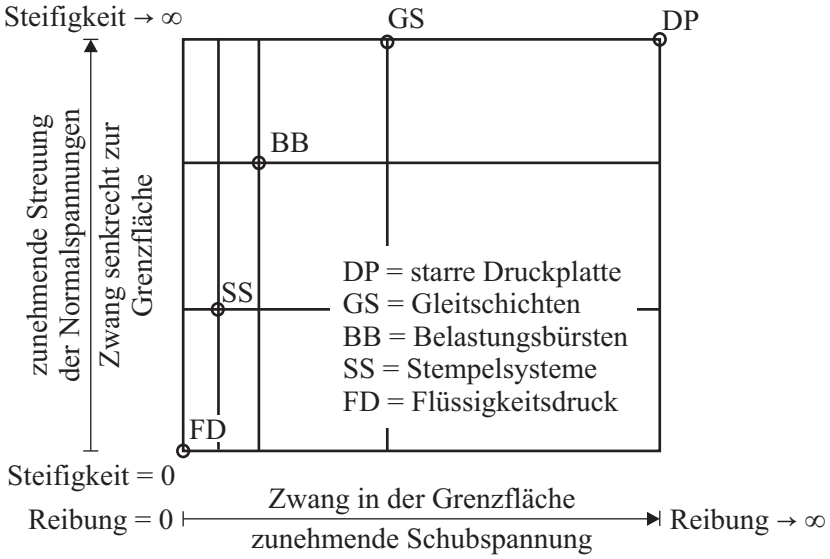


Abbildung 2.22: Einfluss auf die Reibkraft zwischen Prüfkörper und Lasteinleitung in Abhängigkeit des Lasteinleitungsmittels nach Gerstle et al. [33]

Von allen Systemen hatte sich in der Vergangenheit für die Untersuchung quaderförmiger Probekörper die Verwendung der von Hilsdorf [37] entwickelten Belastungsbürsten durchgesetzt. U. a. nutzten Hampel [36], Kupfer [57], Scheerer [107], Speck [118] und van Mier [123] Belastungsbürsten zur Durchführung ihrer mehraxialen Versuche an Normalbeton, hoch- und ultrahochfestem Beton und Leichtbeton.

Prinzipiell gelten die Untersuchungsergebnisse zu den Lasteinleitungsmitteln sowohl für Druck- als auch für Zugbeanspruchungen. Es ist jedoch zu beachten, dass bei Druckbeanspruchungen im Allgemeinen ein vollflächiger Kontakt zwischen Lasteinleitungsmittel und Belastungszylinder der Prüfmaschine besteht, während Zugbeanspruchungen punktuell über Schrauben- bzw. Bolzenverbindungen vom Belastungszylinder auf das Lasteinleitungsmittel übertragen und diese i. d. R. auf die Prüfkörperoberfläche geklebt werden. Somit bleibt speziell bei Zugbeanspruchungen zu prüfen, ob es innerhalb des Lasteinleitungsmittels zu einer ausreichenden Ausbreitung der Kraft kommt, so dass sich in der Kontaktfuge zum Probekörper eine konstante Spannungsverteilung einstellt.

2.2.3 Methoden der Verformungsmessung

Bei dreiaxialen Belastungsversuchen ist neben der maximalen Festigkeit ebenfalls das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von großem Interesse. Hierbei ergibt sich jedoch das Problem, dass alle Oberflächen des Probekörpers mit den Lasteinleitungsmitteln in Kontakt stehen und die Messmittel auf diesen nicht applizierbar sind (Abbildung 2.23). Zur Lösung dieses Problems wurden verschiedene Ansätze entwickelt, von denen auf die wesentlichen im Folgenden näher eingegangen wird. Ausführliche Gegenüberstellungen und Bewertungen der angewandten Verformungsmessmethoden werden z. B. von Dialer et al. [23, 24] und Linse [69] gegeben.

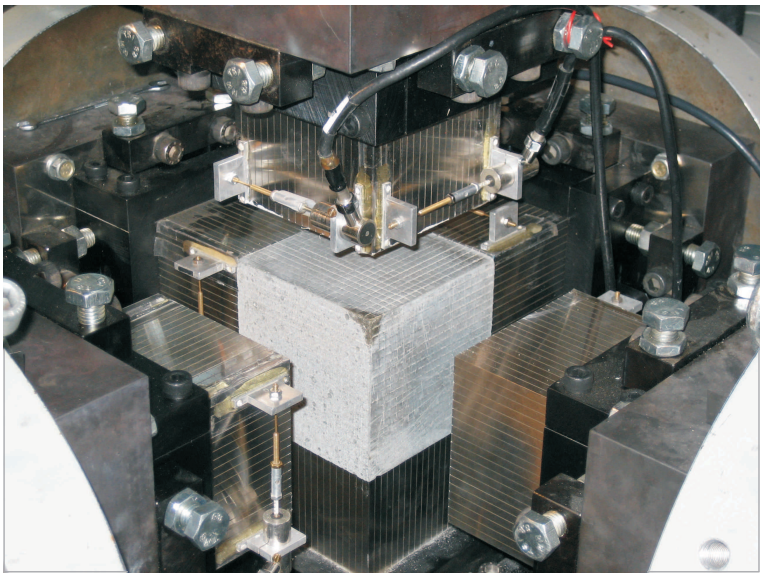


Abbildung 2.23: Blick in den Prüfraum einer Triaxialprüfmaschine zur Untersuchung würfelförmiger Probekörper (Ritter [94])

Hütter & Renz [42] entwickelten ein Dehnungsmesselement, das in den drei Normalenrichtungen Flächen aufwies, auf denen Dehnmessstreifen (DMS) appliziert wurden (Abbildung 2.24a). Damit das Messelement das Materialverhalten des Betons nur unwesentlich beeinflusst, muss das Material des Elementes ähnliche Verformungseigenschaften besitzen wie der Beton selbst. Für niedere Beanspruchungsniveaus, in denen ein lineares Verformungsverhalten auftritt, ist dies durchaus realisierbar. Im Gegensatz dazu ist es ab der einsetzenden Rissbildung und dem sich damit ändernden Materialverhalten schwierig, durch das Messelement keine Störstellen hervorzurufen, selbst wenn dieses aus Beton bestehen würde. Beim Aufbringen einer Zugbeanspruchung tritt zusätzlich zur Materialverformung das Problem der Übertragung der Zugspannungen in der Fuge zwischen Messelement und Beton auf. Speziell bei einer orthogonalen Ausrichtung der Messebene zur Zugbeanspruchung kann nicht gewährleistet werden, dass die Beanspruchung über die einzelnen Schichten des Messelementes und des Messmittels übertragen werden kann. Außerdem muss beim Einbau des

Elementes sichergestellt sein, dass es während der Herstellung der Probekörper zu keiner Lageabweichung und infolgedessen zu einer Dehnungsmessung außerhalb der Normalenrichtungen kommt.

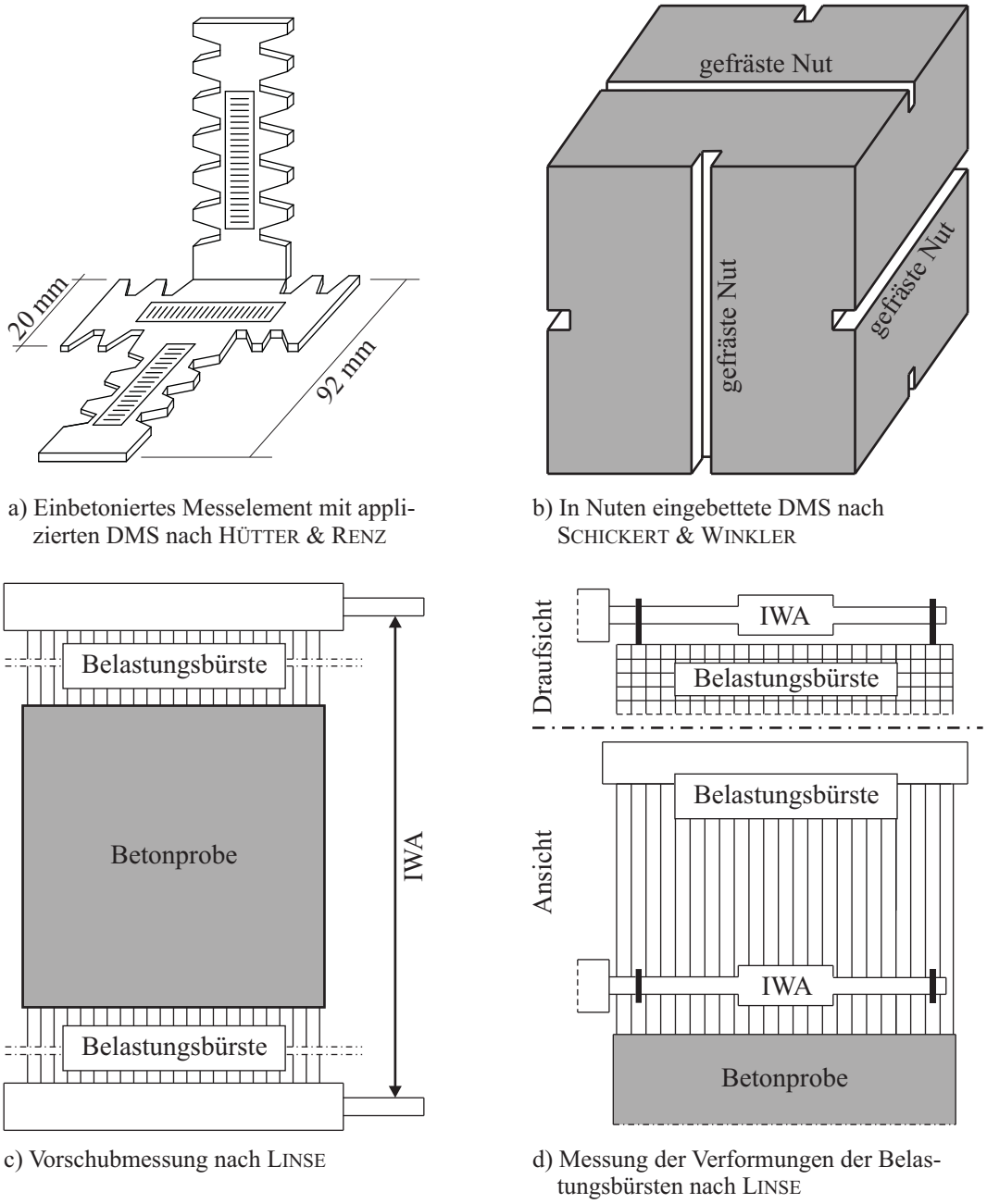
Eine ähnliche Vorgehensweise für die Bestimmung der Normaldehnungen und Schubverzerrungen im Inneren von großen Betonstrukturen existierte bereits in den 50er Jahren. Hierbei wurden bis zu neun Messelemente in unterschiedlichen Richtungen an einer Stelle in großen Betonquerschnitten, wie beispielsweise bei Talsperren, angeordnet und so die Verformungswerte ermittelt, vgl. Abbildung 2.25 und Huggenberger [43]. Unter der Annahme, dass im Bereich der Messmittel ein homogener Dehnungszustand herrsch, können aus den gemessenen Verformungen anschließend die Normaldehnungen und Schubverzerrungen berechnet werden. Mit dem gleichen Messprinzip, jedoch mit der wesentlich kleineren Messtechnik der Faser-Bragg-Gitter, konnten Schlattner et al. [111] im einaxialen Druckversuch an einem Probewürfel mit einer Kantenlänge von 20 cm die Normaldehnungen und Schubverzerrungen bestimmen.

Schickert & Winkler [110] frästen zur Bestimmung der Verformung von würfelförmigen Prüfkörpern in den Normalenrichtungen Nuten in ihre Proben, in die sie anschließend DMS einklebten (Abbildung 2.24b). Dabei ist die Nut, ähnlich dem Messelement, als Fehlstelle im Betongefüge anzusehen und übt einen Einfluss auf das Materialverhalten bzw. auf die Eintragung einer Zug- bzw. Druckbeanspruchung aus. Ein Vorteil gegenüber der von Hütter & Renz entwickelten Messmethode ist das Applizieren der Messmittel nach der Betonage, wodurch die exakte Lage der DMS in den Normalenrichtungen sichergestellt ist.

Die von Linse [68, 69] entwickelte Vorschubmessung bestimmt die Verformung des Probekörpers mittels induktiver Wegaufnehmer (IWA) in einer Normalenrichtung anhand der Relativverschiebung zwischen zwei gegenüber liegenden Lasteinleitungsmitteln (Abbildung 2.24c). Damit der Einfluss der Verformung der Lasteinleitungsmittel auf das Messergebnis gering ist, müssen diese sehr steif ausgebildet sein, was zum Teil im Widerspruch zu der Forderung einer Versuchsdurchführung mit unbehinderter Verformung des Betonprobekörpers steht. Bei einer Zugbeanspruchung werden zudem die Lasteinleitungsmittel meist auf die Probekörperoberfläche aufgeklebt, weshalb sich im Bereich der Verformungsmessung zwei weiche Schichten Klebstoff befinden, was ebenfalls der Grundlage der Vorschubmessung widerspricht.

Ebenfalls von Linse [68, 69] wurde erstmals die Messung der Verformung einer Probe über die Borsten von Lasteinleitungsbürsten mittels IWA angewandt (Abbildung 2.24d). Hierbei wurde ein IWA an den zwei äußeren Borsten einer Lasteinleitungsbürste befestigt und maß die Verformung zwischen den beiden Borsten senkrecht zu ihrer Belastungsrichtung. Für eine erfolgreiche Anwendung dieser Messmethode ist vorauszusetzen, dass die Borsten an ihren Aufstellflächen auf der Oberfläche des Probekörpers die gleichen Verformungen wie die Betonprobe aufweisen. Mittels der Biegelinie der einzelnen Borsten und dem Abstand zwischen IWA und Probekörperoberfläche lässt sich auf die Betonverformung schließen, vgl. u. a. Hampel [36] und Linse [69]. Neben der Vorschubmessung, die z. B. van Mier [123] anwendete, ist die Messung der Borstenverformung senkrecht zur Lasteinleitungsrichtung mittels IWA eine derzeit favorisierte Methode zur Bestimmung der Probekörperverformungen, wie sie u. a. von Hampel [36], Scheerer [107] und Speck [118] vorgenommen wurde.

Von Linse [69] wurden außerdem zwei weitere Messmethoden aufgeführt, mit denen die Verformungen direkt am Probekörper gemessen werden können. Zum einen ist dies die Messung der Verformungen an den Kanten des Probekörpers, wofür zwischen den anliegenden Lasteinleitungsmitteln Spalte vorhanden sein müssen. Da trotz der vorhandenen Spalte ein homogener Lasteintrag zu gewährleisten ist, schlug Linse vor, stattdessen einzelne Borsten der Belastungsbürsten für die Applikation der Messtechnik zu entfernen, um somit die fehlende Fläche für den Lasteintrag zu mi-



a) Einbetoniertes Messelement mit applizierten DMS nach Hütter & Renz

b) In Nuten eingebettete DMS nach Schickert & Winkler

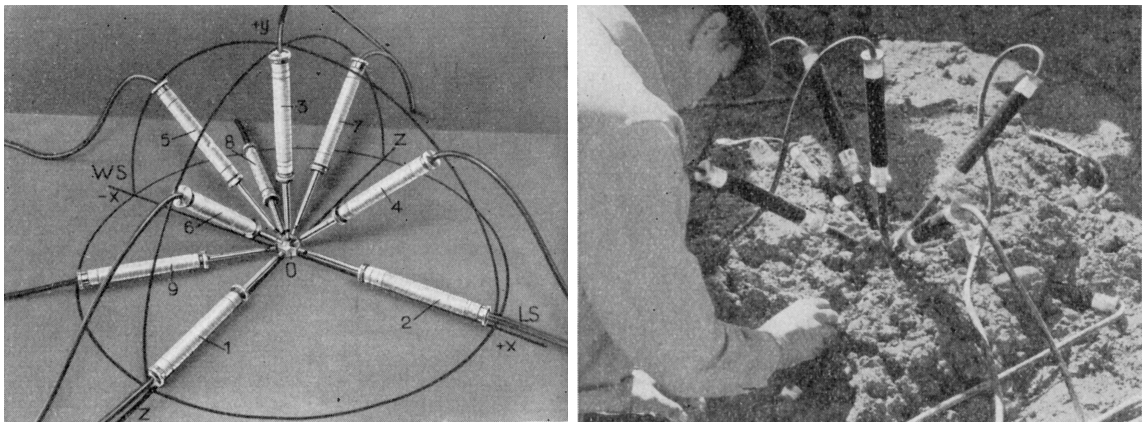
c) Vorschubmessung nach Linse

d) Messung der Verformungen der Belastungsbürsten nach Linse

Abbildung 2.24: Konventionelle Möglichkeiten der Dehnungsmessung an würfelförmigen Probekörpern bei mehraxialen Belastungsversuchen nach Hütter & Renz [42], Schickert & Winkler [110] und Linse [68, 69]

nimieren. Im Bereich der Messpunkte wurden jedoch nicht zu vernachlässigende Inhomogenitäten im Materialverhalten erwartet, weshalb diese Messmethode nicht zur Ausführung kam.

Zum anderen kann die Ermittlung der Verformungen eines mehraxial belasteten Probekörpers über die Verschiebungen der Probekörperoberflächen erfolgen, was u. a. Launay et al. [64] anwendeten. Ähnlich wie bei der Messung an den Kanten der Probe wurde ein kleiner Bereich in der Lasteinleitungsfläche vorgesehen, in dem die Lasteinleitungsmittel keine Kraft übertrugen und statt dessen ein Messmittel in Kontakt mit der Probekörperoberfläche stand. Dieser Bereich wurde mittels Bohrungen in den Lasteinleitungsmitteln realisiert und befand sich im Allgemeinen mittig in der Lasteinleitungsfläche und bei zwei gegenüber liegenden Oberflächen auf einer Achse in Normalenrichtung. Ebenfalls wie bei der Messung der Verformungen an den Probekörperkanten kann



a) Messelement mit neun Dehnungsaufnehmern

b) Messelement im Beton

Abbildung 2.25: Beispiel der Dehnungsmessung eines räumlichen Verzerrungszustandes aus Huggenberger [43]

in den Bereichen der Verformungsmessung ein verändertes Materialverhalten infolge der gestörten Lasteinleitung auftreten, weshalb sich diese Messmethode ebenfalls nicht durchsetzte.

Bei den derzeit angewandten Messmethoden zur Bestimmung der Probekörperverformungen bei mehraxialen Belastungsversuchen können Einflüsse im Messergebnis auftreten, die nicht vernachlässigbar sind, speziell bei kleinen Verformungen bzw. bei Beanspruchungen mit wenigstens einer Zugspannungskomponente, bei denen kleine Verformungen zu erwarten sind. Aus den Messergebnissen der bisher eingesetzten Methoden lässt sich ableiten, dass die Dehnungsmessung günstigerweise im Inneren des Probekörpers vorzunehmen ist. Die Messstellen selbst dürfen keinen Einfluss auf das Materialverhalten des Betons haben und die Anordnung der Messtechnik sollte derart erfolgen, dass lediglich lokal begrenzte Inhomogenitäten im Dehnungszustand bzw. beim Lasteintrag auftreten, die keine Einflüsse auf den Bereich der Messstelle bzw. auf die Verformungsmessung ausüben.

In vielen Versuchen konnte zu Belastungsbeginn ein Anlaufeffekt bzw. „Initial run“ in der Spannungs-Dehnungs-Linie beobachtet werden, vgl. u. a. Dialer et al. [24] und van Mier [123]. Im Bereich des Anlaufeffektes weist die Spannungs-Dehnungs-Linie einen flacheren Anstieg im Vergleich zum sich anschließenden linearen Bereich auf, für den der anfängliche Elastizitätsmodul bestimmt wird. Daher wird der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie im Bereich des Anlaufeffektes im Allgemeinen mit dem Anstieg des folgenden linearen Verlaufs korrigiert und um einen sich ergebenden Betrag $\Delta\varepsilon$ in den Ursprung des Koordinatensystems verschoben (Abbildung 2.26). Infolgedessen werden alle Dehnungswerte in Abhängigkeit des festgelegten Anstiegs des linearen Bereichs modifiziert.

Problematisch ist dieses Vorgehen vor dem Hintergrund, dass die Ursache des Anlaufeffektes nicht einwandfrei geklärt ist. Van Mier [123] führte den Anlaufeffekt auf ein Ausrichten der Lasteinleitungsmittel auf der Probekörperoberfläche zurück, wodurch im Versuch immer eine Vorlast benötigt wurde, bevor unverfälschte Ergebnisse bestimmt werden können. Im Gegensatz dazu begründete Glücklich [35] den Anlaufeffekt mit Verbundrissen, die u. a. durch Schwindvorgänge bereits vor einer Belastung im Probekörper auftreten und sich mit Belastungsbeginn zum Teil schließen, vgl. Abschnitt 2.1.2.1.

Hinsichtlich der Auswertung von Belastungsversuchen muss eine eindeutige Klärung der Ursache für den Anlaufeffekt erfolgen, da die Erklärungsansätze von van Mier und Glücklich einen gegensätzlichen Umgang mit den Versuchsdaten verlangen. So ist nach Glücklich keinesfalls eine Korrektur der Versuchswerte vorzunehmen, sondern vielmehr der Anlaufeffekt bei der Beschreibung

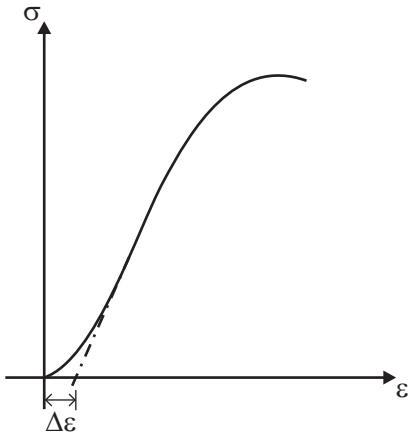


Abbildung 2.26: Korrektur des Anlaufeffektes nach VAN MIER [123]

des Materialverhaltens zu berücksichtigen. Im Gegensatz dazu ist nach VAN MIER eine Korrektur der Kurve zwingend erforderlich, da der beobachtete Effekt den Randbedingungen des Versuchs zuzuordnen ist und im tatsächlichen Materialverhalten nicht auftritt.

2.3 Zusammenfassung

Wirkt ein mehraxialer Spannungszustand auf einen Betonkörper, treten im Vergleich zur einaxialen Zug- bzw. zur einaxialen Druckbeanspruchung signifikante Unterschiede sowohl im Festigkeits- als auch im Verformungsverhalten auf. Die sich aus den maximalen Festigkeitswerten der mehraxialen Belastungsversuche ergebende Grenzfläche schließt sich dabei unter der hydrostatischen Zugbeanspruchung, wobei die Schnittlinie der Grenzfläche mit der Deviatorebene in Richtung dieser Beanspruchung eine dreieckige Form annimmt. Die Gestalt der Grenzfläche in Richtung der hydrostatischen Druckbeanspruchung kann demgegenüber aus den verfügbaren Versuchsdaten nicht eindeutig abgeleitet werden und ist daher vom verwendeten mathematischen Ansatz abhängig. Es gibt Beschreibungen, bei denen sich die Grenzfläche mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil in der Belastung immer weiter öffnet und somit keine hydrostatische Druckfestigkeit existiert, vgl. OTTOSEN [91]. Im Gegensatz dazu schließt sich z. B. nach WILLAM & WARNKE [127] die Grenzfläche auch unter der hydrostatischen Druckbeanspruchung und die Festigkeitssteigerung gegenüber der einaxialen Druckfestigkeit ist endlich. Für die Schnittlinie der Grenzfläche mit der Deviatorebene deuten die Versuchsergebnisse darauf hin, dass diese in Richtung der hydrostatischen Druckbeanspruchung eine runde Form annimmt, was im Allgemeinen von den Ansätzen zur Beschreibung der Grenzfläche wiedergegeben wird. Werden die auf die einaxiale Druckfestigkeit bezogenen mehraxialen Festigkeitswerte unterschiedlicher Betonfestigkeitsklassen verglichen, nehmen die Festigkeitssteigerungen mit Zunahme der einaxialen Festigkeit ab.

Neben der maximalen Festigkeit existieren weitere charakteristische Punkte im Materialverhalten, wie z. B. die Elastizitätsgrenze und das Volumenminimum der Probekörper. Derartige Merkmale, die sich aus bei Versuchen gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien ableiten lassen, werden im Gegensatz zur maximalen Festigkeit in der Literatur jedoch nur wenig diskutiert. Die hierzu bisher gewonnenen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Gestalt dieser Grenzflächen ähnlich der Gestalt der Grenzfläche der maximalen Festigkeit ist.

Die Beschreibung des nichtlinearen Verformungsverhaltens von Beton unter einer mehraxialen Beanspruchung kann auf Grundlage des verallgemeinerten HOOKE'schen Gesetzes mit veränderlichen Materialparametern Elastizitätsmodul und Querdehnzahl erfolgen. Mit der Annahme eines isotro-

pen Materialverhaltens des Betons über den gesamten Beanspruchungsbereich ist die Ermittlung der Materialparameter zugehörig zu einem Belastungsniveau aus den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien mittels Regression möglich. Mit den berechneten Werten lässt sich anschließend ihr Verlauf in Abhängigkeit der Beanspruchung beschreiben. Wird im Gegensatz dazu ein orthotropes Materialverhalten angenommen, müssen für die Ermittlung der Änderungen der Materialkennwerte in Abhängigkeit der Beanspruchung mathematische Ansätze vorgegeben und deren Freiwerte mittels Regression über den gesamten Verlauf der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien bestimmt werden.

Die experimentelle Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Beton unter mehraxialer Beanspruchung stellt dabei hohe Anforderungen an die Versuchstechnik und die Verformungsmessung, deren Funktionalität in der Vergangenheit hauptsächlich für dreiaxiale Druckbeanspruchungen untersucht wurde. Bei der Anwendung der entwickelten Methoden auf die Durchführung mehraxialer Belastungsversuche mit wenigstens einer Zugkomponente in der Beanspruchung ist somit eine kritische Bewertung des Versuchsaufbaus, speziell hinsichtlich der Zugkraftübertragung und der Verformungsmessung notwendig.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Allgemeines

Im folgenden Kapitel wird auf die Eigenschaften des untersuchten Betons, die Versuchsdurchführung und die erzielten Ergebnisse der eigenen mehraxialen Versuche an einem ultrahochfesten Beton eingegangen. Um dem Leser die Zuordnung einzelner Versuche zu erleichtern und die Motivation für die angewandten Methoden und Techniken zu veranschaulichen, wird in Tabelle 3.1 ein Überblick über das Versuchsprogramm gegeben. Detailliertere Ausführungen, wie etwa die untersuchten Spannungsverhältnisse $\alpha_1 \,/\, \alpha_2 \,/\, \alpha_3$ bzw. $\alpha_x \,/\, \alpha_y \,/\, \alpha_z$ der mehraxialen Belastungsversuche (Serie 1 bis 14) mit vorwiegender Zug-Druck-Druck-Beanspruchung, die den Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen bilden, werden in den einzelnen Unterkapiteln vorgenommen.

Tabelle 3.1: Überblick über das Versuchsprogramm

Betonier-serie	Gesamtanzahl Probekörper	Durchgeführte Versuche
1 bis 14	jeweils 21	- je 12 mehraxiale Belastungsversuche - je 6 einaxiale Referenzzugversuche - je 3 einaxiale Referenzdruckversuche
T1	21	- 9 einaxiale Zugversuche zur Untersuchung des Einflusses der Faserverteilung - 9 einaxiale Druckversuche zur Untersuchung des Einflusses der Faserverteilung - 3 Versuche zur Untersuchung der Zugkraftübertragung bei mehraxialen Belastungsversuchen
T2 bis T11	jeweils 6 bis 18	- Versuche zur Untersuchung der Zugkraftübertragung bei mehraxialen Belastungsversuchen mit unterschiedlichen Konfigurationen der Lasteinleitung (jeweils 3 Versuche)

3.2 Betonzusammensetzung und Probekörper

Für alle Versuche wurde ein ultrahochfester kurzfaserbewehrter Feinkornbeton verwendet, dessen Rezeptur in Tabelle 3.2 zusammengestellt ist. Die Untersuchung des Materialverhaltens unter mehraxialer sowie die Ermittlung von Referenzwerten unter einaxialer Beanspruchung erfolgte ausschließlich an würfelförmigen Probekörpern mit einer Kantenlänge von 100 mm, so dass keine Einflüsse infolge unterschiedlicher Probekörpergeometrien auftraten.

Die Betonage der Prüfkörper erfolgte in einem ZYKLOS ZK50 HE Zwangsmischer. Dabei wurden zuerst die Bestandteile Quarzsand, Feinquarz, Zement und Mikrosilika für 2 Minuten trocken gemischt und anschließend das Wasser und das Fließmittel zugegeben. Nach erneuter dreiminütiger Mischung wurden die Stahlfasern eingerieselt und es erfolgte wiederum eine dreiminütige Mischprozedur, bevor der Frischbeton in die Betonierformen eingebracht werden konnte. Die befüllten

Tabelle 3.2: Betonrezeptur

Bestandteil	$[\mathrm{kg/m^3}]$
Zement (CEM I 52,5R HS/NA)	800,00
Quarzsand (0,125/0,50 mm)	946,00
Feinquarz (Quarz I)	194,00
Mikrosilika	170,00
Fließmittel	44,30
Wasser	170,00
Stahlfasern 2,5 Vol.-% ($l = 15\,\mathrm{mm}$, $d = 0{,}9\,\mathrm{mm}$)	196,00

Betonierformen wurden im Anschluss auf einem Rütteltisch fixiert und bei 50 Hz für 90 s verdichtet. Dabei wurde die Fixierung durch eine Klemmung realisiert, damit es hierdurch zu keinem verstärkten Ausrichten der Fasern kommt, wie es beispielsweise bei Verwendung einer Magnethalterung auftreten könnte. Nach dem Verdichten der Prüfkörper wurden diese mit feuchten Tüchern und Folien abgedeckt, um ein Austrocknen zu verhindern.

Einen Tag nach der Betonage wurden die Prüfkörper ausgeformt und eine 24-stündige Wärmenachbehandlung bei maximal 90 °C Betontemperatur vorgenommen. Das zugehörige Temperaturregime der Ofentemperatur ist in Tabelle 3.3 angegeben. Für die Wärmenachbehandlung wurden die Prüfkörper feucht umwickelt und in Folien verpackt, damit die Proben während der gesamten Nachbehandlungsdauer in feuchter Umgebung lagerten. Nach der Wärmenachbehandlung hatten die Prüfkörper ihre Endfestigkeit erreicht, vgl. Kleiner et al. [50], so dass der Zeitpunkt der Prüfung keinen signifikanten Einfluss auf die maximale Festigkeit hat. Nach der Wärmenachbehandlung wurden die Proben bis zur Versuchsdurchführung in einer Klimakammer bei 20 °C und 65 % Luftfeuchte aufbewahrt.

Tabelle 3.3: Ofentemperaturregime der Wärmenachbehandlung

Dauer [min]	Heizrate [K/min]	Zieltemperatur [°C]
5	-	20
400	0,2	100
100	0	100
830	-0,1	17
10	0	17
1	4,99	20
34	0	20

Bevor die mehraxialen Versuche durchgeführt werden konnten, mussten drei der sechs Oberflächen des Würfels maschinell geschliffen werden. Diese waren die Betonieroberseite und die zwei parallelen Oberflächen, die senkrecht zur Betonierrichtung liegen und bei denen in keiner von beiden die Zuführung der Anschlusskabel der innen liegenden Messtechnik erfolgte (siehe Abbildung 3.20). Das Schleifen der Oberflächen war notwendig, damit ein vollständiger und gleichmäßiger Kontakt zwischen den Lasteinleitungsmitteln und dem Beton realisiert werden konnte. Die beiden senkrecht zur Betonierrichtung maschinell geschliffenen Oberflächen wurden nach dem Maschinenschliff nochmals händisch mit einem Schleifstein bearbeitet, um somit gegebenenfalls bereits gelockerte aber noch am Prüfkörper befindliche Gefügepartikel zu entfernen.

Die sehr sorgfältige Vorbehandlung der beiden händisch nachbearbeiteten Oberflächen wurde vorgenommen, da an diesen das Ankleben von Lasteinleitungsmitteln für eine Zugkraftübertragung erfolgte. Ziel war es, ein Versagen in bzw. nahe der Klebeschicht zu vermeiden. Die Ergebnisse durchgeführter Versuche mit dieser anfänglich angewandten Methode der Oberflächenvorbehandlung und mögliche Verbesserungen zur Übertragung von Zugbeanspruchungen auf den Beton werden ausführlich in Abschnitt 3.4.2 diskutiert.

3.3 Festbetoneigenschaften

3.3.1 Einfluss der Faserverteilung

Bei den Versuchsserien 1 bis 14 wurden zusätzlich zu den Prüfkörpern für mehraxiale Belastungsversuche neun Prüfwürfel für einaxiale Referenzversuche hergestellt. Bei diesen wurden neben den Spannungs-Dehnungs-Linien auch die Anteile des Stahlfaservolumens in den Richtungen x, y und z im Prüfkörper bestimmt. Die Faserauszählung, deren Ergebnisse in Tabelle 3.4 aufgeführt sind, erfolgte auf elektromagnetischer Basis. Die x-Richtung entspricht dabei der Richtung, in welcher beim Betonieren der Beton eingefüllt wurde (Betonierrichtung BR, $\parallel$) und die y- bzw. z-Richtung den entsprechend senkrecht ($\perp$) dazu stehenden Richtungen. Es ist ersichtlich, dass für die Serien 1 bis 9 der Faseranteil in x-Richtung etwas geringer ausfällt als in den Richtungen y und z, in denen die Fasern etwa gleiche Anteile aufwiesen. Dies stimmt mit den Beobachtungen von Speck [118] überein, die Versuche mit der gleichen Betonrezeptur durchführte. Im Gegensatz dazu war der Faseranteil in der x-Richtung bei den Serien 10 bis 14 höher als in den beiden anderen Richtungen, in denen die Verteilung erneut etwa gleich groß war. Eine mögliche Ursache hierfür kann in der zeitlichen Differenz zwischen den Betonagen der Serien 1 bis 9 und 10 bis 14 liegen, die ca. 8 Monate betrug. Innerhalb dieser Zeit könnten Veränderungen, z. B. durch die Luftfeuchte, in den Ausgangsstoffen des Betons aufgetreten sein, die zu der geänderten Faserverteilung führten.

Unabhängig von den Fasermessungen der Serie 1 bis 14 wurde bei der Serie T1 der Einfluss der Faserorientierung auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten untersucht, wobei die Betonage der Serie T1 direkt im Anschluss an die Betonage der Serie 9 erfolgte. Die Anzahl der Probekörper je Belastung und Belastungsrichtung ($\parallel$ zur BR und $\perp$ zur BR) sowie die zugehörigen Materialparameter, die anhand der in allen drei Richtungen mittels DMS gemessenen Dehnungen bestimmt wurden, sind in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Für die einaxiale Druck- bzw. Zugbeanspruchung kann kein signifikanter Unterschied bei der Belastung in den beiden untersuchten Richtungen festgestellt werden. Die größten Abweichungen treten im Elastizitätsmodul und der Querdehnzahl bei den Druckversuchen auf, wobei eine Belastung senkrecht zur Betonierrichtung größere Werte im Vergleich zur Belastung in Betonierrichtung liefert. Da die Werte der Belastungsversuche senkrecht zur Betonierrichtung generell höher sind als bei den Belastungsversuchen in Betonierrichtung, kann hier ein geringer Einfluss der Faserverteilung unterstellt werden.

In Abbildung 3.1 sind die Spannungs-Dehnungs-Linien als Mittelwertkurven der Versuche dargestellt. Bei einer Zugbeanspruchung sind diese für beide Belastungsrichtungen nahezu gleich, wobei es mit zunehmendem Belastungsniveau zu einer geringen Abweichung zwischen den beiden Kurven in der Belastungsrichtung kommt. Bei einer Druckbeanspruchung zeigen sich die Abweichungen, die auch schon bei den Materialparametern auftraten deutlicher, was zu geringen Abweichungen zwischen den Kurven in allen drei Dehnungsrichtungen führt. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Faserverteilung nur einen geringen Einfluss auf das Materialverhalten hat und

Tabelle 3.4: Faserverteilung in den einaxialen Referenzprobekörpern

Serie	x-Richtung [%] $\parallel$ zur BR	y-Richtung [%] $\perp$ zur BR	z-Richtung [%] $\perp$ zur BR
1	28,0	35,7	36,3
2	31,6	34,9	33,5
3	29,5	34,8	35,7
4	28,5	36,2	35,2
5	24,3	36,7	39,0
6	25,2	38,7	36,1
7	25,5	36,4	38,2
8	29,2	36,4	34,5
9	28,5	35,9	35,7
10	40,3	29,8	29,9
11	40,5	30,1	29,4
12	37,6	31,6	30,8
13	41,0	30,0	29,1
14	39,0	29,2	31,8
T1	25,7	37,2	37,1

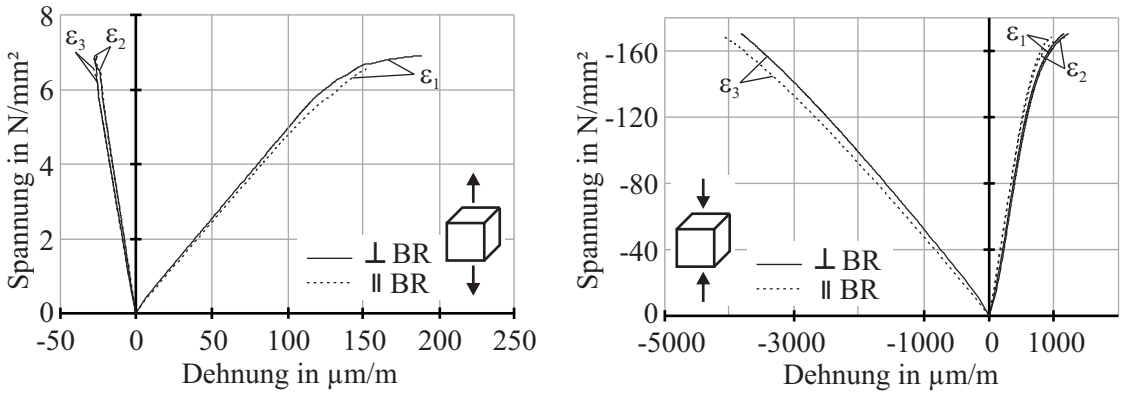
Tabelle 3.5: Materialkennwerte einaxialer Zug- und Druckversuche mit einer Beanspruchung $\parallel$ und $\perp$ zur Betonierrichtung

Versuch	Stk.	Richtung	Festigkeit $\left[\mathrm{N/mm^2}\right]$	E-Modul $\left[\mathrm{N/mm^2}\right]$	Querdehnzahl
Zug	6	$\parallel$ zur BR	6,55	48500	0,199
	3	$\perp$ zur BR	6,90	49900	0,201
Druck	3	$\parallel$ zur BR	-168,57	46700	0,197
	6	$\perp$ zur BR	-170,39	49900	0,252

somit vernachlässigbar ist. Für den linearen Bereich wird der verwendete Beton daher als isotropes Material angesehen.

3.3.2 Materialverhalten unter einaxialer Zug- und Druckbeanspruchung

Für die Ermittlung der Materialkennwerte des verwendeten Betons je Betoniercharge wurden jeweils neun einaxiale Referenzversuche für die Serien 1 bis 14 durchgeführt. Für die drei Druck- und sechs Zugversuche erfolgte neben der Bestimmung der Festigkeitswerte auch die Messung der Spannungs-Dehnungs-Linien mittels DMS in allen drei Normalenrichtungen, um den Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl zu bestimmen. Entsprechend den mehraxialen Belastungsversuchen erfolgte dabei die Druckbeanspruchung parallel zur Betonierrichtung und die Zugbeanspruchung senkrecht zur Betonierrichtung. Eine detaillierte Übersicht der Ergebnisse dieser Versuche wird in Anhang A.1 gegeben.

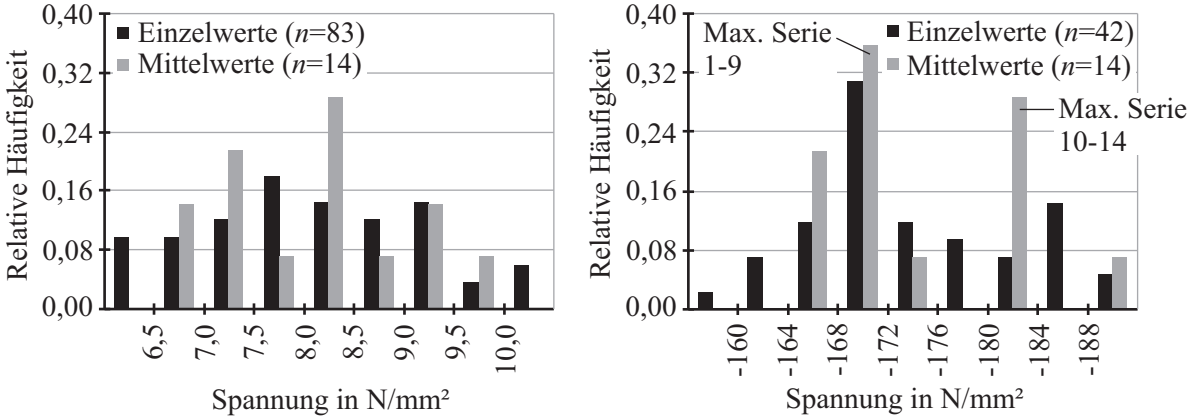


a) Einaxialer Zugversuch b) Einaxialer Druckversuch

Abbildung 3.1: Spannungs-Dehnungs-Linien der Referenzversuche für einaxiale Beanspruchungen ∥ und ⊥ zur Betonierrichtung

Festigkeit

Zur Ermittlung der Streubreite der Festigkeitswerte wurden die Ergebnisse der Zug- und Druckversuche in jeweils 9 Klassen eingeteilt, um die relativen Häufigkeitsverteilungen für die Einzelwerte aller Versuche und für die Mittelwerte der Betonierchargen zu bestimmen (Abbildung 3.2).



a) Einaxiale Zugversuche b) Einaxiale Druckversuche

Abbildung 3.2: Relative Häufigkeitsverteilung der Festigkeit der einaxialen Referenzversuche

Sowohl für die Druck- als auch für die Zugfestigkeiten kann aus den relativen Häufigkeitsverteilungen keine eindeutige Aussage über die Verteilungsfunktionen getroffen werden. Auffällig ist, dass bei der relativen Häufigkeitsverteilung der Mittelwerte der einaxialen Druckversuche zwei Maxima auftreten und in der Klasse von 176 N/mm^2 bis 180 N/mm^2 keine Werte liegen. Dies resultiert daraus, dass die mittleren Festigkeiten der Serien 1 bis 9 geringer sind als die mittleren Festigkeiten der Serien 10 bis 14. Somit tritt hier, wie bei der Faserverteilung (vgl. Abschnitt 3.3.1), vermutlich aufgrund des zeitlichen Abstandes der Betonagen ein Phänomen auf, welches derzeit nicht eindeutig geklärt werden kann. Ähnliches lässt sich für die einaxialen Zugversuche feststellen, wobei bei den Serien 1 bis 9 im Mittel höhere Festigkeiten als bei den Betonagen 10 bis 14 erreicht werden. Der Unterschied ist bei der gewählten Klasseneinteilung jedoch nicht erkennbar, da für jede Klasse Werte existieren. Die hierfür zugrunde liegenden mittleren Festigkeiten, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten je Serie sind in Tabelle 3.6 aufgeführt. Bei der Auswertung der mehraxialen Belastungsversuche wird durch den Bezug der mehraxialen Festigkeitswerte auf die einaxialen

Druckfestigkeiten je Betoniercharge das unterschiedliche Festigkeitsverhalten der Betonierserien 1 bis 14 berücksichtigt und ein entsprechender Einfluss eliminiert.

Tabelle 3.6: Streubreite der einaxialen Druck- und Zugfestigkeit innerhalb einer Betoniercharge unter der Annahme einer Gauss'schen Normalverteilung

Serie	Druckversuche				Zugversuche			
	Stk.	MW	$\sigma\left[\mathrm{N/mm^2}\right]$	v [%]	Stk.	MW	$\sigma\left[\mathrm{N/mm^2}\right]$	v [%]
1	3	-168,00	4,28	-2,5	5	9,55	1,34	14,0
2	3	-170,61	5,69	-3,3	6	9,34	1,12	12,0
3	3	-174,28	4,30	-2,5	6	8,32	0,44	5,3
4	3	-171,22	1,96	-1,1	6	9,14	0,58	6,4
5	3	-171,70	3,75	-2,2	6	8,12	0,84	10,4
6	3	-167,14	0,13	-0,1	6	8,08	0,86	10,7
7	3	-165,38	4,64	-2,8	6	8,81	0,52	5,9
8	3	-164,16	4,85	-3,0	6	7,84	0,81	10,4
9	3	-170,76	1,45	-0,9	6	8,50	0,70	8,2
10	3	-183,50	2,65	-1,4	6	6,72	0,52	7,8
11	3	-188,07	4,09	-2,2	6	7,30	1,24	17,0
12	3	-180,07	6,81	-3,8	6	7,36	0,75	10,2
13	3	-180,87	6,68	-3,7	6	6,61	1,36	20,6
14	3	-181,55	5,53	-3,0	6	7,20	0,51	7,1

Elastizitätsmodul und Querdehnzahl

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der rechnerischen Querdehnzahl erfolgt als Regression anhand der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien mittels Gl. (2.4) und der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in einem Bereich von 10 % bis 30 % der maximalen Festigkeit. Hierbei werden zum einen die Spannungs-Dehnungs-Linien der Einzelversuche und zum anderen die gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien (vgl. Abschnitt 3.6.3) der Versuche einer Betonierserie ausgewertet, woraus sich die in Tabelle 3.7 aufgeführten Mittelwerte der Materialparameter aller Versuche der Serien 1 bis 14 ergeben. Weiterhin sind in Tabelle 3.7 die Mittelwerte der Bruchdehnungen der drei Hauptrichtungen aufgeführt.

Die auf diesen beiden Wegen bestimmten Materialparameter nehmen nahezu gleiche Werte an. Zwischen den Materialparametern infolge einer Druck- bzw. Zugbeanspruchung treten ebenfalls keine wesentlichen Unterschiede auf. Lediglich bei den ermittelten Querdehnzahlen ergibt sich eine Abweichung von ca. 10 % zwischen der Zug- und der Druckbeanspruchung, die jedoch für die anschließende Betrachtung als vernachlässigbar angesehen wird. Somit wird die Annahme des isotropen Materialverhaltens im linearen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs bestätigt, wobei für Druck- und Zugbeanspruchungen gleiche Werte für die Materialparameter angenommen werden können. Der gewichtete Elastizitätsmodul aus den gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien beträgt $E_{iso} = 50400\,\mathrm{N/mm^2}$ und die zugehörige Querdehnzahl $\nu_{iso} = 0{,}23$.

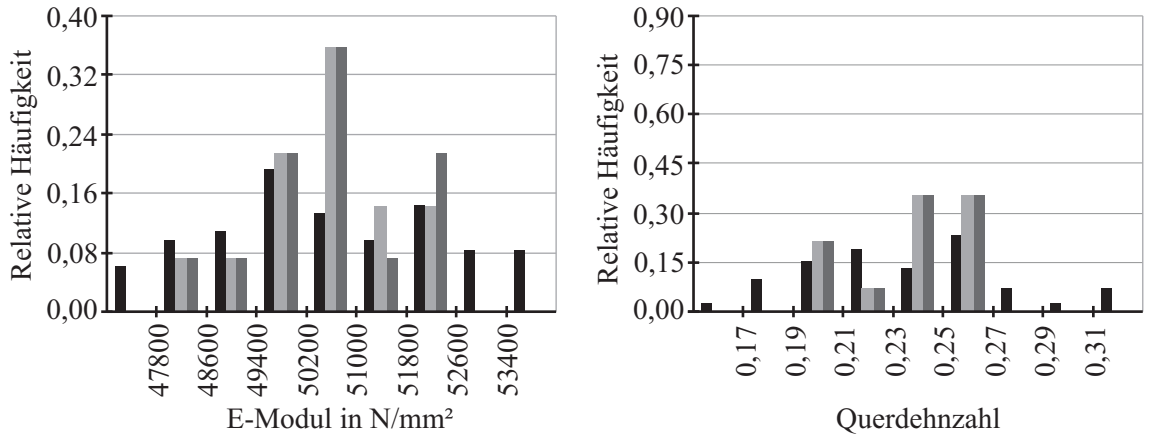
Um einen Überblick über die Streuungen der Materialparameter zu erhalten, sind in Abbildung 3.3 die relativen Häufigkeitsverteilungen ihres Auftretens angegeben. Neben den Mittelwerten für die beiden bereits vorgestellten Bestimmungsmethoden der Materialparameter sind die Ergebnisse der Einzelversuche dargestellt.

Tabelle 3.7: Mittelwerte der Materialparameter und Bruchdehnungen der einaxialen Referenzversuche

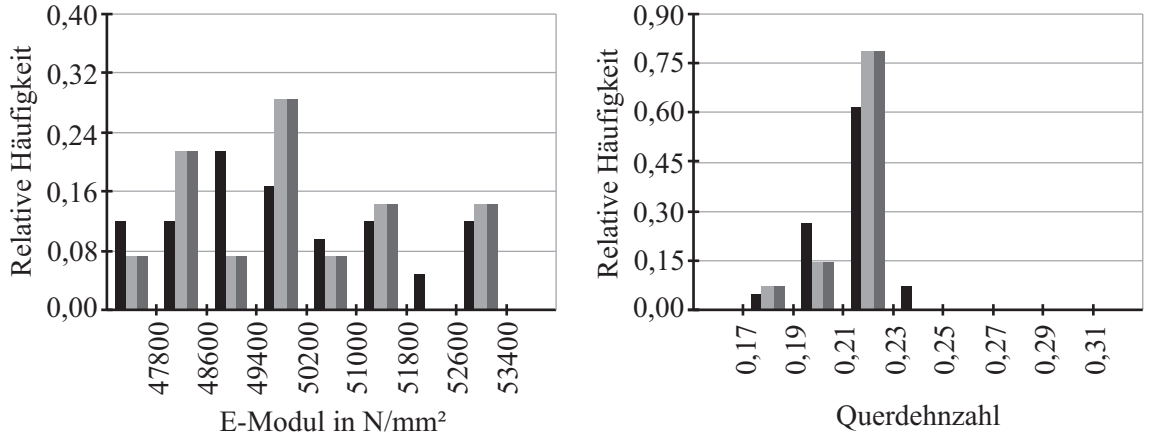
Beanspruchung	Serien	EW je Serie	E [N/mm^2]	ν [–]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]
Zug	14	6	50670 [1)] 50580 [2)]	0,238 [1)] 0,236 [2)]	169	-36	-36
Druck	14	3	49910 [1)] 49900 [2)]	0,213 [1)] 0,213 [2)]	998	993	-3965

[1)] ... Mittelwert aus den Spannungs-Dehnungs-Linien der Einzelversuche einer Serie
[2)] ... Wert aus den gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien einer Serie

Bei der Betrachtung des Elastizitätsmoduls der Einzelversuche unter einer Druck- bzw. Zugbeanspruchung ist ersichtlich, dass diese keine signifikanten Unterschiede in der Klassenhäufigkeit aufweisen und sich diese erst infolge der Mittelwertbildung zeigt. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Querdehnzahlen. Auffällig ist hierbei, dass bei den Zugversuchen das Auftreten einer kennzeichnenden Klassenhäufigkeit des Elastizitätsmoduls ausgeprägter ausfällt als bei den Druckversuchen und sich dies bei der Querdehnzahl umkehrt.



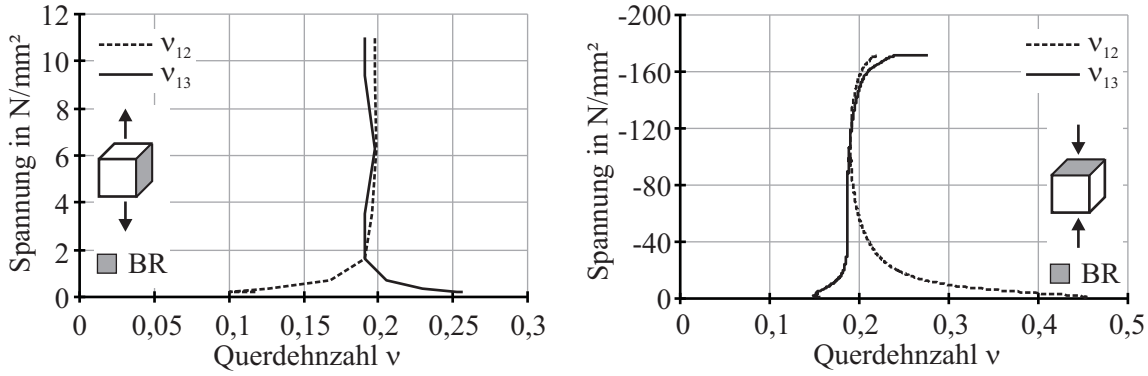
a) Einaxiale Zugversuche



b) Einaxiale Druckversuche

Abbildung 3.3: Relative Häufigkeitsverteilungen der Materialparameter

Neben der rechnerischen Ermittlung der Querdehnzahl nach Gl. (2.4) lässt sich die Querdehnzahl bei einaxialen Versuchen auch direkt aus den gemessenen Hauptdehnungen bestimmen. Hierfür werden die beiden senkrecht zur Belastungsrichtung gemessenen Dehnungen durch die Hauptdehnung in Belastungsrichtung geteilt, wodurch sich für jede unbelastete Richtung eine separate Querdehnzahl ergibt. Charakteristische Verläufe der derartig bestimmten Querdehnzahlen für die einaxialen Referenzversuche sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Sowohl bei einer Druck- als auch bei einer Zugbeanspruchung muss nach dem Belastungsbeginn erst ein bestimmtes Belastungsniveau überschritten werden, bis realistische Verläufe auftreten. Dieses Belastungsniveau kann dabei bis zu 20 % der maximalen Festigkeit betragen, lässt sich jedoch nicht auf einen konkreten Wert festlegen. Für Zugversuche ist ein quasi-konstanter Verlauf bis zum Erreichen der maximalen Beanspruchung typisch, während bei Druckversuchen ab ca. 80 % der Maximallast eine nichtlineare Zunahme der Querdehnzahl auftritt.



a) Einaxialer Zugversuch

b) Einaxialer Druckversuch

Abbildung 3.4: Charakteristischer Verlauf der Querdehnzahl bei einaxialen Belastungen

3.4 Versuchstechnik

3.4.1 Prüfmaschine

Die Durchführung aller Belastungsversuche erfolgte an einer aus einem einteiligen Stahlgussrahmen bestehenden Triaxialprüfmaschine. Je Belastungsrichtung wird die Beanspruchung einseitig über einen hydraulisch steuerbaren Zylinder aktiv aufgebracht, während der Prüfkörper auf der gegenüber liegenden Seite durch ein starres Widerlager gehalten wird (Abbildung 3.5). Mit den Zylindern kann in jeder Belastungsrichtung voneinander unabhängig eine Zugkraft von 500 kN bzw. eine Druckkraft von 5000 kN sowohl kraft- als auch weggesteuert aufgebracht werden. Bei den verwendeten würfelförmigen Prüfkörpern mit einer Kantenlänge von 100 mm entspricht dies einer maximalen Zugbeanspruchung von 50 $\mathrm{N/mm^2}$ bzw. einer maximalen Druckbeanspruchung von 500 $\mathrm{N/mm^2}$. Eine ausführliche Beschreibung und detailliertere Informationen über die verwendete Triaxialprüfmaschine werden von Hampel [36] gegeben.

Aufgrund der dreiseitig starren Widerlager muss davon ausgegangen werden, dass sich in den Probekörpern keine homogenen Spannungszustände in den jeweiligen Richtungen einstellen. In Abbildung 3.6 sind die Spannungsverteilungen in x- und in y-Richtung zweier FE-Simulationen eines zweiaxialen Zug-Druck-Versuchs ($\alpha_x \,/\, \alpha_y = 1 \,/\, -1$) mit unterschiedlichen Ausführungen der Zuglasteinleitungsbürste (unterschiedliche Borstenanzahl und Länge) dargestellt. Dabei wird für alle Materialien ein isotropes, linear-elastisches Verhalten angenommen. Die Verbindungen zwischen den Zugbürsten und den Probekörperoberflächen werden über eine 1 mm dicke Klebeschicht mo-

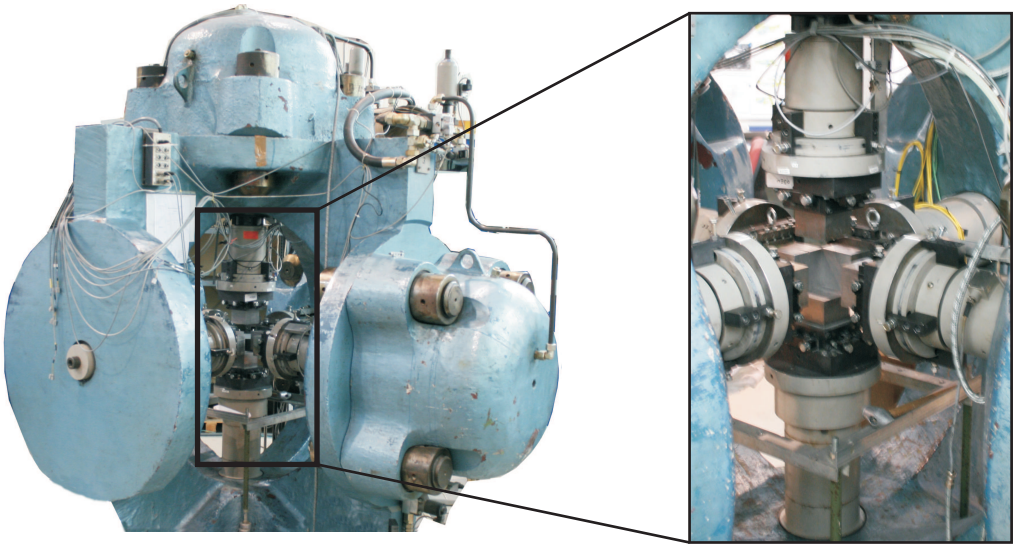


Abbildung 3.5: Triaxialprüfmaschine

delliert, die starr miteinander verbunden sind. Somit können Nichtlinearitäten lediglich durch die Modellierung des Kontakts zwischen den Druckbürsten und den Betonoberflächen hervorgerufen werden. Unabhängig von der Ausführung der Lasteinleitungsmittel treten in beiden Richtungen Spannungsunterschiede von bis zu $\pm 20\%$ im Betonprobekörper auf. Kommt es zu einer nichtlinearen Verformung des Betons, hat dies vermutlich eine weitere Zunahme der Inhomogenität der Spannungsverteilung in der Probe zur Folge, die sich unter den gegebenen Randbedingungen nicht reduzieren lässt.

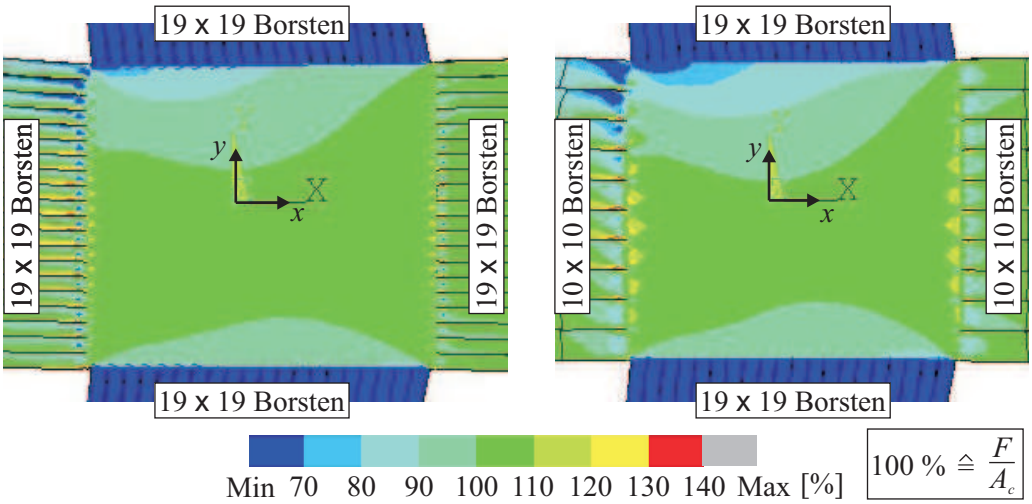
3.4.2 Lasteinleitung

Allgemeines

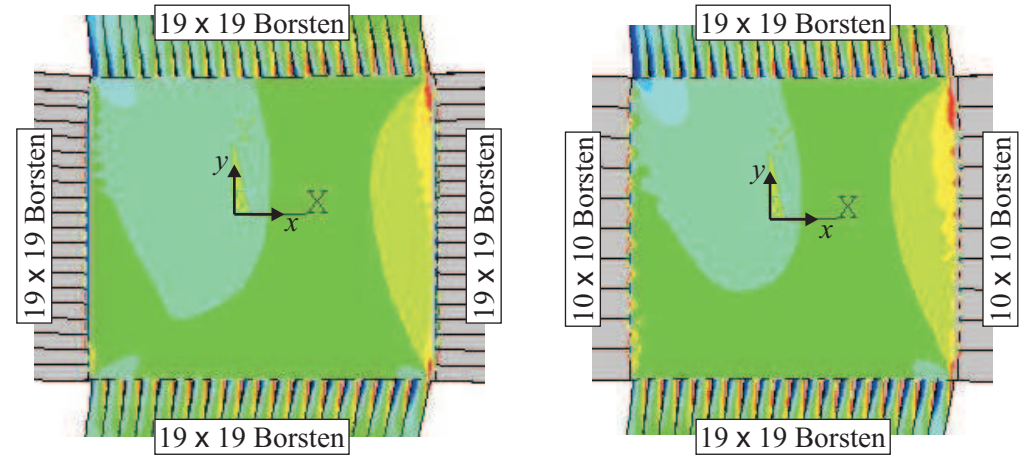
Neben der nur einseitig aktiven Beanspruchung der Prüfkörper durch die Prüfmaschine haben die Lasteinleitungsmittel ebenfalls einen Einfluss auf den Spannungszustand in der Probe, wie Abbildung 3.6 zeigt. Zum einen muss sichergestellt sein, dass die Last gleichmäßig über das Lasteinleitungsmittel aufgebracht wird, zum anderen behindern nahezu alle Lasteinleitungsmittel die Querverformung des Probekörpers, infolge dessen Schubkräfte hervorgerufen werden. Um die Querdehnungsbehinderung gering zu halten, hat sich die Verwendung von Belastungsbürsten als vorteilhaft erwiesen, die bereits bei einer Vielzahl von experimentellen Untersuchungen zum mehraxialen Materialverhalten von z. B. Hampel [36], Kupfer [57], Scheerer [107], Scholz [112] und Speck [118] eingesetzt wurden.

Zur Übertragung von Druckbeanspruchungen wurden für die eigenen Versuche Belastungsbürsten mit 19×19 Stück, 70 mm langen Borsten verwendet, die jeweils eine quadratische Querschnittsfläche von 4,9 mm $\times$ 4,9 mm besaßen. Durch den vollflächigen Kontakt der Bürsten mit dem Belastungszylinder wird die Kraft gleichmäßig auf den Beton übertragen. Untersuchungen von Curbach & Speck [17] zeigten, dass die durch die Schiefstellung der Borsten infolge der Probekörperverformungen und der einseitig starren Lagerung der Probe hervorgerufenen Schubkräfte vernachlässigbar sind.

Beim Aufbringen einer Zugbeanspruchung wurde die Kraft vom Belastungszylinder punktuell über eine Bolzenverbindung auf die Zuglasteinleitungsbürste übertragen. Somit muss innerhalb der



a) Zugnormalspannung σ_x



b) Drucknormalspannung σ_y

Abbildung 3.6: Normalspannungen bei einem Zug-Druck-Versuch $\alpha_x / \alpha_y = 1 / -1$ bei Lasteinleitung in Zugrichtung mit Belastungsbürsten mit unterschiedlicher Borstenanzahl und Borstenlänge

Bürste ein Lastausbreitungsbereich vorhanden sein, der eine gleichmäßige Verteilung der Beanspruchung in Richtung der Betonoberfläche ermöglicht. Da sich hierfür die Belastungsbürsten zur Übertragung einer Druckbeanspruchung nur bedingt eignen, wurde mittels eines parametrisierten FE-Modells eine Bürstengeometrie erarbeitet, die neben der homogenen Lasteinleitung ein hohes Maß an Querverformung des Probekörpers ermöglicht (Abbildung 3.7).

Grundlage der Simulation bildete der bereits genannte zweiaxiale Zug-Druck-Versuch ($\alpha_x / \alpha_y = 1 / -1$) unter Voraussetzung isotropen linear-elastischen Verhaltens aller verwendeten Materialien. Die Untersuchung erfolgte für ein Zuglasteinleitungsmittel ohne Borsten bis hin zu einer Anzahl von 19 × 19 Borsten analog zur Drucklasteinleitung. Aufgrund der geringeren Beanspruchung der Lasteinleitungsmittel bei einer Zugkraftübertragung wurde als Material Aluminium verwendet, das durch sein geringeres Gewicht eine einfachere Handhabung bei der Versuchsdurchführung ermöglicht und in seinen Materialkennwerten dem Beton ähnlicher ist als z. B. Stahl.

Nach der Untersuchung der Einflussfaktoren, wie die Anzahl der Borsten, die Borstenlänge und des Lastausbreitungsbreiches innerhalb der Bürste, ergab sich für die Zuglasteinleitung eine Bürste mit 10 × 10 Borsten mit einer Länge von 50 mm und einer Querschnittsfläche von 9,9 mm × 9,9 mm.

Zwischen den Borsten und dem Ende der Bohrung zum Befestigen eines Schraubenbolzens M20 als Verbindungsmittel zum Belastungszylinder befindet sich ein Lastausbreitungsbereich mit einer Länge von 40 mm (Abbildung 3.7).

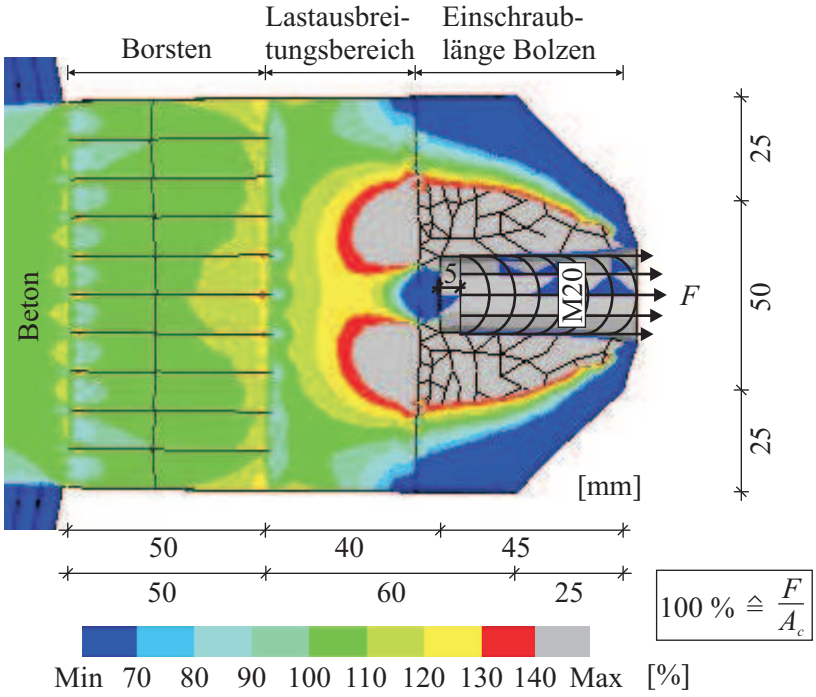
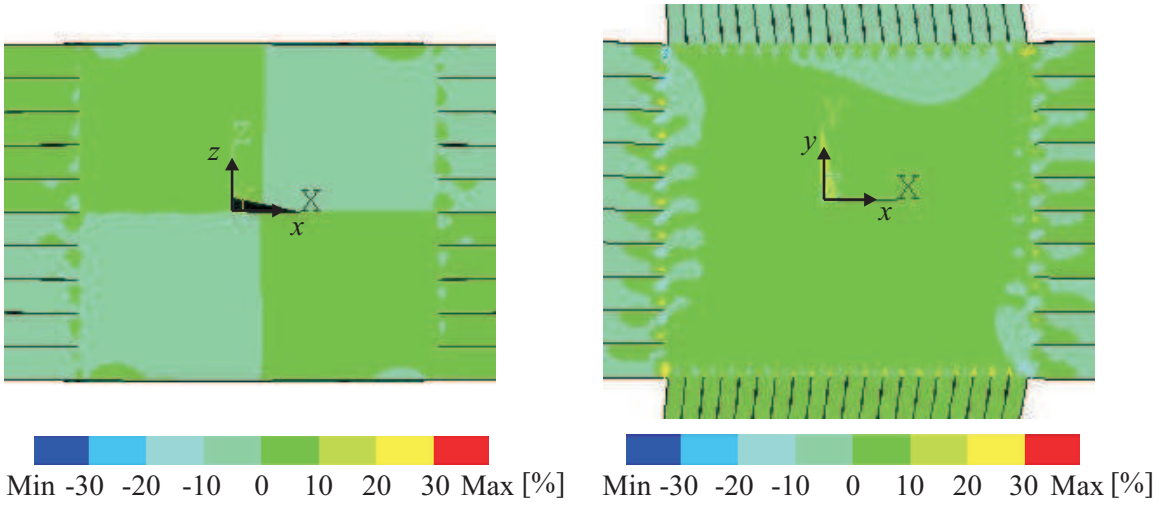


Abbildung 3.7: Spannungsverteilung in der Zugbürste in Belastungsrichtung

In Abbildung 3.6 sind die Normalspannungen von Simulationsergebnissen mit unterschiedlichen Bürsten zur Zugkraftübertragung dargestellt. Zum einen sind dies die in Abbildung 3.7 gezeigten und in den eigenen Versuchen verwendeten Bürsten und zum anderen Belastungsbürsten entsprechend denen für die Druckkraftübertragung. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei beiden Simulationen keine homogenen Normalspannungszustände im Probekörper einstellen, wobei sich erwartungsgemäß bei den Bürsten mit der geringeren Anzahl an Borsten größere Differenzen in der Spannungsverteilung im Probekörper ergeben. Aufgrund der relativ geringen Unterschiede in den Spannungsdifferenzen und dem verhältnismäßig sehr viel höheren Herstellungsaufwand zwischen den Bürsten mit 19 × 19 und 10 × 10 Borsten kamen wie bereits erwähnt Zuglasteinleitungsbürsten mit 10 × 10 Borsten entsprechend Abbildung 3.7 bei den eigenen Versuchen zum Einsatz.

In Abbildung 3.8 sind die in der FE-Simulation auftretenden Schubspannungen für den zweiaxialen Zug-Druck-Versuch unter Verwendung der bei den experimentellen Untersuchungen eingesetzten Bürsten zur Zugkraftübertragung gezeigt. Es treten nahezu keine Schubspannungen auf, so dass diesbezüglich von der Belastungsbürste keine signifikanten Einflüsse zu erwarten sind.

Damit wie in der Simulation nur Normalkräfte von der Zugbürste auf die Betonoberfläche übertragen werden, muss sichergestellt sein, dass keine Außermittigkeiten senkrecht zur Kraftrichtung zwischen Betonprobe und Belastungszylinder auftreten, die eine zusätzliche Momentenbeanspruchung hervorrufen. Die Vermeidung von Außermittigkeiten kann dabei grundsätzlich nur durch das Ausrichten des Prüfkörpers erfolgen, wobei bei mehraxialen Versuchen eine erneute Verschiebung der Probe beim Aufbringen der Beanspruchung in den zwei anderen Richtungen möglich ist. Um eine mögliche Momentenbeanspruchung infolge von Außermittigkeiten in der Zugbelastungsrichtung zu reduzieren, konstruierte Hampel [36] einen Pendelstab, der zwischen Belastungszylinder und dem Zuglasteinleitungsmittel eingebaut wird und somit die Länge des starren Bereichs des Lasteinleitungssystems verringert (Abbildung 3.9).



a) Schubspannung σ_{xy} b) Schubspannung σ_{zx}

Abbildung 3.8: Schubspannungen bei einem Zug-Druck-Versuch mit $\sigma_x / \sigma_y = 1 / -1$ für die gewählten Lasteinleitungsmittel

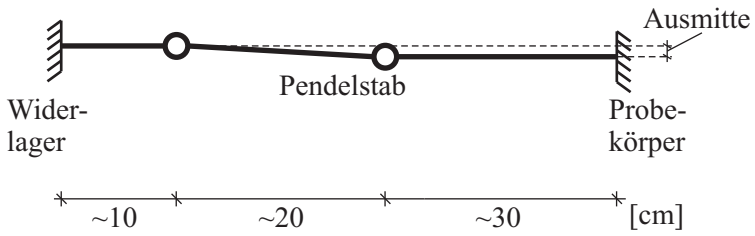


Abbildung 3.9: Lasteinleitungssystem mit Pendelstab zur Übertragung einer Zugkraftbeanspruchung

Zugkraftübertragung auf den Beton

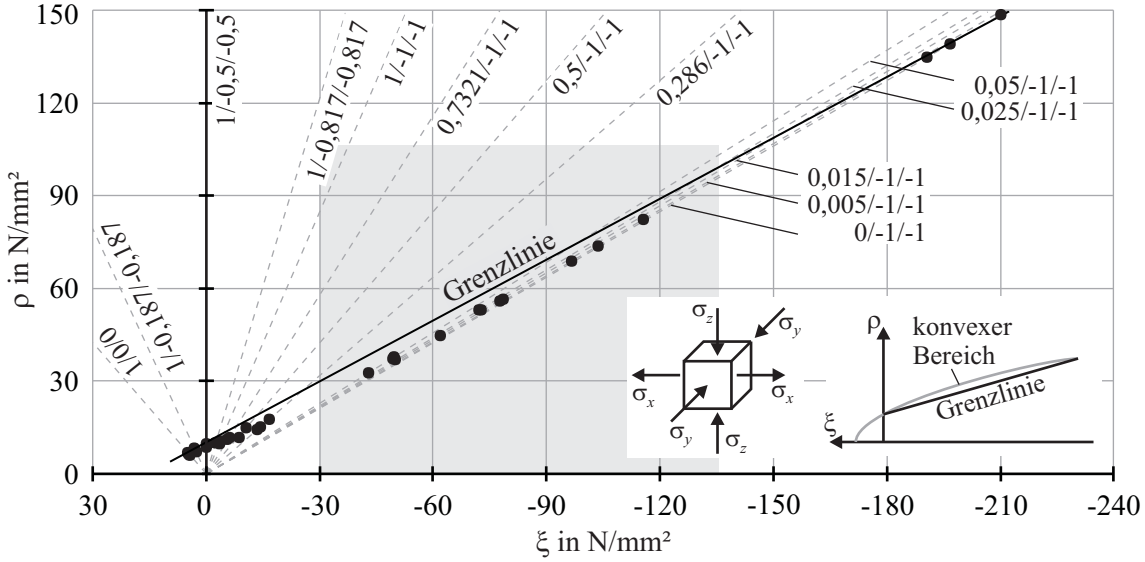
Neben der Gestaltung der Lasteinleitungsmittel selbst ergeben sich bei der Übertragung von Zugkräften auf den Beton weitere Anforderungen an den Versuchsaufbau. Diese resultieren daher, dass das Lasteinleitungsmittel nicht direkt auf der Betonoberfläche aufliegt, sondern über ein zusätzliches Verbindungsmittel an der Betonoberfläche befestigt werden muss. Im Allgemeinen wird dies durch eine Klebeschicht realisiert, die alle Beanspruchungen aus dem Lasteinleitungsmittel aufnimmt und auf den Beton überträgt.

Unter Verwendung eines Mörtelklebers, der Zugspannungen bis $20\,\mathrm{N/mm^2}$ übertragen kann, wurden mehraxiale Versuche durchgeführt, deren maximale Festigkeitswerte alle auf dem Zugmeridian $\alpha_x \geq \alpha_y = \alpha_z$ lagen (Abbildung 3.10a). Hierbei kam es bei Versuchen mit kleinen Zug- und großen Druckbeanspruchungen (z. B. $\alpha_x / \alpha_y / \alpha_z = 0{,}05 / -1 / -1$) zu einem Ablösen der Klebeschicht an der Betonoberfläche, wobei teilweise eine feine Zementsteinschicht an der Klebeschicht verblieb. Im Gegensatz dazu kam es bei Spannungsverhältnissen mit großen Zug- und kleinen Druckbeanspruchungen (z. B. $\alpha_x / \alpha_y / \alpha_z = 1 / -0{,}5 / -0{,}5$) zu einem eindeutigen Zugversagen im Beton.

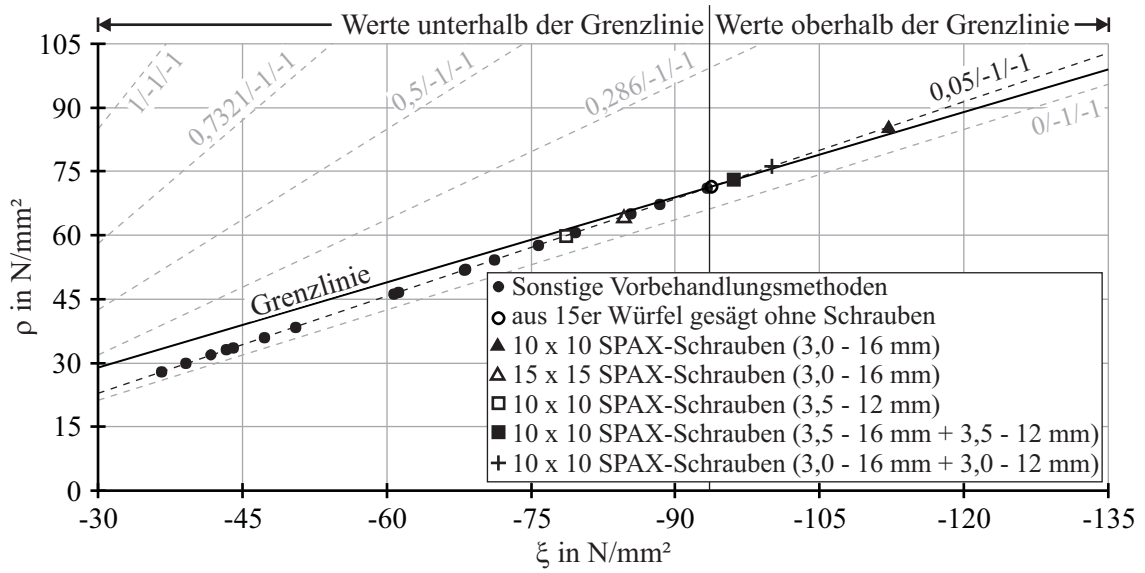
Ausgehend von diesen Versuchsergebnissen und mit weiteren theoretischen Überlegungen, die in Abschnitt 4.1 näher erläutert werden, wird das Versagen in der Grenzschicht zwischen Betonoberfläche und Klebeschicht auf einen fehlerhaften Versuchsaufbau zurückgeführt. Als Kriterium zur Unterscheidung zwischen einem Versagen im Beton und dem „Abreißen“ der Lasteinleitung wird eine Gerade festgelegt, die die untere Grenze der Festigkeitswerte definiert, die Voraussetzung für einen konvexen Verlauf des Zugmeridians sind (Abbildung 3.10a). Zur Bestimmung dieser Geraden wurden die Versuchswerte der einaxialen Zug- und der zweiaxialen Druckversuche herangezogen,

da bei diesen Versuchen ein Betonversagen sichergestellt ist. Somit müssen alle Festigkeitswerte von Spannungsverhältnissen, die zwischen den Versuchen der einaxialen Zug- und der zweiaxialen Druckbeanspruchung auftreten, auf bzw. oberhalb der festgelegten Grenzlinie liegen.

Zur Verbesserung der Übertragung der Zugbeanspruchung wurden zahlreiche Versuche in den Serien T1 bis T11 an einem Referenzspannungsverhältnis von $\alpha_x \,/\, \alpha_y \,/\, \alpha_z = 0{,}05 \,/\, -1 \,/\, -1$ durchgeführt, deren Konfigurationen im Anhang A.5 in Tabelle A.18 zusammengefasst und deren Versuchsergebnisse in Abbildung 3.10b dargestellt sind. Verschiedene Vorbehandlungen der Betonoberfläche, die Wärmenachbehandlung des Klebers zur Steigerung seiner Festigkeit sowie eine geringfügige Vergrößerung der Probekörper brachten dabei keine wesentlichen Verbesserungen für die maximal übertragbaren Beanspruchungen.



a) Versuchsergebnisse mit konventionell angeklebter Lasteinleitung bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen



b) Versuchsergebnisse der Testversuche (α_x / α_y / α_z = 0,05 / -1 / -1) zur Verbesserung der Zugkraftübertragung

Abbildung 3.10: Versuchswerte auf dem Zugmeridian in HAIGH-WESTERGAARD-Koordinaten

Durch das Einbetonieren von Schrauben, deren Schraubenköpfe in die Klebeschicht eingebettet werden, um die Kraftübertragung auf den Beton durch den Schraubenschaft zu gewährleisten,

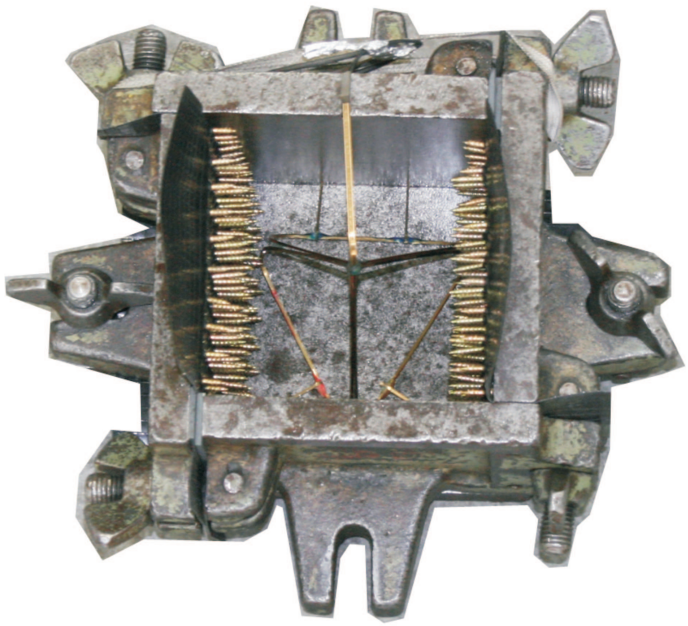
konnten im Vergleich zu konventionell angeklebten Lasteinleitungsmitteln deutlich höhere Beanspruchungen aufgebracht werden (Abbildung 3.11a). Bei der Anordnung von 10 × 10, 16 mm langen SPAX-Schrauben je Oberfläche in Zugrichtung eines Probekörpers wurden Festigkeitswerte erzielt, die oberhalb der Grenzlinie lagen (Abbildung 3.10b). Das Versagen der Prüfkörper trat dabei bei einigen Proben erwartungsgemäß im Beton in der Ebene am Schraubenende, aber auch in der Klebeschicht direkt hinter den Schraubenköpfen auf. Um eine weitere Verbesserung der Kraftübertragung zu erzielen, wurden zusätzliche Versuche mit variiertem Schraubentyp und variierter Schraubenanzahl durchgeführt. Außerdem erfolgten Versuche mit Unterlegscheiben hinter den Schraubenköpfen, um die Fläche der Kraftübertragung zwischen Kleber und Schrauben zu vergrößern.

Bei einer Anordnung von 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 − 16 mm konnten die größten Zugkräfte bei dem untersuchten Spannungsverhältnis in den Beton eingeleitet werden, weshalb die Versuche mit dieser Schraubenanordnung für die nachfolgenden Ausführungen als Referenz dienen. Bei der Verwendung eines anderen Schraubentyps mit gleicher Länge und gleichem Schraubenkopfdurchmesser (z. B. Linsenkopfschrauben) kam es zum Teil zum Ausziehen der Schrauben aus dem Beton bzw. zu einem vorzeitigen Abreißen der Belastungsbürste in der Klebeschicht hinter den Schraubenköpfen. Bei Verwendung von SPAX-Schrauben mit einer Länge von 12 mm erfolgte bei allen Versuchen ein Versagen im Beton, wobei jedoch nur ca. 60 − 70 % der Beanspruchung der 16 mm langen Schraubenreferenzkonfiguration übertragen werden konnte. Dies deutet darauf hin, dass es zu Spannungsspitzen am Schraubenende im Beton kommt, die lokal die Betonfestigkeit überschreiten und somit zu einem vorzeitigen Versagen führen. Weiter wurden SPAX-Schrauben mit größeren Schraubenköpfen verwendet (SPAX 3,5 − 16 mm) sowie die Schraubenanzahl der Referenzkonfiguration erhöht. Die Ergebnisse dieser Versuche führten ebenfalls zu keiner weiteren Steigerung der übertragbaren Zugkraft und es kam nur bei wenigen Versuchen zu einem Versagen im Beton.

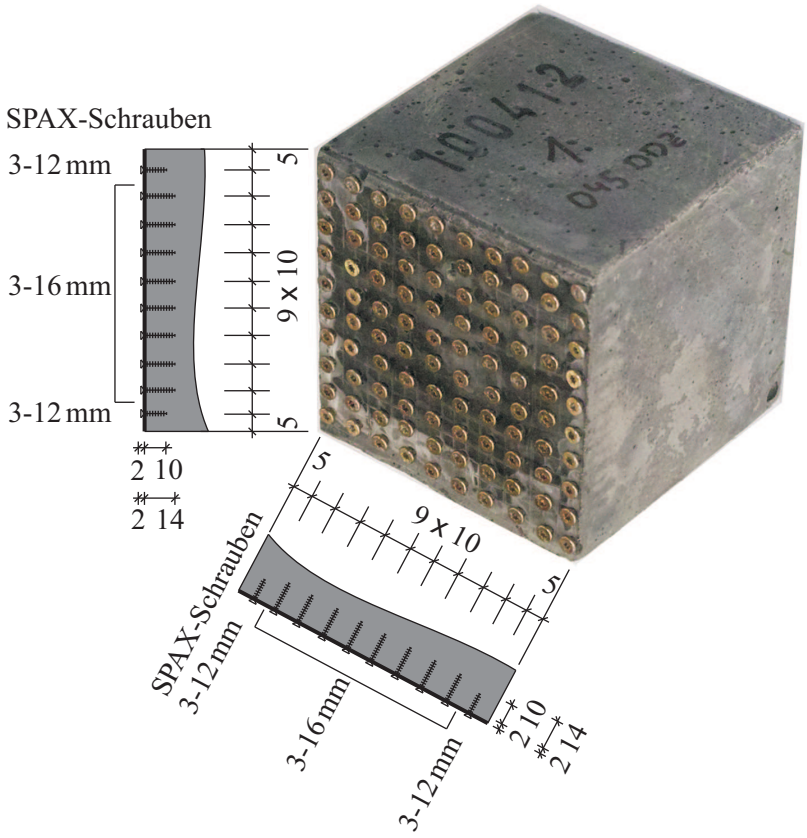
Bei den experimentellen Untersuchungen zur Zugkraftübertragung wurde außerdem festgestellt, dass ein Entfernen bzw. Verbleiben der Schraubenträgerfolie zwischen Betonoberfläche und Kleber keine Auswirkungen auf die übertragbare Beanspruchung hat. Die Trägerfolie wird benötigt, um die Lagefixierung der Schrauben vor und während der Betonage zu gewährleisten (Abbildung 3.11a). Für die Durchführung der mehraxialen Zug-Druck-Druck-Versuche wird daher die Anordnung von 10 × 10 SPAX-Schrauben je Würfeloberfläche in Zugrichtung vorgenommen, wobei die Schraubenträgerfolie nicht entfernt wird. Abweichend von der Referenzkonfiguartion erfolgte die Anordnung von 3,0 × 12 mm SPAX-Schrauben in der äußersten Schraubenreihe um den gesamten Umfang der Oberfläche, um den ordnungsgemäßen Einbau der Messtechnik zur Dehnungsmessung zu gewährleisten (Abbildung 3.11b).

Da bei einaxialen Zugversuchen und bei mehraxialen Versuchen mit einer großen Zugbeanspruchung das Versagen auch ohne Anordnung von Schrauben im Beton auftrat, wird vermutet, dass eine kombinierte Normalkraft-Schubkraft-Beanspruchung zu dem frühzeitigen Versagen der Klebeschicht führte. Diese Beanspruchung ließe sich durch die Reduktion der Steifigkeit des Lasteinleitungsmittels verringern. Es müssten hierfür entweder längere Borsten verwendet oder die Anzahl der Borsten erhöht werden.

Ausgehend von den einbetonierten Schrauben erscheint es jedoch sinnvoller, auf die Klebeschicht gänzlich zu verzichten und eine rein mechanische Kraftübertragungsvorrichtung vorzusehen. Hierfür könnten die Schraubenköpfe mit einem Adapter über Federn mit einer Grundplatte verbunden werden (Abbildung 3.12). Ist die Grundplatte ausreichend steif und gelenkig mit dem Belastungszylinder verbunden, würde sich beim Einsatz gleichartiger Federn die Beanspruchung homogen auf alle Schraubenköpfe verteilen. Somit kann nicht nur ein Versagen im Bereich der Fuge ausgeschlos-



a) Würfelform vor der Betonage mit Schraubenanordung und Trägergerüst der Messtechnik



b) Prüfkörperoberfläche mit Anordnung von 10 x 10 SPAX-Schrauben zur Zugkraftübertragung

Abbildung 3.11: Anordnung der SPAX-Schrauben zur Zugkraftübertragung

sen, sondern zusätzlich wie bei den Druckbürsten eine Reduktion der Verformungsbehinderung senkrecht zur Beanspruchungsrichtung erreicht werden.

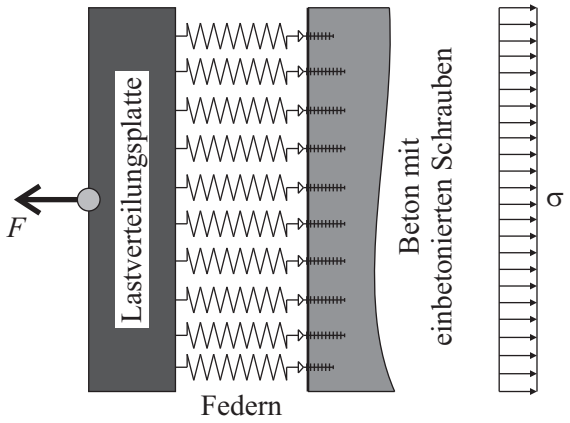


Abbildung 3.12: Skizze zur mechanischen Übertragung der Zugkraft auf den Beton

Zugkraftabnahme durch die Druckbürstenverformung

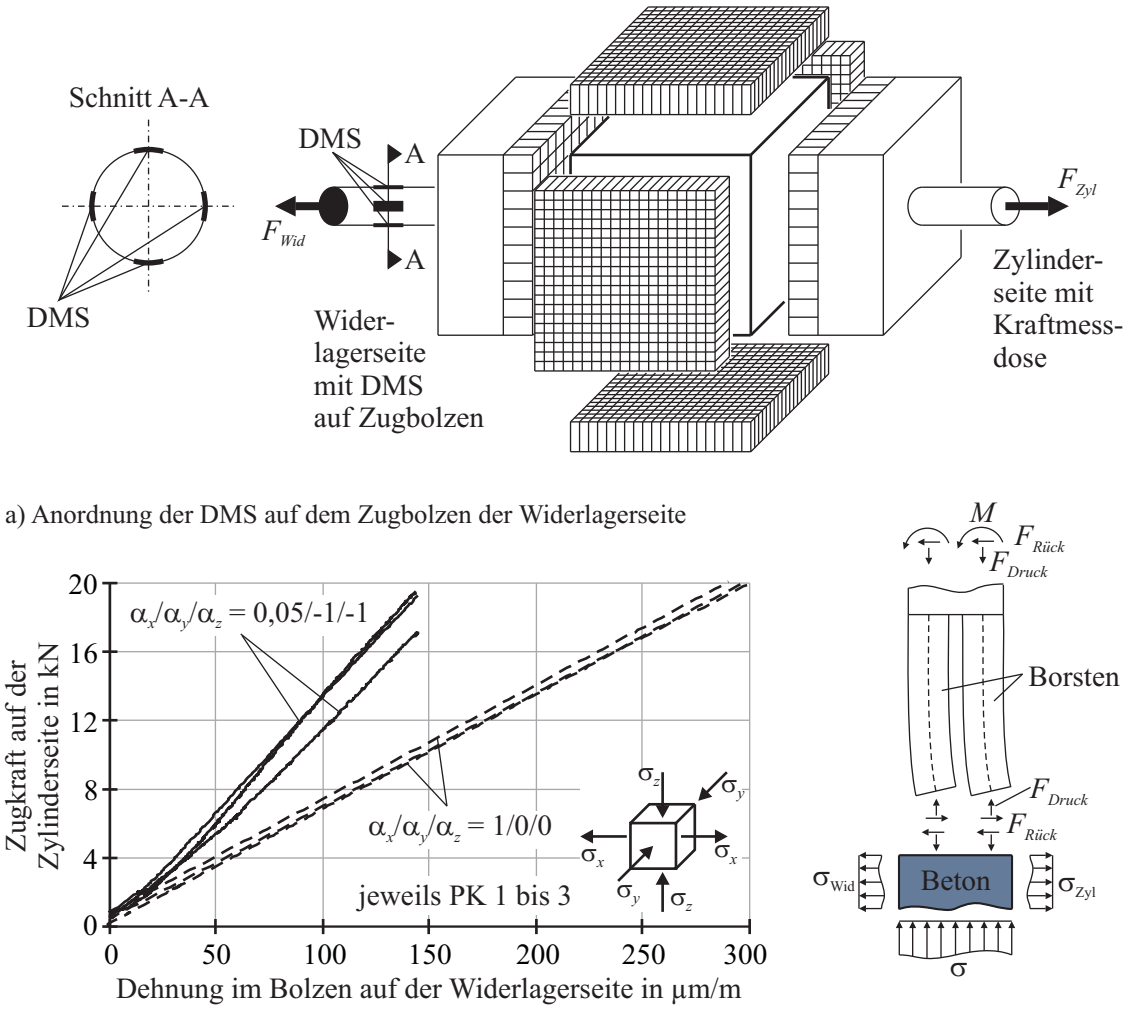
Bei den Versuchen zur Zugkraftübertragung kam es in allen Fällen zu einem Versagen der Klebeschicht bzw. des Betons hinter der Ebene der Schraubenenden auf der Zylinderseite. Das heißt, das Versagen stellte sich auf der Seite der aktiven Zugkrafteinleitung ein, was vermutlich durch die anliegenden Belastungsbürsten zum Aufbringen der Druckbeanspruchung begünstigt wurde. Infolge der Verformung des Probekörpers kam es zu einer Schiefstellung der Borsten aller Belastungsbürsten. Dabei nahm die Schiefstellung der Borsten der Druckbürsten vom starren Widerlager hin zum Belastungszylinder in Zugrichtung zu. Durch das Auslenken der einzelnen Borsten treten zusätzliche Kräfte orthogonal zur ursprünglichen Belastungsrichtung der Druckbürsten auf und wirken somit in Richtung der Zugbeanspruchung. Diese zusätzliche Kraftkomponente in Richtung der Zugbeanspruchung bewirkt eine Zugkraftabnahme in Richtung des starren Widerlagers (Abbildung 3.13c).

Um die Größenordnung der Zugkraftabnahme infolge einer gleichzeitig wirkenden Druckbeanspruchung einzuschätzen, wurden die auftretenden Dehnungen des Zugbolzens auf der Widerlagerseite für einen einaxialen Zug- und einen mehraxialen Zug-Druck-Druck-Versuch ($\alpha_x \,/\, \alpha_y \,/\, \alpha_z = 0{,}05 \,/\, -1 \,/\, -1$) gemessen. Abbildung 3.13a und 3.13b zeigen die Anordnung der vier DMS im Versuchsaufbau sowie die gemessenen Kraft-Dehnungs-Beziehungen als Mittelwertkurven der DMS der jeweils drei Prüfkörper je Beanspruchungsart. Bei den einaxialen Zugversuchen waren bei gleich großer Zugkraft die auftretenden Dehnungen im Bolzen auf der Widerlagerseite doppelt so groß wie bei den dreiaxialen Versuchen. Infolgedessen ist das Versagen der Klebefuge bzw. des Betons auf oder nahe der Zylinderseite ein systematischer Fehler, der unter den derzeitigen Voraussetzungen des Versuchsstandes nicht behoben werden kann.

Eine weiterführende Betrachtung dieses Einflusses und eine Nachrechnung mit theoretischen Ansätzen, wie beispielsweise nach Linse [69], war an dieser Stelle aufgrund der geringen Versuchsanzahl nicht möglich, um eine aussagekräftige Verifikation des Einflusses vorzunehmen.

3.4.3 Versuchsdurchführung

Bei der Durchführung von einaxialen Zug- bzw. mehraxialen Belastungsversuchen mit einer Zugkomponente wurden in Zugrichtung die Lasteinleitungsmittel, wie im vorhergehenden Abschnitt bereits beschrieben, angeklebt (ohne und mit Schrauben). 24 Stunden nach dem Klebevorgang hat der verwendete 2-Komponenten-Mörtelkleber bei 20 °C Raumtemperatur seine Endfestigkeit nahezu erreicht und der Einbau der Prüfkörper mit den angeklebten Lasteinleitungsmitteln in die Triaxialprüfmaschine konnte erfolgen. Während die Belastungsbürsten in Druckrichtung direkt an



a) Anordnung der DMS auf dem Zugbolzen der Widerlagerseite

b) Kraft-Dehnungs-Linie bei einaxialer Zug- und dreiaxialer Zug-Druck-Druck-Belastung

c) Kräfte infolge Borstenschiefstellung

Abbildung 3.13: Einfluss der Druckkrafteinleitungsmittel auf die Zugkraftbeanspruchung

der Betonprobe und den Zylindern der Prüfmaschine anlagen, wurden in Zugrichtung die Bürsten mit Bolzen an den Pendelstäben angeschlossen, die wiederum mit den Zylindern der Prüfmaschine verbunden waren. Nach dem Einbau der Probe erfolgte unter Aufbringung einer geringen Vorlast eine Ausrichtung des Probekörpers und der Lasteinleitungsmittel. Im Anschluss an diesen Ausrichtungsprozess begann, ausgehend von der bereits vorhandenen Vorbelastung, die eigentliche Beanspruchung entsprechend des gewünschten Spannungsverhältnisses.

Das Aufbringen der Belastung für die am höchsten beanspruchte Richtung (Hauptbelastungsrichtung) erfolgte durch eine Wegsteuerung des Belastungszylinders. In den beiden anderen Richtungen wurde die Belastung entsprechend des Spannungsverhältnisses nahezu zeitgleich kraftgesteuert nachgeregelt, wodurch gewährleistet wurde, dass zu jedem Zeitpunkt des Versuchs das vorgegebene Spannungsverhältnis tatsächlich auf den Probekörper wirkte. Die Wegsteuerung in Hauptbelastungsrichtung wurde gewählt, damit bei der Überschreitung der maximalen Festigkeit ggf. ein Materialverhalten im Nachbruchbereich beobachtet und aufgezeichnet werden konnte. Die Beanspruchung in Hauptbelastungsrichtung erfolgte bei Versuchen mit einer relativen Zugspannungskomponente $\alpha_1 \geq 0{,}1$ mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,001 mm / s, was einer anfänglichen Belastung von ca. $0{,}05\,\mathrm{N/mm^2}$ / s entsprach. Für Spannungsverhältnisse mit relativen Zugspannungskomponenten $\alpha_1 < 0{,}1$ betrug die Belastungsgeschwindigkeit der Probekörper 0,002 mm / s,

was einer anfänglichen Belastung von ca. 0,2 N/mm^2 / s entsprach. Die Unterscheidung wurde vorgenommen, um für jeden Versuch eine Versuchsdauer von wenigstens 300 s zu erreichen.

Für die Versuche, die nicht durch die automatische Brucherkennung der Maschine beendet wurden, der ein definierter Kraftabfall in einer bestimmten Zeitspanne zugrunde liegt, erfolgte ein manueller Abbruch. Dieser wurde kurz bevor sich die Lasteinleitungsmittel berührten durchgeführt und war somit durch die Randbedingungen aus der Versuchstechnik definiert. Für die Versuche mit großen Zugspannungskomponenten erfolgte das Versuchsende im Allgemeinen durch die automatische Brucherkennung, während bei den dreiaxialen Druckversuchen ein manueller Abbruch vorgenommen wurde. Bei allen untersuchten Spannungsverhältnissen konnte kein Nachbruchverhalten beobachtet werden, was speziell für manuell abgebrochene Versuche zu der Vermutung führt, dass die erzielten Festigkeitswerte nicht den maximalen Festigkeiten entsprachen.

3.5 Messtechnik

3.5.1 Voruntersuchungen

Bei der Durchführung von dreiaxialen Belastungsversuchen und speziell beim Auftreten von wenigstens einer Zugkomponente in der Belastung verursachen die konventionell verwendeten Messmethoden der direkten Verformungsmessungen nicht vernachlässigbare Störstellen im Probekörper. Insbesondere an den Grenzschichten zwischen Beton und Messmittel kann eine homogene Zugspannungsübertragung nicht gewährleistet werden, weshalb die bisher angewandten direkten Messmethoden bei mehraxialen Versuchen mit Zugbeanspruchung nicht geeignet sind, vgl. Abschnitt 2.2.3.

Zur Überprüfung der Eignung einer indirekten Messmethode und zur Abschätzung des Einflusses des Anlaufeffektes bei den erwarteten kleinen Gesamtverformungen des Probekörpers wurden zyklische zweiaxiale Zug-Druck-Versuche durchgeführt. Die Verformungsmessung erfolgte zum einen indirekt durch die Messung der Querverformung der Belastungsbürsten mittels IWA und zum anderen direkt durch DMS auf den zwei freien Oberflächen des Probekörpers. In Abbildung 3.14 sind die Spannungs-Dehnungs-Linien der einzelnen Messmittel bzw. Messstellen in Zugrichtung dargestellt. Bei der IWA-Messung werden erst ab einer Spannung von ca. 40% – 50% der Bruchfestigkeit Dehnungen entsprechend den DMS aufgenommen, deren Verlauf im Erwartungsbereich lag. Auch nach einem mehrfachen Be- und Entlasten des Probekörpers stellte sich keine Übereinstimmung der IWA-Messungen mit den DMS-Messungen ein, so dass ein mögliches Ausrichten der Borsten auf der Probekörperoberfläche mit jedem Belastungszyklus in gleicher Weise stattfand und eine Kalibrierung der Borstenposition durch eine entsprechende Vorbelastung nicht möglich war. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Durchführung von mehraxialen Belastungsversuchen mit einer Zugkomponente das Problem der Dehnungsmessung neu erörtert werden muss.

Hinsichtlich einer neuen Methode der Dehnungsmessung besteht das Ziel, eine direkte Messmethode zu finden, um somit Einflüsse von Übertragungselementen der Verformungen des Betons auf die Messmittel (z. B. Borsten) auszuschließen. Weiterhin ist es wünschenswert, die Dehnungsmessung im Inneren der Probekörper vorzunehmen, um Auswirkungen eines möglichen inhomogenen Lasteintrags im Bereich der Messmittel zu eliminieren. Ebenfalls lässt sich bei einer Dehnungsmessung im Probekörperinneren die Frage des Anlaufeffektes eindeutiger klären, vorausgesetzt die eingesetzte Messtechnik beeinflusst das Materialverhalten nicht. Eine erfolgversprechende Messmethode zur Umsetzung der gewünschten Ziele zeigten Schlattner et al. [111] auf. Bei einem einaxialen Druckversuch maßen sie mittels auf ein tetraederförmiges Trägergerüst applizierten Faser-Bragg-Gittern die Dehnungen im Inneren eines Betonprobekörpers.

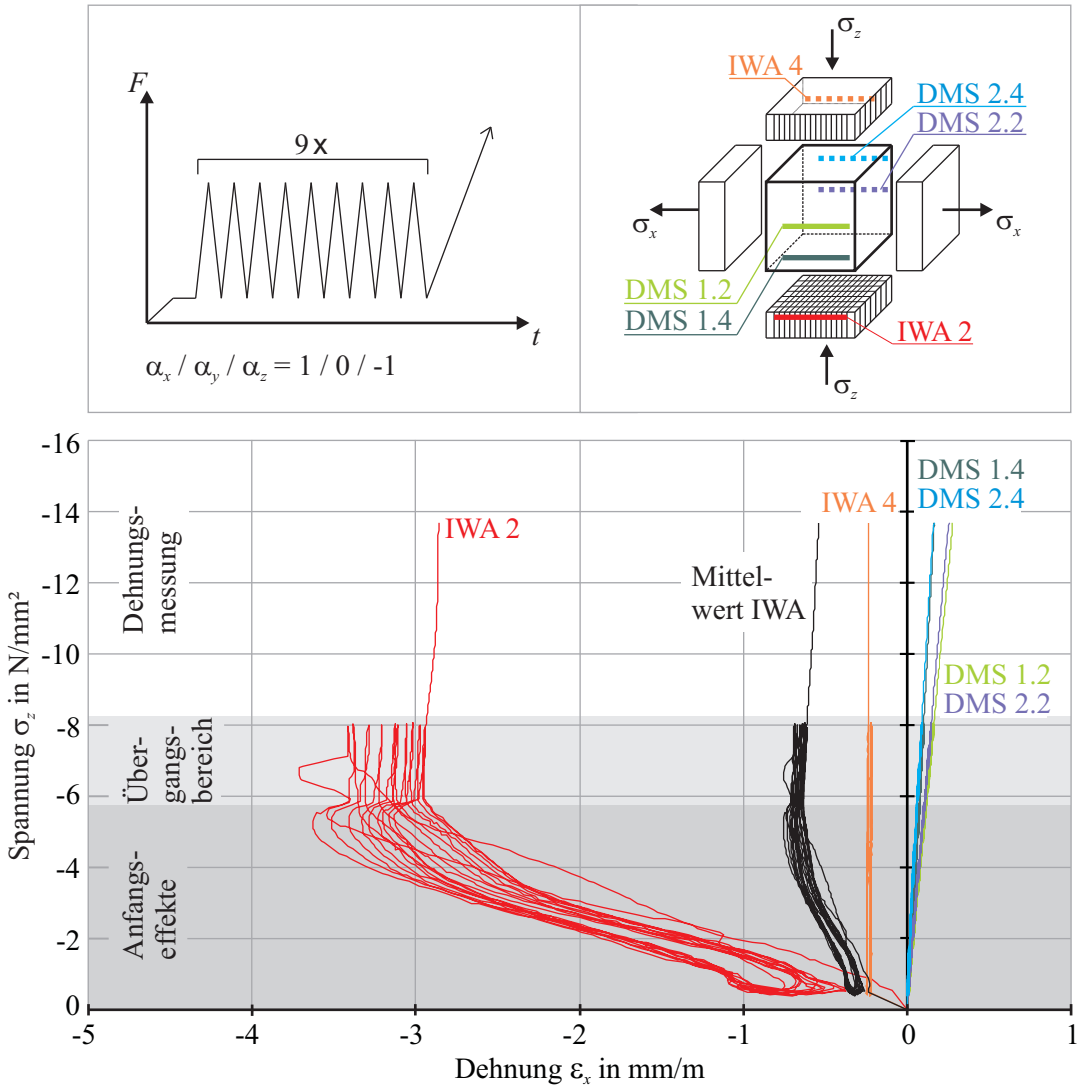


Abbildung 3.14: Unterschiede in der Dehnungsmessung mit DMS und IWA bei kleinen Probekörperverformungen im zweiaxialen Zug-Druck-Versuch

Das von Schlattner et al. [111] verwendete Trägergerüst ist ein gleichseitiges Tetraeder, auf dessen Kanten sich je eine Messstelle befindet. Das Trägergerüst wird aus drei, zu Dreiecken gebogenen, Doppel-T-Messingprofilen mit den Abmessungen 1 mm × 2 mm zusammengesetzt. Somit werden sechs Dehnungen in unterschiedlichen Richtungen gemessen, aus denen sich nachträglich die Normal- und die Schubverzerrungen bestimmen lassen. Auf der Grundlage der Methode von Schlattner et al. wird im Folgenden eine modifizierte Messmethode näher erläutert, die unter Einhaltung weiterer Randbedingungen eine Anwendung bei mehraxialen Belastungsversuchen erlaubt. Mit Vergleichsmessungen wurde nachgewiesen, dass sich diese Methode eignet, um die Dehnungen im Inneren eines Probekörpers unter mehraxialer Beanspruchung zu messen. Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen sind eine Zusammenfassung der von Ritter & Curbach [95] durchgeführten Forschungsarbeit. Weitere Informationen hierzu können dem entsprechenden Forschungsbericht oder Ritter & Curbach [96] entnommen werden.

3.5.2 Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gittern

Die Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gittern (FBG) ist ein optisches Verfahren, bei dem ein Lichtsignal mit einem Wellenlängenspektrum λ durch ein Lichtleiterkabel (Faser) gesendet wird,

in dessen Verlauf ein oder mehrere Bragg-Gitter eingeschrieben sind. Gelangt das Licht in den ca. 5 mm langen Bragg-Gitter-Bereich, wird dort ein Teil des Lichts mit der Bragg-Wellenlänge (λ_B) reflektiert und kehrt zu seinem Ausgangspunkt zurück. Kommt es zu einer Dehnung des Bragg-Gitter-Bereichs und somit zu einer Änderung der Gitterabstände, ändert sich ebenfalls die Bragg-Wellenlänge ($\lambda_{B,i}$) des reflektierten Lichts (Abbildung 3.15).

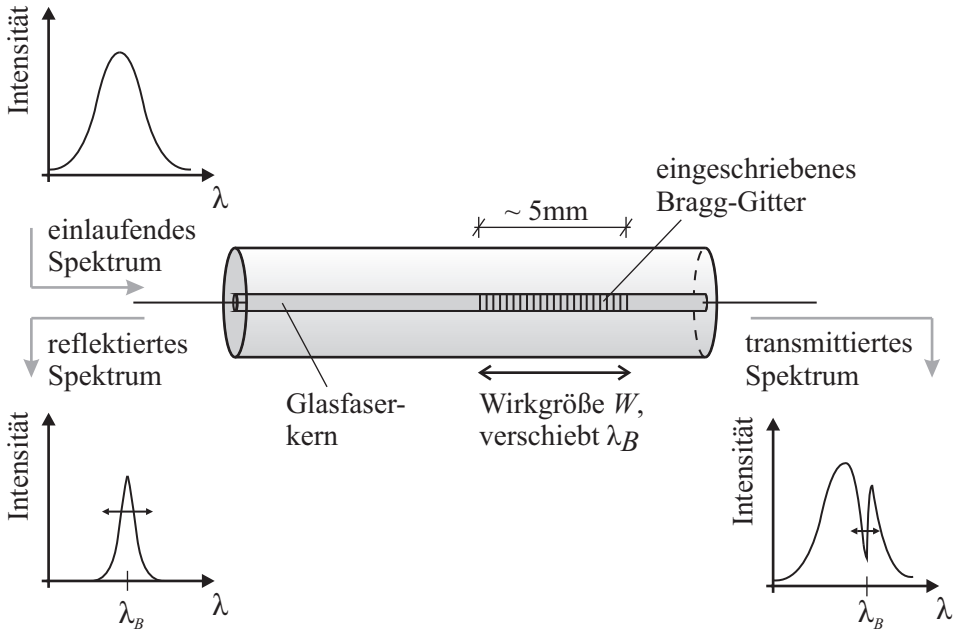


Abbildung 3.15: Funktionsweise der Faser-Bragg-Gitter-Dehnungsmessung nach Roths et al. [104] bzw. Roths & Kratzer [105]

Anhand der Änderung der am Bragg-Gitter reflektierten Wellenlänge $\Delta\lambda$ kann mit Gl. (3.1) die Dehnung des Bragg-Gitter-Bereichs berechnet werden.

$$\varepsilon = \frac{\lambda_{B,i} - \lambda_B}{\lambda_B \cdot (1 - \rho_e)} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_B \cdot k} \tag{3.1}$$

Der Wert der elastooptischen Konstanten ρ_e bzw. der Dehnungsempfindlichkeit $k = (1 - \rho_e)$ ist dabei ein Maß für die spannungsinduzierte Änderung des Brechungsindexes des Glaskerns bei einer vollzogenen Dehnung und kann im relevanten Messbereich als konstant zu $\rho_e = 0{,}24$ angenommen werden.

Das bei der Messung auftretende Messrauschen der in den eigenen Versuchen verwendeten FBG beträgt unter idealen Bedingungen $\pm 1\,\mu m/m$. Bei sorgfältiger Applikation der Gitter auf ein Trägermaterial nimmt das Messrauschen nicht zu und es kann eine gleichwertige Genauigkeit zur DMS-Messung erreicht werden (Roths et al. [105]).

Besondere Beachtung bei der Dehnungsmessung mit FBG gilt der Dehnungsmessung infolge einer Temperaturänderung, da hierbei zwei Effekte berücksichtigt werden müssen. Zum einen ergibt sich durch die thermische Ausdehnung der Faser eine Änderung der Gitterabstände, die sich entsprechend des thermischen Ausdehnungskoeffizientens α_T und der Temperaturänderung ΔT berechnen lässt und zum anderen kommt es zu einer Änderung der Brechzahl des Glases. Letzteres wird durch den als konstant anzunehmenden thermooptischen Koeffizienten $\xi = 8 \cdot 10^{-6}\,1/K$ beschrieben, mit dem die Dehnung infolge Temperaturänderung nach Gl. (3.2) bestimmt werden kann.

$$\varepsilon = \frac{\lambda_{B,i,\Delta T} - \lambda_B}{\lambda_B \cdot (1-\rho_e)} = \underbrace{\alpha_T \cdot \Delta T}_{\text{Dehnung der Faser}} + \underbrace{\frac{\xi}{1-\rho_e} \cdot \Delta T}_{\text{thermooptischer Effekt}} \tag{3.2}$$

Wird die Steifigkeit der Faser vernachlässigt und angenommen, dass die auftretende Dehnung infolge Temperaturänderung der Dehnung des umgebenden Materials entspricht ($EA_{\text{Faser}} << EA_{\text{umgebendes Material}}$), ergibt sich für eine im Beton eingebettete Faser eine Dehnung infolge Temperaturänderung nach Gl. (3.3). Die aus der gemessenen Verschiebung der Wellenlänge berechnete Dehnung durch eine Temperaturänderung ist infolge des thermooptischen Effektes somit annähernd doppelt so groß wie die tatsächlich auftretende Dehnung im Beton.

$$\varepsilon = \alpha_{T,Beton} \cdot \Delta T + \frac{\xi}{1-\rho_e} \cdot \Delta T = 10 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\mathrm{K}} \cdot \Delta T + \frac{8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\mathrm{K}}}{(1-0{,}24)} \cdot \Delta T \approx 20 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T \tag{3.3}$$

Weiterführende Informationen zur Funktionsweise von FBG werden u. a. von Kersey et al. [47], Othonos & Kalli [90] und Roths & Kratzer [104] gegeben.

3.5.3 Berechnung der Dehnungen in beliebigen Richtungen aus tetraederförmig angeordneten Messstellen

Ausgehend von einem kartesischen Bezugskoordinatensystem lässt sich die Dehnung in jeder beliebigen Richtung im Raum mittels der Komponenten des Dehnungstensors sowie der Richtungskosinusse zwischen den Koordinatenachsen des Bezugssystems und der Achse in Richtung der zu berechnenden Dehnung nach Gl. (3.4) bestimmen (Love [76] bzw. Timoshenko & Goodier [121]). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei einer homogenen Normaldehnungs- und Schubverzerrungsverteilung in der Probe sechs paarweise nicht parallele Dehnungen bekannt sein müssen, um bei einer definierten Lage der Messstellen die Komponenten des Dehnungstensors des Bezugskoordinatensystems zu berechnen. Damit das daraus resultierende Gleichungssystem bestimmt ist, dürfen zwei Achsen in Richtung der bekannten Dehnungen nicht in den Ebenen der Koordinatenachsen des Bezugssystems liegen. Hierfür schlägt Wianecki [126] eine tetraederförmige Anordnung von Messstellen vor, um die geometrischen Randbedingungen zu erfüllen. Diese Anordnung wurde auch von Schlattner et al. [111] verwendet.

$$\begin{aligned}\varepsilon = {} & \cos^2(\xi) \cdot \varepsilon_{xx} + \cos^2(\psi) \cdot \varepsilon_{yy} + \cos^2(\zeta) \cdot \varepsilon_{zz} + \\ & \cos(\xi)\cos(\psi) \cdot \varepsilon_{xy} + \cos(\psi)\cos(\zeta) \cdot \varepsilon_{yz} + \cos(\zeta)\cos(\xi) \cdot \varepsilon_{zx}\end{aligned} \tag{3.4}$$

Bei den durchzuführenden dreiaxialen Belastungsversuchen an würfelförmigen Probekörpern entsprechen die Belastungsrichtungen den Normalenrichtungen im gewählten Bezugskoordinatensystem. Zur Bestimmung der Normaldehnungen und Schubverzerrungen aus sechs tetraederförmig angeordneten Dehnungsmessstellen mittels Gl. (3.4) muss ein Gleichungssystem gemäß Gl. (3.5) aufgestellt werden, um die unbekannten Komponenten des Dehnungstensors zu bestimmen. Die Einträge der Koeffizientenmatrix **A** nach Gl. (3.6) sind dabei die Richtungskosinusse zwischen den Messstellen und den Achsen des Bezugskoordinatensystems analog zu Abbildung 3.16. Die sich daraus ergebenden Winkel ξ_i, ψ_i, ζ_i mit $i = a \ldots f$ für die gewählte tetraederförmige Anordnung der Messstellen sind in Tabelle 3.8 angegeben.

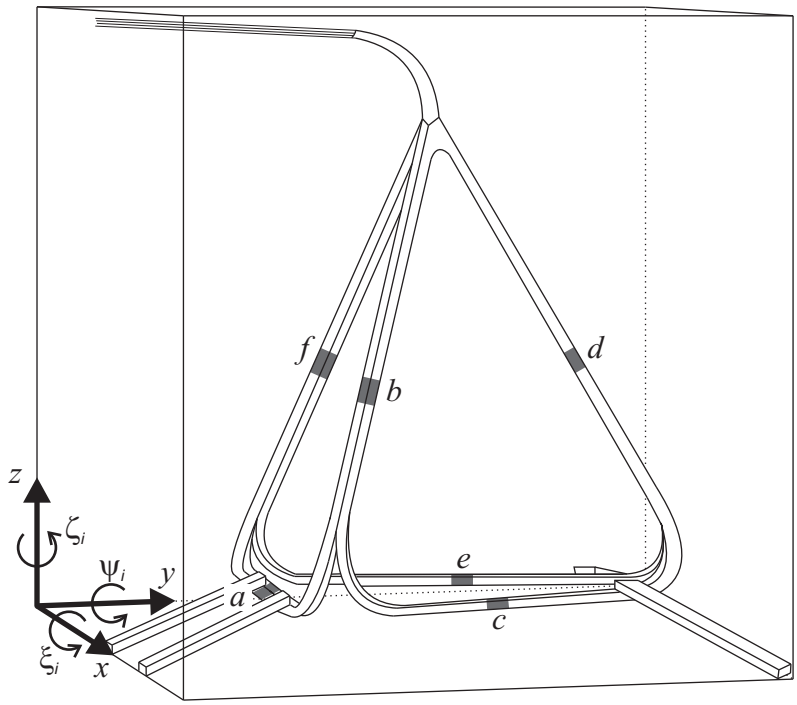


Abbildung 3.16: Gewählte Anordnung der Messstellen für die eigenen Versuche

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \\ \varepsilon_d \\ \varepsilon_e \\ \varepsilon_f \end{Bmatrix} = \mathbf{A} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \\ \varepsilon_d \\ \varepsilon_e \\ \varepsilon_f \end{Bmatrix} \tag{3.5}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos^2\xi_a & \cos^2\psi_a & \cos^2\zeta_a & \cos\xi_a\cos\psi_a & \cos\psi_a\cos\zeta_a & \cos\zeta_a\cos\xi_a \\ \cos^2\xi_b & \cos^2\psi_b & \cos^2\zeta_b & \cos\xi_b\cos\psi_b & \cos\psi_b\cos\zeta_b & \cos\zeta_b\cos\xi_b \\ \cos^2\xi_c & \cos^2\psi_c & \cos^2\zeta_c & \cos\xi_c\cos\psi_c & \cos\psi_c\cos\zeta_c & \cos\zeta_c\cos\xi_c \\ \cos^2\xi_d & \cos^2\psi_d & \cos^2\zeta_d & \cos\xi_d\cos\psi_d & \cos\psi_d\cos\zeta_d & \cos\zeta_d\cos\xi_d \\ \cos^2\xi_e & \cos^2\psi_e & \cos^2\zeta_e & \cos\xi_e\cos\psi_e & \cos\psi_e\cos\zeta_e & \cos\zeta_e\cos\xi_e \\ \cos^2\xi_f & \cos^2\psi_f & \cos^2\zeta_f & \cos\xi_f\cos\psi_f & \cos\psi_f\cos\zeta_f & \cos\zeta_f\cos\xi_f \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

Wird während des Versuchs eine schubspannungsfreie Lasteinleitung erreicht und das Tetraeder befindet sich in seiner theoretisch exakten Lage im Probekörper, ergibt sich beim Lösen des Gleichungssystems ein schubverzerrungsfreier Dehnungszustand und die entsprechenden Komponenten des Dehnungstensors ergeben sich zu Null. Treten dennoch Schubverzerrungen auf, gibt es hierfür die zwei bereits genannten Ursachen. Wird keine schubspannungsfreie Lasteinleitung realisiert, sollte in einem einaxialen Versuch wenigstens eine Schubverzerrung gleich Null sein, da eine Verzerrungsrichtung von den Lasteinleitungsmitteln unbeeinflusst bleibt. Liegt eine Abweichung des Trägergerüstes von seiner theoretisch angenommenen Lage vor, entsprechen die im Gleichungssystem eingesetzten Winkel nicht den tatsächlichen Winkeln und es ergeben sich ebenfalls Schubverzerrungen. Aus Gl. (3.5) wird ersichtlich, dass dabei nur Rotationen, aber keine Translationen des Trägergerüstes einen Einfluss auf die Berechnung der Dehnungen haben.

Unter der Voraussetzung einer schubspannungsfreien Lasteinleitung, einer exakten Lage des Trägergerüstes und der materialbedingten Unabhängigkeit zwischen den Normaldehnungen und den

Tabelle 3.8: Winkel zwischen den Messstellen und Koordinatenachsen

Messstelle i	ξ_i [°]	ψ_i [°]	ζ_i [°]
a	0,00	90,00	90,00
b	120,00	73,22	35,26
c	120,00	30,00	90,00
d	90,00	125,26	35,26
e	60,00	30,00	90,00
f	60,00	73,22	35,26

Schubverzerrungen entsprechen die berechneten Normaldehnungen den Hauptdehnungen des Probekörpers nach Gl. (3.7).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} = 0 & \varepsilon_{xz} = 0 \\ \varepsilon_{yx} = 0 & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} = 0 \\ \varepsilon_{zx} = 0 & \varepsilon_{zy} = 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \mathrel{\widehat{=}} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Können die Schubverzerrungen gleich Null gesetzt werden, ergeben sich aus Gl. (3.5) Bedingungen, die es bei einem Ausfall einer Messstelle erlauben, den fehlenden Wert durch Werte anderer Messstellen zu substituieren. Die in Gl. (3.9) bis Gl. (3.11) angegebenen Substitutionen ergeben sich für die gewählte Tetraederlage aus der numerisch invertierten Koeffizientenmatrix in Gl. (3.8).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} = 0 \\ \varepsilon_{yz} = 0 \\ \varepsilon_{zx} = 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}333 & 0 & 0{,}667 & 0 & 0{,}667 & 0 \\ -0{,}167 & 0{,}5 & -0{,}167 & 0{,}5 & -0{,}167 & 0{,}5 \\ 0 & 0 & -1{,}155 & 0 & 1{,}155 & 0 \\ -0{,}471 & 0{,}707 & 0{,}236 & -1{,}414 & 0{,}236 & 0{,}707 \\ 0 & -1{,}225 & 0{,}408 & 0 & -0{,}408 & 1{,}225 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \\ \varepsilon_d \\ \varepsilon_e \\ \varepsilon_f \end{Bmatrix} \tag{3.8}$$

$$\varepsilon_b = \varepsilon_f \tag{3.9}$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_e \tag{3.10}$$

$$\varepsilon_a = 3 \cdot \varepsilon_b + \varepsilon_c - 3 \cdot \varepsilon_d \tag{3.11a}$$

$$\varepsilon_b = \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_a - \frac{1}{3}\varepsilon_c + \varepsilon_d \tag{3.11b}$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_a - 3 \cdot \varepsilon_b + 3 \cdot \varepsilon_d \tag{3.11c}$$

$$\varepsilon_d = -\frac{1}{3} \cdot \varepsilon_a + \varepsilon_b + \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_c \tag{3.11d}$$

3.5.4 Einfluss einer Lageabweichung der Messstellen auf die Dehnungsmessung

3.5.4.1 Theoretische Betrachtung

Wie in Abschnitt 3.5.3 beschrieben, kommt es durch eine Verdrehung des Trägergerüstes beim Einbau in den Prüfkörper zu einer fehlerhaften Bestimmung der Komponenten des Dehnungstensors in Gl. (3.5). Da der prozentual auftretende Fehler in den Normaldehnungen und Schubverzerrungen nicht nur von der Winkelabweichung der Richtungskosinusse, sondern auch vom aufgebrachten

Spannungsverhältnis einschließlich der Lage des Tetraeders zu den entsprechenden Belastungsrichtungen abhängt, lässt sich der Einfluss einer Lageabweichung nur schwer abschätzen. Eine theoretische Betrachtung eines einaxialen Versuchs zeigt, dass sich bei einer reinen Verdrehung des Tetraeders um die x-Achse die kleinsten Fehler bei der Berechnung der Normaldehnungen ergeben. Die Höhe des prozentualen Fehlers bei der Dehnungsberechnung in Normalenrichtung in Abhängigkeit von den Verdrehungen um die Achsen des Bezugskoordinatensystems sind in Abbildung 3.17 dargestellt. Die Berechnung gilt jedoch nur für einen einaxialen Belastungsversuch bei einer Beanspruchung in die z-Richtung entsprechend Abbildung 3.16.

3.5.4.2 Experimentelle Untersuchung

Zur Bestimmung der Lagesicherheit des Trägergerüstes wurden sechs würfelförmige Probekörper mit einbetonierten Tetraedern hergestellt. Die Verdichtungszeit betrug bei jeweils drei Proben 90 s bzw. 180 s. Nach dem Aushärten des Betons wurden die Probekörper an zwei parallelen Ebenen zur Aufstellfläche des Tetraeders zersägt, so dass drei Schenkel des Trägergerüstes in der herausgeschnittenen Scheibe lagen (Abbildung 3.18). Durch die Bestimmung der Durchstoßpunkte der Tetraederschenkel an der Scheibe ist die Lage des Trägergerüstes bestimmbar.

Mit den Koordinaten der tatsächlichen Durchstoßpunkte werden die Richtungsvektoren $\mathbf{v}'$ der drei Tetraederschenkel aufgestellt. Weiterhin werden die Richtungsvektoren $\mathbf{v}$ der drei Messstellen in der theoretisch exakten Lage bestimmt. Bei Kenntnis der jeweils drei Vektoren und der Voraussetzung, dass alle drei Messstellen des einbetonierten Tetraeders die gleichen Verdrehungen um die Koordinatenachsen erfuhren, können mit Gl. (3.12) die Komponenten der Transformationsmatrix $\mathbf{R}$ Gl. (3.13) berechnet werden. Die verwendete Transformation ist dabei die XYZ-Konvention der Euler-Winkel in Gl. (3.14), bei der die Winkel den Drehungen eines Objektes um ein raumfestes Bezugskoordinatensystem entsprechen. Bei diesem Sonderfall werden die Euler-Winkel auch als Roll-Nick-Gier-Winkel bezeichnet. Aus den Komponenten der Transformationsmatrix $\mathbf{R}$ lassen sich mit Gl. (3.15) bis Gl. (3.17) die gesuchten Verdrehungen bestimmen. Dabei beschreibt der Winkel ξ die Verdrehung um die x-Achse, der Winkel ψ die Verdrehung um die y-Achse und der Winkel ζ die Verdrehung um die z-Achse des raumfesten Bezugskoordinatensystems xyz.

$$\mathbf{v}' = \mathbf{R}\,\mathbf{v} \tag{3.12}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\zeta\cos\psi & \cos\zeta\sin\psi\sin\xi - \sin\zeta\cos\xi & \cos\zeta\sin\psi\cos\xi + \sin\zeta\sin\xi \\ \sin\zeta\cos\psi & \sin\zeta\sin\psi\sin\xi + \cos\zeta\cos\xi & \sin\zeta\sin\psi\cos\xi - \cos\zeta\sin\xi \\ -\sin\psi & \cos\psi\sin\xi & \cos\psi\cos\xi \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

$$\xi = \arctan\left(\frac{R_{32}}{R_{33}}\right) \tag{3.15}$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - R_{31}^2}}{R_{31}}\right) \tag{3.16}$$

$$\zeta = \arctan\left(\frac{R_{21}}{R_{11}}\right) \tag{3.17}$$

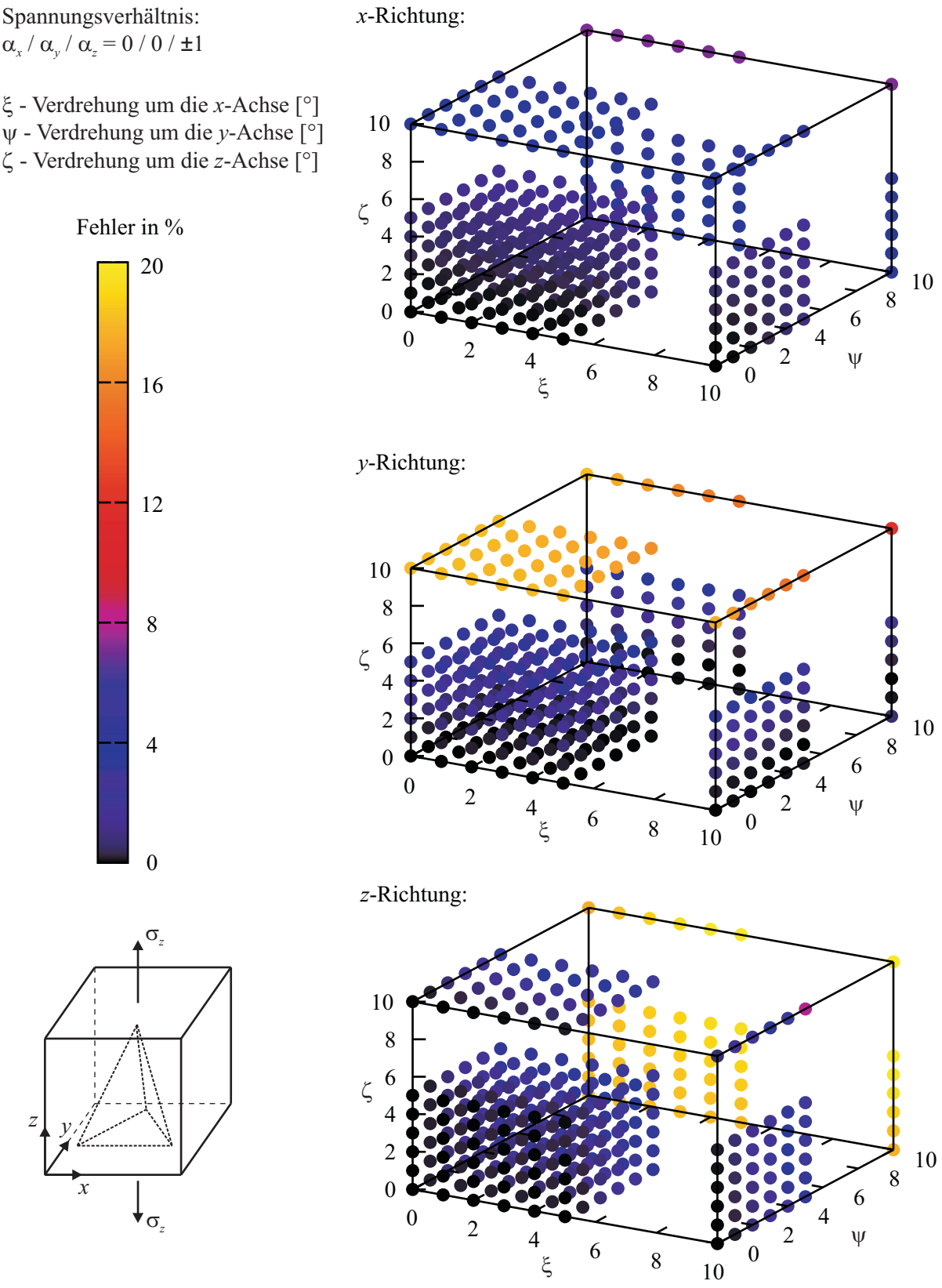


Abbildung 3.17: Prozentualer Fehler im Dehnungswert je Normalenrichtung bei einer Verdrehung des Trägergerüstes

In Tabelle 3.9 sind die berechneten Verdrehungen der einbetonierten Trägergerüste angegeben. Offensichtlich hatte die Verdichtungszeit keinen Einfluss auf die Lage des Trägergerüstes. Die sich aus den Verdrehungen ergebenden Abweichungen in den Normaldehnungen im Bezugskoordina-

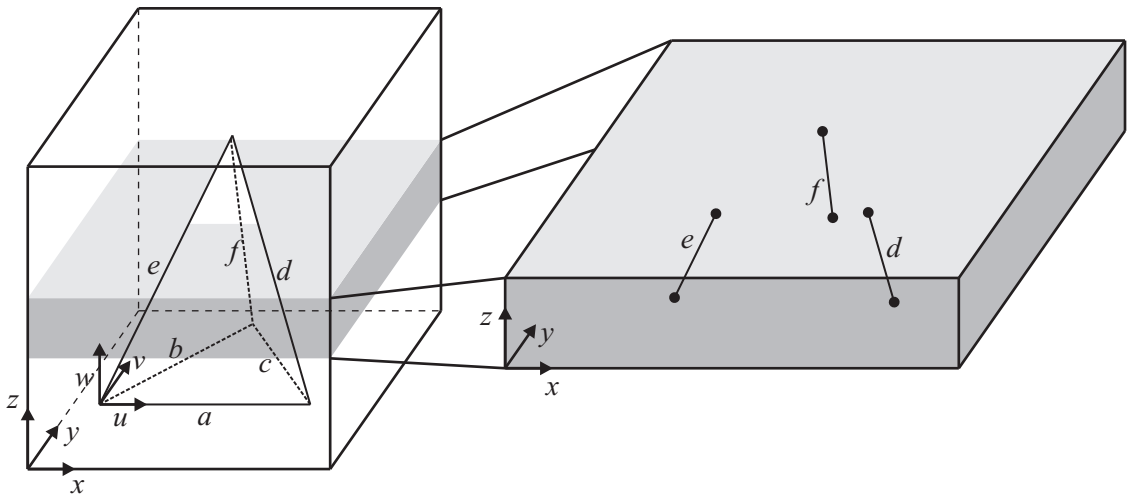


Abbildung 3.18: Lage des Trägergerüstes im Prüfkörper und Durchstoßpunkte an einer herausgeschnittenen Scheibe

tensystem für einen einaxialen Belastungsversuch mit Belastung in x-Richtung können ebenfalls Tabelle 3.9 entnommen werden. Der sich bei diesen Untersuchungen und unter diesen Bedingungen ergebende maximale Fehler beträgt 1,05% des Dehnungswertes in y-Richtung. Da die Fehlergröße, wie in Abschnitt 3.5.3 erläutert, vom aufgebrachten Spannungsverhältnis abhängig ist, werden an dieser Stelle keine weiteren Fehlergrößen berechnet.

Tabelle 3.9: Fehler in den Hauptdehnungen durch Lageabweichung des Tetraeders

Nr.	Verdichtungs-zeit [s]	Verdrehung [°] um die			Fehler der Dehnung [%] ($\alpha_x/\alpha_y/\alpha_z = \pm 1/0/0$)		
		x-Achse	y-Achse	z-Achse	ε_x	ε_y	ε_z
1	90	0,60	1,08	-0,53	0,05	0,05	0,21
2	90	-0,31	-2,21	2,41	0,39	1,05	0,90
3	90	-0,21	0,33	-1,41	0,08	0,36	0,02
4	180	0,85	0,48	-0,74	0,03	0,15	0,38
5	180	0,47	1,89	0,69	0,10	0,08	0,91
6	180	-1,65	2,41	2,16	0,04	0,66	1,00

Bei den ermittelten kleinen Verdrehungen der einbetonierten Trägergerüste wird davon ausgegangen, dass der Einfluss auch bei mehraxialen Spannungsverhältnissen klein und somit vernachlässigbar ist.

3.5.5 Herstellung des Messelementes

Faser-Bragg-Gitter-Sensor

Der Begriff Faser-Bragg-Gitter-Sensor (FBG-Sensor) beschreibt im Folgenden eine auf ein Trägerprofil applizierte Glasfaser mit einem eingeschriebenen 5 mm langen Bragg-Gitter. Das Trägerprofil ist notwendig, um die druckschlaffe Faser im Probekörper in der gewünschten Lage zu positionieren und mittels eines starren Verbundes auch Stauchungen messen zu können. Als Profil wurde ein Messing-U-Profil mit äußeren Querschnittsabmessungen von 1 mm × 1 mm gewählt. Die Verwendung von Messing als Trägermaterial erwies sich als zweckmäßig, da die Materialeigenschaften von

Messing und Beton unter einaxialer Beanspruchung im linearen Bereich der Verformungen ähnlich sind.

Die 250 µm dünne Faser besteht aus drei Schichten. Im Innersten befindet sich ein Glaskern, in dem das Bragg-Gitter eingeschrieben ist und der vom Mantelglas umgeben wird. Das Mantelglas hindert das Licht am Austritt aus dem Glaskern und wird wiederum von einer Polymerbeschichtung umgeben, das für das spröde Glas als Schutz gegen äußere Einwirkungen dient (Abbildung 3.19). Das Einkleben der Faser in das Trägerprofil erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde im Abstand von 1,5 Zentimetern links und rechts neben dem Bragg-Gitter über eine Länge von zwei bis drei Millimetern die Polymerbeschichtung der Faser entfernt, da zwischen der Beschichtung und dem Mantelglas kein Haftverbund besteht. Bei einer Dehnung bzw. Stauchung des Sensors kann es deshalb zum Auftreten eines Schlupfes zwischen diesen beiden Schichten kommen, was durch die direkte Verklebung des Mantelglases mit dem Trägerprofil an den abisolierten Bereichen verhindert wurde. Der Abstand der beiden abisolierten Bereiche bildete somit die Messbasis der Dehnungsmessung.

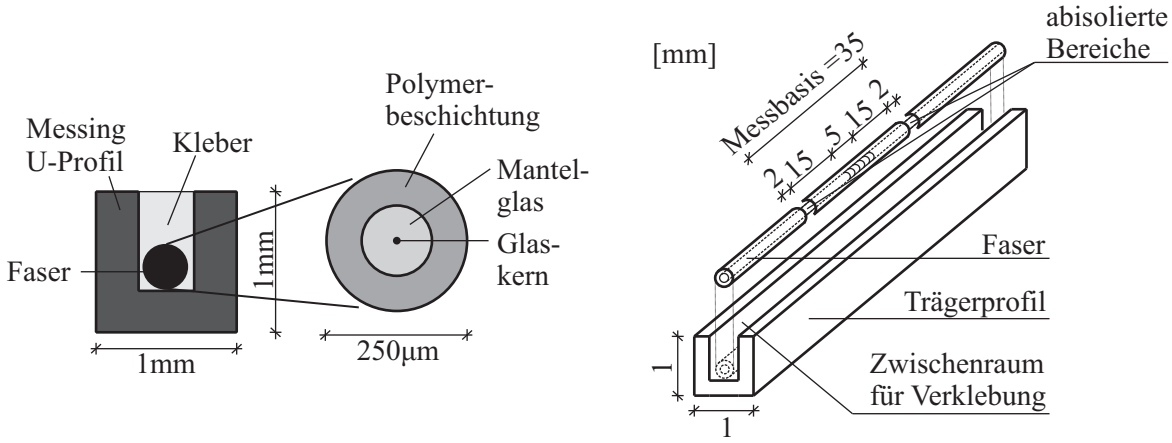


Abbildung 3.19: Aufbau des FBG-Sensors

Zum Einkleben der Faser wurde diese, unter leichter Zugspannung stehend, außerhalb der Messbasis mit zwei Klebepunkten in der Nut des Trägerprofils fixiert. Anschließend erfolgte ein vollständiges Verfüllen der Nut im Bereich der Messbasis mit einem Epoxidharzkleber, der unter Wärme ausgehärtet wurde. Dabei war darauf zu achten, dass sich der Kleber gleichmäßig in der Nut verteilte, um Steifigkeitsunterschiede zu vermeiden, die im Bereich des Gitters Einfluss auf die Dehnungsmessung haben können.

Tetraederförmiges Trägergerüst

Treten die Beanspruchungen unter mehraxialer Belastung in den Normalenrichtungen des würfelförmigen Prüfkörpers auf, ist es grundsätzlich ausreichend, die Dehnungen in diesen Richtungen zu messen, um die Spannungs-Dehnungs-Linien zu erhalten. Die dafür benötigte Positionierung der Messstellen bei gleichzeitiger Einhaltung von weiteren Randbedingungen, wie z. B. das Herausführen der Fasern an einer Stelle des Probekörpers, ließ sich jedoch dabei nicht realisieren. Die tetraederförmige Anordnung der Messstellen bietet hingegen die Möglichkeit zur Einhaltung der Randbedingungen und wird deshalb umgesetzt.

Das tetraederförmige Trägergerüst, dessen umhüllende Seitenflächen aus vier gleichseitigen Dreiecken besteht, setzte sich aus drei aus den Messing-U-Profilen geformten Dreiecken zusammen. Bei jedem Dreieck wurden zwei Ecken „ausgerundet“. Die verbleibenden Spitzen der Dreiecke bilden die Tetraederspitze, an der alle Faserenden die U-Profile verließen. Je Dreieck wurden zwei Fasern

mit je einem Bragg-Gitter in das Profil geklebt, so dass sich nach dem Zusammenstellen der drei Dreiecke zu einem Tetraeder je Kante eine Messstelle befand (Abbildung 3.16 und 3.20). Die zwölf Faserenden der sechs Messstellen wurden an der Tetraederspitze in einem Schrumpfschlauch gefasst und an einer Stelle aus dem Probekörper geführt. Der Schrumpfschlauch wurde dabei von der Tetraederspitze bis zur Seitenfläche der Betonierform ebenfalls von einem Messingprofil geführt, um den bei der Umlenkung des Faserbündels entstehenden Verwerfungen entgegenzuwirken und die Funktionalität der Messstellen zu gewährleisten. Die Fasern wurden im Bereich einer Borste einer Druckbelastungsbürste aus dem Prüfraum der Triaxialprüfmaschine geführt, wofür diese Borste gekürzt wurde und nicht auf der Probekörperoberfläche aufstand. Die entstehende Fehlstelle im Lasteinleitungsbereich befand sich außerhalb des Messbereichs der FBG, betrug ungefähr 1/400 einer Seitenfläche des Prüfkörpers und konnte somit vernachlässigt werden.

Zur Positionierung des Trägergerüstes in der würfelförmigen Betonierform werden auf der Aufstellseite, die sich gegenüber liegend zur Tetraederspitze befindet, vier Abstandshalter angeordnet. Mit den Abstandshaltern wird neben der mittigen Positionierung des Trägergerüstes in der xy-Ebene auch eine mittige Anordnung in der z-Richtung realisiert (Abbildung 3.16 und 3.20).

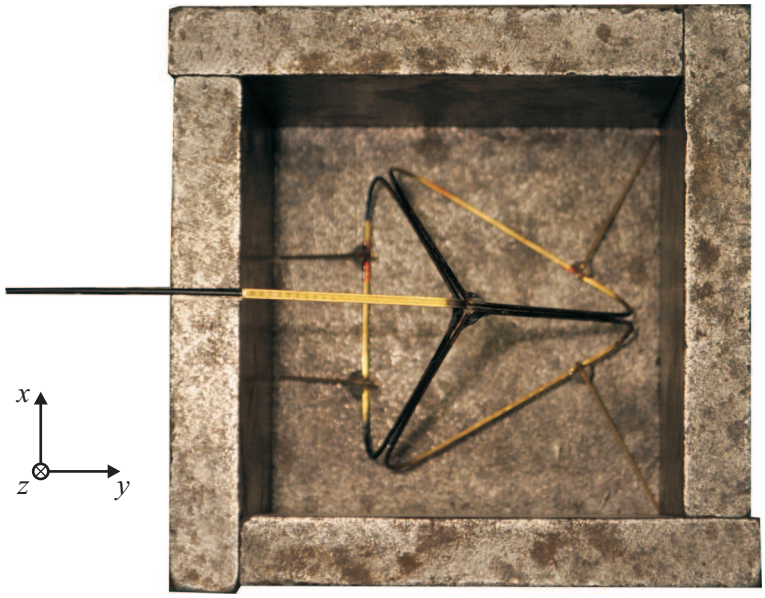


Abbildung 3.20: Tetraederförmiges Trägergerüst in einer Betonierform der Prüfkörper

3.5.6 Verifikation der Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gitter-Sensoren im Beton

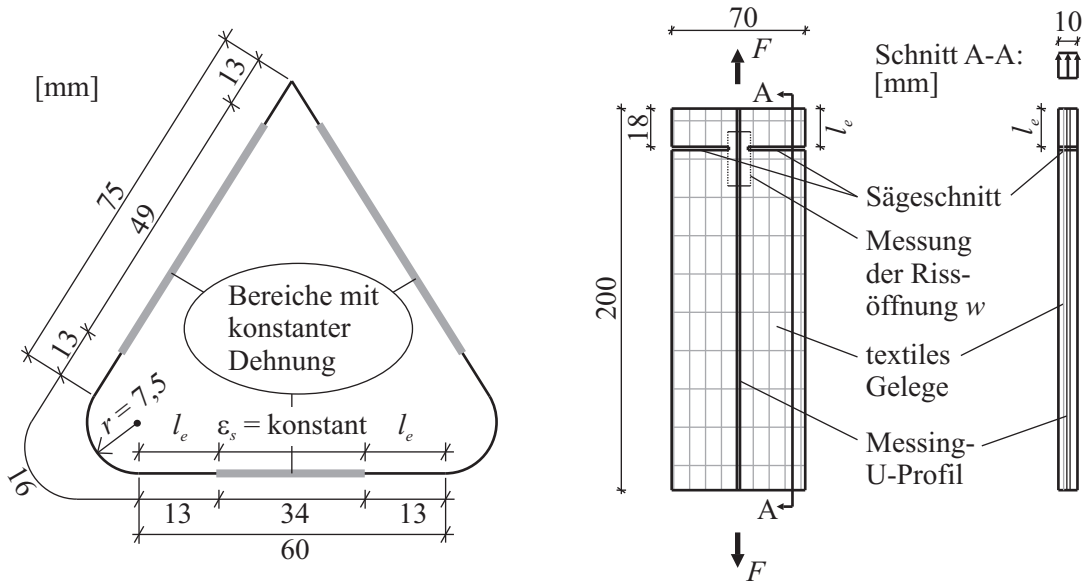
3.5.6.1 Allgemeines

An prismenförmigen Betonprobekörpern wurden einaxiale Druck- und Zugversuche durchgeführt, um die prinzipielle Eignung und die Anwendungsgrenzen der FBG-Sensoren zur Messung von Dehnungen im Beton zu bestimmen. Untersucht wurde das Verbundverhalten zwischen Faser und Trägerprofil sowie zwischen Trägerprofil und Beton. Weiterhin wurde geprüft, ob Kriechvorgänge im FBG-Sensor auftreten und ob die Heterogenität des Betons einen Einfluss auf das Messergebnis hat.

3.5.6.2 Verbundverhalten zwischen Trägerprofil und Beton

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Versuche und Versuchsergebnisse gelten grundsätzlich nur für einen ungeschädigten Betonprobekörper. Treten mit zunehmender Belastung Risse im Betongefüge auf, kann nicht gewährleistet werden, dass über die Messbasis des FBG-Sensors eine konstante Dehnungsverteilung vorliegt und somit die gemessene Dehnung der mittleren Dehnung des Probekörpers entspricht.

Für eine ordnungsgemäße Dehnungsmessung mit FBG-Sensoren im ungeschädigten Beton muss gewährleistet sein, dass über die 35 mm lange Messbasis eine konstante Dehnung im Sensor vorliegt. Daher dürfen in diesem Bereich keine Relativverschiebungen zwischen Bragg-Gitter und Beton auftreten. Die Länge der kürzesten Seite eines Dreiecks, aus denen das Tetraeder zusammengesetzt wird, beträgt ca. 60 mm (Abbildung 3.21a), so dass nach Abzug der Messbasis auf jeder Seite ca. 13 mm zur Lasteinleitung der Beanspruchung in das Trägerprofil zur Verfügung stehen.



a) Bereiche mit konstanter Dehnung einer Tetraederkante

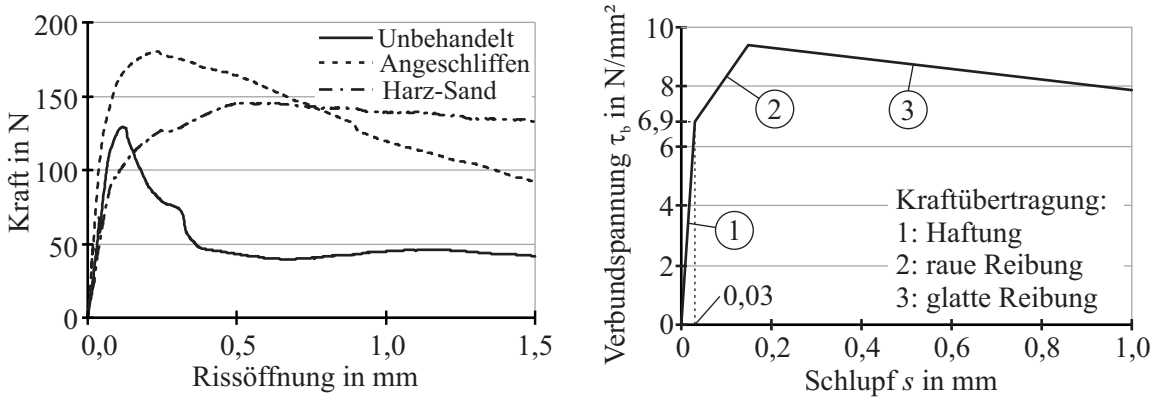
b) Probekörpergeometrie zur Messung der Kraft-Rissöffnungs-Beziehung nach Lorenz & Ortlepp

Abbildung 3.21: Lasteinleitungsbereiche in das Trägerprofil und Probekörper zur Ermittlung der Kraft-Rissöffnungs-Beziehung nach Lorenz & Ortlepp [75, 74]

Zur Bestimmung der übertragbaren Spannung innerhalb der Lasteinleitungslänge l_e wird die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung des Materialverbundes FBG-Sensor - Beton benötigt, die sich aus experimentell ermittelten Kraft-Rissöffnungs-Beziehungen nach Lorenz & Ortlepp [75, 74] aufstellen lässt (Abbildung 3.21b). Da die Verbundeigenschaften voraussichtlich stark von der Oberflächenrauigkeit der Profile abhängen, wurden drei Serien mit je sechs Probekörpern für unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten untersucht. In Serie 1 blieben die Außenseiten der Profile unbehandelt. In Serie 2 wurden die Außenseiten mit einem feinkörnigen Schleifpapier bearbeitet und in Serie 3 mit Epoxidharz bestrichen und das Harz im nicht ausgehärteten Zustand mit feinkörnigem Sand bestäubt.

In Abbildung 3.22a sind die aus jeweils sechs Einzelversuchen gemittelten Kraft-Rissöffnungs-Beziehungen für das unbehandelte, das geschliffene und das mit Epoxidharz und Sand vorbehandelte Profil dargestellt. Mit den geschliffenen Profilen konnten die größten Kräfte F bei gleich großen Rissöffnungen w übertragen werden.

Wird die gemessene Kraft-Rissöffnungs-Beziehung der Serie 2 nach dem Verfahren von Lorenz & Ortlepp [75, 74] in eine Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung überführt, ergeben sich drei charakteristische Bereiche. Während im Bereich 1 die Kraftübertragung durch den Haftverbund erfolgt, kommt es im Bereich 2 zur Auflösung des Haftverbundes unter gleichzeitiger Aktivierung einer mechanischen Verzahnung, wodurch sich die auftretende Verbundspannung erhöht. Im Anschluss findet im Bereich 3 ein Übergang zu einer Kraftübertragung infolge Reibung statt, der durch die Abnahme der Verbundspannungen gekennzeichnet ist (Abbildung 3.22b). Zur Vermeidung von großen Verschiebungen im Bereich der Lasteinleitungslänge erfolgt die Berechnung der maximal übertragbaren Beanspruchung ausschließlich unter Ansatz des Haftverbundes.



a) Kraft-Rissöffnungs-Beziehungen für unterschiedlich vorbehandelte Profiloberflächen

b) Verspannungs-Schlupf-Beziehung für das angeschliffene Profil

Abbildung 3.22: Ergebnisse der Verbunduntersuchungen zwischen Trägerprofil und Beton

Für mathematisch beschreibbare und integrierbare Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen kann nach Martin [79] die übertragbare Kraft nach Vorgabe einer Lasteinleitungslänge iterativ bestimmt werden. Durch Umstellung der Gleichungen gelingt die Bestimmung der Lasteinleitungslänge bei Vorgabe eines Punktes der Kurve der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung. Für den geradlinigen Bereich des Haftverbundes konnte unter Vorgabe des maximal möglichen Schlupfes und der dazugehörigen Verbundspannung eine Lasteinleitungslänge l_e und die zugehörige maximale Spannung im Trägerprofil bestimmt werden (Abbildung 3.23).

Aus der maximal auftretenden Spannung im FBG-Sensor lässt sich die zugehörige maximale Dehnung ε_{max} ermitteln, die in der Materialmatrix auftreten darf. Zur Bestimmung der maximalen Dehnung wurde eine Steifigkeit des FBG-Sensors von 75000 N/mm² (siehe Abschnitt 3.5.6.3) und ein elastisches Materialverhalten vorausgesetzt. Die Ergebnisse der drei untersuchten Serien sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst. Bei den geschliffenen Proben war der größte Haftverbund der drei untersuchten Serien zu verzeichnen. Dies führt zu einer kurzen Lasteinleitungslänge von $l_e = 13\,\text{mm}$ bei einer maximal zulässigen Dehnung von $\varepsilon_{max} = 2930\,\mu\text{m/m}$.

Tabelle 3.10: Verbundspannung und maximale Dehnung unter Aktivierung des Haftverbundes

Serie	Behandlung	Verbundspg. τ_b [N/mm²]	Schlupf s_0 [mm]	l_e [mm]	Spannung [N/mm²]	ε_{max} [µm/m]
1	unbehandelt	5,4	0,06	20	276	3680
2	geschliffen	6,9	0,03	13	220	2930
3	Harz + Sand	6,5	0,06	18	300	4000

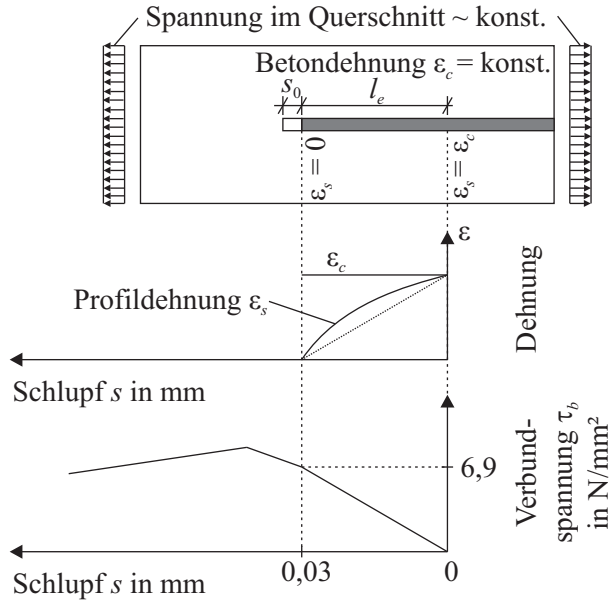


Abbildung 3.23: Verbundsituation des Trägerprofils im Probekörper

Die ermittelte Grenzdehnung liegt unterhalb von zu erwartenden Dehnungen bei den mehraxialen Belastungsversuchen, zumindest wenn keine Zugkomponente in der Beanspruchung vorliegt. Daher muss bei der Überschreitung der Grenzdehnung eine kritische Betrachtung der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien erfolgen und geprüft werden, ob im Bereich der Grenzdehnung Diskrepanzen auftreten.

Aufgrund der Begrenzung der Lasteinleitungslänge aus geometrischen Randbedingungen von ebenfalls 13 mm werden somit zur Herstellung der Trägergerüste für die mehraxialen und für alle weiteren Versuche geschliffene Profile verwendet. Es ist zu berücksichtigen, dass auf die Verbundspannung positiv bzw. negativ wirkende Einflüsse wie Querdruck, Querzug oder der Einfluss von Umlenkungen des Trägerprofils nicht in die Berechnung eingingen. Bei der vorliegenden Umlenkung der Profile wird davon ausgegangen, dass größere Kräfte im Bereich des Haftverbundes übertragen und somit auch größere Verformungen gemessen werden können.

3.5.6.3 Kriechvorgänge und Homogenität bei der Dehnungsmessung mit FGB-Sensoren

Zur Untersuchung von Kriechvorgängen im FBG-Sensor und der Homogenität der Dehnungsmessung bei ungleichmäßiger Verteilung von Zuschlägen entlang der Kanten des Trägergerüstes wurde an den dafür verwendeten prismenförmigen Probekörpern das in Abbildung 3.24 dargestellte Belastungsregime aufgebracht. Die zyklischen Lastpfade dienten dabei zur Abschätzung der Homogenität der Messung verschiedener Messstellen und der Entwicklung des Verbundverhaltens, während die anschließend konstant gehaltene Belastung Aussagen zu Kurzzeitkriechvorgängen ermöglichen sollte. Die dafür festgelegten 30 Minuten entsprachen dabei dem drei- bis fünffachen der erwarteten Versuchsdauer der mehraxialen Belastungsversuche. Die jeweils gewählte Oberlast betrug bei den Druckversuchen ca. 80 % und bei den Zugversuchen ca. 70 % der erwarteten Maximalbelastung.

Im Vorlauf zu den Untersuchungen an prismenförmigen Betonprobekörpern wurden drei einaxiale Zugversuche mit dem entsprechenden Belastungsregime an einzelnen FBG-Sensoren durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 3.25 dargestellt sind. Neben der FBG-Messung erfolgte die Ermittlung der Dehnungen mit einem DD1-Multi-Sens-Dehnungsmesser, der mit einer Messbasis von 100 mm die Verformung an den äußeren Oberflächen des Profils als Referenzmessung aufnahm.

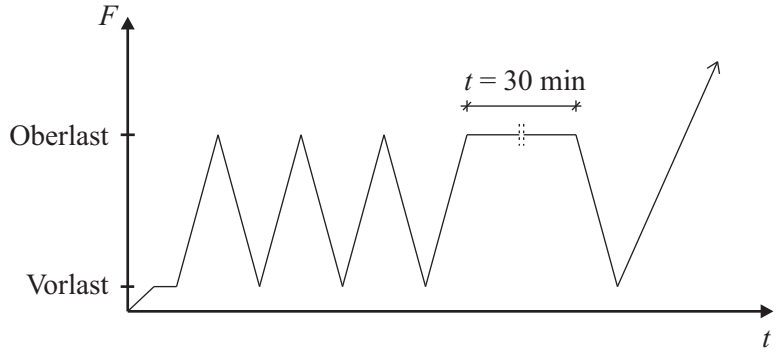
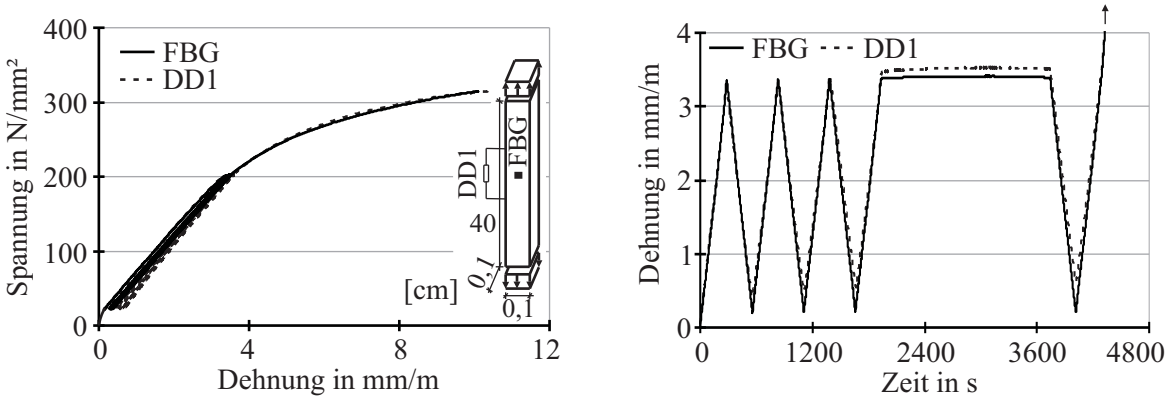


Abbildung 3.24: Belastungsregime bei Versuchen zur Ermittlung von Kriechvorgängen und der Homogenität der Messung verschiedener Messstellen



a) Spannungs-Dehnungs-Diagramm b) Dehnungs-Zeit-Diagramm

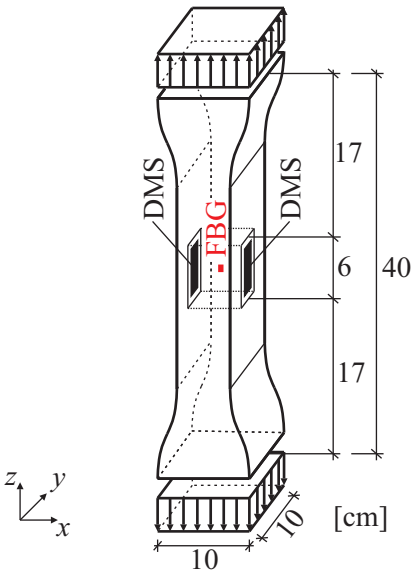
Abbildung 3.25: Einaxialer Zugversuch am einzelnen FBG-Sensor ohne umgebenden Beton

Die Kurven beider Messmethoden weisen eine gute Übereinstimmung auf. Weder im Bereich der zyklischen Belastung noch im Bereich der konstant gehaltenen Last treten nennenswerte Abweichungen zwischen den beiden Messungen auf. Daraus lässt sich ableiten, dass bis zu einer Dehnung von 10 mm / m, die gleichzeitig ungefähr dem maximalen Dehnungsmessbereich eines FBG entspricht, ein störungsfreier Verbund zwischen den Schichten Profil – Kleber – Faser vorliegt (Abbildung 3.25a). Ebenfalls können anhand der Ergebnisse Kriechvorgänge innerhalb des Sensors im betrachteten Zeitraum ausgeschlossen werden (Abbildung 3.25b).

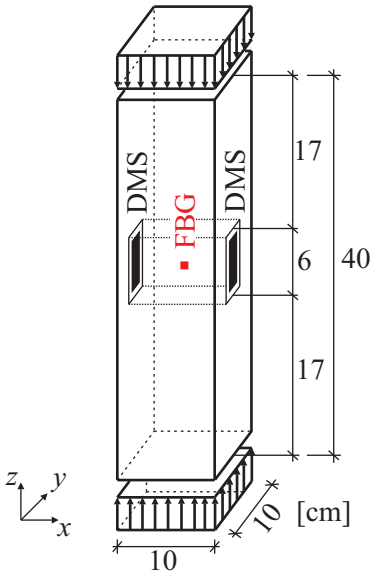
Weiterhin lässt sich aus den Ergebnissen dieser Versuche die Fließgrenze und die Steifigkeit des FBG-Sensors bestimmen. Die Fließgrenze liegt bei ca. 200 N/mm^2 und somit im Bereich der maximal übertragbaren Spannung bei ausschließlicher Aktivierung des Haftverbundes. Aus den ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der FBG-Messung wird im Bereich des ersten Anstieges der Kurve der Elastizitätsmodul der FBG-Sensoren bestimmt. Im Mittel liegt dieser bei 75000 N/mm^2 und ist um ca. 50 % größer als der des untersuchten Betons.

Zur weiteren Untersuchung von Kriechvorgängen und der Homogenität der Dehnungsmessung wurden jeweils drei Zug- und drei Druckversuche an prismenförmigen Betonprobekörpern durchgeführt. Die Prismen hatten die Abmessungen von 40 cm × 10 cm × 10 cm, wobei sich die Probekörper für die Zugversuche in x-Richtung auf 5 cm verjüngen (Abbildung 3.26a und 3.26b). Die FBG-Sensoren wurden bei allen Probekörpern in Belastungsrichtung angeordnet. Zur Positionierung und Lagefixierung wurden vier U-förmige Halterungen an den Betonierformrändern fixiert, auf deren horizontalen Schenkeln der Sensor zwängungsfrei auflagerte (Abbildungen 3.26c und 3.26d). Zur Verifizierung

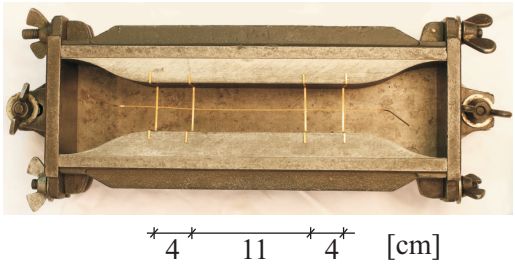
der Messung mit den FBG-Sensoren erfolgte zusätzlich die Dehnungsmessung an zwei gegenüber liegenden Außenseiten des Probekörpers mittels zweier DMS.



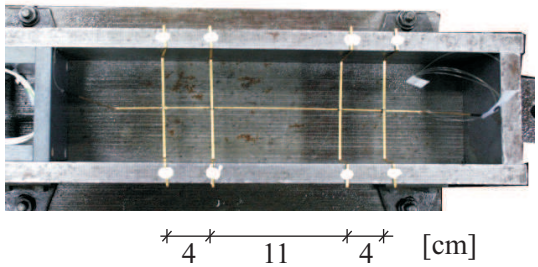
a) Geometrie Zugprisma



b) Geometrie Druckprisma



c) Einbau des FBG-Sensors in ein Zugprisma



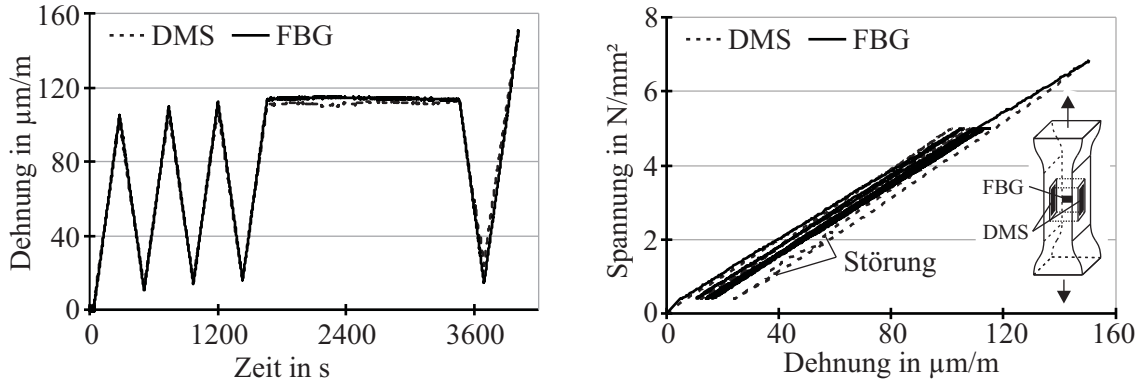
d) Einbau des FBG-Sensors in ein Druckprisma

Abbildung 3.26: Prismenförmige Probekörper für einaxiale Zug- und Druckversuche

In Abbildung 3.27 sind die Dehnungs-Zeit-Kurve und die Spannungs-Dehnungs-Linie eines einaxialen Zugversuchs dargestellt. Vergleicht man die Kurven der DMS- und der FBG-Messung im Dehnungs-Zeit-Diagramm ist eine sehr gute Übereinstimmung ersichtlich. Lediglich beim Erreichen des Entlastungspunktes nach der Phase der konstanten Belastung weichen die DMS-Werte von den FBG-Werten geringfügig ab. Bei der Betrachtung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ist zu erkennen, dass die Anstiege der Kurven vor der konstanten Last gut übereinstimmen. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist die auftretende Abweichung zwischen den beiden Kurven während der Entlastung nach der konstanten Last deutlicher sichtbar. Diese Abweichung wirkt sich anschließend auch auf den Verlauf bis zum Erreichen der Bruchlast aus. Bei genauer Betrachtung wird ersichtlich, dass es bei der DMS-Messung während der letzten Entlastung zu einer Störung kam, die jedoch bei der Versuchsdurchführung nicht beobachtet wurde und somit nachträglich nicht geklärt werden kann.

Bei einer konstanten Last traten weder bei der DMS-Messung noch bei der FBG-Messung Dehnungsänderungen auf. Daraus kann abgeleitet werden, dass es im Beton aber auch im FBG-Sensor zu keinen nennenswerten Kriechverformungen bei einer Zugbeanspruchung kommt.

Im einaxialen Druckversuch konnten beim Vergleich zwischen FBG- und DMS-Messung annähernd gleiche Ergebnisse wie beim Zugversuch erzielt werden (Abbildung 3.28). Auffällig ist, dass zwischen beiden Kurvenverläufen mit zunehmender Belastung eine proportional wachsende Dehnungsdifferenz auftritt, deren Betrag beim Erreichen der Oberlast der zyklischen Belastungsstufen ca. 10 %

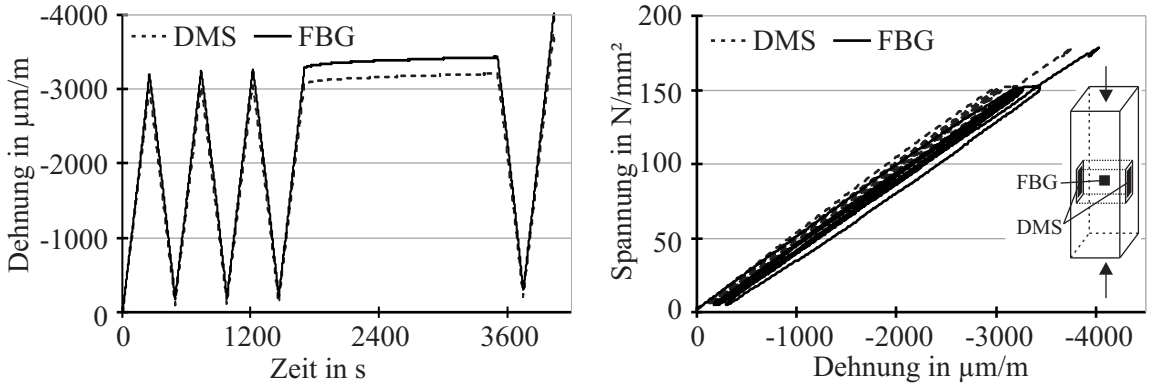


a) Dehnungs-Zeit-Diagramm b) Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Abbildung 3.27: Einaxialer Zugversuch eines Betonprismas mit FBG- und DMS-Dehnungsmessung

der Gesamtdehnung entspricht. Die Werte der FBG-Messung liegen dabei über den Werten der DMS-Messung. Dies könnte durch einen Dehnungsgradienten über den Querschnitt der Probe hervorgerufen werden, der bei einer Entlastung einen plastischen Anteil aufweist. Ein Anzeichen dafür ist das Auftreten von jeweils gleich großen Differenzen beim Erreichen der Oberlast, wobei dieses Phänomen nur mittels weiterführender Versuche abschließend geklärt werden kann.

Während der konstant gehaltenen Beanspruchung kam es bei beiden Messmethoden zu einer gleichgroßen Zunahme der Dehnungen. Es wird angenommen, dass die Dehnungszunahme auf Kriechvorgänge im Beton zurückzuführen ist, da diese durch beide Messmethoden erfasst wurden.



a) Dehnungs-Zeit-Diagramm b) Spannungs-Dehnungs-Diagramm

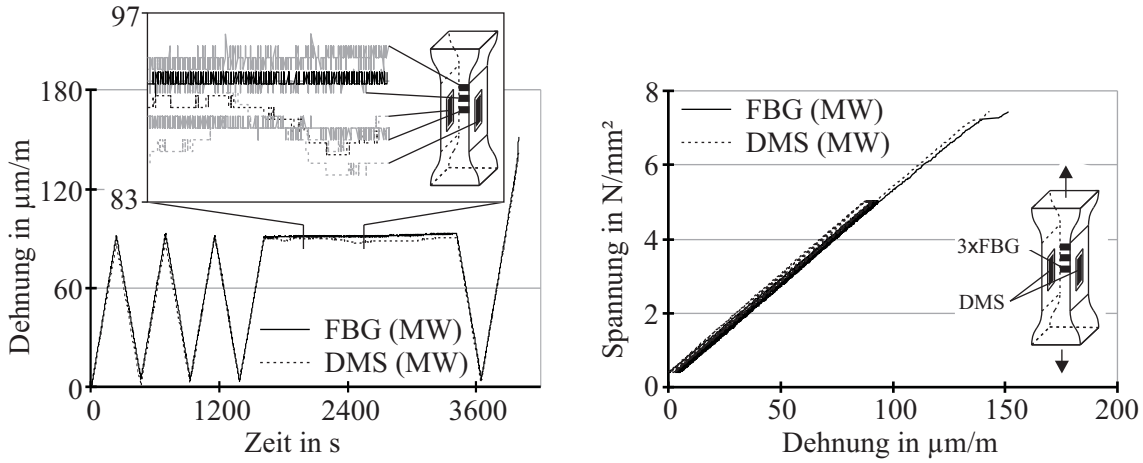
Abbildung 3.28: Einaxialer Druckversuch eines Betonprismas mit FBG- und DMS-Dehnungsmessung

3.5.6.4 Einfluss der Heterogenität des Betons auf die Dehnungsmessung

Zur Untersuchung des Einflusses der Heterogenität des Betons auf die Dehnungsmessung mit FBG-Sensoren wurden Sensoren mit fünf Messstellen in einer Faser hergestellt und in die prismenförmigen Prüfkörper einbetoniert. Die fünf Bragg-Gitter einer Faser wiesen einen lichten Abstand von jeweils 10 mm auf, so dass an jeder Messstelle unterschiedliche Gefügestrukturen des Betons auftraten. Die Belastung der einaxialen Zug- und Druckversuche erfolgte entsprechend der Versuche zur Untersuchung von Kriechvorgängen (siehe Abbildung 3.24). Eine Referenzmessung mit 60 mm langen DMS auf den Oberflächen des Prüfkörpers wurde ebenfalls analog zu den Versuchen zur Untersuchung von Kriechvorgängen vorgenommen.

Die Messergebnisse der gemittelten FBG- und DMS-Dehnungsmessung eines Zugversuchs sind in Abbildung 3.29 und die eines Druckversuchs in Abbildung 3.30 dargestellt. Sowohl für die Zug-

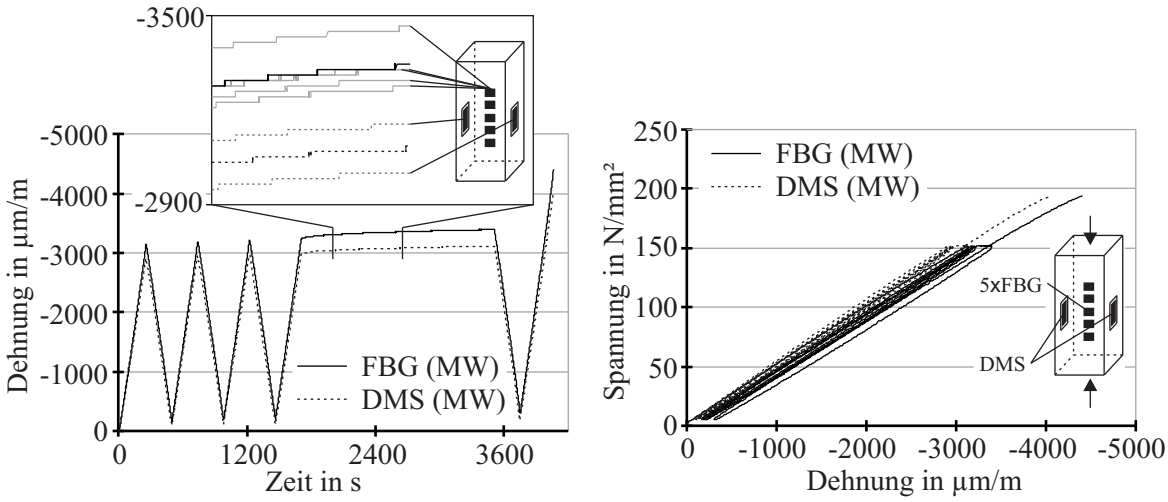
versuche als auch für die Druckversuche waren die Messergebnisse der einzelnen FBG-Messungen homogen. Bei den Zugversuchen, bei denen durch Anwendungsfehler der Messsoftware nur drei der fünf Bragg-Gitter gemessen wurden, lagen die Streuungen bei weniger als ±5 % des Mittelwertes.



a) Dehnungs-Zeit-Diagramm b) Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Abbildung 3.29: Einaxialer Zugversuch eines Betonprismas mit drei FBG-Sensoren und DMS-Dehnungsmessung

Bei den Druckversuchen lagen die Messwerte der einzelnen Bragg-Gitter ebenfalls sehr dicht beieinander, wobei die Messstelle 2 die größten Abweichungen zum Mittelwert aufwies. Was diese Abweichung hervorrief, ließ sich an dem bis zum Bruch belasteten Prüfkörper nicht feststellen. Wird vergleichend dazu die Differenz aus den beiden DMS-Messungen betrachtet, liegt die Streuung der FBG-Messung wie bei den Zugversuchen innerhalb eines Bereichs von ±5 % um den Mittelwert. Wie bei den einaxialen Druckversuchen zur Untersuchung der Kriechvorgänge wurden von den FBG ca. 10 % höhere Dehnungen im Vergleich zu den DMS gemessen, deren Ursache nicht eindeutig geklärt werden konnte.



a) Dehnungs-Zeit-Diagramm b) Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Abbildung 3.30: Einaxialer Druckversuch eines Betonprismas mit fünf FBG-Sensoren und DMS-Dehnungsmessung

Die einaxialen Zug- und Druckversuche haben gezeigt, dass bei der Dehnungsmessung mit FBG in einer feinkörnigen stahlfaserbewehrten Betonmatrix der Einfluss der Gefügestruktur vernachlässigbar ist und somit eine einzelne Messstelle vertrauenswürdige Ergebnisse liefert.

3.5.7 Dehnungsmessung mittels Faser-Bragg-Gitter bei ein- und mehraxialen Belastungsversuchen

Die Verifizierung der Dehnungsmessung mit FBG bei mehraxialen Belastungsversuchen erfolgt an würfelförmigen Probekörpern. Bei den ein- und dreiaxialen Belastungsversuchen wurden die Prüfkörper mit der Messstellenanordnung entsprechend Abbildung 3.16 und dem in Abbildung 3.31 dargestellten Belastungsregime geprüft. Da bei den vorhergehenden einaxialen Versuchen gezeigt werden konnte, dass lediglich Kriechverformungen im Beton auftreten, wurde an dieser Stelle auf einen Lastbereich mit konstanter Last verzichtet.

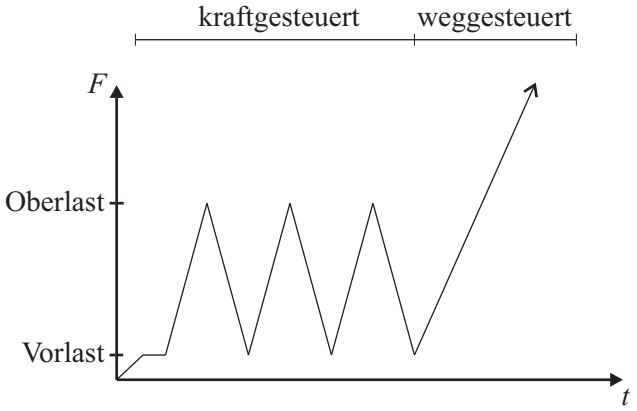
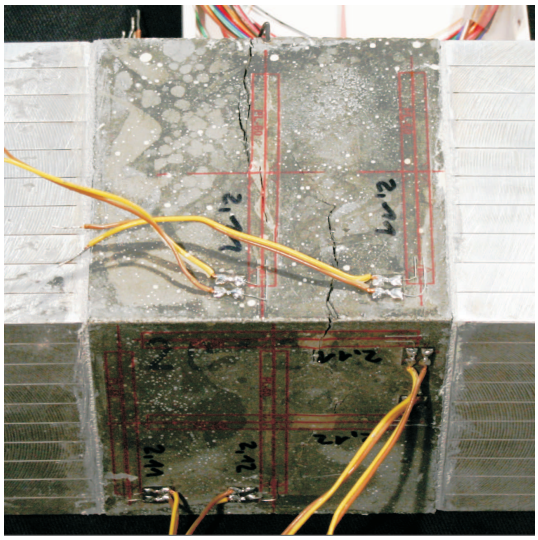


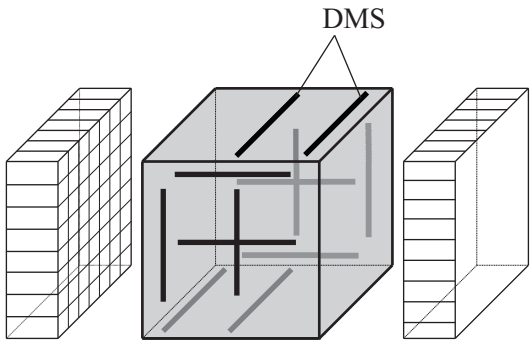
Abbildung 3.31: Belastungsregime bei Versuchen in der Triaxialprüfmaschine

Die Referenzdehnungsmessung bei den einaxialen Belastungsversuchen in der Triaxialprüfmaschine erfolgte in den drei Normalenrichtungen mittels DMS. Im Gegensatz dazu konnte bei den dreiaxialen Versuchen die Referenzmessung lediglich mittels IWA über die Querverformung der Belastungsbürsten vorgenommen werden, was wie bereits beschrieben einen kritischen Umgang mit den Messwerten erfordert. Die Anordnung der externen Messmittel ist in Abbildung 3.32 dargestellt.

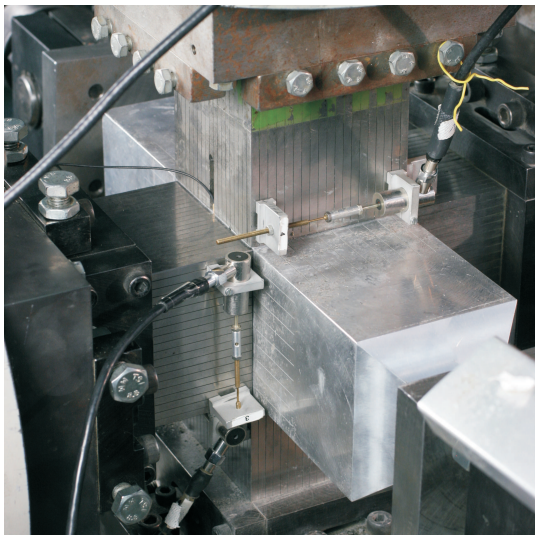
In Abbildung 3.33a sind die Messwerte der FBG-Sensoren eines einaxialen Zugversuchs über die Versuchsdauer dargestellt. Alle Messstellen folgen gleichmäßig dem Belastungszyklus und die zu einer Prüfkörper halbierenden yz-Ebene symmetrisch angeordneten Messstellen weisen nahezu gleich große Dehnungen auf (vgl. Abbildung 3.16). Die aus den gemessenen Werten berechneten Dehnungen in den Normalenrichtungen des Bezugskoordinatensystems nach Gl. (3.5) sind in Abbildung 3.33b den DMS-Messwerten gegenübergestellt. Alle drei Richtungen weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf, wobei es zu einer kleinen Abweichung in der y-Richtung bei der Messung mit FBG-Sensoren kommt. Diese Abweichung kann aus einer Lageabweichung des Tetraeders und gleichzeitiger Schubbeanspruchung durch die Lasteinleitungsmittel hervorgerufen worden sein. Diese Annahme wird durch die berechneten Schubverzerrungen für alle drei Anteile des Dehnungstensors gestützt (Abbildung 3.34).

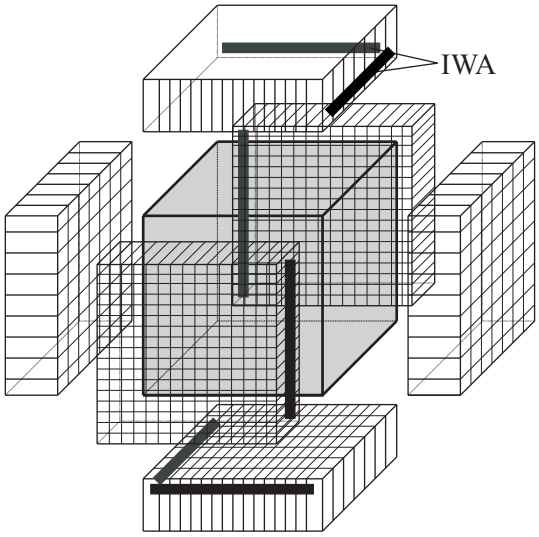
Im Bereich des Bruchlastpfades wird aufgrund des Anstiegs der Kurven der Schubverzerrungen deutlich, dass in der xy-Richtung und in der xz-Richtung eine Einwirkung auftritt, die in der yz-Richtung nicht existiert. Dies kann auf die Lasteinleitungsmittel zurückgeführt werden, die beim einaxialen Zugversuch nur zwei der drei Schubverzerrungen beeinflussen, weshalb den in der dritten Richtung berechneten Schubverzerrungen somit nur die Verdrehung des Tetraeders zugrunde liegt. Da generell gilt, dass es aufgrund der Überlagerung beider Effekte nicht möglich ist, aus den Schubverzerrungen auf die Verdrehung des Tetraeders zu schließen, kann keine separate Auswertung der Messergebnisse hinsichtlich dieser beiden Einflüsse erfolgen.





a) Einaxiale Belastungsversuche





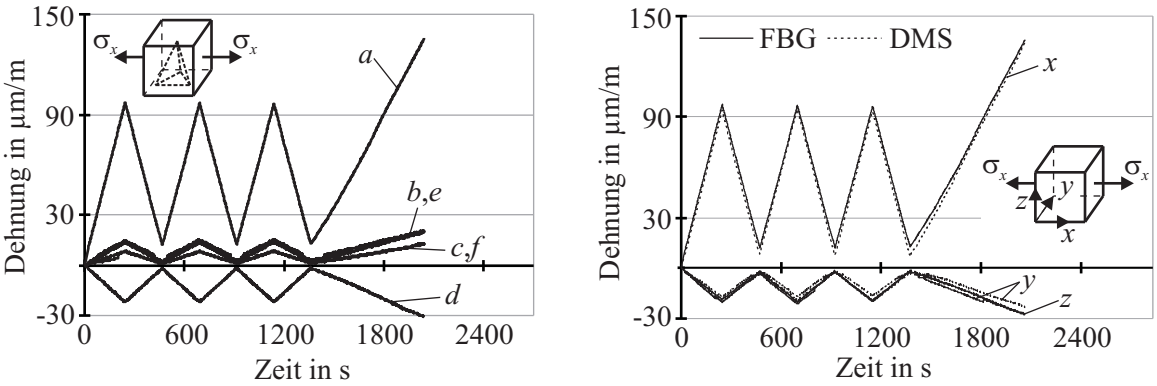
b) Dreiaxiale Belastungsversuche

Abbildung 3.32: Anordnung der Messmittel bei den Versuchen in der Triaxialprüfmaschine

Eine Abschätzung des Fehlers in der Dehnungsmessung für diesen einaxialen Zugversuch lässt sich jedoch durch eine Rückrechnung auf die im Versuch aufgebrachten Belastungen vornehmen. Unter der Annahme eines isotropen linear-elastischen Materialverhaltens müssen der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl gemäß Gl. (2.4) so ermittelt werden, dass sich die im Versuch aufgebrachten Beanspruchungen in den Normalenrichtungen unter Ansatz der entsprechenden Dehnungen ergeben. Mit diesen Materialparametern erfolgt gemäß Gl. (3.18) die Berechnung der Schubspannungen, die theoretisch Null sein müssen. Bei dem hier vorgestellten Versuch beträgt die derart berechnete Schubspannung je Richtung maximal $\tau_{ij} = \pm 0{,}20\,\mathrm{N/mm^2}$ und ist somit bei entsprechend gleichzeitiger Beanspruchung in Hauptbelastungsrichtung von $\sigma_x = 7\,\mathrm{N/mm^2}$ vernachlässigbar.

$$\tau_{ij} = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \cdot \gamma_{ij} \tag{3.18}$$

Die Messergebnisse eines einaxialen Druckversuchs zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen den FBG und DMS (Abbildung 3.35a). Wie schon bei den einaxialen Druckversuchen an prismenförmigen Probekörpern (siehe Abschnitt 3.5.6.3 und Abschnitt 3.5.6.4) wurde in der



a) Messwerte der FBG-Messung

b) Vergleich der FBG-Messung nach der Transformation mit der DMS-Messung

Abbildung 3.33: Vergleich der FBG- mit der DMS-Dehnungsmessung beim einaxialen Zugversuch

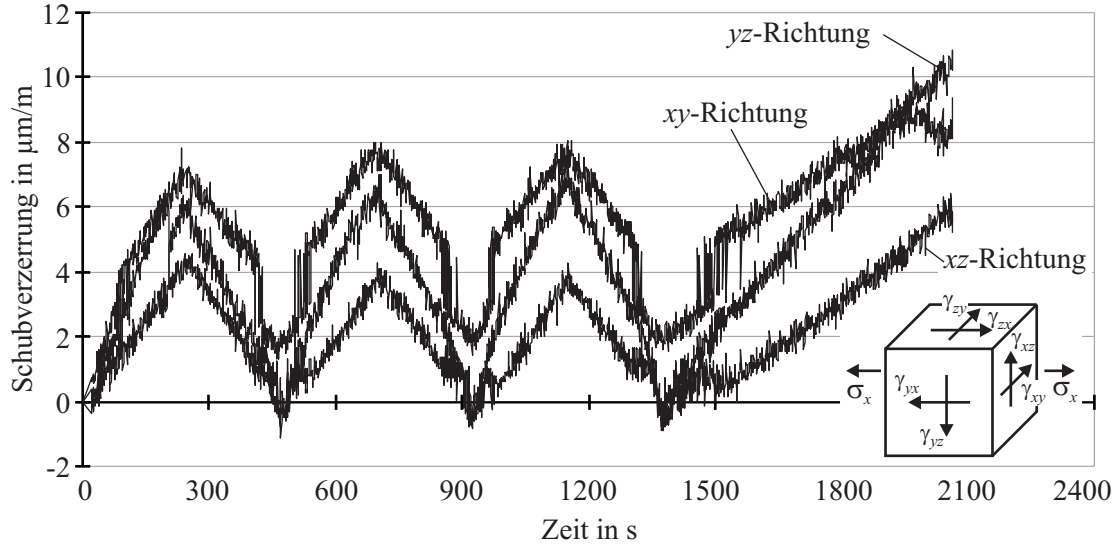
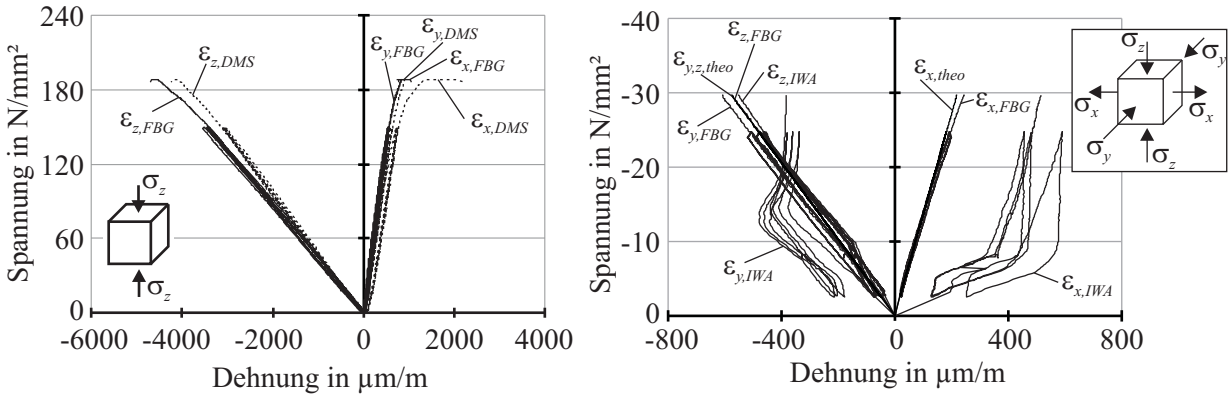


Abbildung 3.34: Schubverzerrungs-Zeit-Diagramm eines einaxialen Zugversuchs

Belastungsrichtung ein größerer Dehnungswert bei der FBG-Messung als bei der DMS-Messung erhalten. Es lässt sich weiterhin feststellen, dass die im Abschnitt 3.5.6.2 ermittelte Grenzdehnung von $\varepsilon = 2930\,\mu m/m$ im Versuch überschritten wurde, ohne dass die Qualität der Messung beeinflusst wird.

Bei den dreiaxialen Belastungsversuchen erfolgte die Referenzmessung nur mittels IWA. Da die Messergebnisse der IWA, wie erwartet, besonders stark im Bereich kleiner Dehnungen von den Messergebnissen der FBG-Messung abweichen, sind in Abbildung 3.35b die theoretisch erwarteten Dehnungen für isotropes linear-elastisches Materialverhalten ebenfalls eingetragen. Ausgehend von den theoretischen Kurven ist zu erkennen, dass die FBG-Messung die Probekörperverformung sehr gut erfasst. Wird eine schubspannungsfreie Beanspruchung zugrunde gelegt, vgl. Abschnitt 3.5.3, lässt sich die Übereinstimmung der Messergebnisse mit den theoretisch erwarteten Ergebnissen weiter verbessern.

Alle Versuche an würfelförmigen Prüfkörpern in der Triaxialprüfmaschine haben gezeigt, dass die FBG-Messung mindestens gleichwertige Ergebnisse zu den konventionellen Methoden mittels IWA und DMS liefert. Speziell bei dreiaxialen Belastungsversuchen wird eine Messmethode zur Verfügung gestellt, die auch bei kleinen Verformungen des Probekörpers die tatsächlichen Dehnungen erfasst. Bei einzelnen beeinträchtigten FBG-Messstellen ist es möglich, bei der Datenaufbereitung



a) Einaxialer Druckversuch

b) Zug-Druck-Druck-Versuch $\alpha_x / \alpha_y / \alpha_z = 0{,}1 / -1 / -1$

Abbildung 3.35: Vergleich der unterschiedlichen Messmethoden bei Belastungsversuchen in der Triaxialprüfmaschine

die entsprechenden Werte mit den verbleibenden Messstellen zu berechnen, da der Einfluss der auftretenden Schubverzerrungen vernachlässigbar ist.

3.6 Versuchsergebnisse der mehraxialen Belastungsversuche

Nach den Voruntersuchungen zur Ermittlung des Materialverhaltens des verwendeten Betons unter einaxialer Belastung sowie zur Verbesserung der Kraftübertragung einer Zugbeanspruchung und der Dehnungsmessung bei mehraxialen Belastungsversuchen erfolgte die Durchführung von mehraxialen Belastungsversuchen mit proportionaler Laststeigerung. Insgesamt wurden 14 Serien mit je 21 Prüfkörpern betoniert, wobei 9 Prüfkörper als einaxiale Referenzversuche und 12 Prüfkörper für mehraxialer Belastungsversuche verwendet wurden. Bei jeweils drei geprüften Probekörpern je Spannungsverhältnis (SPV) konnten theoretisch 42 Spannungsverhältnisse untersucht werden. Nach dem Abzug von Versuchen die aus verschiedenen Gründen nicht bei der Auswertung berücksichtigt werden konnten, ergaben sich insgesamt 35 untersuchte Spannungsverhältnisse.

3.6.1 Darstellung der Festigkeitswerte

Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt in einem gedrehten Koordinatensystem $\widetilde{x}\widetilde{y}\widetilde{z}$ nach Gl. (3.19) bis Gl. (3.21), bei dem die Koordinatenachse $\widetilde{z}$ mit der hydrostatischen Achse ($x = y = z$) des ursprünglichen Koordinatensystems zusammenfällt (Abbildung 3.36).

$$\widetilde{x} = \frac{x - y}{\sqrt{2}} \qquad x = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \widetilde{x} + \frac{\sqrt{6}}{6} \cdot \widetilde{y} + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \widetilde{z} \tag{3.19}$$

$$\widetilde{y} = \frac{x + y - 2 \cdot z}{\sqrt{6}} \qquad y = -\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \widetilde{x} + \frac{\sqrt{6}}{6} \cdot \widetilde{y} + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \widetilde{z} \tag{3.20}$$

$$\widetilde{z} = \frac{x + y + z}{\sqrt{3}} \qquad z = -\frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \widetilde{y} + \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \widetilde{z} \tag{3.21}$$

Für die Beschreibung von Meridianen, die in Richtung der $\widetilde{z}$-Achse verlaufen und deren Werte durch Spannungsverhältnisse $\alpha_x / \alpha_y / \alpha_z$ mit einem konstanten Winkel $\widetilde{\varphi}$ in der $\widetilde{x}\widetilde{y}$-Ebene definiert sind, ergibt sich zur Berechnung des Winkels $\widetilde{\varphi}$ die Beziehung nach Gl. (3.22). Hieraus folgt, dass der

Winkel $\widetilde{\varphi}$ aus dem Spannungsverhältnis bestimmt werden kann, wobei dieser bei proportionaler Belastungssteigerung unabhängig von der Höhe der tatsächlich aufgebrachten Beanspruchung ist. Somit können mit der Kenntnis des Winkels $\widetilde{\varphi}$ alle mehraxialen Festigkeitswerte eines 60 °-Segmentes der Grenzfläche in der $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene dargestellt werden (vgl. Abschnitt 2.16).

$$\widetilde{\varphi} = 60\,^{\circ} - \arctan\left(\frac{\widetilde{x}}{\widetilde{y}}\right) \tag{3.22}$$

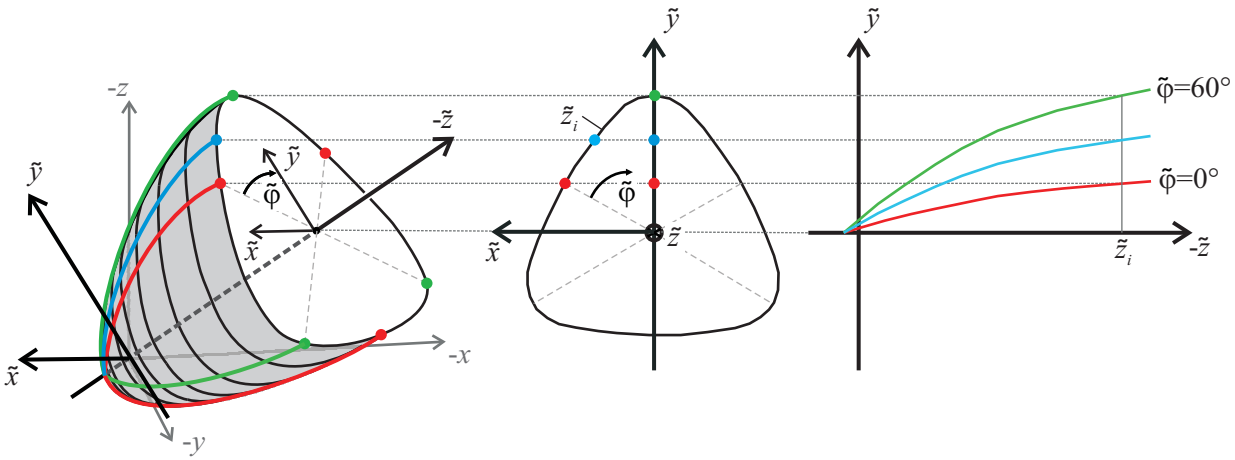


Abbildung 3.36: Drehung des ursprünglichen Koordinatensystems und Projektion der Meridiane in die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene

Die Festigkeitswerte der vier Beanspruchungskombinationen aus Druck und Zug in den jeweiligen Richtungen des ursprünglichen Koordinatensystems, die in einem 60 °-Segment auftreten, können unter Kenntnis des Winkels $\widetilde{\varphi}$ in die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene des gedrehten Koordinatensystems projiziert werden. Unter der Voraussetzung eines anfänglich isotropen Materials, bei dem das Vertauschen der Komponenten α_x, α_y und α_z des Spannungsverhältnisses keinen Einfluss auf den sich ergebenden Festigkeitswert hat, sind somit für alle Spannungsverhältnisse die Festigkeitswerte ablesbar (Abbildung 3.37). Da bei den mehraxialen Belastungsversuchen eine ausschließliche Beanspruchung in den Normalenrichtungen vorausgesetzt wird, entsprechen diese auch den Hauptrichtungen ($\alpha_x \,/\, \alpha_y \,/\, \alpha_z = \alpha_1 \,/\, \alpha_2 \,/\, \alpha_3$). Es erfolgt daher im Folgenden die Bezeichnung der auftretenden Spannungen und Dehnungen für die Hauptrichtungen.

3.6.2 Untersuchte Spannungsverhältnisse

Für die Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Beton unter mehraxialer Beanspruchung ist die Wahl der untersuchten Spannungsverhältnisse von wesentlicher Bedeutung. Diese sollten derart festgelegt werden, dass sie sich möglichst gleichmäßig über den betrachteten Ausschnitt des zu untersuchenden Merkmals (z. B. maximale Festigkeit) verteilen und somit eine genaue Beschreibung dieses Ausschnittes begünstigen.

Ausgehend von mehraxialen Beanspruchungen mit einer Zugspannungskomponente wurden insgesamt 35 Spannungsverhältnisse an je drei würfelförmigen Prüfkörpern untersucht. Die Festlegung der Spannungsverhältnisse der zu untersuchenden Zug-Druck-Druck-Beanspruchung erfolgte dabei mit Hilfe bereits bekannter Versagenskriterien, wodurch eine möglichst gleichmäßige Einteilung dieses Ausschnitts der Festigkeitsgrenzfläche erzielt werden sollte. Zudem erfolgte die Prüfung von zweiaxialen Spannungsverhältnissen an den Übergängen zu den angrenzenden Bereichen ohne Zug-Druck-Druck-Beanspruchung. Dabei wurden ausschließlich Spannungsverhältnisse untersucht, die

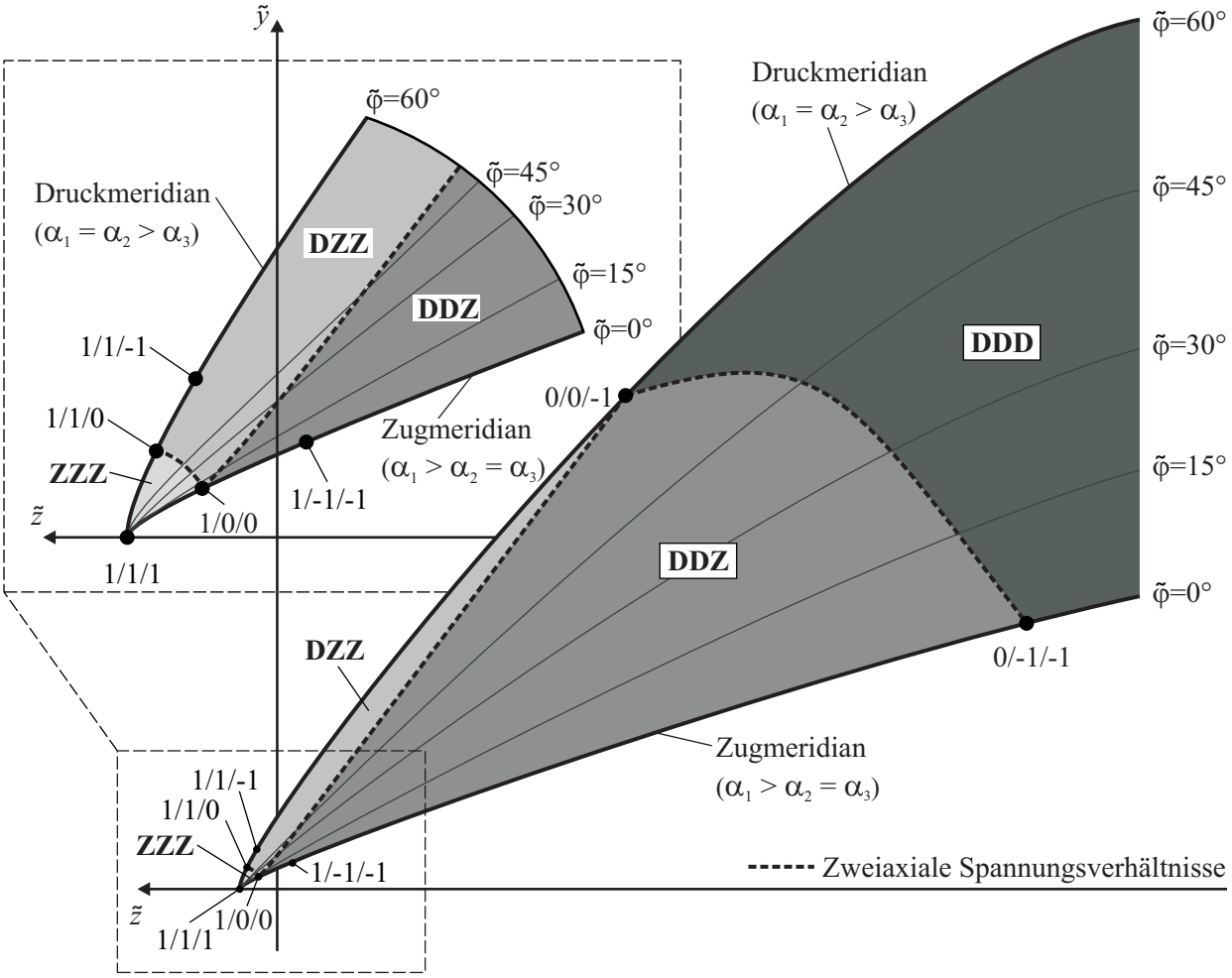


Abbildung 3.37: Bereiche unterschiedlicher Beanspruchungskombinationen aus Zug und Druck in der $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene

auf den 0 °-, 15 °-, 30 °-, 45 °- und 60 °-Meridianen der Grenzfläche liegen. Um einen Anschluss an die dreiaxialen Druckspannungszustände zu erhalten, wurde außerdem je Meridian ein dreiaxiales Druckspannungsverhältnis untersucht.

Ein weiteres Ziel war es, die Komponenten der Belastung derart festzulegen, dass sich auf jedem Meridian Versuchswerte mit gleich großen hydrostatischen Spannungsanteilen ergeben, so dass eine Beschreibung der Deviatorkurven möglich ist (siehe Abbildung 3.38 und Abschnitt 2.1.4). Diese Abschätzung war jedoch eher spekulativ und führte daher nur bedingt zum gewünschten Ergebnis, weshalb während der laufenden Versuchsdurchführung zum Teil korrigierend Einfluss auf die zu untersuchenden Spannungsverhältnisse genommen wurde. In Tabelle 3.11 sind die untersuchten Spannungsverhältnisse aufgeführt.

3.6.3 Spannungs-Dehnungs-Verhalten

3.6.3.1 Mittelwertbildung

Die Ermittlung der Materialparameter Elastizitätsmodul und Querdehnzahl sowie charakteristischer Punkte im Spannungs-Dehnungs-Verhalten des untersuchten Betons erfolgt an den Versuchskurven der Einzelversuche und an den Mittelwertkurven der Versuche gleicher Spannungsverhältnisse. Da für die Berechnung der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linie aus mehreren Einzelkurven

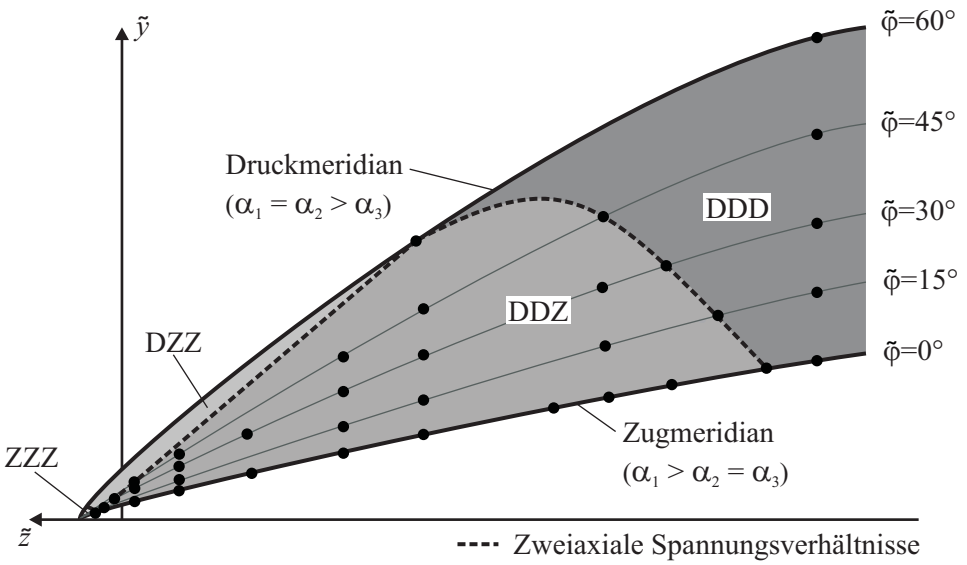


Abbildung 3.38: Schematische Darstellung zur Wahl der Spannungsverhältnisse

Tabelle 3.11: Untersuchte Spannungsverhältnisse

$\widetilde{\varphi} = 0°$	$\widetilde{\varphi} = 15°$	$\widetilde{\varphi} = 30°$	$\widetilde{\varphi} = 45°$	$\widetilde{\varphi} = 60°$
α_1 / α_2 / α_3	α_1 / α_2 / α_3	α_1 / α_2 / α_3	α_1 / α_2 / α_3	α_1 / α_2 / α_3
1/0/0	-	-	-	-
1/-0,183/-0,183	-	-	-	-
1/-0,5/-0,5	-	1/0/-1	-	-
1/-1/-1	-	0,577/-0,211/-1	-	-
0,732/-1/-1	1/0/-0,366	0,333/-0,333/-1	-	-
0,345/-1/-1	1/-0,268/-0,732	0,225/-0,388/-1	0,366/0/-1	-
0,11/-1/-1	0,275/-0,658/-1	0,075/-0,463/-1	0,165/-0,147/-1	-
0,05/-1/-1	0,05/-0,719/-1	0,04/-0,480/-1	0,155/-0,155/-1	-
0,025/-1/-1	0,02/-0,727/-1	0,01/-0,495/-1	0,025/-0,25/-1	-
0/-1/-1	0/-0,732/-1	0/-0,5/-1	0/-0,268/-1	0/0/-1
-0,039/-1/-1	-0,027/-0,739/-1	-0,029/-0,514/-1	-0,027/-0,287/-1	-0,04/-0,04/-1

keine unabhängige Vergleichsgröße zur Verfügung stand, erfolgte die Mittelwertbildung mit der verrichteten Arbeit eines Probekörpers, die bei Erreichen der maximalen Festigkeit zu 100% definiert wurde. Damit können sowohl die Spannungs- als auch die Dehnungswerte gleicher prozentualer Stufen der verrichteten Arbeit bestimmt und gemittelt werden (Abbildung 3.39). Bei dieser Vorgehensweise ist zu beachten, dass die verrichtete Arbeit mit steigender Beanspruchung überproportinal zunimmt und somit die Inkremente der σ- bzw. ε-Achse zwischen den betrachteten Punkten nicht konstant sind. Infolgedessen würden im Bereich niedriger Beanspruchungsniveaus größere Abschnitte der gemessenen Kurven betrachtet als im Vergleich zu höheren Beanspruchungsniveaus, was dazu führen kann, dass das Materialverhalten über einen zu großen Bereich als linear angesehen wird. Um diese Problematik bei der durchgeführten Mittelwertbildung zu berücksichtigen, wurden bis zum Erreichen der halben maximalen Festigkeit 0,25%-Schritte und darüber hinaus 0,50%-Schritte der verrichteten Arbeit zur Mittelwertbildung verwendet.

Diese Methode bietet neben der Bestimmung der mittleren Spannungs- und Dehnungswerte ebenfalls die Möglichkeit, die gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien im Nachbruchbereich bis zu einem für alle Prüfkörper gleichen Kriterium zu betrachten. Hierfür muss für die verrichtete Arbeit ein Wert größer 100% festgelegt werden, bis zu dem die Versuchskurven ausgewertet werden sollen.

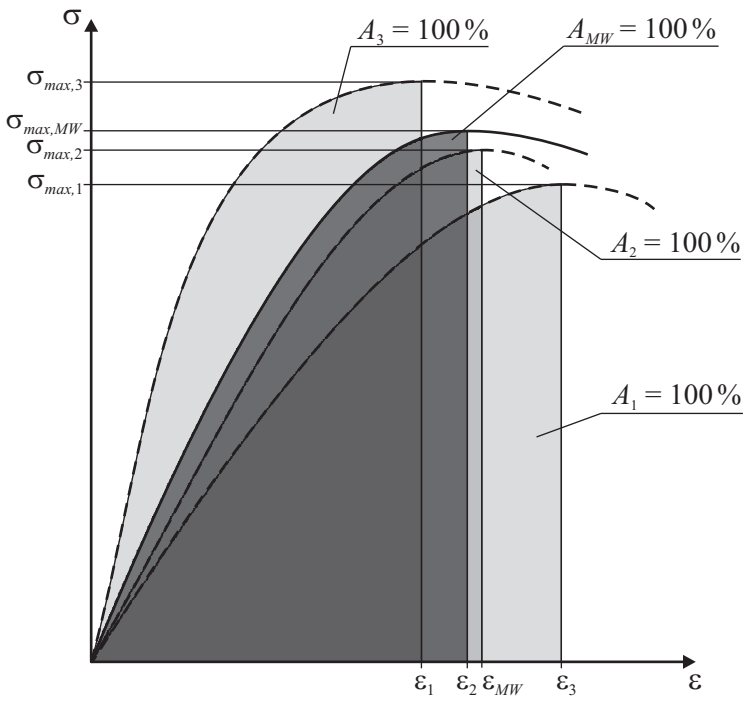


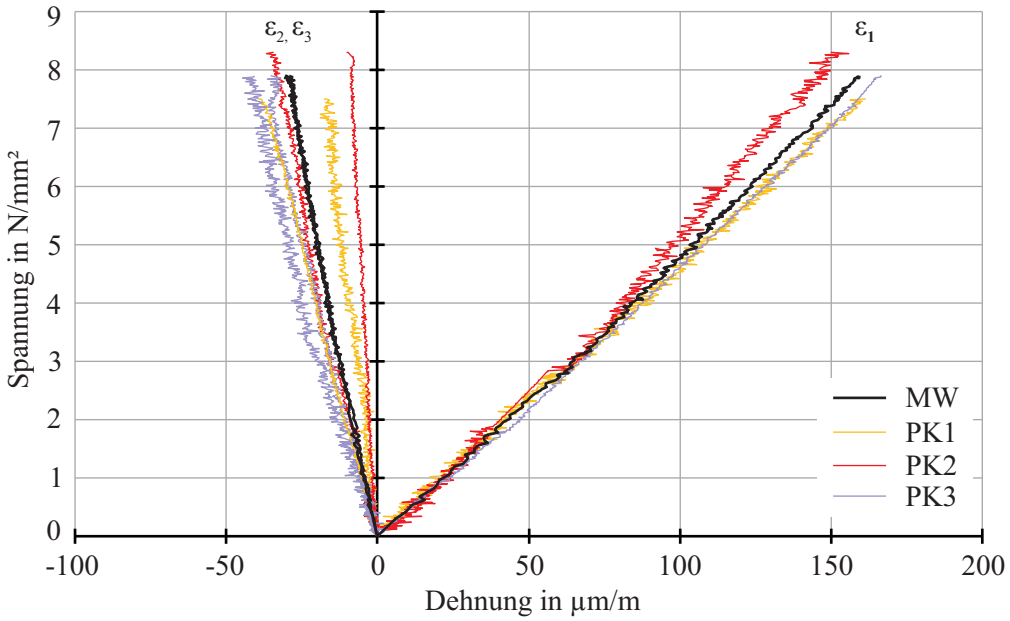
Abbildung 3.39: Schematische Darstellung der Mittelwertbildung von Spannungs-Dehnungs-Linien

Dieser Wert darf jedoch nicht größer als die kleinste prozentuale Zunahme der verrichteten Arbeit im Einzelversuch über die 100%-Grenze hinaus sein.

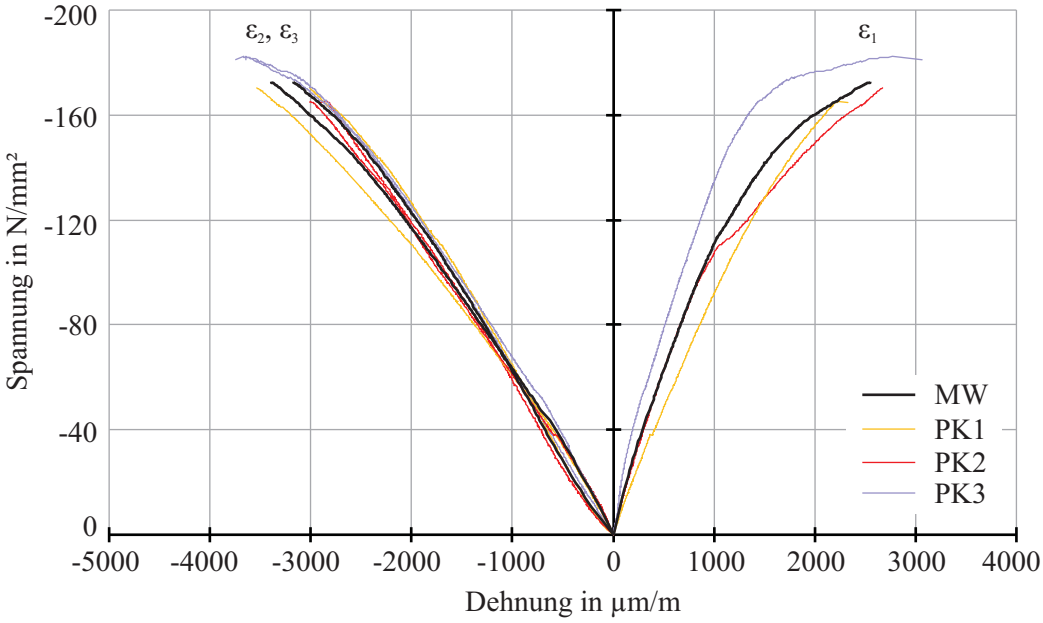
In Abbildung 3.40 sind die gemessenen Einzelwertkurven sowie die berechneten Mittelwertkurven der einzelnen Dehnungsrichtungen exemplarisch für zwei Spannungsverhältnisse dargestellt. Infolge der Mittelwertbildung erfolgt eine Glättung der Versuchswerte, die von den gewählten Inkrementgrößen der verrichteten Arbeit abhängig ist. Das beim einaxialen Zugversuch am Probewürfel signifikant größere Messrauschen gegenüber den einaxialen Zugversuchen an prismenförmigen Prüfkörpern (vgl. Abbildung 3.29 und Abbildung 3.33) kann auf die kleineren Biegeradien im Faserverlauf zurückgeführt werden. Dieser entspricht im Tetraederträgergerüst dem unteren Grenzradius, bei dem zur Dehnungsmessung das Lichtsignal in ausreichendem Maße umgelenkt wird, dies jedoch nicht verlustfrei ist. Die gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien sowie die zugehörigen Mittelwertkurven aller untersuchten Spannungsverhältnisse enthält Anhang A.3.

3.6.3.2 Spannungs-Dehnungs-Linien und Materialparameter

In Abbildung 3.41 sind ausgewählte Spannungs-Dehnungs-Linien von Prüfkörpern dargestellt, deren Spannungsverhältnisse auf dem Zugmeridian ($\widetilde{\varphi} = 0\,°$) liegen. Auch bei kleinen Zugspannungskomponenten weisen die Kurven einen nahezu linearen Verlauf bis zum Versuchsende auf, so dass diese das Verformungsverhalten maßgeblich beeinflussen. Erst bei einer zweiaxialen Druckbeanspruchung kommt es zu einem ausgeprägteren nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei einem höheren Beanspruchungsniveau, was ebenfalls für die Prüfkörper mit Spannungsverhältnissen auf den weiteren untersuchten Meridianen gilt. Zurückgeführt wird diese Charakteristik auf die Sprödheit des verwendeten Betons, die sich auch bei den einaxialen Druckversuchen zeigt. Es tritt dort ebenfalls erst kurz vor dem Erreichen der maximalen Festigkeit ein kleiner Bereich mit nichtlinearem Verformungsverhalten auf, infolgedessen keine signifikante Ankündigung des Versagens stattfindet (vgl. Abbildung 3.1).



a) Einaxialer Zugversuch (α_1 / α_2 / α_3 = 1 / 0 / 0)

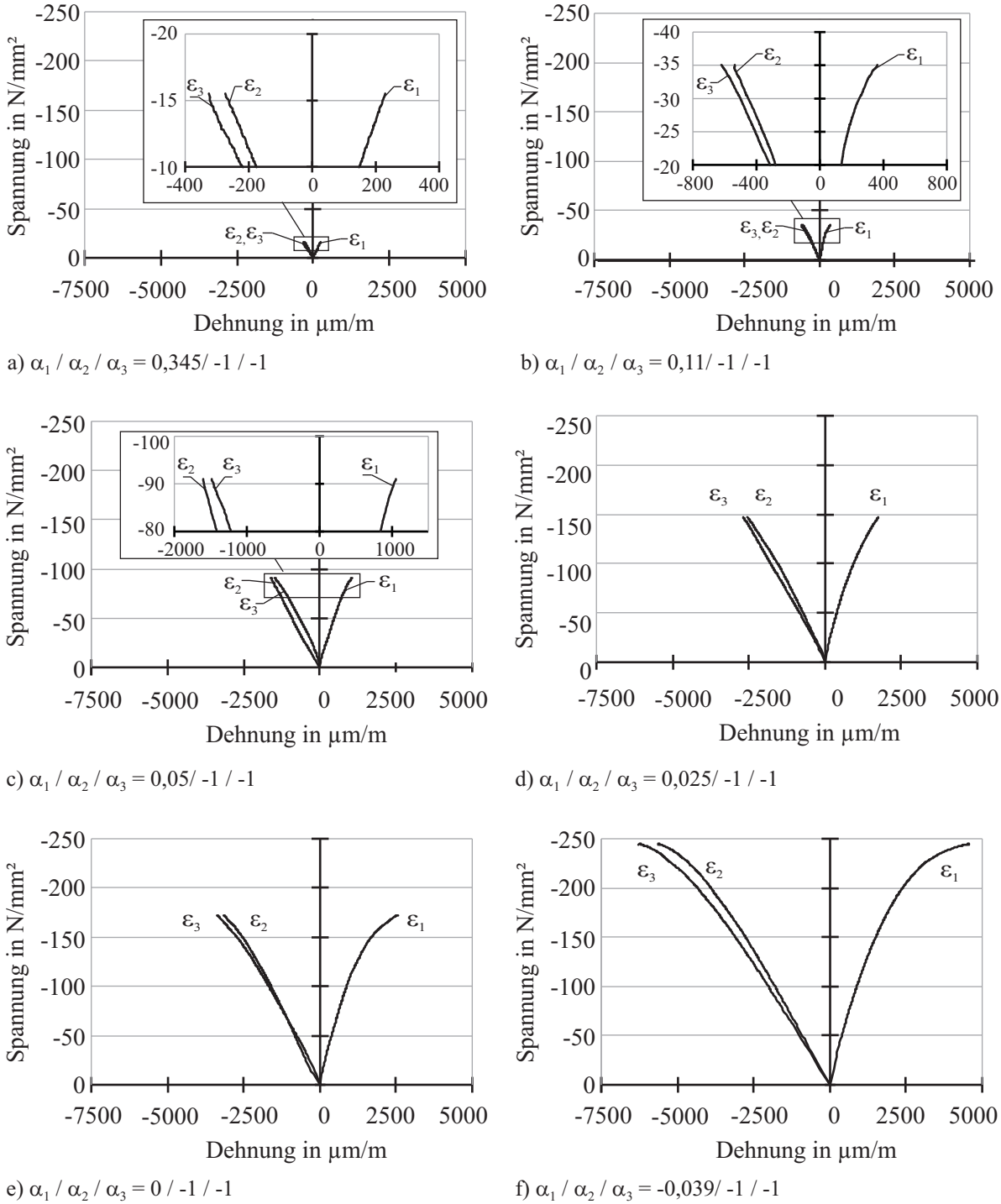


b) Zweiaxialer Druckversuch (α_1 / α_2 / α_3 = 0 / -1 / -1)

Abbildung 3.40: Mittelwertbildung von Spannungs-Dehnungs-Linien

Weiter ist auffällig, dass speziell bei den dreiaxialen Druckversuchen (siehe Abbildung 3.41f) mit Erreichen der maximalen Festigkeit auch das Versuchsende zusammenfällt und es keinen Nachbruchbereich gibt, wie er beispielsweise von Speck [118] auch für ultrahochfesten Beton beobachtet wurde. Dies kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden, die infolge der Sprödheit des Betons und der gewählten Versuchsdurchführung auftreten.

Ein Grund für ein erzwungenes Versuchsende ist die Überschreitung des Abbruchkriteriums, das durch einen Kraftabfall eines Belastungszylinders in einer bestimmten Zeiteinheit definiert ist und im Hinblick auf die Verträglichkeit der Technik festgelegt wurde. Ein weiterer Grund ist der händische Abbruch eines Versuches, wenn die Gefahr bestand, dass die Lasteinleitungsmittel nicht mehr ausschließlich an der Oberfläche des Prüfkörpers anlagen, sondern sich auch untereinander



a) $\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}345/ -1 / -1$

b) $\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}11/ -1 / -1$

c) $\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}05/ -1 / -1$

d) $\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}025/ -1 / -1$

e) $\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -1 / -1$

f) $\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}039/ -1 / -1$

Abbildung 3.41: Spannungs-Dehnungs-Linien von Probekörpern mit Spannungsverhältnissen auf dem Zugmeridian ($\widetilde{\varphi} = 0\,°$)

berührten. Beide Ursachen sind subjektiv und können somit je nach Festlegung zu unterschiedlichen Spannungs-Dehnung-Linien speziell im Nachbruchbereich führen.

Die dritte Ursache ist der Ausfall einer oder mehrerer Messstellen, an denen keine Dehnungsmessung mehr erfolgte. Dies deutet auf große lokale Verformungen innerhalb des Prüfkörpers hin, die zu einer Überschreitung der Bruchdehnung der Glasfasern an einer beliebigen Stelle führten. Findet der Faserbruch vor oder im Bereich des Bragg-Gitters statt, wird die Leitung des Lichtsignals unterbrochen und es können keine weiteren Daten aufgezeichnet werden.

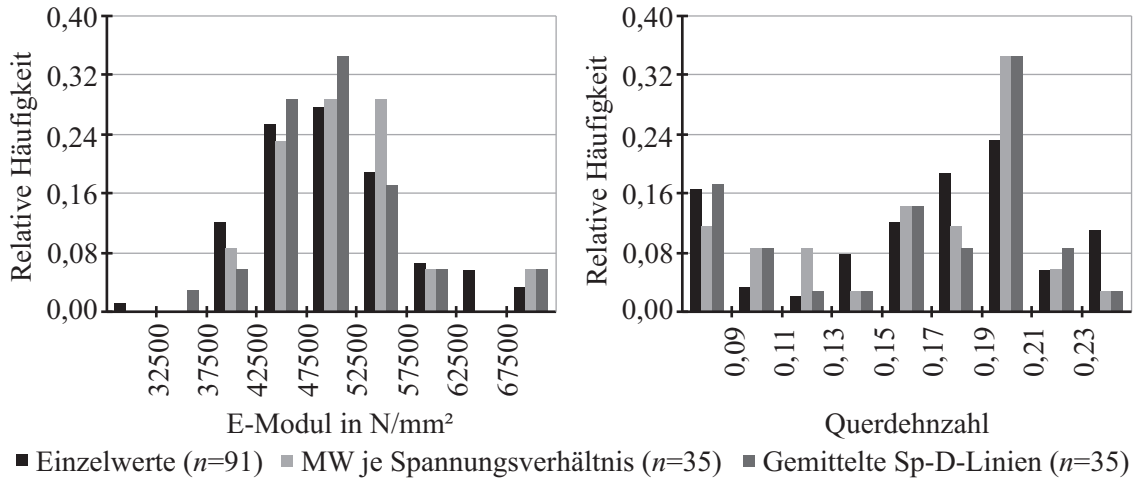
Bei den eigenen Versuchen war der Ausfall einer oder mehrerer Messstellen der Hauptgrund für das Ende der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien. Dabei muss jedoch erwähnt werden, dass dies i. d. R. gleichzeitig mit einem Versuchsabbruch infolge eines Kraftabfalls einherging.

Bei allen gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien der mehraxialen Versuche wurde der in Abschnitt 2.2.3 diskutierte, bei Normalbeton zu Belastungsbeginn auftretende Anlaufeffekt nicht beobachtet. Dies kann einerseits am untersuchten sehr homogenen und spröden Beton liegen, bei dem vermutlich nur sehr geringe Gefügedefekte vor Belastungsbeginn vorhanden waren und diese somit nur einen sehr geringen Einfluss haben. Andererseits ist es denkbar, dass infolge der verwendeten Messtechnik bzw. durch die Anordnung der Messstellen im Inneren der Prüfkörper der Anlaufeffekt nicht auftritt.

Aus den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien lassen sich, wie bei den einaxialen Referenzversuchen, unter der Annahme eines isotropen Materialverhaltens der Elastizitätsmodul E und die Querdehnzahl ν nach Gl. (2.4) mittels Regression bestimmen (vgl. Abschnitt 3.3.2).

Abbildung 3.42 zeigt die relativen Häufigkeitsverteilungen des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl der mehraxialen Versuche. Als untere bzw. obere Bereichsgrenze für die Bestimmung der Materialparameter werden jeweils die betragsmäßig kleineren Werte festgelegt, die sich zu 20% und 45% der mehraxialen Festigkeit bzw. zu 20% und 45% der einaxialen Druckfestigkeit ergeben. Diese Unterscheidung ist notwendig um sicherzustellen, dass auch bei dreiaxialen Druckversuchen nur ein linearer Bereich betrachtet wird, dessen obere Grenze im Verhältnis zur maximalen Festigkeit vorerst noch unbekannt ist und die maximale Festigkeit gegenüber des Spannungsniveaus an der Elastizitätsgrenze überproportional steigt. Die Festlegung der Bereichsgrenzen von 20% und 45% der maximalen Festigkeit erfolgte dahingehend, da die berechneten Materialparameter gegenüber einer Änderung des Bestimmungsbereichs um $\pm 5\,\%$ robust sind.

Analog zur Auswertung der einaxialen Versuche werden die Materialparameter auf drei unterschiedliche Arten ermittelt und gegenübergestellt. Im Gegensatz zu den einaxialen Referenzen kann hierbei jedoch nicht der Mittelwert der Werte einer Betoniercharge gebildet werden, sondern muss die Mittelung der Werte gleicher Spannungsverhältnisse erfolgen. Eine Übersicht über die aus den Spannungs-Dehnungs-Linien berechneten Elastizitätsmoduli und Querdehnzahlen wird im Anhang A.4.2.4 gegeben.



a) Elastizitätsmodul b) Querdehnzahl

Abbildung 3.42: Relative Häufigkeitsverteilungen der Materialparameter bei mehraxialen Belastungsversuchen für den Bereich des linearen Materialverhaltens

Sowohl der Elastizitätsmodul als auch die Querdehnzahl weisen große Streuungen in den ermittelten Werten auf. Dabei treten erhöhte Häufigkeiten der untersuchten Größen in den gleichen Klassen wie bei den einaxialen Referenzversuchen auf (Tabelle 3.12). Daraus kann abgeleitet werden, dass bei mehraxialen Belastungsversuchen im Bereich des linearen Verformungsverhaltens grundsätzlich die gleichen Werte der Materialparameter wie bei einaxialen Versuchen vorliegen, wodurch die Ergebnisse z. B. von Kupfer [57] bestätigt werden.

Tabelle 3.12: Statistische Auswertung der Materialparameter unter Annahme einer Gauss'schen Normalverteilung der Werte

	Elastizitätsmodul		Querdehnzahl	
	Einaxial	Mehraxial	Einaxial	Mehraxial
Anzahl PK	125	91	125	91
Mittelwert	50400 N/mm^2	50900 N/mm^2	0,229	0,164
Standardabweichung	2000 N/mm^2	9900 N/mm^2	0,036	0,074
Variationskoeffizient	4,0 %	19,4 %	15,7 %	45,0 %

Dass die unterschiedlichen Werte des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl zufällig auftreten und nicht vom aufgebrachten Spannungsverhältnis abhängig sind, zeigt Abbildung 3.43. Dabei sind die Elastizitätsmoduli und die Querdehnzahlen über den auf die einaxiale Festigkeit bezogenen hydrostatischen Anteil des Spannungstensors der Festigkeitswerte an der Elastizitätsgrenze von Spannungsverhältnissen des Zugmeridians aufgetragen. Es lässt sich kein Trend ablesen, wobei die Streuungen mit einer kleiner werdender Zugkomponente der Spannungsverhältnisse geringer werden.

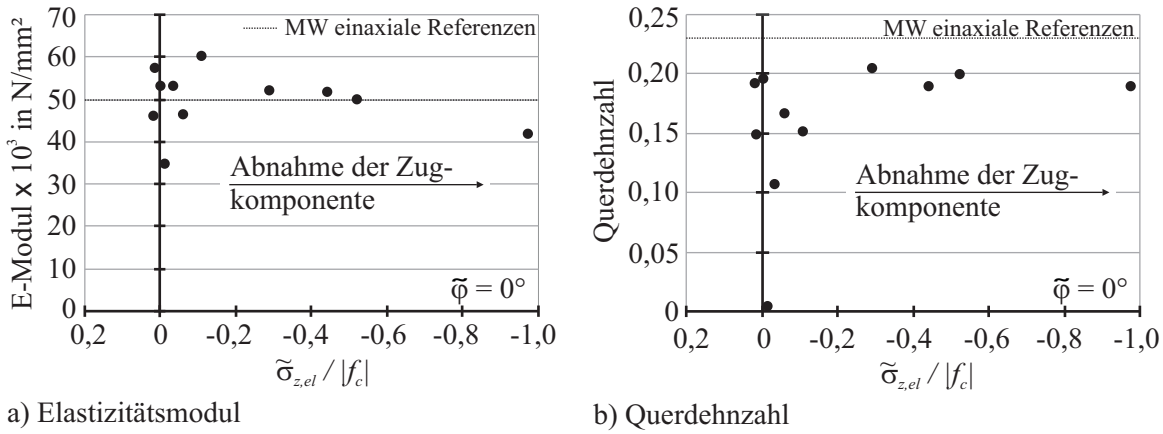


Abbildung 3.43: Berechnete Elastizitätsmoduli und Querdehnzahlen von mehraxialen Belastungsversuchen auf dem Zugmeridian

Hinsichtlich der Verteilung der berechneten Querdehnzahlen im Vergleich zu den Ergebnissen der einaxialen Referenzversuche wird deutlich, dass bei den mehraxialen Versuchen mit der FBG-Messung überwiegend kleinere Querdehnzahlen bestimmt werden, deren Ursache sich nicht eindeutig bestimmen lässt. Ein möglicher Grund hierfür ist die unterschiedliche Wichtung der einzelnen Messstellen der FBG-Messung bei der Berechnung der Hauptdehnungen nach Gl. (3.8).

Bei der Bestimmung der Materialparameter anhand der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien fallen die Streuungen etwas geringer aus, als bei den Mittelwerten der Einzelversuche je Spannungsverhältnis. Dies resultiert vermutlich daher, dass sich durch die Bildung von mittleren Spannungs-Dehnungs-Linien das gesamte Verformungsverhalten der tatsächlichen Spannungs-Dehnungs-Linien annähert, während bei der Mittelwertbildung der Materialparameter der Einzelversuchen nur lokale

Bereiche bzw. Punkte herangezogen werden. Im Folgenden werden daher nur Werte aus gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien bei der Auswertung von Mittelwerten betrachtet.

Für die angewendete Messmethode kann insgesamt festgestellt werden, dass diese gute Messergebnisse liefert, jedoch weitere Verbesserungen wünschenswert sind. Zum einen betrifft dies die Anordnung der Bragg-Gitter, so dass eine gleiche Wichtung der einzelnen Messstellen bei der Berechnung der Hauptdehnungen auftritt. Zum anderen sollte die genaue Ursache für den Ausfall der Messstellen beim Erreichen der maximalen Festigkeit geklärt und ggf. Möglichkeiten für eine weiterführende Messung über diesen Punkt hinaus gefunden werden.

3.6.4 Mehraxiale Spannungswerte – Charakteristische Punkte im Materialverhalten

Im folgenden Abschnitt sind die Spannungswerte an charakteristischen Punkten im Materialverhalten bei mehraxialen Belastungsversuchen aufgeführt. Dabei erfolgt die Darstellung entsprechend Abbildung 3.37 und die zugehörigen Einzelversuchswerte können dem Anhang A.4 entnommen werden. Grundsätzlich werden in den Diagrammen nur Ergebnisse gezeigt, die an den Spannungs-Dehnungs-Linien der Einzelversuchen bzw. an den gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien bestimmt wurden.

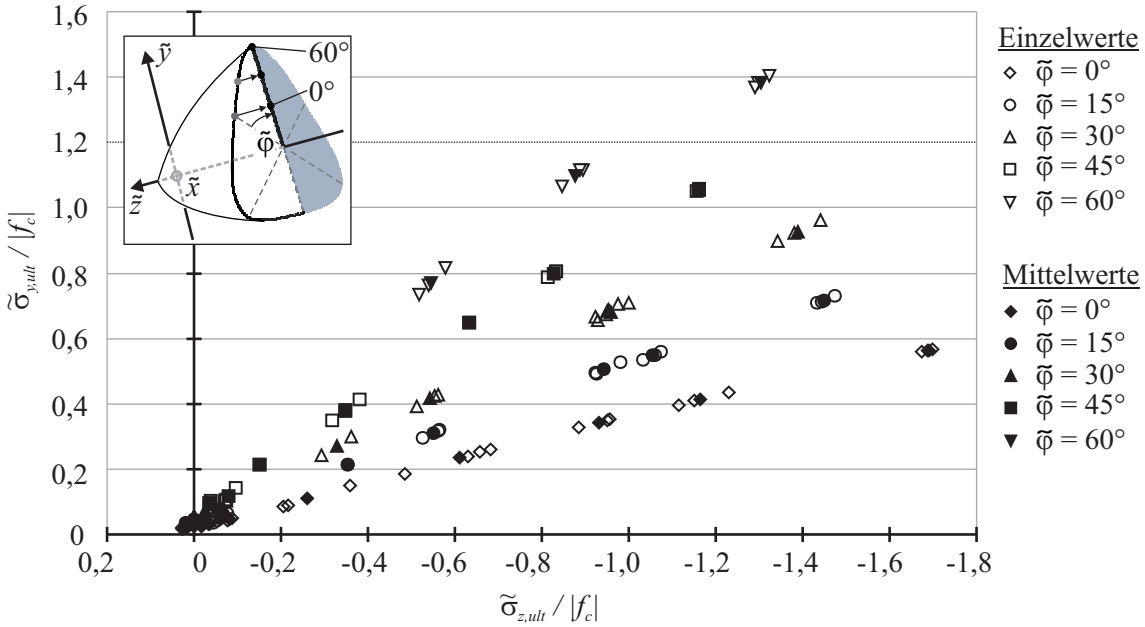
3.6.4.1 Maximale Festigkeit und Bruchbilder

In Abbildung 3.44 sind die auf die einaxiale Festigkeit bezogenen maximalen Festigkeitswerte der mehraxialen Versuche dargestellt. Dabei zeigt Abbildung 3.44a die maximalen Festigkeitswerte aller Versuche, deren Versagen eindeutig im Beton stattfand, während Abbildung 3.44b lediglich die Werte beinhaltet, bei denen zusätzlich verwertbare Spannungs-Dehnungs-Linien gemessen wurden.

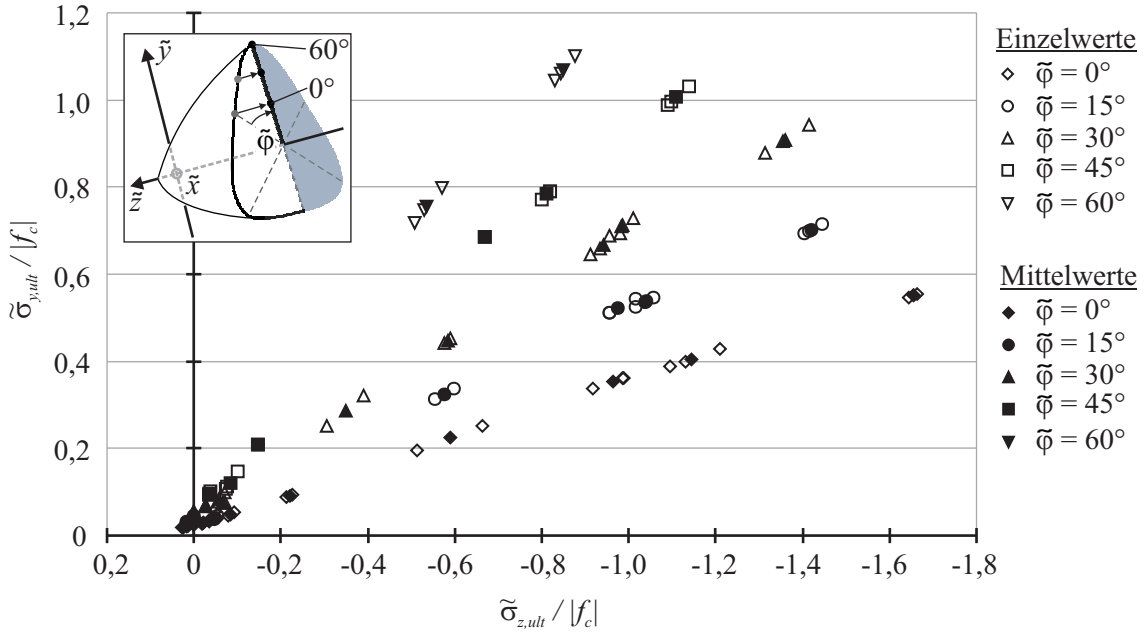
Diese Unterscheidung wird vorgenommen, da einerseits insgesamt mehr Versuchswerte ohne gemessene Dehnungen zur Verfügung stehen, wodurch sich die Form der Grenzfläche besser bestimmen lässt (109 Versuchswerte). Andererseits können alle weiteren charakteristischen Spannungswerte nur aus den Spannungs-Dehnungs-Linien ermittelt werden (91 Versuchswerte) und somit ist eine bessere Vergleichbarkeit zu den maximalen Festigkeitswerten gegeben.

Für die bezogenen maximalen Festigkeitswerte unter mehraxialer Beanspruchung, speziell unter einer Zug-Druck-Druck-Beanspruchung lässt sich keine ausgeprägte konvexe Meridianform, wie in Abschnitt 3.4.2 und in Abschnitt 4.1 gefordert, erkennen. Vielmehr scheinen die Projektionen der bezogenen mehraxialen Festigkeitswerte eines Meridians in die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene auf einer Geraden zu liegen, was auf einen innerhalb des untersuchten Bereichs ebenfalls linear verlaufenden Meridian hindeutet. Da die Gerade den Übergang zwischen einer konvexen und einer nicht konvexen Form der Meridiane darstellt, können die ermittelten Ergebnisse prinzipiell die tatsächlichen Festigkeitswerte zeigen.

Werden bei der Beurteilung der erzielten Festigkeitswerte zumindest im Bereich der Zug-Druck-Druck-Beanspruchung die erhaltenen Bruchbilder der Prüfkörper berücksichtigt, ist zu vermuten, dass die tatsächliche Festigkeit der Prüfkörper über der gemessenen Festigkeit lag. Da nahezu alle Prüfkörper mit einer Kraftübertragung durch einbetonierte Schrauben direkt in der Ebene am Schraubenende auf der Zylinderseite der Prüfmaschine durch einen Einzelriss im Beton versagten, könnten Spannungsspitzen in diesem Bereich ein Versagen begünstigt haben (Abbildung 3.45a und 3.45b). Wie bereits besprochen ist es daher wünschenswert, die Methode der Kraftübertragung weiter zu verbessern und zu optimieren.



a) Bezogene maximale Festigkeitswerte aller verwertbaren mehraxialen Versuche



b) Bezogene maximale Festigkeitswerte der mehraxialen Versuche mit gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien

Abbildung 3.44: Bezogene maximale Festigkeitswerte

Aus Tabelle A.7 im Anhang A.2 wird ersichtlich, dass bei Belastungen mit einer Zugspannungskomponente lediglich beim Spannungsverhältnis $\alpha_1/\alpha_2/\alpha_3 = 0{,}01/-0{,}495/-1$ kein reiner Zugbruch auftrat und es nicht zum typischen Einzelriss kam (Abbildung 3.45c). Da dieses Spannungsverhältnis die kleinste relative Zugkomponente der durchgeführten Versuche aufweist, ist eine Beurteilung der Bruchbilder schwierig. Zum einen könnte die Hypothese gestützt werden, dass die tatsächliche Materialfestigkeit bei den Versuchen mit anderen Spannungsverhältnissen noch nicht erreicht war und sich prinzipiell auch bei Beanspruchungen mit größeren Zugbelastungen keine reinen Zugbrüche ausbilden. Zum anderen ist es ebenfalls möglich, dass schon sehr kleine Zugbeanspruchungen die Versagensart der Probekörper maßgeblich prägen und die Versuche das tatsächliche Materi-

a) $\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}025 / -0{,}25 / -1$ b) $\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}345 / -1 / -1$ c) $\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}01 / -0{,}495 / -1$

Abbildung 3.45: Bruchbilder bei einer Zug-Druck-Druck-Beanspruchung

alverhalten wiedergeben. Prinzipiell ist aus den Bruchbildern der durchgeführten Versuche keine Grenze für den Übergang von einem Zugbruch zu einer anderen Bruchart bestimmbar, weshalb die Versagensarten nicht weiter diskutiert werden.

3.6.4.2 Volumenminimum

In Abbildung 3.46 sind die bezogenen mehraxialen Spannungswerte beim Volumenminimum der Prüfkörper dargestellt. Werden die erzielten Spannungen mit den maximalen Festigkeiten verglichen, ergeben sich nahezu keine Unterschiede, so dass die Prüfkörper zum Zeitpunkt ihres Versagens das kleinste Volumen aufwiesen. Dies trifft sowohl für die Zug-Druck-Druck-Versuche als auch für die dreiaxialen Druckversuche zu, wobei einzig das Spannungsverhältnis $\alpha_1/\alpha_2/\alpha_3 = -0{,}04/-0{,}04/-1$ auf dem Zugmeridian ausgenommen werden muss.

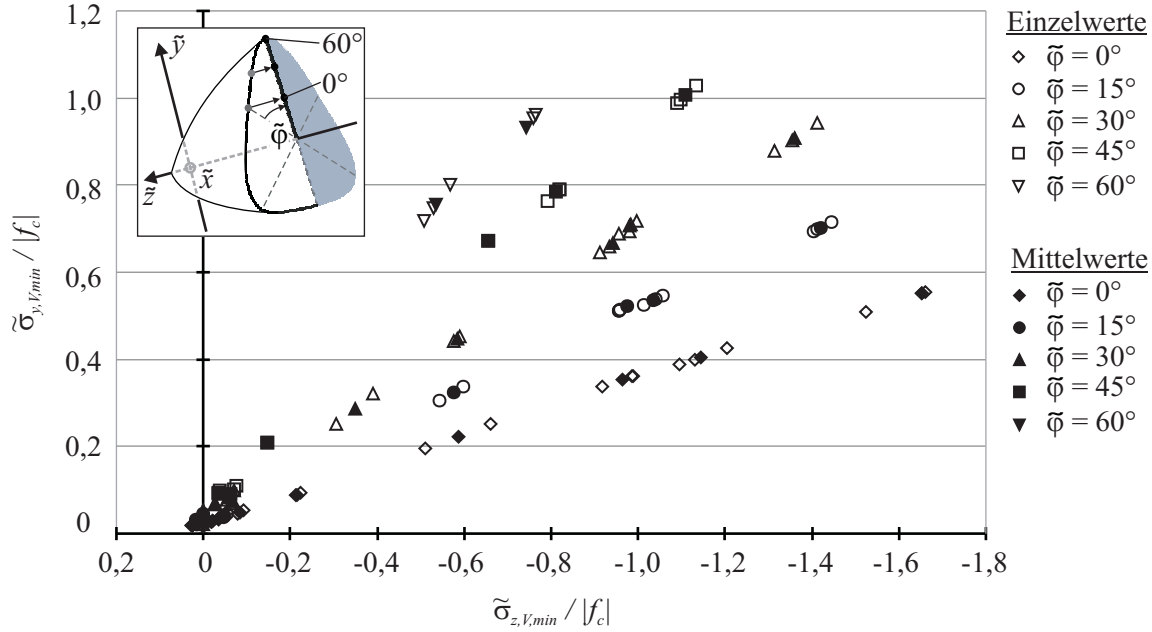


Abbildung 3.46: Bezogene Spannungswerte beim Volumenminimum des Probekörpers

Werden der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl unter der Annahme eines isotropen Materialverhaltens für die Dehnungsänderung einer inkrementellen Laststeigerung bestimmt, ergibt sich, wie von Berg [6] bereits berichtet, beim Volumenminimum des Prüfkörpers eine inkrementell bestimmte Querdehnzahl von 0,5 (vgl. Abschnitt 2.1.2.2).

Hinsichtlich der Grenze des stabilen Risswachstums beim Erreichen des Volumenminimums, wie in Abschnitt 2.1.2.2 aufgeführt, kann für den untersuchten Beton keine eindeutige Aussage getroffen werden. Es wurde erwähnt, dass mehrheitlich auch bei dreiaxialen Druckbeanspruchungen mit dem Erreichen des Volumenminimums das Versagen eintrat. Wenn die Phase des instabilen Risswachstums mit der oberen Bereichsgrenze der Phase des stabilen Risswachstums wegen der Sprödheit des Betons zusammenfällt, ist dies in der Spannungs-Dehnungs-Linie nicht erkennbar, wie es ebenfalls bei einaxialen Zugbeanspruchungen der Fall ist (Galan [32]).

Tendenziell stellte Hampel [36] bei mehraxialen Versuchen an hochfestem Beton die gleichen Effekte fest. Das Verhältnis zwischen Spannung bei Erreichen des Volumenminimums zu maximaler Festigkeit steigt mit zunehmender Sprödheit der untersuchten Betone an und lag bei über 0,9. Im Vergleich dazu beträgt dieses Verhältnis bei Normalbeton 0,85 bis 0,9. Für den hier untersuchten ultrahochfesten Beton ergab sich das Verhältnis für nahezu alle Versuche zu 1,0, was somit in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von Hampel steht.

Eine Aussage zum Verlauf der Grenze zwischen dem stabilen und instabilen Risswachstum kann anhand der durchgeführten Versuche nicht getroffen werden. Zur Bestätigung bzw. Widerlegung der Gültigkeit der Verknüpfung zwischen dem Volumenminimum der Probe und dem Ende der Phase mit stabiler Rissbildung bzw. Dauerstandsfestigkeit, wie sie bei Normalbeton besteht, müssten weitere Versuche durchgeführt werden. Zum einen wäre dabei zu prüfen, wie sich das Verhältnis mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil der Beanspruchung entwickelt und zum anderen, ob im Bereich der durchgeführten Versuche einer Beanspruchung nahe der maximalen Festigkeit tatsächlich dauerhaft widerstanden werden kann. Grundsätzlich wird vermutet, dass bei dem untersuchten ultrahochfesten Beton keine Übereinstimmung vom Volumenminimum der Probe und der Dauerstandsfestigkeit vorliegt und somit eine geänderte Definition für die Dauerstandsfestigkeit gefunden werden muss.

3.6.4.3 Elastizitätsgrenze

Die Bestimmung der Elastizitätsgrenze und dem damit verbundenen Ende des quasi-linearen Materialverhaltens erfolgt anhand der Abweichung zwischen der gemessenen von der rechnerisch aufgestellten Spannungs-Dehnungs-Linie. Hierfür werden mit den für isotropes Materialverhalten bereits ermittelten Materialparametern E_{iso} und ν_{iso} jedes Versuchs die zugehörigen linearen Spannungs-Dehnungs-Linien nach Gl. (2.4) aufgestellt und die Differenz zu den gemessenen Dehnungswerten der absolut größten Hauptdehnung für jede Laststufe berechnet. In Anlehnung an Newmans [88] Vorschlag zur Definition des Endes eines linearen Kurvenverlaufs über eine 2%-ige Abweichung wird eine Differenz von $\Delta\varepsilon = 0{,}02 \cdot \varepsilon_{theo} + 5\,\mu\text{m/m}$ als Kriterium zur Bestimmung der Elastizitätsgrenze gewählt, das für drei aufeinander folgende Laststufen überschritten werden muss. Dabei dient sowohl der additive Term von $5\,\mu\text{m/m}$ als auch die dreimalige Überschreitung des Kriteriums dem Ziel, Einflüsse aus dem Messrauschen auf die Bestimmung der Elastizitätsgrenze zu eliminieren.

Zur Überprüfung der Sensitivität des Kriteriums auf die Änderung der zugelassenen prozentualen Abweichung werden zusätzlich die Spannungswerte der Elastizitätsgrenze mit $\Delta\varepsilon = 0{,}00 \cdot \varepsilon_{theo} + 5\,\mu\text{m/m}$ und $\Delta\varepsilon = 0{,}04 \cdot \varepsilon_{theo} + 5\,\mu\text{m/m}$ bestimmt. Abbildung 3.47 zeigt für diese drei Kriterien die auf die maximalen Festigkeitswerte σ_{ult} bezogenen Spannungen an der Elastizitätsgrenze σ_{el}, aufgetragen über den auf die einaxiale Festigkeit bezogenen hydrostatischen Spannungsanteil der Beanspruchung. Im Vergleich der drei Kriterien nehmen die ermittelten Spannungen nur geringfügig ab bzw. zu, wobei bei der zugelassenen 4%-igen Abweichung größere Streuungen auftreten. Das gewählte Kriterium $\Delta\varepsilon = 0{,}02 \cdot \varepsilon_{theo} + 5\,\mu\text{m/m}$ ist somit robust und wird im Folgenden angewandt.

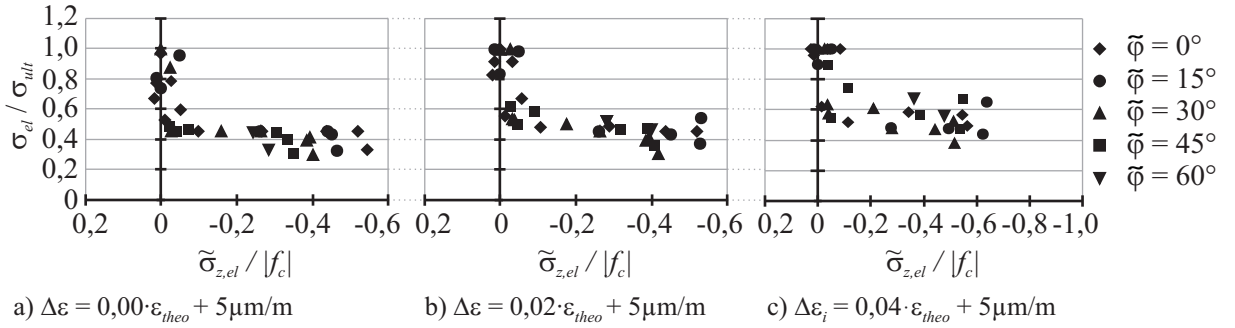


Abbildung 3.47: Spannungswerte σ_{el} der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien an der Elastizitätsgrenze bezogen auf die maximalen Festigkeiten σ_{ult}

Abbildung 3.47 zeigt weiterhin, dass die Elastizitätsgrenze bei positiven und kleinen negativen $\widetilde{z}$-Werten mit der maximalen Festigkeit σ_{ult} zusammenfällt, so dass sich ein Verhältnis $\sigma_{el}/\sigma_{ult} = 1$ ergibt. Im weiteren Verlauf fällt dieses Verhältnis über einen kurzen Bereich auf ungefähr 0,5 steil ab, bevor es anschließend mit weiter zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil in der Beanspruchung nur noch geringfügig abnimmt. Dabei ist für keinen der untersuchten Meridiane ein signifikant höheres oder niedrigeres Niveau der Elastizitätsgrenze bezogen auf die maximale Festigkeit ersichtlich. Es kann daher angenommen werden, dass für alle Werte einer Deviatorkurve das gleiche Verhältnis zwischen der Spannung an der Elastizitätsgrenze und der maximalen Festigkeit besteht.

Es wird deutlich, dass bei einer großen Zugspannungskomponente in der Beanspruchung $\widetilde{\sigma}_{z,el}/|f_c| \geq -0{,}05$ das Materialverhalten bis zum Erreichen der maximalen Festigkeit quasi-linear und somit ähnlich dem im einaxialen Zugversuch ist. Der steile Abfall des Verhältnisses σ_{el}/σ_{ult} deutet darauf hin, dass der Einfluss einer Zugspannungskomponente auf das lineare Materialverhalten schnell abnimmt und sich anschließend ein für Druckversuche typisches Materialverhalten einstellt.

Die sich ergebenden Spannungswerte an der Elastizitätsgrenze bezogen auf die einaxiale Druckfestigkeit sind in Abbildung 3.48 dargestellt und im Anhang A.4.2.4 aufgeführt. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die Spannungswerte an der Elastizitätsgrenze eines Meridians in der projizierten Form einen nahezu linearen Verlauf annehmen, wie er sich auch bei den maximalen Festigkeitswerten ergibt. Vergleichend verlaufen die Meridiane jedoch flacher und ihre Spreizung ist weniger groß. Dies resultiert daher, dass sich die Grenzfläche der Elastizität innerhalb bzw. höchstens auf der Grenzfläche der maximalen Festigkeit befinden kann.

Für gesicherte Aussagen über den weiteren Verlauf der Elastizitätsgrenze in Richtung der negativen $\widetilde{z}$-Achse sind die vorhandenen Versuchswerte nicht ausreichend. Es ist jedoch anzunehmen, dass das Verhältnis σ_{el}/σ_{ult} einem Grenzwert entgegen strebt und somit auch bei hydrostatischer Druckbeanspruchung ein Bereich mit quasi-linearem Materialverhalten auftritt.

3.6.4.4 Affinitätsgrenze

Wie in Abschnitt 2.1.2.2 bereits aufgeführt, definierte Kupfer [57] eine Affinitätsgrenze im Materialverhalten. Diese wird erreicht, wenn der Verlauf der Kurve der absolut größten Hauptdehnung ε, aufgetragen über die Volumenänderung $\Delta V/V$, ihren linearen Bereich verlässt, wobei für die Volumenänderung nur der lineare Anteil $\Delta V/V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ berücksichtigt wird. Die Bestimmung der Affinitätsgrenze erfolgt entsprechend der Bestimmung der Elastizitätsgrenze. Zunächst wird eine Geradengleichung zur Approximation des linearen Verlaufs der $\Delta V/V$-ε-Kurve bestimmt und anschließend die Differenz der Dehnungswerte zwischen der approximierten Geraden und der Ver-

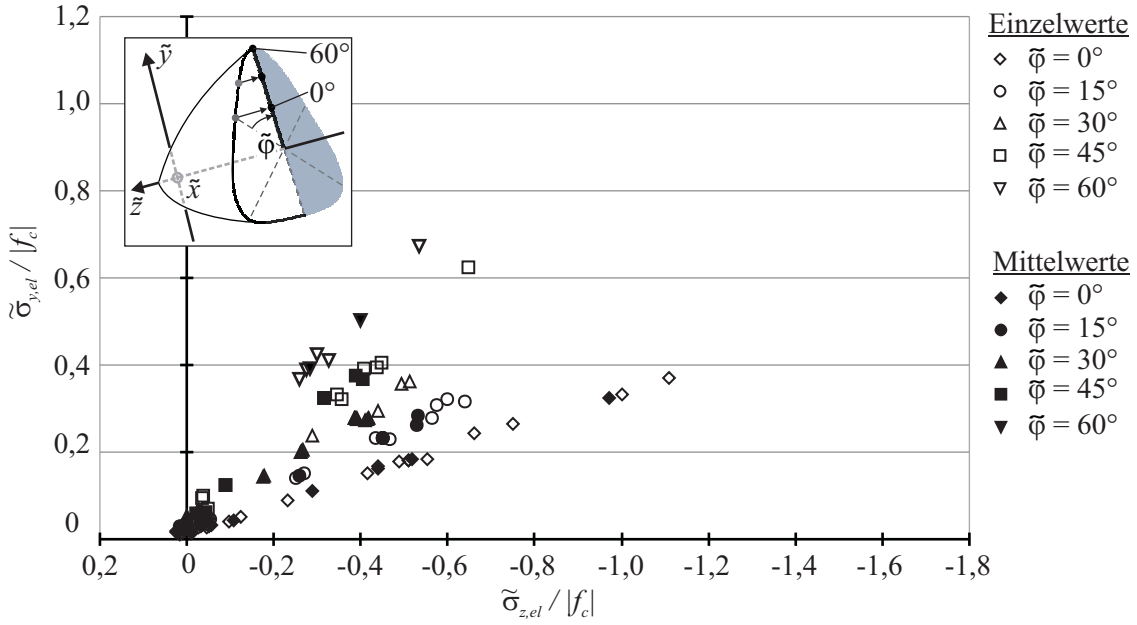


Abbildung 3.48: Bezogene Spannungswerte an der Elastizitätsgrenze

suchskurve berechnet. Als Grenzkriterium wird analog zur Elastizitätsgrenze eine Abweichung von $\Delta\varepsilon = 0{,}02 \cdot \varepsilon_{theo} + 5\,\mu\text{m/m}$ festgelegt, wobei ebenfalls eine Ermittlung der Affinitätsgrenze mit den zwei anderen Kriterien erfolgt.

Abbildung 3.49 zeigt die auf die maximale Festigkeit σ_{ult} bezogenen Spannungswerte σ_{aff} an der Affinitätsgrenze für die drei verwendeten Kriterien. Grundsätzlich lassen sich die gleichen Charakteristika wie bei der Elastizitätsgrenze erkennen, wobei das Verhältnis der beiden Werte in Richtung der negativen $\widetilde{z}$-Achse geringfügig höher liegt. Zudem ist in Abbildung 3.49c ersichtlich, dass die Streuungen der Werte bei der größeren zugelassenen Abweichung ausgeprägter auftreten als bei der Ermittlung der Elastizitätsgrenze.

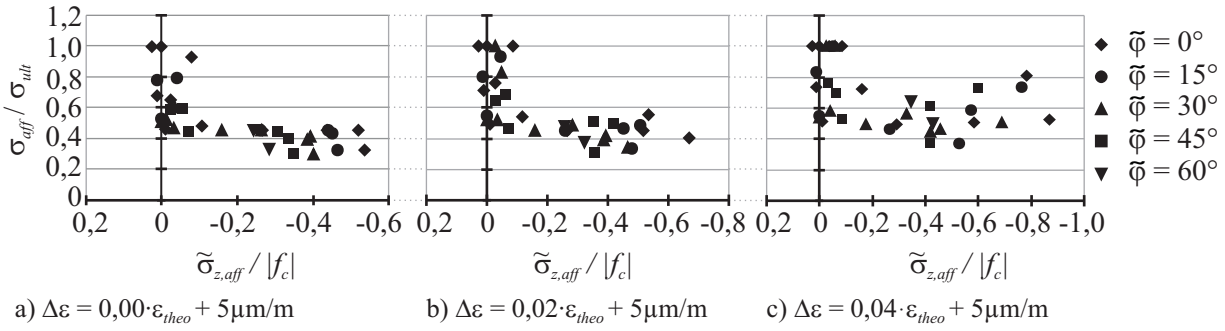


Abbildung 3.49: Spannungswerte σ_{aff} der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien an der Affinitätsgrenze bezogen auf die maximalen Festigkeiten σ_{ult}

Mit dem verwendeten Grenzkriterium $\Delta\varepsilon = 0{,}02 \cdot \varepsilon_{theo} + 5\,\mu\text{m/m}$ ergeben sich die in Abbildung 3.50 dargestellten, auf die einaxiale Druckfestigkeit bezogenen Spannungswerte der Affinitätsgrenze. Bei den in die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene projizierten Werten eines Meridians treten dabei die gleichen Merkmale wie für die bezogenen Spannungswerte an der Elastizitätsgrenze auf.

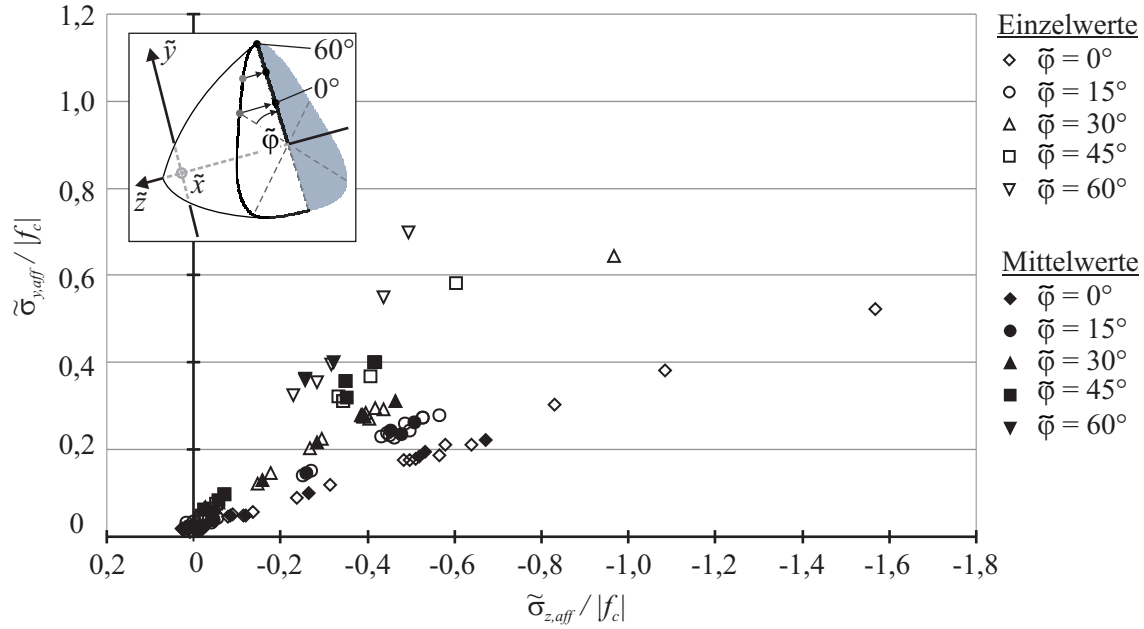


Abbildung 3.50: Bezogene Spannungswerte an der Affinitätsgrenze

Aus den Abbildungen wird deutlich, dass die Affinitätsgrenze für den untersuchten Beton nahezu mit der Elastizitätsgrenze zusammenfällt (Abbildung 3.51). Somit können die Ergebnisse von Kupfer [58] nicht bestätigt werden, der bei seinen zweiaxialen Versuchen an Normalbeton signifikant höhere Spannungswerte an der Affinitätsgrenze im Vergleich zur Elastizitätsgrenze feststellte. Mögliche Ursachen hierfür sind das spröde Materialverhalten des untersuchten Betons, die angewendete Messmethode aber auch das zur Bestimmung der Elastizitäts- und Affinitätsgrenze angewendete Kriterium. Eine spezifische Charakteristik von zweiaxialen Versuchen ist jedoch nicht zu erwarten, da auch die eigenen Untersuchungen sowohl zweiaxiale Druck-Zug- als auch Druck-Druck-Versuche beinhalten und diese ebenfalls keine erhöhte Spannung an der Affinitätsgrenze gegenüber der Spannung an der Elastizitätsgrenze aufweisen.

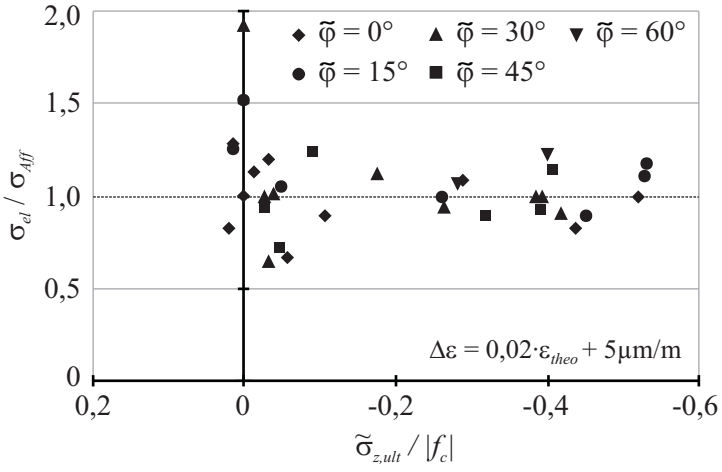


Abbildung 3.51: Verhältnis der Spannungswerte von Elastizitätsgrenze zu Affinitätsgrenze

4 Beschreibung von Grenzflächen charakteristischer Festigkeitswerte

4.1 Vorbetrachtungen

Im folgenden Kapitel wird eine mathematische Beschreibung für Festigkeitsgrenzflächen von Beton unter proportional aufgebrachter mehraxialer Beanspruchung aufgestellt. Hierfür werden die in Abbildung 4.1 angegebenen Definitionen und Bezeichnungen für einzelne Bereiche bzw. Ebenen der Fläche verwendet:

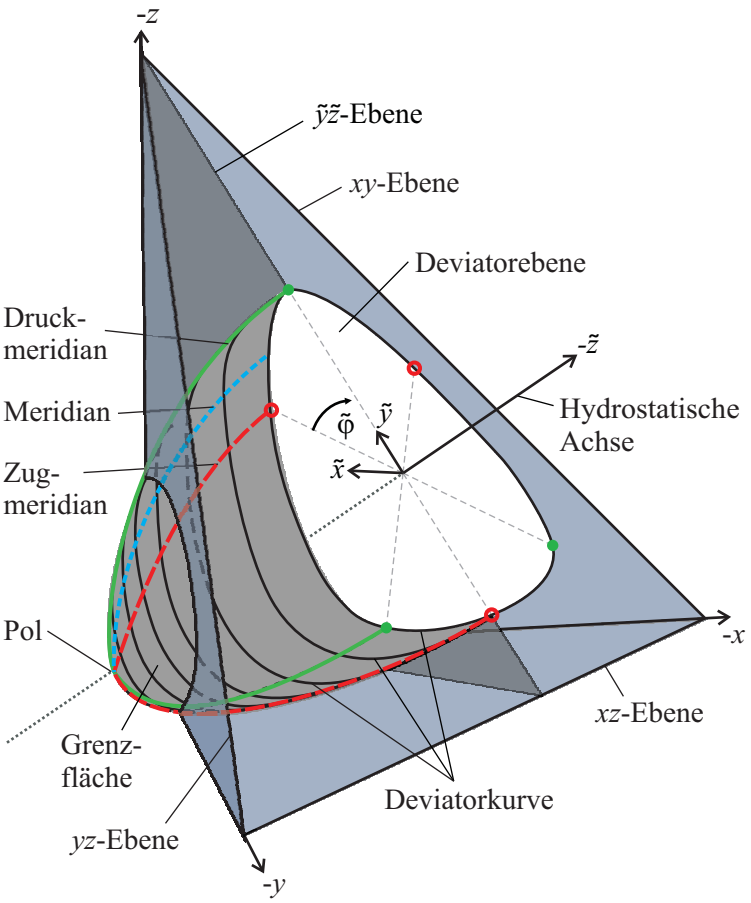


Abbildung 4.1: Verwendete Bezeichnungen zur Beschreibung der Grenzfläche (Abbildung nach Schickert [109])

- Grenzfläche: Fläche auf der die Festigkeitswerte des zu beschreibenden Merkmals liegen;
- Meridian: Kurve der Festigkeitswerte von Spannungsverhältnissen (SPV) mit $\widetilde{\varphi}$ = konstant;
- Zugmeridian: Kurve der Festigkeitswerte von SPV mit $\alpha_1 \geq \alpha_2 = \alpha_3$ ($\widetilde{\varphi} = 0\,^\circ$);
- Druckmeridian: Kurve der Festigkeitswerte von SPV mit $\alpha_1 = \alpha_2 \geq \alpha_3$ ($\widetilde{\varphi} = 60\,^\circ$);
- Deviatorebene: Ebene mit $\widetilde{z}$ = konstant;
- Hydrostatische Achse: Achse mit $x = y = z$, $\widetilde{z}$-Achse;
- Deviatorkurve: Schnittlinie der Grenzfläche mit der Deviatorebene;

- Pol: Zusammentreffen aller Meridiane auf der hydrostatischen Achse unter einer hydrostatischen Zug- oder Druckbeanspruchung;
- $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene: Projektionsebene der Festigkeitswerte eines 60 °-Ausschnitts der Grenzfläche (vom Zug- zum Druckmeridian).

Zunächst sollen zusätzlich zu den in Abschnitt 2.1.4 aufgeführten bekannten Annahmen zur Gestalt von Festigkeitsgrenzflächen mögliche Meridianverläufe hinsichtlich unterschiedlicher Lastpfade diskutiert werden. Als Lastpfad wird dabei die Art und Reihenfolge, in der die mehraxiale Beanspruchung aufgebracht wird, bezeichnet. Ziel der Überlegung ist es, die Meridianformen zu bestimmen, die bei einer proportionalen Laststeigerung auftreten können. Eine proportionale Laststeigerung kann auch als sternenförmig, mit dem Sternenzentrum im Koordinatenursprung, bezeichnet werden und stellt eine sehr eingeschränkte Art der Belastung dar. Daraus folgt, dass für diese Beanspruchung mögliche Meridianformen auch von komplexeren Lastpfaden beschrieben werden können, bei denen beispielsweise eine Richtungsänderung auftritt.

Abbildung 4.2 zeigt verschiedene Meridianverläufe und die entsprechend zugehörigen zulässigen Lastpfade. Ist der Meridian, wie in Abbildung 4.2a, über seinen gesamten Verlauf konvex, kann die Belastung sternenförmig mit jedem beliebigen Punkt unterhalb des Meridians als Sternenzentrum erfolgen. Wird davon ausgegangen, dass der Koordinatenursprung das Sternenzentrum bildet, muss der Meridian nur in einem bestimmten Bereich konvex sein, damit alle Punkte erreichbar sind (Abbildung 4.2b).

Der in Abbildung 4.2c dargestellte Meridian weist eine beliebige Form mit konvexen und konkaven Bereichen auf, ohne dass Hinterschneidungen auftreten. Bei proportionaler Laststeigerung kann im Gegensatz zu den ersten beiden Formen nicht jeder Punkt des Meridians erreicht werden, ohne diesen vorher zu schneiden. Da bei einem Schnitt des Lastpfads mit dem Meridian das Grenzkriterium bereits erfüllt wird, ist eine weitere Laststeigerung ausgeschlossen, weshalb dieser Meridianverlauf für proportionale Belastungen nicht möglich ist. Gleiches gilt für die in Abbildung 4.2d dargestellte beliebige Meridianform mit Hinterschneidung. Diese Form schließt zudem einen weiteren charakteristischen Lastpfad aus, der sich aus einer Belastung entlang der hydrostatischen Achse und einer anschließenden Belastung innerhalb der erreichten Deviatorebene zusammensetzt.

Für die weitere Betrachtung der Gestalt von Festigkeitsgrenzflächen bei mehraxialer Beanspruchung von Beton mit proportional aufgebrachten Beanspruchungen wird vorerst davon ausgegangen, dass die Meridiane entsprechend Abbildung 4.2a über ihren gesamten Verlauf konvex sind.

Über die Form der Deviatorkurven kann aus diesen Betrachtungen kein Rückschluss gezogen werden. Die Bedingung, dass die Meridiane einen konvexen Verlauf annehmen, setzt nicht automatisch voraus, dass die Deviatorkurven ebenfalls eine konvexe Form aufweisen.

4.2 Mathematische Beschreibung von Festigkeitsgrenzflächen

4.2.1 Anforderungen

Da die Gestalt der Festigkeitsgrenzflächen von Beton unter mehraxialer Beanspruchung noch nicht endgültig geklärt ist, besteht die Forderung nach einer großen Flexibilität der mathematischen Beschreibung mit der Notwendigkeit, die Anzahl der eingeführten Freiwerte gering zu halten. Dabei sollen die folgenden Randbedingungen durch die Grenzfläche erfüllt werden, was bei der Aufstellung des mathematischen Ansatzes zu berücksichtigen ist:

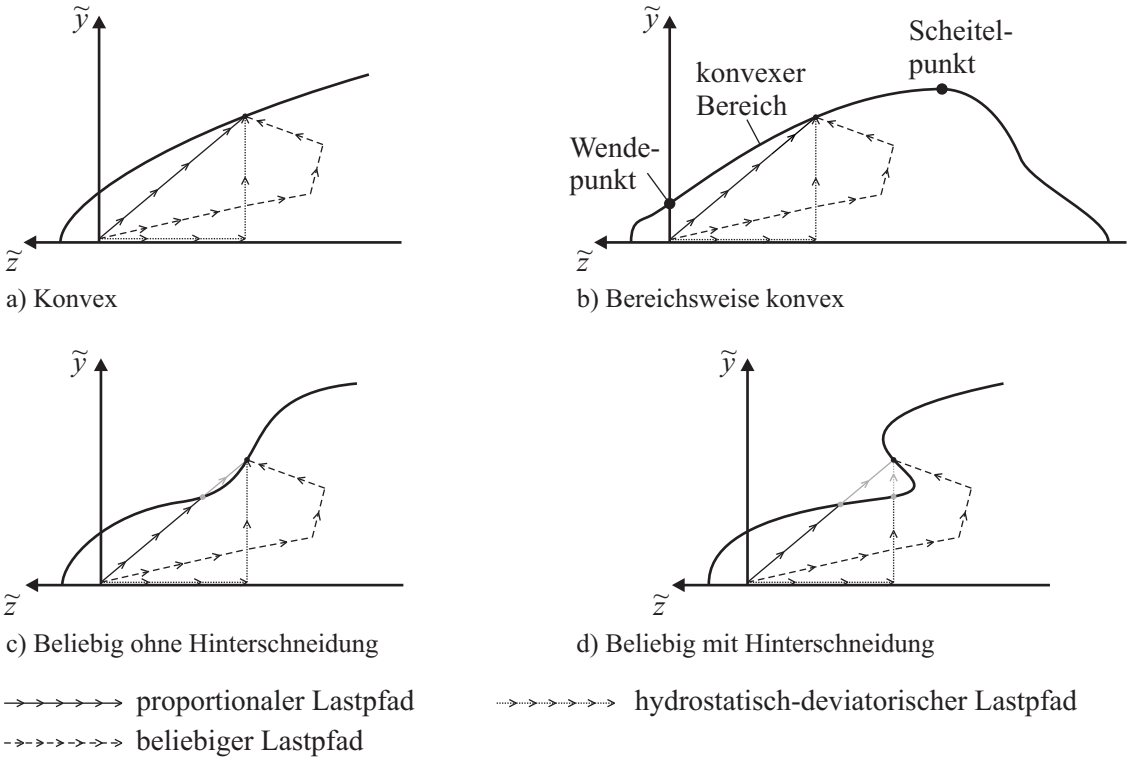


Abbildung 4.2: Mögliche Meridianformen einer Grenzfläche in Abhängigkeit des Belastungspfades

- Die Grenzfläche gilt für isotropes Material und setzt sich aus sechs gleichen Segmenten zusammen. Das Grundsegment liegt dreizählig gedreht und dreizählig gespiegelt vor, so dass die Grenzfläche dreifache Radiärsymmetrie (Drehsymmetrie) aufweist.
- Die Grenzfläche ist in jedem Punkt stetig und differenzierbar, wobei die Differenzierbarkeit an den Polen unter hydrostatischer Beanspruchung ausgenommen wird.
- Die Grenzfläche schließt sich unter hydrostatischer Zugbeanspruchung. Die Meridiane schneiden sich dabei im Pol.
- Die Meridiane verlaufen vom Pol der hydrostatischen Zugbeanspruchung an konvex.

Die Beschreibung der Meridiane erfolgt in dem bereits eingeführten gedrehten Koordinatensystem $\widetilde{x}\widetilde{y}\widetilde{z}$, in der auf die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene projizierten Darstellung der Festigkeitswerte (vgl. Abschnitt 3.6.1). Infolgedessen ist der gewählte mathematische Ansatz zur Beschreibung der Meridiane vom Winkel $\widetilde{\varphi}$ und von $\widetilde{z}$ abhängig.

Zur weiteren Vereinfachung wird im Folgenden $\widetilde{z}$ nach Gl. (4.1) substituiert, so dass das neue $\hat{z}$ nur positive Werte aufweist. Der Wert f_{ttt} beschreibt dabei den Pol der Grenzfläche auf der $\widetilde{z}$-Achse, der sich unter hydrostatischer Zugbeanspruchung ergibt und in dem sich alle Meridiane schneiden.

$$\hat{z} = \frac{-\widetilde{z}}{|f_c|} + \frac{f_{ttt}}{|f_c|} \tag{4.1}$$

Die allgemeine Form des mathematischen Ansatzes zur Beschreibung der Grenzfläche, der sich aus drei Teilen zusammensetzt, ist in Gl. (4.2) angegeben. Der dritte Teil darin beschreibt den prinzipiellen Verlauf des projizierten Zugmeridians ($\widetilde{\varphi} = 0\,^\circ$). Der Verlauf der Deviatorkurve des Ausgangssegmentes zwischen dem Zug- und dem Druckmeridian in der Deviatorebene wird durch den zweiten Teil definiert. Aufgrund des dafür gewählten Ansatzes ist eine Spiegelung an der $\widetilde{y}$-Achse und eine anschließende Drehung um 60 ° des Ausgangssegmentes notwendig, um die Lage- und

Winkeldefinition entsprechend Abbildung 4.1 zu erhalten, was durch den ersten Teil der allgemeinen Form realisiert wird.

$$\widetilde{y}(\hat{z},\widetilde{\varphi}) = \underbrace{\left[\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\tan(\widetilde{\varphi})+\frac{1}{2}\right]}_{\substack{\text{Spiegelung und Drehung des}\\ \text{Ausgangssegmentes}}} \cdot \underbrace{k(\hat{z},\widetilde{\varphi})}_{\substack{\text{Verlauf der}\\ \text{Deviatorkurve}}} \cdot \underbrace{\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z})}_{\substack{\text{prinzipieller Verlauf}\\ \text{des projizierten}\\ \text{Zugmeridians}}} \tag{4.2}$$

4.2.2 Beschreibung des Zugmeridians

Die Beschreibung des Zugmeridians, für dessen originalen und somit auch projizierten Verlauf Konvexität gefordert wird, ist mit einer Vielzahl von geeigneten Ansätzen möglich. Für die durchgeführte Auswertung der Festigkeitswerte wurden drei Ansätze gewählt, die sich in ihrem Verlauf hauptsächlich mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil der Beanspruchung unterscheiden. Ansatz 1 nach Gl. (4.3) beschreibt eine Wurzelfunktion, die bei $\hat{z} = 0$ die $\widetilde{z}$-Achse orthogonal schneidet und sich mit zunehmendem $\hat{z}$ öffnet (Abbildung 4.3a). Im Gegensatz dazu schneidet die für den Ansatz 2 gewählte Exponentialfunktion nach Gl. (4.4) die $\widetilde{z}$-Achse des Koordinatensystems nicht orthogonal und strebt mit zunehmendem $\hat{z}$ asymptotisch gegen einen oberen Grenzwert (Abbildung 4.3b). Das bei Ansatz 3 verwendete Polynom 2. Grades gemäß Gl. (4.5) entspricht in seinem charakteristischen Verlauf in Richtung $\hat{z} = 0$ dem Verlauf des Ansatzes 2. Mit größer werdendem $\hat{z}$ hingegen gibt es einen zweiten Schnittpunkt mit der $\widetilde{z}$-Achse, so dass sich die Grenzfläche unter hydrostatischer Druckbeanspruchung schließt (Abbildung 4.3c). Das zwischen diesen beiden Punkten auftretende Maximum der Funktion ist dabei für alle Meridiane in der gleichen Deviatorebene.

Ansatz 1:

$$\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z}) = a_1 \cdot (\hat{z})^{b_1} \tag{4.3}$$

Ansatz 2:

$$\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z}) = a_2 \cdot (1 - (b_2)^{\hat{z}}) \tag{4.4}$$

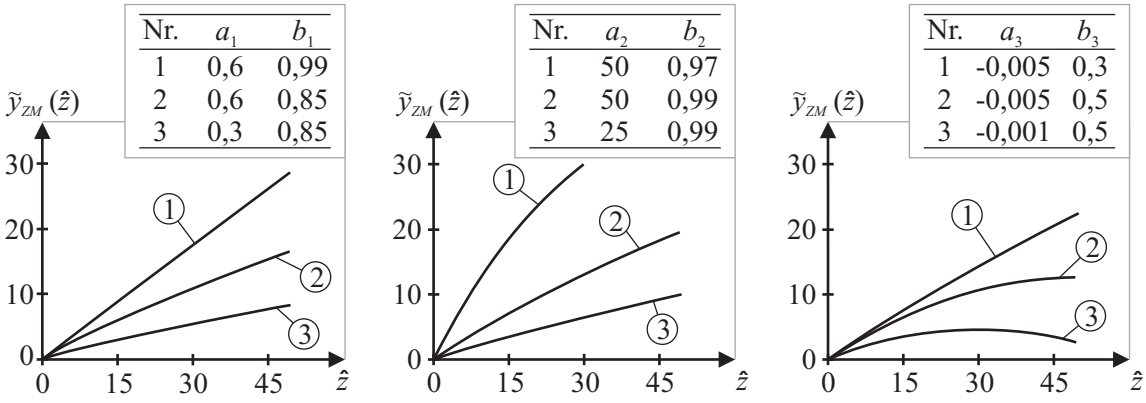
Ansatz 3:

$$\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z}) = a_3 \cdot \hat{z}^2 + b_3 \cdot \hat{z} \tag{4.5}$$

Damit die Forderung der Konvexität der Meridianverläufe erfüllt wird, ergeben sich für einige Freiwerte a_i und b_i untere und obere Grenzen, die eingehalten werden müssen (Tabelle 4.1). Unter der Berücksichtigung dieser Randbedingungen sind in Abbildung 4.3 die prinzipiellen Verläufe der drei gewählten Ansätze nach Gl. (4.3) bis Gl. (4.5) für die Beschreibung des in die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene projizierten Zugmeridians für verschiedene Parameterkombinationen dargestellt.

Tabelle 4.1: Grenzen der Freiwerte der Ansätze zur Beschreibung des Zugmeridianverlaufs

Ansatz 1 (Gl. (4.3)) (öffnend)	Ansatz 2 (Gl. (4.4)) (asymptotisch)	Ansatz 3 (Gl. (4.5)) (schließend)
$a_1 > 0$	$a_2 > 0$	$a_3 < 0$
$0 < b_1 < 1$	$0 < b_2 < 1$	$b_3 > 0$



a) Gl. (4.3) - öffnend b) Gl. (4.4) - asymptotisch c) Gl. (4.5) - schließend

Abbildung 4.3: Gewählte Ansatzfunktionen für die Beschreibung des prinzipiellen Verlauf des projizierten Zugmeridians

4.2.3 Beschreibung der Deviatorkurve

Zur Beschreibung der Gestalt der Grenzflächen in der Deviatorebene muss ein Ansatz gewählt werden, der die Forderung nach einer stetigen und differenzierbaren Grenzfläche erfüllt, wenn sich diese, wie beschrieben, aus sechs gleichen Segmenten zusammensetzt.

Ausgehend von der Projektion der Datenpunkte im gedrehten Koordinatensystem auf die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene nach Abbildung 3.36 ergibt sich ein prinzipieller Zusammenhang zwischen den Werten für $\widetilde{y}$ und dem Winkel $\widetilde{\varphi}$. Zur Beschreibung dieses Zusammenhanges wird vereinfachend vorerst ein Winkel α eingeführt, der entgegengesetzt dem Winkel $\widetilde{\varphi}$ verläuft (Abbildung 4.4). Mit dieser Annahme kommt es, unter inkrementeller Betrachtung, mit zunehmendem Winkel α zu einem zunehmenden Unterschied zwischen den $\widetilde{y}$-Werten entsprechender Winkel, was prinzipiell vom Ansatz nach Gl. (4.6) beschrieben wird. Da es sich hierbei um die Beschreibung der $\widetilde{y}$-Werte in nur einer Deviatorebene handelt, wird die aufgestellte Funktion mit $k(\alpha)$ bezeichnet.

$$k(\alpha) = -k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{\alpha}{60\,^\circ}\right)^{k_3} \tag{4.6}$$

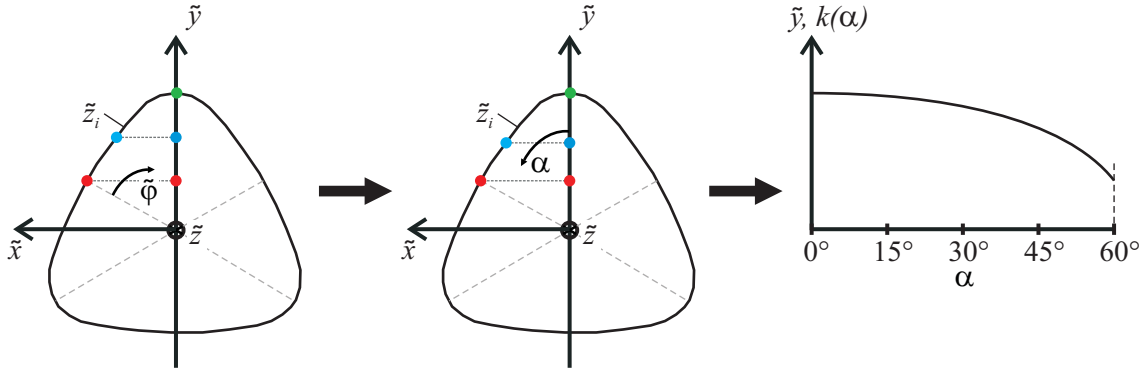


Abbildung 4.4: Definition des Winkels α und Verlauf der $\widetilde{y}$-Werte in Abhängigkeit vom Winkel α in einer Deviatorebene

Damit der prinzipielle Verlauf der $\widetilde{y}$-Werte in Abhängigkeit vom Winkel α in der Deviatorebene beschrieben wird, muss die Gl. (4.6) für $\alpha = 0\,^\circ$ einen horizontalen Anstieg aufweisen $\left(\frac{\delta k(\alpha)}{\delta \alpha} = 0\right)$, woraus folgt, dass $k_3 > 1$ einzuhalten ist.

Um eine größere Flexibilität der Beschreibung von $k(\alpha)$ zu erreichen, wird Gl. (4.6) zu Gl. (4.7) erweitert, wobei aufgrund des horizontalen Anstiegs der Kurve für $\alpha = 0\,^\circ$ ebenfalls $k_4 > 1$ gilt.

$$k(\alpha) = -k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{\alpha}{60\,^\circ}\right)^{k_3} - \left(\frac{\alpha}{60\,^\circ}\right)^{k_4} \tag{4.7}$$

Zusätzlich wird durch die Erweiterung des Faktors k_2 um die Funktion $r(\hat{z})$ eine Abhängigkeit der Form der Deviatorkurven von der $\widetilde{z}$-Komponente (hydrostatischer Spannungsanteil) der mehraxialen Festigkeitswerte eingeführt, so dass sich die Form der Deviatorkurven entlang der hydrostatischen Achse ändern können (Gl. (4.8)).

$$k(\hat{z},\alpha) = -k_1 + (k_2 + r(\hat{z})) \cdot \left(\frac{\alpha}{60\,^\circ}\right)^{k_3} - \left(\frac{\alpha}{60\,^\circ}\right)^{k_4} \tag{4.8}$$

Im Folgenden werden die freien Parameter k_1 bis k_4 bestimmt bzw. festgelegt, um stetige und differenzierbare Deviatorkurven der zusammengesetzten Grenzfläche zu erhalten. Hierfür müssen die Deviatorkurven des 60 °-Ausgangssegmentes die Ebenen des Zug- bzw. des Druckmeridians orthogonal schneiden. Zum Aufstellen und Auswerten der Randbedingungen wird eine Funktion $\rho(\hat{z},\alpha)$ entsprechend Abbildung 4.5 und Gl. (4.9) definiert.

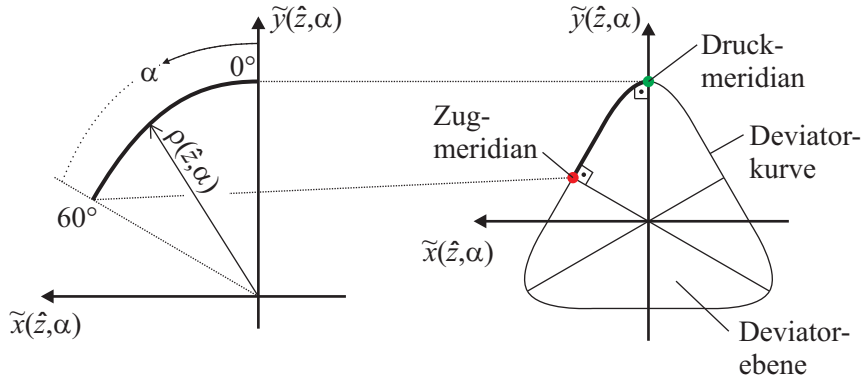


Abbildung 4.5: Definition von $\rho(\hat{z},\alpha)$ und Randbedingungen in der $\widetilde{x}\widetilde{y}$-Ebene (Deviatorebene)

$$\rho(\hat{z},\alpha) = \sqrt{\widetilde{y}(\hat{z},\alpha)^2 + \widetilde{x}(\hat{z},\alpha)^2} \tag{4.9}$$

Hierbei ist bekannt, dass sich die Werte der $\widetilde{x}$-Achse aus dem Wert der $\widetilde{y}$-Achse (Gl. (4.10)) und dem Winkel α nach Gl. (4.11) berechnen lassen.

$$\widetilde{y}(\hat{z},\alpha) = k(\hat{z},\alpha) \cdot \widetilde{y}_{ZM}(\hat{z}) \tag{4.10}$$

$$\widetilde{x}(\hat{z},\alpha) = \tan(\alpha) \cdot \widetilde{y}(\hat{z},\alpha) \tag{4.11}$$

Somit ergeben die zwei Randbedingungen nach Gl. (4.12) und Gl. (4.13) für die Funktion von $\rho(\hat{z},\alpha)$, die unabhängig vom Wert $\hat{z}$ eingehalten werden müssen.

$$\frac{\delta\rho(\hat{z},\alpha = 0\,^\circ)}{\delta\alpha} = 0 \tag{4.12}$$

$$\frac{\delta\rho(\hat{z},\alpha = 60\,^\circ)}{\delta\alpha} = -\sqrt{3} \tag{4.13}$$

Bevor die Randbedingungen ausgewertet werden, wird zur Reduktion der freien Parameter $k_3 = 2$ gesetzt. Anschließend erfolgt die Ableitung von $\rho(\hat{z},\alpha)$, die jedoch nur für Winkel $\alpha > 0\,^\circ$ definiert und weshalb nur Gl. (4.13) auswertbar ist. Um auch die Randbedingung nach Gl. (4.12) berücksichtigen zu können, wird eine Spiegelung des 60 °-Ausgangssegmentes an der $\widetilde{y}$-Achse ($\widetilde{x} = -\widetilde{x}$) und eine anschließende Drehung um 60 ° vorgenommen (Abbildung 4.6, Gl. (4.14) und Gl. (4.15)). Hierdurch ergibt sich die Drehrichtung des Winkels α sowie dessen Startpunkt entsprechend dem Winkel $\widetilde{\varphi}$.

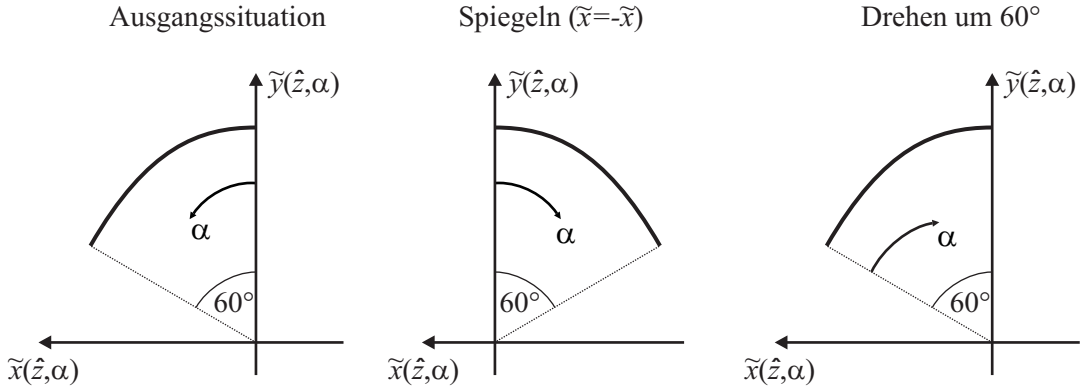


Abbildung 4.6: Spiegeln und Drehen des 60 °-Ausgangssegmentes

$$\widetilde{x}_{neu} = \cos(\pi \cdot 60\,^\circ/180\,^\circ) \cdot ((-1) \cdot \widetilde{x}(\hat{z},\alpha)) - \sin(\pi \cdot 60\,^\circ/180\,^\circ) \cdot \widetilde{y}(\hat{z},\alpha) \tag{4.14}$$

$$\widetilde{y}_{neu} = \sin(\pi \cdot 60\,^\circ/180\,^\circ) \cdot ((-1) \cdot \widetilde{x}(\hat{z},\alpha)) + \cos(\pi \cdot 60\,^\circ/180\,^\circ) \cdot \widetilde{y}(\hat{z},\alpha) \tag{4.15}$$

Weiter wird somit die Randbedingung nach Gl. (4.12) in die Randbedingung nach Gl. (4.13) überführt und kann ebenfalls ausgewertet werden. Die Bestimmung der freien Parameter aus den Randbedingungen ergibt, dass die Werte k_2 und k_4 voneinander abhängig sind und einer der beiden Werte frei gewählt werden kann. Mit der Vorgabe von $k_2 = 0{,}5 \cdot k_1$ führt die erneute Auswertung von Gl. (4.12) nach der Spiegelung und der Drehung des Ausgangssegmentes zu $k_4 = 0{,}0931 \cdot k_1 - 1{,}8138 + 3{,}8138 \cdot r(\hat{z})$. Aus der bekannten Bedingung $k_4 > 1$ lässt sich weiterhin $k_1 \geq -10{,}539$ als untere Grenze für k_1 berechnen (da $r(\hat{z}) \geq 1$ worauf im Folgenden näher eingegangen wird). Um eine einfache Beschreibung der Grenzfläche zu erhalten, wird auf eine mögliche Abhängigkeit des Wertes k_1 von $\hat{z}$ an dieser Stelle verzichtet, so dass sich nach Einsetzen von $k_1 = -10{,}539$ in den Ansatz $k(\hat{z},\alpha)$ nach Gl. (4.8) für die Beschreibung der Deviatorkurve Gl. (4.16) ergibt.

$$k(\hat{z},\alpha) = 10{,}539 - (5{,}27 - r(\hat{z})) \cdot \left(\frac{\alpha}{60\,^\circ}\right)^2 - \left(\frac{\alpha}{60\,^\circ}\right)^{3{,}8138 \cdot r(\hat{z}) - 2{,}8138} \tag{4.16}$$

Damit der aufgestellte Ansatz $k(\hat{z},\alpha)$ für den Winkel $\widetilde{\varphi}$ Gültigkeit aufweist, muss die in Gl. (4.14) und Gl. (4.15) angegebene Spiegelung und Drehung erneut für Gl. (4.16) durchgeführt werden. Damit ergibt sich für die Beschreibung der auf die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene projizierten Festigkeitswerte die Beziehung nach Gl. (4.17). Außerdem ist ersichtlich, dass der erste Teil der allgemeinen Beschreibung der Grenzfläche nach Gl. (4.2) aus der Spiegelung und Drehung des Ausgangssegmentes in der Deviatorebene resultiert.

$$\widetilde{y}(\hat{z},\widetilde{\varphi}) = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\tan(\widetilde{\varphi})+\frac{1}{2}\right)\cdot\underbrace{\left(10{,}539-(5{,}27-r(\hat{z}))\cdot\left(\frac{\widetilde{\varphi}}{60^\circ}\right)^2-\left(\frac{\widetilde{\varphi}}{60^\circ}\right)^{3{,}8138\cdot r(\hat{z})-2{,}8138}\right)}_{k(\hat{z},\widetilde{\varphi})}\cdot(\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z})) \tag{4.17}$$

Da der Ansatz für die Beschreibung der Deviatorkurven ($k(\hat{z},\widetilde{\varphi})$) für $k(\hat{z},\widetilde{\varphi}=0^\circ)>2$ ist, muss ein globaler Faktor vorhanden sein, der die Gl. (4.16) auf die projizierten Werte des Zugmeridians skaliert. Dieser Faktor ist im Freiwert a_i der Ansätze für $\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z})$ integriert.

Somit ist $r(\hat{z})$ die einzige Funktion mit der die Gestalt der Grenzfläche in der Deviatorebene entlang der hydrostatischen Achse variiert werden kann. Mit $r(\hat{z})=1$ ergibt sich eine runde Form der Deviatorkurve ($\rho(\hat{z},\widetilde{\varphi})=$ konstant), die mit zunehmenden Werten von $r(\hat{z})$ über nahezu dreieckig bis hin zu einer Form mit nicht konvexen Bereichen übergeht (Abbildung 4.7). Der Übergang von einer konvexen zu einer nicht konvexen Form ergibt sich bei $r(\hat{z})=-k_1/2=5{,}27$, so dass unter dieser Bedingung die Form einem Dreieck am Nächsten ist.

Mit der u. a. von Ottosen [91] getroffenen Annahme, dass die Gestalt der Grenzfläche von ihrem geschlossenen Ende unter hydrostatischer Zugbeanspruchung mit größer werdenden $\hat{z}$-Werten in der Deviatorebene von dreieckig zu rund übergeht, wird für den Verlauf von $r(\hat{z})$ ein exponentieller Ansatz nach Gl. (4.18) gewählt. Unter der Berücksichtigung von $r_1>0$ und $r_2>0$ kann diese gewünschte Charakteristik abgebildet werden, wobei für sehr kleine Werte von r_1 die Funktion $r(\hat{z})$ nahezu konstant Eins ist und sich die Formen der Deviatorkurven entlang der hydrostatischen Achse quasi nicht ändert.

$$r(\hat{z}) = \frac{r_1}{1+e^{r_2\cdot\hat{z}}}+1 \tag{4.18}$$

Die entwickelte mathematische Beschreibung gemäß Gl. (4.17) weist mit den Ansätzen für $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.18) sowie den Ansätzen für $\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z})$ nach Gl. (4.3) bis Gl. (4.5) fünf Freiwerte f_{ttt}, r_1, r_2, a_i, b_i auf, die anhand von Versuchswerten kalibriert werden müssen. Dies stellt die einfachste Beschreibung mit den wenigsten unbekannten Freiwerten dieses Modells dar.

4.2.4 Modifikations- und Erweiterungsmöglichkeiten der mathematischen Beschreibung

Bei der im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Beschreibung der Grenzflächen wurde die Anzahl der aus Versuchen zu bestimmenden Freiwerte auf ein Minimum reduziert. Durch die Modifikation der getroffenen Annahmen lässt sich die Genauigkeit der Abbildung der Versuchswerte erhöhen, was jedoch mit einer höheren Anzahl zu ermittelnder Freiwerte einhergeht. So können z. B. für die Beschreibung der Meridianform weitere Ansätze $\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z})$ gewählt werden, die gegebenenfalls zu einer genaueren Approximation der Versuchswerte führen.

Weiter kann z. B. für k_1 eine Funktion $k_1(\hat{z})$ nach Gl. (4.19) verwendet werden, womit sich die Gestalt der Grenzfläche entlang der Meridiane aber auch hinsichtlich der Deviatorkurven beeinflussen lässt. Hierbei ist jedoch zwingend die Bedingung $k_4(\hat{z})\geq 1$ einzuhalten. Da diese Erweiterung mit dem in Gl. (4.19) gezeigten Ansatz mit der Einführung von drei weiteren Freiwerten einhergeht und einen ganzheitlichen Einfluss auf die Gestalt der Grenzfläche besitzt, erscheint eine Verwendung unter dem derzeitigen Kenntnisstand jedoch wenig nützlich.

$$k_1(\hat{z}) = \frac{k_{1,1}}{1+e^{k_{1,2}\cdot\hat{z}}}+k_{1,4} \tag{4.19}$$

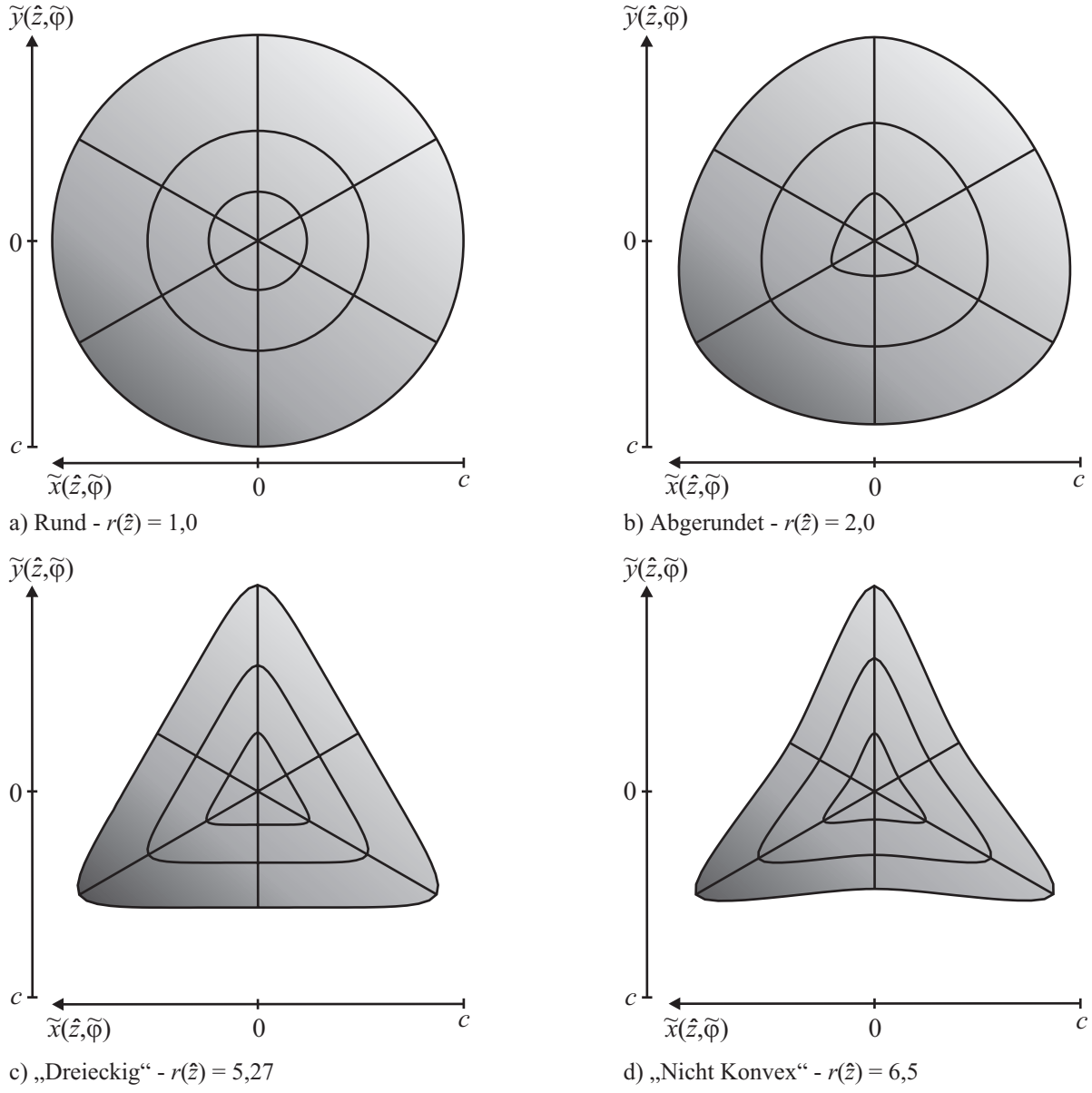


Abbildung 4.7: Mögliche Formen der Deviatorkurven

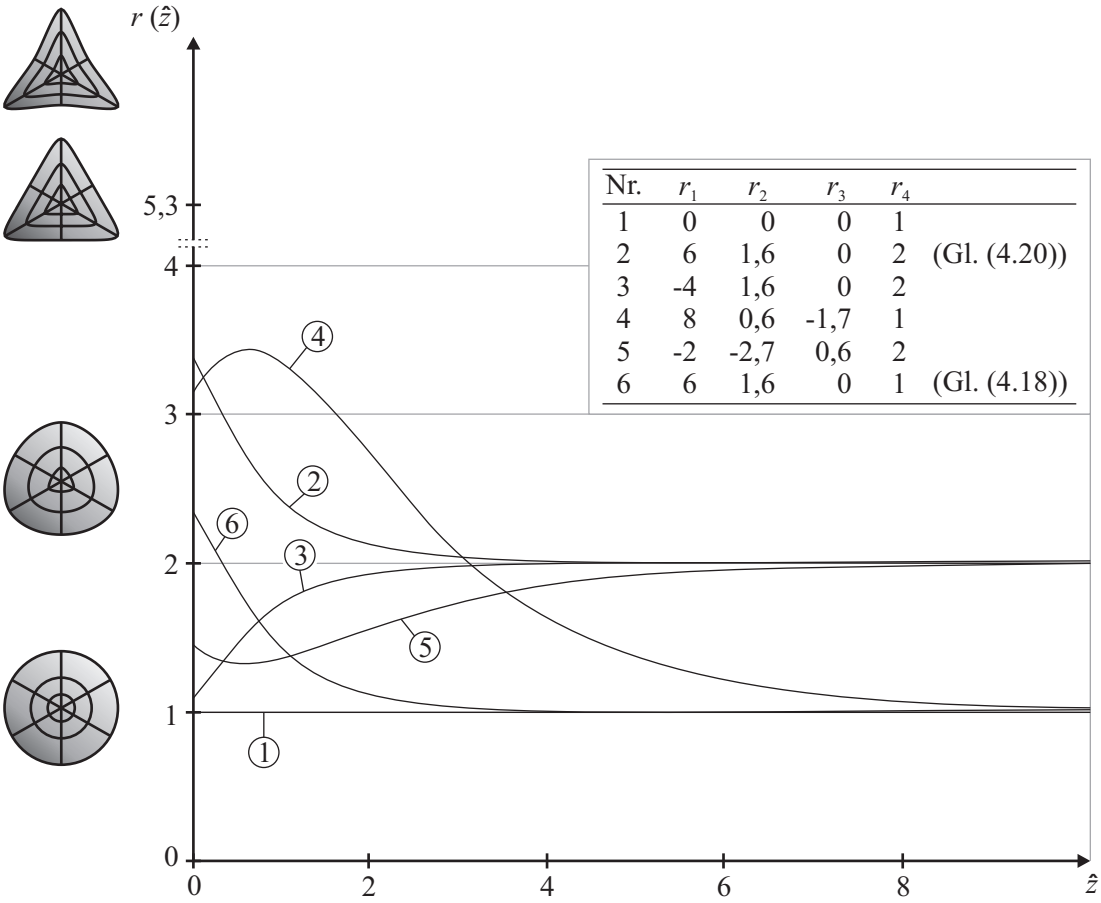
Im Gegensatz dazu bietet die Modifikation des Ansatzes für die Beschreibung des Verlaufs von $r(\hat{z})$ verschiedene Möglichkeiten, der Gestalt der Grenzfläche eine höhere Flexibilität zuzuweisen, aus der ggf. detailliertere Aussagen zu deren Form abgeleitet werden können. Soll die Deviatorkurve mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil der Beanspruchung keine runde Gestalt annehmen, muss für den additiven Term in Gl. (4.18) der Freiwert r_4 gemäß Gl. (4.20) eingeführt werden. Unter der Voraussetzung, dass $r_1 > 0$ und $r_2 \geq 0$ ist, strebt die Funktion nach Gl. (4.20) mit größer werdendem $\hat{z}$ gegen den Wert r_4, der die Form der Deviatorkurve bei steigenden $\hat{z}$-Werten definiert. Mit der Bedingung $r_4 \geq 1$ ergibt sich für $r_4 = 1$ eine runde Form, wogegen Werte $r_4 > 1$ zu einer zunehmend „dreieckigen“ Form der Deviatorkurve und darüber hinaus führt (Abbildung 4.7).

Um die Flexibilität der Gestalt der Grenzfläche weiter zu erhöhen, kann der Ansatz $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) um einen zusätzlichen Term mit dem Freiwert r_3 erweitert werden. Für die sich nach Gl. (4.21) ergebende Beschreibung des Verlaufs von $r(\hat{z})$ behält die Randbedingung $r_4 \geq 1$ Gültigkeit. Die weiteren Freiwerte sind derart festzulegen, dass $r(\hat{z}) \geq 1$ gilt. Die daraus resultierenden, möglichen Verläufe für $r(\hat{z})$ sind in Abbildung 4.8 dargestellt. In Verbindung mit Abbildung 4.7

lassen sich die entsprechenden Formen der Deviatorkurven zuordnen. Prinzipiell kann unter Verwendung des erweiterten Ansatzes für $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.21) die Gestalt der Deviatorkurve bei einem bestimmten $\hat{z}$ eine extreme Form in Richtung „rund“ oder „dreieckig“ annehmen. Es ist ersichtlich, dass mit dem vorgestellten Ansatz unter hydrostatischer Zugbeanspruchung jedoch keine runde Gestalt der Grenzfläche in der Deviatorkurve erreicht werden kann ($r(\hat{z} = 0) > 1$).

$$r(\hat{z}) = \frac{r_1}{1 + e^{r_2 \cdot \hat{z}}} + r_4 \tag{4.20}$$

$$r(\hat{z}) = \frac{r_1}{1 + e^{r_2 \cdot \hat{z}}} \cdot \frac{1}{1 + e^{r_3 \cdot \hat{z}}} + r_4 \tag{4.21}$$



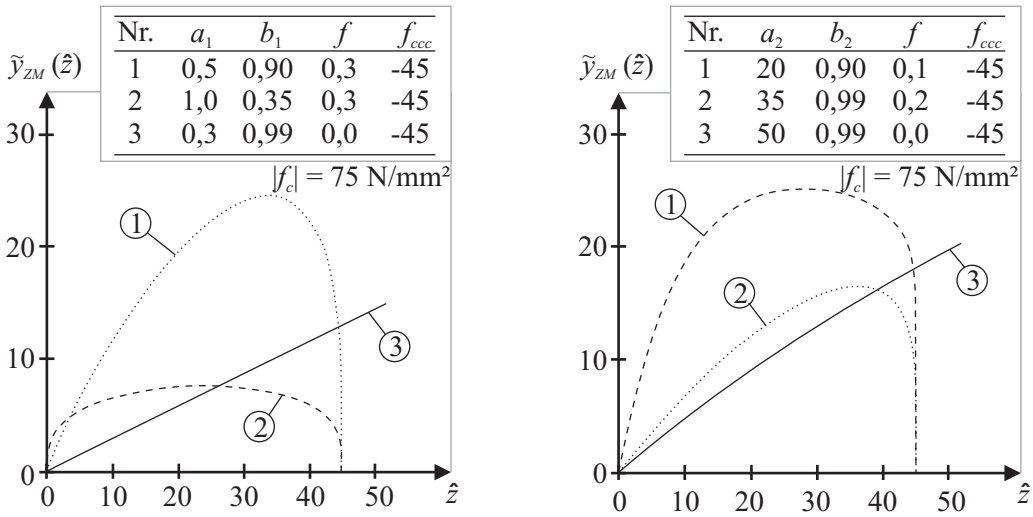
Nr.	r_1	r_2	r_3	r_4	
1	0	0	0	1	
2	6	1,6	0	2	(Gl. (4.20))
3	-4	1,6	0	2	
4	8	0,6	-1,7	1	
5	-2	-2,7	0,6	2	
6	6	1,6	0	1	(Gl. (4.18))

Abbildung 4.8: Mögliche Verläufe von $r(\hat{z})$ unter Verwendung von Gl. (4.21)

Mittels der Beschreibung der Zugmeridiane nach den Ansätzen in Gl. (4.3) und Gl. (4.4) kann sich die Grenzfläche unter einer hydrostatischen Druckbeanspruchung nicht schließen. Werden diese beiden Gleichungen mit dem Term $(^{-f_{ccc}}/_{|f_c|} - \hat{z})^f$ multipliziert, ergeben sich Gl. (4.22) und Gl. (4.23) und es wird ein Schließen der Grenzfläche an der Stelle f_{ccc} unter der Annahme $f > 0$ vorgegeben. Demgegenüber besitzt die Erweiterung für $f = 0$ keinen Einfluss auf den Verlauf der Meridiane und für $f < 0$ ergeben sich keine sinnvollen Meridiankurven. Der Wert f_{ccc} beschreibt dabei den Punkt auf der $\widetilde{z}$-Achse (Pol), an dem alle Meridiane unter hydrostatischer Druckbeanspruchung zusammenlaufen (Abbildung 4.9).

$$\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z}) = \left(a_1 \cdot (\hat{z})^{b_1}\right) \cdot (-f_{ccc}/|f_c| - \hat{z})^f \tag{4.22}$$

$$\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z}) = \left(a_2 \cdot (1 - (b_2)^{\hat{z}})\right) \cdot (-f_{ccc}/|f_c| - \hat{z})^f \tag{4.23}$$



a) Gl. (4.22) b) Gl. (4.23)

Abbildung 4.9: Meridianverläufe für eine sich unter hydrostatischer Druckbeanspruchung schließende Grenzfläche nach Gl. (4.22) und Gl. (4.23)

Die vorgestellten Erweiterungen gehen, wie bereits erwähnt, immer mit der Einführung weiterer Freiwerte einher, was sich auf die Kalibrierung des Modells nachteilig auswirkt. Stehen genügend Versuchsdaten zur Kalibrierung zur Verfügung, können sich mit den vorgestellten Erweiterungen ggf. jedoch detaillierte Aussagen zur Gestalt von Festigkeitsgrenzflächen von Beton unter mehraxialer Belastung ableiten lassen, weshalb es sinnvoll ist, ausgewählte Erweiterungen bei den Untersuchungen zu berücksichtigen.

4.3 Grenzflächen charakteristischer Festigkeitswerte der eigenen Versuche

4.3.1 Vorgehensweise

Zur mathematischen Beschreibung der Festigkeitsgrenzflächen der eigenen Versuchsergebnisse erfolgte die Ermittlung der Freiwerte als Regression mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate der Festigkeitswerte σ_1, σ_2 und σ_3 (Umrechnung zwischen den Koordinatensystemen mit Gl. (3.19) bis Gl. (3.21)) unter Verwendung der Ansätze 1 bis 3 nach Gl. (4.3) bis Gl. (4.5) für die Zugmeridianverläufe sowie mit Gl. (4.18) für die Beschreibung von $r(\hat{z})$. Somit ergeben sich die drei in Gl. (4.25) bis Gl. (4.27) angegebenen Ansätze zur Bestimmung der Freiwerte.

$$k(\widetilde{z},\widetilde{\varphi}) = 10{,}539 - (5{,}27 - r(\hat{z})) \cdot \left(\frac{\widetilde{\varphi}}{60\,^\circ}\right)^2 - \left(\frac{\widetilde{\varphi}}{60\,^\circ}\right)^{(3{,}8138 \cdot r(\hat{z}) - 2{,}8138)} \tag{4.24}$$

$$\widetilde{y}(\widetilde{z},\widetilde{\varphi}) = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \tan(\widetilde{\varphi}) + \frac{1}{2}\right] \cdot k(\widetilde{z},\widetilde{\varphi}) \cdot \left(a_1 \cdot (\hat{z})^{b_1}\right) \tag{4.25}$$

$$\widetilde{y}(\widetilde{z},\widetilde{\varphi}) = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \tan(\widetilde{\varphi}) + \frac{1}{2}\right] \cdot k(\widetilde{z},\widetilde{\varphi}) \cdot \left(a_2 \cdot \left(1 - (b_2)^{\hat{z}}\right)\right) \tag{4.26}$$

$$\widetilde{y}(\widetilde{z},\widetilde{\varphi}) = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \tan(\widetilde{\varphi}) + \frac{1}{2}\right] \cdot k(\widetilde{z},\widetilde{\varphi}) \cdot \left(a_3 \cdot (\hat{z})^2 + b_3 \cdot \hat{z}\right) \tag{4.27}$$

Es ist zu beachten, dass die Regression zwischen dem Datenpunkt aus dem Versuch und der theoretischen Grenzfläche für einen konstanten $\hat{z}$-Wert erfolgt, der sich aus dem Ergebnis des entsprechenden mehraxialen Versuchs ergibt. Da hierbei nicht der kürzeste Abstand zwischen dem Datenpunkt des Versuchs und der Grenzfläche betrachtet wird, tritt ein Fehler im Ergebnis der Optimierungsrechnung auf (Abbildung 4.10). Dieser Fehler wird jedoch als vernachlässigbar angesehen und muss hinsichtlich der Komplexität der Bestimmung des tatsächlich kürzesten Abstandes hingenommen werden.

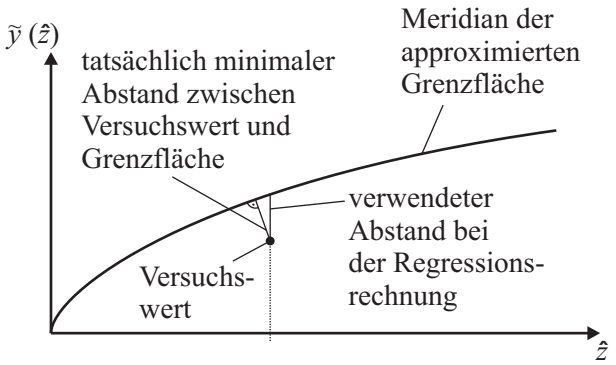


Abbildung 4.10: Fehler bei der Bestimmung des minimalen Abstandes zwischen dem Versuchswert und der theoretischen Beschreibung der Grenzfläche

Bezüglich einer ebenfalls denkbaren Optimierungsrechnung unter der Betrachtung der Abstände zwischen den theoretischen Meridianverläufen und den Versuchsdatenpunkten in der $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene lassen sich die kürzesten Abstände verhältnismäßig einfach bestimmen. Da hierbei jedoch nur zwei von drei Informationen bei der Ausgleichsrechnung berücksichtigt werden, ist zu erwarten, dass der auftretende Fehler deutlich größer ausfällt und vermutlich nicht mehr vernachlässigbar ist.

Für die Kalibrierung des Modells zur Bestimmung der Grenzfläche der maximalen Festigkeitswerte werden zum einen die Einzelwerte aller verwertbaren Versuche und zum anderen nur die Einzelwerte der Versuche, bei denen gleichzeitig Spannungs-Dehnungs-Linien gemessen wurden, berücksichtigt. Zur Ermittlung der Freiwerte weiterer Festigkeitsgrenzflächen von charakteristischen Punkten im Materialverhalten werden dagegen nur die Einzelwerte der Versuche mit gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien sowie die Werte aus den gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien betrachtet.

4.3.2 Grenzfläche der maximalen Festigkeit

In Tabelle 4.2 sind die Werte der Freiwerte der Grenzfläche für die Beschreibung der maximalen Festigkeitswerte aufgeführt. Es zeigt sich, dass bei den drei Ansätzen der Zugmeridianverläufe bei

gleicher Wichtung aller Spannungsverhältnisse im Bereich kleiner $\hat{z}$-Werte nahezu keine Krümmung auftritt. Weiter ist die Gestalt der Grenzfläche in der Deviatorebene, unabhängig vom gewählten Ansatz des Zugmeridianverlaufs, bei sehr kleinen $\hat{z}$-Werten nicht mehr konvex und es findet mit zunehmendem $\hat{z}$ ein Übergang zu einer runden Form statt.

Tabelle 4.2: Freiwerte zur Kalibrierung des aufgestellten Kriteriums für die Grenzfläche der maximalen Festigkeit σ_{ult}

	Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
Daten	alle	Sp-D-L	alle	Sp-D-L	alle	Sp-D-L
a_i	0,0633	0,0633	0,750	0,5422	-0,0029	-0,0040
b_i	0,9836	0,9644	0,9149	0,8821	0,0667	0,0680
$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert$	0,0664	0,0661	0,0664	0,0661	0,0664	0,0661
r_1 (Gl. (4.18))	12,58	10,97	11,61	10,41	11,56	10,41
r_2 (Gl. (4.18))	0,899	0,655	0,815	0,623	0,811	0,626

Abbildung 4.11 zeigt die rechnerischen Verläufe der 0 °-, 15 °-, 30 °-, 45 °- und 60 °-Meridiane sowie die Festigkeitswerte der Einzelversuche der untersuchten Spannungsverhältnisse. Die Versuchsdatenpunkte können mit allen drei Ansätzen gut abgebildet werden. Die größten Abweichungen zwischen den Meridianen und den Versuchswerten treten dabei im Bereich kleiner $\hat{z}$-Werte auf, also bei Spannungsverhältnissen mit großen Zugspannungskomponenten. Dies bedeutet jedoch nicht zwingend, dass sich in diesem Bereich auch die größten Abweichungen zwischen den Festigkeitswerten aus Versuch und Modell ergeben, worauf in Abschnitt 4.4.3 genauer eingegangen wird.

Eine eindeutige Aussage zur Abweichung zwischen den Versuchswerten und den durch die aufgestellte Grenzfläche approximierten Festigkeitswerten lässt sich nur unter Berücksichtigung aller drei Komponenten der Beanspruchung ableiten. Hierfür müssen aus den auf die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene projizierten Werten die Werte des Bezugssystems xyz berechnet werden.

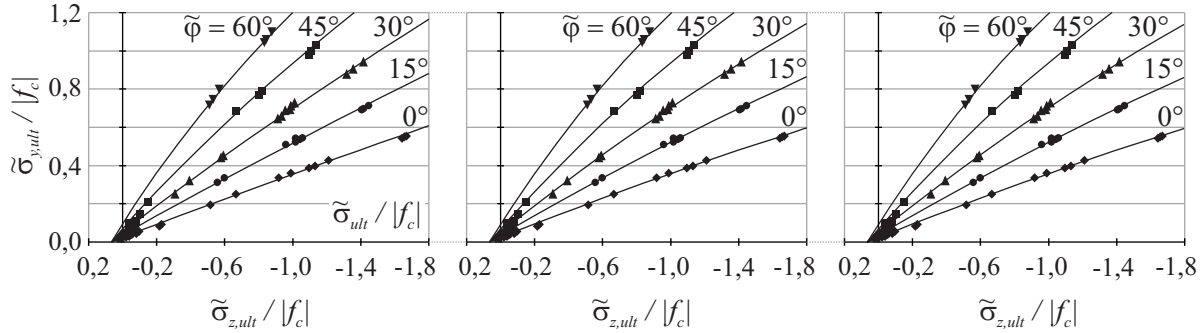
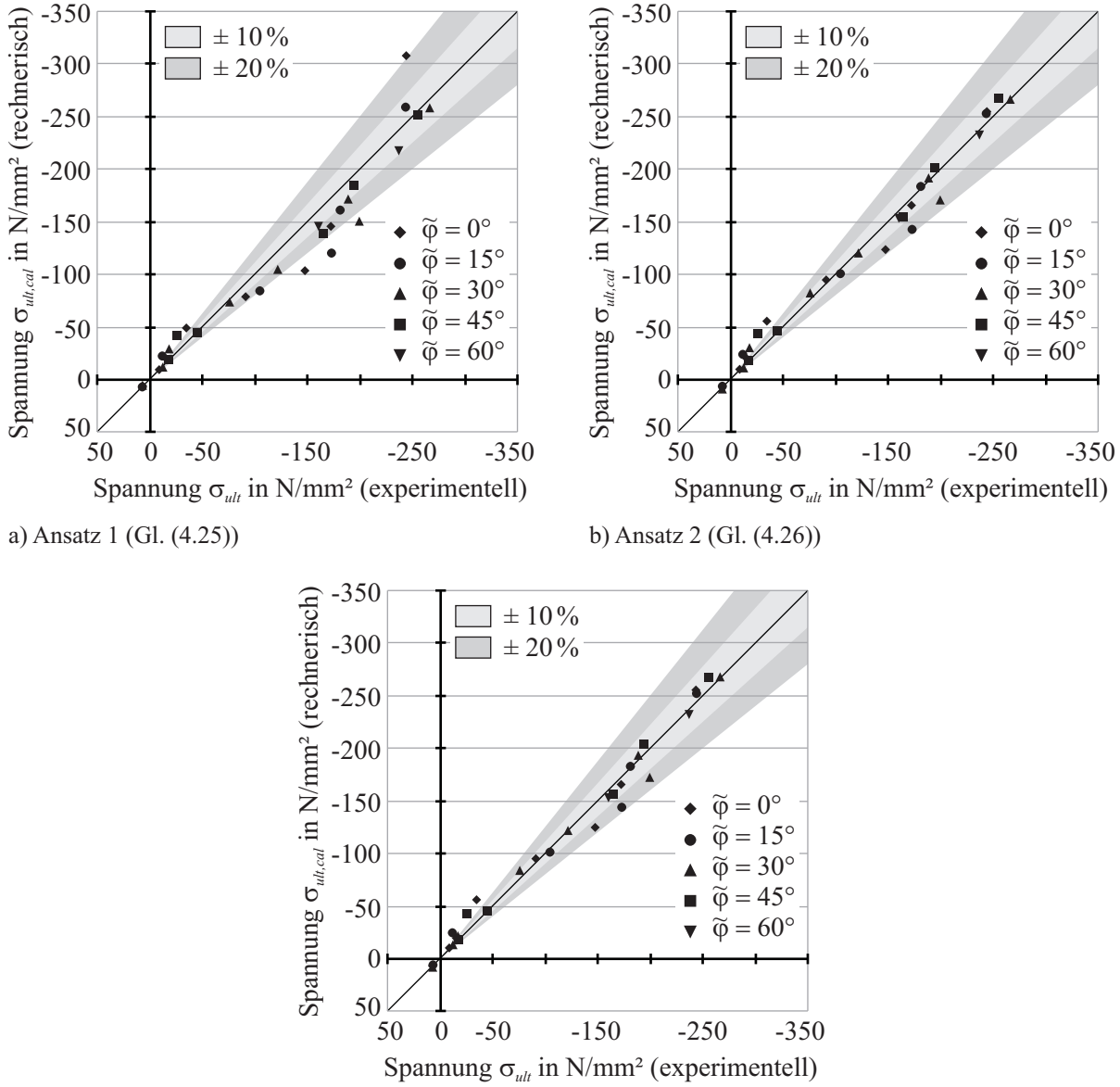


Abbildung 4.11: Meridianverläufe des Modells und Versuchswerte der maximalen Festigkeiten (Mittelwerte der Versuche mit gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien)

In Abbildung 4.12 sind die maximalen Festigkeitswerte, die für die untersuchten Spannungsverhältnisse mit den Ansätzen 1 bis 3 berechnet werden (Tabelle 4.2, Sp-D-L), über die Versuchswerte aufgetragen. Es bestätigt sich, dass alle drei Ansätze die Versuchswerte gut abbilden, wobei im Bereich zwischen $-100\,\mathrm{N/mm^2}$ bis $-250\,\mathrm{N/mm^2}$ tendenziell eine Unterschätzung und in den anderen Bereichen eine Überschätzung der Festigkeiten erfolgt. Die Ansätze 2 und 3 liefern dabei nahezu gleiche Ergebnisse und liegen prinzipiell dichter an den Versuchswerten als Ansatz 1.

Aufgrund des begrenzten experimentell untersuchten Bereichs lassen sich keine Rückschlüsse zur Gestalt der Grenzfläche für beliebige Spannungsverhältnisse ableiten. Beispielsweise haben die un-

terschiedlichen Zugmeridianverläufe der Ansätze 1 bis 3 mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil einen grundlegend größeren Einfluss auf die Gestalt der Grenzfläche als die Genauigkeit im untersuchten Bereich.



a) Ansatz 1 (Gl. (4.25))

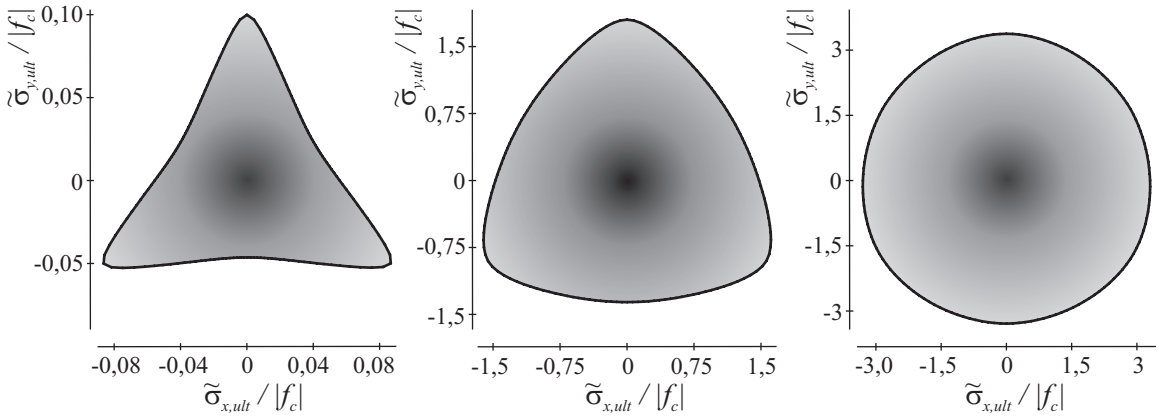
b) Ansatz 2 (Gl. (4.26))

c) Ansatz 3 (Gl. (4.27))

Abbildung 4.12: Vergleich der maximalen Festigkeitswerte aus den Versuchen und dem Grenzkriterium

Wie bereits beschrieben, weisen die Grenzflächen für alle drei Ansätze prinzipiell die gleichen Formen in den Deviatorkurven bei gleich großen $\hat{z}$-Werten auf. Beispielhaft sind in Abbildung 4.13 für den Ansatz 1 nach Gl. (4.25) die Formen der Deviatorkurven an ausgewählten $\hat{z}$-Werten dargestellt.

Wie in Abbildung 4.3 ersichtlich, schließt sich die Grenzfläche nach Ansatz 3 (Gl. (4.27)) mit größer werdendem $\hat{z}$. Die sich damit aus der Kalibrierung ergebende Grenzfläche der maximalen Festigkeit ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Das Zusammentreffen der Meridiane unter einer hydrostatischen Druckbeanspruchung liegt nach diesem Ansatz für die Einzel- bzw. Mittelwerte bei $\hat{z} \approx 23$ bzw. bei $\hat{z} \approx 13$ für die Auswertung mit allen Versuchswerten und bei $\hat{z} \approx 17$ bzw. bei $\hat{z} \approx 10$ bei der Berücksichtigung der Versuche mit gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass sich diese Werte lediglich infolge der mathematischen Beschreibung er-



a) $\widetilde{\sigma}_{z,ult} / |f_c| = 0$ b) $\widetilde{\sigma}_{z,ult} / |f_c| = -2$ c) $\widetilde{\sigma}_{z,ult} / |f_c| = -5$

Abbildung 4.13: Gestalt der Grenzfläche der maximalen Festigkeit in der Deviatorebene nach Ansatz 1 (Gl. (4.25))

geben und nicht die Realität widerspiegeln, da es vermutlich zu einem frühzeitigen Schließen der Grenzfläche kommt.

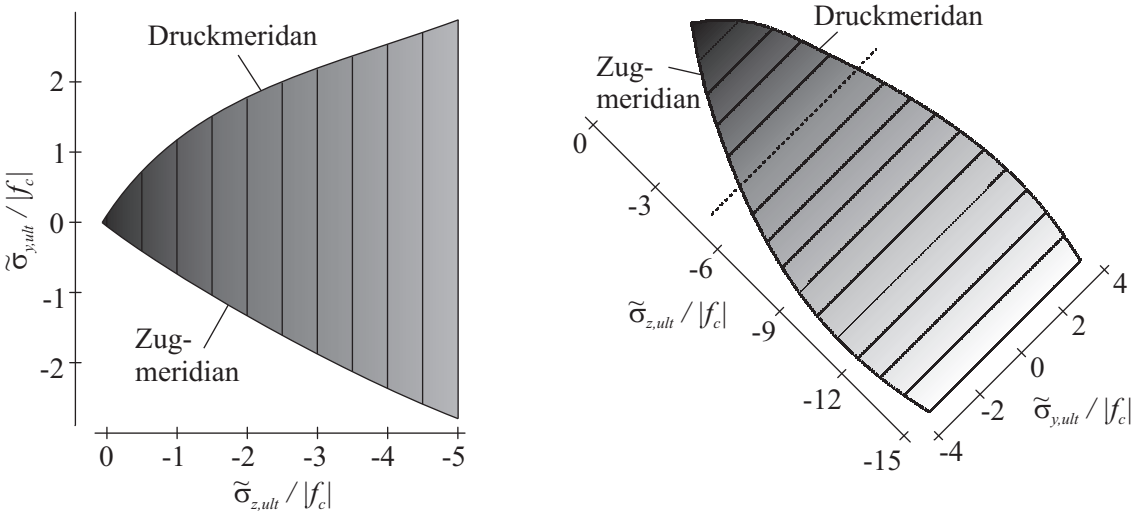


Abbildung 4.14: Sich unter hydrostatischer Druckbeanspruchung schließende Grenzfläche der maximalen Festigkeit nach Ansatz 3 (Gl. (4.27)) in der $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene

4.3.3 Grenzfläche der Elastizitätsgrenze, der Affinitätsgrenze und des Volumenminimums der Probekörper

Für die Ermittlung der Grenzflächen an der Elastizitätsgrenze, der Affinitätsgrenze und des Volumenminimums der Probekörper müssen die Kalibrierungswerte derart festgelegt werden, dass die Grenzfläche der maximalen Festigkeit an keiner Stelle überschritten wird. Hierfür ist es notwendig, die Freiwerte dieser Grenzflächen entsprechend der Werte der Beschreibung der maximalen Festigkeit zu begrenzen, auch wenn infolgedessen nicht die bestmögliche Approximation erzielt wird. Für f_{ttt}, r_1, a_i und b_i ergeben sich somit obere Grenzen, wogegen r_2 eine untere Grenze besitzt. In Tabelle 4.3 sind die ermittelten Freiwerte für die drei untersuchten Ansätze der Grenzfläche angegeben, wobei diese zum einen für die Einzelwerte der Versuche und zum anderen für die Werte der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien bestimmt werden.

Tabelle 4.3: Freiwerte zur Kalibrierung des aufgestellten Kriteriums für die Grenzflächen

Grenzfläche	Freiwert	Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
		EW	Sp-D-L	EW	Sp-D-L	EW	Sp-D-L
Elastizitätsgrenze (σ_{el})	a_i	0,0581	0,0573	0,4912	0,4852	-0,00396	-0,00396
	b_i	0,9644	0,9644	0,8821	0,8821	0,0618	0,0611
	$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert$	0,0661	0,0661	0,0661	0,0661	0,0661	0,0661
	r_1 *)	9,23	8,83	9,11	8,73	9,06	8,68
	r_2 *)	0,655	0,655	0,623	0,623	0,626	0,626
Affinitätsgrenze (σ_{aff})	a_i	0,0590	0,0571	0,5014	0,4820	-0,00396	-0,00396
	b_i	0,9644	0,9644	0,8821	0,8821	0,0632	0,0606
	$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert$	0,0661	0,0661	0,0661	0,0661	0,0661	0,0661
	r_1 *)	8,62	8,40	8,41	8,38	8,30	8,35
	r_2 *)	0,655	0,655	0,623	0,623	0,626	0,626
Volumenminimum ($\sigma_{V,min}$)	a_i	0,0633	0,0633	0,5330	0,5422	-0,00396	-0,00396
	b_i	0,9644	0,9644	0,8798	0,882	0,0680	0,0680
	$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert$	0,0661	0,0661	0,0661	0,0661	0,0661	0,0661
	r_1 *)	10,68	10,633	10,14	10,12	10,18	10,11
	r_2 *)	0,670	0,659	0,653	0,653	0,655	0,647

*) (Gl. (4.18))

Alle Grenzflächen weisen die Gemeinsamkeit auf, dass sie unter einer hydrostatischen Zugbeanspruchung im gleichen Punkt f_{ttt} ihren Ursprung haben und somit alle charakteristischen Punkte des Materialverhaltens unter einer hydrostatischen Zugbeanspruchung zusammenfallen. Weiter zeigt sich beim Vergleich der ermittelten Freiwerte, dass, wie schon in Abschnitt 3.6.4 erwähnt, die Grenzfläche des Volumenminimums nur in einem geringen Maß von der Grenzfläche der maximalen Festigkeit abweicht. Gleiches gilt ebenfalls für die Grenzfläche der Affinitäts- und der Elastizitätsgrenze, wobei die Elastizitätsgrenze zum Teil außerhalb der Affinitätsgrenze liegt. Da die Ermittlung der Spannungswerte der Elastizitätsgrenze gegenüber den Spannungswerten der Affinitätsgrenze als verlässlicher angesehen wird, wird auf eine Beschränkung des Verlaufs der Elastizitätsgrenze innerhalb der Affinitätsgrenze verzichtet.

Die Freiwerte r_2 und b_i weisen für die Elastizitätsgrenze und die maximale Festigkeit gleich große Werte auf, infolge derer die beiden Grenzflächen mit zunehmenden $\hat{z}$ ein von $\widetilde{\varphi}$ unabhängiges konstantes Verhältnis zueinander haben. Daraus ergibt sich, dass das Verhältnis der beiden Spannungen σ_{el}/σ_{ult} in Richtung zunehmender $\hat{z}$-Werte abnehmen muss. Dies resultiert aus der Geraden (Belastungspfad), auf der die beiden Spannungswerte eines betrachteten Spannungsverhältnisses liegen müssen und die beide Grenzflächen schneidet. Mit abnehmendem Anstieg dieser Geraden in der $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene vergrößert sich der Abstand der Schnittpunkte zwischen den beiden Grenzflächen und somit auch die Differenz der Spannungswerte.

Ausgenommen hiervon ist Ansatz 3 (Gl. (4.27)), bei dem diese Charakteristik nur bis zum Maximum des $\widetilde{y}$-Wertes der Meridiane gilt, da sich anschließend das Vorzeichen der Krümmung ändert und sich hierdurch der Abstand der zwei Schnittpunkte wieder verringern kann. Eine ausführliche Diskussion der Auswirkungen des Anstiegs der Geraden (Belastungspfad) eines Spannungsverhältnisses hinsichtlich der Abweichung zwischen zwei Punkten auf dieser Geraden (z. B. rechnerischer und experimenteller Spannungswert) wird in Abschnitt 4.4.3 geführt.

Eine Gegenüberstellung der Grenzflächen der Elastizitätsgrenze und der maximalen Festigkeit zeigt Abbildung 4.15. Im Bereich der vorhandenen Versuchswerte der Elastizitätsgrenze bis ca. $\widetilde{\sigma}_{z,el}/|f_c| = 1{,}0$ stellt sich noch kein konstantes Verhältnis zwischen den beiden Grenzflächen ein. Grundsätzlich ist jedoch eine Übereinstimmung mit Abbildung 3.47 für den untersuchten Bereich vorhanden.

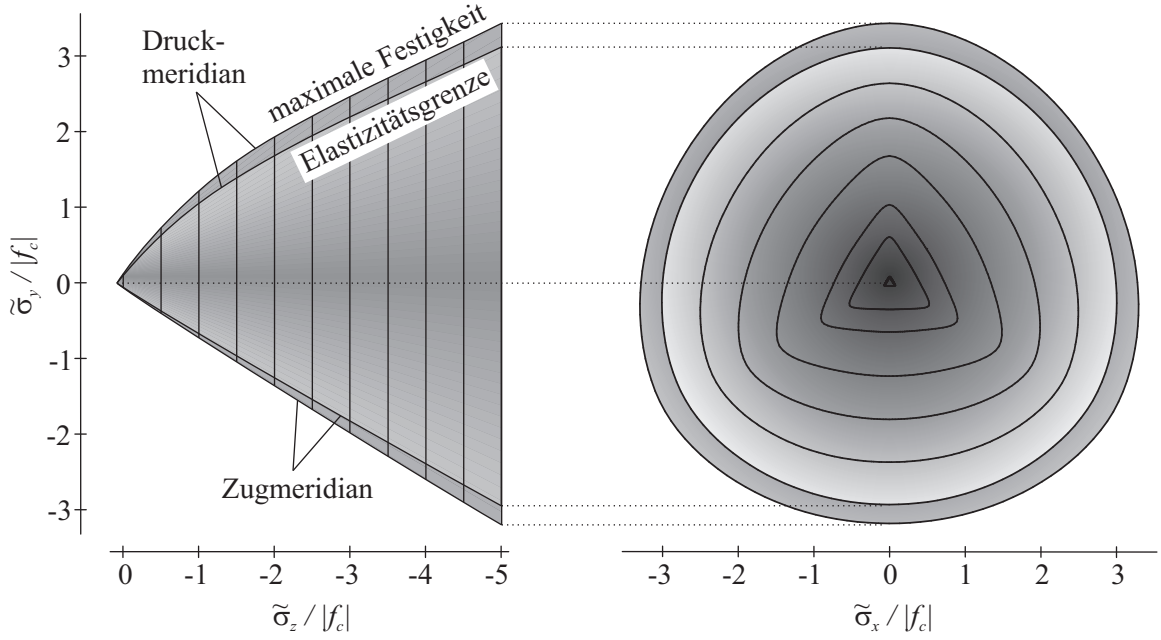


Abbildung 4.15: Gegenüberstellung der Grenzflächen der Elastizitätsgrenze und der maximalen Festigkeit nach Ansatz 1 (Gl. (4.25))

Für die drei untersuchten Ansätze sind die Meridianverläufe der Elastizitätsgrenzfläche sowie die Spannungswerte der Einzelversuche in Abbildung 4.16 dargestellt. Wie schon bei der maximalen Festigkeit können die Versuchsergebnisse mit allen drei Ansätzen gut abgebildet werden, wobei tendenziell für Versuchswerte mit großen Zugspannungskomponenten größere Abweichungen auftreten.

Für den Ansatz 3 ergibt sich ein Schließen der Grenzfläche unter hydrostatischer Druckbeanspruchung bei $\hat{z} \approx 15{,}5$ bzw. bei $\hat{z} \approx 9$ für die Auswertung der Einzelversuche bzw. der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien, was den entsprechenden Werten der maximalen Festigkeit unter hydrostatischer Druckbeanspruchung sehr nahe kommt. Wie schon bei der maximalen Festigkeit resultieren diese Werte aus der gewählten mathematischen Beschreibung und es kann nicht erwartet werden, dass diese den realen Spannungswerten entsprechen.

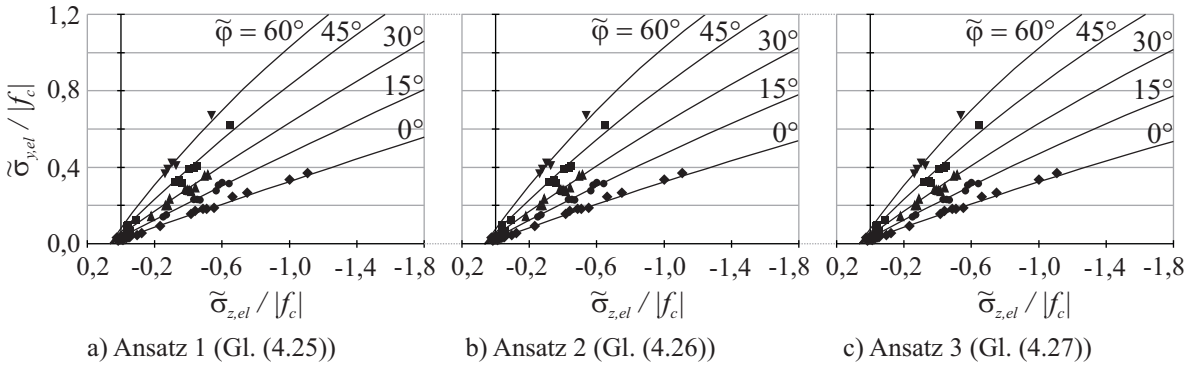


Abbildung 4.16: Meridianverläufe des Modells und Versuchswerte der Elastizitätsgrenze (Werte der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien)

4.4 Grenzfläche der maximalen Festigkeit in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit

4.4.1 Allgemeines

Die Aufstellung von Grenzflächen zur Beschreibung charakteristischer Festigkeiten bei mehraxialen Beanspruchungen von Beton erfolgt im Allgemeinen unter Verwendung von Ergebnissen mehraxialer Belastungsversuche. So können z. B. die Versagenskriterien nach Ottosen [91] oder Willam & Warnke [127] durch eine Regressionsrechnung oder durch vier bzw. fünf Versuchswerte unterschiedlicher Spannungsverhältnisse für einen Beton kalibriert werden. Diese Punkte liegen vornehmlich auf dem Zug- und auf dem Druckmeridian und es werden neben den Festigkeiten infolge einer einaxialen Zug- und Druckbeanspruchung entsprechend weitere experimentelle Daten aus mehraxialen Belastungsversuchen benötigt. Hierbei werden die verwendeten Versuchswerte von dem Kriterien genau abgebildet und bestimmen die Form der Grenzfläche.

Da jedoch nicht immer ausreichend Versuchswerte für die Kalibrierung eines Versagenskriteriums verfügbar sind, gibt es die Bestrebung, die Anzahl der benötigten Versuchswerte zu reduzieren. So führen beispielsweise Dahl [19] und Hampel [36] konstante Verhältnisse zwischen Festigkeitswerten für ausgewählte Spannungsverhältnisse ein, die zur Kalibrierung eines Kriteriums benötigt werden und realisieren damit eine Verringerung der Anzahl der Unbekannten. Werden derartige Bemühungen konsequent zu einem Ende geführt, ist das Ergebnis eine Kalibrierung der Grenzflächen idealerweise in Abhängigkeit von nur einer Größe. Für Beton könnte diese Größe vorzugsweise der einaxialen Druckfestigkeit entsprechen.

Bei der Realisierung der Kalibrierung von Grenzflächen mittels der einaxialen Druckfestigkeit besteht jedoch nicht die Möglichkeit, verschiedene Eigenschaften des heterogenen Betons, wie z. B. unterschiedliche einaxiale Zugfestigkeiten bei gleicher Druckfestigkeit, abzubilden. Um derartige Phänomene zu berücksichtigen, könnte die Kalibrierung der Grenzflächen an komplexeren Größen erfolgen, wie möglicherweise an der verrichteten Arbeit eines Probekörpers während eines einaxialen Druckversuchs. Die Kalibrierung der Grenzflächen anhand nur eines unabhängigen Parameters setzt voraus, dass die Freiwerte des allgemein aufgestellten Kriteriums in Abhängigkeit dieses Parameters ermittelt werden und dafür eine Vielzahl von Versuchsergebnissen vorhanden ist.

4.4.2 Kalibrierung der Grenzfläche in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit

Zur Bestimmung der Freiwerte der Grenzfläche der maximalen Festigkeit in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit werden in der Literatur verfügbare experimentelle Daten mehraxialer Belastungsversuche aller Betonfestigkeiten in einer Datenbank zusammengestellt. Berücksichtigung finden dabei nur Versuche, die an Würfeln, Scheiben oder Vollzylindern durchgeführt wurden. Anschließend erfolgt eine Einteilung der Daten in Klassen unterschiedlicher einaxialer Druckfestigkeiten f_c, wobei die erste Klasse den Bereich bis $20\,\mathrm{N/mm^2}$ umfasst. Für alle weiteren Klassen wird eine Breite von $10\,\mathrm{N/mm^2}$ festgelegt. Die verwendeten Versuchsdaten aller Festigkeitsklassen sind im Anhang B aufgeführt.

Bei der Betrachtung der zusammengestellten Versuchsdaten der einzelnen Klassen werden zum Teil Widersprüche für die Festigkeitswerte erkennbar (Abbildung 4.17). Diese zeigen sich darin, dass sich die einzelnen Meridiane der Grenzfläche in der auf die $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Ebene projizierten Darstellung schneiden müssten, wenn die Festigkeitswerte unter den zugehörigen Spannungsverhältnissen erreicht werden sollen, was in der Realität nicht auftreten kann. Zum einen können die Widersprüche aus unterschiedlichen Betonzusammensetzungen resultieren und somit das tatsächliche Festigkeitsverhalten

zeigen. Zum anderen ist es möglich, dass infolge der verwendeten unterschiedlichen Versuchstechnik und der verschiedenen Probekörperformen die genannten Unstimmigkeiten auftreten. Trifft die unterschiedliche Betonzusammensetzung als Ursache zu, ist es wie bereits erwähnt nicht zielführend die Grenzflächen in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit zu beschreiben. Daher muss unterstellt werden, dass die Widersprüche auf die unterschiedlichen Prüfkörper bzw. verwendete Versuchstechnik zurückgehen.

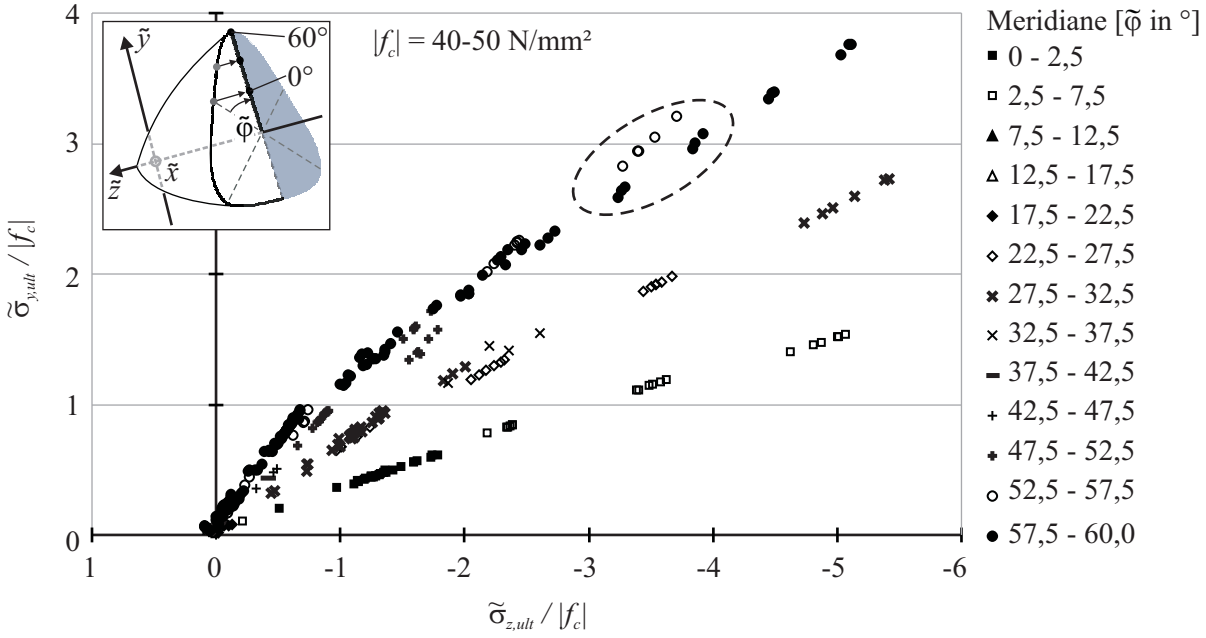


Abbildung 4.17: Widersprüchliche Festigkeitswerte bei mehraxialen Belastungsversuchen der Betonfestigkeitsklasse $|f_c| = 40 - 50\,\mathrm{N/mm^2}$

Werden für die einzelnen Festigkeitsklassen jeweils die Grenzflächen kalibriert, ergeben sich für die Ansätze 1 bis 3 nach Gl. (4.25) bis Gl. (4.27) die in Abbildung 4.18 für $r_4 = 1$ (Gl. (4.18)) und Abbildung 4.19 für $r_4 \geq 1$ (Gl. (4.20)) dargestellten Freiwerte. Zur Bestimmung der Freiwerte wird eine Regression mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate der Differenz der in den Versuchen gemessenen und rechnerisch ermittelten Spannungen σ_1, σ_2 und σ_3 durchgeführt. Es ist ersichtlich, dass sich nur bedingt aussagekräftige Abhängigkeiten zwischen den ermittelten Freiwerten und der einaxialen Druckfestigkeit ergeben. Um dennoch eine Abhängigkeit zu erhalten, werden die einzelnen Freiwerte schrittweise, immer nach einer erneuten Kalibrierung des Kriteriums definiert. Dabei erfolgt die Bestimmung des Verlaufs eines Freiwertes in Abhängigkeit von der einaxialen Druckfestigkeit nach der Wahl eines geeigneten Ansatzes im Allgemeinen ebenfalls mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der 1. Kalibrierung in Abbildung 4.18 und 4.19 wird deutlich, dass bei den Ansätzen 1 und 2 der Freiwert b_i einen maßgeblichen Einfluss auf die Approximation der Versuchsdaten hat (siehe Abbildung 4.3), da dieser den Bereich der größten Krümmungsänderung der Funktionen von $\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z})$ definiert. Je nach verfügbaren Versuchsdaten wird somit der Verlauf der Meridiane für kleine bzw. große $\hat{z}$-Werte besser abgebildet, wobei die genauere Abbildung kleiner Versuchswerte einen größeren Einfluss auf den Bereich großer $\hat{z}$-Werte besitzt als umgekehrt.

Diese Problematik wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass der Einfluss der Freiwerte r_1, r_2 mit zunehmenden $\hat{z}$-Werten abnimmt und diese keine Auswirkungen auf die Form des Zugmeridians haben. Wird der Wert b_i relativ groß gewählt, ist der Zugmeridianverlauf für Ansatz 1 (Gl. (4.25)) und 2 (Gl. (4.26)) bei kleinen $\hat{z}$-Werte nahezu linear und erst im Bereich größerer $\hat{z}$-Werte kommt es zu merklichen Krümmungsänderungen. Daraus folgt, dass speziell Festigkeitsklassen, in denen

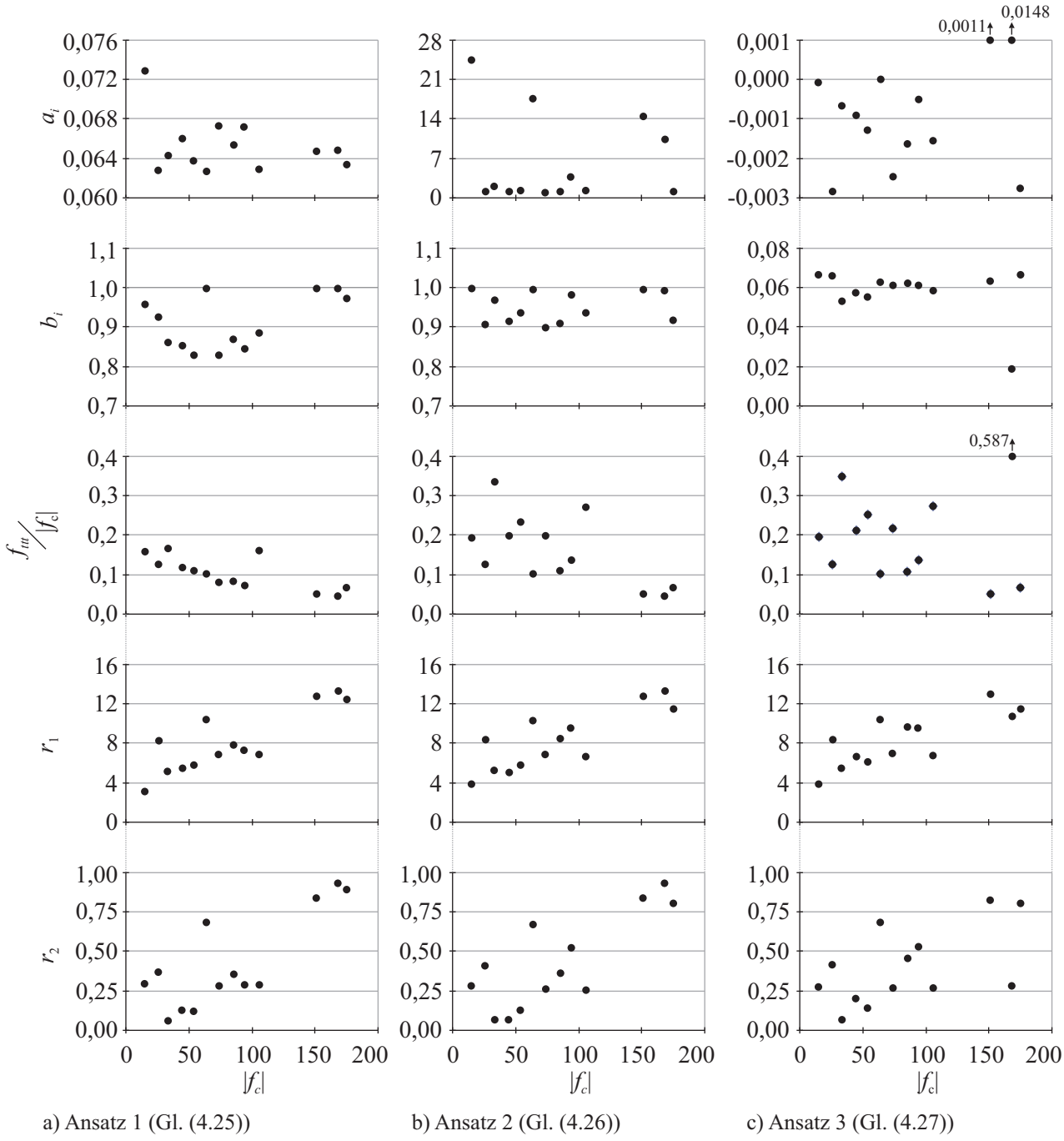


Abbildung 4.18: Freiwerte nach der 1. Kalibrierung der Grenzfläche mit Gl. (4.25), Gl. (4.26), Gl. (4.27) und $r_4 = 1$ (Gl. (4.18))

Versuchswerte mit großen $\hat{z}$-Werten auf dem Zugmeridian auftreten (Tabelle 4.4), kleinere Werte für b_i aufweisen, damit diese approximiert werden können.

Da bei der Ermittlung der Bestimmungsgleichungen der Freiwerte in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit derartige Einflüsse infolge der ungewichteten Betrachtungsweise der Festigkeitsklassen unberücksichtigt bleiben, wird dies insbesondere bei der Festlegung von b_i subjektiv mit einbezogen. Das bedeutet, dass beispielsweise die Festigkeitsklassen mit einaxialen Druckfestigkeiten $\geq 150\,\mathrm{N/mm^2}$ keinen Einfluss auf die Ermittlung der Bestimmungsgleichung für b_i besitzen. Die gleichen Überlegungen und Vorgehensweise gelten ebenfalls für den Ansatz 3 (Gl. (4.27)), beziehen sich jedoch auf den Freiwert a_i.

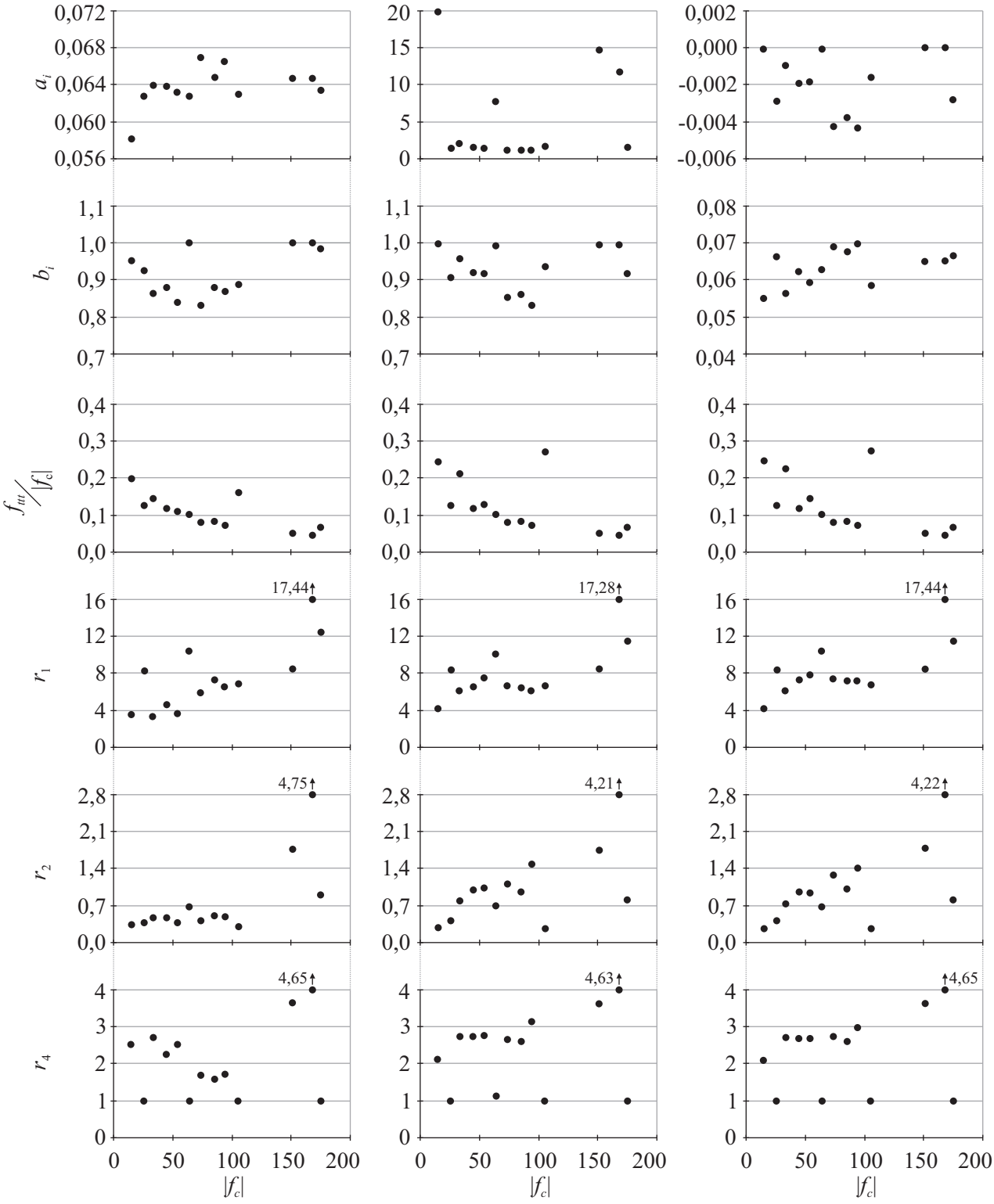


Abbildung 4.19: Freiwerte nach der 1. Kalibrierung der Grenzfläche mit Gl. (4.25), Gl. (4.26), Gl. (4.27) und $r_4 \geq 1$ (Gl. (4.20))

Die sich aus der Kalibrierung der Grenzflächen für die maximale Festigkeit ergebenden Bestimmungsgleichungen der Freiwerte in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit sind in Tabelle 4.5 für $r_4 = 1$ (Gl. (4.18)) und in Tabelle 4.6 für $r_4 \geq 1$ (Gl. (4.20)) zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Oberer Grenzwert von $\hat{z}$ der Versuchsdaten der einzelnen Betonfestigkeitsklassen und Freiwerte b_1, b_2 und a_3 der Ansätze 1 bis 3 nach Gl. (4.25) bis Gl. (4.27) mit $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$)

Festigkeitsklasse $\left[\mathrm{N/mm^2}\right]$	≤ 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 70	70 - 80
Druckmeridian	45	3	14	10	9	6	6
Zugmeridian	1	4	14	5	9	2	4
b_1	0,953	0,926	0,864	0,880	0,839	0,999	0,832
b_2	0,997	0,907	0,958	0,920	0,917	0,991	0,852
a_3	0,0000	-0,0028	-0,0009	-0,0019	-0,0018	0,0000	-0,0042

Festigkeitsklasse $\left[\mathrm{N/mm^2}\right]$	80 - 90	90 - 100	100 - 110	150 - 160	160 - 170	170 - 180
Druckmeridian	5	6	5	1	1	1,5
Zugmeridian	4	2	1,5	1,5	1,5	1,5
b_1	0,880	0,869	0,888	0,999	0,999	0,985
b_2	0,861	0,831	0,936	0,996	0,994	0,918
a_3	-0,0037	-0,0043	-0,0015	0,0000	0,0000	-0,0038

Tabelle 4.5: Berechnung der Freiwerte in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit f_c(in $\mathrm{N/mm^2}$) mittels Gl. (4.27), Gl. (4.26) und Gl. (4.27) sowie Gl. (4.18) ($r_4 = 1$)

Freiwert	Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
a_i	$0{,}054 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}044}$	(2)	$313{,}43 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-1{,}198}$	(2)	$-0{,}00002 \cdot \lvert f_c\rvert$	(1)
b_i	$(\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}037}$	(1)	$exp\,[-0{,}0004 \cdot \lvert f_c\rvert]$	(1)	$0{,}0001 \cdot \lvert f_c\rvert + 0{,}05$	(2)
$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert$	$2{,}79 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}791}$	(3)	$0{,}026 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}491}$	(3)	$5{,}5 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}791}$	(3)
r_1	$1{,}9 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}310}$	(4)	$3{,}42 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}237}$	(4)	$1{,}69 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}36}$	(4)
r_2	$0{,}004 \cdot \lvert f_c\rvert$	(5)	$0{,}5 \cdot exp\,[-0{,}008 \cdot \lvert f_c\rvert]$	(5)	$0{,}004 \cdot \lvert f_c\rvert$	(5)

()...Kalibrierungsschritt; f_c in $\mathrm{N/mm^2}$

4.4.3 Diskussion der vorgeschlagenen mathematischen Beschreibung

Im folgenden Abschnitt werden die mit den drei Ansätzen für die Zugmeridianverläufe nach Gl. (4.25) bis Gl. (4.27) ermittelten mehraxialen maximalen Festigkeitswerte untereinander verglichen sowie ausgewählten zweiaxialen und dreiaxialen Versuchswerten gegenübergestellt. Dabei werden zum einen die Ergebnisse der Kalibrierung mit $r_4 = 1$ (Gl. (4.18)) und zum anderen die Ergebnisse der Kalibrierung mit $r_4 \geq 1$ (Gl. (4.20)) für alle drei Ansätze betrachtet. Durch den nicht proportionalen Zusammenhang zwischen den Werten im gedrehten Koordinatensystem $\widetilde{x}\widetilde{y}\widetilde{z}$ und den Werten im Bezugssystem xyz (Gl. (3.19) bis Gl. (3.21)) sowie durch die vom Spannungsverhältnis abhängigen nicht proportionalen Beziehungen zwischen der Abweichung der $\widetilde{y}$- bzw. der $\widetilde{z}$-Werten (Abbildung 4.20) ist es zwingend, die Fehlerbetrachtung im Bezugssystem xyz vorzunehmen. Nur so werden die tatsächlichen Abweichungen zwischen den Versuchswerten und der Approximation erfasst und lassen eine qualitative und quantitative Aussage zur Gestalt der Grenzfläche und zur Genauigkeit der Vorhersage zu.

Tabelle 4.6: Berechnung der Freiwerte in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit f_c(in N/mm^2) mittels Gl. (4.27), Gl. (4.26) und Gl. (4.27) sowie Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$)

Freiwert	Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))	
a_i	$0{,}057 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}031}$	(2)	$38{,}18 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}911}$	(2)
b_i	$(\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}034}$	(1)	$exp\,[-0{,}0011 \cdot \lvert f_c\rvert]$	(1)
$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert$	$1{,}35 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}633}$	(3)	$0{,}612 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}255}$	(3)
r_1	$0{,}8 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}467}$	(5)	$2{,}24 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}231}$	(5)
r_2	$0{,}28 \cdot exp\,[0{,}006 \cdot \lvert f_c\rvert]$	(6)	$0{,}0008 \cdot \lvert f_c\rvert + 0{,}43$	(6)
r_4	$14{,}93 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}7} + 1$	(4)	$23{,}24 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}742} + 1$	(4)

Freiwert	Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
a_i	$-0{,}00004 \cdot \lvert f_c\rvert - 0{,}0005$	(1)
b_i	$0{,}055 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}044}$	(2)
$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert$	$0{,}31 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}211}$	(3)
r_1	$1{,}54 \cdot \lvert f_c\rvert^{0{,}30}$	(5)
r_2	$89{,}59 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-1{,}193}$	(6)
r_4	$29{,}89 \cdot (\lvert f_c\rvert + 1)^{-0{,}752} + 1$	(4)

()...Kalibrierungsschritt; f_c in N/mm^2

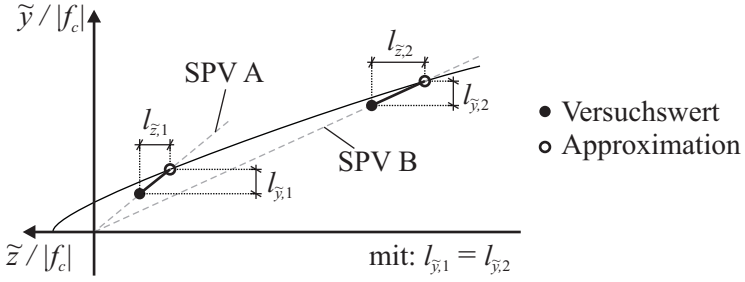


Abbildung 4.20: Einfluss des Spannungsverhältnisses auf die Abweichung zwischen Modell und Versuchswert bei Betrachtung der $\widetilde{y}\widetilde{z}$-Projektion

In Abbildung 4.21 sind die berechneten zweiaxialen Festigkeitswerte unterschiedlicher Betonfestigkeitsklassen den Versuchswerten gegenübergestellt. Unter der Verwendung von Gl. (4.18) ($r_4 = 1$) liefert lediglich Ansatz 1 nach Gl. (4.25) für alle drei Festigkeitsklassen eine gute Approximation. Aufgrund der Kalibrierung anhand aller verfügbaren Versuchswerte der zusammengestellten Datenbank werden dabei jedoch sowohl die einaxiale Druckfestigkeit als auch die einaxiale Zugfestigkeit nicht genau abgebildet.

Prinzipiell lässt sich für die zweiaxialen Festigkeiten der unterschiedlichen Betonfestigkeitsklassen kein Zusammenhang zwischen der Größe der einaxialen Druckfestigkeit und dem Über- bzw. Unterschätzen der Festigkeitswerte einzelner Teilbereiche des Grenzkriteriums feststellen. Für alle Festigkeitsklassen gilt jedoch, dass die Druck-Zug-Festigkeiten hinsichtlich der verfügbaren Versuchsdaten überschätzt werden, wobei eine kritische Beurteilung und Bewertung der Versuchsdurchführung der zugrunde liegenden Versuchsdaten berücksichtigt werden sollte (vgl. Abschnitt 3.4.2).

Wird die Flexibilität der Gestalt der Grenzfläche durch die Verwendung von Gl. (4.20) mit $r_4 \geq 1$ erhöht, verbessert sich die Approximation der zweiaxialen Festigkeitswerte. Speziell für die Ansätze 2 und 3 nach Gl. (4.26) und Gl. (4.27) ergeben sich signifikante Verbesserungen, die jedoch nicht dazu führen, dass die Vorhersagequalität des Ansatzes 1 nach Gl. (4.25) übertroffen wird.

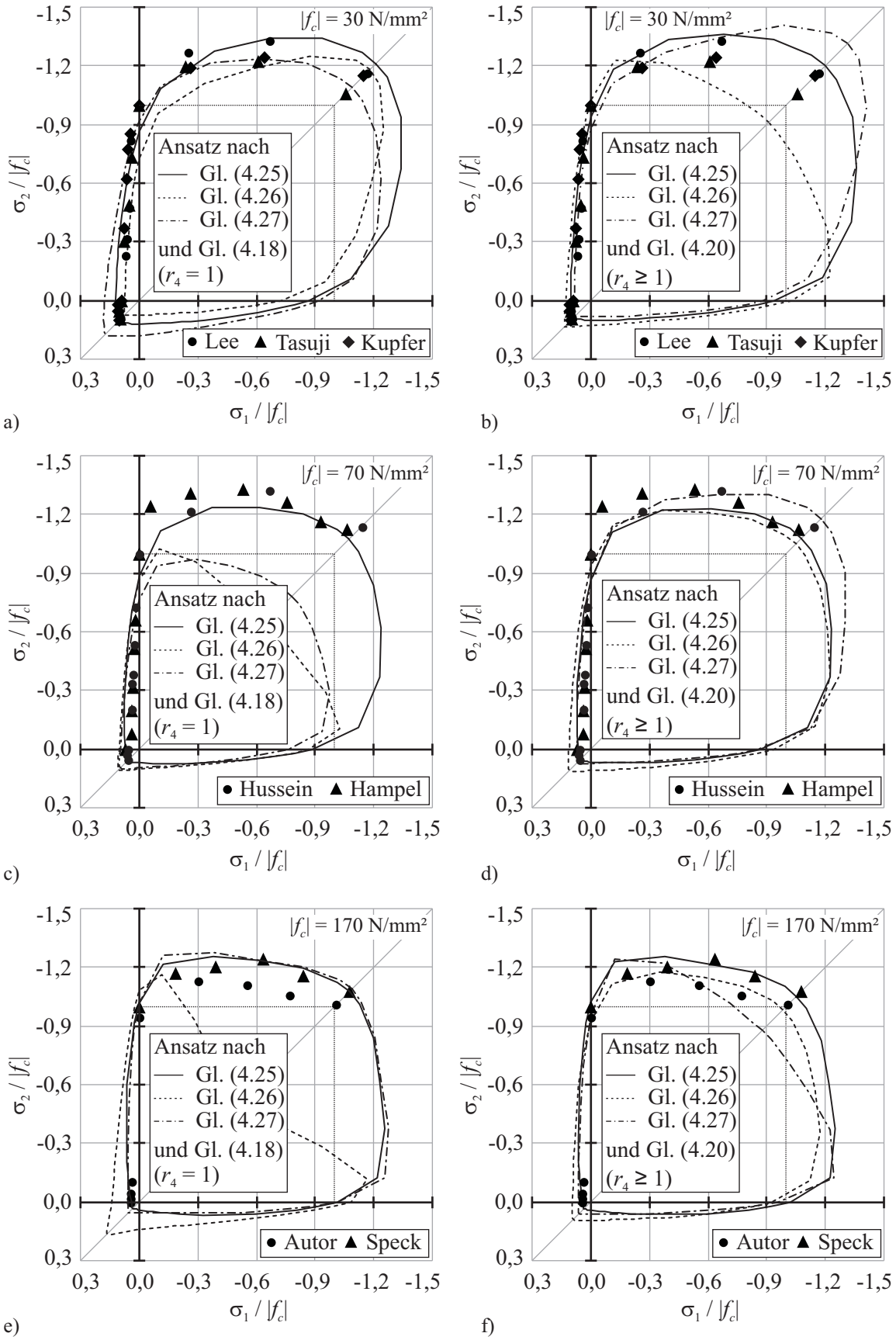


Abbildung 4.21: Vergleich von zweiaxialen Festigkeitswerten unterschiedlicher Betonfestigkeitsklassen nach Kalibrierung der Grenzfläche (Versuchswerte entnommen aus Kupfer [57], Lee [65], Tasuji [119], Hampel [36], Hussein [44] und Speck [118])

Am Beispiel von Ansatz 1 nach Gl. (4.25) mit $r_4 \geq 1$ wird näher auf die bereits erwähnte nicht vorhandene Systematik zwischen der Größe der einaxialen Druckfestigkeit und dem Über- bzw. Unterschätzen der Festigkeitswerte in den einzelnen Teilbereichen der Grenzfläche eingegangen. In Abbildung 4.22 ist ersichtlich, dass z. B. die einaxiale Druckfestigkeit für die Betonfestigkeit $|f_c| = 25\,\mathrm{N/mm^2}$ und $|f_c| = 180\,\mathrm{N/mm^2}$ besser abgebildet wird als für $|f_c| = 70\,\mathrm{N/mm^2}$.

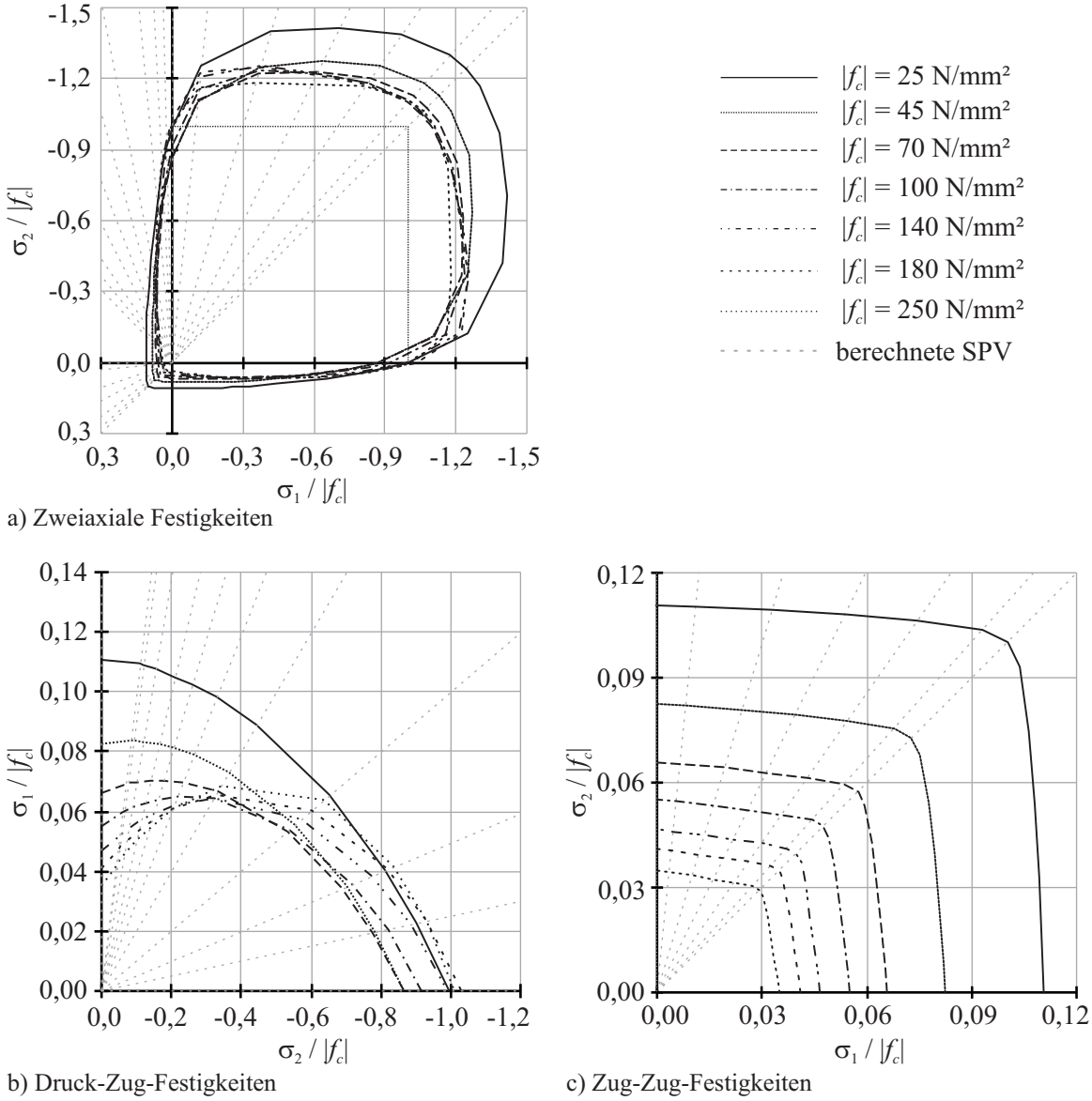


Abbildung 4.22: Approximation der zweiaxialen Festigkeitswerte mit Ansatz 1 nach Gl. (4.25) und $r_4 \geq 1$ von unterschiedlichen Betonfestigkeitsklassen

Weiterhin kommt es infolge des nicht proportionalen Einflusses der Festigkeitsklasse auf die Gestalt der Grenzfläche im Bereich der Druck-Zug-Festigkeit zu einer Verschiebung des zur maximal erreichbaren Zugfestigkeit gehörenden Spannungsverhältnisses hinsichtlich der einaxialen Druckfestigkeit. Während bei Betonen mit geringer Festigkeit die maximale Zugfestigkeit bei der einaxialen Zugbeanspruchung auftritt, wird diese bei Betonen mit einer einaxialen Druckfestigkeit von $|f_c| = 250\,\mathrm{N/mm^2}$ bei einem Spannungsverhältnis von $\alpha_1/\alpha_2 = 1/-0{,}4$ maximal und soll dem nahezu zweifachen Wert der einaxialen Zugfestigkeit entsprechen (siehe Abbildung 4.22b). Wie in Abbildung 4.21 für die Betonfestigkeit $|f_c| = 70\,\mathrm{N/mm^2}$ gezeigt, stellt die Grenzfläche in diesem Bereich die Versuchswerte nur ungenügend dar und führt zu großen Abweichungen.

Lediglich bei einer zweiaxialen Zugbeanspruchung ergeben sich für alle Festigkeitsklassen gleiche Charakteristika. Es werden für alle zweiaxialen Zugbeanspruchungen kleinere Festigkeiten im Vergleich zur einaxialen Zugfestigkeit vom Modell vorhergesagt, was in Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen von Kulik [56] steht.

Die zweiaxialen Spannungsverhältnisse bilden bei der Betrachtung von mehraxialen Beanspruchungen lediglich eine kleine Gruppe von Sonderfällen auf deren Grundlage eine Beurteilung der Approximation aller Versuchswerte nur bedingt möglich ist. Für eine allgemeinere Aussage zur Bewertung der Genauigkeit des Modells für beliebige Spannungsverhältnisse werden je Betonfestigkeitsklasse zwischen neun und elf mehraxiale Spannungsverhältnisse aus Anhang B und den eigenen Versuchen zufällig ausgewählt und die Differenzen zwischen den rechnerischen und den experimentellen Werten ermittelt. Für die insgesamt 122 Wertepaare werden die Häufigkeitsverteilungen der prozentualen Abweichungen zwischen den beiden Festigkeiten bestimmt und sind in Abbildung 4.23 für $r_4 = 1$ und $r_4 \geq 1$ dargestellt. Alle hierfür betrachteten experimentellen und rechnerischen Daten sind in Anhang C zusammengefasst.

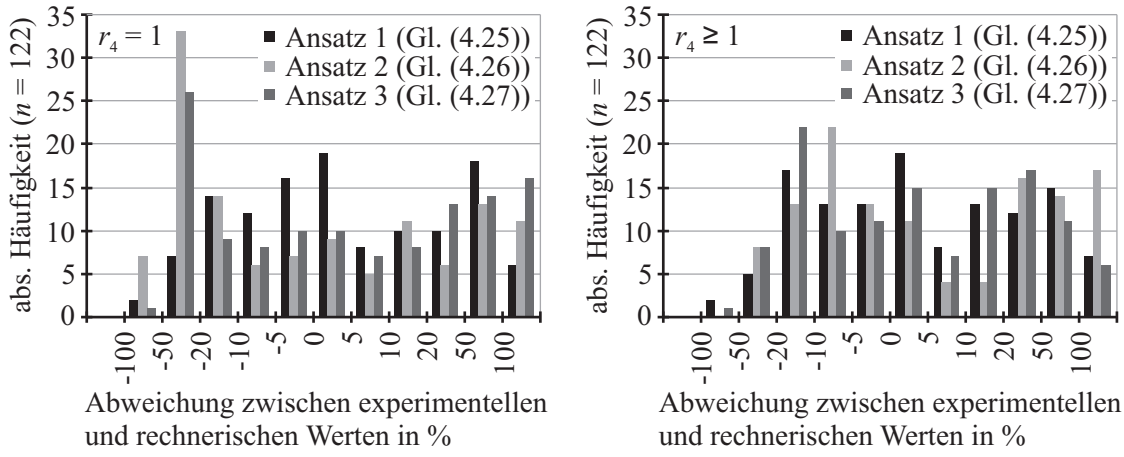


Abbildung 4.23: Häufigkeitsverteilungen der prozentualen Abweichungen zwischen experimentellen und rechnerischen Werten

Die Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 4.23 zeigen, dass sich aus den stichprobenartig überprüften Spannungsverhältnissen keine Systematik hinsichtlich der Qualität der Vorhersagegenauigkeit sowohl bei den drei Ansätzen untereinander als auch bezüglich der Einführung des Freiwertes r_4 ableiten lässt. Durchschnittlich ist für alle Ansätze eine leichte Überschätzung der mehraxialen Festigkeitswerte erkennbar, wobei sich die betragsmäßige mittlere Abweichung unter Verwendung von $r_4 \geq 1$ nur bei Ansatz 3 geringfügig reduziert. Werden die in Tabelle 4.7 aufgeführten extremen Über- und Unterschreitungen der Versuchswerte sowie der betragsmäßig mittlere Fehler betrachtet, ergeben sich, wie schon bei den zweiaxialen Festigkeitswerten, für den Ansatz 1 die besten Vorhersagegenauigkeiten.

Die kalibrierten Ansätze zur Beschreibung der Festigkeitsgrenzfläche lassen bezüglich der auftretenden Abweichungen infolge der iterativ bestimmten Freiwerte nur bedingt Rückschlüsse auf mögliche Ursachen zu. Werden hingegen die Ergebnisse des 1. Kalibrierungsschrittes betrachtet (Abbildung 4.18 und 4.19 in Verbindung mit Tabelle 4.4), wird deutlich, dass bei den vorhandenen Versuchsdaten wenigstens zwei Intervalle auf der $\widetilde{z}$-Achse existieren könnten, die den Verlauf der Meridiane signifikant prägen.

Beispielsweise treten zur Beschreibung des Zugmeridianverlaufs für den Ansatz 1 nach Gl. (4.25) bei Festigkeitsklassen, die nur Versuchswerte mit kleinen $\hat{z}$-Werten enthalten, größere Werte für b_i auf,

Tabelle 4.7: Prozentuale Abweichungen zwischen rechnerischen und experimentellen mehraxialen Festigkeitswerten für zufällig gewählte 122 Werte aus Anhang B und den eigenen Versuchen

	Ansatz 1 (Gl. (4.25))	Ansatz 2 (Gl. (4.26)) mit $r_4 = 1$	Ansatz 3 (Gl. (4.27))	Ansatz 1 (Gl. (4.25))	Ansatz 2 (Gl. (4.26)) mit $r_4 \geq 1$	Ansatz 3 (Gl. (4.27))
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Maximum	298	316	466	310	408	689
Minimum	-63	-56	-59	-30	-41	-39
Mittelwert	29	43	42	29	41	30

als bei den Klassen mit großen $\hat{z}$-Werten. Somit kommt es bei den erstgenannten Festigkeitsklassen zu einem nahezu linearen Verlauf der Meridiane, infolgedessen die mehraxialen Druckfestigkeiten überschätzt würden. Demgegenüber treten bei Festigkeitsklassen mit Versuchswerten mit großen $\hat{z}$-Werten kleine Werte für b_i auf, was zu einer ausgeprägten Krümmung der Zugmeridiane im Bereich kleiner $\hat{z}$-Werten führt und eine mögliche Überschätzung der mehraxialen Festigkeitswerte mit großen Zugbeanspruchungen (kleine $\hat{z}$-Werte) begünstigt (Abbildung 4.24).

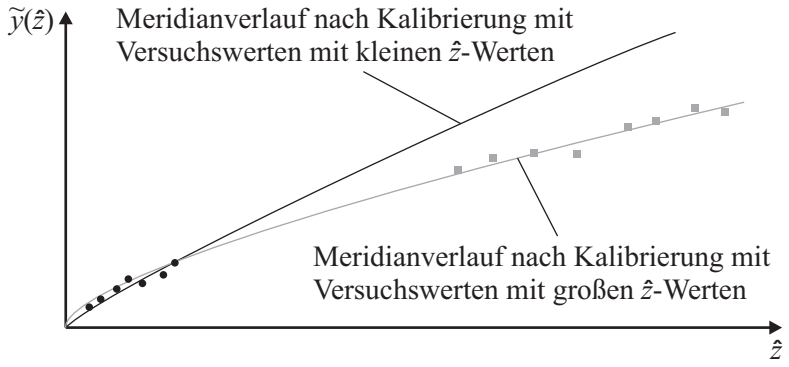


Abbildung 4.24: Schematische Darstellung des Einflusses des Werteintervalls von $\hat{z}$ auf die Bestimmung der Meridianverläufe

Werden in Richtung der $\hat{z}$-Achse wenigstens zwei Bereiche vorausgesetzt, die die Gestalt der Grenzfläche einer Festigkeitsklasse prägen, müssen diese bei der Beschreibung der Meridianverläufe Berücksichtigung finden. Es wird vermutet, dass eine mögliche Grenze zwischen den beiden Bereichen in einem Intervall verlaufen könnte, in dem ein Übergang der Versagensart der Prüfkörper vom Zugbruch zu einer anderen Bruchart stattfindet. Ist dies zutreffend, könnte die Grenzfläche der maximalen Festigkeit auch unstetig sein und einen Sprung aufweisen, wobei die einzelnen Teilbereiche weiterhin den Bedingungen der Meridianform entsprechend Abschnitt 4.1 erfüllen müssen. Da das Materialverhalten zum Teil großen Streuungen unterliegt, kann der eventuell vorhandene Übergang zwischen den verschiedenen Brucharten in den experimentellen Daten verschmiert vorliegen. Infolgedessen ist es denkbar, dass innerhalb des Übergangsintervalls eine approximierte Grenzfläche einen konkaven Verlauf aufweist (Abbildung 4.25).

4.4.4 Anwendung von Erweiterungen der mathematischen Beschreibung

Wie bereits in Abschnitt 4.2.4 beschrieben, kann mit der Einführung zusätzlicher Freiwerte die Komplexität des Modells erhöht und somit die Approximation der Versuchsergebnisse verbessert werden. Für den Meridianverlauf wurde mit Gl. (4.22) bzw. Gl. (4.23) bereits eine Erweiterung vorgestellt, die ein Schließen der Grenzfläche erzwingt und somit die Abbildung der Festigkeitswerte

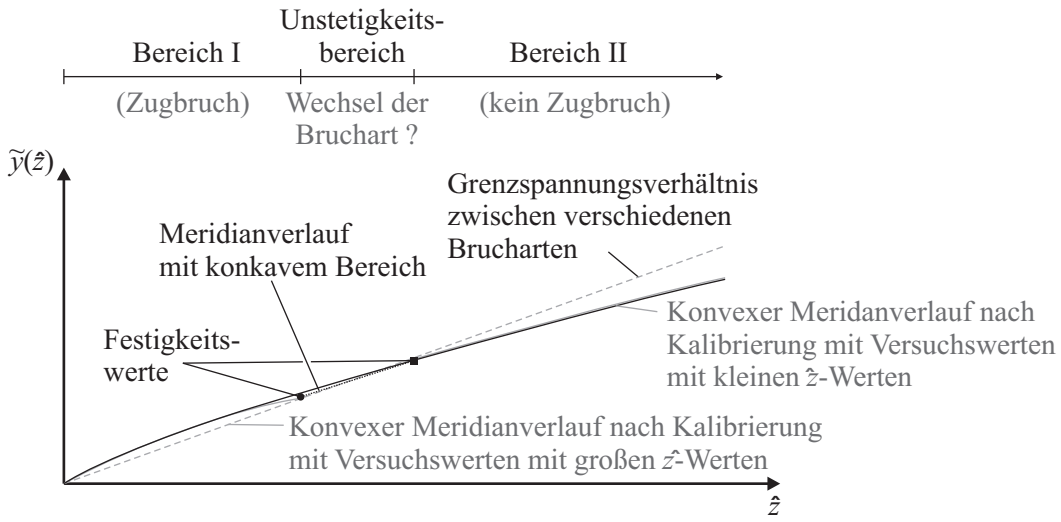


Abbildung 4.25: Theoretische Betrachtung eines Meridianverlaufs mit zwei Teilbereichen

für sehr große $\hat{z}$-Werte verbessern kann. Wie im vorhergehenden Abschnitt diskutiert, erscheint es notwendig, den Verlauf der Meridiane auch in Richtung kleiner $\hat{z}$-Werte detaillierter zu erfassen.

Bei einer Beschreibung würden dann für den Anfangs-, Mittel- und Endbereich der Meridiane Möglichkeiten zur Modifikation des Verlaufs bestehen, deren Abgrenzung gegeneinander und deren Einflussintervalle über die $\hat{z}$-Achse nicht klar abgrenzt sind. Eine Einführung bzw. Verwendung von drei Termen zur Beschreibung der Meridiane ist jedoch nur dann tatsächlich zielführend, wenn für alle drei Bereiche entsprechende Versuchsdaten vorliegen.

4.4.4.1 Erweiterung von $\widetilde{y}_{ZM}(\hat{z})$ zur Modifikation des Meridianverlaufs im Bereich kleiner $\hat{z}$-Werte

Um zu überprüfen, ob und wie weit sich die vermuteten zwei Teilbereiche der Meridianverläufe im Bereich kleiner $\hat{z}$-Werte aufzeigen lassen (vgl. Abbildung 4.25), wird eine Erweiterung nach Gl. (4.28) für die bestehenden Ansätze 1 bis 3 nach Gl. (4.3) bis Gl. (4.5) der Zugmeridianverläufe eingeführt. Beispielhaft sind in Abbildung 4.26 modifizierte Zugmeridianverläufe dargestellt, die sich infolge der Erweiterung mit dem bestehenden Ansatz 1 nach Gl. (4.3) ergeben können. Es ist ersichtlich, dass die Erweiterung nur über einen begrenzten Bereich von $\hat{z}$ einen Einfluss ausübt und dass sich für $c = 0$ oder $d = 0$ keine Änderungen des ursprünglichen Zugmeridianverlaufs ergeben. Grundsätzlich muss $c \geq 0$ sein, wogegen d einen beliebigen Wert annehmen kann und damit das Vorzeichen der Krümmung des Zugmeridians für $\hat{z} = 0$ festlegt.

$$\widetilde{y}_{ZM,mod}(\hat{z}) = \left[1 + c^{\hat{z}}\right]^{d} \cdot \widetilde{y}_{ZM}(\hat{z}) \tag{4.28}$$

Um den Rechenaufwand zur erneuten Kalibrierung des Modells zu verringern, wird der Einfluss der Erweiterung nur für Ansatz 1 nach Gl. (4.29) mit $r_4 \geq 1$ nach Gl. (4.20) untersucht. Werden alle Freiwerte des erweiterten Modells mit der bereits beschriebenen schrittweisen Kalibrierung neu bestimmt, ergeben sich für die Freiwerte c und d keine eindeutigen Tendenzen und somit keine eindeutige Aussage zum Verlauf der Meridiane im Bereich kleiner $\hat{z}$-Werte bei Betrachtung aller Betonfestigkeitsklassen. Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich für die Kalibrierung des erweiterten Modells nach Gl. (4.29), wenn die bereits definierten Freiwerte des Ansatzes 1 nach Tabelle 4.6 vorgegeben und nur c und d neu ermittelt werden (Abbildung 4.27).

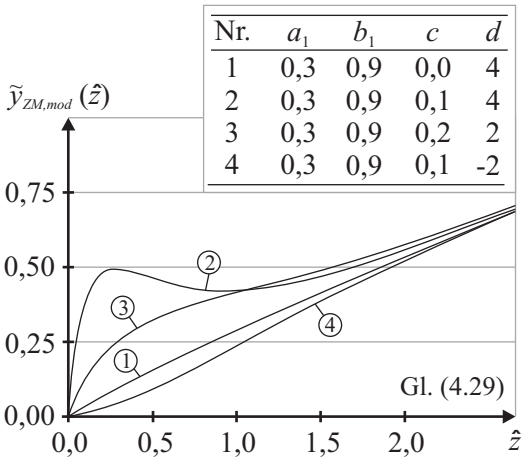
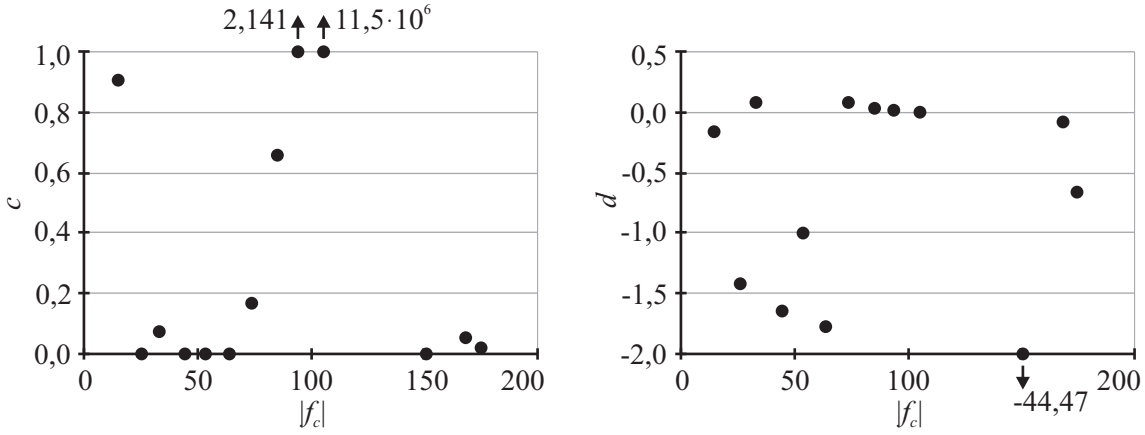


Abbildung 4.26: Mögliche Zugmeridianverläufe des erweiterten Ansatzes 1 nach Gl. (4.29)

$$\widetilde{y}_{ZM,mod}(\hat{z}) = \left[1 + c^{\hat{z}}\right]^{d} \cdot \left(a_1 \cdot (\hat{z})^{b_1}\right) \tag{4.29}$$



a) Kalibrierungsergebnis für den Freiwert c b) Kalibrierungsergebnis für den Freiwert d

Abbildung 4.27: Ermittelte Freiwerte c und d für Ansatz 1 nach Gl. (4.29) unter Vorgabe der bereits definierten Freiwerte aus Tabelle 4.6

Aus den Ergebnissen lässt sich nicht eindeutig ableiten, ob die vermuteten zwei Bereiche im Meridianverlauf entsprechend Abbildung 4.25 auftreten. Grundsätzlich haben die ermittelten Werte für c und d jedoch nur auf ein sehr kleines Werteintervall von $\hat{z}$ Einfluss, der nicht bis zu einem Übergangsbereich vom Zugbruch zu einer anderen Bruchart reicht. Demnach könnte sich der Einfluss der Erweiterung auf einen Bereich beschränken, wo wenigstens eine Zugkomponente in der Beanspruchung auftritt und diese betragsmäßig größer als die vorhandenen Druckkomponenten ist.

4.4.4.2 Erweiterung von $r(\hat{z})$ zur Modifikation der Grenzfläche im Bereich kleiner $\hat{z}$-Werte

Neben der vorgestellten Erweiterung nach Gl. (4.28) lässt sich die Grenzfläche im Bereich kleiner $\hat{z}$-Werte ebenfalls durch eine Erweiterung von $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.21) beeinflussen. Ausgehend vom Druckmeridian verringert sich dabei mit kleiner werdendem Winkel $\widetilde{\varphi}$ der Einfluss der Modifikation und besitzt auf den Zugmeridian keine Auswirkungen mehr. Daraus folgt, dass sich die größten Auswirkungen bei der Berechnung von Druck-Zug-Zug-Spannungsverhältnissen ergeben (vgl. Abbildung 3.37). Anders als bisher kann die Gestalt der Deviatorkurven infolge der Modifikation von

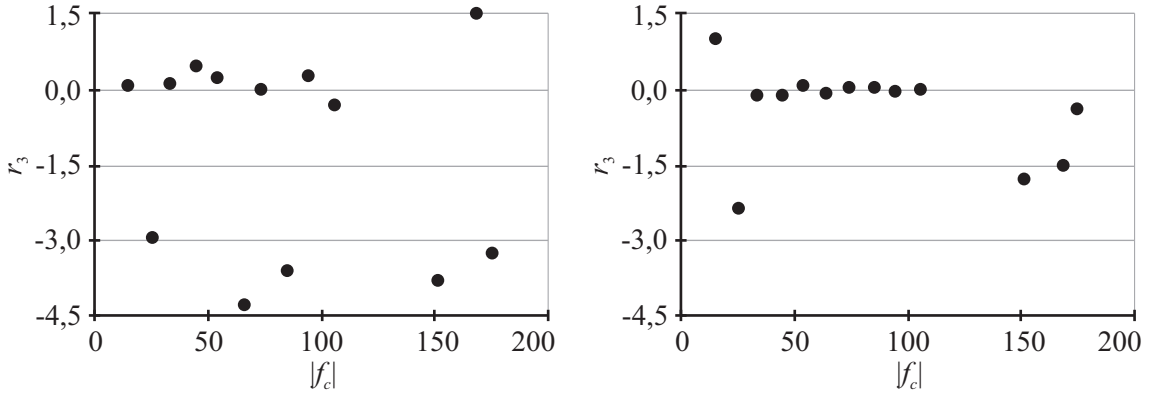
$r(\hat{z})$ mit zunehmenden $\hat{z}$-Werten von „abgerundet“ über „dreieckig“ wieder nach „abgerundet“ bis „rund“ und nicht mehr nur von „dreieckig“ nach „rund“ verlaufen (vgl. Abbildung 4.8).

Wird angenommen, dass die Gestalt der Grenzfläche in Richtung kleiner $\hat{z}$-Werte nicht von der Größe der Zugkomponente, sondern dem deviatorischen Spannungsanteil der Beanspruchung beeinflusst wird, könnte sich wie in Richtung großer $\hat{z}$-Werte eine „abgerundete“ Form der Deviatorkurven auch in Richtung der hydrostatischen Zugbeanspruchung ergeben. Somit existiert ein Punkt, an dem $r(\hat{z})$ maximal wird und die Deviatorkurve eine extreme Form annimmt, die sich am weitesten von einer „runden“ Form entfernt (vgl. Abbildung 4.8).

Zur Untersuchung dieser Hypothese wird für den Verlauf von $r(\hat{z})$ der Ansatz nach Gl. (4.21) zur Kalibrierung des Kriteriums verwendet. Dabei erhöhen positive Werte von r_3 die Werte von $r(\hat{z})$ und begünstigen somit den bisher angenommenen Verlauf der Form der Deviatorkurven entlang der $\widetilde{z}$-Achse. Negative Werte für r_3 führen im Gegensatz dazu, dass die Funktion $r(\hat{z})$ einen Maximalwert aufweist an dem die Form der Deviatorkurve extrem wird und einem Dreieck am nächsten kommt bzw. darüber hinaus eine nicht-konvexe Form aufweist.

Für die Bestimmung der Freiwerte mit dem erweiterten Ansatz von $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.21) wird erneut nur der Ansatz 1 nach Gl. (4.25) für den Zugmeridianverlauf herangezogen. Nach der Kalibrierung aller Freiwerte mit der vorgestellten schrittweisen Vorgehensweise bzw. nach der Kalibrierung des Kriteriums unter Vorgabe aller bereits definierten Freiwerte nach Tabelle 4.6 ergibt sich für r_3 keine eindeutige Tendenz bei Betrachtung aller Betonfestigkeitsklassen (Abbildung 4.28).

Sofern bis auf r_3 alle weiteren Freiwerte gemäß Tabelle 4.6 bereits definiert sind, führen positive und betragsmäßig kleine negative Werte dazu, dass sich der Druckmeridianverlauf über einen großen Bereich ändert. Somit werden die Festigkeitswerte der Spannungsverhältnisse mit Zugkomponenten und ebenfalls die Festigkeitswerte von reinen Druckspannungsverhältnissen modifiziert. Soll der Verlauf des Druckmeridians jedoch nur in einem Intervall bis zur einaxialen Druckfestigkeit angepasst werden, ist ein betragsmäßig größerer Wert für r_3 im Vergleich zu den bei der Kalibrierung ermittelten Werten anzusetzen. Somit stellen die Kalibrierungsergebnisse keine merkliche Verbesserung der Approximation der mehraxialen Festigkeitswerte dar, es wird aber deutlich, dass der gewählte Ansatz für $r(\hat{z})$ einer großen Flexibilität bedarf.



a) 1. Kalibrierung aller Freiwerte des Modells

b) Kalibrierung des Modells mit definierten Freiwerten nach Tabelle 4.6

Abbildung 4.28: Werte von r_3 in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit

Unabhängig von allen verfügbaren Versuchsdaten werden die Bestimmungsgleichungen von $r_1(f_c)$ und $r_3(f_c)$ in einer weiteren Kalibrierung der Grenzflächen unter Verwendung der weiteren bereits definierten Freiwerte nach Tabelle 4.6 derart ermittelt, dass es zu einer Verbesserung der Approximation der zweiaxialen Festigkeitswerte kommt. Hierbei ergibt sich $r_1(f_c)$ gemäß Gl. (4.30) und

$r_3(f_c)$ gemäß Gl. (4.31), womit sich die in Abbildung 4.29 dargestellten Festigkeitswerte berechnen lassen (vgl. Abbildung 4.22).

$$r_1(f_c) = 0{,}86 \cdot |f_c|^{0{,}467} \qquad \text{mit} \qquad f_c \text{ in } \mathrm{N/mm^2} \tag{4.30}$$

$$r_3(f_c) = 0{,}04 \cdot |f_c| - 14 \qquad \text{mit} \qquad f_c \text{ in } \mathrm{N/mm^2} \tag{4.31}$$

Bei der Nachrechnung der 122 aus allen Betonfestigkeitsklassen zufällig gewählten mehraxialen Festigkeitswerte mit den modifizierten Bestimmungsgleichungen Gl. (4.30) und Gl. (4.31) für $r_1(f_c)$ und $r_3(f_c)$ ergibt sich eine betragsmäßig um 1 Prozentpunkt größere mittlere Abweichung zwischen den theoretischen und experimentellen Werten im Vergleich zur Kalibrierung des Kriteriums mit dem Ansatz für $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20). Dementsprechend treten auch bei der maximalen und minimalen Abweichung keine nennenswerten Änderungen auf.

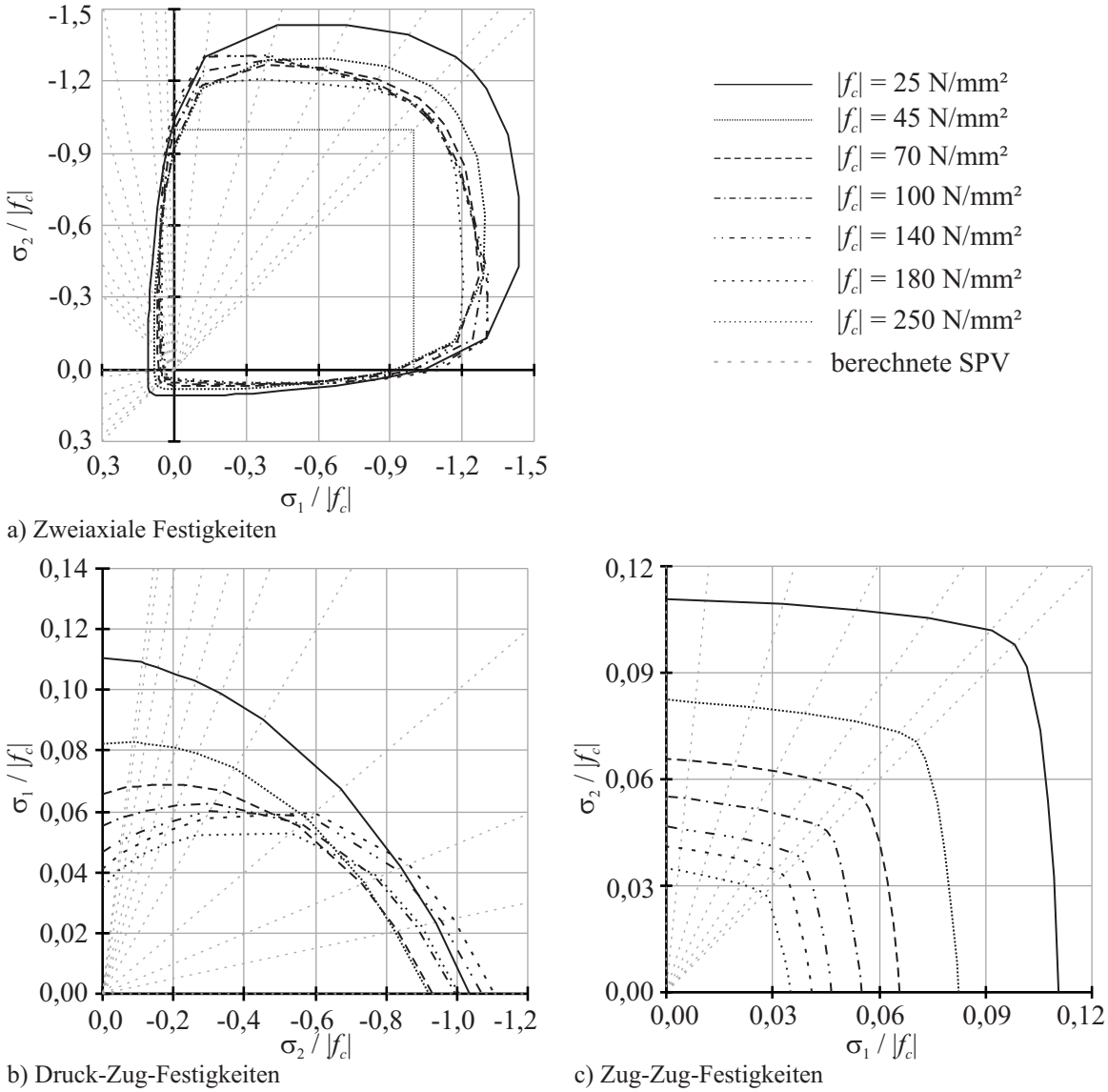


Abbildung 4.29: Approximation der zweiaxialen Festigkeitswerte mit Ansatz 1 nach Gl. (4.25) für unterschiedliche Festigkeitsklassen mit dem erweiterten Ansatz von $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.21) mit $r_4 \geq 1$

In Abbildung 4.30 sind die Verläufe von $r(\hat{z})$ ohne Erweiterung und mit Erweiterung gemäß Gl. (4.20) und Gl. (4.21) für unterschiedliche Betonfestigkeitsklassen dargestellt. Die Form der Deviatorkurven erreicht mit dem erweiterten Ansatz von $r(\hat{z})$ (Gl. (4.21)) in einem Punkt $\hat{z} > 0$ einen Extremwert, wobei sich dieser mit abnehmender einaxialer Druckfestigkeit bzw. größer werdendem Verhältnis zwischen einaxialer Zug- zu einaxialer Druckfestigkeit in Richtung abnehmender $\hat{z}$-Werte verschiebt. Weiterhin zeigen die Verläufe von $r(\hat{z})$ mit Erweiterung (Gl. (4.21)), dass der Wert 5,3 nicht überschritten wird und somit die Deviatorkurve an jedem Punkt der $\hat{z}$-Achse eine konvexe Form aufweist. Da dies ebenfalls für Betone mit einer sehr hohen einaxialen Druckfestigkeit zutrifft, scheint es möglich, die mehraxialen Festigkeitswerte mit einer Grenzfläche zu beschreiben, die keine konkaven Bereiche in den Deviatorkurven aufweist (vgl. Abbildung 4.7).

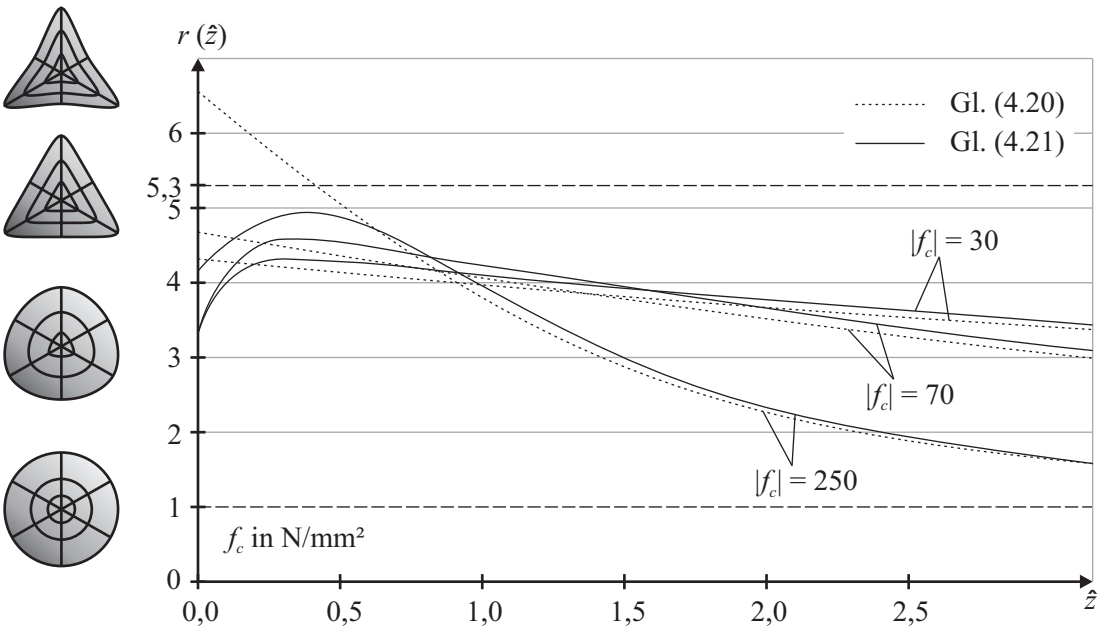


Abbildung 4.30: Verlauf von $r(\hat{z})$ ohne Erweiterung gemäß Gl. (4.20) und mit Erweiterung gemäß Gl. (4.21) für verschiedene Betonfestigkeitsklassen

Zusammenfassend kann angenommen werden, dass sich mit dem erweiterten Ansatz für $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.21) der Verlauf der Meridiane mit $\varphi \geq 0\,^\circ$ gegenüber dem Ansatz ohne Erweiterung nach Gl. (4.20) gleich gut abbilden lässt. Für eine signifikante Verbesserung der Approximation der Versuchswerte müsste jedoch ein Ansatz mit einer größeren Flexibilität verwendet werden. Ausgehend von einem Maximalwert der Funktion $r(\hat{z})$ sollte die Modifikation des Verlaufs von $r(\hat{z})$ vor und nach diesem Extremwert nahezu unabhängig voneinander stattfinden können.

4.4.4.3 Schließen der Grenzfläche unter hydrostatischer Druckbeanspruchung

Wird für die hydrostatische Druckbeanspruchung eine maximale Festigkeit vorausgesetzt, muss sich die Grenzfläche in Richtung zunehmender $\hat{z}$-Werte Schließen. Für die untersuchten Ansätze 1 bis 3 nach Gl. (4.25) bis Gl. (4.27) bedeutet dies, dass lediglich der Ansatz 3 (Gl. (4.27)) die gesamte Grenzfläche qualitativ abbilden kann. Soll unter Verwendung der Ansätze 1 (Gl. (4.25)) und 2 (Gl. (4.26)) ebenfalls ein Schließen der Grenzfläche erfolgen, sind diese unter der Einführung von zwei zusätzlichen Freiwerten gemäß Gl. (4.22) und Gl. (4.23) zu erweitern (siehe Abschnitt 4.2.4).

Die Auswertung der vorhandenen Versuchsdaten hinsichtlich des Schließens der Grenzfläche unter hydrostatischer Druckbeanspruchung erfolgt wiederum nur für den Ansatz 1 nach Gl. (4.22) unter

Berücksichtigung der Gl. (4.20) für den Verlauf von $r(\hat{z})$ ($r_4 \geq 1$). Das Ergebnis der ersten Kalibrierung aller Parameter mit dem beschriebenen Vorgehen zeigt, dass für jede Festigkeitsklasse $f > 0$ ist. Somit schneidet die $\hat{z}$-Achse die Grenzfläche in zwei Punkten, an denen alle Meridiane zusammenlaufen.

Die beiden beiden Schnittpunkte und damit Nullstellen von Gl. (4.22) definieren die $\widetilde{z}$-Werte der Festigkeiten unter hydrostatischer Zug- (f_{ttt}) und hydrostatischer Druckbeanspruchung (f_{ccc}). Die sich ergebenden Werte f_{ccc} unter einer hydrostatischen Druckbeanspruchung weisen große Streuungen auf und können aufgrund der z. T. sehr großen Werte nicht als realistisch angesehen werden, weshalb auch die Werte für f nur aus der mathematischen Beschreibung und nicht aus dem Materialverhalten resultieren (siehe Abbildung 4.31). Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn die Kalibrierung von f und f_{ccc} mit den bereits definierten Freiwerten nach Tabelle 4.6 des Ansatzes 1 durchgeführt wird.

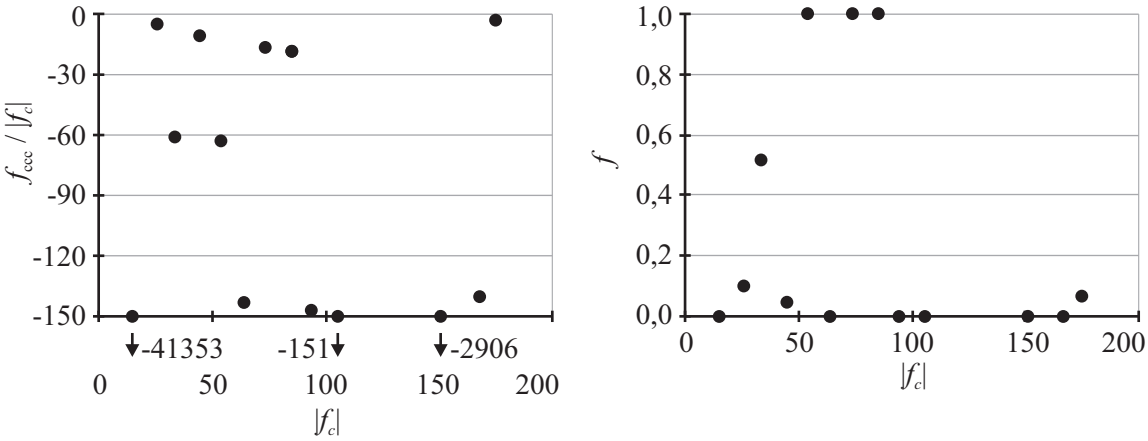
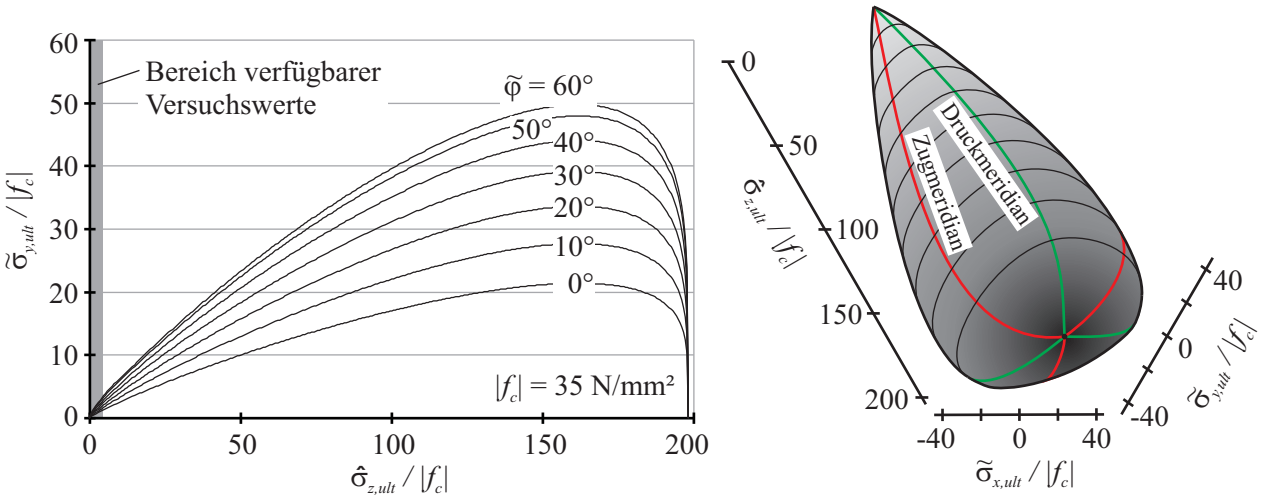


Abbildung 4.31: Parameter f und f_{ccc} in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit von sich schließenden Grenzflächen nach Gl. (4.22) mit $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$) nach der 1. Kalibrierung aller Freiwerte

Da es dennoch zweckmäßig sein kann, die Grenzflächen auf eine maximale hydrostatische Druckfestigkeit zu begrenzen, muss diese im Modell vorgegeben werden. Mit der fiktiven Annahme, dass $f_{ccc}/|f_c| = -400 \cdot |f_c|^{-0,2}$ (f_c in N/mm^2) beträgt, werden die Größen a_1, r_4 und f unter Vorgabe der bereits definierten Freiwerte nach Tabelle 4.6 des Ansatzes 1 bestimmt.

Nach der ersten Kalibrierung des Modells mit den noch unbekannten drei Parametern ergibt sich für eine Vielzahl der Festigkeitsklassen $f = 0$, wodurch die Erweiterung keinen Einfluss auf den Meridianverlauf besitzt und ein Schließen der Grenzfläche nicht erfolgt. Dies bestätigt, dass die Versuchswerte in einem Intervall liegen, in dem noch keine Anzeichen auf ein Schließen der Grenzfläche in Richtung zunehmender $\hat{z}$-Werte auftreten und die Erweiterung formal nicht nötig ist. Zum Erzwingen des Schließens der Fläche wird daher $f = 0{,}2$ ebenfalls vorgegeben und anschließend die Ermittlung der zwei verbleibenden Freiwerte vorgenommen ($a_1(f_c) = 0{,}018 \cdot |f_c|^{0,054}$ und $r_4(f_c) = 80{,}78 \cdot (|f_c| + 1)^{-1,288} + 1$ mit f_c in N/mm^2). Beispielhaft zur Darstellung der Auswirkung dieser Erweiterung sind in Abbildung 4.32 zum einen die Meridianverläufe für eine einaxiale Druckfestigkeit $|f_c| = 35\,\mathrm{N/mm^2}$ und zum anderen die zugehörige Grenzfläche der mehraxialen Festigkeitswerte gezeigt. Es sei darauf hingewiesen, dass die aufgeführten Formeln und Darstellungen lediglich die Möglichkeiten der Erweiterung zeigen und nicht dem tatsächlichen Festigkeitsverhalten des Betons entsprechen, da keine Verifizierung mit Versuchswerten möglich ist bzw. die vorhandenen Versuchswerte keine derartige Extrapolation erlauben.

Zusätzlich zur Betrachtung einer sich schließenden Grenzfläche über alle Betonfestigkeitsklassen werden im Folgenden drei derartige Grenzflächen mit einer Kalibrierung für die eigenen Versuchs-



a) Sich schließende Grenzfläche für $\sigma_{ult} / |f_c|$ projiziert auf die $\widetilde{yz}$-Ebene

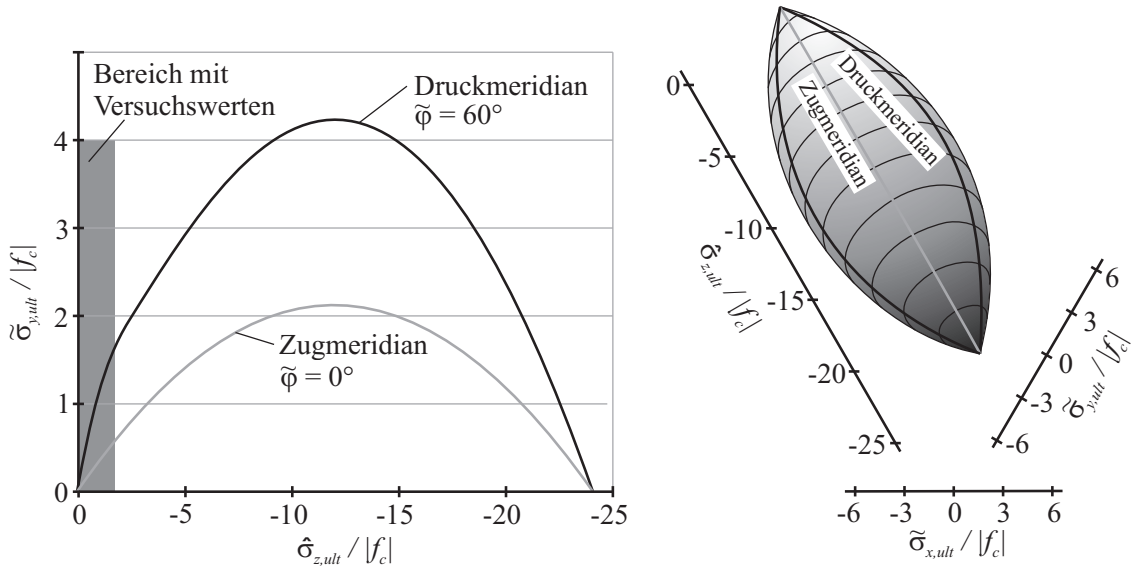
b) Räumliche Darstellung der sich schließenden Grenzfläche für $\sigma_{ult} / |f_c|$

Abbildung 4.32: Geschlossene Grenzfläche nach Gl. (4.22) mit $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$) mit fiktiver Annahme der hydrostatischen Druckfestigkeit

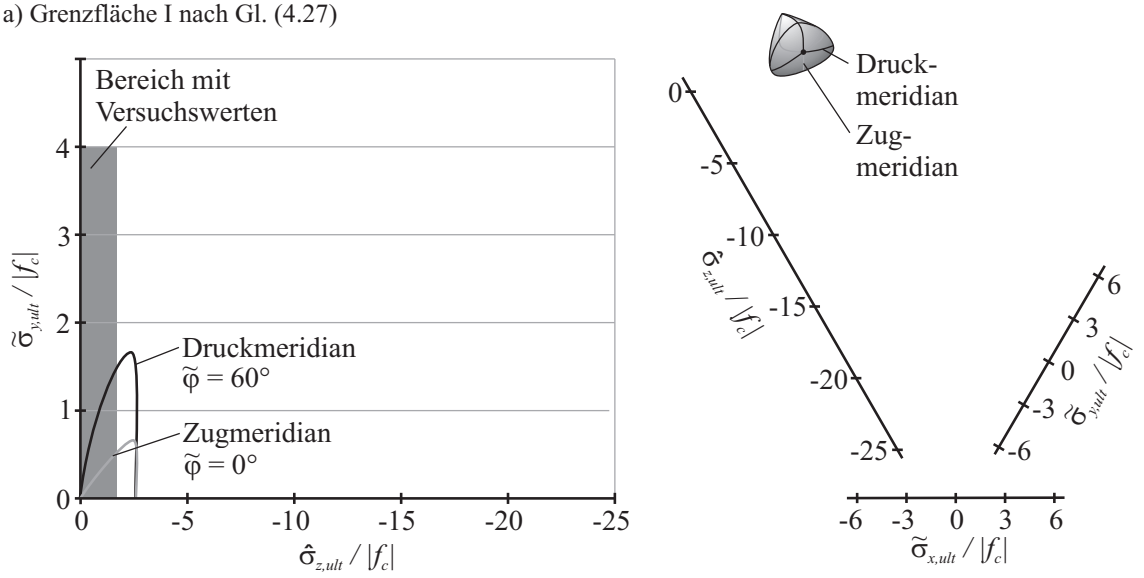
ergebnisse verglichen. Diese sind Grenzfläche I nach Gl. (4.27) mit $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$), Grenzfläche II nach Gl. (4.22) mit $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$) und Grenzfläche III nach Willam & Warnke [27]. Die zur Kalibrierung der allgemeinen Grenzflächenbeschreibungen ermittelten Freiwerte sind in Tabelle 4.8 angegeben.

In Abbildung 4.33 sind die kalibrierten Grenzflächen sowie die Verläufe der Zug- bzw. Druckmeridiane dargestellt. Es ist ersichtlich, dass alle drei Kriterien sehr unterschiedliche hydrostatische Druckfestigkeiten angeben. Bei Grenzfläche I nach Gl. (4.27) (Abbildung 4.33a) ergibt sich die hydrostatische Druckfestigkeit zu $\approx 14 \cdot f_c$ aus dem zugehörigen Wert für f_{ccc} am Schnittpunkt der Meridiane mit der hydrostatischen Achse. Da der Verlauf der Meridiane nur von Versuchswerten bestimmt wird, die vor den Parabelscheiteln liegen, kann davon ausgegangen werden, dass der Wert der hydrostatischen Druckfestigkeit aus den mathematischen Randbedingungen resultiert und nicht als realer Wert angesehen werden kann.

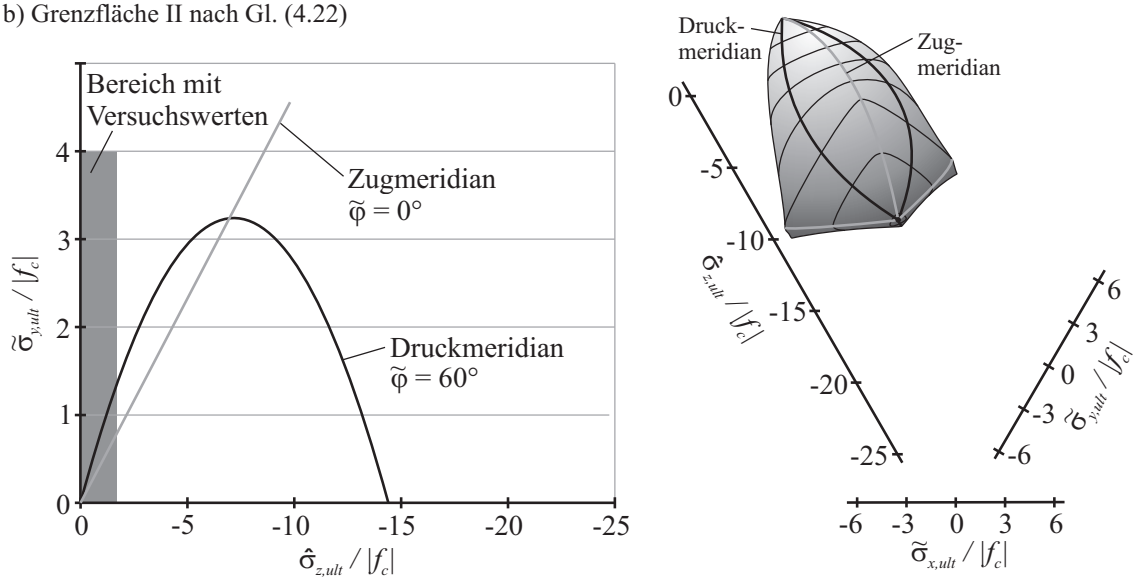
Bei Grenzfläche III nach Willam & Warnke [27] (Abbildung 4.33c) ergibt sich die hydrostatische Druckfestigkeit zu $\approx 8{,}5 \cdot f_c$ und folgt ebenfalls aus den mathematischen Aspekten. Der Wert ergibt sich aus dem kleineren Absolutwert des Schnittpunktes des Zug- bzw. des Druckmeridians mit der hydrostatischen Achse. Aufgrund der quadratischen Ansätze für den Verlauf des Zug- und des Druckmeridians der fünfparametrigen Grenzfläche kann es zu einem Schnittpunkt der beiden Meridiane kommen, an dem eine runde Deviatorkurve vorliegt. Da nach diesem Schnittpunkt der Zugmeridian betragsmäßig größere Werte als der Druckmeridian aufweist, werden dabei die i. d. R. getroffenen Annahmen für die Gestalt der Grenzfläche überschritten. Existiert andernfalls kein Schnittpunkt zwischen Zug- und Druckmeridian, ergibt sich keine runde Gestalt der Deviatorkurve mit zunehmenden hydrostatischen Druckspannungsanteil der Beanspruchung, was ebenfalls im Gegensatz zu den allgemeinen Annahmen zur Gestalt der Grenzfläche steht.



a) Grenzfläche I nach Gl. (4.27)



b) Grenzfläche II nach Gl. (4.22)



c) Grenzfläche III nach Willam & Warnke

Abbildung 4.33: Geschlossene Grenzflächen unterschiedlicher Modelle nach Gl. (4.27) mit $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$), nach Gl. (4.22) mit $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$) und nach Willam & Warnke [27] für die eigenen Versuche

Bei Grenzfläche II nach Gl. (4.22) (Abbildung 4.33b) ergibt sich eine wesentlich geringere hydrostatische Druckfestigkeit von $\approx 1{,}6 \cdot f_c$ gegenüber $\approx 14 \cdot f_c$ bzw. $\approx 8{,}5 \cdot f_c$ der beiden anderen Grenzflächen. Diese resultiert daher, dass die Krümmung der Meridiane bei Verwendung des Ansatzes nach Gl. (4.25) (ohne Schließen der Grenzfläche) zu klein ist, um Versuchswerte mit großen Absolutwerten des hydrostatischen Spannungsanteils der Versagensfestigkeitswerte genau abzubilden. Wird der Ansatz nach Gl. (4.25) zum Schließen der Grenzfläche erweitert, verbessert sich die Approximation dieser Werte. Ist der Abstand zwischen den Bereichen, die das Öffnen und Schließen der Grenzfläche charakterisieren, jedoch nicht groß genug, führt dies zu einem zu schnellen Schließen der Fläche. Für den untersuchten Beton muss daher auch der sich mit Grenzfläche II rechnerisch ergebende Wert der hydrostatischen Druckfestigkeit als unrealistisch angesehen werden.

Tabelle 4.8: Kalibrierungswerte zum Aufstellen geschlossener Grenzflächen unterschiedlicher Modelle

I	II	III
Gl. (4.27) mit $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$)	Gl. (4.22) mit $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$)	Willam & Warnke [27]
$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert = 0{,}0666$	$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert = 0{,}0666$	$f_c = -174{,}09\,\mathrm{N/mm^2}$
-	$f_{ccc}/\lvert f_c\rvert = -2{,}7$	$f_t = 8{,}05\,\mathrm{N/mm^2}$
$r_1 = 11{,}44$	$r_1 = 11{,}44$	$f_{2c} = -172{,}59\,\mathrm{N/mm^2}$
$r_2 = 0{,}804$	$r_2 = 0{,}8075$	$(\sigma_{oct} = -147{,}51\,\mathrm{N/mm^2})$
$r_4 = 1$	$r_4 = 1$	$\tau_{oct,\widetilde{\varphi}=60\,^\circ} = 185{,}71\,\mathrm{N/mm^2}$
$a_3 = -0{,}00276$	$a_1 = 0{,}0616$	$\tau_{oct,\widetilde{\varphi}=0\,^\circ}{}^{*)} = 102{,}38\,\mathrm{N/mm^2}$
$b_3 = 0{,}0666$	$b_1 = 0{,}9999$	
-	$f = 0{,}0704$	

*) ... Der mehraxiale Festigkeitswert des Zugmeridians wurde derart festgelegt, dass sich eine konvexe Grenzfläche ergibt. Er liegt jedoch unter dem zu erwartenden experimentellen Festigkeitswert.

4.5 Kalibrierung der Grenzfläche anhand einzelner Versuchswerte

Aufgrund des hohen rechnerischen Aufwands und der Vielzahl der benötigten Versuchsdaten zur Bestimmung der Freiwerte anhand von Ausgleichsrechnungen ist es zweckmäßig, die Grenzfläche mittels weniger einzelner Versuchsdaten zu kalibrieren. Beispielsweise werden zur Aufstellung des Grenzkriteriums nach Willam & Warnke [127] drei bzw. fünf und nach Ottosen [27, 91] vier spezielle Versuchswerte benötigt, um die allgemeine Beschreibung der Grenzfläche auf einen bestimmten Beton anzupassen. Die benötigten Versuchswerte liegen dabei zum einen auf dem Zug- und zum anderen auf dem Druckmeridian, wobei die für die Kalibrierung verwendeten Versuchswerte von der Approximation exakt abgebildet werden.

Ausgehend von Ansatz 1 nach Gl. (4.25) und einem Verlauf für $r(\hat{z})$ nach Gl. (4.20) sind für das eigene Modell sechs Freiwerte a_1, b_1, f_{ttt}, r_1, r_2, r_4 anzupassen. Wie bei anderen Kalibrierungen von Grenzflächen an einzelnen Versuchswerten auch ist es dabei vereinfachend Werte zu verwenden, die auf dem Zug- ($\widetilde{\varphi} = 0\,^\circ$) und auf dem Druckmeridian ($\widetilde{\varphi} = 60\,^\circ$) liegen. Aus Gl. (4.8) folgt, dass für die Kalibrierung des eigenen Modells drei Wertepaare auf dem Zugmeridian zur Berechnung von a_1, b_1 und f_{ttt} und drei Wertepaare auf dem Druckmeridian zur Berechnung von r_1, r_2 und r_4 vorliegen müssen. Aufgrund der Komplexität einiger der gewählten Teilansätze existiert jedoch keine analytische und auch keine numerische Lösung zur Kalibrierung des vorgeschlagenen Modells unter Einbeziehung aller sechs Freiwerte.

Mit der Vorgabe von r_2 kann unter Anwendung numerischer Methoden eine Kalibrierung des Kriteriums mit den verbleibenden fünf Freiwerten durch Versuchswerte erfolgen. Zudem existiert eine analytische Lösung, wenn zusätzlich der Wert f_{ttt}, zugehörig zur hydrostatischen Zugbeanspruchung, z. B. nach LIANG [66] zu $f_{ttt} = {}^{(3 \cdot 0{,}75 \cdot f_{ct})}/\sqrt{3}$ vorgegeben wird, wodurch sich die Anzahl der benötigten Versuchswerte auf vier Spannungsverhältnisse reduziert. Es ist zu beachten, dass nicht für alle Versuchsdatenpunkte eine numerische bzw. analytische Lösung existiert. Nehmen beispielsweise die Verbindungslinien zwischen drei verwendeten Datenpunkten auf dem Zugmeridian keine konvexe Form an, kann ein derartiger Verlauf mit Ansatz 1 nach Gl. (4.25) nicht beschrieben werden bzw. wird die obere Grenze für b_1 überschritten.

Ebenfalls an drei z. B. auf dem Zugmeridian liegenden Punkten wird deutlich, weshalb die zugrunde liegenden Versuchswerte einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Approximation der Festigkeitswerte haben. Während Punkte in einem kleinen Intervall der $\widetilde{z}$-Achse den Verlauf des Zugmeridians signifikant beeinflussen können, ist bei Verwendung von Datenpunkten in einem großen Intervall der $\widetilde{z}$-Achse der Einfluss auf den Verlauf des Zugmeridians geringer.

Die Anzahl der zu bestimmenden Freiwerte lässt sich durch die Einführung von Vereinfachungen und Annahmen weiter reduzieren. Zum einen könnte für die Gestalt der Deviatorkurven mit zunehmenden $\hat{z}$-Werten eine runde Form vorgeschrieben werden ($r_4 = 1$), zum anderen ist es möglich, den Datenpunkt der zweiaxialen Druckfestigkeit auf dem Zugmeridian hinreichend genau mit der einaxialen Druckfestigkeit abzuschätzen. Somit würden zur Kalibrierung des Kriteriums lediglich zwei Werte mit Spannungsverhältnissen auf dem Zug- und ein Wert mit einem Spannungsverhältnis auf dem Druckmeridian benötigt, von denen zwei durch die einaxiale Zug- bzw. einaxiale Druckfestigkeit gegeben sind.

Zur Beurteilung und Einschätzung der Auswirkung einzelner verwendeter Datenpunkte bei der Kalibrierung des Kriteriums sind in Tabelle 4.9 die minimale, die maximale und die betragsmäßig mittlere Abweichung zwischen den rechnerischen und den experimentellen Festigkeitswerten der eigenen Versuche (Anhang A.4, Tabelle A.9) für verschiedene Kalibrierungsvarianten angegeben. Die Werte werden dabei nicht auf die einaxiale Referenzdruckfestigkeit der jeweiligen Betoniercharge, sondern auf die Festigkeit des Spannungsverhältnisses $\alpha_1 \,/\, \alpha_2 \,/\, \alpha_3 = 0 \,/\, 0 \,/\, -1$ der mehraxialen Versuchsserie bezogen. Die Aufstellung der Grenzfläche erfolgt mittels Ansatz 1 gemäß Gl. (4.25) und Gl. (4.20) für den Verlauf von $r(\hat{z})$ ($r_4 \geq 1$). Die für die einzelnen Kalibrierungen verwendeten Versuchsdaten sind in Abbildung 4.34 schematisch dargestellt und die zugehörigen Werte in Tabelle 4.10 angegeben.

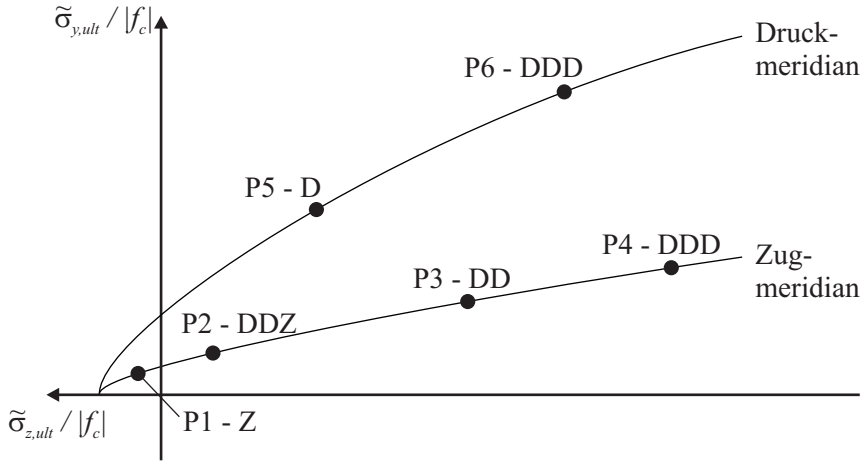


Abbildung 4.34: Schematische Darstellung der Lage der zur Kalibrierung des eigenen Modells verwendeten Versuchsdaten

Tabelle 4.9: Prozentuale Abweichungen zwischen den rechnerischen und den experimentellen mehraxialen Festigkeitswerten bei unterschiedlichen Kalibrierungsvarianten des eigenen Modells mit Ansatz 1 nach Gl. (4.25)

	I	II	III	IV	V	VI	VII
Verwendung / Vorgabe von	Fit alle eigenen Werte	P1, P2, P4, P5, P6, r_2*	P1, P3, P4, P5, P6, r_2*	P1, P3, P4, P5, r_2*, r_4*	P1, P3, P4, P5, r_2*, r_4*	P1, P3, $f_{ttt}/\lvert f_c\rvert$*, P5, r_2*, r_4*	nach Tabelle 4.6
$f_{ttt}/\lvert f_c\rvert$	0,0718	0,1101	0,0669	0,0669	0,0669	0,0637	0,0539
r_1	12,33	16,69	4,20	9,88	8,81	9,57	8,83
r_2	0,835	0,702	0,702	0,702	0,400	0,702	0,702
r_4	1,00	1,15	3,21	1,00	1,00	1,00	1,42
a_1	0,0636	0,0567	0,0659	0,0659	0,0659	0,0664	0,0539
b_1	0,975	1,0804	0,8773	0,8773	0,8773	0,8564	0,8410
Min [%]	-24,1	-	-5,0	-9,5	-5,9	-10,9	-8,6
SPV	0,025/-1/-1	-	0,01/-0,495/-1	0,01/-0,495/-1	0,01/-0,495/-1	-0,04/-0,04/-1	1/0/0
$\widetilde{\varphi}$	0 °	-	30 °	30 °	30 °	60 °	0 °
Max [%]	84,2	-	168,2	169,9	168,5	189,0	216,1
SPV	0,165/-0,147/-1	-	0,275/-0,658/-1	0,275/-0,658/-1	0,275/-0,658/-1	0,275/-0,658/-1	0,275/-0,658/-1
$\widetilde{\varphi}$	45 °	-	15 °	15 °	15 °	15 °	15 °
Mittel [%]	18,5	-	32,7	33,3	32,6	37,4	44,2

* - nach Tabelle 4.2 (Sp-D-L)

Insgesamt werden sieben verschiedene Kalibrierungsvarianten miteinander verglichen, wobei eine Kalibrierung als Ausgleichsrechnung für alle Versuchswerte der untersuchten Spannungsverhältnisse (Variante I) und eine Kalibrierung in Abhängigkeit von der einaxialen Druckfestigkeit entsprechend Abschnitt 4.4 (Variante VII) vorgenommen wird. Bei den verbleibenden fünf Kalibrierungen (Variante II bis VI) werden die Versuchswerte einzelner Spannungsverhältnisse verwendet, wobei entsprechend der vorhergehenden Ausführungen teilweise die Größen einzelner Freiwerte vorgegeben werden (vgl. Tabelle 4.2). Wie zu erwarten ist, ergibt sich bei Variante I die betragsmäßig geringste mittlere Abweichung zwischen den Versuchswerten und ihrer Approximation. Im Gegensatz dazu ergibt sich die größte Differenz, wenn das Kriterium mit den Freiwerten nach Tabelle 4.6 in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit kalibriert wird (Tabelle 4.9).

Bei der Kalibrierung des Modells mit einzelnen Versuchswerten ausgewählter Spannungsverhältnisse zeigt sich, wie bereits diskutiert, dass die Wahl der Versuchswerte einen wesentlichen Einfluss auf die sich ergebenden Freiwerte und somit auf die Approximation hat. Z. B. wird für die Kalibrierung von Variante II und III nur ein Datenpunkt geändert, was bei Variante II zu widersprüchlichen und bei Variante III zu guten Ergebnissen führt. Bei Variante II kommt es infolge der Versuchswerte mit kleinen $\widetilde{z}$-Werten (P1 und P2) dazu, dass die Grenze des Freiwertes b_1 nicht eingehalten wird und durch $b_1 > 1$ die Meridiane eine konkave Form annehmen. Somit ergibt sich z. B. zwischen dem kalibrierten Kriterium und der Geraden des Spannungsverhältnisses des Datenpunktes P4, der „exakt“ approximiert wird, ein vorzeitiger Schnittpunkt, der zu einer zu geringen Vorhersage der Festigkeit führt (Abbildung 4.35).

Tabelle 4.10: Verwendete Versuchswerte zur Kalibrierung des eigenen Modells

Nr.	Versuch	$\widetilde{\varphi}$ [°]	SPV α_1	SPV α_2	SPV α_3	σ_{ult} [N/mm^2]	$\widetilde{\sigma}_{z,ult}/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_{y,ult}/\lvert f_c\rvert$
P1	Z	0	1	0	0	7,90	0,02829	0,02000
P2	DDZ	0	0,345	-1	-1	-15,44	-0,09107	0,05286
P3	DD	0	0	-1	-1	-172,59	-1,23518	0,43774
P4	DDD	0	-0,039	-1	-1	-244,47	-1,78482	0,59620
P5	D	60	0	0	-1	-161,22	-0,57736	0,81651
P6	DDD	60	-0,040	-0,040	-1	-236,80	-0,91498	1,15192

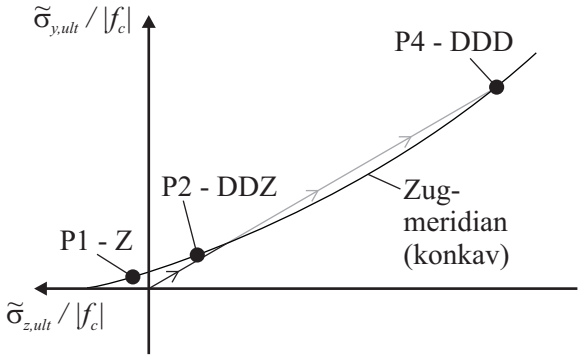


Abbildung 4.35: Fehlerhafte Wiedergabe der Festigkeitswerte bei der Kalibrierung des Kriteriums nach Variante II

Dieser Effekt zeigt sich ebenfalls bei den berechneten zweiaxialen Festigkeitswerten der unterschiedlichen Kalibrierungsvarianten, die in Abbildung 4.36 dargestellt sind. Bei Variante II wird die Festigkeit des zur Kalibrierung verwendeten zweiaxialen Druck-Druck-Spannungsverhältnisses nicht exakt getroffen, da das Materialversagen durch den vorzeitigen Schnittpunkt bereits definiert ist. Weiterhin ist ersichtlich, dass unter Einhaltung der Grenzen der Freiwerte die für die Kalibrierung verwendeten Festigkeitswerte exakt abgebildet werden. Diese sind die einaxiale Zug-, die einaxiale Druck- und die zweiaxiale Druckfestigkeit.

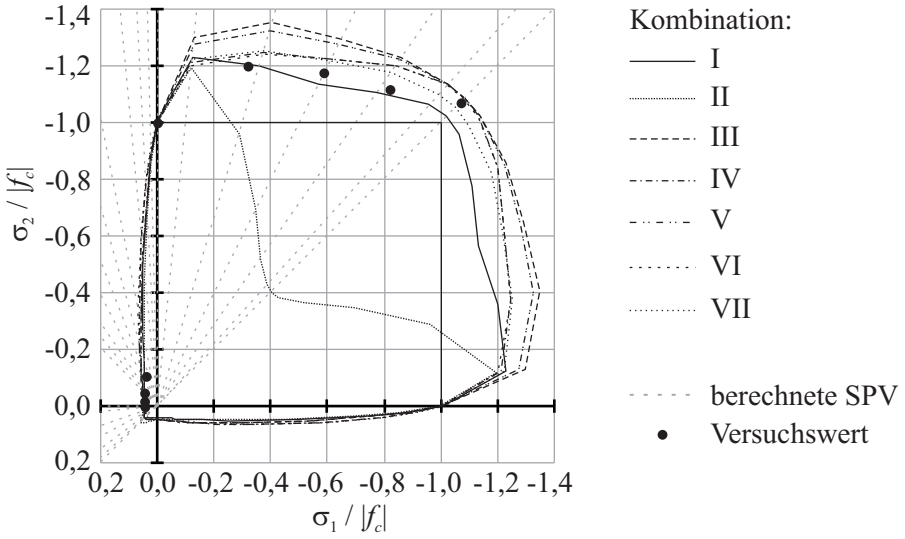


Abbildung 4.36: Zweiaxiale Festigkeitswerte für unterschiedliche Kalibrierungsvarianten des eigenen Modells

Die in Tabelle 4.9 aufgeführten Abweichungen zwischen den experimentellen und den rechnerisch ermittelten Werten zeigen, dass auch bei einer Kalibrierung mit einzelnen Versuchswerten eine hinreichend gute Beschreibung der Materialfestigkeit erfolgen kann. Hierfür ist es jedoch notwendig, bei der Wahl der zur Kalibrierung der Festigkeitsgrenzfläche herangezogenen Festigkeitswerte auf einen möglichst großen Abstand zwischen den Werten entlang der $\widetilde{z}$-Achse zu achten. Weiterhin ist festzustellen, dass unabhängig von der verwendeten Kalibrierungsvariante die minimale und maximale Abweichung nahezu immer bei den gleichen zwei Spannungsverhältnissen auftreten, was auf eine unzureichende Anpassungsfähigkeit der Grenzfläche in diesen Bereichen hindeutet.

5 Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens bei mehraxialer Beanspruchung

5.1 Allgemeines

Die im Folgenden vorgestellte Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens des untersuchten Betons basiert auf der Grundlage des verallgemeinerten HOOKE'schen Gesetzes. Dabei wird angenommen, dass keine Koppelungen zwischen den Hauptdehnungen und den Schubspannungen bestehen und die Belastungen nur in den Hauptrichtungen eingetragen werden. Somit ergibt sich für die Beschreibung des Materialverhaltens Gl. (2.3), die unter Annahme eines isotropen Materialverhaltens zwei und unter Annahme eines orthotropen Materialverhaltens sechs unbekannte Materialkennwerte E_i und ν_i gemäß Gl. (2.4) und Gl. (2.5) aufweist.

Unter der Voraussetzung, dass infolge der Beanspruchung eine Änderung der Materialkennwerte E_i und ν_i auftritt, lässt sich auf Grundlage des verallgemeinerten HOOKE'schen Gesetzes ein nichtlineares Materialverhalten beschreiben, sofern die Änderungen der Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix (Gl. (2.1)) in Abhängigkeit der Beanspruchung bekannt sind. Dabei wird mittels der Änderung der Materialkennwerte die Schädigung des Materials beschrieben, die das nichtlineare Verformungsverhalten bestimmen. Für die Approximation des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens kann im einfachsten Fall von einer isotropen Schädigung ausgegangen werden, bei der sich die Materialkennwerte in allen drei Hauptrichtungen gleichmäßig ändern und somit nur von einem Schädigungsmaß D abhängen. Unter Annahme eines anfänglichen isotropen Materials, bei dem infolge der Beanspruchung eine orthotrope Schädigung auftritt, ergeben sich je Hauptrichtung unterschiedliche Schädigungsmaße D_i, denen grundsätzlich jedoch eine gemeinsame Schädigungsfunktion ϕ zugrunde liegt. Dies resultiert aus der Bedingung, dass bei einem anfänglich isotropen Material ein definiert aufgebrachtes Belastungsniveau bei einem Vertauschen der Beanspruchungsrichtungen in den vertauschten Richtungen die gleichen Schädigungen hervorruft und sich somit das Spannungs-Dehnungs-Verhalten in den entsprechenden Richtungen analog einstellt.

5.2 Isotrope Schädigung

5.2.1 Isotrope Schädigung mit Schädigungsbeginn während der Belastung

Unter der Annahme einer isotropen Schädigung ist es grundsätzlich möglich, den Verlauf bzw. die Änderung der zwei Materialkennwerte E und ν des weiterhin isotropen Materials aus gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien zu bestimmen. Die Auswertung der Spannungs-Dehnungs-Linie eines einaxialen Druckversuchs zeigt, dass sich sowohl der Elastizitätsmodul E als auch die Querdehnzahl ν in Abhängigkeit der Belastung ändern (vgl. Abbildung 3.4). Somit wird in dem von RIZZI & CAROL [98] hergeleiteten Ansatz mit der Schädigungsfunktion $\phi(\kappa_{di})$ zur Beschreibung der Änderung des Elastizitätsmoduls (Gl. (2.11)) eine zweite Schädigungsfunktion $\lambda(\kappa_{di})$ eingeführt (Gl. (5.1)), die die Änderung der Querdehnzahl ν in Abhängigkeit der auftretenden Dehnung κ_{di} eines Belastungsniveaus i beschreibt (Gl. (5.4)).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{1,i} \\ \varepsilon_{2,i} \\ \varepsilon_{3,i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0 \cdot (\phi(\kappa_{di}))^2} & -\frac{\nu_0 \cdot \lambda(\kappa_{di})}{E_0 \cdot (\phi(\kappa_{di}))^2} & -\frac{\nu_0 \cdot \lambda(\kappa_{di})}{E_0 \cdot (\phi(\kappa_{di}))^2} \\ -\frac{\nu_0 \cdot \lambda(\kappa_{di})}{E_0 \cdot (\phi(\kappa_{di}))^2} & \frac{1}{E_0 \cdot (\phi(\kappa_{di}))^2} & -\frac{\nu_0 \cdot \lambda(\kappa_{di})}{E_0 \cdot (\phi(\kappa_{di}))^2} \\ -\frac{\nu_0 \cdot \lambda(\kappa_{di})}{E_0 \cdot (\phi(\kappa_{di}))^2} & -\frac{\nu_0 \cdot \lambda(\kappa_{di})}{E_0 \cdot (\phi(\kappa_{di}))^2} & \frac{1}{E_0 \cdot (\phi(\kappa_{di}))^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{1,i} \\ \sigma_{2,i} \\ \sigma_{3,i} \end{Bmatrix} \tag{5.1}$$

Der Wert der Schädigungsfunktion $\phi(\kappa_{di})$ berechnet sich mit dem Schädigungsmaß $D(\kappa_{di})$ gemäß Gl. (5.2), wobei κ_{di} das Maß der auftretenden Beanspruchung ist, das sich, wie bereits erwähnt, aus dem Dehnungszustand des Belastungsniveaus i des Materials ergibt. Das Schädigungsmaß $D(\kappa_{di})$ wird entsprechend Bachmann [5] definiert und berechnet sich nach Gl. (5.3). Zur Approximation des Verlaufs der Querdehnzahl wird eine Potenzfunktion nach Gl. (5.4) gewählt, der eine Zunahme der Querdehnzahl mit steigendem Belastungsniveau zugrunde liegt.

$$\phi(\kappa_{di}) = \sqrt{1 - D(\kappa_{di})} \tag{5.2}$$

$$D(\kappa_{di}) = \begin{cases} 0 & |\kappa_{di}| \leq |\varepsilon_{d0}| \\ 1 - exp\left[- \left(\frac{|\kappa_{di}| - |\varepsilon_{d0}|}{\varepsilon_d} \right)^{g_d} \right] & |\kappa_{di}| > |\varepsilon_{d0}| \end{cases} \tag{5.3}$$

$$\lambda(\kappa_{di}) = \begin{cases} 1 & |\kappa_{di}| \leq |\varepsilon_{d0}| \\ 1 + (a \cdot (|\kappa_{di}| - |\varepsilon_{d0}|))^{b \cdot (|\kappa_{di}| - |\varepsilon_{d0}|) + 1)} & |\kappa_{di}| > |\varepsilon_{d0}| \end{cases} \tag{5.4}$$

Beide Schädigungsfunktionen sind vom Maß der Beanspruchung κ_{di} abhängig, wobei κ_{di} den Wert der Dehnung ε_{i-1} in Hauptbelastungsrichtung des vorhergehenden Beanspruchungsniveaus $i-1$ annimmt. Die Verwendung des Dehnungszustandes des vorhergehenden Belastungsniveaus im Gegensatz zum tatsächlichen Belastungsniveau ist notwendig, um aus den experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien die Formbeiwerte ε_d, g_d, a und b der Schädigungsfunktionen zu bestimmen. Prinzipiell wird hierbei angenommen, dass das Materialverhalten während der Änderung des Belastungsniveaus linear ist und von den Materialkennwerten am Ende des vorgehenden Belastungsniveaus abhängt. Hierdurch ergibt sich eine Abhängigkeit der Schädigung vom Belastungsinkrement, was abweichend zu der von Bachmann [5] formulierten Schädigungsevolution ist.

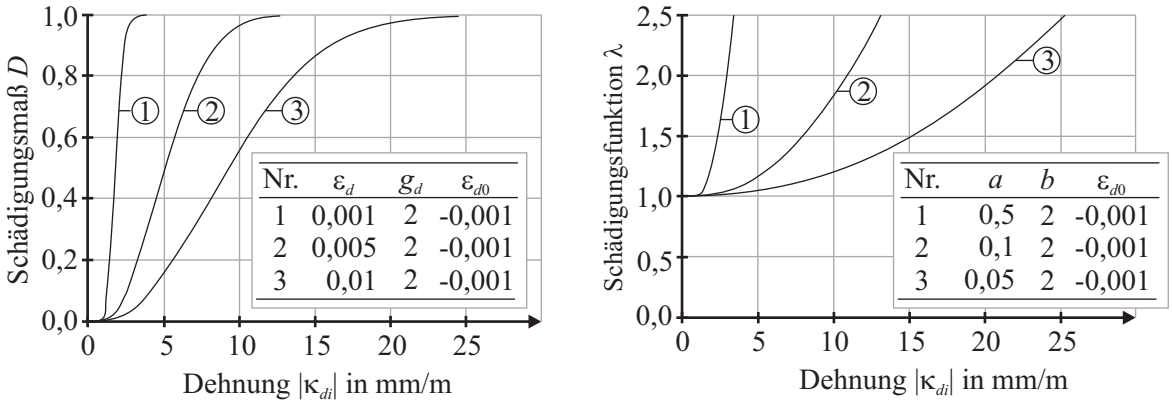
Infolgedessen tritt im ersten Belastungsschritt bei dem gewählten Ansatz keine Schädigung im Material auf, weshalb der Wahl des Belastungsinkrements eine wesentliche Bedeutung zukommt. Mit kleiner werdenden Belastungsinkrementen nimmt dessen Einfluss auf den Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linien ab. Im Gegensatz dazu führen zu groß gewählte Inkremente zu einer Verzögerung der auftretenden Schädigung. Im Extremfall kann somit das Material im zweiten Belastungsschritt bereits vollständig geschädigt sein und die auftretenden Dehnungen streben direkt nach dem linearen Materialverhalten gegen unendlich.

Bei den verwendeten Schädigungsevolutionen nach Gl. (5.3) und Gl. (5.4) tritt erst nach dem Überschreiten der Vergleichsdehnung ε_{d0} eine Änderung der Materialkennwerte E und ν auf, weshalb diese Grenze neben den Formbeiwerten ebenfalls bekannt sein muss. Sowohl die Vergleichsdehnung ε_{d0} als auch die Formbeiwerte ε_d, g_d, a und b, die den Verlauf der Schädigung definieren, sind vom aufgebrachten mehraxialen Belastungsverhältnis abhängig und müssen entsprechend ausgedrückt werden. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Schädigung unabhängig vom aktuel-

len Dehnungszustand ihren bis dahin erreichten Höchstwert nicht wieder unterschreiten kann, da die aufgetretene Schädigung bei Zug- und bei Druckbeanspruchungen irreversibel ist.

Für den untersuchten Beton können die Formbeiwerte ε_d, g_d, a und b der Schädigungsfunktionen anhand der im Versuch gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien mittels Regression der Summe der kleinsten Fehlerquadrate zwischen den berechneten und den experimentell bestimmten Dehnungen der Hauptrichtungen bestimmt werden. Als Vergleichsdehnung ε_{d0} wird die Dehnung an der Elastizitätsgrenze angesetzt ($\varepsilon_{d0} = \varepsilon_{el}$, siehe Abschnitt 4.3). Zur Vermeidung von Unstetigkeiten der Spannungs-Dehnungs-Linien an der Elastizitätsgrenze werden für die Ermittlung der Formbeiwerte die für die einzelnen Spannungsverhältnisse ermittelten Materialkennwerte $E_0 = E_{iso}$ und $\nu_0 = \nu_{iso}$ verwendet (Anhang A.4.2.4, Tabelle A.16).

Aus Vereinfachungsgründen wird $b = 2$ und entsprechend Kitzig [48] $g_d = 2$ gesetzt, so dass jeweils nur ein vom Spannungsverhältnis abhängiger Wert die Änderung des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl beschreibt (Abbildung 5.1).



a) Schädigungsmaß $D(\kappa_{di})$ des Elastizitätsmoduls nach Gl. (5.3)

b) Schädigungsfunktion $\lambda(\kappa_{di})$ der Querdehnzahl nach Gl. (5.4)

Abbildung 5.1: Mögliche Verläufe der Schädigungsfunktionen

Zur Bestimmung der zwei verbleibenden Formbeiwerte ε_d und a werden die gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der mehraxialen Versuche herangezogen, bei denen ein ausgeprägtes nichtlineares Verformungsverhalten auftritt. Dies ist zweckmäßig, da bei Versuchen mit linearem Verformungsverhalten bis zum Erreichen der maximalen Festigkeit σ_{ult} die Schädigung nur in einem sehr kleinen Bereich stattfindet und die Formbeiwerte der Schädigungsfunktionen nicht bestimmbar sind. Die Lösung der Ausgleichsrechnung erfolgt durch eine *erschöpfende Suche* (Brute-Force-Methode), wobei für ε_d der Wertebereich von $0 \ldots 0{,}1$ mit einem Inkrement von 0,00001 und für a ein Wertebereich von $0 \ldots 0{,}5$ mit einem Inkrement von 0,001 abgesucht wird. Aufgrund der großen Anzahl an möglichen Kombinationen erfolgt ein Abbruch der Suche, wenn die zu minimierende Summe der Fehlerquadrate zwischen den berechneten und den gemessenen Dehnungen der Hauptrichtungen nach dreifacher Erhöhung des langsamer wachsenden Freiwertes der erschöpfenden Suche nicht erneut unterschritten wird.

In Abbildung 5.2 sind die Formbeiwerte ε_d und a in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis dargestellt. Grundlage dieser Darstellung ist die erste Invariante des Spannungstensors der auf *Eins* normierten Spannungsverhältnisse $\alpha_1 \,/\, \alpha_2 \,/\, \alpha_3$, über die die Formbeiwerte in Abhängigkeit vom Winkel $\widetilde{\varphi}$ aufgetragen werden. Für jeden Winkel $\widetilde{\varphi}$ verläuft das Intervall der Abszisse somit von $-\sqrt{3}$ für eine hydrostatische Druckbeanspruchung bis $\sqrt{3}$ für eine hydrostatische Zugbeanspruchung. Für eine einfachere mathematische Beschreibung wird dieses Intervall entsprechend Gl. (5.5) um den Wert $\sqrt{3}$ verschoben, so dass auf der Abszisse nur positive Werte auftreten.

$$z^* = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{\sqrt{3}} + \sqrt{3} \tag{5.5}$$

Da sich bei einer hydrostatischen Beanspruchung alle Meridiane in einem Punkt schneiden, müssen die Schädigungsvariablen winkelunabhängige Werte bei $z^* = 0$ und $z^* = 2 \cdot \sqrt{3}$ aufweisen. Weiterhin ist bekannt, dass bei Spannungsverhältnissen ohne ausgeprägtes nichtlineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Zeitpunkt des Versagens mit dem Überschreiten der Vergleichsdehnung ε_{d0} zusammenfällt oder kurz danach stattfindet und die Verformungen somit bei kleinen Laststeigerungen sehr stark zunehmen müssen. Aus Gl. (5.3) und Gl. (5.4) können somit Einflüsse des Spannungsverhältnisses für die Werte von ε_d und a abgeleitet werden. Demnach muss ε_d sehr kleine und a sehr große Werte aufweisen, damit die Dehnungswerte der Spannungs-Dehnungs-Linien bei kleinen Erhöhungen des Beanspruchungsniveaus nach dem Überschreiten der Vergleichsdehnung ε_{d0} stark zunehmen.

In Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses lassen sich die Formbeiwerte ε_d und a auf Grundlage der durchgeführten Versuche mittels Gl. (5.6) und Gl. (5.7) beschreiben. Die daraus resultierenden rechnerischen Verläufe von ε_d und a sind in Abbildung 5.2 den aus den experimentellen Spannungs-Dehnungs-Linien ermittelten Größen gegenübergestellt.

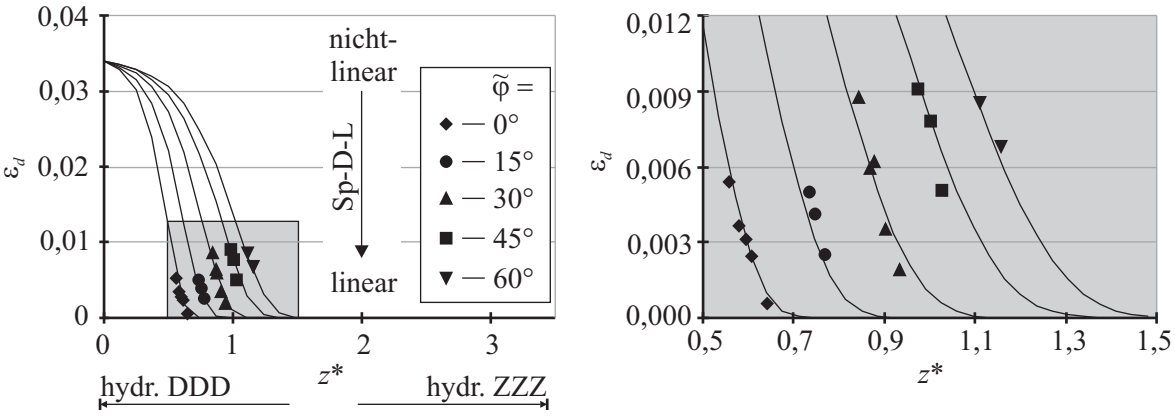
$$\begin{aligned} \varepsilon_d(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= 0{,}03442 \cdot exp\left[-0{,}01631 \cdot exp\left[c_{\varepsilon_d}(\widetilde{\varphi}) \cdot z^*\right]\right] \\ \text{mit} \qquad c_{\varepsilon_d}(\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= 0{,}000916 \cdot \widetilde{\varphi}^2 - 0{,}12794 \cdot \widetilde{\varphi} + 8{,}4024 \end{aligned} \tag{5.6}$$

$$\begin{aligned} a(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= 15{,}7359 \cdot exp\left[-67{,}94 \cdot exp\left[c_a(\widetilde{\varphi}) \cdot z^*\right]\right] \\ \text{mit} \qquad c_a(\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= -0{,}000559 \cdot \widetilde{\varphi}^2 + 0{,}07441 \cdot \widetilde{\varphi} - 4{,}8847 \end{aligned} \tag{5.7}$$

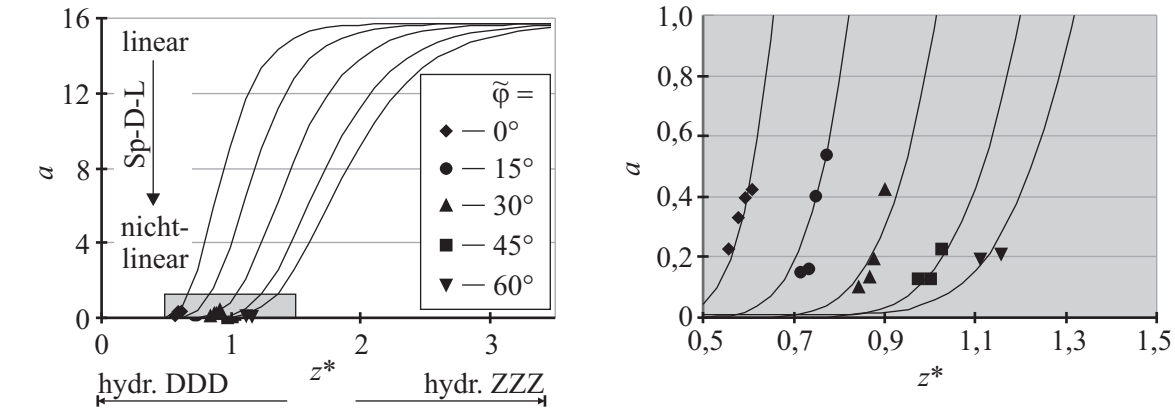
Aus Abbildung 5.2 wird ersichtlich, dass in Richtung der hydrostatischen Zugbeanspruchung die Werte für ε_d gegen Null laufen und somit die Schädigung sehr schnell anwächst. Demgegenüber nehmen die Werte von a in dieser Richtung zu und erreichen unter hydrostatischem Zug ihren Größtwert. Prinzipiell führt dies dazu, dass die Dehnungen in den Hauptrichtungen kurz nach Überschreiten der Vergleichsdehnung ε_{d0} infolge der Abnahme des Elastizitätsmoduls zunehmen und dieser Dehnungszunahme durch die Erhöhung der Querdehnzahl entgegengewirkt wird. Da die Abnahme des Elastizitätsmoduls einen größeren Einfluss auf den Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie besitzt als die Zunahme der Querdehnzahl, kommt es somit nach dem Erreichen der Vergleichsdehnung ε_{d0} bei geringer Steigerung des Beanspruchungsniveaus zu einem großen Dehnungszuwachs wenigstens in der Hauptbelastungsrichtung.

Für eine mehraxiale Beanspruchung in Richtung der hydrostatischen Druckbeanspruchung weisen ε_d und a gegenläufige Werte zur hydrostatischen Zugbeanspruchung auf. Die Werte für ε_d nehmen zu und die Werte für a nehmen bis auf Null ab. Daraus folgt, dass die Abnahme des Elastizitätsmoduls und die Zunahme der Querdehnzahl mit kleiner werdenden z^*-Werten grundsätzlich langsamer verläuft. Geht der Wert a gegen Null, ändert sich die Querdehnzahl gegenüber ihres ursprünglichen Wertes ν_0 nicht und hat infolgedessen keinen Einfluss auf das nichtlineare Verformungsverhalten des Materials.

Aufgrund fehlender Versuchswerte für den Bereich $0 \leq z^* \leq 0{,}5$ kann an dieser Stelle jedoch keine Verifizierung dieser Hypothese erfolgen, die jedoch in Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen von Launay et al. [64] steht (vgl. Abschnitt 2.1.5.4). Für die Querdehnzahl ergibt sich



a) Formbeiwert ε_d



b) Formbeiwert a

Abbildung 5.2: Verlauf der Formbeiwerte ε_d und a nach Gl. (5.6) und Gl. (5.7) für eine isotrope Schädigung mit $|\varepsilon_{d0}| > 0$

somit nur ein begrenzter Bereich von z^*-Werten bzw. Spannungsverhältnissen, bei denen durch die Änderung der Querdehnzahl ein Einfluss auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten auftritt. Wird in diese Betrachtung der in Abschnitt 4.4.4 beschriebene Verlauf der Form der Deviatorkurven von „abgerundet“ über „dreieckig“ zu „rund“ von der hydrostatischen Zug- hin zur hydrostatischen Druckbeanspruchung einbezogen, könnte sich hier ein Zusammenhang zu dem begrenzten Bereich der veränderlichen Querdehnzahl ergeben, was jedoch noch näher zu untersuchen ist.

Da nur Versuche ausgewertet werden, bei denen bis zum Erreichen der maximalen Festigkeit die Vergleichsdehnung ε_{d0} signifikant überschritten wird, ist der obere Grenzwert für a bei hydrostatischer Zugbeanspruchung nur bedingt realistisch. Aufgrund fehlender Versuchswerte mit großen hydrostatischen Druckbeanspruchungsanteilen in der Belastung gilt gleiches auch für den oberen Grenzwert von ε_d.

Für die rechnerische Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Linien ist das Vorgeben der Vergleichsdehnung ε_{d0} zur Definition des Schädigungsbeginns als kritisch zu bewerten, da diese vorab in Versuchen bestimmt werden muss. Für die Festlegung einer vom Spannungsverhältnis abhängigen Vergleichsdehnung muss demnach eine Grenzfläche bekannt sein, mit der sich der entsprechende Wert ε_{d0} berechnen lässt, wie sie beispielsweise in Abschnitt 4.3 als Elastizitätsgrenze angegeben wird.

Weiterhin kann bei einer weggesteuerten Belastung die stetige Zunahme der Querdehnzahl entsprechend Gl. (5.4) dazu führen, dass kein maximaler Spannungswert erreicht wird. Somit stellt sich nicht für alle Spannungsverhältnisse ein Entfestigungsverhalten ein (siehe Anhang D) und die

Spannungs-Dehnungs-Linien sind durch die Vorgabe von maximalen Festigkeitswerten zu begrenzen. Daraus folgt, dass bei weggesteuerten wie auch bei kraftgesteuerten Versuchen die Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Linie mit dem Erreichen der maximalen Festigkeit σ_{ult} endet und hierfür die entsprechende Grenzfläche bekannt sein muss.

An dieser Stelle soll kurz darauf hingewiesen werden, dass sich die benötigten Werte der Vergleichsdehnung ε_{d0} und der maximalen Festigkeit σ_{ult} vermutlich ebenfalls in Abhängigkeit von z^* und $\widetilde{\varphi}$ angeben lassen. In Abbildung 5.3 sind die absolut größten Dehnungswerte $|\varepsilon_{el}|$ an der Elastizitätsgrenze sowie die absolut maximalen Festigkeitswerte $|\sigma_{ult}|$ der Hauptbelastungsrichtung der eigenen mehraxialen Versuche entsprechend dargestellt. Ebenfalls abgebildet sind die sich aus einer ersten einfachen Näherung ergebenden approximierten Verläufe der beiden Größen in Abhängigkeit von z^* und $\widetilde{\varphi}$, die sich nach Gl. (5.8) und Gl. (5.9) für $|\varepsilon_{el}|$ und $|\sigma_{ult}|$ berechnen lassen. Im Gegensatz zu ε_d und a sind hierbei andere Randbedingungen zu berücksichtigen. So dürfen z. B. sowohl die Dehnungen an der Elastizitätsgrenze $|\varepsilon_{el}|$ und die maximalen Festigkeitswerten $|\sigma_{ult}|$ unter hydrostatischem Zug bzw. Druck nicht gegen Null laufen.

$$\begin{aligned} |\varepsilon_{el}(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ])| &= 0{,}015 \cdot exp\left[c_{\varepsilon_{el}}(\widetilde{\varphi}) \cdot (z^*)^3\right] + 0{,}00016 \\ \text{mit} \qquad c_{\varepsilon_{el}}(\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= -0{,}0034 \cdot \widetilde{\varphi}^2 - 0{,}395 \cdot \widetilde{\varphi} + 13 \end{aligned} \tag{5.8}$$

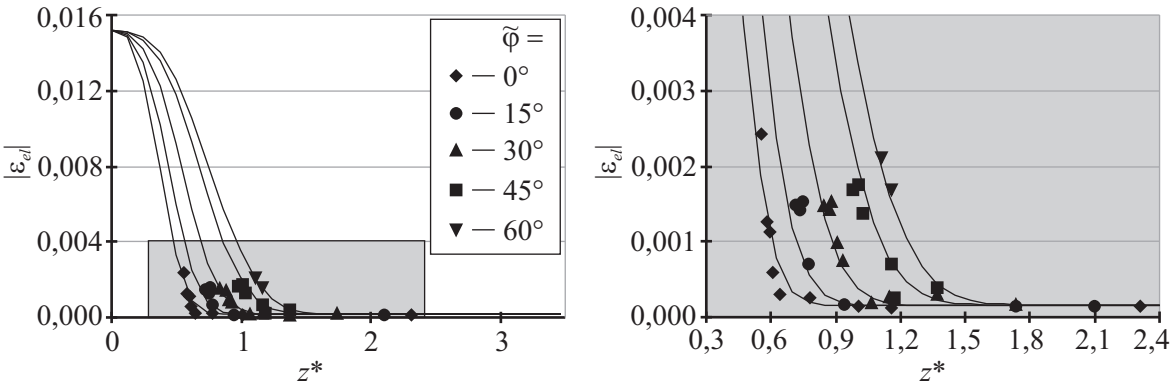
$$\begin{aligned} |\sigma_{ult}(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ])| &= 1000 \cdot exp\left[-0{,}002 \cdot exp\left[c_{\sigma_{ult}}(\widetilde{\varphi}) \cdot z^*\right]\right] + 7{,}5 \qquad (|\sigma_{ult}| \text{ in } \mathrm{N/mm^2}) \\ \text{mit} \qquad c_{\sigma_{ult}}(\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= 0{,}0013 \cdot \widetilde{\varphi}^2 - 0{,}1708 \cdot \widetilde{\varphi} + 11{,}63 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Die Frage, ob sich diese Art der Beschreibung zur Approximation von charakteristischen Datenpunkten mehraxialer Belastungsversuche tatsächlich eignet, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden und sollte Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein. Die hier vorgestellten Ergebnisse lassen jedoch interessante Aspekte aus weiterführenden Untersuchungen erwarten.

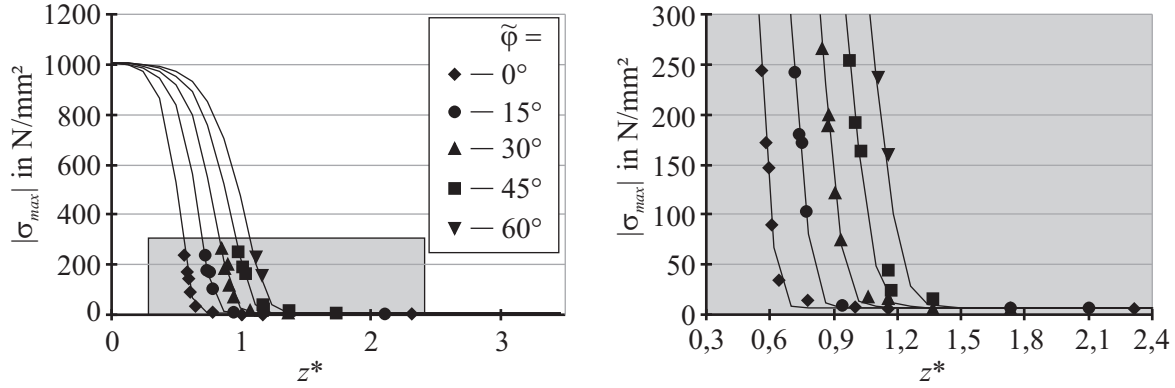
Mit den Werten ε_d und a lassen sich grundsätzlich die Spannungs-Dehnungs-Linien für alle durchgeführten Versuche beschreiben, was anhand der Gegenüberstellung aller Mittelwertkurven der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien und den rechnerisch ermittelten Kurven im Anhang D ersichtlich ist.

In Abbildung 5.4 sind die experimentell und rechnerisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien für zwei ausgewählte Spannungsverhältnisse dargestellt. Für die Vergleichsdehnung ε_{d0} wird dabei der für die einzelnen Spannungsverhältnisse tatsächlich ermittelte Wert der Elastizitätsgrenze angesetzt, um den Schädigungsbeginn zu definieren. Im Gegensatz dazu werden der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl als Mittelwerte aller Versuche herangezogen, da die Bestimmung der Formbeiwerte ε_d und a als Ausgleichsrechnung über alle Versuche erfolgte. Infolge der Verwendung der mittleren Materialparameter kommt es bereits im linear-elastischen Bereich zu Abweichungen zwischen den experimentellen und rechnerischen Kurven, die nicht durch die Schädigungsevolution hervorgerufen werden. Der Anteil der daraus resultierenden Dehnungsdifferenz über den gesamten Verlauf der Kurven müsste durch die Einführung streuender Materialkennwerte Berücksichtigung finden.

Die in Abbildung 5.4a und 5.4b gezeigten rechnerisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien wurden mit einer konstanten Spannungszunahme bestimmt (Kraftsteuerung). Bei dem in Abbildung 5.4a dargestellten Zug-Druck-Druck-Versuch (ZDD-Versuch) fällt die maximale Festigkeit mit



a) Absolutwerte der Dehnung an der Elastizitätsgrenze in Hauptbelastungsrichtung



b) Absolutwerte der maximalen Festigkeit in Hauptbelastungsrichtung

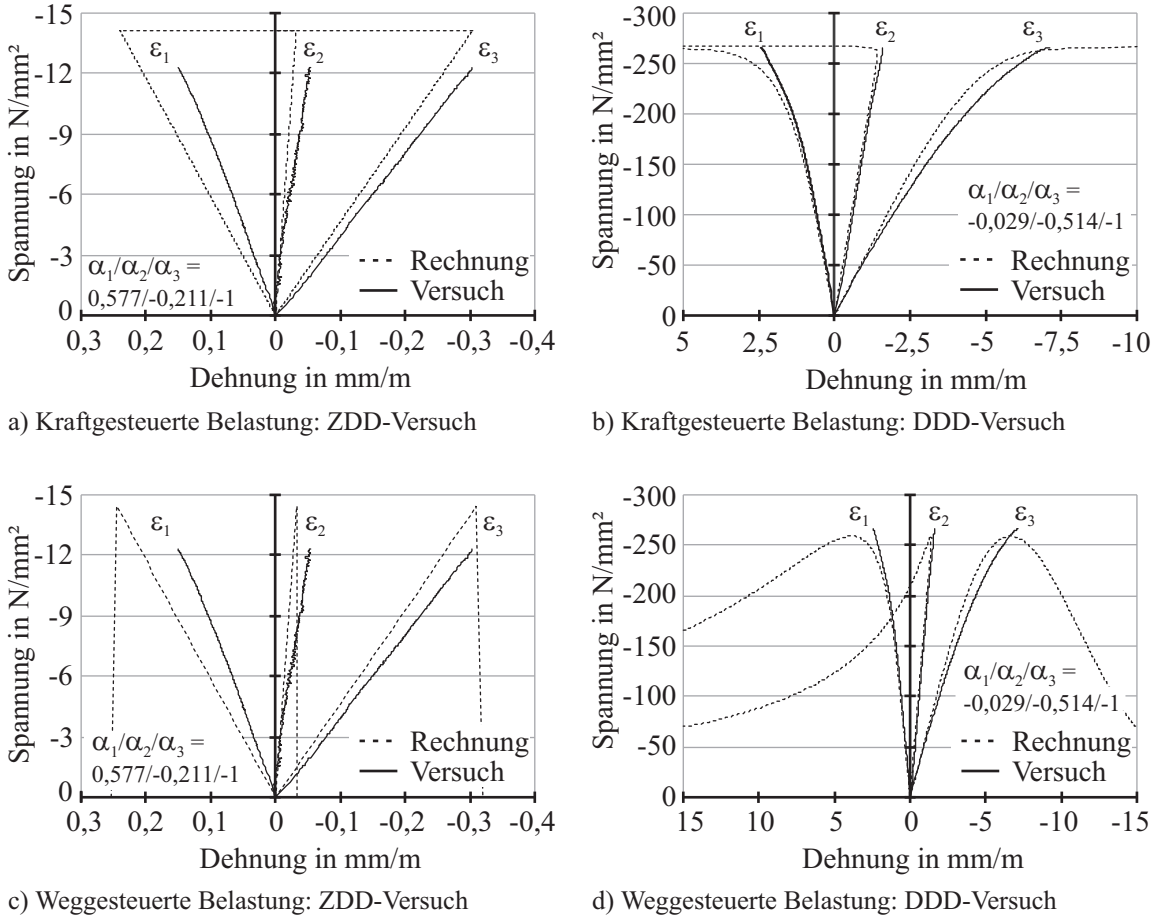
Abbildung 5.3: Absolute Dehnungswerte an der Elastizitätsgrenze und absolute maximale Festigkeitswerte $|\sigma_{ult}|$ der mehraxialen Belastungsversuche nach Gl. (5.8) und Gl. (5.9)

dem rechnerischen Schädigungsbeginn zusammen, weshalb nach dem Überschreiten der Vergleichsdehnung ε_{d0} eine nahezu vollständige Schädigung des Materials erfolgen muss. Es ist ersichtlich, dass die Kurven des rechnerisch ermittelten Materialverhaltens beim Erreichen von $\kappa_{di} = \varepsilon_{d0}$ gegen unendlich laufen und somit diesen Effekt widerspiegeln. Bis zum Auftreten der maximalen Festigkeit σ_{ult} bzw. bis zum Erreichen der Vergleichsdehnung ε_{d0} liegt demnach lineares Materialverhalten vor. Die maximale Festigkeit σ_{ult} variiert entsprechend der Abweichung zwischen den mittleren Materialparametern E und ν aller Versuche und den im betrachteten Spannungsverhältnis tatsächlich auftretenden Materialparametern.

Für die dargestellten Spannungs-Dehnungs-Linien eines dreiaxialen Druckversuchs (DDD-Versuch) in Abbildung 5.4b fallen die auftretenden Abweichungen zwischen den experimentellen und rechnerischen Werten im Bereich des linearen Materialverhaltens etwas geringer aus. Wie bereits diskutiert, resultiert dies aus der geringeren Abweichung zwischen den über alle Versuche gemittelten und den am einzelnen Spannungsverhältnis bestimmten Materialparametern E und ν.

Für die Spannungs-Dehnungs-Linien in Abbildung 5.4c und 5.4d wurden die gleichen Versuche für eine konstante Dehnungszunahme je Belastungsschritt (Wegsteuerung) nachgerechnet. Bei beiden Versuchen können bis kurz vor dem Erreichen der maximalen Festigkeit σ_{ult} keine wesentlichen Unterschiede zu den Kurven in Abbildung 5.4a und 5.4b verzeichnet werden. Beim ZDD-Versuch fallen die Spannungs-Dehnungs-Linien nach dem Erreichen der maximalen Festigkeit σ_{ult} auf Null ab, da bereits bei einer kleinen Dehnungszunahme eine nahezu vollständige Schädigung des Materials vorliegt. Eine detaillierte Abbildung des Entfestigungsverhaltens lässt sich dabei nur durch die Verringerung des Belastungsinkrements erzielen, die jedoch durchaus mehrere Zehnerpotenzen betragen kann.

Für den DDD-Versuch weisen die rechnerischen Spannungs-Dehnungs-Linien prinzipiell ein ausgeprägtes Entfestigungsverhalten auf (Abbildung 5.4d). Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Belastungsrichtungen durch die Änderung des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl kann es jedoch bei wesentlichen Änderungen der Dehnungsverhältnisse untereinander zu einer stetigen Spannungszunahme bzw. zu wiederholten Ver- und Entfestigungen des Materials kommen, was auf die steigende Querdehnzahl bei Dehnungszunahme zurückzuführen ist. Somit ist es für die Beschreibung einer streng monotonen Entfestigung nach dem Erreichen von σ_{ult} notwendig, den Wert der Querdehnzahl auf einen Höchstwert zu begrenzen oder über die gesamte Beanspruchung als konstant anzunehmen. Bei einer veränderlichen Querdehnzahl ist zu erwarten, dass der auftretende Höchstwert vom Spannungsverhältnis abhängig ist.



a) Kraftgesteuerte Belastung: ZDD-Versuch

b) Kraftgesteuerte Belastung: DDD-Versuch

c) Weggesteuerte Belastung: ZDD-Versuch

d) Weggesteuerte Belastung: DDD-Versuch

Abbildung 5.4: Rechnerisch ermittelte Spannungs-Dehnungs-Linien für eine kraftgesteuerte und eine weggesteuerte Beanspruchung mit isotroper Schädigung und $|\varepsilon_{d0}| > 0$

Abbildung 5.5 zeigt am Beispiel des weggesteuerten dreiaxialen Druckversuchs, wie sich die bereits diskutierte Größe des Belastungsinkrements auf die rechnerischen Spannungs-Dehnungs-Linien auswirkt. Ausgehend von einem Belastungsinkrement von 0,002 mm, welches ungefähr auch im realen Versuch erreicht wurde, erfolgt der Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien für Belastungsinkremente von 0,001 mm und 0,1 mm.

Eine Halbierung des Belastungsinkrements führt zu keiner wesentlichen Änderung der Spannungs-Dehnungs-Linien. Die Linien verlaufen sowohl im Bereich vor als auch nach der maximalen Festigkeit nahezu identisch und es tritt eine um ca. $0{,}5\,\mathrm{N/mm^2}$ geringere maximale Festigkeit σ_{ult} bei der langsamer aufgebrachten Beanspruchung auf, wobei der Unterschied weniger als 1% von σ_{ult} beträgt.

Demgegenüber erhöht sich bei einer Erhöhung der Belastungsinkrements auf das 50-fache die maximale Festigkeit σ_{ult} um ca. $40\,\mathrm{N/mm^2}$ (ca. 15%). Die Spannungs-Dehnungs-Linien bei einem großen Inkrment verlaufen dabei bis zu einem höheren Spannungsniveau linear bzw. die Schädigungen haben einen verzögerten Einfluss auf das Materialverhalten. Im Entfestigungsbereich nähern sich die Kurven berechnet mit den verschiedenen Belastungsinkrmenten mit zunehmender Dehnung wieder aneinander an, da sich die Änderung der Materialkennwerte und speziell die Abnahme des Elastizitätsmoduls abschwächt.

Sind nach der Auswertung der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien die Verläufe der Formbeiwerte und somit die Verläufe der Schädigungsfunktionen in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses bekannt, lässt sich der Einfluss der Größe des Belastungsinkrements auf den Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linien durch die Anwendung eines Näherungsverfahrens, wie beispielsweise dem Newton-Raphson-Verfahren, eliminieren.

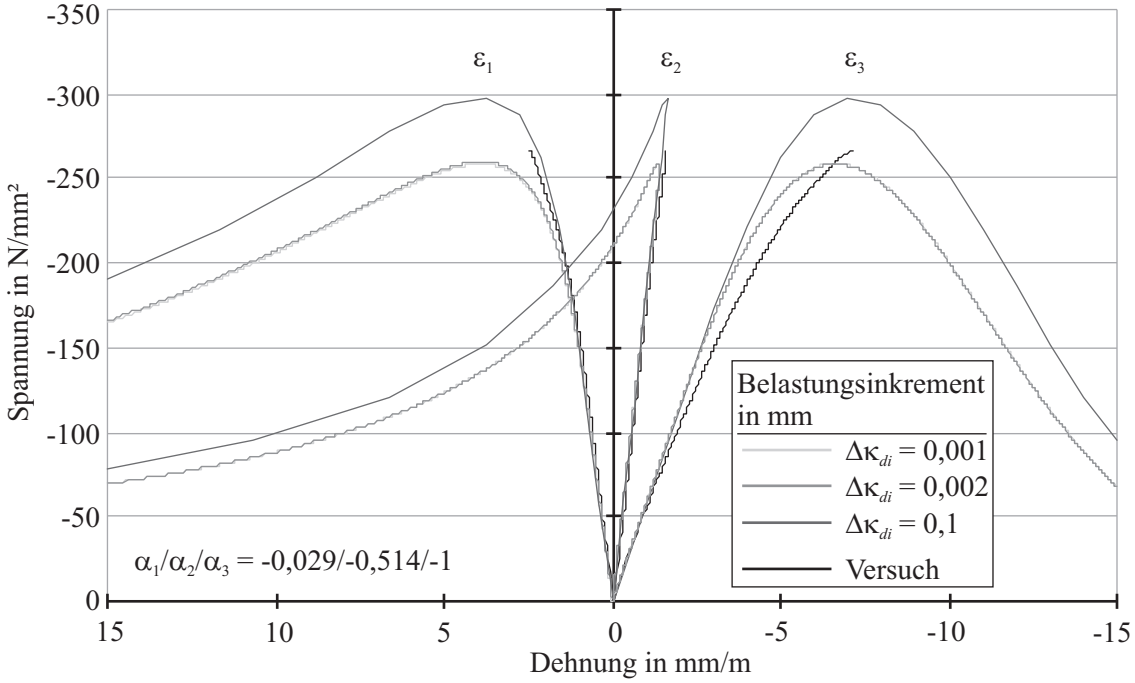


Abbildung 5.5: Rechnerische Spannungs-Dehnungs-Linien in Abhängigkeit des Belastungsinkrements

Bei der vorgestellten Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens des untersuchten Betons unter mehraxialer Beanspruchung gestaltet sich die Approximation des Materialverhaltens im Wesentlichen in zwei Punkten problematisch. Dies ist zum einen die notwendige Kenntnis der Vergleichsdehnung ε_{d0}, die den Schädigungsbeginn definiert und mittels mehraxialer Versuche bestimmt werden sollte. Zum anderen kommt es durch den gewählten Ansatz für den Verlauf der Querdehnzahl zu einer fehlerhaften Beschreibung des Entfestigungsbereichs, weshalb die maximalen Festigkeiten σ_{ult} ebenfalls bekannt sein sollten. Zur Beseitigung dieser Schwachpunkte wird eine erneute Auswertung der Versuchsdaten für isotropes Materialverhalten mit isotroper Schädigung vorgenommen, wobei jedoch Modifikationen bei den Annahmen der Schädigungsevolution erfolgen.

5.2.2 Isotrope Schädigung mit Schädigungsbeginn zu Belastungsbeginn

Damit zur Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens keine Grenzfläche charakteristischer Punkte des Materialverhaltens mehr benötigt wird, wird im Folgenden der Wert der Vergleichsdehnung ε_{d0} für alle Spannungsverhältnisse zu $\varepsilon_{d0} = 0$ festgelegt und somit der Schädigungsbeginn

mit dem Belastungsbeginn gleichgesetzt. Weiterhin wird die Querdehnzahl über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten, da eine veränderliche Querdehnzahl vermutlich nur auf die Spannungs-Dehnungs-Linien eines speziellen Intervalls von z^*-Werten einen Einfluss ausübt und im Entfestigungsbereich zu Unregelmäßigkeiten führen kann.

Um den Fortschritt des Schädigungsprozesses speziell im Bereich niedriger Belastungen zu beeinflussen und rechnerisch einer zu schnell voranschreitenden Schädigung entgegenzuwirken, wird der bisher als konstant angenommene Formbeiwert g_d neben ε_d als zweiter Parameter ebenfalls in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses ausgedrückt.

In Abbildung 5.6 sind die Verläufe des Schädigungsmaßes D in Abhängigkeit von g_d dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit größeren g_d-Werten die Schädigung ab Belastungsbeginn über ein größeres Beanspruchungsintervall langsamer voranschreitet, anschließend jedoch stärker zunimmt als bei kleineren g_d-Werten. Werden darauf aufbauend die Spannungs-Dehnungs-Linien berechnet, kann ein quasi-lineares Materialverhalten nur mit kleinen g_d-Werten abgebildet werden.

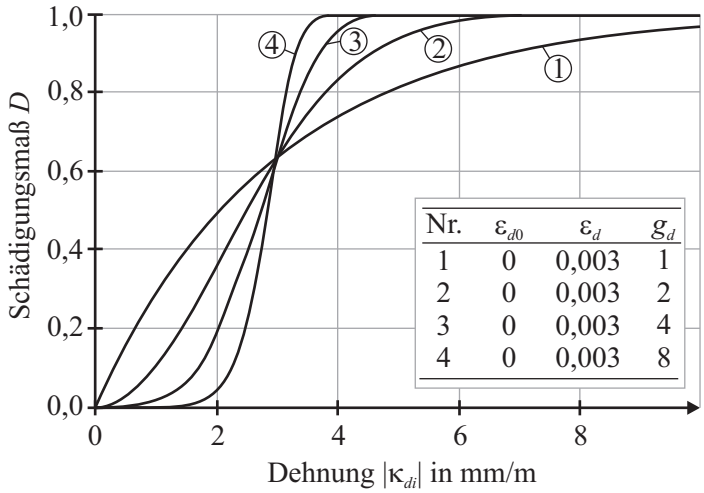
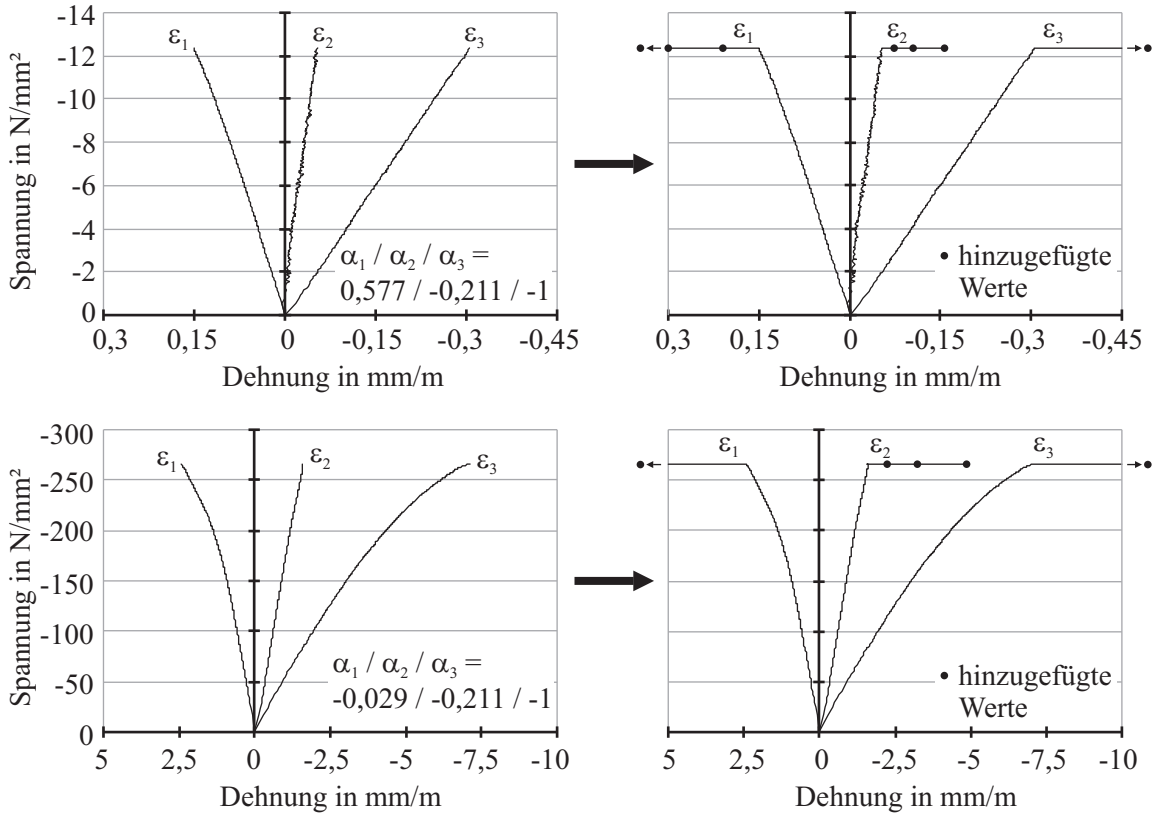


Abbildung 5.6: Verlauf des Schädigungsmaßes D nach Gl. (5.3) in Abhängigkeit von g_d

Neben den mathematischen Beschreibungen der Materialkennwerte E und ν in Abhängigkeit des Belastungsniveaus werden zudem die experimentell gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien modifiziert, um eine bessere Approximation der maximalen Festigkeit σ_{ult} zu erreichen. Hierfür werden jeder Spannungs-Dehnungs-Linie drei Belastungsschritte hinzugefügt, bei denen die Belastungssteigerung jeweils $\Delta\sigma = 0{,}01\,\mathrm{N/mm^2}$ beträgt und die zugehörigen Dehnungen den 1,2-fachen, den 1,5-fachen und den 2-fachen der zu σ_{ult} zugehörigen Dehnungswerte je Richtung entsprechen (Abbildung 5.7). Somit erhält der Punkt der maximalen Festigkeit σ_{ult} bei der Ermittlung der Formbeiwerte eine höhere Wichtung gegenüber den anderen Datenpunkten und ein horizontaler Anstieg der rechnerischen Spannung-Dehnungs-Linien in diesem Bereich wird forciert.

Aufgrund des Schädigungsbeginns mit dem Belastungsbeginn können für die Ermittlung der unbekannten Formbeiwerte ε_d und g_d des Schädigungsmaßes D die Spannungs-Dehnungs-Linien aller Spannungsverhältnisse herangezogen werden. Außerdem erfolgt die Ermittlung der Formbeiwerte unter Verwendung anfänglicher Materialkennwerte E_0 und ν_0 entsprechend der Mittelwerte aller Versuche, da durch den Schädigungsbeginn mit dem Belastungsbeginn stetige Spannungs-Dehnungs-Linien gewährleistet werden.

Zur Bestimmung der zwei Formbeiwerte ε_d und g_d in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses wird in ähnlicher Weise wie in Abschnitt 5.2.1 vorgegangen. Der Erfolg der *erschöpfenden Suche* hängt dabei wiederum maßgeblich von der Wahl der Inkrementgröße und des abgesuchten Bereichs



a) Gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien b) Modifizierte Spannungs-Dehnungs-Linien

Abbildung 5.7: Modifikation der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien

der einzelnen Formbeiwerte ab. Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Auswertung der Versuche in Abschnitt 5.2.1 für eine isotrope Schädigung mit $|\varepsilon_{d0}| > 0$ ist bekannt, dass signifikante Unterschiede in der Größe der Formbeiwerte in Abhängigkeit von der Ausprägung des nichtlinearen Verformungsverhaltens existieren. Daher werden bei der Vorgabe der abzusuchenden Bereiche und Inkrementgrößen für Versuche mit und ohne ausgeprägtem nichtlinearen Verformungsverhalten verschiedene Werte entsprechend Tabelle 5.1 vorgegeben.

Tabelle 5.1: Untersuchte Bereiche und gewählte Inkrementgrößen für die *erschöpfende Suche* zur Bestimmung der Formbeiwerte ε_d und g_d des Schädigungsmaßes D gemäß Gl. (5.3) mit $\varepsilon_{d0} = 0$

Formbeiwert	Nichtlineares Verformungsverhalten			
	ausgeprägt		nicht ausgeprägt	
	Bereich	Inkrement	Bereich	Inkrement
ε_d	0 – 0,015	0,00002	0 – 0,005	0,00001
g_d	0 – 10	0,1	0 – 40	0,1

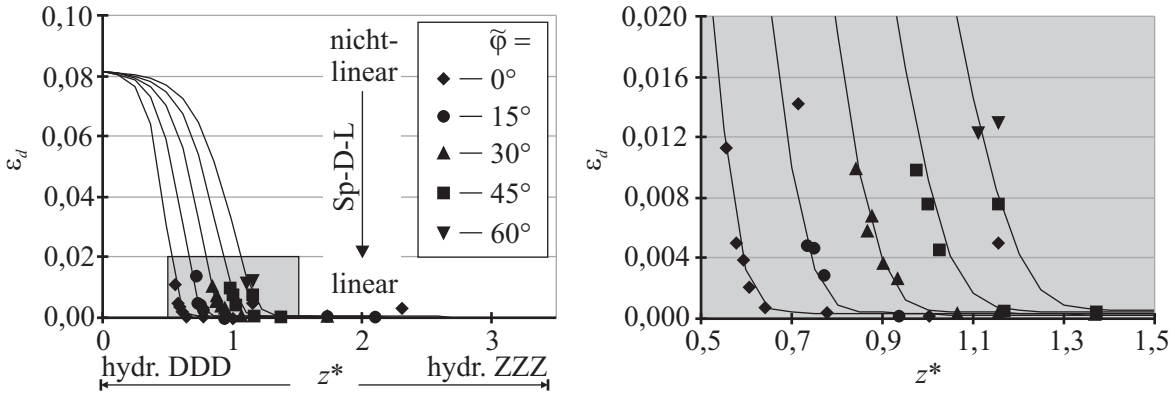
Die sich bei der Auswertung der Versuche ergebenden Formbeiwerte ε_d und g_d sowie die daraus abgeleiteten Verläufe gemäß Gl. (5.10) und Gl. (5.11) in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Für ε_d ergeben sich die gleichen Randbedingungen für den oberen und den unteren Grenzwert wie in Abschnitt 5.2.1, was bedeutet, dass ε_d vom Spannungsverhältnis unabhängige Werte für die hydrostatische Zug- und Druckbeanspruchung annehmen muss.

Damit bei großen z^*-Werten, d. h. bei Versuchen mit wenigstens einer Zugbeanspruchungskomponente, Einfluss auf die abzubildenden Festigkeiten genommen werden kann, muss die Bestim-

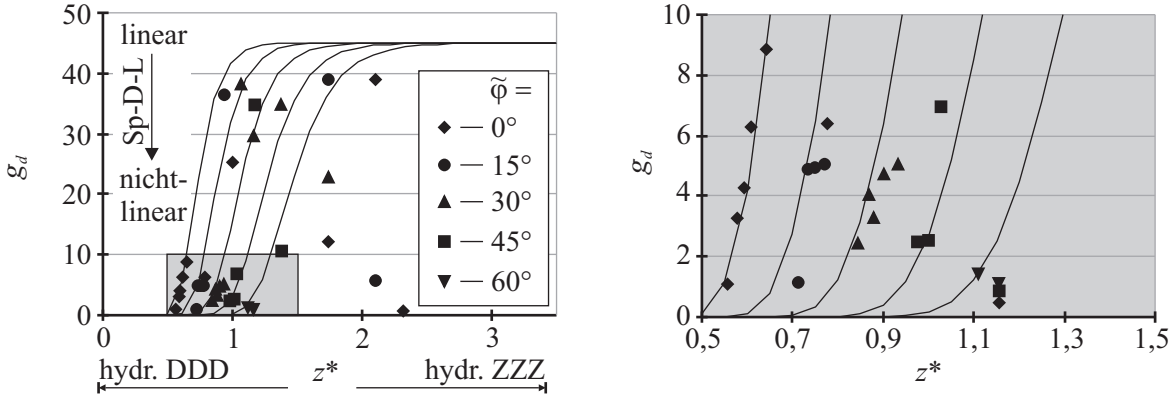
mungsgleichung von ε_d gemäß Gl. (5.10) um einen vom Spannungsverhältnis abhängigen und einem konstanten Term gegenüber Gl. (5.6) zur Bestimmung von ε_d nach Abschnitt 5.2.1 erweitert werden. Zusätzlich muss für $c_{\varepsilon_d}(\widetilde{\varphi})$ anstelle eines Polynoms 2. Grades (siehe Gl. (5.6)) ein Polynom 3. Grades gemäß Gl. (5.10) zur hinreichenden Approximation des Formbeiwerts ε_d verwendet werden. Diese Erhöhung der Komplexität des Ansatzes für $\varepsilon_d(z^*,\widetilde{\varphi})$ ist notwendig, da die Verläufe der rechnerischen Spannungs-Dehnungs-Linien sehr sensitiv auf Abweichungen $\Delta\varepsilon_d$ zwischen den approximierten und aus den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien ermittelten Werten reagieren.

$$\begin{aligned}\varepsilon_d(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= 0{,}08 \cdot exp\left[-0{,}0034 \cdot exp\left[c_{\varepsilon_d}(\widetilde{\varphi}) \cdot z^*\right]\right] \\ &\quad + 0{,}0015 \cdot exp\left[-1{,}5^{\left(\left(\frac{60^\circ-\widetilde{\varphi}}{25^\circ}\right)\cdot z^*\right)}\right] + 0{,}0018 \\ \text{mit} \quad c_{\varepsilon_d}(\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= -0{,}00001 \cdot \widetilde{\varphi}^3 + 0{,}002 \cdot \widetilde{\varphi}^2 - 0{,}1811 \cdot \widetilde{\varphi} + 11{,}5\end{aligned} \tag{5.10}$$

$$\begin{aligned}g_d(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= 45 \cdot exp\left[-500 \cdot exp\left[c_{g_d}(\widetilde{\varphi}) \cdot z^*\right]\right] \\ \text{mit} \quad c_{g_d}(\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= -0{,}0006 \cdot \widetilde{\varphi}^2 + 0{,}11 \cdot \widetilde{\varphi} - 8{,}92\end{aligned} \tag{5.11}$$



a) Formbeiwert ε_d



b) Formbeiwert g_d

Abbildung 5.8: Verlauf der Formbeiwerte ε_d und g_d nach Gl. (5.10) und Gl. (5.11) für eine isotrope Schädigung mit $\varepsilon_{d0} = 0$

Die Beschreibung des Verlaufs von g_d erfolgt nach Gl. (5.11), wobei sich die rechnerischen Spannungs-Dehnungs-Linien gegenüber Abweichungen zu den aus den experimentellen Daten ermittelten Werten von g_d robuster verhalten als bei Abweichungen von ε_d. Grundsätzlich muss gewährleistet

sein, dass für alle Spannungsverhältnisse $g_d > 0$ gilt, wobei kleine Werte von g_d zu einem größeren Schädigungsmaß bei kleinen Dehnungen $|\kappa_{di}|$ führen. Mit der Zunahme der Dehnungen $|\kappa_{di}|$ nimmt das Schädigungsmaß bei kleinen Werten von g_d jedoch langsamer zu als bei großen g_d-Werten, so dass bei großen Werten von g_d die vollständige Schädigung des Materials schneller erreicht wird. Es sei darauf hingewiesen, dass g_d unter einer hydrostatischen Druckbeanspruchung den Wert Null annimmt und infolgedessen rechnerisch ein vom Dehnungszustand unabhängiges konstantes Schädigungsmaß auftritt. Somit liegt nach dem ersten Belastungsinkrement ein lineares Materialverhalten mit reduzierten Materialkennwerten vor, dessen rechnerische Spannungs-Dehnungs-Linie keine maximale Festigkeit σ_{ult} erreicht. Somit wäre eine Anpassung des Verlaufs von g_d notwendig, die jedoch erst bei einer Verifikation mit entsprechenden Versuchswerten sinnvoll ist und weshalb an dieser Stelle darauf verzichtet wird.

In Abbildung 5.9 sind die experimentell und rechnerisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der zwei ausgewählten Spannungsverhältnisse als kraft- und weggesteuerter Versuch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bei entsprechender Vorgabe von g_d auch bei zu Belastungsbeginn einsetzender Schädigung ein quasi-linearer Bereich im Materialverhalten realisiert werden kann. Wie der ZDD-Versuch zeigt, kann mit den gewählten Ansätzen für ε_d und g_d ein Verformungsverhalten beschrieben werden, bei dem nahezu der gesamte Schädigungsprozess bei einer geringen Beanspruchungssteigerung abläuft. Somit ist es möglich, das spröde Verhalten des Betons infolge einer großen Zugbeanspruchungskomponente abzubilden, ohne einen erst während der Belastung einsetzenden Schädigungsbeginn definieren zu müssen.

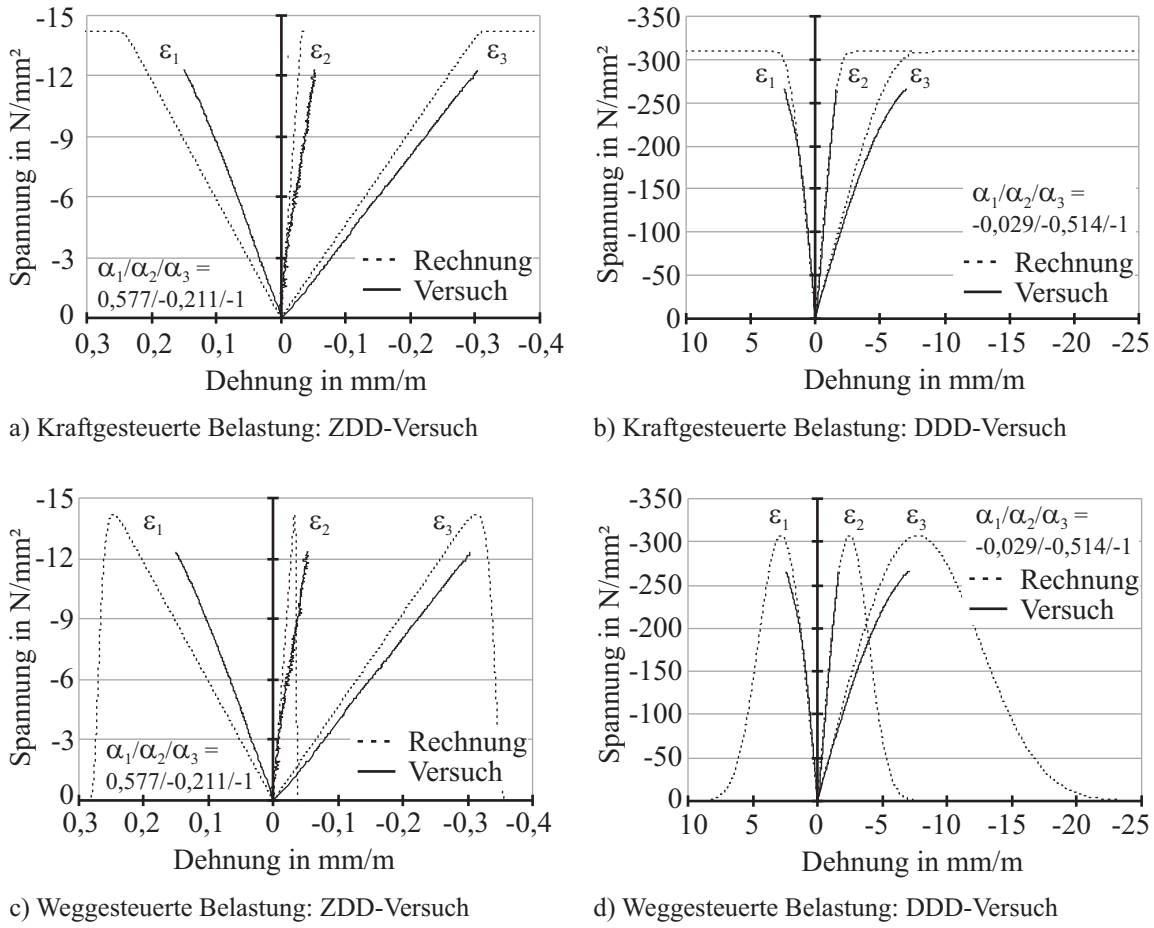
Weiterhin zeigt der Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Linien des dargestellten dreiaxialen Druckversuchs, dass auch bei zu erwartenden großen Dehnungen ein quasi-linearer Bereich im Spannungs-Dehnungs-Verhalten vorhergesagt werden kann und sich mit steigender Beanspruchung ein nichtlineares Verhalten einstellt. Dabei werden mit zunehmender Dehnung die Abweichungen zwischen den experimentell und rechnerisch bestimmten Kurven größer. Für die beiden dargestellten Versuche sind die Dehnungen der rechnerischen Kurven in Hauptbelastungsrichtung und somit in der Richtung, die das Maß der Schädigung definiert, betragsmäßig kleiner als die tatsächlichen Dehnungen. Diese Konstellation begünstigt die in ebenfalls beiden Versuchen auftretende Überschätzung der maximalen Festigkeit σ_{ult}, was sich auch bei anderen Spannungsverhältnissen einstellt (vgl. Anhang D).

Die Abhängigkeit der Schädigung vom betragsmäßigen Dehnungswert der Hauptbelastungsrichtung führt zu einer streng monotonen Zunahme des Schädigungsmaßes. Infolgedessen verlaufen die Spannungs-Dehnungs-Linien im Entfestigungsbereich bei einer weggesteuerten Beanspruchung ebenfalls streng monoton gegen die Spannung Null.

Zusammenfassung

Für die Approximation der Spannungs-Dehnungs-Linien des untersuchten anfänglich isotropen Betons unter mehraxialer Beanspruchung wurde eine lastinduzierte isotrope Schädigung angenommen. Die Auswirkungen des Schädigungsprozesses auf das Materialverhalten werden dabei über eine vom Spannungsverhältnis der aufgebrachten Beanspruchung und vom Belastungsniveau abhängige Änderung der Materialparameter E und ν der Nachgiebigkeitsmatrix nach Gl. (2.3) berücksichtigt.

Zunächst wurde der Schädigungsprozess durch die von jeweils einem Parameter abhängige Änderung der Querdehnzahl und des Elastizitätsmoduls beschrieben. Dabei erfolgte der Schädigungsbeginn durch die Vorgabe einer Vergleichsdehnung ε_{d0} an der Elastizitätsgrenze. In einer zweiten Berechnungsvariante wurde der Schädigungsbeginn mit dem Belastungsbeginn gleichgesetzt und



a) Kraftgesteuerte Belastung: ZDD-Versuch

b) Kraftgesteuerte Belastung: DDD-Versuch

c) Weggesteuerte Belastung: ZDD-Versuch

d) Weggesteuerte Belastung: DDD-Versuch

Abbildung 5.9: Spannungs-Dehnungs-Linien mit isotroper Schädigung und $\varepsilon_{d0} = 0$

eine konstante Querdehnzahl für den gesamten Beanspruchungsverlauf angenommen. Aufgrund dieser Vereinfachung bei der Beschreibung des Schädigungsprozesses war es notwendig, das Schädigungsmaß des Elastizitätsmoduls mit zwei vom Spannungsverhältnis abhängigen Parametern zu beschreiben.

Bei der Berechnung der Spannungs-Dehnungs-Linien mit einer veränderlichen Querdehnzahl können im Bereich bis zur maximalen Festigkeit die experimentell ermittelten Kurven gut abgebildet werden. Die angenommene Zunahme der Querdehnzahl kann jedoch nach dem Überschreiten eines vom Spannungsverhältnis abhängigen Dehnungswertes dazu führen, dass ein Materialverhalten beschrieben wird, welches nicht im Erwartungsbereich liegt und als unrealistisch bewertet wird.

Vergleichend treten demgegenüber bei der Berechnung der Spannungs-Dehnungs-Linien mit einer konstanten Querdehnzahl und einem angenommenen Schädigungsbeginn zum Belastungsbeginn bis zum Erreichen der maximalen Festigkeit σ_{ult} größere Abweichungen zu den experimentellen Daten auf. Nach dem Überschreiten der maximalen Festigkeit σ_{ult} kommt es jedoch zu einer streng monotonen Entfestigung, was dem erwarteten Materialverhalten des untersuchten Betons entspricht. Grundsätzlich ist jedoch zu beachten, dass für den Bereich nach dem Überschreiten der maximalen Festigkeiten σ_{ult} keine Verifizierung der rechnerischen Spannungs-Dehnungs-Linien möglich ist, da hierzu im Versuch keine Daten ermittelt werden konnten.

Eine ausführliche Bewertung der theoretischen Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Linien, insbesondere hinsichtlich der approximierten mehraxialen Festigkeitswerte und den zugehörigen Dehnungswerten, wird in Abschnitt 5.4 vorgenommen. Die Mittelwertkurven aller gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien sind den rechnerisch ermittelten Kurven im Anhang D gegenübergestellt.

5.3 Orthotrope Schädigung

Die Approximation der Spannungs-Dehnungs-Linien unter der Annahme einer isotropen Schädigung hat gezeigt, dass eine Beschreibung des Materialverhaltens grundsätzlich ohne zusätzliche Kenntnis der Grenzflächen für charakteristische Punkte im Materialverhalten möglich ist. Um die vorhandenen Differenzen zwischen den experimentellen und rechnerischen Kurven, speziell im Bereich der maximalen Festigkeit σ_{ult}, weiter zu reduzieren, wird eine erneute Auswertung der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien unter der Annahme einer orthotropen Schädigung durchgeführt.

Entsprechend der Herleitung der Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix des Materialgesetzes von Rizzi & Carol [98] nach Gl. (2.11) ergibt sich hierbei eine Schädigungsfunktion, die in Abhängigkeit der Beanspruchung in den drei Hauptrichtungen j das Maß der Schädigung D_j in diesen Richtungen entsprechend definiert (vgl. Abschnitt 2.1.5.3). Durch die Kopplung der einzelnen Schädigungsfunktionen der Hauptrichtungen ergeben sich dabei Änderungen der Komponenten der Nebendiagonalen der Nachgiebigkeitsmatrix unter Beibehaltung der Symmetrie, die nicht den Änderungen der Elastizitätsmoduli der Hauptdiagonalen entsprechen. Für das anfänglich isotrope Material liegt damit eine Beschreibung einer lastinduzierten Schädigung vor, die bei einem Vertauschen der Beanspruchungsrichtungen unter gleichen Belastungsniveaus zu entsprechend gleichen Schädigungsmaßen D_j in den vertauschten Richtungen führt, was bei einem anfänglich isotropen Material vorausgesetzt wird.

Die Ermittlung der zwei freien Parameter ε_d und g_d der Schädigungsfunktion in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis erfolgt in gleicher Weise wie in Abschnitt 5.2.2. Dabei bleiben die verwendeten Inkrementgrößen und Grenzen der abgesuchten Bereiche unverändert und können Tabelle 5.1 entnommen werden. Die mit der *erschöpfenden Suche* aus den Versuchen bestimmten Formbeiwerte sowie deren daraus ermittelten rechnerischen Verläufen in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses sind in Abbildung 5.10 dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass sich unter der Annahme einer orthotropen Schädigung bei der Beschreibung der Formbeiwerte ε_d bzw. g_d für Spannungsverhältnisse mit gleichem Winkel $\widetilde{\varphi}$ korrespondierende, um einen vom Winkel $\widetilde{\varphi}$ abhängigen Betrag Δz^* verschobene, Verläufe ergeben. Unter Erhaltung der Randbedingungen für die Formbeiwerte aus Abschnitt 5.2.1 ergeben sich bei orthotroper Schädigung die nach Gl. (5.12) und Gl. (5.13) angegebenen Beziehungen für ε_d bzw. g_d in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses.

$$\begin{aligned}\varepsilon_d(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= 0{,}05 \cdot exp\left[-0{,}003 \cdot exp\left[11{,}3 \cdot \Delta z_{e_d}{}^*(z^*,\widetilde{\varphi})\right]\right] \\ &\quad + 0{,}0015 \cdot exp\left[-\left(1{,}5^{\left(\left(\frac{60^\circ-\widetilde{\varphi}}{25^\circ}\right)\cdot \Delta z_{e_d}{}^*\right)}\right)\right] + 0{,}00015\end{aligned} \tag{5.12}$$

mit

$$\Delta z_{e_d}{}^*(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ]) = \begin{cases} z^* - \left(-0{,}000016 \cdot \widetilde{\varphi}^2 + 0{,}0105 \cdot \widetilde{\varphi}\right) & \text{für} \quad z^* > -0{,}000016 \cdot \widetilde{\varphi}^2 + 0{,}0105 \cdot \widetilde{\varphi} \\ 0 & \text{für} \quad z^* \leq -0{,}000016 \cdot \widetilde{\varphi}^2 + 0{,}0105 \cdot \widetilde{\varphi} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} g_d(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= 45 \cdot exp\left[-500 \cdot exp\left[-8{,}8 \cdot \Delta z_{g_d}{}^*(z^*,\widetilde{\varphi})\right]\right] \\ \text{mit} \qquad \Delta z_{g_d}{}^*(z^*,\widetilde{\varphi}[^\circ]) &= z^* + (-0{,}0093 \cdot \widetilde{\varphi}) \end{aligned} \tag{5.13}$$

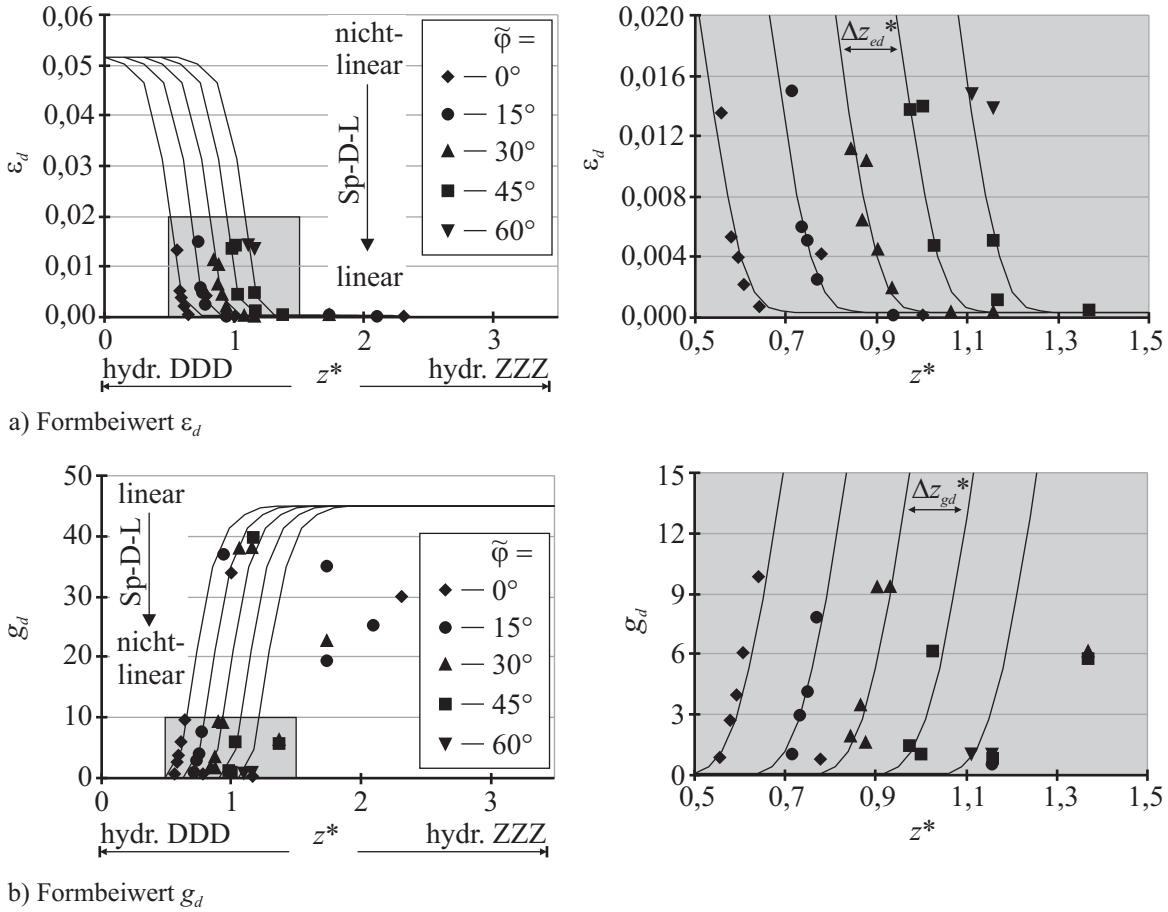


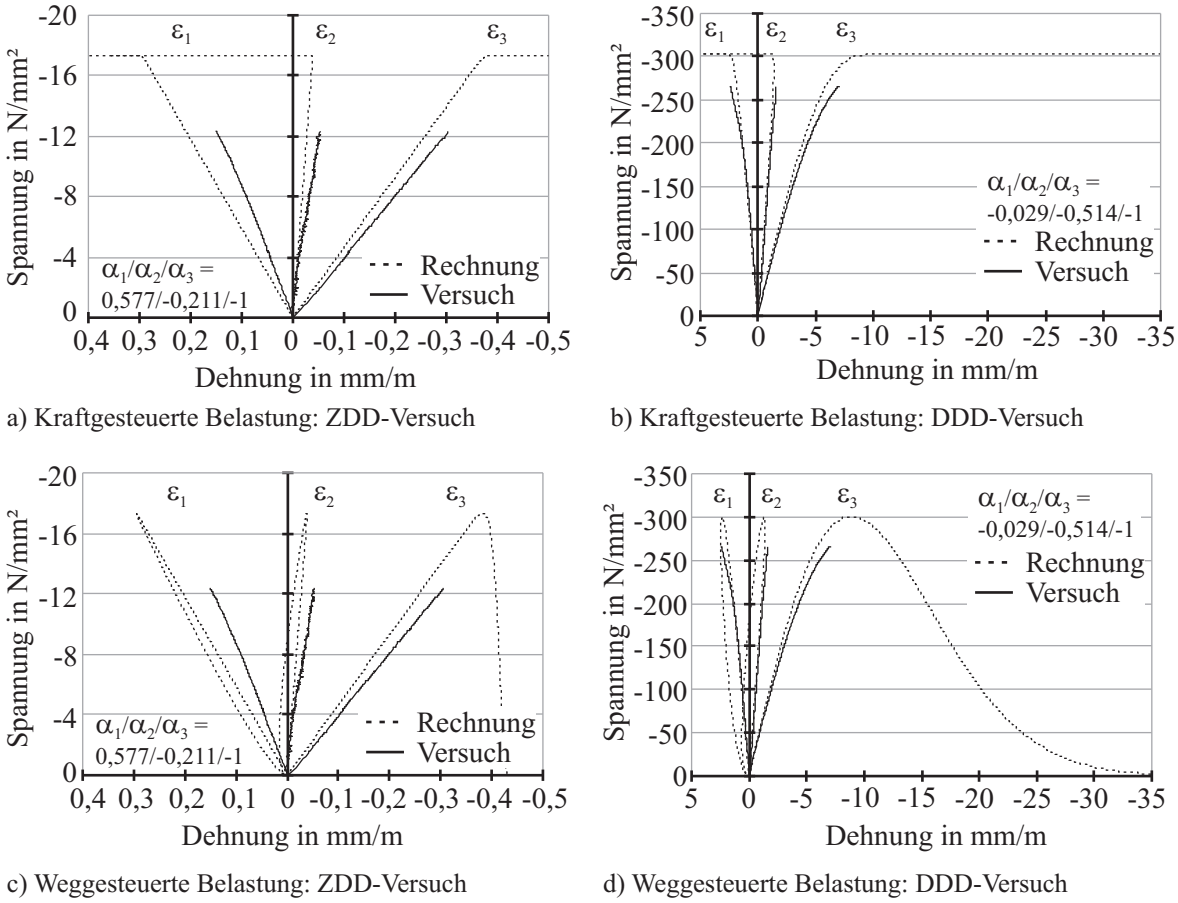
Abbildung 5.10: Verlauf der Formbeiwerte ε_d und g_d nach Gl. (5.10) und Gl. (5.11) für eine orthotrope Schädigung mit $\varepsilon_{d0} = 0$

In Abbildung 5.11 sind für den bereits besprochenen ZDD-Versuch und DDD-Versuch die mittels Gl. (5.12) und Gl. (5.13) berechneten Spannungs-Dehnungs-Linien dargestellt. In beiden Fällen werden sowohl bei der kraft- als auch bei der weggesteuerten Beanspruchung die gemessenen Kurven gut approximiert, was ebenfalls für alle weiteren untersuchten Spannungsverhältnisse gilt (siehe Abhang D).

Für eine realitätsnahe Abbildung der durchgeführten Versuche muss dabei die Berechnung der Spannungs-Dehnungs-Linien mit einem konstanten Spannungsverhältnis durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 3.4.3). Hierfür wird bei einem kraftabhängigen Belastungsinkrement dieses entsprechend des Spannungsverhältnisses in den drei Belastungsrichtungen aufgebracht. Für ein verformungsabhängiges Belastungsinkrement ist das Vorgehen ähnlich, wobei das vorgegebene Dehnungsinkrement in Hauptbelastungsrichtung in ein proportionales Spannungsverhältnis umgerechnet werden muss. Hierfür wird mit den Schädigungsfunktionen in Abhängigkeit des Dehnungszustandes des vorhergehenden Belastungsniveaus die Spannung in der Hauptbelastungsrichtung z. B. für Hauptbelastungsrichtung 1 gemäß Gl. (5.14) ermittelt und die Belastung entsprechend des Spannungsverhältnisses für die zwei verbleibenden Richtungen festgelegt.

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_1}{\dfrac{\alpha_1}{E_0 \cdot \phi_1^2} - \dfrac{\alpha_2 \cdot \nu_0}{E_0 \cdot \phi_1 \cdot \phi_2} - \dfrac{\alpha_3 \cdot \nu_0}{E_0 \cdot \phi_1 \cdot \phi_3}} \tag{5.14}$$

Die daraus resultierenden rückläufigen Dehnungen in den Richtungen senkrecht zur Hauptbelastungsrichtung nach Überschreiten der maximalen Festigkeit σ_{ult} würden dazu führen, dass rein



a) Kraftgesteuerte Belastung: ZDD-Versuch

b) Kraftgesteuerte Belastung: DDD-Versuch

c) Weggesteuerte Belastung: ZDD-Versuch

d) Weggesteuerte Belastung: DDD-Versuch

Abbildung 5.11: Rechnerische Spannungs-Dehnungs-Linien für eine kraftgesteuerte und eine weggesteuerte Beanspruchung mit orthotroper Schädigung und $\varepsilon_{d0} = 0$

rechnerisch eine Abnahme des Schädigungsmaßes in diesen Richtungen auftritt. Da eine im Versuch aufgetretene Schädigung jedoch irreversibel und somit eine Abnahme des Schädigungsmaßes nicht möglich ist, weisen die Richtungen senkrecht zur Hauptbelastungsrichtung kurz nach dem Überschreiten der maximalen Festigkeit σ_{ult} per Definition bei jedem Belastungsniveau ein konstantes Schädigungsmaß auf.

Prinzipiell erfolgt bei allen untersuchten Spannungsverhältnissen eine streng monotone Abnahme der Spannungen nach dem Überschreiten ihres Maximalwerts unter der Zunahme der betragsmäßigen Dehnung in Hauptbelastungsrichtung verbunden mit der Abnahme der betragsmäßigen Dehnungen in den verbleibenden zwei Richtungen. Eine Ausnahme hiervon stellt der Versuch mit dem Spannungsverhältnis $\alpha_1 \,/\, \alpha_2 \,/\, \alpha_3 = 0{,}732 \,/\, -1 \,/\, -1$ dar (siehe Abhang D). Bei diesem tritt die betragsmäßig größte Dehnung und somit die größte Schädigung in der Richtung der betragsmäßig kleinsten Beanspruchung auf. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der Richtungen bei der Dehnungsberechnung kommt es in den beiden verbleibenden Richtungen unabhängig vom Schädigungsfortschritt in Richtung 1 auch nach der Überschreitung der maximalen Festigkeit σ_{ult} zu keiner signifikanten Dehnungszunahme und das Material bleibt in diesen beiden Richtungen „ungeschädigt“. In Richtung 1 hingegen tritt unabhängig von der gewählten Inkrementgröße der weggesteuerten Beanspruchungssteigerung im Entfestigungsbereich innerhalb eines Belastungsschrittes eine Dehnungszunahme auf, infolge derer die Schädigung von wenig geschädigt auf vollständig geschädigt zunimmt. Somit ist für den nachfolgenden Belastungsschritt keine Berechnung des Spannungs-Dehnungs-Zustandes mehr möglich.

Wie bei der Annahme einer isotropen Schädigung können die Spannungs-Dehnungs-Linien der untersuchten Spannungsverhältnisse mittels einer lastinduzierten Orthotropie gut abgebildet werden. Eine ausführliche Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich der erzielten maximalen Festigkeitswerte und den zugehörigen Dehnungen erfolgt im folgenden Abschnitt. Alle experimentell und rechnerisch ermittelten Kurven sind im Anhang D dargestellt.

5.4 Bewertung der vorgeschlagenen Modelle

Bei der Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der durchgeführten mehraxialen Belastungsversuche auf Grundlage des verallgemeinerten HOOKE'schen Gesetzes kann eine nichtlineare Verformung durch die Einführung von Schädigungsfunktionen beschrieben werden. Die Schädigungsfunktionen, deren Verläufe von Formbeiwerten definiert werden, bewirken dabei eine vom Belastungsniveau abhängige Änderung der Materialparameter E und ν. Für jedes Spannungsverhältnis ergeben sich zur Beschreibung der Schädigungsfunktionen unterschiedliche Formbeiwerte, so dass deren Größe in Abhängigkeit des aufgebrachten Spannungsverhältnisses bestimmt werden muss. Basierend auf der Auswertung der Spannungs-Dehnungs-Linien der eigenen Versuche zeigte sich, dass für die mathematische Beschreibung der Verläufe der Formbeiwerte eine Anzahl von Parametern benötigt wird, die es nicht erlaubt, diese anhand weniger, einfach durchzuführender Versuche zu bestimmen. Weiterhin musste festgestellt werden, dass speziell im Bereich dreiaxialer Druckversuche der angenommene Verlauf der Formbeiwerte infolge fehlender Versuchsergebnisse nicht verifiziert werden kann.

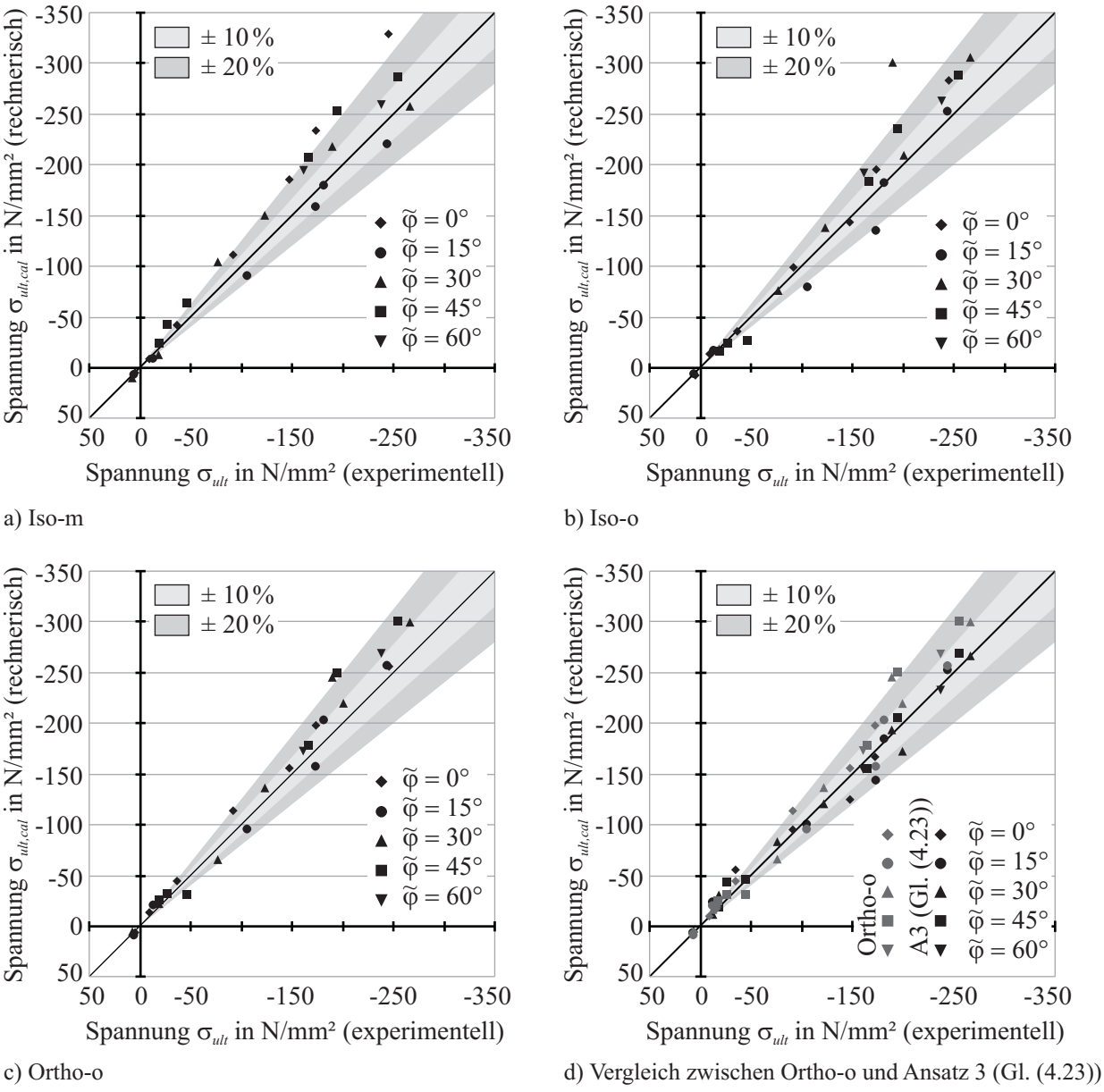
Allgemein ist bei dem Vergleich der rechnerischen und experimentellen Spannungs-Dehnungs-Linien zu beachten, dass Effekte aus der Versuchsdurchführung den Verlauf der Spannung-Dehnungs-Linien beeinflussen. Bei Versuchen mit einer Zugkomponente ist z. B. infolge des Versagens der Klebefuge zwischen Beton und Lasteinleitungsmittel oder einer inhomogenen Beanspruchung des Betons in der Ebene der Schraubenenden (vgl. Abschnitt 3.4.2) ein Versuchsende vor dem tatsächlichen Betonversagen möglich. Dies würde zu geringeren maximalen Festigkeitswerten σ_{ult} und zu „unvollständigen“ Spannungs-Dehnungs-Linien führen, was ebenfalls das Resultat eines manuellen Versuchsabbruchs bei dreiaxialer Druckbeanspruchung wäre. Generell ergeben sich hieraus für die Ermittlung der Formbeiwerte der Schädigungsfunktionen Unsicherheiten, wobei deren Auswirkungen geringer eingeschätzt werden, als die im Vergleich dazu abnehmende Anzahl an verfügbaren Versuchsergebnissen bei Nichtbeachtung mit Unsicherheiten behaftete Versuche und somit die Verkleinerung des betrachteten Bereichs des Beanspruchungsraumes.

Für die Bewertung der rechnerisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien werden die maximal auftretenden Festigkeitswerte und die dazugehörigen Dehnungen mit den experimentell ermittelten Werten verglichen. Dabei werden für die Bezeichnung der mit unterschiedlichen Schädigungsevolutionen aufgestellten Modelle folgende Abkürzungen verwendet:

- Iso-m – Isotrope Schädigung mit Vorgabe des Schädigungsbeginns bei einer definierten Vergleichsdehnung $|\varepsilon_{d0}| > 0$ und mit veränderlicher Querdehnzahl;
- Iso-o – Isotrope Schädigung mit Schädigungsbeginn bei Belastungsbeginn ($\varepsilon_{d0} = 0$) und mit konstanter Querdehnzahl;
- Ortho-o – Orthotrope Schädigung mit Schädigungsbeginn bei Belastungsbeginn ($\varepsilon_{d0} = 0$) und mit konstanter Querdehnzahl.

Ein Vergleich zwischen den maximalen Festigkeitswerten σ_{ult} der Hauptbelastungsrichtung aus den experimentell und rechnerisch (weggesteuert) ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien wird in Abbildung 5.12a bis c gezeigt. Bei allen drei Modellen werden die maximalen Festigkeitswerte

überschätzt. Die Größe der absoluten Abweichung nimmt dabei mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil im Spannungsverhältnis zu. Die geringsten Abweichungen der maximalen Festigkeitswerte zwischen Modell und Versuchsdaten treten bei der Beschreibung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens mit dem orthotropen Schädigungsansatz auf.



a) Iso-m

b) Iso-o

c) Ortho-o

d) Vergleich zwischen Ortho-o und Ansatz 3 (Gl. (4.23))

Abbildung 5.12: Vergleich der experimentell und rechnerisch (weggesteuert) ermittelten maximalen Festigkeitswerte σ_{ult}

Um weitere Aussagen treffen zu können, werden die Häufigkeitsverteilungen der absoluten und der prozentualen Abweichungen zwischen den berechneten und den aus den Versuchen erhaltenen maximalen Festigkeitswerten σ_{ult} aufgestellt. Die Betrachtung beider Abweichungen ist notwendig, da bei kleinen Werten die prozentualen Abweichungen tendenziell größer gegenüber hohen Werten ausfallen und sich bei absoluter Betrachtung ein gegenläufiger Effekt einstellt.

In Abbildung 5.13 sind die Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen der maximalen Festigkeit der drei Modelle für die kraft- und für die weggesteuerten Berechnungsvarianten dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bei einer kraft- bzw. weggesteuerten Beanspruchung tendenziell keine signifikanten Unterschiede zwischen den Abweichungen auftreten. Da bei der Berechnung von kraftgesteuer-

ten Versuchen kein eindeutiger maximaler Festigkeitswert auftritt, wird hierfür ein Wert kleiner $\Delta\sigma_{ult} = 0{,}5\,\mathrm{N/mm^2}$ verwendet, der sich bei einem nahezu horizontalen Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linien ergibt. Da sich auch bei der Betrachtung der zur maximalen Festigkeit gehörigen Dehnungen keine signifikanten Unterschiede zwischen der kraft- bzw. weggesteuerten Berechnung ergeben, wird im Weiteren auf eine Darstellung der Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen der Dehnungen der kraftgesteuerten Berechnung verzichtet (siehe dazu Anhang D.3).

Abbildung 5.13 zeigt außerdem, dass sich für die Modelle Iso-o und Ortho-o ähnliche Häufigkeitsverteilungen ergeben, wogegen zum Modell Iso-m größere Unterschiede auftreten. Die höchsten Häufigkeiten liegen bei allen drei Modellen in einem Bereich von $-10\,\mathrm{N/mm^2} < \Delta\sigma_{ult} < +20\,\mathrm{N/mm^2}$ bzw. bei $-10\,\% < \Delta\sigma_{ult} < +20\,\%$ für die absoluten bzw. prozentualen Abweichungen. Wie bereits aus Abbildung 5.12 bekannt, liegen die rechnerisch ermittelten maximalen Festigkeitswerte im Mittel über den Versuchswerten, was mit den möglichen bereits diskutierten „unvollständigen" Spannungs-Dehnungs-Linien in Übereinstimmung steht. Grundsätzlich kann bei der Betrachtung der Häufigkeitsverteilungen davon ausgegangen werden, dass die prozentualen Abweichungen bei Spannungsverhältnissen in Richtung der hydrostatischen Zugbeanspruchung größer ausfallen während sich die absoluten Abweichungen verringern.

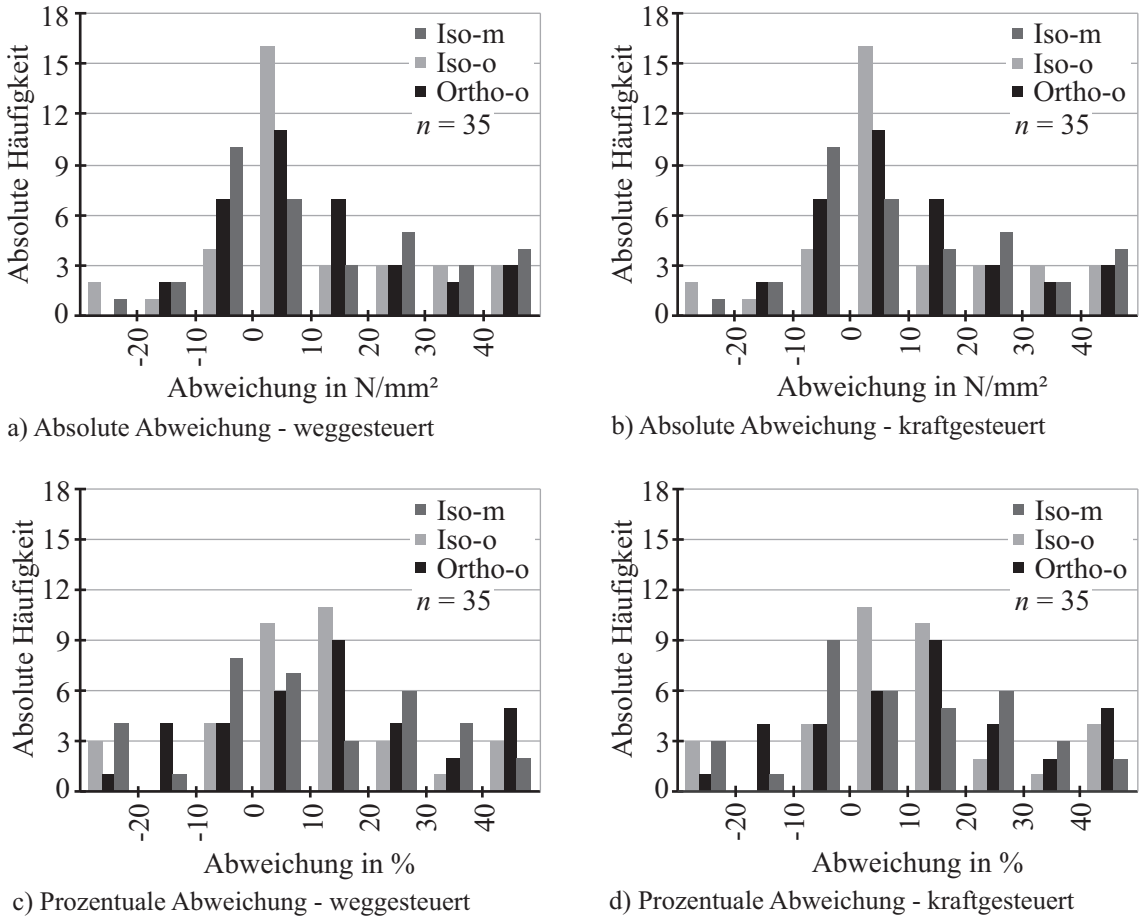


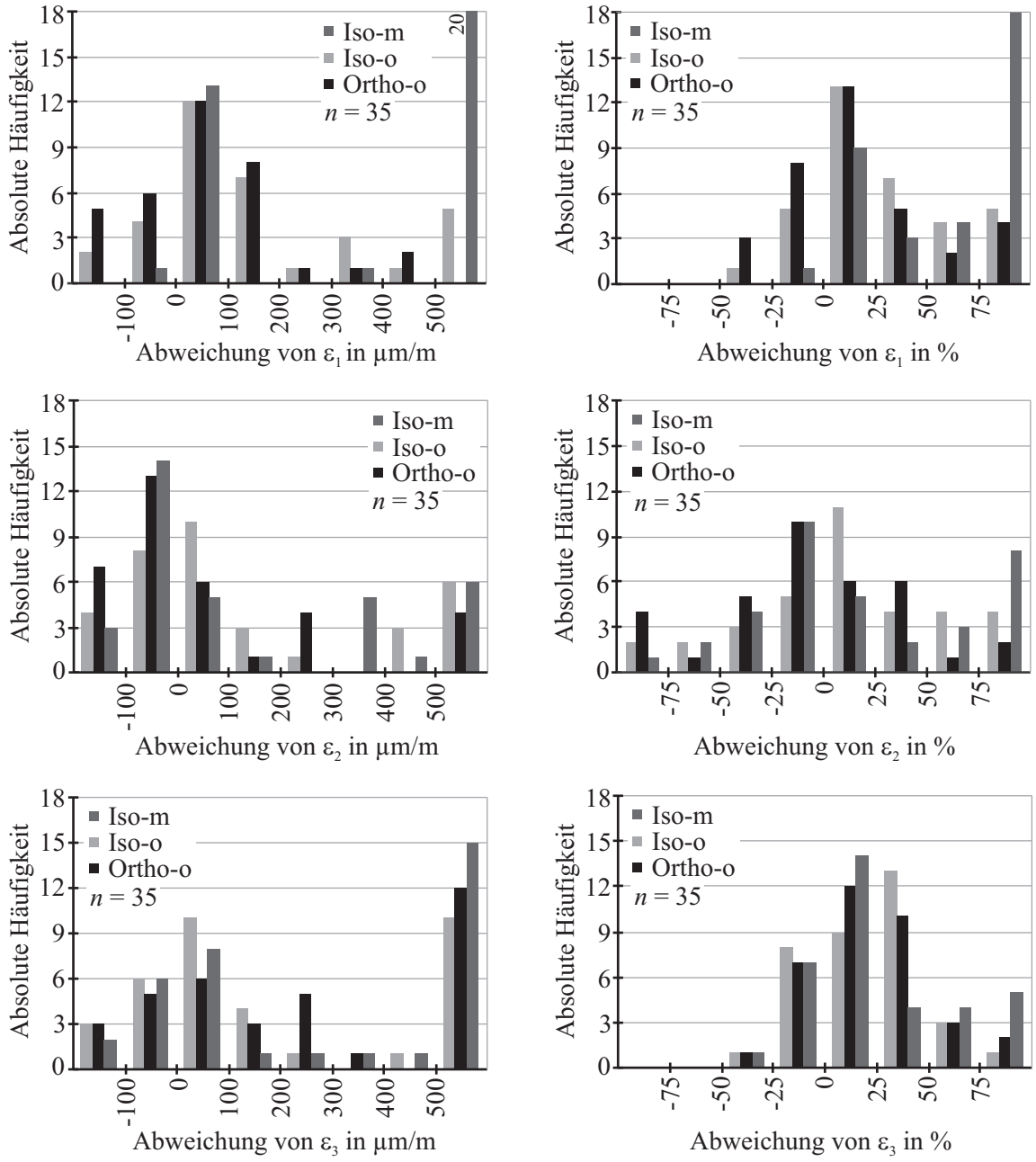
Abbildung 5.13: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen der berechneten maximalen Festigkeitswerte σ_{ult} von den Versuchswerten

Für die in Abbildung 5.14 dargestellten Häufigkeitsverteilungen der betragsmäßigen Abweichungen der zugehörigen Dehnungen können prinzipiell die gleichen Aussagen getroffen werden. Die Unterschiede zwischen Iso-m und Iso-o bzw. Ortho-o treten hierbei ausgeprägter als bei der maximalen Festigkeit auf. Dabei gibt es eine größere Anzahl an Versuchen, bei denen die absolute

Abweichung der Dehnung ε_3 im Vergleich zu den Dehnungen ε_1 und ε_2 überdurchschnittlich hoch ausfällt. Die Ursache hierfür liegt darin, dass für die überwiegende Anzahl der Versuche diese Richtung der Hauptbelastungsrichtung entspricht und sich entsprechend die betragsmäßig größten Dehnungswerte ergeben. Zieht man die Häufigkeitsverteilungen der prozentualen Abweichung mit in Betracht, wird dieser Effekt relativiert und es ergeben sich für alle drei Dehnungsrichtungen ähnliche Verteilungen.

Aufgrund der größeren Abweichungen bei den Festigkeiten und Dehnungen sowie die unzureichende Abbildung des Entfestigungsbereichs wird das Modell Iso-m nicht zur Abbildung der Spannungs-Dehnungs-Linien favorisiert. Bei den Modellen Iso-o und Ortho-o, bei denen der Schädigungsbeginn mit dem Belastungsbeginn zusammenfällt, ergeben sich im Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie bis zum Erreichen der maximalen Festigkeitswerte keine signifikanten Unterschiede und bilden diese gut ab. Im Gegensatz dazu weisen die beiden Modelle im Entfestigungsbereich unter proportionaler Beanspruchungssteigerung ein gegensätzliches Verhalten in den Richtungen senkrecht zur Hauptbelastungsrichtung auf. Bei Verwendung von Iso-o nehmen die betragsmäßigen Dehnungen in diesen Richtungen zu, wogegen dies bei Ortho-o nur über einen kurzen Bereich der Fall ist, bevor rückläufige Dehnungen auftreten. Eine belastbare Aussage zur Richtigkeit eines der beiden Modelle kann an dieser Stelle nicht getroffen werden, da der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linien für den untersuchten Beton in diesem Bereich experimentell nicht bestimmt werden konnte. Es wird jedoch vermutet, dass es im Entfestigungsbereich zu einer Abnahme der Dehnungen senkrecht zur Hauptbelastungsrichtung kommt und somit das Modell Ortho-o angewendet werden sollte.

In Abbildung 5.12d werden abschließend die mit der Grenzfläche nach Abschnitt 4.3, Ansatz 3 (Sp-D-L) gemäß Gl. (4.27) sowie die mit dem Modell Ortho-o berechneten maximalen Festigkeitswerte σ_{ult} der Hauptbelastungsrichtung über die Versuchswerte aufgetragen. Die Approximation der Festigkeitswerte mit einer speziellen Grenzflächenbeschreibung führt erwartungsgemäß zu besseren Ergebnissen im Vergleich zur Ermittlung der Werte anhand der berechneten Spannungs-Dehnungs-Linien. Speziell im Bereich hoher mehraxialer Festigkeiten kommt es zu einer Zunahme der absoluten Abweichungen zwischen den beiden theoretischen Beschreibungen, wobei tendenziell stets eine Überschätzung der Versuchswerte erfolgt. Grundsätzlich gelingt es mit dem Modell Ortho-o sehr gut, das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des untersuchten Betons zu beschreiben, so dass auf eine explizite Beschreibung der Grenzfläche der mehraxialen Festigkeiten verzichtet werden könnte.



a) Absolute Abweichung

b) Prozentuale Abweichung

Abbildung 5.14: Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen der berechneten Dehnungen von den Versuchswerten bei den maximal auftretenden Festigkeitswerten σ_{ult}

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Durch die Entwicklung von hochfesten (HPC) und ultrahochfesten Betonen (UHPC) mit einaxialen Druckfestigkeiten von über $200\,\mathrm{N/mm^2}$ ergeben sich für Beton Anwendungsfelder, die auch außerhalb des Bauwesens liegen können. Speziell im Maschinenbau bieten sich für derartige Werkstoffe Einsatzmöglichkeiten, wobei Solokonstruktionen aus Beton das technologische Ziel darstellen. Ein Beispiel hierfür ist die Herstellung von formgebenden Werkzeugmatrizen aus UHPC zur Blechumformung. Für eine effiziente und beanspruchungsgerechte Ausbildung der Konstruktion, in der komplexe Spannungszustände auftreten können, ist es im Vorfeld notwendig, den Verfahrensprozess für den gewünschten Einsatz der Betonstruktur in Simulationen abzubilden. Somit kann eine Abschätzung der Eignung der Struktur bzw. eine entsprechende Optimierung der Geometrie vorgenommen werden. Das ist jedoch nur möglich, wenn das Materialverhalten des eingesetzten Betons hinreichend genau bekannt ist und beschrieben werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Trag- und Verformungsverhalten eines stahlfaserbewehrten feinkörnigen UHPC mit einer einaxialen Druckfestigkeit von über $170\,\mathrm{N/mm^2}$ unter mehraxialer Beanspruchung experimentell untersucht. Aufgrund der deutlich geringeren Widerstandsfähigkeit des Betons gegenüber einer Zug- im Vergleich zu einer Druckbeanspruchung lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Erforschung des Materialverhaltens bei einer mehraxialen Belastung mit einer Zugkomponente. Aus den Versuchsergebnissen werden Gesetzmäßigkeiten zur Beschreibung des Materialverhaltens abgeleitet. Die Durchführung der Versuche war notwendig, um die aus der Literatur bekannten Effekte einer mehraxialen Beanspruchung, wie die festigkeitssteigernde oder verringernde Wirkung bzw. die Variation der auftretenden Dehnungen gegenüber einaxialen Beanspruchungen, zu verifizieren und zu quantifizieren.

Die Umsetzung der mehraxialen Belastungsversuche erfolgte aufbauend auf den vorhandenen Erkenntnissen bei der Versuchsdurchführung, denen ein stetiger Verbesserungsprozess zur Elimination von störenden Einflüssen zugrunde liegt. Speziell bei der Übertragung von Zugbeanspruchungen und der damit verbundenen Messung von kleinen Dehnungen konnten jedoch mit den bisher verwendeten Lasteinleitungs- und Messmethoden keine zuverlässigen Ergebnisse erzielt werden. Zur unverfälschten Bestimmung des Materialverhaltens wurde daher eine neuartige Form der Zugkraftübertragung entwickelt und umgesetzt, sowie die Weiterentwicklung einer bekannten Methode zur Dehnungsmessung im Probekörperinneren vorgenommen.

Mehraxiale Belastungsversuche

Insgesamt wurden 35 Spannungsverhältnisse unter proportionaler Laststeigerung geprüft, die auf den 0 °-, 15 °-, 30 °-, 45 °-, 60 °-Meridianen der Festigkeitsgrenzfläche liegen. Neben dreiaxialen Zug-Druck-Druck-Versuchen wurden ebenfalls zweiaxiale Spannungsverhältnisse an den Grenzen des Zug-Druck-Druck-Oktanten untersucht, sowie zur Anbindung an eine reine Druckbeanspruchung für jeden Meridian ein dreiaxialer Druckversuch durchgeführt.

Bei allen Versuchen erfolgte die Dehnungsmessung im Inneren der würfelförmigen Probekörper mit sechs tetraederförmig angeordneten Faser-Bragg-Gitter Messstellen, deren zuverlässige Funktion in

Voruntersuchungen nachgewiesen werden konnte. Weiterhin war bei Versuchen mit hohen Druck- und kleinen Zugkomponenten die Entwicklung einer neuartigen Methode zur Zugkraftübertragung auf den Beton notwendig, da bei konventionell angeklebten Lasteinleitungsmitteln stets ein Versagen in der Klebefuge auftrat. Hierfür wurden in Zugrichtung je Würfeloberfläche einhundert 16 mm lange Schrauben in einem 10×10 Raster in den Probekörper einbetoniert, deren Schraubenköpfe ca. 2 mm aus dem Beton herausstanden. Die Schraubenköpfe wurden nach der Betonage vollständig in einem Mörtelkleber eingebettet und hierüber mit dem Lasteinleitungsmittel verbunden. Anhand von zahlreichen Versuchen mit dieser Form der Zugkraftübertragung konnte gezeigt werden, dass sich eine signifikante Erhöhung bei den erzielten Festigkeitswerten gegenüber konventionell angeklebten Lasteinleitungsmitteln ergibt. Bei allen Versuchen mit einer Zugkomponente konnte ein Zugbruch im Beton beobachtet werden. Dabei trat der Bruch bei der Anwendung der neuartigen Zugkraftübertragung direkt in der Ebene hinter den Schraubenenden auf, was auf eine begünstigende Wirkung der Schrauben auf diese Versagensart hindeutet.

Bei den mehraxialen Druckversuchen konnte im Vergleich zu Normalbeton kein ausgeprägtes nichtlineares Verformungsverhalten bei höheren Beanspruchungsniveaus festgestellt werden. Vielmehr findet schon ab einer geringen Beanspruchung eine kontinuierliche geringfügige nichtlineare Verformung statt. Die Spannungs-Dehnungs-Linien erreichen dabei keinen horizontalen Verlauf und das Versagen des Probekörpers tritt schlagartig ein. Die Versuche bestätigen erwartungsgemäß, dass infolge der hohen einaxialen Druckfestigkeit unter mehraxialer Beanspruchung ein verhältnismäßig sprödes Versagen vorherrscht und dass die festigkeitssteigernde Wirkung eines mehraxialen Druckspannungszustandes bezogen auf die einaxiale Druckfestigkeit geringer ausfällt als bei Normalbetonen.

Beschreibung von Grenzflächen charakteristischer Punkte im Materialverhalten

Die am häufigsten beschriebene Grenzfläche eines charakteristischen Punktes im Materialverhalten von Beton ist die der maximalen Festigkeit, die sich direkt aus den Messergebnissen eines Versuchs ablesen lässt. Neben diesem Punkt werden bei den eigenen experimentellen Untersuchungen aus den gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien die Spannungen an der Elastizitätsgrenze, der Affinitätsgrenze sowie bei Erreichen des Volumenminimums des Probekörpers bestimmt und deren Grenzflächen beschrieben. Aus den ermittelten Werten lässt sich ableiten, dass die Spannung an der Elastizitätsgrenze, bezogen auf die maximale mehraxiale Festigkeit, mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil der Beanspruchung abnimmt, wodurch sich eine zunehmende Differenz zwischen beiden Festigkeiten ergibt. Im Gegensatz dazu tritt das Volumenminimum bei fast allen Versuchen gleichzeitig mit dem Versagen des Probekörpers auf, so dass beide Grenzflächen nahezu übereinstimmen, was auf das verhältnismäßig spröde Versagen des ultrahochfesten Betons zurückgeführt werden kann.

Die mathematische Beschreibung der Grenzflächen erfolgt in einem gedrehten kartesischen Koordinatensystem $\widetilde{x}\widetilde{y}\widetilde{z}$, bei dem die $\widetilde{z}$-Achse mit der hydrostatischen Achse des ursprünglichen Systems ($x = y = z$) zusammenfällt. Die Gestalt der Grenzfläche wird jeweils über eine Ansatzfunktion für den Zugmeridian (0 °-Meridian) und für die Gestalt der Schnittlinie der Grenzfläche mit der deviatorischen Ebene (Deviatorkurve) definiert. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Zugmeridian eine konvexe Form aufweist und sich die Deviatorkurve aus sechs gleichen Segmenten zusammensetzt. Unter Berücksichtigung eines stetigen und differenzierbaren Übergangs zwischen den einzelnen Segmenten kann die Deviatorkurve mit der verwendeten Ansatzfunktion eine runde über nahezu dreieckige bis hin zu einer nicht konvexen Form in theoretisch jeder beliebigen Position entlang der $\widetilde{z}$-Achse annehmen. Weiterhin werden für die Beschreibung des Zugmeridianverlaufs drei

Ansätze untersucht, die sich im Wesentlichen in ihrem Verlauf mit zunehmendem hydrostatischen Druckspannungsanteil in der Beanspruchung unterscheiden (öffnend, asymptotisch, schließend).

Durch die Aufstellung einer sehr flexiblen Beschreibung der Grenzfläche, ergibt sich neben deren quantifizierenden Eigenschaften auch die qualitative Gestalt erst nach der Festlegung der Freiwerte der Ansatzfunktionen, deren Komplexität sich durch Modifikationen modular erweitern lässt. Um die Komplexität der Grenzfläche zu erweitern, werden sowohl für die Meridiane als auch die Deviatorkurve Modifikationsmöglichkeiten vorgeschlagen und untersucht. Die Ermittlung der Freiwerte erfolgt als Ausgleichsrechnung für alle eigenen Versuchswerte, so dass grundsätzlich auch eine Extrapolation über den untersuchten Bereich der Spannungsverhältnisse hinaus möglich ist. Für die eigenen experimentellen Untersuchungen ergibt sich bei der einfachsten Beschreibung der Grenzfläche mit fünf zu bestimmenden Freiwerten, dass die Deviatorkurve in Richtung einer hydrostatischen Zugbeanspruchung eine über „dreieckig“ hinausgehende nicht konvexe Form und in Richtung einer hydrostatischen Druckbeanspruchung eine runde Form annimmt.

Zur Erweiterung des Anwendungsbereichs des aufgestellten Modells auf andere Betonfestigkeitsklassen bis $180\,\mathrm{N/mm^2}$ werden unter Verwendung von Literaturdaten mehraxialer Versuche die entsprechenden Freiwerte der Grenzfläche der maximalen Festigkeit ermittelt und in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit beschrieben. Somit besteht die Möglichkeit, das mehraxiale Festigkeitsverhalten eines Betons ohne Kenntnis von Ergebnissen mehraxialer Belastungsversuche abzuschätzen, wie sie prinzipiell für die Kalibrierung von Bruchkriterien z. B. nach Ottosen [91], Willam & Warnke [127] oder dem eigenen Kriterium nach Abschnitt 4.3 benötigt werden.

Infolge einer Erhöhung der Komplexität der Ansatzfunktionen kann festgestellt werden, dass sich eine verbesserte Approximation der Festigkeitswerte in Richtung einer hydrostatischen Zugbeanspruchung ergibt, wenn die Form der Deviatorkurve von der hydrostatischen Zug- hin zur hydrostatischen Druckbeanspruchung von „abgerundet“ über „dreieckig“ wieder hin zu „abgerundet“ verläuft. Somit weist die Deviatorkurve eine extreme Form in Richtung „dreieckig“ auf, wobei diese für alle betrachteten Betonfestigkeitsklassen konvex bleibt. Unabhängig davon wird bei der Beschreibung der mehraxialen Festigkeitswerte in Abhängigkeit der einaxialen Druckfestigkeit für Spannungsverhältnisse mit großen Zugkomponenten die Festigkeit überschätzt.

Spannungs-Dehnungs-Verhalten des untersuchten Betons

Zur Approximation des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens wird ein von Rizzi & Carol [98] aufgestelltes schädigungsbasiertes Materialgesetz verwendet, mit dem durch eine beanspruchungsabhängige Änderung des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl ein nichtlineares Verformungsverhalten hervorgerufen wird. Die Beschreibung der Änderung dieser Materialkennwerte erfolgt grundlegend auf einer von Bachmann [5] formulierten Schädigungsevolution, wobei deren Verläufe jedoch vom aufgebrachten Spannungsverhältnis abhängen. Unter der Annahme eines anfänglich isotropen Materials und einer beanspruchungsinduzierten Schädigung werden anhand der gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien die Formbeiwerte der Schädigungsfunktionen bestimmt und in Abhängigkeit des aufgebrachten Spannungsverhältnisses ausgedrückt.

Dabei ergeben sich für die Beschreibung des untersuchten ultrahochfesten Betons unter der Annahme einer mit dem Belastungsbeginn einsetzenden isotropen bzw. orthotropen Schädigung gute Approximationen der Spannungs-Dehnungs-Linien bis zum Erreichen der maximalen Festigkeit. Im Entfestigungsbereich kommt es bei beiden Modellen zu einer monotonen Abnahme der Festigkeit, wobei dies bei isotroper Schädigung unter Zunahme der betragsmäßigen Dehnungen erfolgt. Im Gegensatz dazu tritt bei orthotroper Schädigung nur in Hauptbelastungsrichtung eine Zunahme der

betragsmäßigen Dehnungen auf, wogegen in den zwei verbleibenden Richtungen diese abnehmen. Eine Evidenz für die Richtigkeit einer der beiden Verläufe kann aufgrund fehlender Versuchsergebnisse jedoch nicht erfolgen. Grundsätzlich werden mit den aufgestellten Materialgesetzen auch die maximalen Festigkeiten unter mehraxialer Beanspruchung gut wiedergegeben, so dass eine explizite Kenntnis der Festigkeitsgrenzfläche nicht notwendig ist.

6.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Sowohl bei der Durchführung als auch bei der Auswertung von mehraxialen Belastungsversuchen steht ein breites Grundlagenwissen zur Verfügung. Bei den eigenen experimentellen Untersuchungen eines UHPCs wurden, insbesondere bei der Umsetzung der Versuche, die Grenzen der Anwendbarkeit bestehender Methoden überschritten, weshalb Weiter- und Neuentwicklungen der Messtechnik und Lasteinleitung zur Lösung spezieller Teilprobleme erfolgte. Im Hinblick auf den Untersuchungsgegenstand konnten bei der Dehnungsmessung im Inneren der Probekörper und bei der Übertragung von Zugkräften wesentliche Neuerungen hervorgebracht werden, deren Entwicklung jedoch nicht als abgeschlossen betrachtet werden sollte und die im Rahmen weiterer Untersuchungen zukünftiger Arbeiten weiter verfeinert werden müssen.

Hinsichtlich der untersuchten Spannungsverhältnisse hat sich die Wahl von Werten ausschließlich auf den 0 °-, 15 °-, 30 °-, 45 °- und 60 °-Meridianen als sehr vorteilhaft erwiesen, da somit für eine Gruppe von Versuchen zumindest ein geometrisches Merkmal der Grenzfläche konstant ist und sich Aussagen zur Beschreibung des Materialverhaltens eindeutiger ableiten lassen. Hierdurch ergibt sich auch die Möglichkeit, mit wenigen ergänzenden Versuchen gezielte Informationsgewinne über einzelne Meridianverläufe zu erzielen. In Anbetracht der verfügbaren Datenlage erscheint es sinnvoll, Versuche mit ähnlichen Spannungsverhältnissen an Normalbeton durchzuführen, um grundlegendere Aussagen für Beton zu erhalten. Hierbei wären auch Versuche mit deutlich höheren hydrostatischen Druckspannungsanteilen der Beanspruchung wünschenswert, um die Gestalt der Grenzfläche in Richtung des hydrostatischen Druckspannungszustandes zu ermitteln. Dafür scheint jedoch ein völlig neues Konzept der Lasteinleitung bzw. zum Aufbau der Prüfmaschine nötig, bei der beispielsweise eine schwimmende Lagerung der Probekörper erfolgt, um die Einflüsse aus der Lagerung der Prüfkörper und der Lasteinleitung weiter zu reduzieren.

Bei der neuerlichen Auswertung von mehraxialen Belastungsversuchen zur Approximation des Festigkeitsverhaltens muss, speziell bei der Verwendung von Datensätzen mehrerer Betonfestigkeitsklassen, eine Möglichkeit gefunden werden, um die unterschiedliche Größe des durch die Versuche abgedeckten Bereiches der Grenzfläche zu berücksichtigen. Weiterhin erscheint es sinnvoll, die durchzuführende Ausgleichsrechnung für eine gekoppelte Betrachtung der absoluten und prozentualen Abweichungen zwischen experimentellen und rechnerischen Werten vorzunehmen, da somit die unterschiedlichen Festigkeiten des Betons bei einer Zug- bzw. Druckbeanspruchung gleichwertiger einbezogen werden können. Werden diese beiden Punkte berücksichtigt, lassen sich vermutlich die noch nicht endgültig geklärten Aussagen zur Gestalt der Grenzfläche speziell in Richtung der hydrostatischen Zugbeanspruchung beantworten.

Für den untersuchten Beton lässt sich das Spannungs-Dehnungs-Verhalten mit dem verwendeten Materialgesetz und der aufgestellten Schädigungsevolution für eine monotone Steigerung der Beanspruchung gut beschreiben. Zur Verifizierung der vom Spannungsverhältnis abhängigen Formbeiwerte zur Beschreibung der Schädigungsevolution müssen jedoch weitere mehraxiale Versuche mit hohen hydrostatischen Druckspannungsanteilen der Beanspruchung durchgeführt werden, da die getroffenen Festlegungen in diesem Bereich aus Annahmen resultieren. Weiterhin ist zu prüfen,

wie ein rechnerisch ermitteltes Materialverhalten unter beliebigen Belastungspfaden ein derartig im Experiment ermitteltes Spannungs-Dehnungs-Verhalten abbildet und ob eine Übertragung der aufgestellten Schädigungsevolution auf andere Betone möglich ist. Hinsichtlich der von den auftretenden Dehnungen abhängigen Schädigungsevolution sollte weiterhin eruiert werden, ob sich durch die Wahl einer anderen Bezugsgröße eine bessere Approximation des Materialverhaltens ergibt. Hierfür scheint u. a. die Verwendung der verrichteten Arbeit des Probekörpers als Bezugsgröße für das Schädigungsmaß zielführend.

Da die Beschreibung der maximalen Festigkeit als charakteristischer Punkt im Materialverhalten von besonderem Interesse ist, sollte bei künftigen Arbeiten der Zusammenhang zwischen der Schädigungsevolution und der maximalen Festigkeit näher untersucht werden. Würde eine derartige Beziehung herausgestellt, ließen sich daraus voraussichtlich interessante Aspekte zur Gestalt der entsprechenden Grenzfläche ableiten.

Die Anwendung des aufgestellten Materialgesetzes kann im Rahmen von Simulationen durch die Implementierung in FE-Programme erfolgen. Nach einer erfolgreichen Verifizierung der Implementierung des Materialgesetzes anhand von Benchmark-Tests ist eine Abschätzung von Einsatzmöglichkeiten bzw. eine Optimierung der Geometrie entsprechender Betonstrukturen aus dem untersuchten UHPC unter komplexen Beanspruchungszuständen möglich und das übergeordnete Ziel der Arbeit erreicht.

Literaturverzeichnis

[1] *Umformwerkzeuge in Versuchsständen des Instituts für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund.* 2008 und 2011

[2] *http://www.allmystery.de/themen/it66098-1.* Aufgerufen am 10.09.2012

[3] *http://www.glas-oswald.de/unsere-projekte/konstruktiver-glasbau/glasbruecke-schwaebisch-hall/.* Aufgerufen am 10.09.2012

[4] Annual Bokk of ASTM Standards Vol. 04.02: *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.* 2008

[5] Bachmann, H.: *Die Massenträgheit in einem Pseudo-Stoffgesetz für Beton bei schneller Zugbeanspruchung*, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Dissertation, 1993

[6] Berg, O. J.: Die Hauptentwicklungsrichtungen der Theorie der Festigkeit und Verformungen des Betons. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 17 (1968), Nr. 6, S. 1489–1496

[7] Bornemann, R. ; Schmidt, M. ; Fehling, E. ; Middendorf, B.: Ultra-Hochleistungsbeton UHPC – Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 96 (2001), Nr. 7, S. 458–467

[8] Brandtzaeg, A.: Failure of Material Composed of Non-Isotropic Elements: An Analytical Study with Special Application to Concrete. In: *Det Kongelige Norske Videnskabers Selskabs Skrifter* 2 (1927), S. 1–68

[9] Bremer, F. ; Steinsdörfer, F.: Bruchfestigkeiten und Bruchverformung von Beton unter mehraxialer Belastung bei Raumtemperatur. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 263.* Ernst & Sohn, 1976

[10] Bresler, B. ; Pister, K. S.: Strength of Concrete under Combined Stresses. In: *ACI Journal* 30 (1958), Nr. 3, S. 321–345

[11] Butterworth, N. A. ; Farnworth, G. H.: Concrete in machine tools. In: *Machinery and Production Engineering* 117 (1970), S. 703–709

[12] Cedolin, I. ; Crutzen, Y. R. I. ; Poli, S. D.: Triaxial Stress-Strain Relationship for Concrete. In: *ASCE Journal of Engineering Mechanics Division* 103 (1977), Nr. EM3, S. 423–439

[13] Chen, R. L.: *Behavior of High-Strength Concrete in Biaxial Compression*, University of Texas, Dissertation, 1984

[14] Chern, J.-C. ; Yang, H.-J. ; Chen, H.-W.: Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete in Multiaxial Loading. In: *ACI Materials Journal* 89 (1992), Nr. 1, S. 32–40

[15] Chinn, J. ; Zimmerman, R. M.: *Behavior of Plain Concrete under Various High Triaxial Compression Loading Conditions*, University of Colorado, Air Force Weapons Laboratory. 1965 (WL TR 64-163)

[16] Cordon, W. A. ; Gillespie, H. A.: Variables in Concrete Aggregate and Portland Cement Paste which Influence the Strength of Concrete. In: *ACI Proceedings* 60 (1963), Nr. 7, S. 1029–1052

[17] Curbach, M. ; Speck, K.: Mehraxiale Festigkeit von duktilem Hochleistungsbeton. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 524*. Beuth Verlag, 2002

[18] Curbach, M. ; Speck, K.: Zweiaxiale Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007), Nr. 10, S. 664–673

[19] Dahl, K.: *A Failure Criterion for Normal and High Strength Concrete*, Danmarks Tekniske Hojskole, Dissertation, 1992

[20] Darwin, D. ; Slate, F. O.: Effect of Paste-Aggregate Bond Strength on Behavior of Concrete. In: *Journal of Materials* 5 (1970), Nr. 1, S. 86–98

[21] Demeke, A. ; Tegos, I. A.: Steel Fibre Reinforced Concrete in Biaxial Stress Tension-Compression Conditions. In: *ACI Structural Journal* 91 (1994), Nr. 5, S. 579–584

[22] Dhir, R. K. ; Sangha, C. M.: A Study of the relationships between time, strength, deformation and fracture of plain concrete. In: *Magazine of Concrete Research* 24 (1972), Nr. 81, S. 197–208

[23] Dialer, C. ; Lanig, N. ; Stöckl, S.: Versuche zur Methode der Verformungsmessung an dreiachsig beanspruchten Betonwürfeln. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 447*. Beuth Verlag, 1995

[24] Dialer, C. ; Lanig, N. ; Stöckl, S. ; Zelger, C.: *Versuche zur Methode der Verformungsmessung an dreiachsig beanspruchten Betonwürfeln – Abschlussbericht zum DFG-Vorhaben Ze 210/1-1*, Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau. 1988

[25] DIN 1048-5: *Prüfverfahren für Beton – Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper*. 1991

[26] Drucker, D. C. ; Prager, W.: Soil mechanics and plastic analysis for limit design. In: *Quarterly of Applied Mathematics* 10 (1952), Nr. 2, S. 157–165

[27] Eibl, J.: Concrete under Multiaxial States of Stress – Constitutive Equations for Practical Design. In: CEB (Hrsg.): *Comité Euro International Du Béton – Bulletin D'Information No. 156*, 1983

[28] Eibl, J. ; Iványi, G.: Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 260*. Wilhelm Ernst & Sohn, 1976

[29] Föppl, A. ; Föppl, L.: *Drang und Zwang - Eine höhere Festigkeitslehre für Ingenieure*. Verlag R. Oldenbourg, 1920

[30] Freudenthal, A. M.: *Inelastisches Verhalten von Werkstoffen*. VEB Verlag Technik, 1955

[31] Gachon, H.: Comportement d'un Béton en Sollicitation Triaxiale. In: *La Déformation et la Rupture des Solids soumis a des Sollicitations Pluriaxiales*. Cannes, 1972, S. 53–70

[32] Galan, A.: Die Bildung und Verbreitung von Mikrorissen im Beton bei mittiger Druck- und Zugbeanspruchung. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* 17 (1968), Nr. 6, S. 1526–1529

[33] Gerstle, K. H. ; Aschl, H. ; Bellotti, B. P. ; Kotsovos, M. D. ; Ko, H. Y. ; Linse, D. ; Newman, J. B. ; Rossi, P. ; Schickert, G. ; Taylor, M. A. ; Triana, L. A. ; Winkler, A. ; Zimmermann, R. M.: Strength of concrete under multiaxial stress states. In: *ACI SP-55: Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures*, 1978, S. 103–131

[34] Gilkey, H. J.: Water-Cement Ratio Versus Strength - Another Look. In: *ACI Journal* 57 (1961), Nr. 4, S. 1287–1312

[35] Glücklich, J.: The effect of microcracking on time dependent deformation and the longterm strength of concrete. In: Brooks, A. E. (Hrsg.): *The structure of concrete and its behaviour under load – Proceedings of the International Conference on the Structure of Concrete.* Cement and Concrete Association, 1968, S. 176–189

[36] Hampel, T.: *Experimentelle Analyse des Tragverhaltens von Hochleistungsbeton unter mehraxialer Beanspruchung*, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2006

[37] Hilsdorf, H.: Die Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit des Betons. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 173.* Ernst & Sohn, 1965

[38] Hintze, D.: *Zur Beschreibung des physikalisch nichtlinearen Betonverhaltens bei mehrachsigem Spannungszustand mit Hilfe differentieller Stoffgesetze unter Anwendung der Methode der finiten Elemente*, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Dissertation, 1986

[39] Hsieh, S. S. ; Ting, E. C. ; Chen, W. F.: A plastic-fracture model for concrete. In: *International Journal of Solids and Structures* 18 (1982), Nr. 3, S. 181–197

[40] Hsu, T. T. C. ; Slate, F. O.: Tensile Bond Strength Between Aggregate and Cement Paste or Mortar. In: *ACI Journal* 60 (1963), Nr. 4, S. 465–486

[41] Hsu, T. T. C. ; Slate, F. O. ; Sturman, G. M. ; Winter, G.: Microcracking of Plain Concrete and the shape of the Stress-Strain Curve. In: *ACI Journal* 60 (1963), Nr. 2, S. 209–224

[42] Hütter, A. ; Renz, E.: Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton bei dreiachsiger Beanspruchung. In: *Bauplanung – Bautechnik* 32 (1978), Nr. 5, S. 220–222

[43] Huggenberger, U. A.: *Talsperren Messtechnik.* Springer Verlag, 1951

[44] Hussein, A. A.: *Behaviour of High-Strength Concrete under Biaxial Loading Conditions*, Memorial University of Newfoundland, Dissertation, 1998

[45] Hussein, A. A. ; Marzouk, H.: Behavior of High-Strength Concrete under Biaxial Stresses. In: *ACI Materials Journal* 97 (2000), Nr. 1, S. 27–36

[46] Kaplan, M. F.: Strains and Stresses of Concrete at Initiation of Cracking and Near Failure. In: *ACI Proceedings* 60 (1963), Nr. 7, S. 853–879

[47] Kersey, A. D. ; Davis, M. A. ; Patrick, H. J. ; LeBlanc, M. ; Koo, K. P. ; Askins, C. G. ; Putnam, M. A. ; Friebele, E. J.: Fiber Grating Sensors. In: *Journal of Lightwave Technology* 15 (1997), Nr. 8, S. 1442–1463

[48] Kitzig, M.: *Eine anisotrope, schädigungsmechanische Materialbeschreibung zur Simulation des Tragverhaltens unbewehrter Betonstrukturen*, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2011

[49] Kitzig, M. ; Häussler-Combe, U.: Modeling of plain concrete structures based on an anisotropic damage formulation. In: *Materials and Structures* 44 (2011), Nr. 10, S. 1837–1853

[50] Kleiner, M. ; Curbach, M. ; Tekkaya, A. E. ; Ritter, R. ; Speck, K. ; Trompeter, M.: Development of ultra high performance concrete dies for sheet metal hydroforming. In: *Production Engineering Research and Development* 2 (2008), Nr. 2, S. 201–208

[51] Kless, R.: *Untersuchungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten von Stahlfaserbeton unter mehrachsiger Zug-Druck-Belastung*, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 1988

[52] Kotsovos, M. D.: Effect of Stress Path on the Behavior of Concrete Under Triaxial Stress States. In: *ACI Proceedings* 76 (1979), Nr. 2, S. 213–223

[53] Kotsovos, M. D. ; Newman, J. B.: Behavior of Concrete Under Multiaxial Stress. In: *ACI Journal* 74 (1977), Nr. 9, S. 443–446

[54] Kotsovos, M. D. ; Newman, J. B.: A mathematical description of the deformational behaviour of conrete and complex loading. In: *Magazine of Concrete Research* 31 (1979), Nr. 107, S. 77–90

[55] Krishnaswamy, K. T.: Strength and Microcracking of Plain Concrete Under Triaxial Compression. In: *ACI Journal* 65 (1968), Nr. 10, S. 856–862

[56] Kulik, I.: Einfluss der Betonart auf seine Festigkeit bei zweiachsigem Zug. In: *Beton i Zelesobeton* 10 (1980), S. 19–20

[57] Kupfer, H.: Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. In: *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 229*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1973

[58] Kupfer, H.: Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 229*. Ernst & Sohn, 1973

[59] Kupfer, H. B. ; Gerstle, K. H.: Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses. In: *Journal of the Engineering Mechanics Division* 99 (1973), Nr. EM4, S. 853–866

[60] Kurth, W.: Wirtschaftliche Kaltumformung von dünnen Blechen in kleinen Serien. In: *Fertigungstechnik* 6 (1956), Nr. 2, S. 64

[61] Lan, S. ; Guo, Z.: Experimental Investigation of Multiaxial Compressive Strength of Concrete under Different Stress Paths. In: *ACI Materials Journal* 94 (1997), Nr. 5, S. 427–434

[62] Launay, P. ; Gachon, H.: Strain and ultimate strength of concrete under triaxial stress. In: *Proceedings of the First International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology – Vol. 3*, 1971, S. 23–40

[63] Launay, P. ; Gachon, H.: Strain and Ultimate Strength of Concrete under Triaxial Stress. In: *ACI Special Publication - Concrete for Nuclear Reactors* 34 (1972), S. 269–282

[64] Launay, P. ; Gachon, H. ; Poitevin, P.: Déformation et Résistance Ultime du Béton sous Étreinte Triaxiale. In: *Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics* 269 (1970), S. 22–48

[65] Lee, S.-K. ; Song, Y.-C. ; Han, S.-H.: Biaxial behavior of plain concrete of nuclear containment building. In: *Nuclear Engineering and Design* 227 (2004), S. 143–153

[66] Liang, W.: *Experimental Research on strength and deformation of high strength concrete under triaxial stress states (T/T/C, T/T/T)*, Tsinghua University Beijing, Dissertation, 1998

[67] Linhua, J. ; Dahai, H. ; Nianxiang, X.: Behavior of Concrete under Triaxial Compressive-Compressive-Tensile Stresses. In: *ACI Materials Journal* 88 (1991), Nr. 2, S. 181–185

[68] Linse, D.: Versuchsanlage zur Ermittlung der dreiachsigen Festigkeit von Beton mit ersten Versuchsergebnissen. In: *Cement and Concrete Research* 3 (1973), S. 445–457

[69] Linse, D.: Lösung versuchstechnischer Fragen bei der Ermittlung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Beton unter dreiachsiger Belastung. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 292.* Ernst & Sohn, 1978

[70] Linse, D. ; Aschl, H.: *Dreiachsiges Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton unter besonderer Berücksichtigung von Zugbeanspruchungen*, Technische Universität München, Lehrstuhl und Institut für Massivbau. 1974

[71] Linse, D. ; Aschl, H.: *Versuche zum Verhalten von Beton unter mehrachsiger Beanspruchung*, Technische Universität München, Lehrstuhl und Institut für Massivbau. 1976

[72] Liu, C. H.: *Experimental research on the behavior of high strength concrete under triaxial stress states (C/C/C, C/C/T)*, Tsinghua University Beijing, Dissertation, 1989

[73] Liu, T. C. Y. ; Nilson, A. H. ; Slate, F. O.: Stress-Strain Response and Fracture of Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression. In: *ACI Journal* 69 (1972), Nr. 5, S. 291–295

[74] Lorenz, E. ; Ortlepp, R.: Bond Behavior of Textile Reinforcements - Development of a Pull-Out Test and Modeling of the Respective Bond versus Slip Relation. In: *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPFRCC 6.* Ann Arbor, MI, USA, 2011

[75] Lorenz, Enrico ; Ortlepp, Regine: Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Verankerungslänge der textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix. In: *4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4)*, 2009

[76] Love, A. E. H.: *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity.* Mineola, N. Y. : Dover Publication Inc., 1944

[77] Mahmood, N. ; Hannant, D. J.: The Strength of Concrete Subjected to Compression-Compression-Tension Stress Systems. In: *Journal of Testing and Evaluation* 3 (1975), Nr. 2, S. 107–112

[78] Mal'cov, K. A. ; Pak, A.: Betonfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung. Festigkeitsprobleme des Betons. Internationales Kolloquium Dresden. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* Sonderdruck (1968), S. 1519–1920

[79] Martin, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung. In: *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton. Heft 228.* Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1973

[80] McCreath, D. R. ; Newman, J. B. ; Newman, K.: The influence of aggregate particles on the local strain distribution and fracture mechanism of cement paste during drying, shrinkage, and loading to failure. In: *Materials and Structures* 2 (1969), Nr. 7, S. 73–84

[81] McHenry, D. ; Karni, J.: Strength of Concrete under Combined Tensile and Compressive Stress. In: *ACI Journal* 54 (1958), Nr. 4, S. 829–839

[82] Mills, L. L. ; Zimmermann, R. M.: Compressive Strength of Plain Concrete Under Multiaxial Loading Conditions. In: *ACI Proceedings* 67 (1970), Nr. 10, S. 802–807

[83] Müller, R. K.: Der Einfluß der Meßlänge auf die Ergebnisse bei Dehnmessungen an Beton. In: *Beton* 5 (1964), S. 205–208

[84] Nelissen, L. J. M.: Biaxial Testing of Normal Concrete. In: *Heron* 18 (1972), Nr. 1, S. 1–90

[85] Neumann, M.: *Werkstoffgerechte Gestaltung und Wirtschaftliche Fertigung Dauerhaltbarer Maschinenbauteile aus Mineralguss*, Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen, Fakultät Maschinenbau, Dissertation, 1985

[86] Newman, K.: The Structure and Engineering Properties of Concrete. In: Rydzewski, J. R. (Hrsg.): *Theory of Arch Dams*, Pergamon Press, 1964, S. 683–712

[87] Newman, K.: Concrete control tests as measures of the properties of concrete. In: *Proceedings of a Symposium of Concrete Quality.* London : Cement and Concrete Association, 1966, S. 120–138

[88] Newman, K.: Concrete Systems. In: Holliday, L. (Hrsg.): *Composite Materials*, Elsevier Publishing Company, 1966, S. 336–446

[89] Newman, K.: The structure and properties of concrete - an introductory review. In: *Proceedings of the International Conference on the Structure of Concrete, September 1965.* London, 1968, S. 255–274

[90] Othonos, A. (Hrsg.) ; Kalli, K. (Hrsg.): *Fiber Bragg Gratings – Fundamentals and Application in Telecommunication and Sensing.* Boston : Artech House, 1999

[91] Ottosen, N. S.: A Failure Criterion for Concrete. In: *Journal of the Engineering Mechanics Division* 103 (1977), Nr. EM4, S. 527–535

[92] Pölling, R.: *Eine praxisnahe schädigungsorientierte Materialbeschreibung von Stahlbeton*, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2000

[93] Pope, A. W. ; Jennings, H. M.: The influence of mixing on the microstructure of cement paste/aggregate interfacial zone and on the strength of mortar. In: *Journal of Materials Science* 27 (1992), S. 6452–6462

[94] Ritter, R.: *Spannungs-Dehnungs-Verhalten von ultra-hochfestem Beton in Abhängigkeit von der Umschnürungswirkung*, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2006

[95] Ritter, R. ; Curbach, M.: *Weiterentwicklung und Verifizierung der Funktionalität der Dehnungsmessung mit FBG-Sensoren*, Arbeitsbericht zum Arbeitsschritt 1 des Forschungsvorhabens “Entwicklung von Formgebenden Werkzeugen aus Hydraulisch gebundenen Werkstoffen für die Wirkmedienbasierte Blechumformung“ - Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau. 2011. – Unveröffentlicht

[96] Ritter, R. ; Curbach, M.: Strain Measurement of Steel Fiber-Reinforced Concrete under Multiaxial Loads with Fiber Bragg Grating. In: *ACI Materials Journal* 110 (2013), Nr. 1, S. 57–66

[97] Ritter, R. ; Curbach, M. ; Trompeter, M. ; Tekkaya, A. E.: Material Behavior of an UHPC Forming Die for Sheet Metal Hydroforming. In: *ACI Materials Journal* 106 (2009), Nr. 6, S. 515–522

[98] Rizzi, E. ; Carol, I.: A Formulation of Anisotropic Elastic Damage Using Compact Tensor Formalism. In: *Journal of Elasticity* 64 (2001), S. 85–109

[99] Robinson, G. S.: Behavior of Concrete in Biaxial Compression. In: *ASCE Journal of the Structural Division* 93 (1967), Nr. ST1, S. 71–86

[100] Rogge, A.: *Materialverhalten von Beton unter mehrachsiger Beanspruchung*, Technische Universität München, Dissertation, 2003

[101] Rohs, H. G. ; Kuhn, S.: Beton im Werkzeugmaschinenbau - Eigenschaften. In: *Werkstatt und Betrieb* 122 (1989), Nr. 8, S. 672–676

[102] Rohs, H. G. ; Kuhn, S.: Beton im Werkzeugmaschinenbau - Gestaltungsmöglichkeiten und Verarbeitungseigenschaften. In: *Werkstatt und Betrieb* 122 (1989), Nr. 9, S. 752–756

[103] Rosenthal, I. ; Glücklich, J.: Strength of Plain Concrete Under Biaxial Stress. In: *ACI Proceedings* 67 (1970), Nr. 11, S. 903–914

[104] Roths, J. ; Kratzer, P.: Vergleich zwischen optischen Faser–Bragg–Gitter–Dehnungsmesssensoren und elektrischen Dehnungsmessstreifen. In: *Technisches Messen* 75 (2008), Nr. 12, S. 647–654

[105] Roths, J. ; Kratzer, P. ; Jülich, F. ; Kuttler, R.: Genauigkeitsaspekte von optischen Faser-Bragg-Dehnungssensoren. In: *Wissenschaftliche Berichte Hochschule Mittweida* 5 (2008), S. 6–9

[106] Rüsch, H.: Physikalische Fragen der Betonprüfung. In: *Zement-Kalk-Gips* 12 (1959), Nr. 1, S. 1–9

[107] Scheerer, S.: *Hochleistungsleichtbeton unter Mehraxialer Beanspruchung*, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2009

[108] Schickert, G.: *Mehraxiale Kurzzeitfestigkeit von Beton.* Kolloquium Düsseldorf, 1974. – Bundesanstalt für Materialprüfung

[109] Schickert, G.: Schwellenwerte beim Betondruckversuch. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 312.* Wilhelm Ernst & Sohn, 1980

[110] Schickert, G. ; Winkler, H.: Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – Heft 277.* Ernst & Sohn, 1977

[111] Schlattner, E. ; Klink, T. ; Slowik, V.: *Faser-Bragg-Sensoren in Bauwerken*, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Fachbereich Bauwesen. 1999

[112] Scholz, U.: *Verhalten von Beton unter mehrachsiger Beanspruchung bei Kurzzeitbelastung*, Technische Universität München, Dissertation, 1989

[113] Scholz, U. ; Nechvatal, D. ; Aschl, H. ; Linse, D. ; Stöckl, S. ; Grasser, E. ; Kupfer, H.: Versuche zum Verhalten von Beton unter dreiachsiger Kurzzeitbeanspruchung. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 447.* Beuth Verlag, 1995

[114] Schröder, U.: *Untersuchungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton bei Druck-Druck-Zug-Beanspruchung*, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 1987

[115] Schwartzentruber, A. ; Bournazel, J.-P. ; Gacel, J.-N.: Hydraulic concrete as a deep-drawing tool of sheet steel. In: *Cement and Concrete Research* 29 (1999), S. 267–271

[116] Sfer, D. ; Carol, I. ; Gettu, R. ; Etse, G.: Study of the Behavior of Concrete under Triaxial Compression. In: *Journal of the Engineering Mechanics Division* 128 (2002), Nr. 2, S. 156–163

[117] Smith, S. S. ; Willam, K. J. ; Gerstle, K. H. ; Sture, S.: Concrete over the Top, or: Is There life after Peak? In: *ACI Materials Journal* 86 (1989), Nr. 5, S. 491–497

[118] Speck, K.: *Beton unter mehraxialer Beanspruchung*, Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2008

[119] Tasuji, M. E.: *The Behavior of Plain Concrete Subject to Biaxial Stress*, Cornell University, Dissertation, 1976

[120] Taylor, M. A. ; Jain, K. J. ; Ramey, M. R.: Path Dependent Biaxial Compressive Testing of an All-Leightweight Aggregate Concrete. In: *ACI Proceedings* 69 (1972), Nr. 12, S. 758–764

[121] Timoshenko, S. ; Goodier, J. N.: *Theory of Elasticity.* New York : McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951

[122] Traina, L. A. ; Mansour, S. A.: Biaxial Strength and Deformational Behavior of Plain Concrete and Steel Fiber Concrete. In: *ACI Materials Journal* 88 (1991), Nr. 4, S. 354–362

[123] van Mier, J. G. M.: *Strain-Softening of Concrete under multiaxial Loading Conditions*, Technische Hogeschool Eindhoven, Dissertation, 1984

[124] Vile, G. W. D. ; Sigvaldason, O. T.: Discussion of the Paper „Strength of Concrete Under Biaxial Compression“. In: *ACI Journal* 62 (1962), S. 1192–1196

[125] Wang, H. L. ; Song, Y. P.: Behavior of mass concrete under biaxial compression-tension and triaxial compression-compression-tension. In: *Materials and Structures* 42 (2009), Nr. 2, S. 241–249

[126] Wianecki, J.: Détermination de l'état tridimensionnel de contrainte basée sur des mesures de six déformationes linéaires. In: *Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics* 237 (1967), September, S. 1225–1230

[127] Willam, K. J. ; Warnke, E. P.: Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete. In: *IABSE reports of the working commissions: Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses.* Bergamo : IABSE, 1974

[128] Wittmann, F. H.: Structure of Concrete with Respect to Crack Formation. In: Wittmann, F. H. (Hrsg.): *Fracture Mechanics of Concrete.* Elsevier Science Publishers B. V., 1983, S. 43–74

[129] Zilch, K. ; Zehetmaier, G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2006

Symbolverzeichnis

Lateinische Großbuchstaben

$\mathbf{A}$	Transformationsmatrix der Richtungskosinus
A_i	Fläche
$D(\kappa_{di})$	Schädigungsmaß bei isotroper Schädigung
$D_j(\kappa_{di})$	Schädigungsmaß in den Hauptrichtungen bei orthotroper Schädigung
D_{ijkl}	Koeffizienten der Nachgiebigkeitsmatrix $\mathbf{D}$ (i, j, k, $l = 1 \ldots 3$)
E	Elastizitätsmodul allgemein
E_0	Anfänglicher Elastizitätsmodul
E_1, E_2, E_3	Elastizitätsmodul in den Hauptrichtungen
E_{cal}	Aus den Spannungs-Dehnungs-Linien berechneter Elastizitätsmodul für isotropes Materialverhalten
E_{iso}	Elastizitätsmodul für isotropes Materialverhalten
E_s	Sekantenelastizitätsmodul
F_i	Kraft, Grenzkraft
G_0	Anfänglicher Schubmodul
G_S	Sekantenschubmodul
I_1	1. Invariante des Spannungstensors
J_2	2. Invariante des deviatorischen Spannungstensors
K_0	Anfänglicher Kompressionsmodul
K_S	Sekantenkompressionsmodul
$\mathbf{R}$	Transformationsmatrix der EULER-Winkel
R_{ij}	Koeffizienten der Transformationsmatrix $\mathbf{R}$ (i,$j = 1 \ldots 3$)
R_T	Ultraschalldurchgangszeit
R_T^{ν}	Zeitpunkt des schnellsten Ultraschalldurchgangs in Längsrichtung
R_T^0	Zeitpunkt des schnellsten Ultraschalldurchgangs in Querrichtung
S	Standardabweichung (σ)
V_f	Faservolumen

Lateinische Kleinbuchstaben

a, b	Freiwerte der Schädigungsfunktion der Querdehnzahl $\lambda(\kappa_{di})$
a, b, c, d, e, f	Bezeichnung der Messstellen im Probekörper
c, d, f	Freiwerte der Erweiterung von $\widetilde{y}_{ZM}(\widetilde{z})$ zur Beschreibung des Verlaufs des Zugmeridians
a, c, m, p	Freiwerte zur Beschreibung des bezogenen Sekantenelastizitäts- und bezogenen Sekantenschubmoduls
a_1, a_2, a_3	Freiwerte der Funktion $\widetilde{y}_{ZM}(\widetilde{z})$
b_1, b_2, b_3	Freiwerte der Funktion $\widetilde{y}_{ZM}(\widetilde{z})$
$c_{\varepsilon_d}(\widetilde{\varphi})$	Funktion zur Beschreibung des Formbeiwerts ε_d
$c_{\varepsilon_{el}}(\widetilde{\varphi})$	Funktion zur Beschreibung der Dehnung an der Elastizitätsgrenze

$c_{g_d}(\widetilde{\varphi})$	Funktion zur Beschreibung des Formbeiwerts g_d
$c_{\sigma_{ult}}(\widetilde{\varphi})$	Funktion zur Beschreibung der maximalen Festigkeit
d	(Größt-)Korndurchmesser des Betons
f_c	Einaxiale Betondruckfestigkeit
f_{ct}	Einaxiale Betonzugfestigkeit
f_{ctm}	Mittlere einaxiale Betonzugfestigkeit
f_{cyl}	Zylinderdruckfestigkeit
f_{ccc}	Wert der hydrostatischen Druckfestigkeit auf der $\widetilde{z}$-Achse
f_{ttt}	Wert der hydrostatischen Zugfestigkeit auf der $\widetilde{z}$-Achse
k	Dehnungsempfindlichkeit der Glasfaser
$k(\hat{z},\widetilde{\varphi})$	Funktion zur Beschreibung der Gestalt der Grenzfläche in der Deviatorebene
$k_1(\hat{z})$, $k_2(\hat{z})$, $k_3(\hat{z})$, $k_4(\hat{z})$	Freiwerte der Funktion $k(\hat{z},\widetilde{\varphi})$
$k_{1,1}$, $k_{1,2}$, $k_{1,4}$	Freiwerte der Funktion $k_1(\hat{z})$
l	Länge, Basislänge der Dehnungsmessung
l_e	Lasteinleitungslänge
$l_{\widetilde{y},i}$, $l_{\widetilde{z},i}$	Strecke in $\widetilde{y}$- bzw. $\widetilde{z}$-Richtung zwischen den experimentellen und rechnerischen Werten
n	Anzahl
r	Radius
$r(\hat{z})$	Funktion zur Beeinflussung des Verlaufs von $k(\hat{z},\widetilde{\varphi})$
r_1, r_2, r_3, r_4	Freiwerte von $r(\hat{z})$
s	Schlupf
t	Zeit
w	Rissöffnung
$\mathbf{v}$, $\mathbf{v}'$	Richtungsvektoren
x, y, z	Koordinatenachsen des kartesischen Bezugssystems
$\widetilde{x}$, $\widetilde{y}$, $\widetilde{z}$	Koordinatenachsen des gedrehten Bezugssystems
$\hat{z}$, z^*	Modifizierter Wert der $\widetilde{z}$-Achse

Griechische Großbuchstaben

ΔQ	Differentielle Volumenänderung
ΔT	Temperaturänderung
ΔV	Volumenänderung
Δt	Änderung der Ultraschalldurchgangszeit
$\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_2$, $\Delta\varepsilon_3$	Differentielle Dehnungsänderung in den Hauptrichtungen
$\Delta\varepsilon$	Dehnungsdifferenz
$\Delta\lambda$	Änderung der Wellenlänge des Lichtspektrums
$\Delta\nu$	Differentielle Änderung der Querdehnzahl
$\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, $\Delta\sigma_3$	Differentielle Spannungsänderung in den Hauptrichtungen
$\Delta\sigma_{ult}$	Differenz zwischen experimenteller und berechneter maximaler Festigkeit in Hauptbelastungsrichtung
$\Delta z_i{}^*$	Verschiebung der Funktion der Formbeiwerte bei orthotroper Schädigung

Griechische Kleinbuchstaben

$\alpha_1 \,/\, \alpha_2 \,/\, \alpha_3$	Spannungsverhältnis der Hauptrichtungen
$\alpha_x \,/\, \alpha_y \,/\, \alpha_z$	Spannungsverhältnis der Normalenrichtungen
α_T	Thermischer Ausdehnungskoeffizient der Glasfaser
$\alpha_{T,Beton}$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Betons
β_p	Einaxiale Prismendruckfestigkeit
γ, δ, ε_d, g_d	Formbeiwerte des Schädigungsmaßes
γ_0	Oktaederschubdehnung
$\widetilde{y}_{ZM}$, $\widetilde{y}_{ZM,mod}$	Ansatzfunktionen zur Beschreibung des Zugmeridianverlaufs
ε	Dehnung allgemein
ε_0, ε_{d0}	Dehnungen bei Schädigungsbeginn
ε_1, ε_2, ε_3	Hauptdehnungen
ε_{11}, ε_{22}, ε_{33}	Hauptdehnungen
ε_{12}, ε_{13}, ε_{23}	Schubverzerrungen
$\varepsilon_{1,aff}$, $\varepsilon_{2,aff}$, $\varepsilon_{3,aff}$	Dehnungen in den Hauptrichtungen an der Affinitätsgrenze
$\varepsilon_{1,el}$, $\varepsilon_{2,el}$, $\varepsilon_{3,el}$	Dehnungen in den Hauptrichtungen an der Elastizitätsgrenze
$\varepsilon_{1,i}$, $\varepsilon_{2,i}$, $\varepsilon_{3,i}$	Dehnungen eines Belastungsniveaus in den Hauptrichtungen
$\varepsilon_{1,V,min}$, $\varepsilon_{2,V,min}$, $\varepsilon_{3,V,min}$	Dehnungen in den Hauptrichtungen beim minimalen Probekörpervolumen
$\varepsilon_{1,ult}$, $\varepsilon_{2,ult}$, $\varepsilon_{3,ult}$	Dehnungen in den Hauptrichtungen bei maximaler Festigkeit
ε_c	Betondehnung
ε_{el}	Dehnung an der Elastizitätsgrenze in Hauptbelastungsrichtung
ε_i	Dehnung in beliebiger Richtung
ε_a, ε_b, ε_c, ε_d, ε_e, ε_f,	Dehnungen in Richtung der Messstellen
ε_m	Mittlere Dehnung über die Basislänge (Messlänge)
ε_{max}	Maximale Dehnung
ε_s	Dehnung des Trägerprofils
ε_{theo}	Theoretischer Wert der Dehnung
ε_{MW}	Mittelwert der Dehnung
κ_{di}	Argument der Schädigungsfunktion
λ	Wellenlänge
$\lambda(\kappa_{di})$	Schädigungsfunktion der Querdehnzahl
λ_B	Anfängliche Bragg-Wellenlänge
$\lambda_{B,i}$	Bragg-Wellenlänge zu einem definierten Zeitpunkt
$\lambda_{B,i,\Delta T}$	Bragg-Wellenlänge in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz
ν	Querdehnzahl
ν_0	Anfängliche Querdehnzahl
ν_{cal}	Aus den Spannungs-Dehnungs-Linien berechnete Querdehnzahl
ν_{12}, ν_{13}, ν_{23}	Querdehnzahlen bei orthotropem Materialverhalten
ν_{iso}	Querdehnzahl bei isotropem Materialverhalten
$\rho(\hat{z},\widetilde{\varphi})$	Senkrechter Abstand zwischen $\widetilde{z}$-Achse und Datenpunkt der Grenzfläche in der Deviatorebene
ρ_e	Elastooptische Konstante der Glasfasern
σ	Spannung allgemein
σ	Standardabweichung
σ_1, σ_2, σ_3	Hauptspannungen

$\widetilde{\sigma}_1$, $\widetilde{\sigma}_2$, $\widetilde{\sigma}_3$	Hauptspannungen des Ursprungssystems im gedrehten Koordinatensystem
σ_{11}, σ_{22}, σ_{33}	Hauptspannungen
$\sigma_{1,aff}$, $\sigma_{2,aff}$, $\sigma_{3,aff}$	Hauptspannungen an der Affinitätsgrenze
$\sigma_{1,el}$, $\sigma_{2,el}$, $\sigma_{3,el}$	Hauptspannungen an der Elastizitätsgrenze
$\sigma_{1,V,min}$, $\sigma_{2,V,min}$, $\sigma_{3,V,min}$	Hauptspannungen beim Minimum des Probekörpervolumens
$\sigma_{1,ult}$, $\sigma_{2,ult}$, $\sigma_{3,ult}$	Maximale Hauptspannungen
σ_{el}	Spannung an der Elastizitätsgrenze in Hauptbelastungsrichtung
$\sigma_{1,i}$, $\sigma_{1,i}$, $\sigma_{3,i}$	Hauptspannungen bei einem Belastungsinkrement
σ_{f_c}	Standardabweichung der Betondruckfestigkeit
$\sigma_{f_{ctm}}$	Standardabweichung der mittleren Betonzugfestigkeit
σ_{12}, σ_{13}, σ_{23}	Schubspannungen
σ_{ult}	Maximale Spannung in Hauptbelastungsrichtung
$\sigma_{ult,cal}$	Berechnete maximale Spannung in Hauptbelastungsrichtung
σ_x, σ_y, σ_z	Spannungen in den Normalenrichtungen
σ_{aff}	Spannung an der Affinitätsgrenze in Hauptbelastungsrichtung
τ_0	Oktaederschubspannung
τ_b	Verbundspannung
$\widetilde{\varphi}$	Winkel des SPV im gedrehten Koordinatensystem
$\phi(\kappa_{di})$	Schädigungsfunktion bei isotroper Schädigung
$\phi_1(\kappa_{di})$, $\phi_2(\kappa_{di})$, $\phi_3(\kappa_{di})$	Schädigungsfunktionen in den Hauptrichtungen bei orthotroper Schädigung
ξ	Thermooptischer Koeffizient der Glasfasern
ξ, ρ, θ	Haigh-Westergaard-Koordinaten
ξ, ψ, ζ	Drehwinkel um die x-, y-, z-Achse des Bezugskoordinatensystems
ξ_i, ψ_i, ζ_i $\quad (i = a \dots f)$	Winkel zwischen den Dehnungsmessstellen und der x-, y-, z-Achse des Bezugskoordinatensystems

Abkürzungen

BR	Betonierrichtung
D	Einaxiale Druckbeanspruchung
DD	Zweiaxiale Druckbeanspruchung
DDD	Dreiaxiale Druckbeanspruchung
DMS	Dehnmessstreifen
FBG	Faser-Bragg-Gitter
IWA	Induktiver Wegaufnehmer
MW	Mittelwert
PK	Probekörper
SP	Scheitelpunkt
Sp-D-L	Spannungs-Dehnungs-Linie
SPV	Spannungsverhältnis
WP	Wendepunkt
Z	Einaxiale Zugbeanspruchung
ZD	Zweiaxiale Zug-Druck-Beanspruchung
ZDD	Dreiaxiale Zug-Druck-Druck-Beanspruchung
ZZ	Zweiaxiale Zugbeanspruchung
ZZD	Dreiaxiale Zug-Zug-Druck-Beanspruchung
ZZZ	Dreiaxiale Zugbeanspruchung

A Ergebnisse der eigenen experimentellen Untersuchungen

A.1 Einaxiale Referenzversuche der Serie 1 bis 14

Tabelle A.1: Kennwerte der einaxialen Druckversuche - Einzelwerte

Serie	σ_{ult} [N/mm^2]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]	E_{cal} [N/mm^2]	ν_{cal} [-]
1	-169,05	866	752	-3892	47369	0,175
	-163,29	829	779	-3629	47270	0,185
	-171,66	840	1012	-3862	48651	0,198
2	-176,22	970	972	-4036	49964	0,208
	-164,84	832	785	-3770	49042	0,213
	-170,76	1067	919	-3912	49436	0,218
3	-175,66	996	1009	-4041	50047	0,216
	-169,47	842	916	-3881	49135	0,196
	-177,72	1173	870	-4027	50252	0,195
4	-169,37	1177	995	-3959	49144	0,225
	-173,27	962	1055	-3990	47760	0,194
	-171,02	940	888	-3946	49047	0,218
5	-175,89	956	1072	-4200	48207	0,221
	-168,68	1001	955	-3974	48328	0,218
	-170,53	949	1200	-4054	47899	0,237
6	-167,27	779	962	-4006	48355	0,199
	-167,16	1376	1113	-4090	46948	0,230
	-167,00	867	862	-3839	48657	0,215
7	-167,62	1175	784	-4144	49043	0,213
	-168,49	906	976	-3870	50929	0,221
	-160,05	989	945	-3925	49550	0,219
8	-169,42	1076	1019	-4047	49161	0,215
	-163,19	1102	1168	-3972	47409	0,207
	-159,86	907	1015	-3671	48344	0,217
9	-171,99	966	918	-3905	49264	0,211
	-169,16	903	828	-3940	49421	0,207

Fortsetzung Tabelle A.1: Kennwerte der einaxialen Druckversuche - Einzelwerte

Serie	σ_{ult} [N/mm^2]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]	E_{cal} [N/mm^2]	ν_{cal} [-]
	-171,12	1096	1223	-3633	49675	0,216
10	-185,76	1050	1102	-4121	51525	0,215
	-184,16	1028	984	-4118	51629	0,217
	-180,58	951	1015	-3963	51065	0,204
11	-186,75	972	1068	-3924	52767	0,227
	-184,79	957	1229	-3993	53141	0,220
	-192,66	998	1299	-4270	52981	0,225
12	-172,39	891	742	-3748	50087	0,200
	-182,42	841	1130	-3986	50588	0,201
	-185,39	1214	1060	-4029	51569	0,212
13	-188,59	1306	1516	-4240	50851	0,221
	-177,18	926	1033	-3966	52293	0,229
	-176,85	1131	909	-4091	51303	0,231
14	-175,41	929	795	-3753	52983	0,219
	-183,09	1111	803	-4051	53306	0,223
	-186,15	1051	1012	-4069	51879	0,215

Tabelle A.2: Kennwerte der einaxialen Druckversuche - Mittelwerte je Serie

Serie	σ_{ult} [N/mm^2]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]	E_{cal} [N/mm^2]	ν_{cal} [-]
1	-168,00	845	848	-3794	47763	0,186
2	-170,61	956	892	-3906	49481	0,213
3	-174,28	1004	931	-3983	49811	0,202
4	-171,22	1027	979	-3965	48650	0,212
5	-171,70	968	1076	-4076	48144	0,225
6	-167,14	1007	979	-3979	47987	0,215
7	-165,38	1023	901	-3980	49841	0,218
8	-164,16	1028	1067	-3897	48305	0,213
9	-170,76	988	989	-3826	49454	0,212
10	-183,50	1009	1034	-4067	51406	0,212
11	-188,07	976	1199	-4062	52963	0,224
12	-180,07	982	977	-3921	50748	0,204
13	-180,87	1121	1153	-4099	51482	0,227
14	-181,55	1031	870	-3958	52723	0,219

Tabelle A.3: Kennwerte der einaxialen Druckversuche - aus den gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien

Serie	σ_{ult} [N/mm^2]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]	E_{cal} [N/mm^2]	ν_{cal} [-]
1	-168,00	845	848	-3794	47758	0,186
2	-170,61	956	892	-3906	49491	0,213
3	-174,28	1004	931	-3983	49826	0,202
4	-171,22	1027	979	-3965	48636	0,212
5	-171,70	968	1076	-4076	48120	0,225
6	-167,14	1007	979	-3979	47957	0,215
7	-165,38	1023	901	-3980	49853	0,218
8	-164,16	1028	1067	-3897	48287	0,212
9	-170,76	988	989	-3826	49433	0,211
10	-183,50	1009	1034	-4067	51401	0,212
11	-188,07	976	1199	-4062	52983	0,224
12	-180,07	982	977	-3921	50763	0,204
13	-180,87	1121	1153	-4099	51477	0,227
14	-181,55	1031	870	-3958	52684	0,219

Tabelle A.4: Kennwerte der einaxialen Zugversuche - Einzelwerte

Serie	σ_{ult} [N/mm^2]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]	E_{cal} [N/mm^2]	ν_{cal} [-]
1	10,05	208	-40	-40	49975	0,204
	7,81	161	-31	-32	48911	0,210
	8,48	174	-34	-32	51789	0,214
	10,53	215	-41	-42	51962	0,206
	10,88	229	-42	-38	49396	0,188
2	9,68	196	-37	-38	50028	0,179
	10,05	215	-47	-39	49073	0,236
	9,20	198	-40	-37	48692	0,219
	9,26	196	-38	-34	48988	0,191
	10,54	220	-42	-39	51293	0,205
	7,29	151	-30	-28	52695	0,221
3	8,67	180	-33	-39	49708	0,210
	8,55	178	-32	-37	50718	0,185
	7,87	165	-30	-30	46098	0,166
	8,45	183	-34	-34	47443	0,173
	8,71	185	-36	-36	47926	0,158
	7,67	161	-31	-31	48724	0,199
4	9,01	187	-34	-40	50191	0,195
	8,09	170	-31	-35	52238	0,194
	9,16	187	-36	-36	52053	0,193
	9,80	201	-48	-54	52117	0,247

Fortsetzung Tabelle A.4: Kennwerte der einaxialen Zugversuche - Einzelwerte

Serie	σ_{ult} [N/mm^2]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]	E_{cal} [N/mm^2]	ν_{cal} [-]
	9,48	194	-45	-48	50374	0,244
	9,31	191	-48	-47	53625	0,260
5	7,80	159	-30	-31	52428	0,182
	7,64	158	-32	-32	52678	0,196
	6,98	146	-35	-37	49634	0,229
	8,70	182	-45	-47	50694	0,262
	9,37	198	-48	-48	49136	0,255
	8,25	181	-42	-39	48380	0,241
6	9,23	196	-35	-41	49826	0,183
	7,89	162	-30	-28	51748	0,186
	6,94	140	-26	-26	51365	0,204
	7,33	153	-37	-36	50392	0,258
	8,75	180	-41	-45	52100	0,211
	8,32	172	-41	-46	49917	0,260
7	9,16	204	-39	-36	50539	0,209
	9,10	195	-36	-36	52925	0,226
	8,22	172	-33	-33	51821	0,204
	8,37	170	-41	-43	54280	0,255
	8,50	175	-44	-43	50288	0,257
	9,53	204	-50	-46	52649	0,253
8	7,90	170	-31	-32	48283	0,194
	6,37	136	-25	-26	51150	0,207
	8,05	175	-33	-29	50593	0,175
	8,88	214	-45	-43	51416	0,258
	7,84	175	-41	-45	49769	0,269
	7,98	167	-41	-40	49768	0,277
9	8,27	174	-41	-49	46615	0,228
	8,48	179	-44	-45	49739	0,268
	8,99	197	-45	-45	48352	0,245
	7,22	156	-38	-38	50935	0,274
	9,00	184	-44	-49	51244	0,235
	9,02	191	-46	-47	49148	0,247
10	7,10	150	-27	-28	51829	0,192
	6,92	146	-27	-28	48396	0,195
	7,11	148	-28	-27	49651	0,241
	7,02	146	-36	-36	53320	0,288

Fortsetzung Tabelle A.4: Kennwerte der einaxialen Zugversuche - Einzelwerte

Serie	σ_{ult} [N/mm^2]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]	E_{cal} [N/mm^2]	ν_{cal} [-]
	5,82	127	-33	-29	51550	0,284
	6,36	134	-33	-34	50350	0,317
11	6,60	132	-25	-26	52597	0,208
	8,52	175	-32	-33	48118	0,174
	8,17	166	-31	-31	49494	0,185
	7,12	142	-37	-35	54042	0,313
	8,15	166	-41	-39	52132	0,258
	5,25	106	-26	-28	55103	0,291
12	6,83	140	-29	-27	53057	0,234
	6,88	145	-35	-27	52040	0,282
	6,86	140	-28	-25	54118	0,222
	6,99	150	-35	-32	50039	0,259
	8,60	187	-43	-42	46929	0,222
	7,98	161	-42	-38	47638	0,215
13	6,17	133	-27	-20	48318	0,199
	6,19	130	-24	-27	47928	0,174
	7,16	148	-29	-29	49374	0,206
	7,92	165	-40	-44	49525	0,283
	4,33	93	-21	-22	50449	0,329
	7,91	164	-41	-37	53133	0,294
14	7,21	146	-28	-28	50273	0,187
	7,52	146	-30	-29	56973	0,220
	6,20	167	-26	-18	49447	0,202
	7,24	153	-36	-32	52270	0,259
	7,51	173	-41	-37	55323	0,355
	7,52	167	-38	-38	50188	0,249

Tabelle A.5: Kennwerte der einaxialen Zugversuche - Mittelwerte je Serie

Serie	σ_{ult} [N/mm^2]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]	E_{cal} [N/mm^2]	ν_{cal} [-]
1	9,55	197	-38	-37	50407	0,204
2	9,34	196	-39	-36	50128	0,209
3	8,32	175	-33	-34	48436	0,182
4	9,14	188	-40	-43	51766	0,222
5	8,12	171	-39	-39	50492	0,228
6	8,08	167	-35	-37	50892	0,217
7	8,81	187	-40	-40	52084	0,234
8	7,84	173	-36	-36	50163	0,230
9	8,50	180	-43	-46	49339	0,249
10	6,72	142	-31	-30	50849	0,253
11	7,30	148	-32	-32	51914	0,238
12	7,36	154	-35	-32	50637	0,239
13	6,61	139	-30	-30	49788	0,248
14	7,20	159	-33	-30	52412	0,246

Tabelle A.6: Kennwerte der einaxialen Zugversuche - aus den gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien

Serie	σ_{ult} [N/mm^2]	$\varepsilon_{1,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{2,ult}$ [µm/m]	$\varepsilon_{3,ult}$ [µm/m]	E_{cal} [N/mm^2]	ν_{cal} [-]
1	9,55	197	-38	-37	50394	0,203
2	9,34	196	-39	-36	50004	0,208
3	8,32	175	-33	-34	48427	0,182
4	9,14	188	-40	-43	51754	0,222
5	8,12	171	-39	-39	50407	0,230
6	8,08	167	-35	-37	50864	0,216
7	8,81	187	-40	-40	52051	0,234
8	7,84	173	-36	-36	50151	0,232
9	8,50	180	-43	-46	49272	0,248
10	6,72	142	-31	-30	50795	0,250
11	7,30	148	-32	-32	51503	0,231
12	7,36	154	-35	-32	50274	0,237
13	6,61	139	-30	-30	49817	0,244
14	7,20	159	-33	-30	52403	0,246

A.2 Übersicht der mehraxialen Belastungsversuche

Abkürzungen:

Festigkeit i.O.?	ja	-	Festigkeit im Erwartungsbereich
Verwertbar?	*	-	Messung kann nicht verwendet werden, da Festigkeit nicht im Erwartungsbereich
Bruch / Ort	FB	-	Fuge zwischen Klebstoff und Beton
	B	-	Beton
Bruch / Art	Z	-	Zugbruch
	D	-	Druckbruch
	ZD	-	Schubbruch

Tabelle A.7: Übersicht der mehraxialen Versuche

Serie	PK	SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	Festig-	Sp-D-	Verwert-	Bruch	
		α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	keit i.O.?	Linie	bar?	Ort	Art
1	1	1,000	0,000	0,000	0	7,50	0,00	0,00	ja	ja	ja	FB	Z
	2	1,000	0,000	0,000	0	8,31	0,00	0,00	ja	ja	ja	B	Z
	3	1,000	0,000	0,000	0	7,89	0,00	0,00	ja	ja	ja	B	Z
	4	0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-170,79	ja	ja	ja	B	D
	5	0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-159,62	ja	ja	ja	B	D
	6	0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-153,26	ja	ja	ja	B	D
	7	1,000	0,000	-0,366	15	8,24	0,00	-2,97	ja	ja	ja	FB	Z
	8	1,000	0,000	-0,366	15	6,98	0,00	-2,53	ja	ja	ja	B	Z
	9	1,000	0,000	-0,366	15	7,44	0,00	-2,65	ja	ja	ja	FB	Z
	10	1,000	0,000	-1,000	30	7,25	0,00	-7,29	ja	ja	ja	B	Z
	11	1,000	0,000	-1,000	30	7,52	0,00	-7,50	ja	ja	ja	B	Z
	12	1,000	0,000	-1,000	30	8,06	0,00	-8,01	ja	ja	ja	FB	Z
2	1	0,366	0,000	-1,000	45	6,11	0,00	-16,68	ja	ja	ja	F	Z
	2	0,366	0,000	-1,000	45	6,22	0,00	-16,92	ja	ja	ja	F	Z
	3	0,366	0,000	-1,000	45	6,66	0,00	-18,19	ja	ja	ja	F	Z
	4	0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-50,67	-189,98	ja	ja	ja	B	D
	5	0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-52,03	-194,65	ja	ja	ja	B	D
	6	0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-51,92	-194,71	ja	ja	ja	B	D
	7	0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-91,53	-183,21	ja	ja	ja	B	D
	8	0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-98,25	-197,24	ja	ja	ja	B	D
	9	0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-93,27	-187,55	ja	ja	ja	B	D
	10	0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-132,56	-181,11	ja	ja	ja	B	D
	11	0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-134,08	-183,78	ja	ja	ja	B	D
	12	0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-129,00	-176,69	ja	ja	ja	B	D
3	1	0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-170,16	-170,45	ja	ja	ja	B	D
	2	0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-164,89	-165,08	ja	ja	ja	B	D
	3	0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-181,91	-182,25	ja	ja	ja	B	D
	4	1,000	-0,183	-0,183	0	7,29	-1,33	-1,33	ja	ja	ja	B	Z
	5	1,000	-0,183	-0,183	0	8,54	-1,56	-1,56	ja	ja	ja	B	Z
	6	1,000	-0,183	-0,183	0	8,01	-1,47	-1,47	ja	ja	ja	B	Z
	7	1,000	-0,500	-0,500	0	6,95	-3,48	-3,48	ja	ja	ja	FB	Z
	8	1,000	-0,500	-0,500	0	7,61	-3,81	-3,81	ja	ja	ja	B	Z
	9	1,000	-0,500	-0,500	0	7,88	-3,94	-3,94	ja	ja	ja	B	Z
	10	1,000	-0,268	-0,732	15	7,31	-1,73	-5,19	ja	ja	ja	B	Z
	11	1,000	-0,268	-0,732	15	8,05	-2,00	-5,72	ja	ja	ja	B	Z
	12	1,000	-0,268	-0,732	15	8,66	-2,20	-6,18	ja	ja	ja	FB	Z

Fortsetzung Tabelle A.7: Übersicht der mehraxialen Versuche

Serie	PK	SPV			$\bar{\varphi}$	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	Festig-	Sp-D-	Verwert-	Bruch	
		α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	keit i.O.?	Linie	bar?	Ort	Art
4	1	1,000	-0,817	-0,817	0	6,96	-5,69	-5,69	nein	ja	nein*	FB	Z
	2	1,000	-0,817	-0,817	0	6,66	-5,44	-5,44	nein	ja	nein*	FB	Z
	3	1,000	-0,817	-0,817	0	6,68	-5,46	-5,46	nein	ja	nein*	FB	Z
	4	0,866	-0,500	-1,000	15	7,20	-4,06	-8,24	nein	ja	nein*	FB	Z
	5	0,866	-0,500	-1,000	15	5,30	-2,88	-6,02	nein	ja	nein*	F	Z
	6	0,866	-0,500	-1,000	15	6,49	-3,58	-7,33	nein	ja	nein*	FB	Z
	7	0,577	-0,211	-1,000	30	6,20	-2,20	-10,74	nein	ja	nein*	F	Z
	8	0,577	-0,211	-1,000	30	7,03	-2,33	-12,11	ja	ja	ja	FB	Z
	9	0,577	-0,211	-1,000	30	7,24	-2,54	-12,55	ja	ja	ja	FB	Z
	10	0,155	-0,155	-1,000	45	6,89	-6,81	-44,67	ja	ja	ja	F	Z
	11	0,155	-0,155	-1,000	45	5,28	-5,24	-34,22	nein	ja	nein*	F	Z
	12	0,155	-0,155	-1,000	45	4,92	-4,87	-32,02	nein	ja	nein*	F	Z
5	1	1,000	-1,000	-1,000	0	6,52	-6,52	-6,52	ja	ja	ja	B	Z
	2	1,000	-1,000	-1,000	0	5,79	-5,79	-5,79	ja	ja	nein	B	Z
	3	1,000	-1,000	-1,000	0	6,05	-6,05	-6,05	ja	ja	ja	F	Z
	4	0,732	-1,000	-1,000	0	5,87	-8,23	-8,18	ja	ja	ja	F	Z
	5	0,732	-1,000	-1,000	0	6,17	-8,34	-8,36	ja	ja	ja	B	Z
	6	0,732	-1,000	-1,000	0	5,72	-7,80	-7,85	ja	ja	nein	FB	Z
	7	0,500	-1,000	-1,000	0	4,84	-9,64	-9,70	nein	ja	nein*	FB	Z
	8	0,500	-1,000	-1,000	0	6,04	-12,07	-12,07	nein	nein	nein	FB	Z
	9	0,500	-1,000	-1,000	0	6,09	-12,06	-12,09	nein	ja	nein*	FB	Z
	10	0,286	-1,000	-1,000	0	3,90	-13,63	-13,63	nein	ja	nein*	FB	Z
	11	0,286	-1,000	-1,000	0	4,86	-16,98	-16,98	nein	nein	nein	FB	Z
	12	0,286	-1,000	-1,000	0	4,05	-14,43	-14,47	nein	ja	nein*	FB	Z
6	1	0,577	-0,577	-1,000	15	6,11	-6,10	-10,54	nein	ja	nein*	FB	Z
	2	0,577	-0,577	-1,000	15	6,97	-6,91	-12,07	nein	ja	nein*	F	Z
	3	0,577	-0,577	-1,000	15	6,55	-6,50	-11,36	nein	ja	nein*	F	Z
	4	0,366	-0,634	-1,000	15	6,14	-10,53	-16,72	nein	ja	nein*	F	Z
	5	0,366	-0,634	-1,000	15	6,41	-11,13	-17,63	nein	ja	nein*	FB	Z
	6	0,366	-0,634	-1,000	15	5,51	-9,53	-15,03	nein	ja	nein*	F	Z
	7	0,183	-0,683	-1,000	15	4,93	-18,56	-27,21	nein	ja	nein*	FB	Z
	8	0,183	-0,683	-1,000	15	4,46	-16,71	-24,51	nein	ja	nein*	F	Z
	9	0,183	-0,683	-1,000	15	4,70	-17,52	-25,87	nein	ja	nein*	F	Z
	10	0,333	-0,333	-1,000	30	4,77	-4,65	-14,41	ja	ja	ja	F	Z
	11	0,333	-0,333	-1,000	30	7,08	-6,79	-21,36	ja	ja	ja	F	Z
	12	0,333	-0,333	-1,000	30	Betonagefehler							
7	1	0,155	-0,423	-1,000	30	5,19	-14,32	-34,28	nein	ja	nein*	F	Z
	2	0,155	-0,423	-1,000	30	4,53	-12,58	-30,08	nein	ja	nein*	F	Z
	3	0,155	-0,423	-1,000	30	4,98	-13,79	-32,72	nein	ja	nein*	F	Z
	4	0,050	-1,000	-1,000	0	1,87	-38,15	-38,23	nein	ja	nein*	F	Z
	5	0,050	-1,000	-1,000	0	2,11	-43,61	-43,74	nein	ja	nein*	F	Z
	6	0,050	-1,000	-1,000	0	2,21	-44,13	-44,13	nein	ja	nein*	F	Z
	7	0,025	-1,000	-1,000	0	1,03	-43,72	-43,55	nein	ja	nein*	F	Z
	8	0,025	-1,000	-1,000	0	1,46	-63,57	-63,62	nein	ja	nein*	F	Z
	9	0,025	-1,000	-1,000	0	1,58	-63,32	-63,32	nein	ja	nein*	F	Z
	10	0,015	-1,000	-1,000	0	0,93	-68,32	-68,40	nein	ja	nein*	F	Z
	11	0,015	-1,000	-1,000	0	0,95	-67,71	-67,66	nein	ja	nein*	F	Z
	12	0,015	-1,000	-1,000	0	0,81	-53,99	-53,99	nein	ja	nein*	F	Z
8	1	0,005	-1,000	-1,000	0	0,41	-89,79	-89,89	nein	ja	nein*	F	Z
	2	0,005	-1,000	-1,000	0	0,46	-100,16	-100,67	nein	ja	nein*	F	Z

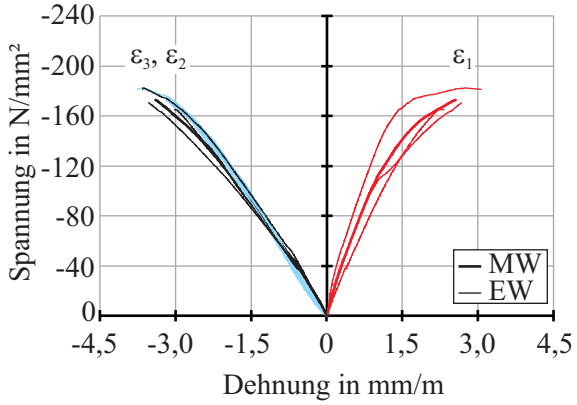
Fortsetzung Tabelle A.7: Übersicht der mehraxialen Versuche

Serie	PK	SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	Festig-	Sp-D-	Verwert-	Bruch	
		α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	keit i.O.?	Linie	bar?	Ort	Art
	3	0,005	-1,000	-1,000	0	0,38	-83,54	-84,01	nein	ja	nein*	F	Z
	4	1,000	0,000	0,000	0	4,80	0,00	0,00	nein	ja	nein*	B	Z
	5	1,000	0,000	-1,000	30	4,47	0,00	-4,41	nein	ja	nein*	B	Z
	6	1,000	0,000	-1,000	30	4,97	0,00	-4,96	nein	ja	nein*	B	Z
	7	-0,040	-0,040	-1,000	60	-9,24	-9,28	-233,93	ja	ja	ja	B	D
	8	-0,027	-0,287	-1,000	45	-6,70	-71,77	-250,27	ja	ja	ja	B	D
	9	-0,027	-0,287	-1,000	45	-6,42	-72,19	-251,83	ja	ja	ja	B	D
9	1	-0,029	-0,514	-1,000	30	-7,35	-131,97	-256,87	ja	ja	ja	B	D
	2	-0,040	-0,040	-1,000	60	-9,05	-9,12	-231,87	ja	ja	ja	B	D
	3	-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,53	-246,02	-246,03	ja	ja	ja	B	D
	4	-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,10	-242,66	-242,95	ja	ja	ja	B	D
	5	-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,39	-178,51	-241,58	ja	ja	ja	B	D
	6	-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,31	-244,73	-244,86	ja	ja	ja	B	D
	7	-0,029	-0,514	-1,000	30	-7,94	-141,85	-275,81	ja	ja	ja	B	D
	8	-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,36	-182,14	-246,45	ja	ja	ja	B	D
	9	-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,33	-176,95	-239,80	ja	ja	ja	B	D
	10	-0,027	-0,287	-1,000	45	-6,90	-74,74	-261,14	ja	ja	ja	B	D
	11	-0,040	-0,040	-1,000	60	-9,70	-9,71	-244,60	ja	ja	ja	B	D
	12	-0,029	-0,514	-1,000	30	-7,43	-136,07	-264,64	ja	ja	ja	B	D
10	1	0,050	-1,000	-1,000	0	1,71	-35,17	-35,58	nein	ja	nein*	F	Z
	2	0,050	-1,000	-1,000	0	3,90	-79,05	-79,25	ja	ja	ja	B	Z
	3	0,050	-1,000	-1,000	0	5,05	-102,37	-102,64	ja	ja	ja	B	Z
	4	0,050	-0,719	-1,000	15	5,29	-76,83	-107,18	ja	nein	nein	B	Z
	5	0,050	-0,719	-1,000	15	5,31	-77,19	-107,82	ja	ja	ja	B	Z
	6	0,050	-0,719	-1,000	15	4,83	-71,65	-100,08	ja	ja	ja	B	Z
	7	0,040	-0,480	-1,000	30	3,09	-37,09	-77,33	nein	ja	nein*	B	Z
	8	0,040	-0,480	-1,000	30	4,50	-54,06	-113,18	ja	nein	nein	B	Z
	9	0,040	-0,480	-1,000	30	4,89	-59,29	-123,70	ja	ja	ja	B	Z
	10	0,025	-0,250	-1,000	45	4,06	-41,08	-164,46	ja	ja	ja	F	Z
	11	0,025	-0,250	-1,000	45	2,95	-30,39	-121,86	nein	ja	nein*	B	Z
	12	0,025	-0,250	-1,000	45	3,44	-34,79	-139,08	nein	nein	nein	B	Z
11	1	0,110	-1,000	-1,000	0	6,78	-61,54	-62,09	ja	nein	nein	B	Z
	2	0,110	-1,000	-1,000	0	4,16	-37,83	-38,22	nein	ja	nein*	B	Z
	3	0,110	-1,000	-1,000	0	4,20	-38,52	-39,20	nein	ja	nein*	B	Z
	4	0,090	-0,708	-1,000	15	4,75	-37,15	-53,22	nein	nein	nein	B	Z
	5	0,090	-0,708	-1,000	15	6,35	-50,22	-70,93	ja	ja	nein	B	Z
	6	0,090	-0,708	-1,000	15	4,97	-39,10	-55,54	nein	ja	nein*	B	Z
	7	0,075	-0,463	-1,000	30	4,51	-28,05	-61,01	nein	nein	nein	B	Z
	8	0,075	-0,463	-1,000	30	6,34	-39,06	-84,97	ja	ja	ja	B	Z
	9	0,075	-0,463	-1,000	30	3,86	-23,99	-51,69	nein	ja	nein*	B	Z
	10	0,050	-0,231	-1,000	45	5,23	-24,19	-104,91	ja	nein	nein	B	Z
	11	0,050	-0,231	-1,000	45	4,40	-20,08	-87,91	ja	nein	nein	B	Z
	12	0,050	-0,231	-1,000	45	4,77	-22,05	-95,84	ja	nein	nein	B	Z
12	1	0,025	-1,000	-1,000	0	3,71	-150,79	-150,95	ja	ja	ja	B	Z
	2	0,025	-1,000	-1,000	0	3,43	-139,52	-139,96	ja	ja	ja	B	Z
	3	0,025	-1,000	-1,000	0	3,76	-150,31	-150,31	ja	ja	ja	B	Z
	4	0,020	-0,727	-1,000	15	3,33	-122,43	-168,64	ja	ja	ja	B	Z
	5	0,020	-0,727	-1,000	15	3,53	-130,45	-179,41	ja	ja	ja	B	Z
	6	0,020	-0,727	-1,000	15	3,34	-123,32	-168,67	ja	ja	ja	B	Z
	7	0,010	-0,495	-1,000	30	1,94	-99,18	-200,25	ja	ja	ja	B	ZD

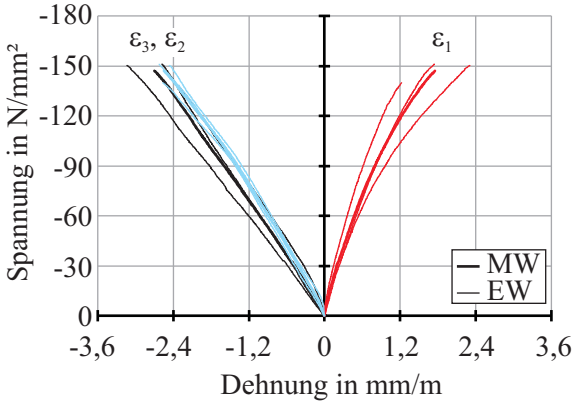
Fortsetzung Tabelle A.7: Übersicht der mehraxialen Versuche

Serie	PK	SPV			$\bar{\varphi}$	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	Festig-	Sp-D-	Verwert-	Bruch	
		α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	keit i.O.?	Linie	bar?	Ort	Art
	8	0,010	-0,495	-1,000	30	1,88	-95,90	-193,66	ja	ja	ja	B	ZD
	9	0,010	-0,495	-1,000	30	2,00	-101,30	-205,22	ja	ja	ja	B	ZD
	10	0,345	-1,000	-1,000	0	3,44	-10,58	-10,58	nein	ja	nein*	B	Z
	11	0,345	-1,000	-1,000	0	5,65	-16,39	-16,53	ja	ja	ja	B	Z
	12	0,345	-1,000	-1,000	0	5,03	-14,28	-14,34	ja	ja	ja	B	Z
13	1	0,275	-0,658	-1,000	15	2,64	-6,25	-9,49	nein	nein	nein	F	Z
	2	0,275	-0,658	-1,000	15	4,19	-10,05	-15,50	ja	ja	nein	B	Z
	3	0,275	-0,658	-1,000	15	4,71	-11,24	-17,23	ja	nein	nein	B	Z
	4	0,225	-0,388	-1,000	30	4,32	-7,19	-18,90	ja	nein	nein	B	Z
	5	0,225	-0,388	-1,000	30	4,13	-6,89	-18,28	ja	ja	ja	B	Z
	6	0,225	-0,388	-1,000	30	3,91	-6,45	-17,22	ja	nein	nein	B	Z
	7	0,165	-0,147	-1,000	45	3,81	-3,35	-23,64	ja	ja	ja	B	Z
	8	0,165	-0,147	-1,000	45	3,68	-3,20	-22,44	ja	ja	ja	B	Z
	9	0,165	-0,147	-1,000	45	5,11	-4,52	-30,90	ja	ja	ja	B	Z
	10	0,275	-0,658	-1,000	15	3,01	-7,12	11,19	nein	ja	nein*	B	Z
	11	0,075	-0,463	-1,000	30	2,47	-15,58	-34,00	nein	nein	nein	F	Z
	12	1,000	0,000	-1,000	30	4,17	0,00	-4,13	nein	ja	nein*	B	Z
14	1	0,025	-0,250	-1,000	45	3,01	-31,14	-124,44	nein	nein	nein	B	Z
	2	0,090	-0,708	-1,000	15	3,90	-30,86	-43,78	nein	ja	nein*	B	Z
	3	0,110	-1,000	-1,000	0	3,93	-36,10	-36,18	ja	ja	ja	B	Z
	4	0,275	-0,658	-1,000	15	3,26	-7,53	-11,78	ja	ja	ja	B	Z
	5	0,275	-0,658	-1,000	15	2,73	-6,48	-9,85	ja	ja	ja	B	Z
	6	0,110	-1,000	-1,000	0	3,67	-33,85	-34,04	ja	ja	ja	B	Z
	7	0,225	-0,388	-1,000	30	3,85	-6,61	-17,13	ja	ja	ja	B	Z
	8	0,075	-0,463	-1,000	30	5,00	-30,69	-66,58	ja	ja	ja	B	Z
	9	0,225	-1,000	-1,000	0	3,39	-15,26	-15,47	nein	ja	nein*	B	Z
	10	0,333	-0,333	-1,000	30	5,56	-5,51	-16,81	ja	ja	ja	B	Z
	11	0,040	-0,480	-1,000	30	4,75	-57,93	-120,86	ja	ja	ja	B	Z
	12	1,000	-1,000	-1,000	0	5,65	-5,55	-5,55	ja	ja	ja	B	Z
T8	2	0,050	-1,000	-1,000	0	4,98	-99,49	-99,85	ja	nein	nein	B	Z
	3	0,050	-1,000	-1,000	0	5,17	-103,08	-103,72	ja	nein	nein	B	Z
BW1	1	-0,100	-0,100	-1,000	60	-32,05	-32,06	-320,56	ja	nein	nein	B	D
	2	-0,100	-0,100	-1,000	60	-32,79	-32,79	-327,19	ja	nein	nein	B	D
	3	-0,100	-0,100	-1,000	60	-31,93	-31,93	-319,34	ja	nein	nein	B	D

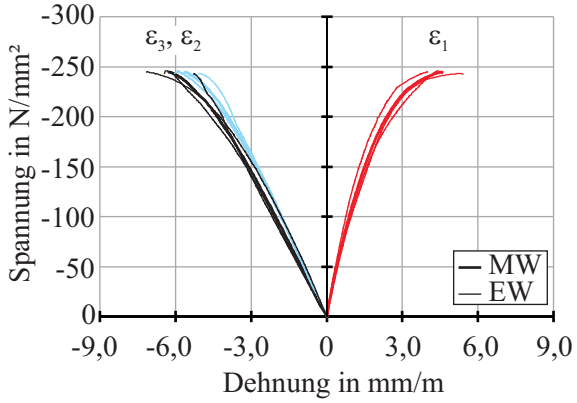
A.3 Gemessene Spannungs-Dehnungs-Linien unter mehraxialer Belastung



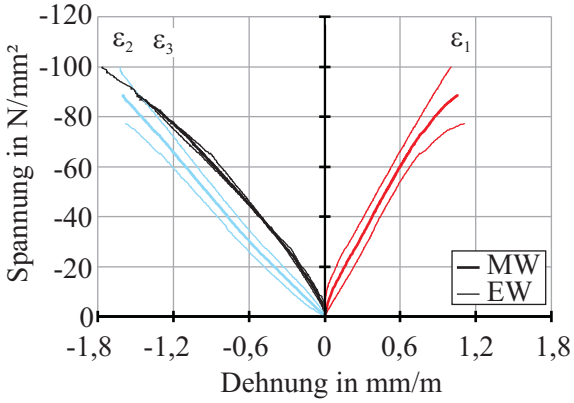
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -1 / -1$



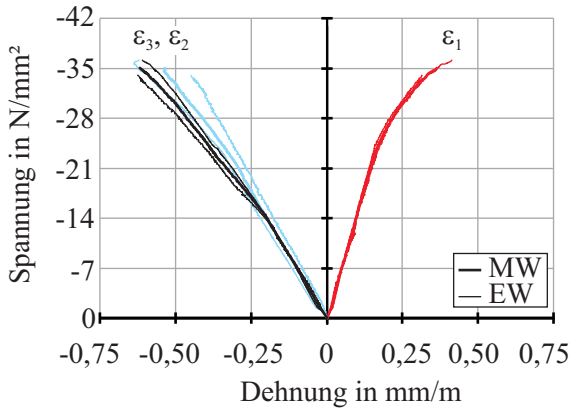
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}025 / -1 / -1$



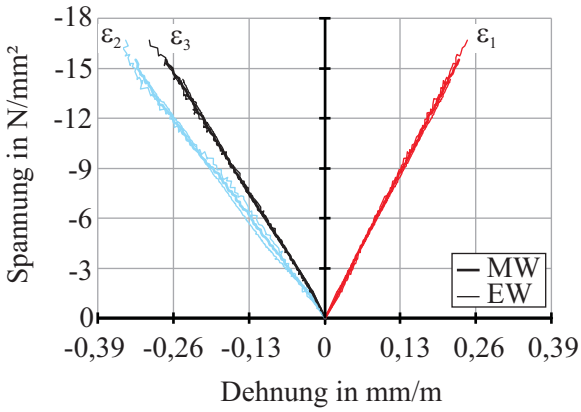
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}039 / -1 / -1$



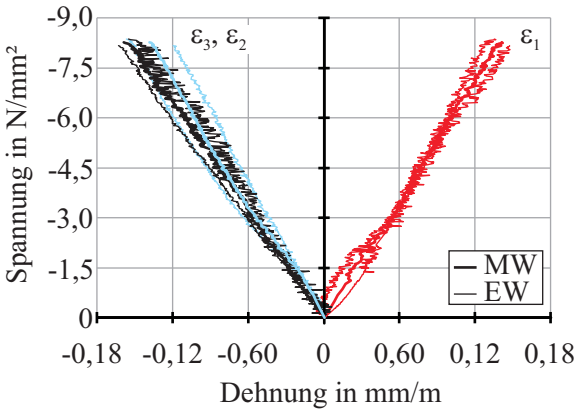
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}05 / -1 / -1$



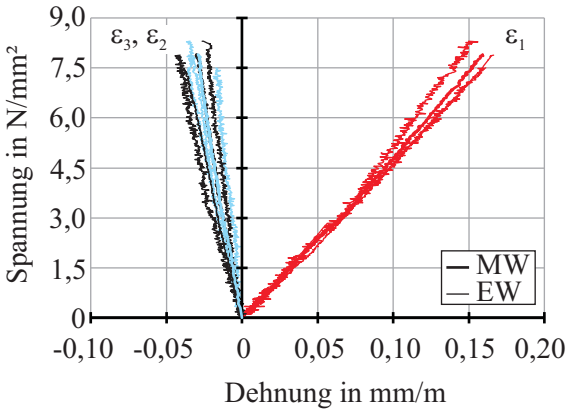
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}11 / -1 / -1$



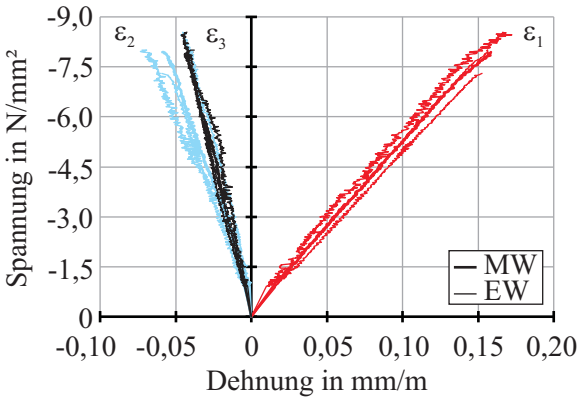
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}345 / -1 / -1$



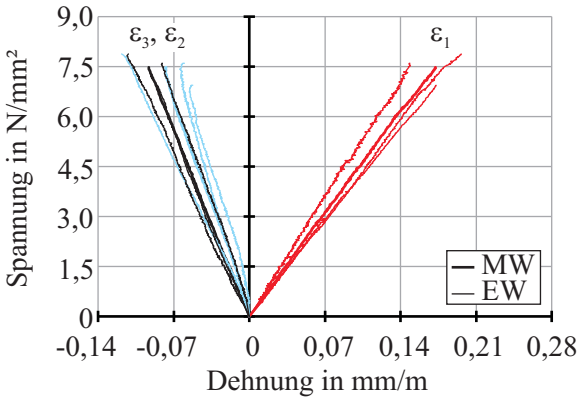
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}732 / -1 / -1$



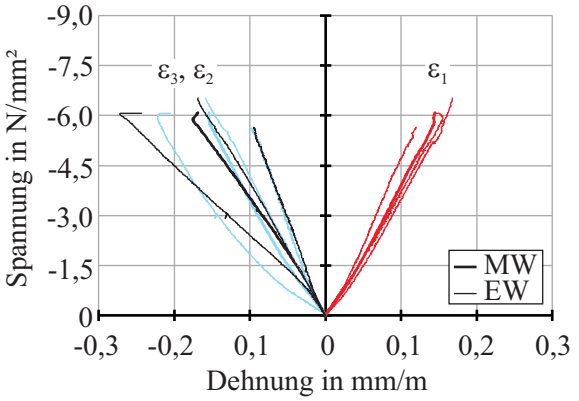
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / 0 / 0$



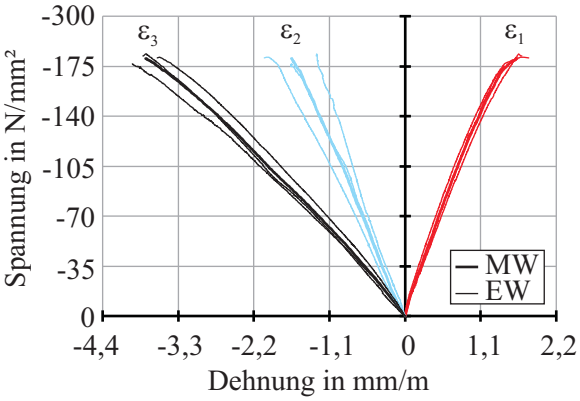
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -0{,}183 / -0{,}183$



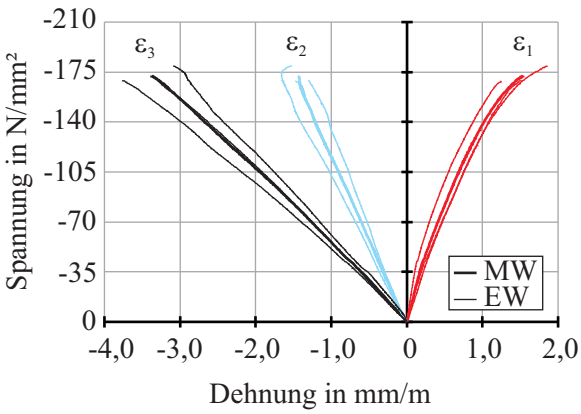
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -0{,}5 / -0{,}5$



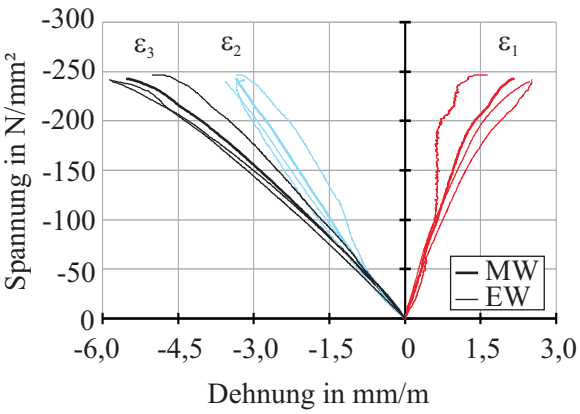
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -1 / -1$



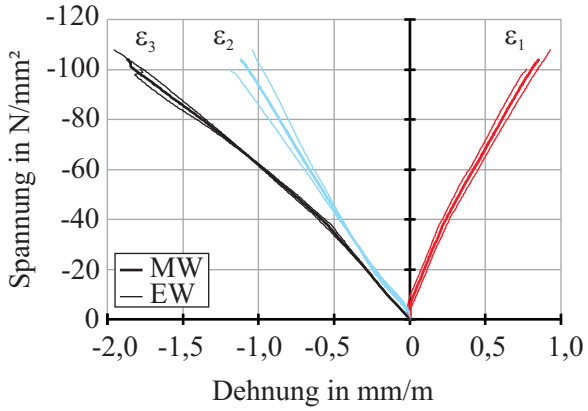
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -0{,}732 / -1$



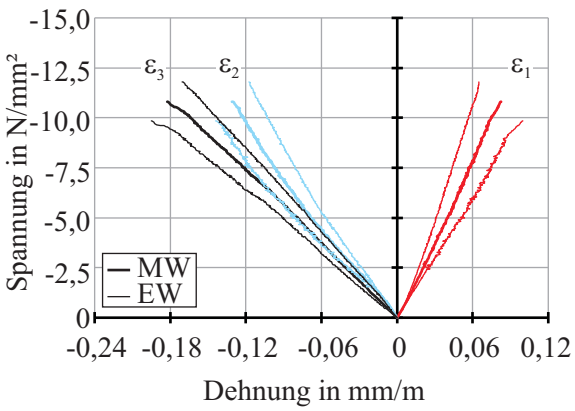
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}02 / -0{,}727 / -1$



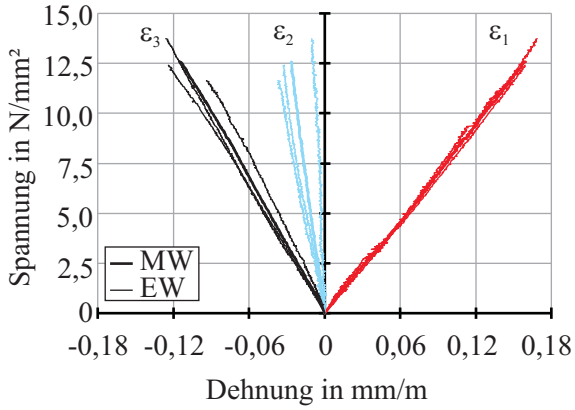
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}027 / -0{,}739 / -1$



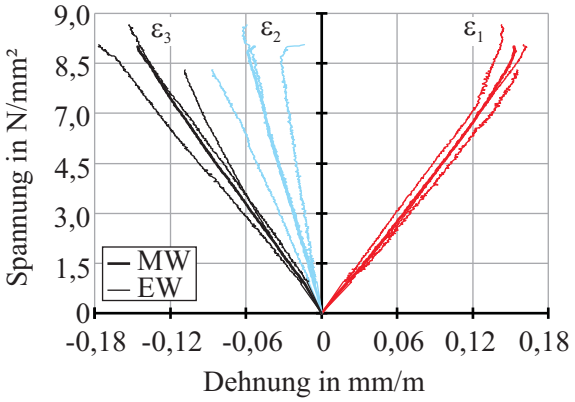
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}05 / -0{,}719 / -1$



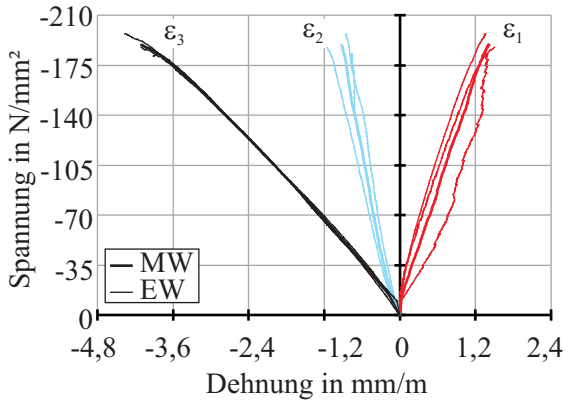
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}275 / -0{,}658 / -1$



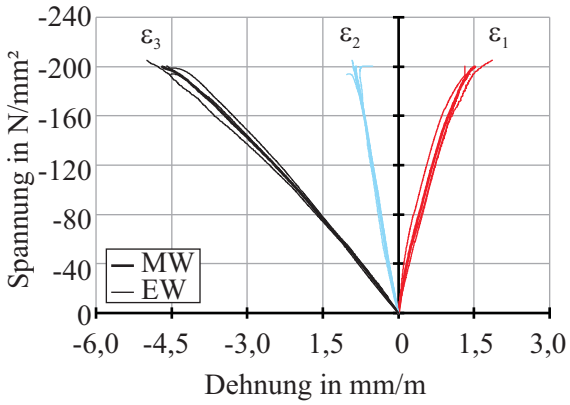
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / 0 / -0{,}366$



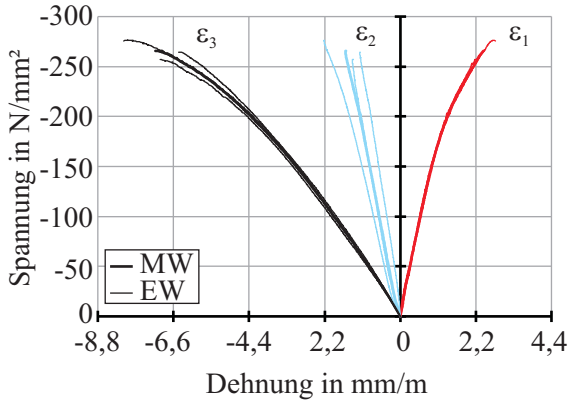
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -0{,}268 / -0{,}732$



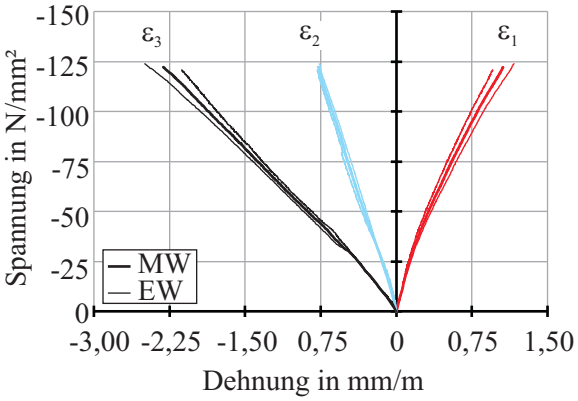
$\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3 = 0 / -0{,}5 / -1$



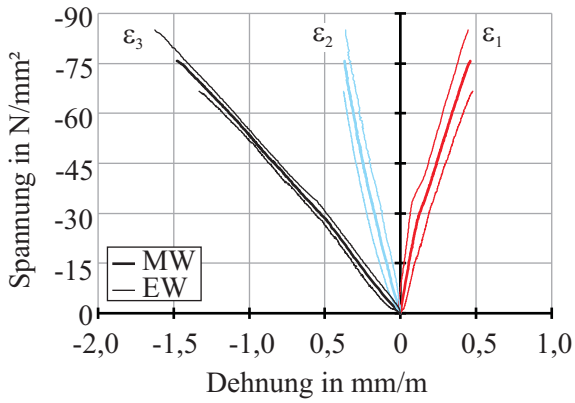
$\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3 = 0{,}01 / -0{,}495 / -1$



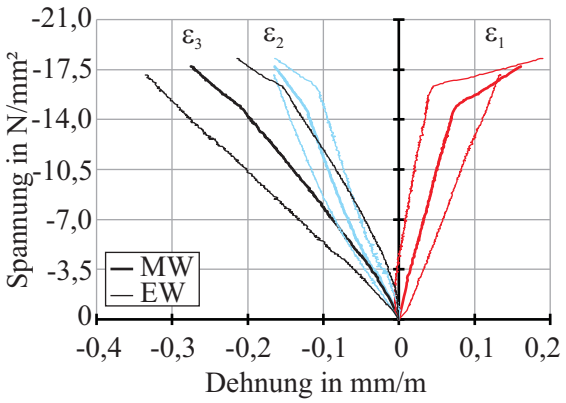
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}029 / -0{,}514 / -1$



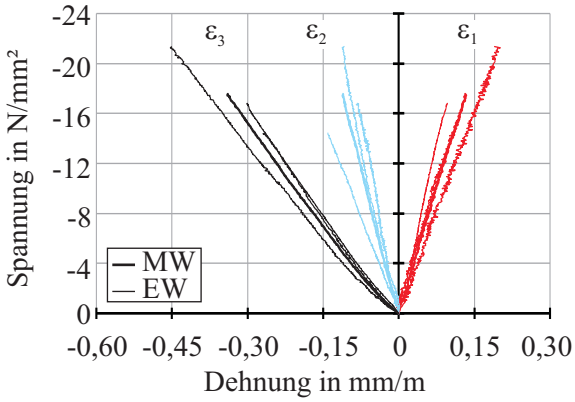
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}04 / -0{,}48 / -1$



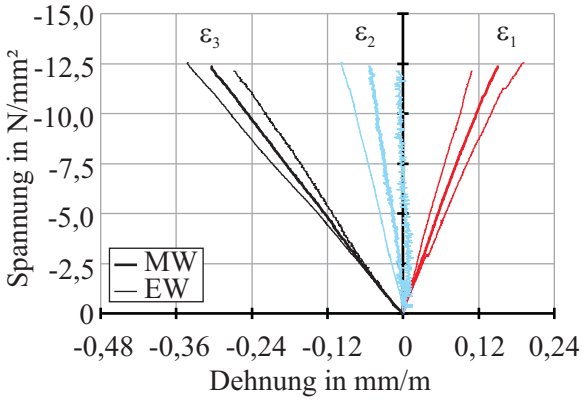
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}075 / -0{,}463 / -1$



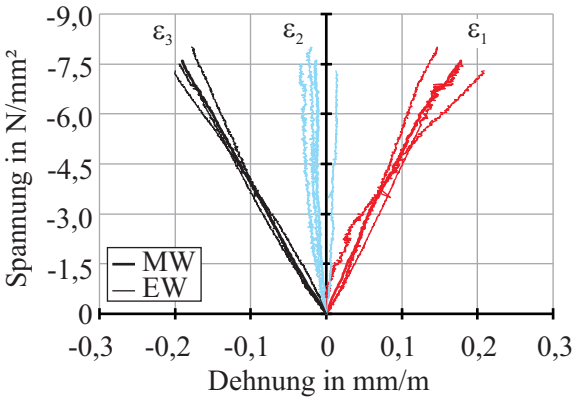
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}225 / -0{,}388 / -1$



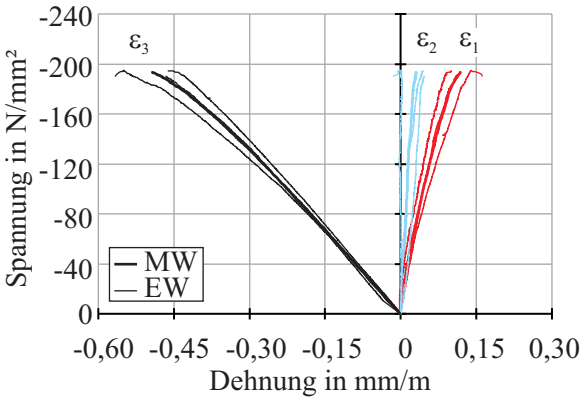
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}333 / -0{,}333 / -1$



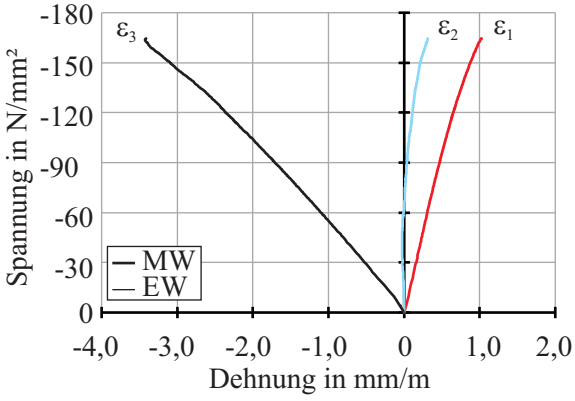
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}577 / -0{,}211 / -1$



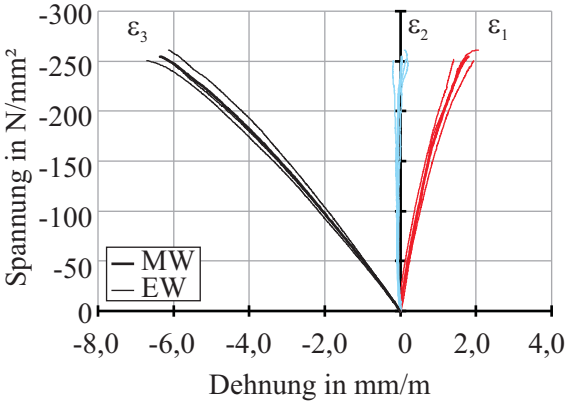
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / 0 / -1$



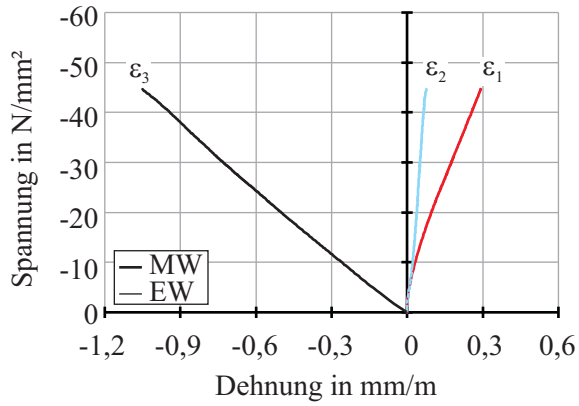
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -0{,}268 / -1$



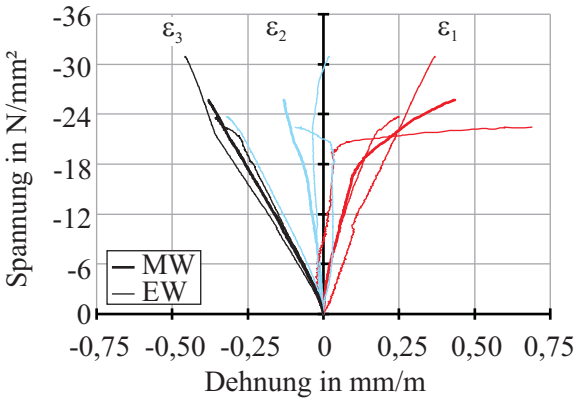
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}025 / -0{,}25 / -1$



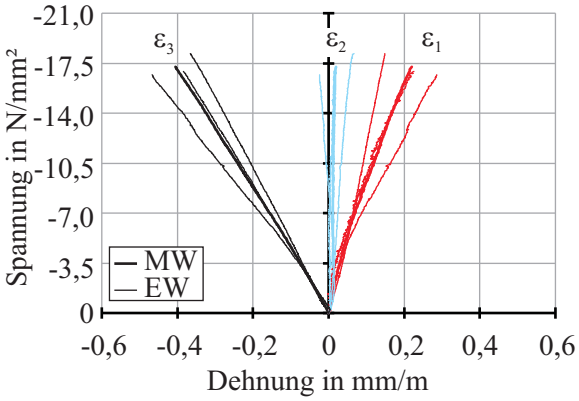
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}027 / -0{,}287 / -1$



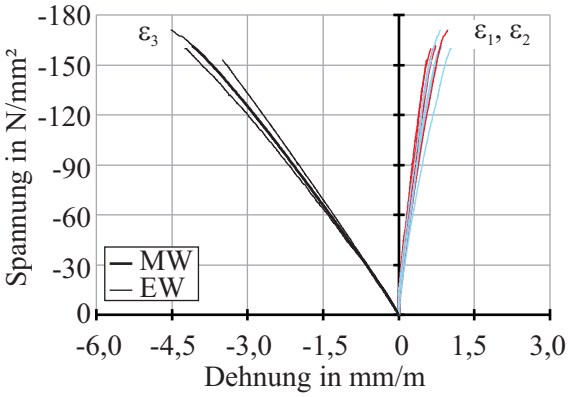
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}155 / -0{,}155 / -1$



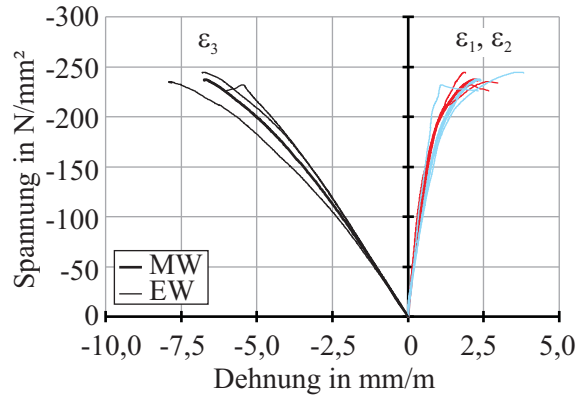
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}165 / -0{,}147 / -1$



$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}366 / 0 / -1$



$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / 0 / -1$



$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}04 / -0{,}04 / -1$

A.4 Mehraxiale Festigkeitswerte

Mittlere einaxiale Druckfestigkeit: $f_c = -174{,}09\,\mathrm{N/mm^2}$
Mittlere einaxiale Zugfestigkeit: $f_{ct} = 8{,}05\,\mathrm{N/mm^2}$

A.4.1 Versuche mit verwertbaren Festigkeitswerten

Tabelle A.8: Einzelwerte der maximalen Festigkeiten aller verwertbarer Versuche

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	f_{ct}	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]			[N/mm²]					
Z	1,000	0,000	0,000	0	-170,83	7,90	7,50	0,00	0,00	0,03	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0	-170,83	7,90	8,31	0,00	0,00	0,03	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0	-170,83	7,90	7,89	0,00	0,00	0,03	0,02	0,03
ZDD	1,000	-0,183	-0,183	0	-170,83	8,32	7,29	-1,33	-1,33	0,04	0,02	0,02
ZDD	1,000	-0,183	-0,183	0	-170,83	8,32	8,54	-1,56	-1,56	0,04	0,02	0,02
ZDD	1,000	-0,183	-0,183	0	-170,83	8,32	8,01	-1,47	-1,47	0,04	0,02	0,02
ZDD	1,000	-0,500	-0,500	0	-170,83	8,32	6,95	-3,48	-3,48	0,04	0,02	0,00
ZDD	1,000	-0,500	-0,500	0	-170,83	8,32	7,61	-3,81	-3,81	0,05	0,03	0,00
ZDD	1,000	-0,500	-0,500	0	-170,83	8,32	7,88	-3,94	-3,94	0,05	0,03	0,00
DD	0,000	-1,000	-1,000	0	-170,83	8,32	0,00	-170,16	-170,45	0,70	0,41	-1,15
DD	0,000	-1,000	-1,000	0	-170,83	8,32	0,00	-164,89	-165,08	0,68	0,39	-1,12
DD	0,000	-1,000	-1,000	0	-170,83	8,32	0,00	-181,91	-182,25	0,75	0,44	-1,23
ZDD	1,000	-1,000	-1,000	0	-171,68	8,12	6,52	-6,52	-6,52	0,05	0,03	-0,02
ZDD	1,000	-1,000	-1,000	0	-171,68	8,12	5,79	-5,79	-5,79	0,05	0,03	-0,02
ZDD	1,000	-1,000	-1,000	0	-171,68	8,12	6,08	-6,05	-6,05	0,05	0,03	-0,02
ZDD	0,732	-1,000	-1,000	0	-171,68	8,12	5,87	-8,18	-8,23	0,06	0,03	-0,04
ZDD	0,732	-1,000	-1,000	0	-171,68	8,12	6,17	-8,34	-8,36	0,06	0,03	-0,04
ZDD	0,732	-1,000	-1,000	0	-171,68	8,12	5,72	-7,80	-7,85	0,06	0,03	-0,03
DDD	-0,039	-1,000	-1,000	0	-170,49	8,50	-9,10	-242,66	-242,95	0,97	0,56	-1,68
DDD	-0,039	-1,000	-1,000	0	-170,49	8,50	-9,53	-246,02	-246,03	0,98	0,57	-1,70
DDD	-0,039	-1,000	-1,000	0	-170,49	8,50	-9,31	-244,73	-244,86	0,98	0,56	-1,69
ZDD	0,050	-1,000	-1,000	0	-183,50	6,72	3,90	-79,05	-79,29	0,32	0,19	-0,49
ZDD	0,050	-1,000	-1,000	0	-183,50	6,72	5,05	-102,37	-102,64	0,41	0,24	-0,63
ZDD	0,110	-1,000	-1,000	0	-188,07	7,71	6,78	-61,54	-62,09	0,26	0,15	-0,36
ZDD	0,025	-1,000	-1,000	0	-180,07	7,36	3,71	-150,79	-150,95	0,61	0,35	-0,96
ZDD	0,025	-1,000	-1,000	0	-180,07	7,36	3,43	-139,52	-139,96	0,56	0,33	-0,89
ZDD	0,025	-1,000	-1,000	0	-180,07	7,36	3,76	-150,31	-150,32	0,61	0,35	-0,95
ZDD	0,345	-1,000	-1,000	0	-180,07	7,36	5,65	-16,39	-16,53	0,09	0,05	-0,09
ZDD	0,345	-1,000	-1,000	0	-180,07	7,36	5,03	-14,28	-14,34	0,08	0,04	-0,08
ZDD	1,000	-1,000	-1,000	0	-181,55	7,20	5,65	-5,55	-5,55	0,04	0,03	-0,02
ZDD	0,110	-1,000	-1,000	0	-181,55	7,20	3,93	-36,10	-36,18	0,16	0,09	-0,22
ZDD	0,110	-1,000	-1,000	0	-181,55	7,20	3,67	-33,85	-34,04	0,15	0,09	-0,20
ZDD	0,050	-1,000	-1,000	0	-170,83	*	4,98	-99,49	-99,85	0,43	0,25	-0,66
ZDD	0,050	-1,000	-1,000	0	-170,83	*	5,17	-103,08	-103,72	0,45	0,26	-0,68
ZD	1,000	0,000	-0,366	15	-170,83	9,79	8,24	0,00	-2,97	0,03	0,03	0,02
ZD	1,000	0,000	-0,366	15	-170,83	9,79	6,98	0,00	-2,53	0,03	0,03	0,02
ZD	1,000	0,000	-0,366	15	-170,83	9,79	7,44	0,00	-2,65	0,03	0,03	0,02
DD	0,000	-0,732	-1,000	15	-170,83	9,34	0,00	-132,56	-181,11	0,55	0,55	-1,06
DD	0,000	-0,732	-1,000	15	-170,83	9,34	0,00	-134,08	-183,78	0,55	0,56	-1,07
DD	0,000	-0,732	-1,000	15	-170,83	9,34	0,00	-129,00	-176,69	0,53	0,54	-1,03

Fortsetzung Tabelle A.8: Einzelwerte der maximalen Festigkeiten

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	f_{ct}	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]							
ZDD	1,000	-0,268	-0,732	15	-170,83	8,32	7,31	-1,73	-5,19	0,04	0,04	0,00
ZDD	1,000	-0,268	-0,732	15	-170,83	8,32	8,05	-2,00	-5,72	0,04	0,04	0,00
ZDD	1,000	-0,268	-0,732	15	-170,83	8,32	8,66	-2,20	-6,18	0,04	0,04	0,00
DDD	-0,027	-0,739	-1,000	15	-170,49	8,50	-6,33	-176,95	-239,80	0,71	0,71	-1,43
DDD	-0,027	-0,739	-1,000	15	-170,49	8,50	-6,36	-182,14	-246,45	0,73	0,73	-1,47
DDD	-0,027	-0,739	-1,000	15	-170,49	8,50	-6,39	-178,51	-241,58	0,71	0,71	-1,44
ZDD	0,050	-0,719	-1,000	15	-183,50	6,72	5,29	-76,83	-107,18	0,32	0,32	-0,56
ZDD	0,050	-0,719	-1,000	15	-183,50	6,72	5,31	-77,19	-107,82	0,32	0,32	-0,57
ZDD	0,050	-0,719	-1,000	15	-183,50	6,72	4,83	-71,65	-100,08	0,29	0,30	-0,53
ZDD	0,090	-0,708	-1,000	15	-188,07	7,71	6,35	-50,22	-70,93	0,21	0,21	-0,35
ZDD	0,020	-0,727	-1,000	15	-180,07	7,36	3,33	-122,43	-168,64	0,49	0,49	-0,92
ZDD	0,020	-0,727	-1,000	15	-180,07	7,36	3,53	-130,45	-179,41	0,53	0,53	-0,98
ZDD	0,020	-0,727	-1,000	15	-180,07	7,36	3,34	-123,32	-168,67	0,50	0,49	-0,93
ZDD	0,275	-0,658	-1,000	15	-180,87	7,07	4,19	-10,05	-15,50	0,06	0,06	-0,07
ZDD	0,275	-0,658	-1,000	15	-180,87	7,07	4,71	-11,24	-17,23	0,06	0,06	-0,08
ZDD	0,275	-0,658	-1,000	15	-181,55	7,20	3,26	-7,53	-11,78	0,04	0,04	-0,05
ZDD	0,275	-0,658	-1,000	15	-181,55	7,20	2,73	-6,48	-9,85	0,04	0,04	-0,04
ZD	1,000	0,000	-1,000	30	-170,83	9,79	7,25	0,00	-7,29	0,03	0,05	0,00
ZD	1,000	0,000	-1,000	30	-170,83	9,79	7,52	0,00	-7,50	0,03	0,05	0,00
ZD	1,000	0,000	-1,000	30	-170,83	9,79	8,06	0,00	-8,01	0,03	0,06	0,00
DD	0,000	-0,500	-1,000	30	-170,83	9,34	0,00	-91,53	-183,21	0,38	0,66	-0,93
DD	0,000	-0,500	-1,000	30	-170,83	9,34	0,00	-98,25	-197,24	0,41	0,71	-1,00
DD	0,000	-0,500	-1,000	30	-170,83	9,34	0,00	-93,27	-187,55	0,39	0,67	-0,95
ZDD	0,577	-0,211	-1,000	30	-171,22	9,13	7,03	-2,33	-12,11	0,04	0,07	-0,02
ZDD	0,577	-0,211	-1,000	30	-171,22	9,13	7,24	-2,54	-12,55	0,04	0,07	-0,03
ZDD	0,333	-0,333	-1,000	30	-167,14	8,08	4,77	-4,65	-14,41	0,04	0,07	-0,05
ZDD	0,333	-0,333	-1,000	30	-167,14	8,08	7,08	-6,79	-21,36	0,06	0,11	-0,07
DDD	-0,029	-0,514	-1,000	30	-170,49	8,50	-7,94	-141,85	-275,81	0,56	0,96	-1,44
DDD	-0,029	-0,514	-1,000	30	-170,49	8,50	-7,35	-131,97	-256,87	0,52	0,90	-1,34
DDD	-0,029	-0,514	-1,000	30	-170,49	8,50	-7,43	-136,07	-264,64	0,53	0,92	-1,38
ZDD	0,040	-0,480	-1,000	30	-183,50	6,72	4,50	-54,06	-113,18	0,23	0,39	-0,51
ZDD	0,040	-0,480	-1,000	30	-183,50	6,72	4,89	-59,29	-123,70	0,25	0,43	-0,56
ZDD	0,075	-0,463	-1,000	30	-188,07	7,71	6,34	-39,06	-84,97	0,17	0,30	-0,36
ZDD	0,010	-0,495	-1,000	30	-180,07	7,36	1,94	-99,18	-200,25	0,40	0,69	-0,95
ZDD	0,010	-0,495	-1,000	30	-180,07	7,36	1,88	-95,90	-193,66	0,38	0,66	-0,92
ZDD	0,010	-0,495	-1,000	30	-180,07	7,36	2,00	-101,30	-205,22	0,41	0,71	-0,98
ZDD	0,225	-0,388	-1,000	30	-180,87	7,07	4,32	-7,19	-18,90	0,04	0,08	-0,07
ZDD	0,225	-0,388	-1,000	30	-180,87	7,07	4,13	-6,89	-18,28	0,04	0,08	-0,07
ZDD	0,225	-0,388	-1,000	30	-180,87	7,07	3,91	-6,45	-17,22	0,04	0,07	-0,06
ZDD	0,225	-0,388	-1,000	30	-181,55	7,20	3,85	-6,61	-17,13	0,04	0,07	-0,06
ZDD	0,333	-0,333	-1,000	30	-181,55	7,20	5,56	-5,51	-16,81	0,04	0,08	-0,05
ZDD	0,040	-0,480	-1,000	30	-181,55	7,20	4,75	-57,93	-120,86	0,24	0,42	-0,55
ZDD	0,075	-0,463	-1,000	30	-181,55	7,20	5,00	-30,69	-66,58	0,14	0,24	-0,29
ZD	0,366	0,000	-1,000	45	-170,83	9,34	6,11	0,00	-16,68	0,03	0,09	-0,04
ZD	0,366	0,000	-1,000	45	-170,83	9,34	6,22	0,00	-16,92	0,03	0,10	-0,04
ZD	0,366	0,000	-1,000	45	-170,83	9,34	6,66	0,00	-18,19	0,03	0,10	-0,04
DD	0,000	-0,268	-1,000	45	-170,83	9,34	0,00	-50,67	-189,98	0,21	0,79	-0,81

Fortsetzung Tabelle A.8: Einzelwerte der maximalen Festigkeiten

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	f_{ct}	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]			[N/mm^2]					
DD	0,000	-0,268	-1,000	45	-170,83	9,34	0,00	-52,03	-194,65	0,22	0,81	-0,83
DD	0,000	-0,268	-1,000	45	-170,83	9,34	0,00	-51,92	-194,71	0,21	0,81	-0,83
ZDD	0,155	-0,155	-1,000	45	-171,22	9,13	6,89	-6,81	-44,67	0,06	0,21	-0,15
DDD	-0,027	-0,287	-1,000	45	-164,04	7,82	-6,70	-71,77	-250,27	0,28	1,05	-1,16
DDD	-0,027	-0,287	-1,000	45	-164,04	7,82	-6,42	-72,19	-251,83	0,28	1,06	-1,16
DDD	-0,027	-0,287	-1,000	45	-170,49	8,50	-6,90	-74,74	-261,14	0,28	1,06	-1,16
ZDD	0,025	-0,250	-1,000	45	-183,50	6,72	4,06	-41,08	-164,46	0,17	0,65	-0,63
ZDD	0,050	-0,231	-1,000	45	-188,07	7,71	5,23	-24,19	-104,91	0,11	0,41	-0,38
ZDD	0,050	-0,231	-1,000	45	-188,07	7,71	4,40	-20,08	-87,91	0,09	0,35	-0,32
ZDD	0,050	-0,231	-1,000	45	-188,07	7,71	4,77	-22,05	-95,84	0,10	0,38	-0,35
ZDD	0,165	-0,147	-1,000	45	-180,87	7,07	3,81	-3,35	-23,64	0,03	0,11	-0,07
ZDD	0,165	-0,147	-1,000	45	-180,87	7,07	3,68	-3,20	-22,44	0,03	0,10	-0,07
ZDD	0,165	-0,147	-1,000	45	-180,87	7,07	5,11	-4,52	-30,90	0,04	0,14	-0,10
D	0,000	0,000	-1,000	60	-170,83	9,79	0,00	0,00	-170,79	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60	-170,83	9,79	0,00	0,00	-159,62	0,00	0,76	-0,54
D	0,000	0,000	-1,000	60	-170,83	9,79	0,00	0,00	-153,26	0,00	0,73	-0,52
DDD	-0,040	-0,040	-1,000	60	-164,04	7,82	-9,24	-9,28	-233,93	0,00	1,12	-0,89
DDD	-0,040	-0,040	-1,000	60	-170,49	8,50	-9,05	-9,12	-231,87	0,00	1,07	-0,85
DDD	-0,040	-0,040	-1,000	60	-170,49	8,50	-9,70	-9,71	-244,60	0,00	1,12	-0,89
DDD	-0,100	-0,100	-1,000	60	-171,39	*	-32,05	-32,06	-320,56	0,00	1,37	-1,30
DDD	-0,100	-0,100	-1,000	60	-171,39	*	-32,72	-32,72	-327,19	0,00	1,40	-1,32
DDD	-0,100	-0,100	-1,000	60	-171,39	*	-31,93	-31,93	-319,34	0,00	1,37	-1,29

* Zusätzliche Betonierserie ohne Referenzprüfkörper

Tabelle A.9: Mittelwerte der maximalen Festigkeiten aller verwertbarer Versuche

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	f_{ct}	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]			[N/mm^2]					
Z	1,000	0,000	0,000	0	-170,83	7,90	7,50	0,00	0,00	0,03	0,02	0,03
ZDD	1,000	-0,183	-0,183	0	-170,83	8,32	7,29	-1,33	-1,33	0,04	0,02	0,02
ZDD	1,000	-0,500	-0,500	0	-170,83	8,32	6,95	-3,48	-3,48	0,04	0,02	0,00
DD	0,000	-1,000	-1,000	0	-170,83	8,32	0,00	-170,16	-170,45	0,70	0,41	-1,15
ZDD	1,000	-1,000	-1,000	0	-171,68	8,12	6,52	-6,52	-6,52	0,05	0,03	-0,02
ZDD	0,732	-1,000	-1,000	0	-171,68	8,12	5,87	-8,18	-8,23	0,06	0,03	-0,04
DDD	-0,039	-1,000	-1,000	0	-170,49	8,50	-9,10	-242,66	-242,95	0,97	0,56	-1,68
ZDD	0,050	-1,000	-1,000	0	-183,50	6,72	3,90	-79,05	-79,29	0,32	0,19	-0,49
ZDD	0,025	-1,000	-1,000	0	-180,07	7,36	3,71	-150,79	-150,95	0,61	0,35	-0,96
ZDD	0,345	-1,000	-1,000	0	-180,07	7,36	5,65	-16,39	-16,53	0,09	0,05	-0,09
ZDD	0,110	-1,000	-1,000	0	-181,55	7,20	3,93	-36,10	-36,18	0,16	0,09	-0,22
ZD	1,000	0,000	-0,366	15	-170,83	9,79	8,24	0,00	-2,97	0,03	0,03	0,02
DD	0,000	-0,732	-1,000	15	-170,83	9,34	0,00	-132,56	-181,11	0,55	0,55	-1,06
ZDD	1,000	-0,268	-0,732	15	-170,83	8,32	7,31	-1,73	-5,19	0,04	0,04	0,00
DDD	-0,027	-0,739	-1,000	15	-170,49	8,50	-6,33	-176,95	-239,80	0,71	0,71	-1,43
ZDD	0,050	-0,719	-1,000	15	-183,50	6,72	5,29	-76,83	-107,18	0,32	0,32	-0,56

Fortsetzung Tabelle A.9: Mittelwerte der maximalen Festigkeiten aller verwertbarer Versuche

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	f_{ct}	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]			[N/mm²]					
ZDD	0,090	-0,708	-1,000	15	-188,07	7,71	6,35	-50,22	-70,93	0,21	0,21	-0,35
ZDD	0,275	-0,658	-1,000	15	-180,87	7,07	4,19	-10,05	-15,50	0,06	0,06	-0,07
ZD	1,000	0,000	-1,000	30	-170,83	9,79	7,25	0,00	-7,29	0,03	0,05	0,00
DD	0,000	-0,500	-1,000	30	-170,83	9,34	0,00	-91,53	-183,21	0,38	0,66	-0,93
ZDD	0,577	-0,211	-1,000	30	-171,22	9,13	7,03	-2,33	-12,11	0,04	0,07	-0,02
ZDD	0,333	-0,333	-1,000	30	-167,14	8,08	4,77	-4,65	-14,41	0,04	0,07	-0,05
DDD	-0,029	-0,514	-1,000	30	-170,49	8,50	-7,94	-141,85	-275,81	0,56	0,96	-1,44
ZDD	0,040	-0,480	-1,000	30	-183,50	6,72	4,50	-54,06	-113,18	0,23	0,39	-0,51
ZDD	0,010	-0,495	-1,000	30	-180,07	7,36	1,94	-99,18	-200,25	0,40	0,69	-0,95
ZDD	0,225	-0,388	-1,000	30	-180,87	7,07	4,32	-7,19	-18,90	0,04	0,08	-0,07
ZDD	0,075	-0,463	-1,000	30	-188,07	7,71	6,34	-39,06	-84,97	0,17	0,30	-0,36
ZD	0,366	0,000	-1,000	45	-170,83	9,34	6,11	0,00	-16,68	0,03	0,09	-0,04
DD	0,000	-0,268	-1,000	45	-170,83	9,34	0,00	-50,67	-189,98	0,21	0,79	-0,81
ZDD	0,155	-0,155	-1,000	45	-171,22	9,13	6,89	-6,81	-44,67	0,06	0,21	-0,15
DDD	-0,027	-0,287	-1,000	45	-164,04	7,82	-6,70	-71,77	-250,27	0,28	1,05	-1,16
ZDD	0,025	-0,250	-1,000	45	-183,50	6,72	4,06	-41,08	-164,46	0,17	0,65	-0,63
ZDD	0,050	-0,231	-1,000	45	-188,07	7,71	5,23	-24,19	-104,91	0,11	0,41	-0,38
ZDD	0,165	-0,147	-1,000	45	-180,87	7,07	3,81	-3,35	-23,64	0,03	0,11	-0,07
D	0,000	0,000	-1,000	60	-170,83	9,79	0,00	0,00	-170,79	0,00	0,82	-0,58
DDD	-0,040	-0,040	-1,000	60	-164,04	7,82	-9,24	-9,28	-233,93	0,00	1,12	-0,89
DDD	-0,100	-0,100	-1,000	60	-171,39	*	-32,05	-32,06	-320,56	0,00	1,37	-1,30

* Zusätzliche Betonierserie ohne Referenzprüfkörper

A.4.2 Versuche mit gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien

A.4.2.1 Maximale Festigkeit und zugehörige Dehnungen

Tabelle A.10: Einzelwerte der maximalen Festigkeiten und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	$\varepsilon_{1,ult}$	$\varepsilon_{2,ult}$	$\varepsilon_{3,ult}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
1,000	0,000	0,000	0	7,50	0,00	0,00	161	-17	-39
1,000	0,000	0,000	0	8,31	0,00	0,00	150	-34	-10
1,000	0,000	0,000	0	7,89	0,00	0,00	167	-35	-41
1,000	-0,183	-0,183	0	7,29	-1,33	-1,33	153	-59	-37
1,000	-0,183	-0,183	0	8,54	-1,56	-1,56	166	-45	-43
1,000	-0,183	-0,183	0	8,01	-1,47	-1,47	156	-72	-38
1,000	-0,500	-0,500	0	6,95	-3,47	-3,47	173	-52	-86
1,000	-0,500	-0,500	0	7,61	-3,80	-3,80	149	-60	-81
1,000	-0,500	-0,500	0	7,88	-3,94	-3,94	196	-118	-112
1,000	-1,000	-1,000	0	6,52	-6,52	-6,52	168	-159	-169

Fortsetzung Tabelle A.10: Einzelwerte der maximalen Festigkeiten und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	$\varepsilon_{1,ult}$	$\varepsilon_{2,ult}$	$\varepsilon_{3,ult}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
1,000	-1,000	-1,000	0	6,07	-6,07	-6,07	146	-205	-244
1,000	-1,000	-1,000	0	5,65	-5,65	-5,65	120	-99	-94
0,732	-1,000	-1,000	0	5,98	-8,18	-8,18	147	-120	-163
0,732	-1,000	-1,000	0	6,12	-8,36	-8,36	135	-157	-155
0,345	-1,000	-1,000	0	5,76	-16,69	-16,69	245	-343	-302
0,345	-1,000	-1,000	0	4,95	-14,34	-14,34	216	-308	-245
0,110	-1,000	-1,000	0	3,97	-36,10	-36,10	413	-623	-612
0,110	-1,000	-1,000	0	3,74	-34,04	-34,04	313	-450	-628
0,050	-1,000	-1,000	0	3,96	-79,29	-79,29	1106	-1583	-1204
0,050	-1,000	-1,000	0	5,13	-102,64	-102,64	1003	-1624	-1762
0,025	-1,000	-1,000	0	3,77	-150,95	-150,95	1754	-2620	-2572
0,025	-1,000	-1,000	0	3,50	-139,96	-139,96	1227	-2557	-2388
0,025	-1,000	-1,000	0	3,76	-150,31	-150,31	2311	-2452	-3125
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-170,45	-170,45	2673	-3010	-3533
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-165,08	-165,08	2222	-2837	-3005
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-182,25	-182,25	2766	-3670	-3646
-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,59	-246,02	-246,02	4415	-5920	-6340
-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,48	-242,97	-242,97	5284	-5047	-5270
-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,55	-244,86	-244,86	3978	-5920	-7121
1,000	0,000	-0,366	15	8,24	0,00	-3,01	169	-10	-126
1,000	0,000	-0,366	15	6,98	0,00	-2,56	151	-37	-94
1,000	0,000	-0,366	15	7,44	0,00	-2,72	159	-32	-124
1,000	-0,268	-0,732	15	7,31	-1,96	-5,35	155	-86	-108
1,000	-0,268	-0,732	15	8,05	-2,16	-5,90	161	-13	-177
1,000	-0,268	-0,732	15	8,66	-2,32	-6,34	143	-59	-153
0,275	-0,658	-1,000	15	3,24	-7,75	-11,78	65	-118	-170
0,275	-0,658	-1,000	15	2,71	-6,48	-9,85	100	-144	-195
0,050	-0,719	-1,000	15	5,39	-77,52	-107,82	931	-1043	-1954
0,050	-0,719	-1,000	15	5,00	-71,96	-100,08	771	-1189	-1782
0,020	-0,727	-1,000	15	3,37	-122,60	-168,64	1253	-1474	-3286
0,020	-0,727	-1,000	15	3,59	-130,43	-179,41	1863	-1520	-3091
0,020	-0,727	-1,000	15	3,38	-122,82	-168,94	1497	-1298	-3752
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-132,58	-181,11	1731	-2019	-3577
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-134,52	-183,78	1656	-1283	-3774
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-129,34	-176,69	1509	-1647	-3969
-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,52	-178,53	-241,58	2522	-3179	-5868
-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,66	-182,37	-246,78	1473	-3283	-4880
-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,47	-177,21	-239,80	2470	-3568	-5814
1,000	0,000	-1,000	30	7,29	0,00	-7,29	209	12	-200
1,000	0,000	-1,000	30	7,50	0,00	-7,50	178	-33	-195
1,000	0,000	-1,000	30	8,01	0,00	-8,01	147	-21	-178

Fortsetzung Tabelle A.10: Einzelwerte der maximalen Festigkeiten und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	$\varepsilon_{1,ult}$	$\varepsilon_{2,ult}$	$\varepsilon_{3,ult}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
0,577	-0,211	-1,000	30	7,00	-2,56	-12,13	109	-11	-267
0,577	-0,211	-1,000	30	7,24	-2,65	-12,55	192	-96	-341
0,333	-0,333	-1,000	30	4,80	-4,80	-14,41	108	-140	-266
0,333	-0,333	-1,000	30	7,11	-7,11	-21,36	190	-108	-452
0,333	-0,333	-1,000	30	5,60	-5,60	-16,81	96	-82	-301
0,225	-0,388	-1,000	30	4,11	-7,09	-18,28	190	-165	-214
0,225	-0,388	-1,000	30	3,85	-6,64	-17,13	133	-165	-336
0,075	-0,463	-1,000	30	6,37	-39,34	-84,97	446	-364	-1623
0,075	-0,463	-1,000	30	4,99	-30,83	-66,58	475	-376	-1331
0,040	-0,480	-1,000	30	4,95	-59,38	-123,70	1167	-764	-2495
0,040	-0,480	-1,000	30	4,83	-58,01	-120,86	953	-779	-2128
0,010	-0,495	-1,000	30	2,00	-99,19	-200,39	1317	-615	-4585
0,010	-0,495	-1,000	30	1,94	-96,00	-193,94	1384	-989	-4474
0,010	-0,495	-1,000	30	2,05	-101,58	-205,22	1860	-923	-4995
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-91,61	-183,21	1363	-760	-3840
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-98,62	-197,24	1369	-854	-4365
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-93,77	-187,55	1499	-1155	-4108
-0,029	-0,514	-1,000	30	-7,45	-132,04	-256,89	2179	-1367	-6961
-0,029	-0,514	-1,000	30	-8,01	-142,00	-276,25	2728	-2209	-7919
-0,029	-0,514	-1,000	30	-7,67	-136,02	-264,64	2394	-1173	-6414
0,366	0,000	-1,000	45	6,10	0,00	-16,68	286	-24	-467
0,366	0,000	-1,000	45	6,19	0,00	-16,92	226	13	-384
0,366	0,000	-1,000	45	6,66	0,00	-18,19	149	68	-367
0,165	-0,147	-1,000	45	3,91	-3,49	-23,72	245	-318	-353
0,165	-0,147	-1,000	45	3,70	-3,30	-22,44	689	-94	-330
0,165	-0,147	-1,000	45	5,10	-4,55	-30,93	369	20	-457
0,155	-0,155	-1,000	45	6,92	-6,92	-44,67	292	77	-1051
0,025	-0,250	-1,000	45	4,11	-41,12	-164,46	1022	310	-3410
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-50,91	-189,98	1142	472	-4654
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-52,17	-194,65	1010	448	-4617
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-52,18	-194,71	1398	-10	-5500
-0,027	-0,287	-1,000	45	-6,76	-71,83	-250,27	1936	-186	-6707
-0,027	-0,287	-1,000	45	-6,80	-72,28	-251,83	1402	164	-6226
-0,027	-0,287	-1,000	45	-7,05	-74,95	-261,14	2062	106	-6139
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-170,79	966	826	-4513
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-159,62	635	1044	-4247
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-153,01	546	645	-3500
-0,040	-0,040	-1,000	60	-9,41	-9,41	-235,33	2698	2204	-7902
-0,040	-0,040	-1,000	60	-9,27	-9,27	-231,87	2077	1088	-5461
-0,040	-0,040	-1,000	60	-9,78	-9,78	-244,60	1862	3670	-6777

Tabelle A.11: Mittelwerte der maximalen Festigkeiten und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	$\varepsilon_{1,ult}$	$\varepsilon_{2,ult}$	$\varepsilon_{3,ult}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
1,000	0,000	0,000	0	7,90	0,00	0,00	159	-29	-30
1,000	-0,183	-0,183	0	7,95	-1,45	-1,45	158	-59	-39
1,000	-0,500	-0,500	0	7,48	-3,74	-3,74	173	-77	-93
1,000	-1,000	-1,000	0	6,08	-6,08	-6,08	145	-154	-169
0,732	-1,000	-1,000	0	6,05	-8,27	-8,27	141	-139	-159
0,345	-1,000	-1,000	0	5,35	-15,52	-15,52	230	-326	-273
0,110	-1,000	-1,000	0	3,86	-35,07	-35,07	363	-536	-620
0,050	-1,000	-1,000	0	4,55	-90,97	-90,97	1054	-1603	-1483
0,025	-1,000	-1,000	0	3,68	-147,08	-147,08	1764	-2543	-2695
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-172,59	-172,59	2554	-3172	-3395
-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,54	-244,61	-244,61	4559	-5629	-6244
1,000	0,000	-0,366	15	7,55	0,00	-2,76	159	-26	-115
1,000	-0,268	-0,732	15	8,01	-2,15	-5,86	153	-53	-146
0,275	-0,658	-1,000	15	2,97	-7,12	-10,82	82	-131	-182
0,050	-0,719	-1,000	15	5,20	-74,74	-103,95	851	-1116	-1868
0,020	-0,727	-1,000	15	3,45	-125,29	-172,33	1538	-1431	-3376
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-132,15	-180,53	1632	-1650	-3773
-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,55	-179,37	-242,72	2155	-3344	-5520
1,000	0,000	-1,000	30	7,60	0,00	-7,60	178	-14	-191
0,577	-0,211	-1,000	30	7,12	-2,60	-12,34	150	-53	-304
0,333	-0,333	-1,000	30	5,84	-5,84	-17,53	131	-110	-339
0,225	-0,388	-1,000	30	3,98	-6,87	-17,70	161	-165	-275
0,075	-0,463	-1,000	30	5,68	-35,08	-75,78	460	-370	-1477
0,040	-0,480	-1,000	30	4,89	-58,69	-122,28	1060	-772	-2312
0,010	-0,495	-1,000	30	2,00	-98,93	-199,85	1520	-842	-4685
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-94,67	-189,33	1410	-923	-4104
-0,029	-0,514	-1,000	30	-7,71	-136,69	-265,93	2433	-1583	-7098
0,366	0,000	-1,000	45	6,32	0,00	-17,26	220	19	-406
0,165	-0,147	-1,000	45	4,24	-3,78	-25,70	434	-131	-380
0,155	-0,155	-1,000	45	6,92	-6,92	-44,67	292	77	-1051
0,025	-0,250	-1,000	45	4,11	-41,12	-164,46	1022	310	-3410
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-51,75	-193,11	1183	303	-4924
-0,027	-0,287	-1,000	45	-6,87	-73,02	-254,41	1800	28	-6357
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-161,14	716	838	-4087
-0,040	-0,040	-1,000	60	-9,49	-9,49	-237,27	2212	2321	-6713

A.4.2.2 Volumenminimum

Tabelle A.12: Einzelwerte der Spannungen beim Volumenminimum der Probekörper und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,V,min}$	$\sigma_{2,V,min}$	$\sigma_{3,V,min}$	$\varepsilon_{1,V,min}$	$\varepsilon_{2,V,min}$	$\varepsilon_{3,V,min}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
1,000	0,000	0,000	0	7,50	0,00	0,00	161	-17	-39
1,000	0,000	0,000	0	8,31	0,00	0,00	150	-34	-10
1,000	0,000	0,000	0	7,89	0,00	0,00	167	-35	-41
1,000	-0,183	-0,183	0	7,29	-1,33	-1,33	153	-59	-37
1,000	-0,183	-0,183	0	8,54	-1,56	-1,56	166	-45	-43
1,000	-0,183	-0,183	0	8,01	-1,47	-1,47	156	-72	-38
1,000	-0,500	-0,500	0	6,95	-3,47	-3,47	173	-52	-86
1,000	-0,500	-0,500	0	4,47	-2,24	-2,24	84	-40	-47
1,000	-0,500	-0,500	0	7,45	-3,72	-3,72	180	-110	-107
1,000	-1,000	-1,000	0	6,52	-6,52	-6,52	168	-159	-169
1,000	-1,000	-1,000	0	6,05	-6,05	-6,05	152	-220	-272
1,000	-1,000	-1,000	0	5,62	-5,62	-5,62	119	-98	-95
0,732	-1,000	-1,000	0	5,98	-8,18	-8,18	147	-120	-163
0,732	-1,000	-1,000	0	6,12	-8,36	-8,36	135	-157	-155
0,345	-1,000	-1,000	0	5,76	-16,69	-16,69	245	-343	-302
0,345	-1,000	-1,000	0	4,95	-14,34	-14,34	216	-308	-245
0,110	-1,000	-1,000	0	3,92	-35,62	-35,62	382	-637	-590
0,110	-1,000	-1,000	0	3,74	-34,04	-34,04	313	-450	-628
0,050	-1,000	-1,000	0	3,95	-79,10	-79,10	1092	-1573	-1200
0,050	-1,000	-1,000	0	5,11	-102,18	-102,18	997	-1624	-1766
0,025	-1,000	-1,000	0	3,77	-150,95	-150,95	1754	-2620	-2572
0,025	-1,000	-1,000	0	3,50	-139,96	-139,96	1227	-2557	-2388
0,025	-1,000	-1,000	0	3,76	-150,31	-150,31	2311	-2452	-3125
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-170,45	-170,45	2673	-3010	-3533
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-165,08	-165,08	2222	-2837	-3005
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-181,64	-181,64	2577	-3579	-3587
-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,58	-245,77	-245,77	4422	-5900	-6382
-0,039	-1,000	-1,000	0	-8,79	-225,37	-225,37	3223	-4223	-4791
-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,53	-244,46	-244,46	4000	-5937	-7155
1,000	0,000	-0,366	15	8,24	0,00	-3,01	169	-10	-126
1,000	0,000	-0,366	15	6,98	0,00	-2,56	151	-37	-94
1,000	0,000	-0,366	15	7,44	0,00	-2,72	159	-32	-124
1,000	-0,268	-0,732	15	7,30	-1,96	-5,34	155	-87	-108
1,000	-0,268	-0,732	15	7,93	-2,13	-5,81	161	-28	-174
1,000	-0,268	-0,732	15	8,59	-2,30	-6,29	144	-62	-151
0,275	-0,658	-1,000	15	3,24	-7,75	-11,78	65	-118	-170
0,275	-0,658	-1,000	15	2,71	-6,48	-9,85	100	-144	-195
0,050	-0,719	-1,000	15	5,39	-77,52	-107,82	931	-1043	-1954
0,050	-0,719	-1,000	15	4,90	-70,39	-97,91	739	-1143	-1817
0,020	-0,727	-1,000	15	3,37	-122,60	-168,64	1253	-1474	-3286

Fortsetzung Tabelle A.12: Einzelwerte der Spannungen beim Volumenminimum der Probekörper und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,V,min}$	$\sigma_{2,V,min}$	$\sigma_{3,V,min}$	$\varepsilon_{1,V,min}$	$\varepsilon_{2,V,min}$	$\varepsilon_{3,V,min}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
0,020	-0,727	-1,000	15	3,39	-123,06	-169,27	1541	-1646	-2890
0,020	-0,727	-1,000	15	3,38	-122,82	-168,94	1497	-1298	-3752
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-132,55	-181,07	1681	-1983	-3565
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-134,52	-183,78	1656	-1283	-3774
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-129,03	-176,28	1502	-1663	-3953
-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,51	-178,21	-241,14	2522	-3226	-5826
-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,66	-182,37	-246,78	1473	-3283	-4880
-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,47	-177,21	-239,80	2470	-3568	-5814
1,000	0,000	-1,000	30	2,99	0,00	-2,99	42	8	-71
1,000	0,000	-1,000	30	6,67	0,00	-6,67	139	-28	-169
1,000	0,000	-1,000	30	7,61	0,00	-7,61	138	-26	-170
0,577	-0,211	-1,000	30	7,00	-2,56	-12,13	109	-11	-267
0,577	-0,211	-1,000	30	7,22	-2,64	-12,51	189	-99	-343
0,333	-0,333	-1,000	30	4,77	-4,77	-14,32	107	-140	-268
0,333	-0,333	-1,000	30	7,11	-7,11	-21,36	190	-108	-452
0,333	-0,333	-1,000	30	5,57	-5,57	-16,72	95	-84	-299
0,225	-0,388	-1,000	30	3,70	-6,38	-16,44	52	-114	-159
0,225	-0,388	-1,000	30	3,85	-6,64	-17,13	133	-165	-336
0,075	-0,463	-1,000	30	6,37	-39,34	-84,97	446	-364	-1623
0,075	-0,463	-1,000	30	4,99	-30,83	-66,58	474	-376	-1329
0,040	-0,480	-1,000	30	4,95	-59,38	-123,70	1167	-764	-2495
0,040	-0,480	-1,000	30	4,82	-57,86	-120,55	957	-785	-2128
0,010	-0,495	-1,000	30	2,00	-98,89	-199,79	1317	-759	-4567
0,010	-0,495	-1,000	30	1,94	-96,00	-193,94	1384	-989	-4474
0,010	-0,495	-1,000	30	2,02	-100,07	-202,15	1729	-900	-4892
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-91,61	-183,21	1363	-760	-3840
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-98,62	-197,24	1369	-854	-4365
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-93,77	-187,55	1499	-1155	-4108
-0,029	-0,514	-1,000	30	-7,45	-132,03	-256,87	2186	-1377	-6980
-0,029	-0,514	-1,000	30	-8,01	-141,94	-276,15	2704	-2216	-7927
-0,029	-0,514	-1,000	30	-7,67	-135,95	-264,49	2398	-1169	-6437
0,366	0,000	-1,000	45	6,04	0,00	-16,49	281	-24	-463
0,366	0,000	-1,000	45	6,12	0,00	-16,73	214	16	-378
0,366	0,000	-1,000	45	6,61	0,00	-18,07	148	63	-364
0,165	-0,147	-1,000	45	3,86	-3,44	-23,42	237	-312	-357
0,165	-0,147	-1,000	45	3,21	-2,86	-19,45	27	30	-253
0,165	-0,147	-1,000	45	3,58	-3,19	-21,69	243	-36	-359
0,155	-0,155	-1,000	45	6,91	-6,91	-44,60	291	76	-1051
0,025	-0,250	-1,000	45	4,04	-40,40	-161,60	984	288	-3388
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-50,44	-188,23	1111	449	-4605

Fortsetzung Tabelle A.12: Einzelwerte der Spannungen beim Volumenminimum der Probekörper und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,V,min}$	$\sigma_{2,V,min}$	$\sigma_{3,V,min}$	$\varepsilon_{1,V,min}$	$\varepsilon_{2,V,min}$	$\varepsilon_{3,V,min}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-52,17	-194,65	1010	448	-4617
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-52,18	-194,71	1398	-10	-5500
-0,027	-0,287	-1,000	45	-6,76	-71,83	-250,27	1936	-186	-6707
-0,027	-0,287	-1,000	45	-6,80	-72,28	-251,83	1402	164	-6226
-0,027	-0,287	-1,000	45	-7,02	-74,58	-259,84	1890	145	-6065
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-170,79	966	826	-4513
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-159,62	635	1044	-4247
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-153,01	546	645	-3500
-0,040	-0,040	-1,000	60	-8,46	-8,46	-211,57	1312	1536	-6243
-0,040	-0,040	-1,000	60	-8,54	-8,54	-213,51	1335	898	-4929
-0,040	-0,040	-1,000	60	-8,29	-8,29	-207,22	1138	1532	-4932

Tabelle A.13: Spannungen beim Volumenminimum der Probekörper und zugehörige Dehnungen der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,V,min}$	$\sigma_{2,V,min}$	$\sigma_{3,V,min}$	$\varepsilon_{1,V,min}$	$\varepsilon_{2,V,min}$	$\varepsilon_{3,V,min}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
1,000	0,000	0,000	0	7,90	0,00	0,00	159	-29	-30
1,000	-0,183	-0,183	0	7,95	-1,45	-1,45	158	-59	-39
1,000	-0,500	-0,500	0	5,91	-2,96	-2,96	133	-65	-74
1,000	-1,000	-1,000	0	5,91	-5,91	-5,91	143	-154	-175
0,732	-1,000	-1,000	0	6,05	-8,27	-8,27	141	-139	-159
0,345	-1,000	-1,000	0	5,35	-15,52	-15,52	230	-326	-273
0,110	-1,000	-1,000	0	3,78	-34,35	-34,35	340	-536	-600
0,050	-1,000	-1,000	0	4,53	-90,68	-90,68	1047	-1601	-1483
0,025	-1,000	-1,000	0	3,68	-147,08	-147,08	1764	-2543	-2695
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-172,59	-172,59	2554	-3172	-3395
-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,53	-244,36	-244,36	4584	-5633	-6270
1,000	0,000	-0,366	15	7,55	0,00	-2,76	159	-26	-115
1,000	-0,268	-0,732	15	7,82	-2,10	-5,72	153	-59	-144
0,275	-0,658	-1,000	15	2,97	-7,12	-10,82	82	-131	-182
0,050	-0,719	-1,000	15	5,20	-74,74	-103,95	851	-1116	-1868
0,020	-0,727	-1,000	15	3,45	-125,23	-172,26	1535	-1431	-3374
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-131,87	-180,15	1621	-1651	-3761
-0,027	-0,739	-1,000	15	-6,55	-179,37	-242,72	2155	-3344	-5520
1,000	0,000	-1,000	30	5,30	0,00	-5,30	108	-12	-134
0,577	-0,211	-1,000	30	7,12	-2,60	-12,34	150	-53	-304

Fortsetzung Tabelle A.13: Spannungen beim Volumenminimum der Probekörper und zugehörige Dehnungen der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,V,min}$	$\sigma_{2,V,min}$	$\sigma_{3,V,min}$	$\varepsilon_{1,V,min}$	$\varepsilon_{2,V,min}$	$\varepsilon_{3,V,min}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
0,333	-0,333	-1,000	30	5,84	-5,84	-17,53	131	-110	-339
0,225	-0,388	-1,000	30	3,94	-6,80	-17,53	155	-162	-272
0,075	-0,463	-1,000	30	5,68	-35,08	-75,78	460	-370	-1477
0,040	-0,480	-1,000	30	4,89	-58,69	-122,28	1060	-772	-2312
0,010	-0,495	-1,000	30	1,99	-98,50	-199,00	1482	-863	-4642
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-94,67	-189,33	1410	-923	-4104
-0,029	-0,514	-1,000	30	-7,71	-136,65	-265,85	2439	-1585	-7123
0,366	0,000	-1,000	45	6,25	0,00	-17,07	215	18	-401
0,165	-0,147	-1,000	45	3,09	-2,75	-18,71	132	-72	-270
0,155	-0,155	-1,000	45	6,91	-6,91	-44,60	291	76	-1051
0,025	-0,250	-1,000	45	4,04	-40,40	-161,60	984	288	-3388
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-51,75	-193,11	1183	303	-4924
-0,027	-0,287	-1,000	45	-6,87	-73,02	-254,41	1800	28	-6357
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-161,14	716	838	-4087
-0,040	-0,040	-1,000	60	-8,29	-8,29	-207,25	1178	1363	-5282

A.4.2.3 Affinitätsgrenze

Tabelle A.14: Einzelwerte der Spannungen bei der Affinitätsgrenze und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,aff}$	$\sigma_{2,aff}$	$\sigma_{3,aff}$	$\sigma_{aff}/\sigma_{ult}$	$\varepsilon_{1,aff}$	$\varepsilon_{2,aff}$	$\varepsilon_{3,aff}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
1,000	0,000	0,000	0	7,50	0,00	0,00	1,00	161	-17	-39
1,000	0,000	0,000	0	8,31	0,00	0,00	1,00	150	-34	-10
1,000	0,000	0,000	0	7,02	0,00	0,00	0,89	151	-34	-37
1,000	-0,183	-0,183	0	7,29	-1,33	-1,33	1,00	153	-59	-37
1,000	-0,183	-0,183	0	6,57	-1,20	-1,20	0,77	118	-33	-33
1,000	-0,183	-0,183	0	4,29	-0,79	-0,79	0,54	82	-32	-26
1,000	-0,500	-0,500	0	5,06	-2,53	-2,53	0,73	125	-42	-64
1,000	-0,500	-0,500	0	7,61	-3,80	-3,80	1,00	149	-60	-81
1,000	-0,500	-0,500	0	7,66	-3,83	-3,83	0,97	189	-113	-111
1,000	-1,000	-1,000	0	3,04	-3,04	-3,04	0,47	90	-74	-76
1,000	-1,000	-1,000	0	2,83	-2,83	-2,83	0,47	79	-137	-120
1,000	-1,000	-1,000	0	3,96	-3,96	-3,96	0,70	84	-68	-68
0,732	-1,000	-1,000	0	3,13	-4,27	-4,27	0,52	74	-63	-86
0,732	-1,000	-1,000	0	5,14	-7,02	-7,02	0,84	110	-134	-125
0,345	-1,000	-1,000	0	5,63	-16,32	-16,32	0,98	239	-341	-297
0,345	-1,000	-1,000	0	4,95	-14,34	-14,34	1,00	216	-308	-245
0,110	-1,000	-1,000	0	2,01	-18,24	-18,24	0,51	120	-280	-268
0,110	-1,000	-1,000	0	2,40	-21,80	-21,80	0,64	156	-278	-366
0,050	-1,000	-1,000	0	1,84	-36,71	-36,71	0,46	398	-781	-434
0,050	-1,000	-1,000	0	2,43	-48,67	-48,67	0,47	388	-811	-652
0,025	-1,000	-1,000	0	2,20	-88,19	-88,19	0,58	797	-1377	-1514
0,025	-1,000	-1,000	0	3,17	-126,76	-126,76	0,91	1011	-2232	-2093
0,025	-1,000	-1,000	0	1,84	-73,78	-73,78	0,49	718	-1039	-1504
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-76,78	-76,78	0,45	635	-1187	-1314
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-74,78	-74,78	0,45	798	-1243	-1251
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-163,44	-163,44	0,90	1402	-2800	-2836
-0,039	-1,000	-1,000	0	-3,68	-94,28	-94,28	0,38	878	-1660	-1984
-0,039	-1,000	-1,000	0	-3,25	-83,38	-83,38	0,34	763	-1502	-1817
-0,039	-1,000	-1,000	0	-9,05	-232,00	-232,00	0,95	2964	-5125	-5704
1,000	0,000	-0,366	15	8,24	0,00	-3,01	1,00	169	-10	-126
1,000	0,000	-0,366	15	5,38	0,00	-1,97	0,77	115	-29	-69
1,000	0,000	-0,366	15	5,08	0,00	-1,86	0,68	111	-25	-81
1,000	-0,268	-0,732	15	7,02	-1,88	-5,14	0,96	152	-82	-106
1,000	-0,268	-0,732	15	4,11	-1,10	-3,01	0,51	89	-19	-88
1,000	-0,268	-0,732	15	4,35	-1,17	-3,18	0,50	85	-32	-75
0,275	-0,658	-1,000	15	3,24	-7,75	-11,78	1,00	65	-118	-170
0,275	-0,658	-1,000	15	2,42	-5,79	-8,80	0,89	86	-131	-166
0,050	-0,719	-1,000	15	2,43	-34,95	-48,61	0,45	342	-527	-763
0,050	-0,719	-1,000	15	2,25	-32,42	-45,09	0,45	257	-525	-659
0,020	-0,727	-1,000	15	1,57	-57,03	-78,45	0,47	353	-669	-1405

Fortsetzung Tabelle A.14: Einzelwerte der Spannungen bei der Affinitätsgrenze und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,aff}$	$\sigma_{2,aff}$	$\sigma_{3,aff}$	$\sigma_{aff}/\sigma_{ult}$	$\varepsilon_{1,aff}$	$\varepsilon_{2,aff}$	$\varepsilon_{3,aff}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
0,020	-0,727	-1,000	15	1,72	-62,38	-85,81	0,48	600	-834	-1414
0,020	-0,727	-1,000	15	1,52	-55,36	-76,14	0,45	514	-570	-1528
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-57,35	-78,35	0,43	508	-800	-1290
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-67,15	-91,73	0,50	702	-682	-1783
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-67,10	-91,67	0,52	662	-761	-1816
-0,027	-0,739	-1,000	15	-2,13	-58,21	-78,77	0,33	570	-1392	-1435
-0,027	-0,739	-1,000	15	-2,29	-62,58	-84,68	0,34	493	-1081	-1372
-0,027	-0,739	-1,000	15	-2,60	-71,29	-96,47	0,40	569	-1506	-1952
1,000	0,000	-1,000	30	3,31	0,00	-3,31	0,45	58	8	-82
1,000	0,000	-1,000	30	4,60	0,00	-4,60	0,61	103	-27	-123
1,000	0,000	-1,000	30	4,64	0,00	-4,64	0,58	87	-18	-111
0,577	-0,211	-1,000	30	3,31	-1,21	-5,74	0,47	50	-1	-127
0,577	-0,211	-1,000	30	6,85	-2,50	-11,87	0,95	176	-92	-326
0,333	-0,333	-1,000	30	4,80	-4,80	-14,41	1,00	108	-140	-266
0,333	-0,333	-1,000	30	4,22	-4,22	-12,66	0,59	119	-74	-286
0,333	-0,333	-1,000	30	5,60	-5,60	-16,81	1,00	96	-82	-301
0,225	-0,388	-1,000	30	2,15	-3,70	-9,55	0,52	17	-68	-72
0,225	-0,388	-1,000	30	2,58	-4,45	-11,46	0,67	89	-123	-221
0,075	-0,463	-1,000	30	2,88	-17,79	-38,43	0,45	128	-164	-668
0,075	-0,463	-1,000	30	2,40	-14,79	-31,95	0,48	201	-233	-605
0,040	-0,480	-1,000	30	2,23	-26,79	-55,82	0,45	401	-331	-1037
0,040	-0,480	-1,000	30	2,47	-29,67	-61,81	0,51	390	-427	-1074
0,010	-0,495	-1,000	30	0,79	-38,86	-78,51	0,39	446	-338	-1511
0,010	-0,495	-1,000	30	0,79	-38,87	-78,52	0,40	289	-333	-1541
0,010	-0,495	-1,000	30	0,80	-39,81	-80,43	0,39	477	-401	-1639
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-42,09	-84,17	0,46	849	-471	-1564
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-39,33	-78,66	0,40	370	-378	-1444
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-39,26	-78,53	0,42	423	-527	-1400
-0,029	-0,514	-1,000	30	-2,47	-43,81	-85,24	0,33	490	-562	-1698
-0,029	-0,514	-1,000	30	-2,29	-40,68	-79,14	0,29	471	-645	-1434
-0,029	-0,514	-1,000	30	-5,48	-97,17	-189,05	0,71	1270	-801	-3933
0,366	0,000	-1,000	45	4,09	0,00	-11,18	0,67	178	-9	-308
0,366	0,000	-1,000	45	2,80	0,00	-7,64	0,45	76	2	-170
0,366	0,000	-1,000	45	3,14	0,00	-8,59	0,47	77	28	-169
0,165	-0,147	-1,000	45	2,24	-2,00	-13,61	0,57	84	-155	-185
0,165	-0,147	-1,000	45	1,73	-1,54	-10,48	0,47	10	32	-132
0,165	-0,147	-1,000	45	2,60	-2,32	-15,75	0,51	166	-30	-252
0,155	-0,155	-1,000	45	3,26	-3,26	-21,00	0,47	104	39	-524
0,025	-0,250	-1,000	45	2,15	-21,47	-85,89	0,52	444	29	-1618
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-38,48	-143,59	0,76	674	349	-3278
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-21,21	-79,14	0,41	244	92	-1665

Fortsetzung Tabelle A.14: Einzelwerte der Spannungen bei der Affinitätsgrenze und zugehörige Dehnungen

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,aff}$	$\sigma_{2,aff}$	$\sigma_{3,aff}$	$\sigma_{aff}/\sigma_{ult}$	$\varepsilon_{1,aff}$	$\varepsilon_{2,aff}$	$\varepsilon_{3,aff}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-26,54	-99,03	0,51	536	-5	-2312
-0,027	-0,287	-1,000	45	-2,12	-22,59	-78,70	0,31	395	-78	-1683
-0,027	-0,287	-1,000	45	-2,13	-22,67	-78,98	0,31	266	-96	-1609
-0,027	-0,287	-1,000	45	-2,52	-26,75	-93,21	0,36	440	-47	-1781
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-149,22	0,87	740	595	-3698
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-77,05	0,48	231	381	-1837
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-69,10	0,45	194	215	-1502
-0,040	-0,040	-1,000	60	-3,52	-3,52	-87,98	0,37	346	398	-2043
-0,040	-0,040	-1,000	60	-4,88	-4,88	-121,96	0,53	394	436	-2578
-0,040	-0,040	-1,000	60	-3,16	-3,16	-79,01	0,32	283	358	-1644

Tabelle A.15: Spannungen bei der Affinitätsgrenze und zugehörige Dehnungen der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,aff}$	$\sigma_{2,aff}$	$\sigma_{3,aff}$	$\sigma_{aff}/\sigma_{ult}$	$\varepsilon_{1,aff}$	$\varepsilon_{2,aff}$	$\varepsilon_{3,aff}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
1,000	0,000	0,000	0	7,90	0,00	0,00	1,00	159	-29	-30
1,000	-0,183	-0,183	0	5,67	-1,04	-1,04	0,71	109	-40	-29
1,000	-0,500	-0,500	0	7,48	-3,74	-3,74	1,00	173	-77	-93
1,000	-1,000	-1,000	0	3,02	-3,02	-3,02	0,50	80	-90	-84
0,732	-1,000	-1,000	0	4,62	-6,31	-6,31	0,76	105	-108	-119
0,345	-1,000	-1,000	0	5,35	-15,52	-15,52	1,00	230	-326	-273
0,110	-1,000	-1,000	0	2,09	-18,97	-18,97	0,54	129	-267	-291
0,050	-1,000	-1,000	0	2,05	-41,01	-41,01	0,45	376	-771	-512
0,025	-1,000	-1,000	0	2,04	-81,40	-81,40	0,55	702	-1224	-1424
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-78,20	-78,20	0,45	650	-1248	-1274
-0,039	-1,000	-1,000	0	-3,87	-99,15	-99,15	0,41	876	-1791	-2005
1,000	0,000	-0,366	15	6,04	0,00	-2,21	0,80	128	-21	-90
1,000	-0,268	-0,732	15	4,42	-1,18	-3,23	0,55	94	-34	-82
0,275	-0,658	-1,000	15	2,78	-6,66	-10,12	0,94	76	-123	-166
0,050	-0,719	-1,000	15	2,35	-33,74	-46,93	0,45	300	-528	-713
0,020	-0,727	-1,000	15	1,60	-58,23	-80,10	0,46	489	-690	-1450
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-64,55	-88,18	0,49	632	-774	-1634
-0,027	-0,739	-1,000	15	-2,20	-60,35	-81,66	0,34	499	-1245	-1478
1,000	0,000	-1,000	30	3,95	0,00	-3,95	0,52	79	-13	-100
0,577	-0,211	-1,000	30	7,12	-2,60	-12,34	1,00	150	-53	-304
0,333	-0,333	-1,000	30	4,84	-4,84	-14,52	0,83	111	-93	-287
0,225	-0,388	-1,000	30	2,07	-3,57	-9,19	0,52	44	-83	-119

Fortsetzung Tabelle A.15: Spannungen bei der Affinitätsgrenze und zugehörige Dehnungen der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,aff}$	$\sigma_{2,aff}$	$\sigma_{3,aff}$	$\sigma_{aff}/\sigma_{ult}$	$\varepsilon_{1,aff}$	$\varepsilon_{2,aff}$	$\varepsilon_{3,aff}$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]
0,075	-0,463	-1,000	30	2,57	-15,88	-34,30	0,45	162	-195	-621
0,040	-0,480	-1,000	30	2,37	-28,49	-59,36	0,49	403	-381	-1070
0,010	-0,495	-1,000	30	0,78	-38,79	-78,37	0,39	399	-354	-1548
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-39,44	-78,88	0,42	548	-457	-1441
-0,029	-0,514	-1,000	30	-2,63	-46,68	-90,82	0,34	525	-557	-1740
0,366	0,000	-1,000	45	4,11	0,00	-11,24	0,65	130	12	-259
0,165	-0,147	-1,000	45	2,94	-2,62	-17,84	0,69	116	-66	-257
0,155	-0,155	-1,000	45	3,26	-3,26	-21,00	0,47	104	39	-524
0,025	-0,250	-1,000	45	2,15	-21,47	-85,89	0,52	444	29	-1618
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-26,40	-98,49	0,51	438	129	-2210
-0,027	-0,287	-1,000	45	-2,18	-23,18	-80,77	0,32	352	-76	-1635
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-77,37	0,48	263	314	-1780
-0,040	-0,040	-1,000	60	-3,59	-3,59	-89,80	0,38	320	389	-1958

A.4.2.4 Elastizitätsgrenze

Tabelle A.16: Einzelwerte der Spannungen und zugehörige Dehnungen an der Elastizitätsgrenze sowie Materialparameter für den Bereich des linearen Materialverhaltens

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,el}$	$\sigma_{2,el}$	$\sigma_{3,el}$	σ_{el}/σ_{ult}	$\varepsilon_{1,el}$	$\varepsilon_{2,el}$	$\varepsilon_{3,el}$	E_{cal}	ν_{cal}
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]	[N/mm²]	[-]
1,000	0,000	0,000	0	7,50	0,00	0,00	1,00	161	-17	-39	46366	0,170
1,000	0,000	0,000	0	4,90	0,00	0,00	0,59	95	-22	-5	47860	0,146
1,000	0,000	0,000	0	7,01	0,00	0,00	0,89	149	-34	-40	44348	0,262
1,000	-0,183	-0,183	0	7,29	-1,33	-1,33	1,00	153	-59	-37	52824	0,174
1,000	-0,183	-0,183	0	4,70	-0,86	-0,86	0,55	84	-21	-19	63323	0,089
1,000	-0,183	-0,183	0	8,01	-1,47	-1,47	1,00	156	-72	-38	57246	0,185
1,000	-0,500	-0,500	0	6,95	-3,47	-3,47	1,00	173	-52	-86	52322	0,193
1,000	-0,500	-0,500	0	7,61	-3,80	-3,80	1,00	149	-60	-81	62125	0,188
1,000	-0,500	-0,500	0	7,88	-3,94	-3,94	1,00	196	-118	-112	46674	0,197
1,000	-1,000	-1,000	0	3,51	-3,51	-3,51	0,54	102	-85	-88	40267	0,123
1,000	-1,000	-1,000	0	2,78	-2,78	-2,78	0,46	77	-135	-118	24878	0,005
1,000	-1,000	-1,000	0	3,29	-3,29	-3,29	0,58	72	-57	-57	54061	0,150
0,732	-1,000	-1,000	0	5,98	-8,18	-8,18	1,00	147	-120	-163	54604	0,153
0,732	-1,000	-1,000	0	4,68	-6,39	-6,39	0,77	101	-126	-105	51967	0,066
0,345	-1,000	-1,000	0	2,88	-8,35	-8,35	0,50	123	-174	-148	48247	0,174
0,345	-1,000	-1,000	0	3,28	-9,50	-9,50	0,66	144	-208	-165	44610	0,159
0,110	-1,000	-1,000	0	2,15	-19,59	-19,59	0,54	129	-299	-291	58182	0,139
0,110	-1,000	-1,000	0	1,69	-15,40	-15,40	0,45	105	-194	-234	62898	0,167
0,050	-1,000	-1,000	0	1,79	-35,89	-35,89	0,45	391	-775	-418	46433	0,232
0,050	-1,000	-1,000	0	3,40	-68,06	-68,06	0,66	599	-1110	-1023	57629	0,180
0,025	-1,000	-1,000	0	2,52	-100,98	-100,98	0,67	950	-1596	-1744	49874	0,199
0,025	-1,000	-1,000	0	1,58	-63,24	-63,24	0,45	391	-944	-897	60822	0,167
0,025	-1,000	-1,000	0	1,86	-74,45	-74,45	0,50	731	-1055	-1520	47679	0,201
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-76,78	-76,78	0,45	635	-1187	-1314	49935	0,200
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-76,69	-76,69	0,46	817	-1264	-1287	45578	0,240
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-113,02	-113,02	0,62	803	-1827	-1789	55195	0,164
-0,039	-1,000	-1,000	0	-6,39	-163,82	-163,82	0,67	1834	-3050	-3564	40262	0,200
-0,039	-1,000	-1,000	0	-5,77	-148,00	-148,00	0,61	1615	-2682	-3148	40191	0,188
-0,039	-1,000	-1,000	0	-3,19	-81,75	-81,75	0,33	607	-1487	-1446	46240	0,185
1,000	0,000	-0,366	15	5,50	0,00	-2,01	0,67	112	-4	-84	49322	0,315
1,000	0,000	-0,366	15	6,98	0,00	-2,56	1,00	151	-37	-94	52752	0,325
1,000	0,000	-0,366	15	7,10	0,00	-2,60	0,95	153	-31	-118	50362	0,406
1,000	-0,268	-0,732	15	6,24	-1,67	-4,56	0,85	139	-71	-97	49132	0,197
1,000	-0,268	-0,732	15	5,59	-1,50	-4,09	0,69	117	-23	-121	49764	0,196
1,000	-0,268	-0,732	15	7,19	-1,93	-5,26	0,83	132	-51	-130	56683	0,182
0,275	-0,658	-1,000	15	3,24	-7,75	-11,78	1,00	65	-118	-170	64080	0,061
0,275	-0,658	-1,000	15	2,64	-6,32	-9,60	0,97	96	-139	-186	46283	0,090
0,050	-0,719	-1,000	15	2,43	-34,95	-48,61	0,45	342	-527	-763	55041	0,174
0,050	-0,719	-1,000	15	2,25	-32,42	-45,09	0,45	257	-525	-659	59310	0,135
0,020	-0,727	-1,000	15	2,03	-73,95	-101,72	0,60	527	-879	-1853	55513	0,135
0,020	-0,727	-1,000	15	2,12	-76,89	-105,77	0,59	756	-1028	-1770	53322	0,195
0,020	-0,727	-1,000	15	1,53	-55,70	-76,62	0,45	519	-573	-1540	49381	0,196
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-57,35	-78,35	0,43	508	-800	-1290	53446	0,191
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-57,53	-78,59	0,43	596	-602	-1475	49379	0,233
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-57,36	-78,36	0,44	561	-672	-1520	48415	0,214

Fortsetzung Tabelle A.16: Einzelwerte der Spannungen und zugehörige Dehnungen an der Elastizitätsgrenze sowie Materialparameter für den Bereich des linearen Materialverhaltens

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,el}$	$\sigma_{2,el}$	$\sigma_{3,el}$	σ_{el}/σ_{ult}	$\varepsilon_{1,el}$	$\varepsilon_{2,el}$	$\varepsilon_{3,el}$	E_{cal}	ν_{cal}
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]	[N/mm²]	[-]
-0,027	-0,739	-1,000	15	-2,15	-58,97	-79,80	0,33	579	-1415	-1455	42264	0,155
-0,027	-0,739	-1,000	15	-2,60	-71,07	-96,18	0,39	572	-1150	-1591	48445	0,177
-0,027	-0,739	-1,000	15	-2,95	-80,78	-109,32	0,46	677	-1697	-2232	42404	0,138
1,000	0,000	-1,000	30	3,60	0,00	-3,60	0,49	73	7	-92	62920	0,185
1,000	0,000	-1,000	30	4,46	0,00	-4,46	0,59	101	-28	-119	46016	0,195
1,000	0,000	-1,000	30	4,65	0,00	-4,65	0,58	86	-16	-112	53069	0,195
0,577	-0,211	-1,000	30	3,98	-1,46	-6,90	0,57	60	1	-151	49963	0,005
0,577	-0,211	-1,000	30	7,24	-2,65	-12,55	1,00	192	-96	-341	37927	0,005
0,333	-0,333	-1,000	30	2,51	-2,51	-7,55	0,52	51	-74	-150	46054	0,005
0,333	-0,333	-1,000	30	3,27	-3,27	-9,82	0,46	91	-60	-226	42223	0,050
0,333	-0,333	-1,000	30	3,44	-3,44	-10,34	0,62	56	-47	-194	52155	0,005
0,225	-0,388	-1,000	30	3,05	-5,25	-13,53	0,74	31	-91	-120	100000	0,005
0,225	-0,388	-1,000	30	2,73	-4,71	-12,14	0,71	93	-128	-238	47040	0,043
0,075	-0,463	-1,000	30	2,88	-17,79	-38,43	0,45	128	-164	-668	61444	0,095
0,075	-0,463	-1,000	30	4,69	-28,97	-62,56	0,94	436	-362	-1231	47919	0,141
0,040	-0,480	-1,000	30	2,23	-26,79	-55,82	0,45	401	-331	-1037	50329	0,198
0,040	-0,480	-1,000	30	2,19	-26,25	-54,69	0,45	328	-379	-937	55428	0,166
0,010	-0,495	-1,000	30	0,79	-38,86	-78,51	0,39	446	-338	-1511	50126	0,196
0,010	-0,495	-1,000	30	1,00	-49,74	-100,49	0,52	435	-417	-1998	50583	0,148
0,010	-0,495	-1,000	30	0,79	-38,91	-78,61	0,38	466	-395	-1597	47270	0,193
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-51,57	-103,14	0,56	978	-548	-1951	44496	0,301
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-39,33	-78,66	0,40	370	-378	-1444	52769	0,171
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-39,26	-78,53	0,42	423	-527	-1400	52954	0,159
-0,029	-0,514	-1,000	30	-2,32	-41,11	-79,97	0,31	465	-535	-1599	45867	0,190
-0,029	-0,514	-1,000	30	-2,35	-41,66	-81,05	0,29	485	-657	-1478	48531	0,178
-0,029	-0,514	-1,000	30	-2,49	-44,17	-85,94	0,32	478	-325	-1629	50056	0,230
0,366	0,000	-1,000	45	2,84	0,00	-7,77	0,47	102	4	-204	41379	0,109
0,366	0,000	-1,000	45	6,19	0,00	-16,92	1,00	226	13	-384	45676	0,023
0,366	0,000	-1,000	45	6,66	0,00	-18,19	1,00	149	68	-367	56054	0,205
0,165	-0,147	-1,000	45	1,82	-1,62	-11,02	0,46	60	-119	-142	73097	0,005
0,165	-0,147	-1,000	45	2,07	-1,85	-12,57	0,56	21	30	-158	94574	0,077
0,165	-0,147	-1,000	45	2,43	-2,17	-14,73	0,48	151	-28	-234	62618	0,261
0,155	-0,155	-1,000	45	4,10	-4,10	-26,42	0,59	146	46	-649	41019	0,109
0,025	-0,250	-1,000	45	1,95	-19,46	-77,85	0,47	401	18	-1456	52510	0,216
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-41,20	-153,73	0,81	756	363	-3539	42425	0,241
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-25,87	-96,54	0,50	332	126	-2046	46974	0,178
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-21,95	-81,90	0,42	430	-1	-1894	42297	0,199
-0,027	-0,287	-1,000	45	-2,70	-28,69	-99,98	0,40	524	-70	-2165	44575	0,201
-0,027	-0,287	-1,000	45	-2,20	-23,41	-81,56	0,32	279	-97	-1668	48258	0,162
-0,027	-0,287	-1,000	45	-2,78	-29,52	-102,87	0,39	493	-38	-1986	49672	0,215
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-90,34	0,53	390	365	-2111	43762	0,173
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-78,42	0,49	236	390	-1892	42528	0,158
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-83,22	0,54	241	279	-1828	46566	0,126
-0,040	-0,040	-1,000	60	-3,64	-3,64	-90,94	0,39	361	415	-2122	43120	0,203
-0,040	-0,040	-1,000	60	-5,98	-5,98	-149,49	0,64	568	560	-3221	46774	0,183

Fortsetzung Tabelle A.16: Einzelwerte der Spannungen und zugehörige Dehnungen an der Elastizitätsgrenze sowie Materialparameter für den Bereich des linearen Materialverhaltens

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,el}$	$\sigma_{2,el}$	$\sigma_{3,el}$	σ_{el}/σ_{ult}	$\varepsilon_{1,el}$	$\varepsilon_{2,el}$	$\varepsilon_{3,el}$	E_{cal}	ν_{cal}
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]	[N/mm²]	[-]
-0,040	-0,040	-1,000	60	-5,68	-5,68	-141,88	0,58	588	715	-3025	47190	0,214

Tabelle A.17: Spannungen und zugehörige Dehnungen an der Elastizitätsgrenze sowie Materialparameter für den Bereich des linearen Materialverhaltens der gemittelten Spannungs-Dehnungs-Linien

SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\sigma_{1,el}$	$\sigma_{2,el}$	$\sigma_{3,el}$	σ_{el}/σ_{ult}	$\varepsilon_{1,el}$	$\varepsilon_{2,el}$	$\varepsilon_{3,el}$	E_{cal}	ν_{cal}
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[µm/m]	[µm/m]	[µm/m]	[N/mm²]	[-]
1,000	0,000	0,000	0	6,53	0,00	0,00	0,83	133	-25	-25	46241	0,193
1,000	-0,183	-0,183	0	7,26	-1,33	-1,33	0,91	142	-51	-39	57528	0,150
1,000	-0,500	-0,500	0	7,48	-3,74	-3,74	1,00	173	-77	-93	53336	0,197
1,000	-1,000	-1,000	0	3,40	-3,40	-3,40	0,56	89	-99	-96	35174	0,005
0,732	-1,000	-1,000	0	5,53	-7,56	-7,56	0,91	126	-126	-144	53329	0,108
0,345	-1,000	-1,000	0	3,59	-10,41	-10,41	0,67	156	-231	-184	46597	0,167
0,110	-1,000	-1,000	0	1,87	-16,98	-16,99	0,48	114	-240	-254	60373	0,152
0,050	-1,000	-1,000	0	2,23	-44,56	-44,56	0,49	412	-827	-576	52218	0,206
0,025	-1,000	-1,000	0	1,67	-66,95	-66,95	0,46	546	-994	-1154	52012	0,191
0,000	-1,000	-1,000	0	0,00	-78,20	-78,20	0,45	650	-1248	-1274	50148	0,201
-0,039	-1,000	-1,000	0	-5,60	-143,52	-143,52	0,59	1418	-2640	-2949	42106	0,191
1,000	0,000	-0,366	15	7,55	0,00	-2,76	1,00	159	-26	-115	50649	0,347
1,000	-0,268	-0,732	15	6,67	-1,79	-4,88	0,83	137	-50	-123	51756	0,192
0,275	-0,658	-1,000	15	2,92	-6,98	-10,61	0,98	81	-128	-178	54297	0,077
0,050	-0,719	-1,000	15	2,35	-33,74	-46,93	0,45	300	-528	-713	57003	0,155
0,020	-0,727	-1,000	15	1,88	-68,22	-93,83	0,54	596	-805	-1718	52610	0,177
0,000	-0,732	-1,000	15	0,00	-57,38	-78,39	0,43	555	-696	-1426	50319	0,213
-0,027	-0,739	-1,000	15	-2,44	-66,71	-90,27	0,37	573	-1354	-1651	44628	0,154
1,000	0,000	-1,000	30	7,60	0,00	-7,60	1,00	178	-14	-191	53439	0,196
0,577	-0,211	-1,000	30	7,12	-2,60	-12,34	1,00	150	-53	-304	42791	0,005
0,333	-0,333	-1,000	30	3,13	-3,13	-9,39	0,54	71	-62	-196	45995	0,008
0,225	-0,388	-1,000	30	2,11	-3,64	-9,38	0,53	44	-85	-123	70165	0,005
0,075	-0,463	-1,000	30	2,87	-17,69	-38,22	0,50	190	-216	-699	54666	0,118
0,040	-0,480	-1,000	30	2,22	-26,58	-55,39	0,45	367	-356	-991	52631	0,184
0,010	-0,495	-1,000	30	0,78	-38,79	-78,37	0,39	399	-354	-1548	49225	0,179
0,000	-0,500	-1,000	30	0,00	-39,44	-78,88	0,42	548	-457	-1441	49880	0,214
-0,029	-0,514	-1,000	30	-2,37	-42,08	-81,86	0,31	469	-507	-1553	48150	0,199
0,366	0,000	-1,000	45	3,92	0,00	-10,72	0,62	122	12	-246	47315	0,106
0,165	-0,147	-1,000	45	2,16	-1,92	-13,08	0,51	73	-43	-180	74008	0,086
0,155	-0,155	-1,000	45	4,10	-4,10	-26,42	0,59	146	46	-649	41019	0,109
0,025	-0,250	-1,000	45	1,95	-19,46	-77,85	0,47	401	18	-1456	52510	0,216
0,000	-0,268	-1,000	45	0,00	-24,75	-92,37	0,48	406	121	-2071	43817	0,207
-0,027	-0,287	-1,000	45	-2,50	-26,62	-92,74	0,36	416	-70	-1896	47452	0,193
0,000	0,000	-1,000	60	0,00	0,00	-84,19	0,52	291	347	-1951	44141	0,154
-0,040	-0,040	-1,000	60	-4,46	-4,46	-111,49	0,47	415	502	-2472	45462	0,202

A.5 Konfigurationen und Festigkeitswerte der Versuche zur Zugkraftübertragung

Abkürzung: WBH - Wärmenachbehandlung

Tabelle A.18: Versuche zur Kraftübertragung bei Zugbeanspruchungen bei mehraxialen Belastungsversuchen

Serie	PK	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	ξ	ρ	Ausführung PK	Bruchstelle
T1-1	1	1,72	-34,31	-34,60	-38,79	29,54	Klebefläche maschinell und händisch geschliffen (Standardvorgehen)	Klebefuge
T1-1	2	1,93	-37,93	-37,96	-42,70	32,56	Klebefläche maschinell und händisch geschliffen (Standardvorgehen)	Klebefuge
T1-1	3	1,95	-38,75	-39,30	-43,94	33,46	Klebefläche maschinell und händisch geschliffen (Standardvorgehen)	Klebefuge
T1-2	4	3,02	-60,33	-60,58	-68,06	51,83	Klebefläche maschinell und händisch geschliffen (Standardvorgehen), Lagekorrektur des Würfels in Prüfmaschine	Klebefuge
T2-1	1	4,44	-88,82	-89,07	-100,14	76,25	aus 15er Würfel gesägt, Kleber mit WBH, Beton ohne Fasern	Klebefuge
T2-1	2	3,69	-73,70	-73,93	-83,10	63,28	aus 15er Würfel gesägt, Kleber mit WBH, Beton ohne Fasern	Klebefuge
T2-1	3	3,21	-64,31	-65,04	-72,83	55,43	aus 15er Würfel gesägt, Kleber mit WBH, Beton ohne Fasern	Beton
T2-2	4	3,78	-75,57	-75,82	-85,22	64,89	aus 15er Würfel gesägt, Beton ohne Fasern	Beton
T2-2	5	3,38	-67,68	-67,93	-76,34	58,12	aus 15er Würfel gesägt, Beton ohne Fasern	Klebefuge
T2-2	6	2,31	-46,22	-46,56	-52,23	39,76	aus 15er Würfel gesägt, Beton ohne Fasern	Klebefuge
T3-1	1	3,58	-71,59	-71,74	-80,68	61,44	Klebefläche nur händisch geschliffen	Klebefuge
T3-1	2	3,62	-72,36	-72,51	-81,55	62,10	Klebefläche nur händisch geschliffen	Klebefuge
T3-1	3	2,88	-57,66	-57,81	-65,00	49,49	Klebefläche nur händisch geschliffen	Klebefuge
T3-2	4	2,92	-58,27	-58,52	-65,74	50,06	Klebefläche nur händisch geschliffen, Kleber mit WBH	Klebefuge
T3-2	5	3,65	-72,58	-72,86	-81,86	62,36	Klebefläche nur händisch geschliffen, Kleber mit WBH	Klebefuge
T3-2	6	2,53	-50,34	-50,66	-56,85	43,30	Klebefläche nur händisch geschliffen, Kleber mit WBH	Klebefuge
T3-3	7	4,86	-97,09	-97,31	-109,43	83,33	aus 15er Würfel geschnitten	Klebefuge
T3-3	8	3,79	-75,85	-76,04	-85,51	65,10	aus 15er Würfel geschnitten	Klebefuge
T3-3	9	3,8	-76,10	-76,47	-85,89	65,39	aus 15er Würfel geschnitten	Klebefuge
T3-4	10	3,43	-68,36	-68,98	-77,31	58,87	aus 15er Würfel geschnitten, Belastungsgeschwindigkeit reduziert	Klebefuge
T3-4	11	4,30	-85,79	-86,24	-96,84	73,74	aus 15er Würfel geschnitten, Belastungsgeschwindigkeit reduziert	Klebefuge
T3-4	12	4,03	-80,55	-80,92	-90,90	69,21	aus 15er Würfel geschnitten, Belastungsgeschwindigkeit reduziert	Klebefuge
T4	1	4,17	-83,16	-83,62	-93,88	71,49	10er Würfel in Zugrichtung um 2 mm länger, Klebefläche nur händisch geschliffen	Klebefuge
T4	2	3,35	-66,84	-67,28	-75,50	57,49	10er Würfel in Zugrichtung um 2 mm länger, Klebefläche nur händisch geschliffen	Klebefuge
T4	3	3,08	-61,38	-61,91	-69,40	52,85	10er Würfel in Zugrichtung um 2 mm länger, Klebefläche nur händisch geschliffen	Klebefuge
T5	1	1,75	-34,86	-35,07	-39,36	29,98	Klebefläche nur händisch geschliffen, Lageüberprüfung	Klebefuge
T5	2	1,74	-34,60	-34,96	-39,16	29,82	Klebefläche nur händisch geschliffen, Lageüberprüfung	Klebefuge
T5	3	2,28	-45,68	-46,00	-51,62	39,29	Klebefläche nur händisch geschliffen, Lageüberprüfung	Klebefuge
T6-1	1	1,53	-30,53	-30,88	-34,57	26,32	10er Würfel in Zugrichtung um 2 mm länger, Klebefläche nur händisch geschliffen	Klebefuge
T6-1	2	1,70	-34,03	-34,58	-38,63	29,40	10er Würfel in Zugrichtung um 2 mm länger, Klebefläche nur händisch geschliffen	Klebefuge
T6-2	3	2,13	-42,55	-42,79	-48,04	36,58	$100 \times 100 \times 102\,mm^3$ Würfel aus Prisma geschnitten	Klebefuge
T6-2	4	2,42	-48,33	-48,7	-54,62	41,59	$100 \times 100 \times 102\,mm^3$ Würfel aus Prisma geschnitten	Klebefuge
T6-2	5	2,16	-43,14	-43,58	-48,82	37,17	$100 \times 100 \times 102\,mm^3$ Würfel aus Prisma geschnitten	Klebefuge
T7-1	1	1,56	-31,18	-31,46	-35,26	26,85	10er Würfel in Zugrichtung um 2 mm länger, Klebefläche nur händisch geschliffen, längere Kleberaushärtezeit	Klebefuge
T7-1	2	1,91	-38,11	-38,42	-43,08	32,80	10er Würfel in Zugrichtung um 2 mm länger, Klebefläche nur händisch geschliffen, längere Kleberaushärtezeit	Klebefuge
T7-2	3	2,95	-58,82	-59,29	-66,49	50,63	$100 \times 100 \times 102\,mm^3$ Würfel aus Prisma geschnitten, längere Kleberaushärtezeit	Klebefuge
T7-2	4	2,74	-54,50	-54,93	-61,60	46,91	$100 \times 100 \times 102\,mm^3$ Würfel aus Prisma geschnitten, längere Kleberaushärtezeit	Klebefuge
T7-2	5	2,46	-49,07	-49,54	-55,51	42,27	$100 \times 100 \times 102\,mm^3$ Würfel aus Prisma geschnitten, längere Kleberaushärtezeit	Klebefuge

Fortsetzung Tabelle A.18: Versuche zur Kraftübertragung bei Zugbeanspruchungen bei mehraxialen Belastungsversuchen

Serie	PK	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	ξ	ρ	Ausführung PK	Bruchstelle
T8	1	4,80	-95,62	-96,15	-107,95	82,21	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt	Klebefuge am Schraubenkopf
T8	2	4,93	-99,85	-100,03	-112,55	85,63	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt	Beton hinter Schraubenende
T8	3	5,17	-103,08	-103,71	-116,41	88,64	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt	Beton hinter Schraubenende
T9	1	7,8	0	0	4,50	6,37	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt, einaxialer Test zur Prüfung genereller Eignung	Beton hinter den Schrauben
	2	8,51	0	0	4,91	6,95	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt, einaxialer Test zur Prüfung genereller Eignung	Beton hinter den Schrauben
	3	3,57	-71,15	-71,69	-80,41	61,23	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt	Klebefuge hinter Schraubenköpfen
	4	6,00	-61,28	-61,64	-67,50	55,08	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt	Beton hinter den Schrauben
	5	7,12	-35,69	-36,15	-37,37	35,14	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt	Beton hinter den Schrauben
	6	2,86	0,00	0,00	1,65	2,34	Würfel mit 10 × 10 Linsenkopfschrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt (ging schlecht), einaxialer Test zur Prüfung genereller Eignung	Klebefuge hinter Schraubenköpfen; teilweise Auszug der Schrauben
	7	3,38	0,00	0,00	1,95	2,76	Würfel mit 10 × 10 Linsenkopfschrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt (ging schlecht), einaxialer Test zur Prüfung genereller Eignung	Klebefuge hinter Schraubenköpfen; teilweise Auszug der Schrauben
T10-1	1	4,09	-81,47	-81,93	-91,98	70,05	Würfel mit 15 × 15 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt da nicht frei liegend	Klebefuge hinter Schraubenköpfen
T10-1	2	3,42	-68,44	-68,93	-77,34	58,87	Würfel mit 15 × 15 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt da nicht frei liegend	Klebefuge hinter Schraubenköpfen
T10-2	3	1,86	-37,13	-37,47	-42,00	31,97	Würfel mit 6 × 6 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm und 5,3-15 Unterlegscheiben je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter den Scheiben
T10-2	4	2,03	-40,74	-41,23	-46,15	35,12	Würfel mit 6 × 6 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm und 5,3-15 Unterlegscheiben je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter Scheiben
T10-3	5	2,62	-52,34	-52,58	-59,06	44,97	Würfel mit 6 × 6 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm und 4,3-15 Unterlegscheiben je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter den Scheiben
T10-3	6	2,77	-55,26	-55,69	-62,46	47,56	Würfel mit 6 × 6 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm und 4,3-15 Unterlegscheiben je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter Scheiben
T10-4	7	4,39	-87,84	-88,21	-99,11	75,46	Würfel mit 8 × 8 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm und 4,3-10 Unterlegscheiben je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter Scheiben
T10-4	8	3,88	-77,44	-77,97	-87,49	66,61	Würfel mit 8 × 8 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm und 4,3-10 Unterlegscheiben je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter Scheiben
T11-1	1	4,18	-83,69	-84,06	-94,44	71,90	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,5 × 12 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Beton hinter Schrauben
T11-1	2	3,18	-63,32	-63,81	-71,56	54,50	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,5 × 12 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter Schraubenköpfen
T11-1	3	3,10	-61,90	-62,25	-69,89	53,22	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,5 × 12 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt	Beton hinter Schrauben
T11-2	4	5,45	-108,80	-109,23	-122,73	93,46	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,5 × 16 mm und der äußersten Reihe 3,5 × 12 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter Schraubenköpfen
T11-2	5	4,11	-82,40	-82,71	-92,95	70,76	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,5 × 16 mm und der äußersten Reihe 3,5 × 12 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Beton hinter Schrauben
T11-2	6	3,21	-64,08	-64,51	-72,39	55,12	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,5 × 16 mm und der äußersten Reihe 3,5 × 12 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt	Klebefuge hinter Schraubenköpfen
T11-3	7	4,29	-85,83	-86,2	-96,84	73,73	Würfel mit 10 × 10 SPAX-Schrauben 3,0 × 16 mm und der äußersten Reihe 3,0 × 12 mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter Schraubenköpfen

Fortsetzung Tabelle A.18: Versuche zur Kraftübertragung bei Zugbeanspruchungen bei mehraxialen Belastungsversuchen

Serie	PK	$\sigma_{1,ult}$	$\sigma_{2,ult}$	$\sigma_{3,ult}$	ξ	ρ	Ausführung PK	Bruchstelle
T11-3	8	5,16	-103,1	-103,46	-116,28	88,54	Würfel mit 10×10 SPAX-Schrauben $3{,}0 \times 16$ mm und der äußersten Reihe $3{,}0 \times 12$ mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie nicht entfernt	Klebefuge hinter Schraubenköpfen
T11-3	9	3,86	-76,99	-77,32	-86,86	66,15	Würfel mit 10×10 SPAX-Schrauben $3{,}0 \times 16$ mm und der äußersten Reihe $3{,}0 \times 12$ mm je Oberfläche in Zugrichtung, Schraubenträgerfolie entfernt	Beton hinter Schrauben

B Mehraxiale Festigkeitswerte aus der Literatur (Datenbank)

Es werden nur die Festigkeitswerte mit proportionaler Laststeigerung verwendet.

B.1 Übersicht

Abkürzungen:
- W - Würfel
- S - Scheibe
- P - Prisma
- Z - Zylinder
- 1 - Einzelwerte
- 2 - Mittelwerte
- 3 - verschiedene Fasergehalte/-typen
- 4 - Probekörper gekerbt
- 5 - Zugbelastung über einbetonierte Bewehrungsstäbe

Tabelle B.1: Versuchsprogramme mit dreiaxialer Beanspruchung

Quelle	Jahr	Versuch	Probekörper		einaxiale Festigkeit
			Form	Größe [cm]	
Bremer & Steinsdörfer [9]	1976	DDD[1]	W	$10 \times 10 \times 10$	C35/45, C45/55, C55/67
Curbach & Speck [17]	2002	DDD[1,3]	W	$10 \times 10 \times 10$	C55/67, C60/75, C70/85, C80/95, C90/105
Dahl [19]	1992	DDD[1]	Z	$\varnothing 10$ / h = 20	C12/15 bis C100/115
Hampel [36]	2006	DDD[1]	W	$10 \times 10 \times 10$	C35/45, C60/75, C70/85
Kless [51]	1988	DZZ[1,4]	W	$15 \times 15 \times 15$	C35/45
Liang [66]	1998	DZZ[1,3,4] ZZZ[1,3,4]	W	$10 \times 10 \times 10$	C25/30, C35/45, C45/55
Linse & Aschl [70]	1974	DDZ[1] DZZ[1]	W	$10 \times 10 \times 10$	C30/37 bis C40/50
Linse & Aschl [71]	1976	DDD[1]	W	$10 \times 10 \times 10$	C30/37
Mahmood & Hannant [77]	1975	DDZ[1]	Z	$\varnothing 10{,}2$ / h = 61	C16/20 bis C30/37

Fortsetzung Tabelle B.1: Versuchsprogramme mit dreiaxialer Beanspruchung

Quelle	Jahr	Versuch	Probekörper		einaxiale Festigkeit
			Form	Größe [cm]	
Mills & Zimmermann [82]	1970	DDD[1]	W	5,72 x 5,72 x5,72	C16/20, C20/25, C30/37
Rogge [100]	2003	DDD[1]	Z	⌀15 / h = 40	C30/37 bis C90/105
Scholz et al. [113]	1995	DZZ[1] DDZ[1] DDD[1]	W	10 × 10 × 10	C30/37 bis C40/50
Schröder [114]	1987	DDZ[1]	W	15 × 15 × 15	C 25/30
Wang & Song [125]	2008	DDZ[1,5]	P	15 × 15 × 30 25 × 25 × 40	C20/25 C12/15
Liu [72]	1989	DDZ[1,4] DDD[1,4]	W	10 × 10 × 10	C70/85, C45/55

Tabelle B.2: Versuchsprogramme mit zweiaxialer Beanspruchung

Quelle	Jahr	Versuch	Probekörper		einaxiale Festigkeit
			Form	Größe [cm]	
Bremer & Steinsdörfer [9]	1976	DD[1]	W	10 × 10 × 10	C35/45, C45/55, C55/67
Chen [13]	1984	DD[1]	S	12,7 × 12,7 × 1,27	C35/45, C40/50, C50/60
Curbach & Speck [17]	2002	DD[1,3]	W	10 × 10 × 10	C55/67, C60/75, C70/85, C80/95, C90/105
Curbach & Speck [18], [118]	2008	DD[1,5]	W	10 × 10 × 10	C150, C170, C180
Demeke & Tegos [21]	1994	DZ[3,5]	P	10 x 10 x 30	C25/30
Hampel [36]	2006	DZ[1]	S	20 × 20 × 5	C50/60, C55/67, C70/85
Hampel [36]	2006	DD[1]	W	10 × 10 × 10	C50/60, C60/75, C80/95
Hussein & Marzouk [45], [44]	2000	DD[2] DZ[2] ZZ[2]	S	15 × 15 × 4	C35/45, C60/75, C80/95

Fortsetzung Tabelle B.2: Versuchsprogramme mit zweiaxialer Beanspruchung

Quelle	Jahr	Versuch	Probekörper		einaxiale Festigkeit
			Form	Größe [cm]	
Kulik [56]	1980	ZZ[4]	W	6 × 6 × 6	C30/37, C45/55
Kupfer [57], [59]	1973	DD[2] DZ[2] ZZ[2]	S	20 × 20 × 5	C12/15, C16/20, C25/30, C45/55, C50/60
Lee [65]	2004	DD[3] DZ[3] ZZ[3]	S	20 × 20 × 6	C25/30, C30/37
Linse & Aschl [71]	1976	DD[1]	W	10 × 10 × 10	C25/30
Mills & Zimmermann [82]	1970	DD[1]	W	5,72 × 5,72 × 5,72	C20/25, C30/37
Nelissen [84]	1972	DD[1] DZ[1] ZZ[1]	S	17,7 × 17,7 × 12,6	C20/25, C30/37
Schickert & Winkler [110]	1977	DD[1]	W	10 × 10 × 10	C25/30
Scholz et al. [113]	1995	DD[1] DZ[1] ZZ[1]	W	10 × 10 × 10	C30/37 bis C45/55
Schröder [114]	1987	DZ[1]	W	15 × 15 × 15	C 25/30
Tasuji [119]	1976	DD[2] DZ[2] ZZ[2]	S	12,7 × 12,7 × 1,27	C25/30
Traina & Mansour [122]	1991	DD[3]	W	7 × 7 × 7	C30/37, C40/50
Wang & Song [125]	2008 2008	DZ[2,5] DZ[2,5]	P P	15 × 15 × 30 25 × 25 × 40	C20/25 C12/15

B.2 Aufstellung nach Autor

Bremer & Steinsdörfer [9]

- Probekörper: Würfel 10 cm × 10 cm × 10 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.3: Versuchswerte von Bremer & Steinsdörfer [9]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-43,60	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-43,60	0,00	-1,29	-1,29	-1,49	1,05	0,91	0,53	-1,49
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-43,60	0,00	-0,63	-1,31	-1,12	0,93	0,45	0,81	-1,12
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-44,50	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-44,50	0,00	-1,23	-1,23	-1,42	1,00	0,87	0,50	-1,42
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-44,50	0,00	-0,63	-1,26	-1,09	0,89	0,44	0,77	-1,09
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-54,80	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-54,80	0,00	-1,25	-1,25	-1,44	1,02	0,88	0,51	-1,44
DD	0,000	-0,700	-1,000	17,0	-54,80	0,00	-0,95	-1,35	-1,33	0,98	0,67	0,72	-1,33
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-54,80	0,00	-0,64	-1,28	-1,11	0,90	0,45	0,78	-1,11
DD	0,000	-0,250	-1,000	46,1	-54,80	0,00	-0,31	-1,25	-0,90	0,92	0,22	0,89	-0,90
DD	0,000	-0,100	-1,000	54,8	-54,80	0,00	-0,12	-1,17	-0,74	0,91	0,08	0,91	-0,74
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-54,00	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-54,00	0,00	-1,19	-1,19	-1,37	0,97	0,84	0,49	-1,37
DD	0,000	-0,850	-1,000	8,0	-54,00	0,00	-1,04	-1,22	-1,30	0,93	0,73	0,57	-1,30
DD	0,000	-0,650	-1,000	20,2	-54,00	0,00	-0,82	-1,26	-1,20	0,90	0,58	0,69	-1,20
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-54,00	0,00	-0,61	-1,23	-1,06	0,87	0,43	0,75	-1,06
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-54,00	0,00	-0,24	-1,20	-0,83	0,90	0,17	0,88	-0,83
DD	0,000	-0,100	-1,000	54,8	-54,00	0,00	-0,11	-1,10	-0,70	0,86	0,08	0,85	-0,70
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-64,00	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-64,00	0,00	-1,15	-1,15	-1,33	0,94	0,81	0,47	-1,33
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-64,00	0,00	-0,62	-1,24	-1,08	0,88	0,44	0,76	-1,08
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-64,30	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-64,30	0,00	-1,08	-1,08	-1,25	0,88	0,76	0,44	-1,25
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-64,30	0,00	-0,59	-1,18	-1,02	0,83	0,42	0,72	-1,02
DDD	-0,020	-1,000	-1,000	0,0	-43,60	-0,03	-1,53	-1,53	-1,78	1,22	1,06	0,61	-1,78
DDD	-0,020	-0,500	-1,000	30,7	-43,60	-0,03	-0,78	-1,55	-1,36	1,08	0,53	0,94	-1,36
DDD	-0,014	-0,500	-1,000	30,5	-43,60	-0,03	-0,74	-1,48	-1,30	1,03	0,50	0,89	-1,30
ZDD	0,100	-1,000	-1,000	0,0	-43,60	0,05	-0,46	-0,46	-0,50	0,41	0,36	0,21	-0,50
ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	-43,60	0,02	-1,05	-1,05	-1,20	0,88	0,76	0,44	-1,20
ZDD	0,030	-0,500	-1,000	29,0	-43,60	0,03	-0,43	-0,86	-0,73	0,63	0,32	0,54	-0,73
ZDD	0,100	-0,300	-1,000	38,9	-43,60	0,06	-0,18	-0,59	-0,41	0,47	0,17	0,44	-0,41
DDD	-0,020	-1,000	-1,000	0,0	-44,50	-0,03	-1,48	-1,48	-1,73	1,19	1,03	0,59	-1,73
DDD	-0,020	-0,500	-1,000	30,7	-44,50	-0,03	-0,75	-1,49	-1,31	1,03	0,51	0,90	-1,31
DDD	-0,014	-0,500	-1,000	30,5	-44,50	-0,03	-0,71	-1,43	-1,25	0,99	0,48	0,86	-1,25
ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	-44,50	0,02	-1,00	-1,00	-1,14	0,83	0,72	0,41	-1,14
ZDD	0,030	-0,500	-1,000	29,0	-44,50	0,03	-0,44	-0,87	-0,74	0,64	0,33	0,54	-0,74
ZDD	0,010	-0,100	-1,000	54,3	-44,50	0,01	-0,10	-0,98	-0,61	0,77	0,08	0,76	-0,61
DDD	-0,014	-1,000	-1,000	0,0	-54,80	-0,02	-1,45	-1,45	-1,69	1,17	1,01	0,58	-1,69
DDD	-0,014	-0,700	-1,000	17,3	-54,80	-0,02	-1,11	-1,58	-1,56	1,13	0,77	0,83	-1,56
DDD	-0,010	-0,700	-1,000	17,2	-54,80	-0,01	-1,09	-1,55	-1,53	1,11	0,76	0,82	-1,53
DDD	-0,014	-0,500	-1,000	30,5	-54,80	-0,02	-0,70	-1,41	-1,23	0,98	0,48	0,86	-1,23
DDD	-0,014	-0,100	-1,000	55,5	-54,80	-0,02	-0,12	-1,25	-0,80	0,97	0,07	0,96	-0,80
ZD	0,010	0,000	-1,000	59,5	-54,80	0,01	0,00	-1,02	-0,58	0,84	0,01	0,84	-0,58
ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	-54,80	0,02	-1,06	-1,06	-1,21	0,88	0,76	0,44	-1,21
ZDD	0,060	-0,700	-1,000	15,9	-54,80	0,04	-0,49	-0,69	-0,66	0,54	0,37	0,39	-0,66
ZDD	0,030	-0,700	-1,000	16,4	-54,80	0,03	-0,51	-0,73	-0,70	0,55	0,38	0,40	-0,70
ZDD	0,060	-0,500	-1,000	28,1	-54,80	0,04	-0,37	-0,74	-0,61	0,55	0,29	0,47	-0,61
ZDD	0,010	-0,100	-1,000	54,3	-54,80	0,01	-0,10	-0,97	-0,61	0,76	0,07	0,75	-0,61
DDD	-0,020	-1,000	-1,000	0,0	-54,00	-0,03	-1,45	-1,45	-1,69	1,16	1,00	0,58	-1,69
DDD	-0,014	-1,000	-1,000	0,0	-54,00	-0,02	-1,41	-1,41	-1,64	1,14	0,98	0,57	-1,64
DDD	-0,020	-0,850	-1,000	8,2	-54,00	-0,02	-1,30	-1,53	-1,65	1,15	0,90	0,71	-1,65
DDD	-0,014	-0,850	-1,000	8,1	-54,00	-0,02	-1,26	-1,48	-1,59	1,11	0,87	0,69	-1,59
DDD	-0,020	-0,500	-1,000	30,7	-54,00	-0,03	-0,71	-1,43	-1,25	0,99	0,49	0,86	-1,25
DDD	-0,014	-0,500	-1,000	30,5	-54,00	-0,02	-0,69	-1,37	-1,20	0,96	0,47	0,83	-1,20
DDD	-0,007	-0,500	-1,000	30,2	-54,00	-0,01	-0,66	-1,32	-1,15	0,93	0,46	0,80	-1,15
DDD	-0,014	-0,300	-1,000	43,6	-54,00	-0,02	-0,38	-1,27	-0,96	0,91	0,26	0,87	-0,96
DDD	-0,007	-0,300	-1,000	43,3	-54,00	-0,01	-0,36	-1,21	-0,91	0,87	0,25	0,84	-0,91
DDD	-0,020	-0,100	-1,000	55,8	-54,00	-0,02	-0,12	-1,16	-0,75	0,89	0,07	0,89	-0,75
DDD	-0,014	-0,100	-1,000	55,5	-54,00	-0,01	-0,11	-1,07	-0,69	0,83	0,07	0,82	-0,69
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-54,00	0,05	0,00	-0,52	-0,27	0,45	0,04	0,45	-0,27
ZD	0,010	0,000	-1,000	59,5	-54,00	0,01	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,01	0,80	-0,56
ZDD	0,100	-1,000	-1,000	0,0	-54,00	0,05	-0,52	-0,52	-0,57	0,47	0,40	0,23	-0,57
ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	-54,00	0,02	-1,00	-1,00	-1,14	0,83	0,72	0,42	-1,14
ZDD	0,010	-1,000	-1,000	0,0	-54,00	0,01	-1,08	-1,08	-1,24	0,89	0,77	0,45	-1,24
ZDD	0,060	-0,850	-1,000	7,5	-54,00	0,03	-0,47	-0,56	-0,57	0,45	0,36	0,27	-0,57
ZDD	0,020	-0,850	-1,000	7,8	-54,00	0,02	-0,70	-0,82	-0,87	0,64	0,51	0,39	-0,87
ZDD	0,060	-0,650	-1,000	18,9	-54,00	0,04	-0,40	-0,62	-0,57	0,47	0,31	0,36	-0,57
ZDD	0,020	-0,650	-1,000	19,7	-54,00	0,02	-0,53	-0,81	-0,76	0,59	0,38	0,45	-0,76

Fortsetzung Tabelle B.3: Versuchswerte von Bremer & Steinsdörfer [9]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
ZDD	0,060	-0,500	-1,000	28,1	-54,00	0,04	-0,31	-0,62	-0,52	0,47	0,24	0,40	-0,52
ZDD	0,030	-0,500	-1,000	29,0	-54,00	0,02	-0,37	-0,74	-0,63	0,54	0,28	0,46	-0,63
ZDD	0,100	-0,300	-1,000	38,9	-54,00	0,05	-0,16	-0,54	-0,37	0,42	0,15	0,39	-0,37
ZDD	0,020	-0,300	-1,000	42,1	-54,00	0,01	-0,23	-0,77	-0,57	0,57	0,17	0,54	-0,57
ZDD	0,010	-0,100	-1,000	54,3	-54,00	0,01	-0,09	-0,93	-0,58	0,73	0,07	0,72	-0,58
DDD	-0,020	-1,000	-1,000	0,0	-64,60	-0,03	-1,38	-1,38	-1,61	1,10	0,96	0,55	-1,61
DDD	-0,020	-0,500	-1,000	30,7	-64,60	-0,03	-0,70	-1,41	-1,24	0,98	0,48	0,85	-1,24
DDD	-0,014	-0,500	-1,000	30,5	-64,60	-0,02	-0,64	-1,28	-1,12	0,89	0,44	0,78	-1,12
ZDD	0,100	-1,000	-1,000	0,0	-64,60	0,04	-0,45	-0,45	-0,49	0,40	0,35	0,20	-0,49
ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	-64,60	0,02	-1,01	-1,01	-1,15	0,84	0,73	0,42	-1,15
ZDD	0,030	-0,500	-1,000	29,0	-64,60	0,02	-0,34	-0,70	-0,59	0,51	0,26	0,44	-0,59
DDD	-0,020	-1,000	-1,000	0,0	-64,30	-0,03	-1,33	-1,33	-1,55	1,06	0,92	0,53	-1,55
DDD	-0,020	-0,500	-1,000	30,7	-64,30	-0,03	-0,68	-1,37	-1,20	0,95	0,46	0,83	-1,20
DDD	-0,014	-0,500	-1,000	30,5	-64,30	-0,02	-0,62	-1,24	-1,08	0,86	0,43	0,75	-1,08
ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	-64,30	0,02	-0,96	-0,96	-1,10	0,80	0,69	0,40	-1,10
ZDD	0,010	-1,000	-1,000	0,0	-64,30	-0,01	-1,05	-1,05	-1,22	0,85	0,73	0,42	-1,10

Chen [13]

- Probekörper: Scheiben 12,7 cm × 12,7 cm × 1,27 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.4: Versuchswerte von Chen [13]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-59,02	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,81	0,00	0,81	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-59,02	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,83	0,00	0,83	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-59,02	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-59,02	0,00	-0,25	-1,26	-0,87	0,94	0,18	0,93	-0,87
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-59,02	0,00	-0,22	-1,09	-0,75	0,81	0,15	0,80	-0,75
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-59,02	0,00	-0,22	-1,08	-0,75	0,81	0,15	0,79	-0,75
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-59,02	0,00	-0,58	-1,17	-1,01	0,83	0,41	0,72	-1,01
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-59,02	0,00	-0,51	-1,03	-0,89	0,73	0,36	0,63	-0,89
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-59,02	0,00	-0,55	-1,10	-0,95	0,78	0,39	0,67	-0,95
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-59,02	0,00	-1,01	-1,01	-1,16	0,82	0,71	0,41	-1,16
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-59,02	0,00	-1,09	-1,09	-1,25	0,89	0,77	0,44	-1,25
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-59,02	0,00	-1,10	-1,10	-1,27	0,89	0,77	0,45	-1,27
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-51,87	0,00	0,00	-1,06	-0,61	0,87	0,00	0,87	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-51,87	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-51,87	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-51,87	0,00	-0,25	-1,26	-0,87	0,94	0,18	0,93	-0,87
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-51,87	0,00	-0,26	-1,30	-0,90	0,97	0,18	0,95	-0,90
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-51,87	0,00	-0,25	-1,24	-0,86	0,93	0,17	0,91	-0,86
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-51,87	0,00	-0,60	-1,20	-1,04	0,85	0,43	0,74	-1,04
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-51,87	0,00	-0,57	-1,15	-1,00	0,81	0,41	0,70	-1,00
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-51,87	0,00	-0,62	-1,25	-1,08	0,88	0,44	0,76	-1,08
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-51,87	0,00	-1,10	-1,10	-1,28	0,90	0,78	0,45	-1,28
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-51,87	0,00	-1,07	-1,07	-1,24	0,87	0,76	0,44	-1,24
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-51,87	0,00	-1,08	-1,08	-1,25	0,88	0,76	0,44	-1,25
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-47,92	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-47,92	0,00	0,00	-1,01	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-47,92	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-47,92	0,00	-0,24	-1,21	-0,84	0,91	0,17	0,89	-0,84
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-47,92	0,00	-0,26	-1,29	-0,89	0,96	0,18	0,95	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-47,92	0,00	-0,25	-1,26	-0,87	0,94	0,18	0,92	-0,87
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-47,92	0,00	-0,65	-1,29	-1,12	0,92	0,46	0,79	-1,12
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-47,92	0,00	-0,62	-1,25	-1,08	0,88	0,44	0,77	-1,08
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-47,92	0,00	-0,67	-1,35	-1,17	0,95	0,48	0,83	-1,17
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-47,92	0,00	-1,14	-1,14	-1,31	0,93	0,80	0,46	-1,31
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-47,92	0,00	-1,17	-1,17	-1,35	0,95	0,82	0,48	-1,35
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-47,92	0,00	-1,12	-1,12	-1,29	0,91	0,79	0,46	-1,29
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,22	0,00	0,00	-1,05	-0,60	0,86	0,00	0,86	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,22	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,22	0,00	0,00	-0,95	-0,55	0,77	0,00	0,77	-0,55
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-46,22	0,00	-0,25	-1,27	-0,88	0,95	0,18	0,94	-0,88
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-46,22	0,00	-0,25	-1,26	-0,87	0,94	0,18	0,92	-0,87
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-46,22	0,00	-0,26	-1,28	-0,88	0,96	0,18	0,94	-0,88
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-46,22	0,00	-0,66	-1,32	-1,14	0,93	0,47	0,81	-1,14

Fortsetzung Tabelle B.4: Versuchswerte von Chen [13]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-46,22	0,00	-0,64	-1,29	-1,11	0,91	0,45	0,79	-1,11
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-46,22	0,00	-0,62	-1,25	-1,08	0,88	0,44	0,76	-1,08
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-46,22	0,00	-1,13	-1,13	-1,31	0,93	0,80	0,46	-1,31
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-46,22	0,00	-1,08	-1,08	-1,25	0,88	0,76	0,44	-1,25
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-46,22	0,00	-1,09	-1,09	-1,26	0,89	0,77	0,45	-1,26
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-43,58	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-43,58	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-43,58	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-43,58	0,00	-0,24	-1,19	-0,82	0,89	0,17	0,87	-0,82
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-43,58	0,00	-0,26	-1,29	-0,89	0,97	0,18	0,95	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-43,58	0,00	-0,25	-1,27	-0,88	0,95	0,18	0,93	-0,88
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-43,58	0,00	-0,64	-1,28	-1,10	0,90	0,45	0,78	-1,10
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-43,58	0,00	-0,64	-1,29	-1,12	0,91	0,46	0,79	-1,12
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-43,58	0,00	-0,62	-1,23	-1,07	0,87	0,44	0,76	-1,07
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-43,58	0,00	-1,17	-1,17	-1,35	0,96	0,83	0,48	-1,35
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-43,58	0,00	-1,15	-1,15	-1,32	0,94	0,81	0,47	-1,32
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-43,58	0,00	-1,12	-1,12	-1,29	0,91	0,79	0,46	-1,29

Curbach & Speck [17]

- Probekörper: Würfel 10 cm × 10 cm × 10 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.5: Versuchswerte von Curbach & Speck [17]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-66,70	0,00	-0,51	-1,30	-1,05	0,92	0,36	0,85	-1,05
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-66,70	0,00	-0,53	-1,33	-1,07	0,94	0,37	0,87	-1,07
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-66,70	0,00	-0,52	-1,30	-1,05	0,93	0,37	0,85	-1,05
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-66,70	0,00	-0,54	-1,35	-1,09	0,96	0,38	0,88	-1,09
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-66,70	0,00	-0,53	-1,33	-1,07	0,95	0,37	0,87	-1,07
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-66,70	0,00	-0,53	-1,32	-1,06	0,94	0,37	0,86	-1,06
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-66,70	0,00	-0,81	-1,36	-1,25	0,96	0,58	0,77	-1,25
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-66,70	0,00	-0,79	-1,32	-1,22	0,94	0,56	0,75	-1,22
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-66,70	0,00	-0,78	-1,31	-1,21	0,93	0,55	0,75	-1,21
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-66,70	0,00	-0,83	-1,38	-1,27	0,98	0,58	0,79	-1,27
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-66,70	0,00	-0,77	-1,28	-1,18	0,91	0,54	0,73	-1,18
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-66,70	0,00	-0,80	-1,33	-1,23	0,95	0,57	0,76	-1,23
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-66,70	0,00	-1,07	-1,34	-1,39	1,00	0,76	0,66	-1,39
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-66,70	0,00	-1,03	-1,29	-1,34	0,96	0,73	0,63	-1,34
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-66,70	0,00	-1,09	-1,37	-1,42	1,02	0,77	0,67	-1,42
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-66,70	0,00	-1,01	-1,27	-1,32	0,95	0,72	0,62	-1,32
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-66,70	0,00	-1,05	-1,31	-1,36	0,98	0,74	0,64	-1,36
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-66,70	0,00	-1,07	-1,34	-1,39	1,00	0,76	0,66	-1,39
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-66,70	0,00	-1,23	-1,29	-1,46	1,03	0,87	0,55	-1,46
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-66,70	0,00	-1,20	-1,27	-1,42	1,01	0,85	0,54	-1,42
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-66,70	0,00	-1,21	-1,28	-1,44	1,02	0,86	0,55	-1,44
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-66,70	0,00	-1,24	-1,31	-1,47	1,04	0,88	0,56	-1,47
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-66,70	0,00	-1,23	-1,29	-1,46	1,03	0,87	0,55	-1,46
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-66,70	0,00	-1,14	-1,20	-1,35	0,96	0,81	0,51	-1,35
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,10	0,00	0,00	-1,05	-0,61	0,86	0,00	0,86	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,10	0,00	0,00	-1,10	-0,63	0,90	0,00	0,90	-0,63
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,10	0,00	0,00	-1,05	-0,61	0,86	0,00	0,86	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,10	0,00	0,00	-1,06	-0,61	0,87	0,00	0,87	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,10	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,10	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,10	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-83,10	0,00	-0,27	-1,37	-0,95	1,02	0,19	1,01	-0,95
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-83,10	0,00	-0,26	-1,31	-0,91	0,98	0,19	0,97	-0,91
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-83,10	0,00	-0,27	-1,37	-0,95	1,03	0,19	1,01	-0,95
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-83,10	0,00	-0,25	-1,25	-0,86	0,94	0,18	0,92	-0,86
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-83,10	0,00	-0,25	-1,27	-0,88	0,95	0,18	0,93	-0,88
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-83,10	0,00	-0,27	-1,33	-0,92	1,00	0,19	0,98	-0,92
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-83,10	0,00	-0,82	-1,37	-1,26	0,97	0,58	0,78	-1,26
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-83,10	0,00	-0,86	-1,43	-1,32	1,02	0,61	0,82	-1,32
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-83,10	0,00	-0,84	-1,40	-1,29	1,00	0,59	0,80	-1,29
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-83,10	0,00	-0,76	-1,26	-1,17	0,90	0,54	0,72	-1,17
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-83,10	0,00	-0,81	-1,35	-1,24	0,96	0,57	0,77	-1,24

Fortsetzung Tabelle B.5: Versuchswerte von Curbach & Speck [17]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-83,10	0,00	-0,81	-1,35	-1,25	0,96	0,57	0,77	-1,25
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-83,10	0,00	-1,21	-1,27	-1,43	1,01	0,85	0,55	-1,43
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-83,10	0,00	-1,19	-1,26	-1,41	1,00	0,84	0,54	-1,41
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-83,10	0,00	-1,15	-1,21	-1,36	0,96	0,81	0,52	-1,36
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-83,10	0,00	-1,20	-1,26	-1,42	1,01	0,85	0,54	-1,42
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-83,10	0,00	-1,20	-1,27	-1,43	1,01	0,85	0,55	-1,43
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-83,10	0,00	-1,22	-1,28	-1,44	1,02	0,86	0,55	-1,44
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,21	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,21	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,21	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,21	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,21	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,21	0,00	0,00	-1,03	-0,60	0,84	0,00	0,84	-0,60
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-93,21	0,00	-0,05	-1,07	-0,65	0,85	0,04	0,85	-0,65
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-93,21	0,00	-0,06	-1,16	-0,70	0,92	0,04	0,92	-0,70
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-93,21	0,00	-0,06	-1,19	-0,72	0,95	0,04	0,95	-0,72
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-93,21	0,00	-0,05	-1,11	-0,67	0,89	0,04	0,89	-0,67
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-93,21	0,00	-0,06	-1,11	-0,67	0,89	0,04	0,89	-0,67
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-93,21	0,00	-0,06	-1,16	-0,70	0,92	0,04	0,92	-0,70
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,21	0,00	-0,24	-1,23	-0,85	0,92	0,17	0,90	-0,85
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,21	0,00	-0,24	-1,20	-0,83	0,90	0,17	0,88	-0,83
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,21	0,00	-0,25	-1,25	-0,86	0,93	0,18	0,92	-0,86
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,21	0,00	-0,25	-1,25	-0,87	0,94	0,18	0,92	-0,87
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,21	0,00	-0,27	-1,33	-0,92	1,00	0,19	0,98	-0,92
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,21	0,00	-0,24	-1,20	-0,83	0,90	0,17	0,88	-0,83
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-93,21	0,00	-0,54	-1,36	-1,10	0,97	0,38	0,89	-1,10
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-93,21	0,00	-0,50	-1,25	-1,01	0,89	0,35	0,82	-1,01
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-93,21	0,00	-0,50	-1,25	-1,01	0,89	0,35	0,82	-1,01
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-93,21	0,00	-0,52	-1,31	-1,06	0,93	0,37	0,85	-1,06
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-93,21	0,00	-0,52	-1,31	-1,06	0,93	0,37	0,86	-1,06
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-93,21	0,00	-0,54	-1,36	-1,10	0,97	0,38	0,89	-1,10
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,21	0,00	-0,79	-1,32	-1,22	0,94	0,56	0,76	-1,22
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,21	0,00	-0,78	-1,30	-1,20	0,92	0,55	0,74	-1,20
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,21	0,00	-0,77	-1,29	-1,19	0,92	0,55	0,74	-1,19
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,21	0,00	-0,87	-1,45	-1,34	1,03	0,61	0,83	-1,34
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,21	0,00	-0,85	-1,41	-1,30	1,00	0,60	0,81	-1,30
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,21	0,00	-0,78	-1,29	-1,20	0,92	0,55	0,74	-1,20
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-93,21	0,00	-1,02	-1,27	-1,32	0,95	0,72	0,62	-1,32
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-93,21	0,00	-1,09	-1,37	-1,42	1,02	0,77	0,67	-1,42
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-93,21	0,00	-1,00	-1,25	-1,30	0,94	0,71	0,61	-1,30
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-93,21	0,00	-1,11	-1,38	-1,44	1,03	0,78	0,68	-1,44
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-93,21	0,00	-1,04	-1,30	-1,35	0,97	0,73	0,64	-1,35
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-93,21	0,00	-1,10	-1,37	-1,42	1,02	0,77	0,67	-1,42
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,19	-1,25	-1,41	0,99	0,84	0,54	-1,41
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,15	-1,21	-1,37	0,97	0,82	0,52	-1,37
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,20	-1,26	-1,42	1,00	0,85	0,54	-1,42
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,16	-1,23	-1,38	0,98	0,82	0,53	-1,38
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,11	-1,17	-1,31	0,93	0,78	0,50	-1,31
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,21	-1,28	-1,44	1,02	0,86	0,55	-1,44
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,18	-1,24	-1,40	0,99	0,84	0,53	-1,40
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,13	-1,19	-1,34	0,95	0,80	0,51	-1,34
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,12	-1,18	-1,33	0,94	0,79	0,51	-1,33
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,14	-1,21	-1,36	0,96	0,81	0,52	-1,36
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,23	-1,29	-1,45	1,03	0,87	0,56	-1,45
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,21	0,00	-1,19	-1,26	-1,42	1,00	0,84	0,54	-1,42
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,47	0,00	0,00	-1,06	-0,61	0,87	0,00	0,87	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,47	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,47	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,47	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,47	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-93,47	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,47	0,00	-0,25	-1,27	-0,88	0,95	0,18	0,93	-0,88
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,47	0,00	-0,25	-1,28	-0,89	0,96	0,18	0,94	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,47	0,00	-0,26	-1,29	-0,89	0,97	0,18	0,95	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,47	0,00	-0,26	-1,29	-0,89	0,97	0,18	0,95	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,47	0,00	-0,25	-1,28	-0,89	0,96	0,18	0,94	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-93,47	0,00	-0,27	-1,35	-0,93	1,01	0,19	0,99	-0,93
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,47	0,00	-0,91	-1,51	-1,40	1,08	0,64	0,86	-1,40
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,47	0,00	-0,79	-1,32	-1,22	0,94	0,56	0,76	-1,22
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,47	0,00	-0,84	-1,41	-1,30	1,00	0,60	0,80	-1,30
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,47	0,00	-0,86	-1,43	-1,32	1,02	0,61	0,82	-1,32
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,47	0,00	-0,89	-1,48	-1,37	1,05	0,63	0,85	-1,37
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-93,47	0,00	-0,84	-1,40	-1,29	1,00	0,59	0,80	-1,29
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,47	0,00	-1,23	-1,30	-1,46	1,03	0,87	0,56	-1,46
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,47	0,00	-1,26	-1,33	-1,49	1,06	0,89	0,57	-1,49
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,47	0,00	-1,24	-1,30	-1,47	1,04	0,88	0,56	-1,47
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,47	0,00	-1,18	-1,24	-1,40	0,99	0,84	0,53	-1,40
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,47	0,00	-1,25	-1,32	-1,48	1,05	0,88	0,56	-1,48
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-93,47	0,00	-1,17	-1,23	-1,38	0,98	0,82	0,53	-1,38
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-76,12	0,00	0,00	-1,05	-0,61	0,86	0,00	0,86	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-76,12	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-76,12	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-76,12	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-76,12	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-76,12	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57

Fortsetzung Tabelle B.5: Versuchswerte von Curbach & Speck [17]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-76,12	0,00	-0,24	-1,21	-0,84	0,90	0,17	0,89	-0,84
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-76,12	0,00	-0,24	-1,20	-0,83	0,90	0,17	0,88	-0,83
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-76,12	0,00	-0,24	-1,22	-0,85	0,92	0,17	0,90	-0,85
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-76,12	0,00	-0,24	-1,19	-0,83	0,89	0,17	0,88	-0,83
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-76,12	0,00	-0,22	-1,13	-0,78	0,84	0,16	0,83	-0,78
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-76,12	0,00	-0,22	-1,11	-0,77	0,83	0,16	0,82	-0,77
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-76,12	0,00	-0,70	-1,17	-1,08	0,84	0,50	0,67	-1,08
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-76,12	0,00	-0,72	-1,19	-1,10	0,85	0,51	0,68	-1,10
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-76,12	0,00	-0,76	-1,28	-1,18	0,91	0,54	0,73	-1,18
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-76,12	0,00	-0,72	-1,20	-1,10	0,85	0,51	0,69	-1,10
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-76,12	0,00	-0,78	-1,30	-1,20	0,92	0,55	0,74	-1,20
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-76,12	0,00	-0,70	-1,16	-1,08	0,83	0,49	0,67	-1,08
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-76,12	0,00	-1,02	-1,07	-1,20	0,85	0,72	0,46	-1,20
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-76,12	0,00	-1,09	-1,15	-1,29	0,91	0,77	0,49	-1,29
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-76,12	0,00	-1,01	-1,07	-1,20	0,85	0,72	0,46	-1,20
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-76,12	0,00	-0,93	-0,98	-1,10	0,78	0,66	0,42	-1,10
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-76,12	0,00	-0,99	-1,05	-1,17	0,83	0,70	0,45	-1,17
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-76,12	0,00	-0,95	-1,00	-1,12	0,80	0,67	0,43	-1,12
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-85,24	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-85,24	0,00	0,00	-1,01	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-85,24	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-85,24	0,00	0,00	-1,01	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-85,24	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-85,24	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-85,24	0,00	-0,26	-1,32	-0,91	0,99	0,18	0,97	-0,91
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-85,24	0,00	-0,26	-1,32	-0,91	0,99	0,18	0,97	-0,91
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-85,24	0,00	-0,25	-1,27	-0,88	0,95	0,18	0,93	-0,88
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-85,24	0,00	-0,25	-1,26	-0,87	0,94	0,18	0,93	-0,87
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-85,24	0,00	-0,25	-1,23	-0,85	0,92	0,17	0,90	-0,85
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-85,24	0,00	-0,85	-1,42	-1,32	1,01	0,60	0,81	-1,32
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-85,24	0,00	-0,79	-1,33	-1,23	0,95	0,56	0,76	-1,23
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-85,24	0,00	-0,79	-1,31	-1,21	0,93	0,56	0,75	-1,21
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-85,24	0,00	-0,76	-1,27	-1,18	0,91	0,54	0,73	-1,18
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-85,24	0,00	-0,79	-1,32	-1,22	0,94	0,56	0,76	-1,22
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-85,24	0,00	-0,76	-1,27	-1,17	0,90	0,54	0,73	-1,17
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-85,24	0,00	-1,26	-1,32	-1,49	1,05	0,89	0,57	-1,49
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-85,24	0,00	-1,33	-1,39	-1,57	1,11	0,94	0,60	-1,57
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-85,24	0,00	-1,13	-1,19	-1,34	0,95	0,80	0,51	-1,34
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-85,24	0,00	-1,07	-1,13	-1,27	0,90	0,76	0,48	-1,27
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-85,24	0,00	-1,11	-1,16	-1,31	0,93	0,78	0,50	-1,31
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-85,24	0,00	-1,10	-1,16	-1,30	0,92	0,78	0,49	-1,30
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-97,27	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-97,27	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-97,27	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-97,27	0,00	0,00	-0,96	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-97,27	0,00	0,00	-0,95	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-97,27	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-97,27	0,00	-0,26	-1,29	-0,89	0,97	0,18	0,95	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-97,27	0,00	-0,27	-1,33	-0,92	1,00	0,19	0,98	-0,92
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-97,27	0,00	-0,25	-1,26	-0,87	0,94	0,18	0,92	-0,87
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-97,27	0,00	-0,24	-1,22	-0,85	0,91	0,17	0,90	-0,85
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-97,27	0,00	-0,24	-1,20	-0,83	0,90	0,17	0,88	-0,83
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-97,27	0,00	-0,26	-1,31	-0,91	0,98	0,19	0,97	-0,91
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-97,27	0,00	-0,79	-1,31	-1,21	0,93	0,56	0,75	-1,21
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-97,27	0,00	-0,71	-1,18	-1,09	0,84	0,50	0,68	-1,09
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-97,27	0,00	-0,78	-1,30	-1,20	0,93	0,55	0,74	-1,20
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-97,27	0,00	-0,77	-1,29	-1,19	0,92	0,54	0,74	-1,19
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-97,27	0,00	-0,77	-1,29	-1,19	0,92	0,55	0,74	-1,19
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-97,27	0,00	-0,79	-1,33	-1,22	0,94	0,56	0,76	-1,22
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-97,27	0,00	-1,17	-1,23	-1,38	0,98	0,82	0,53	-1,38
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-97,27	0,00	-1,18	-1,25	-1,40	0,99	0,84	0,54	-1,40
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-97,27	0,00	-1,12	-1,18	-1,33	0,94	0,79	0,51	-1,33
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-97,27	0,00	-1,09	-1,15	-1,30	0,92	0,77	0,50	-1,30
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-97,27	0,00	-1,12	-1,18	-1,33	0,94	0,79	0,51	-1,33
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-97,27	0,00	-1,16	-1,22	-1,37	0,97	0,82	0,52	-1,37
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-106,28	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-106,28	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-106,28	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-106,28	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-106,28	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-106,28	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-106,28	0,00	-0,06	-1,14	-0,69	0,91	0,04	0,91	-0,69
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-106,28	0,00	-0,06	-1,16	-0,70	0,93	0,04	0,92	-0,70
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-106,28	0,00	-0,05	-1,11	-0,68	0,89	0,04	0,89	-0,68
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-106,28	0,00	-0,05	-1,08	-0,65	0,86	0,04	0,86	-0,65
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-106,28	0,00	-0,05	-1,13	-0,68	0,90	0,04	0,90	-0,68
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-106,28	0,00	-0,06	-1,18	-0,72	0,94	0,04	0,94	-0,72
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-106,28	0,00	-0,25	-1,26	-0,88	0,95	0,18	0,93	-0,88
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-106,28	0,00	-0,26	-1,32	-0,91	0,99	0,19	0,97	-0,91
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-106,28	0,00	-0,25	-1,25	-0,86	0,93	0,18	0,92	-0,86
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-106,28	0,00	-0,25	-1,23	-0,85	0,92	0,17	0,91	-0,85
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-106,28	0,00	-0,25	-1,25	-0,86	0,93	0,18	0,92	-0,86
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-106,28	0,00	-0,26	-1,32	-0,91	0,99	0,19	0,97	-0,91
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-106,28	0,00	-0,51	-1,29	-1,04	0,92	0,36	0,84	-1,04
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-106,28	0,00	-0,50	-1,26	-1,02	0,90	0,36	0,82	-1,02

Fortsetzung Tabelle B.5: Versuchswerte von Curbach & Speck [17]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-106,28	0,00	-0,50	-1,25	-1,01	0,89	0,35	0,81	-1,01
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-106,28	0,00	-0,57	-1,42	-1,15	1,01	0,40	0,93	-1,15
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-106,28	0,00	-0,55	-1,36	-1,10	0,97	0,39	0,89	-1,10
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-106,28	0,00	-0,53	-1,32	-1,07	0,94	0,37	0,86	-1,07
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-106,28	0,00	-0,78	-1,31	-1,21	0,93	0,55	0,75	-1,21
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-106,28	0,00	-0,76	-1,27	-1,17	0,90	0,54	0,72	-1,17
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-106,28	0,00	-0,83	-1,38	-1,27	0,98	0,58	0,79	-1,27
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-106,28	0,00	-0,78	-1,31	-1,21	0,93	0,55	0,75	-1,21
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-106,28	0,00	-0,80	-1,34	-1,24	0,95	0,57	0,77	-1,24
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-106,28	0,00	-0,83	-1,38	-1,28	0,98	0,59	0,79	-1,28
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-106,28	0,00	-1,03	-1,29	-1,34	0,96	0,73	0,63	-1,34
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-106,28	0,00	-0,99	-1,24	-1,29	0,93	0,70	0,61	-1,29
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-106,28	0,00	-1,02	-1,28	-1,33	0,96	0,72	0,63	-1,33
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-106,28	0,00	-0,97	-1,22	-1,27	0,91	0,69	0,60	-1,27
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-106,28	0,00	-1,02	-1,27	-1,32	0,95	0,72	0,62	-1,32
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-106,28	0,00	-0,99	-1,24	-1,29	0,93	0,70	0,61	-1,29
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,19	-1,25	-1,41	0,99	0,84	0,54	-1,41
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,12	-1,18	-1,33	0,94	0,79	0,51	-1,33
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,19	-1,26	-1,41	1,00	0,84	0,54	-1,41
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,12	-1,18	-1,33	0,94	0,79	0,51	-1,33
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,12	-1,18	-1,33	0,94	0,79	0,50	-1,33
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,20	-1,26	-1,42	1,00	0,85	0,54	-1,42
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,13	-1,19	-1,34	0,95	0,80	0,51	-1,34
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,10	-1,16	-1,30	0,92	0,77	0,50	-1,30
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,11	-1,17	-1,31	0,93	0,78	0,50	-1,31
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,22	-1,28	-1,45	1,02	0,86	0,55	-1,45
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,08	-1,13	-1,28	0,90	0,76	0,49	-1,28
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-106,28	0,00	-1,20	-1,26	-1,42	1,01	0,85	0,54	-1,42
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-102,25	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-102,25	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-102,25	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-102,25	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-102,25	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-102,25	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-102,25	0,00	-0,26	-1,28	-0,89	0,96	0,18	0,94	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-102,25	0,00	-0,25	-1,25	-0,87	0,93	0,18	0,92	-0,87
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-102,25	0,00	-0,27	-1,36	-0,94	1,02	0,19	1,00	-0,94
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-102,25	0,00	-0,28	-1,42	-0,98	1,06	0,20	1,04	-0,98
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-102,25	0,00	-0,27	-1,37	-0,95	1,02	0,19	1,01	-0,95
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-102,25	0,00	-0,25	-1,25	-0,87	0,94	0,18	0,92	-0,87
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-102,25	0,00	-0,79	-1,32	-1,22	0,94	0,56	0,75	-1,22
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-102,25	0,00	-0,84	-1,40	-1,29	1,00	0,59	0,80	-1,29
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-102,25	0,00	-0,85	-1,42	-1,31	1,01	0,60	0,81	-1,31
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-102,25	0,00	-0,85	-1,41	-1,30	1,00	0,60	0,81	-1,30
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-102,25	0,00	-0,86	-1,44	-1,33	1,02	0,61	0,82	-1,33
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-102,25	0,00	-0,79	-1,31	-1,21	0,93	0,56	0,75	-1,21
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-102,25	0,00	-1,11	-1,17	-1,32	0,93	0,79	0,50	-1,32
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-102,25	0,00	-1,16	-1,22	-1,37	0,97	0,82	0,52	-1,37
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-102,25	0,00	-1,17	-1,23	-1,39	0,98	0,83	0,53	-1,39
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-102,25	0,00	-1,13	-1,19	-1,34	0,95	0,80	0,51	-1,34
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-102,25	0,00	-1,25	-1,31	-1,48	1,05	0,88	0,56	-1,48
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-102,25	0,00	-1,18	-1,24	-1,39	0,99	0,83	0,53	-1,39
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,90	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,90	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,90	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,90	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,90	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,90	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-72,90	-0,07	-0,07	-1,37	-0,87	1,06	0,00	1,06	-0,87
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-72,90	-0,07	-0,07	-1,39	-0,88	1,08	0,00	1,08	-0,88
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-72,90	-0,07	-0,07	-1,39	-0,88	1,08	0,00	1,08	-0,88
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-72,90	-0,07	-0,07	-1,36	-0,86	1,05	0,00	1,05	-0,86
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-72,90	-0,07	-0,07	-1,39	-0,88	1,08	0,00	1,08	-0,88
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-72,90	-0,07	-0,07	-1,40	-0,89	1,08	0,00	1,08	-0,89
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,90	-0,08	-0,31	-1,57	-1,13	1,14	0,17	1,13	-1,13
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,90	-0,08	-0,33	-1,65	-1,19	1,19	0,17	1,18	-1,19
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,90	-0,08	-0,34	-1,68	-1,22	1,22	0,18	1,20	-1,22
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,90	-0,08	-0,34	-1,68	-1,21	1,21	0,18	1,20	-1,21
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,90	-0,09	-0,34	-1,72	-1,24	1,24	0,18	1,23	-1,24
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,90	-0,09	-0,34	-1,69	-1,22	1,22	0,18	1,21	-1,22
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,90	-0,09	-1,10	-1,83	-1,74	1,23	0,71	1,01	-1,74
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,90	-0,09	-1,03	-1,72	-1,64	1,16	0,67	0,95	-1,64
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,90	-0,09	-1,08	-1,79	-1,71	1,21	0,70	0,99	-1,71
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,90	-0,08	-1,00	-1,67	-1,59	1,13	0,65	0,92	-1,59
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,90	-0,09	-1,13	-1,89	-1,80	1,27	0,73	1,04	-1,80
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,90	-0,09	-1,12	-1,87	-1,78	1,26	0,73	1,03	-1,78
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,90	-0,08	-1,44	-1,52	-1,76	1,15	0,97	0,62	-1,76
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,90	-0,08	-1,46	-1,54	-1,78	1,17	0,98	0,63	-1,78
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,90	-0,08	-1,46	-1,54	-1,78	1,16	0,98	0,63	-1,78
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,90	-0,08	-1,53	-1,61	-1,86	1,22	1,02	0,66	-1,86
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,90	-0,08	-1,49	-1,57	-1,81	1,19	1,00	0,64	-1,81
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,90	-0,08	-1,50	-1,58	-1,82	1,20	1,01	0,65	-1,82
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-84,95	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-84,95	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-84,95	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56

Fortsetzung Tabelle B.5: Versuchswerte von Curbach & Speck [17]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-84,95	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-84,95	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-84,95	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-84,95	-0,07	-0,07	-1,44	-0,92	1,12	0,00	1,12	-0,92
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-84,95	-0,08	-0,08	-1,51	-0,96	1,17	0,00	1,17	-0,96
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-84,95	-0,07	-0,07	-1,44	-0,92	1,12	0,00	1,12	-0,92
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-84,95	-0,07	-0,08	-1,54	-0,98	1,20	0,00	1,20	-0,98
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-84,95	-0,08	-0,08	-1,56	-0,99	1,21	0,00	1,21	-0,99
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-84,95	-0,08	-0,08	-1,57	-1,00	1,22	0,00	1,22	-1,00
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-84,95	-0,09	-0,37	-1,84	-1,33	1,33	0,20	1,32	-1,33
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-84,95	-0,09	-0,38	-1,88	-1,36	1,36	0,20	1,34	-1,36
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-84,95	-0,09	-0,35	-1,78	-1,28	1,28	0,19	1,27	-1,28
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-84,95	-0,09	-0,37	-1,87	-1,35	1,35	0,20	1,34	-1,35
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-84,95	-0,09	-0,38	-1,90	-1,37	1,37	0,20	1,36	-1,37
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-84,95	-0,09	-0,41	-2,04	-1,47	1,48	0,22	1,46	-1,47
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-84,95	-0,10	-1,19	-1,98	-1,89	1,34	0,77	1,09	-1,89
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-84,95	-0,09	-1,12	-1,87	-1,78	1,26	0,73	1,03	-1,78
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-84,95	-0,09	-1,12	-1,86	-1,78	1,26	0,72	1,03	-1,78
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-84,95	-0,10	-1,23	-2,04	-1,95	1,38	0,80	1,13	-1,95
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-84,95	-0,09	-1,14	-1,90	-1,81	1,28	0,74	1,05	-1,81
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-84,95	-0,10	-1,19	-1,99	-1,89	1,34	0,77	1,10	-1,89
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-84,95	-0,08	-1,51	-1,58	-1,83	1,20	1,01	0,65	-1,83
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-84,95	-0,09	-1,72	-1,81	-2,09	1,37	1,15	0,74	-2,09
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-84,95	-0,09	-1,63	-1,72	-1,98	1,30	1,09	0,70	-1,98
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-84,95	-0,09	-1,63	-1,71	-1,98	1,29	1,09	0,70	-1,98
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-84,95	-0,08	-1,56	-1,64	-1,89	1,24	1,04	0,67	-1,89
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-84,95	-0,09	-1,65	-1,74	-2,01	1,31	1,11	0,71	-2,01
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-91,05	0,00	0,00	-0,95	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-91,05	0,00	0,00	-1,03	-0,60	0,84	0,00	0,84	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-91,05	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-91,05	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-91,05	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-91,05	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-91,05	-0,08	-0,08	-1,58	-1,00	1,22	0,00	1,22	-1,00
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-91,05	-0,08	-0,08	-1,67	-1,06	1,30	0,00	1,30	-1,06
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-91,05	-0,08	-0,08	-1,62	-1,03	1,25	0,00	1,25	-1,03
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-91,05	-0,08	-0,08	-1,68	-1,07	1,30	0,00	1,30	-1,07
DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	-91,05	-0,08	-0,08	-1,59	-1,01	1,23	0,00	1,23	-1,01
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-91,05	-0,10	-0,39	-1,97	-1,42	1,42	0,21	1,41	-1,42
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-91,05	-0,10	-0,40	-2,03	-1,46	1,46	0,21	1,45	-1,46
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-91,05	-0,09	-0,37	-1,85	-1,34	1,34	0,20	1,33	-1,34
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-91,05	-0,10	-0,38	-1,90	-1,37	1,37	0,20	1,36	-1,37
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-91,05	-0,09	-0,36	-1,83	-1,32	1,32	0,19	1,31	-1,32
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-91,05	-0,10	-0,40	-1,98	-1,43	1,43	0,21	1,42	-1,43
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-91,05	-0,10	-1,21	-2,01	-1,92	1,36	0,78	1,11	-1,92
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-91,05	-0,10	-1,22	-2,04	-1,94	1,37	0,79	1,12	-1,94
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-91,05	-0,10	-1,19	-1,99	-1,89	1,34	0,77	1,09	-1,89
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-91,05	-0,09	-1,14	-1,91	-1,81	1,29	0,74	1,05	-1,81
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-91,05	-0,10	-1,18	-1,98	-1,88	1,33	0,77	1,09	-1,88
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-91,05	-0,10	-1,25	-2,09	-1,99	1,41	0,81	1,15	-1,99
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-91,05	-0,09	-1,70	-1,79	-2,07	1,35	1,14	0,73	-2,07
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-91,05	-0,09	-1,66	-1,75	-2,02	1,32	1,11	0,71	-2,02
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-91,05	-0,08	-1,61	-1,70	-1,96	1,28	1,08	0,69	-1,96
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-91,05	-0,08	-1,58	-1,67	-1,92	1,26	1,06	0,68	-1,92
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-91,05	-0,08	-1,55	-1,63	-1,89	1,24	1,04	0,67	-1,89
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-91,05	-0,09	-1,72	-1,82	-2,10	1,37	1,16	0,74	-2,10

Curbach & Speck [18, 118]

- Probekörper: Würfel 10 cm × 10 cm × 10 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.6: Versuchswerte von Curbach & Speck [18, 118]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-151,02	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-151,02	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-151,02	0,00	0,00	-1,07	-0,62	0,87	0,00	0,87	-0,62
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-151,02	0,00	0,00	-1,07	-0,62	0,87	0,00	0,87	-0,62
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-151,02	0,00	0,00	-0,90	-0,52	0,74	0,00	0,74	-0,52
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-151,02	0,00	0,00	-0,92	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-151,02	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-151,02	0,00	0,00	-1,05	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-151,02	0,00	-0,06	-1,12	-0,68	0,89	0,04	0,89	-0,68
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-151,02	0,00	-0,06	-1,14	-0,69	0,91	0,04	0,91	-0,69
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-151,02	0,00	-0,06	-1,17	-0,71	0,93	0,04	0,93	-0,71
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-151,02	0,00	-0,06	-1,19	-0,72	0,95	0,04	0,95	-0,72
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-151,02	0,00	-0,24	-1,20	-0,83	0,90	0,17	0,88	-0,83
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-151,02	0,00	-0,26	-1,28	-0,89	0,96	0,18	0,94	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-151,02	0,00	-0,26	-1,28	-0,89	0,96	0,18	0,94	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-151,02	0,00	-0,25	-1,27	-0,88	0,95	0,18	0,93	-0,88
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-151,02	0,00	-0,24	-1,19	-0,82	0,89	0,17	0,87	-0,82
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-151,02	0,00	-0,24	-1,21	-0,84	0,91	0,17	0,89	-0,84
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-151,02	0,00	-0,24	-1,18	-0,82	0,89	0,17	0,87	-0,82
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-151,02	0,00	-0,51	-1,27	-1,02	0,90	0,36	0,83	-1,02
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-151,02	0,00	-0,49	-1,22	-0,99	0,87	0,35	0,80	-0,99
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-151,02	0,00	-0,49	-1,22	-0,98	0,87	0,34	0,79	-0,98
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-151,02	0,00	-0,50	-1,25	-1,01	0,89	0,35	0,82	-1,01
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-151,02	0,00	-0,76	-1,27	-1,18	0,91	0,54	0,73	-1,18
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-151,02	0,00	-0,72	-1,20	-1,11	0,85	0,51	0,68	-1,11
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-151,02	0,00	-0,76	-1,27	-1,17	0,90	0,54	0,73	-1,17
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-151,02	0,00	-0,74	-1,23	-1,14	0,88	0,52	0,70	-1,14
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-151,02	0,00	-0,93	-1,17	-1,21	0,87	0,66	0,57	-1,21
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-151,02	0,00	-0,97	-1,22	-1,26	0,91	0,69	0,60	-1,26
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-151,02	0,00	-0,96	-1,20	-1,25	0,90	0,68	0,59	-1,25
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-151,02	0,00	-0,98	-1,23	-1,28	0,92	0,69	0,60	-1,28
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-151,02	0,00	-1,12	-1,12	-1,30	0,92	0,79	0,46	-1,30
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-151,02	0,00	-1,20	-1,20	-1,39	0,98	0,85	0,49	-1,39
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-151,02	0,00	-1,20	-1,20	-1,39	0,98	0,85	0,49	-1,39
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-151,02	0,00	-1,13	-1,13	-1,30	0,92	0,80	0,46	-1,30
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-151,02	0,00	-1,07	-1,07	-1,24	0,87	0,76	0,44	-1,24
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-151,02	0,00	-1,05	-1,05	-1,21	0,85	0,74	0,43	-1,21
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-151,02	0,00	-1,16	-1,16	-1,34	0,94	0,82	0,47	-1,34
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-151,02	0,00	-1,13	-1,13	-1,31	0,92	0,80	0,46	-1,31
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-151,02	0,00	-1,18	-1,18	-1,36	0,96	0,83	0,48	-1,36
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-168,20	0,00	0,00	-0,95	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-168,20	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-168,20	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-168,20	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-168,20	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-168,20	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
DD	0,000	-0,158	-1,000	51,5	-168,20	0,00	-0,18	-1,14	-0,76	0,86	0,13	0,85	-0,76
DD	0,000	-0,158	-1,000	51,5	-168,20	0,00	-0,18	-1,14	-0,76	0,87	0,13	0,86	-0,76
DD	0,000	-0,158	-1,000	51,5	-168,20	0,00	-0,19	-1,22	-0,82	0,93	0,14	0,92	-0,82
DD	0,000	-0,325	-1,000	41,4	-168,20	0,00	-0,38	-1,16	-0,89	0,83	0,27	0,79	-0,89
DD	0,000	-0,325	-1,000	41,4	-168,20	0,00	-0,39	-1,19	-0,91	0,86	0,27	0,82	-0,91
DD	0,000	-0,325	-1,000	41,4	-168,20	0,00	-0,41	-1,26	-0,96	0,91	0,29	0,86	-0,96
DD	0,000	-0,510	-1,000	29,3	-168,20	0,00	-0,62	-1,22	-1,06	0,86	0,44	0,74	-1,06
DD	0,000	-0,510	-1,000	29,3	-168,20	0,00	-0,62	-1,21	-1,06	0,86	0,44	0,74	-1,06
DD	0,000	-0,510	-1,000	29,3	-168,20	0,00	-0,66	-1,29	-1,12	0,91	0,46	0,78	-1,12
DD	0,000	-0,727	-1,000	15,3	-168,20	0,00	-0,85	-1,17	-1,17	0,86	0,60	0,61	-1,17
DD	0,000	-0,727	-1,000	15,3	-168,20	0,00	-0,81	-1,12	-1,12	0,82	0,57	0,58	-1,12
DD	0,000	-0,727	-1,000	15,3	-168,20	0,00	-0,85	-1,17	-1,17	0,86	0,60	0,61	-1,17
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-168,20	0,00	-1,09	-1,09	-1,26	0,89	0,77	0,45	-1,26
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-168,20	0,00	-1,04	-1,04	-1,20	0,85	0,74	0,42	-1,20
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-168,20	0,00	-1,09	-1,09	-1,26	0,89	0,77	0,45	-1,26
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-168,20	0,00	-1,09	-1,09	-1,26	0,89	0,77	0,44	-1,26
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-168,20	0,00	-1,05	-1,05	-1,21	0,86	0,74	0,43	-1,21
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-168,20	0,00	-1,11	-1,11	-1,28	0,90	0,78	0,45	-1,28
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-179,50	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-179,50	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-179,50	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-179,50	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-179,50	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-179,50	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
DD	0,000	-0,268	-1,000	45,0	-179,50	0,00	-0,30	-1,13	-0,83	0,83	0,21	0,80	-0,83
DD	0,000	-0,268	-1,000	45,0	-179,50	0,00	-0,31	-1,15	-0,84	0,84	0,22	0,81	-0,84
DD	0,000	-0,268	-1,000	45,0	-179,50	0,00	-0,31	-1,15	-0,84	0,84	0,22	0,81	-0,84
DD	0,000	-0,577	-1,000	24,9	-179,50	0,00	-0,63	-1,10	-1,00	0,78	0,45	0,64	-1,00

Fortsetzung Tabelle B.6: Versuchswerte von Curbach & Speck [18, 118]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,577	-1,000	24,9	-179,50	0,00	-0,68	-1,17	-1,07	0,83	0,48	0,68	-1,07
DD	0,000	-0,577	-1,000	24,9	-179,50	0,00	-0,66	-1,15	-1,05	0,82	0,47	0,67	-1,05
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-179,50	0,00	-1,00	-1,00	-1,16	0,82	0,71	0,41	-1,16
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-179,50	0,00	-0,99	-0,99	-1,14	0,81	0,70	0,40	-1,14
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-179,50	0,00	-1,02	-1,02	-1,18	0,84	0,72	0,42	-1,18
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-179,50	0,00	-0,99	-0,99	-1,15	0,81	0,70	0,41	-1,15
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-179,50	0,00	-0,94	-0,94	-1,09	0,77	0,67	0,39	-1,09
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-179,50	0,00	-0,99	-0,99	-1,14	0,81	0,70	0,40	-1,14
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-171,60	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-171,60	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-171,60	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-171,60	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-171,60	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-171,60	0,00	0,00	-1,06	-0,61	0,86	0,00	0,86	-0,61
DD	0,000	-0,268	-1,000	45,0	-171,60	0,00	-0,26	-0,95	-0,70	0,70	0,18	0,67	-0,70
DD	0,000	-0,268	-1,000	45,0	-171,60	0,00	-0,30	-1,12	-0,82	0,82	0,21	0,79	-0,82
DD	0,000	-0,268	-1,000	45,0	-171,60	0,00	-0,26	-0,97	-0,71	0,71	0,18	0,69	-0,71
DD	0,000	-0,577	-1,000	24,9	-171,60	0,00	-0,61	-1,05	-0,96	0,75	0,43	0,61	-0,96
DD	0,000	-0,577	-1,000	24,9	-171,60	0,00	-0,66	-1,14	-1,04	0,81	0,47	0,66	-1,04
DD	0,000	-0,577	-1,000	24,9	-171,60	0,00	-0,62	-1,08	-0,98	0,77	0,44	0,63	-0,98
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-171,60	0,00	-0,96	-0,96	-1,11	0,78	0,68	0,39	-1,11
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-171,60	0,00	-1,00	-1,00	-1,16	0,82	0,71	0,41	-1,16
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-171,60	0,00	-0,91	-0,91	-1,06	0,75	0,65	0,37	-1,06
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-171,60	0,00	-0,96	-0,96	-1,11	0,79	0,68	0,39	-1,11
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-171,60	0,00	-1,08	-1,08	-1,25	0,88	0,76	0,44	-1,25
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-171,60	0,00	-1,02	-1,02	-1,17	0,83	0,72	0,41	-1,17

Dahl [19]

- Probekörper: Zylinder 10 cm × 20 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.7: Versuchswerte von Dahl [19]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,109	-0,109	-1,000	60,0	-9,79	-0,24	-0,24	-2,22	-1,56	1,62	0,00	1,62	-1,56
DDD	-0,129	-0,129	-1,000	60,0	-9,79	-0,37	-0,37	-2,90	-2,10	2,06	0,00	2,06	-2,10
DDD	-0,165	-0,165	-1,000	60,0	-9,79	-0,70	-0,70	-4,22	-3,24	2,88	0,00	2,88	-3,24
DDD	-0,164	-0,164	-1,000	60,0	-9,79	-0,75	-0,75	-4,56	-3,49	3,11	0,00	3,11	-3,49
DDD	-0,174	-0,174	-1,000	60,0	-9,79	-0,79	-0,79	-4,57	-3,55	3,08	0,00	3,08	-3,55
DDD	-0,181	-0,181	-1,000	60,0	-9,79	-1,01	-1,01	-5,58	-4,39	3,73	0,00	3,73	-4,39
DDD	-0,200	-0,200	-1,000	60,0	-9,79	-1,27	-1,27	-6,38	-5,15	4,17	0,00	4,17	-5,15
DDD	-0,196	-0,196	-1,000	60,0	-9,79	-1,48	-1,48	-7,52	-6,04	4,93	0,00	4,93	-6,04
DDD	-0,212	-0,212	-1,000	60,0	-9,79	-1,64	-1,64	-7,73	-6,35	4,97	0,00	4,97	-6,35
DDD	-0,207	-0,207	-1,000	60,0	-9,79	-1,85	-1,85	-8,92	-7,28	5,78	0,00	5,78	-7,28
DDD	-0,213	-0,213	-1,000	60,0	-9,79	-2,04	-2,04	-9,55	-7,87	6,14	0,00	6,14	-7,87
DDD	-0,218	-0,218	-1,000	60,0	-9,79	-2,54	-2,54	-11,66	-9,67	7,45	0,00	7,45	-9,67
DDD	-0,230	-0,230	-1,000	60,0	-9,79	-3,02	-3,02	-13,16	-11,09	8,28	0,00	8,28	-11,09
DDD	-0,240	-0,240	-1,000	60,0	-9,79	-3,53	-3,53	-14,71	-12,57	9,13	0,00	9,13	-12,57
DDD	-0,240	-0,240	-1,000	60,0	-9,79	-4,05	-4,05	-16,88	-14,42	10,47	0,00	10,47	-14,42
DDD	-0,247	-0,247	-1,000	60,0	-9,79	-5,02	-5,02	-20,34	-17,54	12,51	0,00	12,51	-17,54
DDD	-0,258	-0,258	-1,000	60,0	-9,79	-6,02	-6,02	-23,38	-20,45	14,17	0,00	14,17	-20,45
DDD	-0,261	-0,261	-1,000	60,0	-9,79	-8,04	-8,04	-30,78	-27,05	18,57	0,00	18,57	-27,05
DDD	-0,260	-0,260	-1,000	60,0	-9,79	-10,16	-10,16	-39,13	-34,33	23,66	0,00	23,66	-34,33
DDD	-0,273	-0,273	-1,000	60,0	-9,79	-13,85	-13,85	-50,66	-45,25	30,05	0,00	30,05	-45,25
DDD	-0,127	-0,127	-1,000	60,0	-14,55	-0,32	-0,32	-2,51	-1,82	1,79	0,00	1,79	-1,82
DDD	-0,141	-0,141	-1,000	60,0	-14,55	-0,43	-0,43	-3,02	-2,24	2,12	0,00	2,12	-2,24
DDD	-0,162	-0,162	-1,000	60,0	-14,55	-0,62	-0,62	-3,83	-2,93	2,62	0,00	2,62	-2,93
DDD	-0,176	-0,176	-1,000	60,0	-14,55	-0,80	-0,80	-4,56	-3,56	3,07	0,00	3,07	-3,56
DDD	-0,191	-0,191	-1,000	60,0	-14,55	-1,03	-1,03	-5,37	-4,28	3,54	0,00	3,54	-4,28
DDD	-0,200	-0,200	-1,000	60,0	-14,55	-1,22	-1,22	-6,09	-4,92	3,98	0,00	3,98	-4,92
DDD	-0,207	-0,207	-1,000	60,0	-14,55	-1,44	-1,44	-6,96	-5,68	4,51	0,00	4,51	-5,68
DDD	-0,214	-0,214	-1,000	60,0	-14,55	-1,62	-1,62	-7,57	-6,24	4,86	0,00	4,86	-6,24
DDD	-0,217	-0,217	-1,000	60,0	-14,55	-1,82	-1,82	-8,38	-6,95	5,36	0,00	5,36	-6,95
DDD	-0,219	-0,219	-1,000	60,0	-14,55	-2,03	-2,03	-9,29	-7,71	5,93	0,00	5,93	-7,71
DDD	-0,238	-0,238	-1,000	60,0	-14,55	-3,02	-3,02	-12,69	-10,81	7,89	0,00	7,89	-10,81
DDD	-0,251	-0,251	-1,000	60,0	-14,55	-4,02	-4,02	-16,01	-13,88	9,79	0,00	9,79	-13,88
DDD	-0,251	-0,251	-1,000	60,0	-14,55	-5,02	-5,02	-20,02	-17,36	12,25	0,00	12,25	-17,36

Fortsetzung Tabelle B.7: Versuchswerte von Dahl [19]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,258	-0,258	-1,000	60,0	-14,55	-6,01	-6,01	-23,34	-20,42	14,15	0,00	14,15	-20,42
DDD	-0,266	-0,266	-1,000	60,0	-14,55	-8,04	-8,04	-30,27	-26,76	18,15	0,00	18,15	-26,76
DDD	-0,267	-0,267	-1,000	60,0	-14,55	-9,66	-9,66	-36,18	-32,05	21,66	0,00	21,66	-32,05
DDD	-0,105	-0,105	-1,000	60,0	-17,08	-0,24	-0,24	-2,26	-1,58	1,65	0,00	1,65	-1,58
DDD	-0,137	-0,137	-1,000	60,0	-17,08	-0,42	-0,42	-3,10	-2,28	2,18	0,00	2,18	-2,28
DDD	-0,157	-0,157	-1,000	60,0	-17,08	-0,62	-0,62	-3,98	-3,02	2,74	0,00	2,74	-3,02
DDD	-0,171	-0,171	-1,000	60,0	-17,08	-0,83	-0,83	-4,87	-3,77	3,29	0,00	3,29	-3,77
DDD	-0,192	-0,192	-1,000	60,0	-17,08	-1,03	-1,03	-5,33	-4,27	3,52	0,00	3,52	-4,27
DDD	-0,198	-0,198	-1,000	60,0	-17,08	-1,23	-1,23	-6,20	-4,99	4,06	0,00	4,06	-4,99
DDD	-0,201	-0,201	-1,000	60,0	-17,08	-1,42	-1,42	-7,03	-5,70	4,59	0,00	4,59	-5,70
DDD	-0,211	-0,211	-1,000	60,0	-17,08	-1,64	-1,64	-7,76	-6,38	5,00	0,00	5,00	-6,38
DDD	-0,217	-0,217	-1,000	60,0	-17,08	-1,80	-1,80	-8,29	-6,87	5,30	0,00	5,30	-6,87
DDD	-0,223	-0,223	-1,000	60,0	-17,08	-2,00	-2,00	-8,97	-7,49	5,69	0,00	5,69	-7,49
DDD	-0,239	-0,239	-1,000	60,0	-17,08	-3,01	-3,01	-12,62	-10,77	7,84	0,00	7,84	-10,77
DDD	-0,248	-0,248	-1,000	60,0	-17,08	-4,04	-4,04	-16,30	-14,08	10,01	0,00	10,01	-14,08
DDD	-0,254	-0,254	-1,000	60,0	-17,08	-5,02	-5,02	-19,77	-17,22	12,04	0,00	12,04	-17,22
DDD	-0,261	-0,261	-1,000	60,0	-17,08	-6,07	-6,07	-23,25	-20,43	14,03	0,00	14,03	-20,43
DDD	-0,268	-0,268	-1,000	60,0	-17,08	-8,09	-8,09	-30,22	-26,79	18,08	0,00	18,08	-26,79
DDD	-0,113	-0,113	-1,000	60,0	-37,39	-0,23	-0,23	-2,00	-1,42	1,45	0,00	1,45	-1,42
DDD	-0,151	-0,151	-1,000	60,0	-37,39	-0,42	-0,42	-2,80	-2,11	1,94	0,00	1,94	-2,11
DDD	-0,178	-0,178	-1,000	60,0	-37,39	-0,62	-0,62	-3,45	-2,70	2,32	0,00	2,32	-2,70
DDD	-0,198	-0,198	-1,000	60,0	-37,39	-0,80	-0,80	-4,07	-3,28	2,66	0,00	2,66	-3,28
DDD	-0,209	-0,209	-1,000	60,0	-37,39	-1,01	-1,01	-4,85	-3,97	3,13	0,00	3,13	-3,97
DDD	-0,220	-0,220	-1,000	60,0	-37,39	-1,20	-1,20	-5,46	-4,54	3,47	0,00	3,47	-4,54
DDD	-0,230	-0,230	-1,000	60,0	-37,39	-1,40	-1,40	-6,09	-5,14	3,83	0,00	3,83	-5,14
DDD	-0,236	-0,236	-1,000	60,0	-37,39	-1,60	-1,60	-6,79	-5,76	4,24	0,00	4,24	-5,76
DDD	-0,245	-0,245	-1,000	60,0	-37,39	-1,81	-1,81	-7,37	-6,34	4,54	0,00	4,54	-6,34
DDD	-0,246	-0,246	-1,000	60,0	-37,39	-2,00	-2,00	-8,13	-7,01	5,01	0,00	5,01	-7,01
DDD	-0,262	-0,262	-1,000	60,0	-37,39	-2,50	-2,50	-9,54	-8,40	5,75	0,00	5,75	-8,40
DDD	-0,112	-0,112	-1,000	60,0	-42,95	-0,21	-0,21	-1,90	-1,35	1,38	0,00	1,38	-1,35
DDD	-0,157	-0,157	-1,000	60,0	-42,95	-0,42	-0,42	-2,68	-2,03	1,84	0,00	1,84	-2,03
DDD	-0,181	-0,181	-1,000	60,0	-42,95	-0,62	-0,62	-3,40	-2,67	2,27	0,00	2,27	-2,67
DDD	-0,199	-0,199	-1,000	60,0	-42,95	-0,81	-0,81	-4,08	-3,29	2,67	0,00	2,67	-3,29
DDD	-0,218	-0,218	-1,000	60,0	-42,95	-1,01	-1,01	-4,63	-3,84	2,96	0,00	2,96	-3,84
DDD	-0,227	-0,227	-1,000	60,0	-42,95	-1,20	-1,20	-5,30	-4,45	3,35	0,00	3,35	-4,45
DDD	-0,237	-0,237	-1,000	60,0	-42,95	-1,40	-1,40	-5,91	-5,03	3,68	0,00	3,68	-5,03
DDD	-0,245	-0,245	-1,000	60,0	-42,95	-1,60	-1,60	-6,54	-5,62	4,03	0,00	4,03	-5,62
DDD	-0,251	-0,251	-1,000	60,0	-42,95	-1,81	-1,81	-7,20	-6,24	4,41	0,00	4,41	-6,24
DDD	-0,257	-0,257	-1,000	60,0	-42,95	-2,00	-2,00	-7,78	-6,80	4,72	0,00	4,72	-6,80
DDD	-0,267	-0,267	-1,000	60,0	-42,95	-2,50	-2,50	-9,38	-8,31	5,62	0,00	5,62	-8,31
DDD	-0,301	-0,301	-1,000	60,0	-42,95	-3,00	-3,00	-9,98	-9,23	5,70	0,00	5,70	-9,23
DDD	-0,109	-0,109	-1,000	60,0	-40,41	-0,21	-0,21	-1,93	-1,35	1,40	0,00	1,40	-1,35
DDD	-0,151	-0,151	-1,000	60,0	-40,41	-0,41	-0,41	-2,70	-2,03	1,87	0,00	1,87	-2,03
DDD	-0,181	-0,181	-1,000	60,0	-40,41	-0,60	-0,60	-3,32	-2,61	2,22	0,00	2,22	-2,61
DDD	-0,200	-0,200	-1,000	60,0	-40,41	-0,81	-0,81	-4,04	-3,26	2,64	0,00	2,64	-3,26
DDD	-0,211	-0,211	-1,000	60,0	-40,41	-1,01	-1,01	-4,78	-3,92	3,07	0,00	3,07	-3,92
DDD	-0,225	-0,225	-1,000	60,0	-40,41	-1,20	-1,20	-5,35	-4,48	3,39	0,00	3,39	-4,48
DDD	-0,234	-0,234	-1,000	60,0	-40,41	-1,41	-1,41	-6,01	-5,10	3,76	0,00	3,76	-5,10
DDD	-0,243	-0,243	-1,000	60,0	-40,41	-1,60	-1,60	-6,61	-5,67	4,09	0,00	4,09	-5,67
DDD	-0,247	-0,247	-1,000	60,0	-40,41	-1,81	-1,81	-7,31	-6,31	4,49	0,00	4,49	-6,31
DDD	-0,260	-0,260	-1,000	60,0	-40,41	-2,00	-2,00	-7,72	-6,77	4,66	0,00	4,66	-6,77
DDD	-0,255	-0,255	-1,000	60,0	-40,41	-2,50	-2,50	-9,80	-8,55	5,96	0,00	5,96	-8,55
DDD	-0,103	-0,103	-1,000	60,0	-42,11	-0,20	-0,20	-1,95	-1,36	1,42	0,00	1,42	-1,36
DDD	-0,156	-0,156	-1,000	60,0	-42,11	-0,42	-0,42	-2,69	-2,03	1,85	0,00	1,85	-2,03
DDD	-0,180	-0,180	-1,000	60,0	-42,11	-0,63	-0,63	-3,48	-2,73	2,33	0,00	2,33	-2,73
DDD	-0,204	-0,204	-1,000	60,0	-42,11	-0,81	-0,81	-3,98	-3,23	2,58	0,00	2,58	-3,23
DDD	-0,214	-0,214	-1,000	60,0	-42,11	-1,00	-1,00	-4,68	-3,85	3,00	0,00	3,00	-3,85
DDD	-0,225	-0,225	-1,000	60,0	-42,11	-1,21	-1,21	-5,37	-4,50	3,40	0,00	3,40	-4,50
DDD	-0,235	-0,235	-1,000	60,0	-42,11	-1,42	-1,42	-6,03	-5,12	3,76	0,00	3,76	-5,12
DDD	-0,244	-0,244	-1,000	60,0	-42,11	-1,62	-1,62	-6,62	-5,69	4,08	0,00	4,08	-5,69
DDD	-0,247	-0,247	-1,000	60,0	-42,11	-1,82	-1,82	-7,36	-6,35	4,52	0,00	4,52	-6,35
DDD	-0,249	-0,249	-1,000	60,0	-42,11	-2,00	-2,00	-8,04	-6,96	4,93	0,00	4,93	-6,96
DDD	-0,108	-0,108	-1,000	60,0	-52,17	-0,21	-0,21	-1,93	-1,36	1,41	0,00	1,41	-1,36
DDD	-0,153	-0,153	-1,000	60,0	-52,17	-0,41	-0,41	-2,66	-2,00	1,84	0,00	1,84	-2,00
DDD	-0,179	-0,179	-1,000	60,0	-52,17	-0,61	-0,61	-3,42	-2,68	2,30	0,00	2,30	-2,68
DDD	-0,198	-0,198	-1,000	60,0	-52,17	-0,80	-0,80	-4,05	-3,26	2,65	0,00	2,65	-3,26
DDD	-0,217	-0,217	-1,000	60,0	-52,17	-1,01	-1,01	-4,64	-3,84	2,97	0,00	2,97	-3,84
DDD	-0,227	-0,227	-1,000	60,0	-52,17	-1,20	-1,20	-5,29	-4,44	3,34	0,00	3,34	-4,44
DDD	-0,238	-0,238	-1,000	60,0	-52,17	-1,40	-1,40	-5,90	-5,03	3,67	0,00	3,67	-5,03
DDD	-0,248	-0,248	-1,000	60,0	-52,17	-1,61	-1,61	-6,49	-5,60	3,98	0,00	3,98	-5,60
DDD	-0,259	-0,259	-1,000	60,0	-52,17	-1,80	-1,80	-6,97	-6,10	4,22	0,00	4,22	-6,10
DDD	-0,264	-0,264	-1,000	60,0	-52,17	-2,00	-2,00	-7,59	-6,69	4,56	0,00	4,56	-6,69
DDD	-0,255	-0,255	-1,000	60,0	-52,17	-1,94	-1,94	-7,59	-6,62	4,61	0,00	4,61	-6,62
DDD	-0,115	-0,115	-1,000	60,0	-52,72	-0,21	-0,21	-1,81	-1,29	1,31	0,00	1,31	-1,29
DDD	-0,159	-0,159	-1,000	60,0	-52,72	-0,41	-0,41	-2,57	-1,96	1,76	0,00	1,76	-1,96
DDD	-0,182	-0,182	-1,000	60,0	-52,72	-0,60	-0,60	-3,32	-2,61	2,21	0,00	2,21	-2,61
DDD	-0,200	-0,200	-1,000	60,0	-52,72	-0,81	-0,81	-4,03	-3,26	2,63	0,00	2,63	-3,26
DDD	-0,218	-0,218	-1,000	60,0	-52,72	-1,01	-1,01	-4,62	-3,83	2,95	0,00	2,95	-3,83
DDD	-0,231	-0,231	-1,000	60,0	-52,72	-1,20	-1,20	-5,21	-4,40	3,27	0,00	3,27	-4,40
DDD	-0,240	-0,240	-1,000	60,0	-52,72	-1,40	-1,40	-5,83	-4,98	3,61	0,00	3,61	-4,98
DDD	-0,252	-0,252	-1,000	60,0	-52,72	-1,60	-1,60	-6,35	-5,52	3,88	0,00	3,88	-5,52
DDD	-0,261	-0,261	-1,000	60,0	-52,72	-1,80	-1,80	-6,90	-6,07	4,16	0,00	4,16	-6,07
DDD	-0,306	-0,306	-1,000	60,0	-52,72	-2,50	-2,50	-8,19	-7,62	4,64	0,00	4,64	-7,62
DDD	-0,106	-0,106	-1,000	60,0	-51,54	-0,21	-0,21	-2,01	-1,41	1,47	0,00	1,47	-1,41
DDD	-0,156	-0,156	-1,000	60,0	-51,54	-0,41	-0,41	-2,65	-2,01	1,83	0,00	1,83	-2,01

Fortsetzung Tabelle B.7: Versuchswerte von Dahl [19]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,181	-0,181	-1,000	60,0	-51,54	-0,60	-0,60	-3,34	-2,62	2,23	0,00	2,23	-2,62
DDD	-0,194	-0,194	-1,000	60,0	-51,54	-0,81	-0,81	-4,17	-3,34	2,74	0,00	2,74	-3,34
DDD	-0,210	-0,210	-1,000	60,0	-51,54	-1,01	-1,01	-4,79	-3,93	3,09	0,00	3,09	-3,93
DDD	-0,229	-0,229	-1,000	60,0	-51,54	-1,20	-1,20	-5,25	-4,42	3,31	0,00	3,31	-4,42
DDD	-0,240	-0,240	-1,000	60,0	-51,54	-1,40	-1,40	-5,84	-4,99	3,62	0,00	3,62	-4,99
DDD	-0,254	-0,254	-1,000	60,0	-51,54	-1,60	-1,60	-6,31	-5,49	3,84	0,00	3,84	-5,49
DDD	-0,263	-0,263	-1,000	60,0	-51,54	-1,80	-1,80	-6,86	-6,04	4,13	0,00	4,13	-6,04
DDD	-0,101	-0,101	-1,000	60,0	-64,12	-0,20	-0,20	-2,01	-1,40	1,48	0,00	1,48	-1,40
DDD	-0,149	-0,149	-1,000	60,0	-64,12	-0,41	-0,41	-2,78	-2,08	1,93	0,00	1,93	-2,08
DDD	-0,181	-0,181	-1,000	60,0	-64,12	-0,61	-0,61	-3,36	-2,64	2,24	0,00	2,24	-2,64
DDD	-0,201	-0,201	-1,000	60,0	-64,12	-0,81	-0,81	-4,02	-3,26	2,63	0,00	2,63	-3,26
DDD	-0,217	-0,217	-1,000	60,0	-64,12	-1,00	-1,00	-4,62	-3,83	2,96	0,00	2,96	-3,83
DDD	-0,229	-0,229	-1,000	60,0	-64,12	-1,20	-1,20	-5,26	-4,43	3,31	0,00	3,31	-4,43
DDD	-0,243	-0,243	-1,000	60,0	-64,12	-1,40	-1,40	-5,75	-4,94	3,55	0,00	3,55	-4,94
DDD	-0,257	-0,257	-1,000	60,0	-64,12	-1,60	-1,60	-6,23	-5,45	3,77	0,00	3,77	-5,45
DDD	-0,108	-0,108	-1,000	60,0	-71,65	-0,20	-0,20	-1,90	-1,33	1,38	0,00	1,38	-1,33
DDD	-0,155	-0,155	-1,000	60,0	-71,65	-0,40	-0,40	-2,60	-1,97	1,79	0,00	1,79	-1,97
DDD	-0,188	-0,188	-1,000	60,0	-71,65	-0,61	-0,61	-3,25	-2,58	2,15	0,00	2,15	-2,58
DDD	-0,208	-0,208	-1,000	60,0	-71,65	-0,81	-0,81	-3,89	-3,18	2,51	0,00	2,51	-3,18
DDD	-0,224	-0,224	-1,000	60,0	-71,65	-1,01	-1,01	-4,49	-3,75	2,85	0,00	2,85	-3,75
DDD	-0,242	-0,242	-1,000	60,0	-71,65	-1,20	-1,20	-4,97	-4,26	3,07	0,00	3,07	-4,26
DDD	-0,253	-0,253	-1,000	60,0	-71,65	-1,40	-1,40	-5,54	-4,82	3,38	0,00	3,38	-4,82
DDD	-0,266	-0,266	-1,000	60,0	-71,65	-1,60	-1,60	-6,02	-5,32	3,61	0,00	3,61	-5,32
DDD	-0,106	-0,106	-1,000	60,0	-76,73	-0,20	-0,20	-1,93	-1,35	1,41	0,00	1,41	-1,35
DDD	-0,152	-0,152	-1,000	60,0	-76,73	-0,41	-0,41	-2,67	-2,01	1,85	0,00	1,85	-2,01
DDD	-0,183	-0,183	-1,000	60,0	-76,73	-0,61	-0,61	-3,31	-2,61	2,21	0,00	2,21	-2,61
DDD	-0,210	-0,210	-1,000	60,0	-76,73	-0,80	-0,80	-3,83	-3,14	2,47	0,00	2,47	-3,14
DDD	-0,225	-0,225	-1,000	60,0	-76,73	-1,00	-1,00	-4,46	-3,73	2,82	0,00	2,82	-3,73
DDD	-0,242	-0,242	-1,000	60,0	-76,73	-1,20	-1,20	-4,97	-4,26	3,08	0,00	3,08	-4,26
DDD	-0,259	-0,259	-1,000	60,0	-76,73	-1,40	-1,40	-5,40	-4,73	3,27	0,00	3,27	-4,73
DDD	-0,274	-0,274	-1,000	60,0	-76,73	-1,60	-1,60	-5,86	-5,23	3,47	0,00	3,47	-5,23
DDD	-0,103	-0,103	-1,000	60,0	-89,46	-0,20	-0,20	-1,95	-1,36	1,43	0,00	1,43	-1,36
DDD	-0,151	-0,151	-1,000	60,0	-89,46	-0,41	-0,41	-2,70	-2,03	1,87	0,00	1,87	-2,03
DDD	-0,182	-0,182	-1,000	60,0	-89,46	-0,61	-0,61	-3,32	-2,62	2,22	0,00	2,22	-2,62
DDD	-0,205	-0,205	-1,000	60,0	-89,46	-0,80	-0,80	-3,92	-3,19	2,54	0,00	2,54	-3,19
DDD	-0,227	-0,227	-1,000	60,0	-89,46	-1,00	-1,00	-4,43	-3,72	2,80	0,00	2,80	-3,72
DDD	-0,238	-0,238	-1,000	60,0	-89,46	-1,20	-1,20	-5,06	-4,31	3,15	0,00	3,15	-4,31
DDD	-0,257	-0,257	-1,000	60,0	-89,46	-1,40	-1,40	-5,45	-4,77	3,31	0,00	3,31	-4,77
DDD	-0,253	-0,253	-1,000	60,0	-89,46	-1,40	-1,40	-5,53	-4,81	3,37	0,00	3,37	-4,81
DDD	-0,269	-0,269	-1,000	60,0	-89,46	-1,50	-1,50	-5,58	-4,96	3,33	0,00	3,33	-4,96
DDD	-0,103	-0,103	-1,000	60,0	-90,36	-0,20	-0,20	-1,99	-1,39	1,46	0,00	1,46	-1,39
DDD	-0,148	-0,148	-1,000	60,0	-90,36	-0,40	-0,40	-2,73	-2,04	1,90	0,00	1,90	-2,04
DDD	-0,176	-0,176	-1,000	60,0	-90,36	-0,60	-0,60	-3,44	-2,68	2,32	0,00	2,32	-2,68
DDD	-0,201	-0,201	-1,000	60,0	-90,36	-0,80	-0,80	-3,99	-3,23	2,60	0,00	2,60	-3,23
DDD	-0,221	-0,221	-1,000	60,0	-90,36	-1,00	-1,00	-4,54	-3,78	2,89	0,00	2,89	-3,78
DDD	-0,235	-0,235	-1,000	60,0	-90,36	-1,20	-1,20	-5,12	-4,34	3,20	0,00	3,20	-4,34
DDD	-0,255	-0,255	-1,000	60,0	-90,36	-1,40	-1,40	-5,50	-4,80	3,35	0,00	3,35	-4,80
DDD	-0,259	-0,259	-1,000	60,0	-90,36	-1,50	-1,50	-5,78	-5,07	3,50	0,00	3,50	-5,07
DDD	-0,105	-0,105	-1,000	60,0	-88,39	-0,20	-0,20	-1,96	-1,37	1,43	0,00	1,43	-1,37
DDD	-0,150	-0,150	-1,000	60,0	-88,39	-0,41	-0,41	-2,72	-2,04	1,89	0,00	1,89	-2,04
DDD	-0,179	-0,179	-1,000	60,0	-88,39	-0,60	-0,60	-3,37	-2,65	2,26	0,00	2,26	-2,65
DDD	-0,206	-0,206	-1,000	60,0	-88,39	-0,80	-0,80	-3,91	-3,18	2,53	0,00	2,53	-3,18
DDD	-0,219	-0,219	-1,000	60,0	-88,39	-1,00	-1,00	-4,58	-3,80	2,92	0,00	2,92	-3,80
DDD	-0,234	-0,234	-1,000	60,0	-88,39	-1,20	-1,20	-5,15	-4,37	3,22	0,00	3,22	-4,37
DDD	-0,251	-0,251	-1,000	60,0	-88,39	-1,40	-1,40	-5,58	-4,84	3,41	0,00	3,41	-4,84
DDD	-0,254	-0,254	-1,000	60,0	-88,39	-1,51	-1,51	-5,92	-5,16	3,60	0,00	3,60	-5,16
DDD	-0,097	-0,097	-1,000	60,0	-106,20	-0,21	-0,21	-2,12	-1,46	1,56	0,00	1,56	-1,46
DDD	-0,142	-0,142	-1,000	60,0	-106,20	-0,41	-0,41	-2,86	-2,12	2,01	0,00	2,01	-2,12
DDD	-0,172	-0,172	-1,000	60,0	-106,20	-0,61	-0,61	-3,55	-2,75	2,40	0,00	2,40	-2,75
DDD	-0,195	-0,195	-1,000	60,0	-106,20	-0,81	-0,81	-4,14	-3,32	2,72	0,00	2,72	-3,32
DDD	-0,214	-0,214	-1,000	60,0	-106,20	-1,01	-1,01	-4,71	-3,88	3,02	0,00	3,02	-3,88
DDD	-0,230	-0,230	-1,000	60,0	-106,20	-1,21	-1,21	-5,24	-4,42	3,29	0,00	3,29	-4,42
DDD	-0,243	-0,243	-1,000	60,0	-106,20	-1,32	-1,32	-5,44	-4,67	3,36	0,00	3,36	-4,67
DDD	-0,096	-0,096	-1,000	60,0	-107,12	-0,20	-0,20	-2,13	-1,47	1,57	0,00	1,57	-1,47
DDD	-0,145	-0,145	-1,000	60,0	-107,12	-0,40	-0,40	-2,79	-2,08	1,95	0,00	1,95	-2,08
DDD	-0,174	-0,174	-1,000	60,0	-107,12	-0,61	-0,61	-3,48	-2,71	2,35	0,00	2,35	-2,71
DDD	-0,198	-0,198	-1,000	60,0	-107,12	-0,80	-0,80	-4,07	-3,28	2,66	0,00	2,66	-3,28
DDD	-0,218	-0,218	-1,000	60,0	-107,12	-1,00	-1,00	-4,61	-3,82	2,94	0,00	2,94	-3,82
DDD	-0,236	-0,236	-1,000	60,0	-107,12	-1,20	-1,20	-5,09	-4,33	3,18	0,00	3,18	-4,33
DDD	-0,242	-0,242	-1,000	60,0	-107,12	-1,30	-1,30	-5,37	-4,61	3,32	0,00	3,32	-4,61
DDD	-0,094	-0,094	-1,000	60,0	-99,82	-0,21	-0,21	-2,20	-1,51	1,63	0,00	1,63	-1,51
DDD	-0,137	-0,137	-1,000	60,0	-99,82	-0,40	-0,40	-2,95	-2,17	2,08	0,00	2,08	-2,17
DDD	-0,167	-0,167	-1,000	60,0	-99,82	-0,60	-0,60	-3,61	-2,78	2,46	0,00	2,46	-2,78
DDD	-0,189	-0,189	-1,000	60,0	-99,82	-0,80	-0,80	-4,25	-3,38	2,82	0,00	2,82	-3,38
DDD	-0,207	-0,207	-1,000	60,0	-99,82	-1,00	-1,00	-4,85	-3,96	3,14	0,00	3,14	-3,96
DDD	-0,224	-0,224	-1,000	60,0	-99,82	-1,20	-1,20	-5,38	-4,50	3,41	0,00	3,41	-4,50
DDD	-0,241	-0,241	-1,000	60,0	-99,82	-1,40	-1,40	-5,81	-4,97	3,60	0,00	3,60	-4,97
DDD	-0,096	-0,096	-1,000	60,0	-108,80	-0,21	-0,21	-2,13	-1,47	1,58	0,00	1,58	-1,47
DDD	-0,143	-0,143	-1,000	60,0	-108,80	-0,40	-0,40	-2,81	-2,09	1,97	0,00	1,97	-2,09
DDD	-0,171	-0,171	-1,000	60,0	-108,80	-0,60	-0,60	-3,52	-2,73	2,38	0,00	2,38	-2,73
DDD	-0,192	-0,192	-1,000	60,0	-108,80	-0,80	-0,80	-4,17	-3,33	2,75	0,00	2,75	-3,33
DDD	-0,215	-0,215	-1,000	60,0	-108,80	-1,01	-1,01	-4,68	-3,86	3,00	0,00	3,00	-3,86
DDD	-0,233	-0,233	-1,000	60,0	-108,80	-1,20	-1,20	-5,15	-4,36	3,23	0,00	3,23	-4,36
DDD	-0,099	-0,099	-1,000	60,0	-108,76	-0,20	-0,20	-2,06	-1,43	1,52	0,00	1,52	-1,43
DDD	-0,143	-0,143	-1,000	60,0	-108,76	-0,40	-0,40	-2,82	-2,10	1,97	0,00	1,97	-2,10

Fortsetzung Tabelle B.7: Versuchswerte von Dahl [19]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,171	-0,171	-1,000	60,0	-108,76	-0,61	-0,61	-3,54	-2,74	2,40	0,00	2,40	-2,74
DDD	-0,196	-0,196	-1,000	60,0	-108,76	-0,80	-0,80	-4,10	-3,29	2,69	0,00	2,69	-3,29
DDD	-0,214	-0,214	-1,000	60,0	-108,76	-1,00	-1,00	-4,69	-3,87	3,01	0,00	3,01	-3,87
DDD	-0,234	-0,234	-1,000	60,0	-108,76	-1,20	-1,20	-5,15	-4,36	3,22	0,00	3,22	-4,36

Demeke & Tegos [21]

- Probekörper: Prisma 10 cm × 10 cm × 30 cm
- Wichtung: Mittelwert aus 3 Einzelwerten

Tabelle B.8: Versuchswerte von Demeke & Tegos [21]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-30,03	0,11	0,00	0,00	0,06	0,09	0,08	0,04	0,06
ZD	0,525	0,000	-1,000	40,2	-30,03	0,09	0,00	-0,17	-0,05	0,19	0,06	0,18	-0,05
ZD	0,320	0,000	-1,000	46,6	-30,03	0,08	0,00	-0,25	-0,10	0,25	0,06	0,24	-0,10
ZD	0,216	0,000	-1,000	50,4	-30,03	0,07	0,00	-0,33	-0,15	0,31	0,05	0,30	-0,15
ZD	0,157	0,000	-1,000	52,8	-30,03	0,07	0,00	-0,42	-0,20	0,37	0,05	0,37	-0,20
ZD	0,130	0,000	-1,000	53,9	-30,03	0,06	0,00	-0,50	-0,25	0,43	0,05	0,43	-0,25
ZD	0,106	0,000	-1,000	55,0	-30,03	0,06	0,00	-0,58	-0,30	0,50	0,04	0,50	-0,30
ZD	0,089	0,000	-1,000	55,8	-30,03	0,06	0,00	-0,66	-0,34	0,56	0,04	0,56	-0,34
ZD	0,072	0,000	-1,000	56,6	-30,03	0,05	0,00	-0,74	-0,40	0,63	0,04	0,63	-0,40
ZD	0,052	0,000	-1,000	57,5	-30,03	0,04	0,00	-0,83	-0,46	0,70	0,03	0,70	-0,46
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,03	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-30,03	0,14	0,00	0,00	0,08	0,11	0,10	0,06	0,08
ZD	0,710	0,000	-1,000	35,6	-30,03	0,12	0,00	-0,17	-0,03	0,21	0,09	0,19	-0,03
ZD	0,462	0,000	-1,000	42,0	-30,03	0,12	0,00	-0,25	-0,08	0,26	0,08	0,25	-0,08
ZD	0,331	0,000	-1,000	46,2	-30,03	0,11	0,00	-0,33	-0,13	0,33	0,08	0,32	-0,13
ZD	0,262	0,000	-1,000	48,7	-30,03	0,11	0,00	-0,42	-0,18	0,40	0,08	0,39	-0,18
ZD	0,218	0,000	-1,000	50,4	-30,03	0,11	0,00	-0,50	-0,23	0,46	0,08	0,45	-0,23
ZD	0,189	0,000	-1,000	51,5	-30,03	0,11	0,00	-0,58	-0,27	0,53	0,08	0,52	-0,27
ZD	0,158	0,000	-1,000	52,8	-30,03	0,10	0,00	-0,66	-0,32	0,59	0,07	0,58	-0,32
ZD	0,125	0,000	-1,000	54,2	-30,03	0,09	0,00	-0,74	-0,37	0,65	0,07	0,64	-0,37
ZD	0,092	0,000	-1,000	55,6	-30,03	0,08	0,00	-0,83	-0,44	0,71	0,05	0,71	-0,44
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,03	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-30,03	0,16	0,00	0,00	0,09	0,13	0,11	0,06	0,09
ZD	0,921	0,000	-1,000	31,4	-30,03	0,15	0,00	-0,17	-0,01	0,23	0,11	0,20	-0,01
ZD	0,612	0,000	-1,000	37,9	-30,03	0,15	0,00	-0,25	-0,06	0,28	0,11	0,26	-0,06
ZD	0,452	0,000	-1,000	42,3	-30,03	0,15	0,00	-0,33	-0,11	0,35	0,11	0,33	-0,11
ZD	0,356	0,000	-1,000	45,3	-30,03	0,15	0,00	-0,41	-0,15	0,41	0,10	0,40	-0,15
ZD	0,293	0,000	-1,000	47,5	-30,03	0,14	0,00	-0,49	-0,20	0,47	0,10	0,46	-0,20
ZD	0,248	0,000	-1,000	49,2	-30,03	0,14	0,00	-0,58	-0,25	0,54	0,10	0,53	-0,25
ZD	0,214	0,000	-1,000	50,5	-30,03	0,14	0,00	-0,66	-0,30	0,61	0,10	0,60	-0,30
ZD	0,174	0,000	-1,000	52,1	-30,03	0,13	0,00	-0,74	-0,36	0,67	0,09	0,66	-0,36
ZD	0,131	0,000	-1,000	53,9	-30,03	0,11	0,00	-0,83	-0,42	0,73	0,08	0,72	-0,42
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,03	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-30,03	0,18	0,00	0,00	0,11	0,15	0,13	0,08	0,11
ZD	1,000	0,000	-0,886	28,0	-30,03	0,18	0,00	-0,16	0,01	0,25	0,13	0,21	0,01
ZD	0,761	0,000	-1,000	34,5	-30,03	0,19	0,00	-0,24	-0,03	0,31	0,13	0,28	-0,03
ZD	0,558	0,000	-1,000	39,3	-30,03	0,18	0,00	-0,33	-0,08	0,37	0,13	0,35	-0,08
ZD	0,444	0,000	-1,000	42,5	-30,03	0,18	0,00	-0,41	-0,13	0,43	0,13	0,41	-0,13
ZD	0,371	0,000	-1,000	44,8	-30,03	0,18	0,00	-0,49	-0,18	0,49	0,13	0,47	-0,18
ZD	0,316	0,000	-1,000	46,7	-30,03	0,18	0,00	-0,58	-0,23	0,56	0,13	0,55	-0,23
ZD	0,273	0,000	-1,000	48,3	-30,03	0,18	0,00	-0,65	-0,27	0,62	0,13	0,61	-0,27
ZD	0,223	0,000	-1,000	50,2	-30,03	0,17	0,00	-0,74	-0,33	0,68	0,12	0,67	-0,33
ZD	0,167	0,000	-1,000	52,4	-30,03	0,14	0,00	-0,84	-0,40	0,75	0,10	0,74	-0,40
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,03	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58

Hampel [36]

- Probekörper: Scheibe 20 cm × 20 cm × 5 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.9: Versuchswerte von Hampel [36]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-60,15	0,04	0,00	-0,07	-0,02	0,08	0,03	0,07	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-60,15	0,04	0,00	-0,08	-0,02	0,09	0,03	0,08	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-60,15	0,03	0,00	-0,07	-0,02	0,07	0,02	0,07	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-60,15	0,04	0,00	-0,08	-0,02	0,09	0,03	0,08	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-60,15	0,04	0,00	-0,09	-0,02	0,09	0,03	0,09	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-60,15	0,04	0,00	-0,08	-0,02	0,08	0,03	0,08	-0,02
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-60,15	0,05	0,00	-0,27	-0,13	0,25	0,04	0,24	-0,13
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-60,15	0,04	0,00	-0,19	-0,09	0,17	0,03	0,17	-0,09
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-60,15	0,04	0,00	-0,20	-0,09	0,19	0,03	0,18	-0,09
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-60,15	0,03	0,00	-0,15	-0,07	0,14	0,02	0,13	-0,07
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-60,15	0,03	0,00	-0,17	-0,08	0,16	0,02	0,15	-0,08
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-60,15	0,05	0,00	-0,24	-0,11	0,22	0,03	0,22	-0,11
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-60,15	0,03	0,00	-0,17	-0,08	0,15	0,02	0,15	-0,08
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-60,15	0,04	0,00	-0,19	-0,09	0,17	0,03	0,17	-0,09
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-60,15	0,02	0,00	-0,19	-0,10	0,16	0,01	0,16	-0,10
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-60,15	0,03	0,00	-0,34	-0,17	0,29	0,02	0,29	-0,17
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-60,15	0,04	0,00	-0,38	-0,20	0,33	0,03	0,32	-0,20
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-60,15	0,03	0,00	-0,26	-0,14	0,23	0,02	0,22	-0,14
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-60,15	0,03	0,00	-0,27	-0,14	0,24	0,02	0,23	-0,14
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-60,15	0,04	0,00	-0,37	-0,19	0,32	0,03	0,31	-0,19
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-60,15	0,03	0,00	-0,34	-0,17	0,29	0,02	0,29	-0,17
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-60,15	0,01	0,00	-0,26	-0,14	0,22	0,01	0,22	-0,14
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-60,15	0,02	0,00	-0,35	-0,19	0,30	0,01	0,30	-0,19
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-60,15	0,03	0,00	-0,67	-0,37	0,57	0,02	0,56	-0,37
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-60,15	0,01	0,00	-0,16	-0,09	0,14	0,01	0,14	-0,09
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-60,15	0,03	0,00	-0,50	-0,28	0,42	0,02	0,42	-0,28
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-60,15	0,03	0,00	-0,59	-0,32	0,49	0,02	0,49	-0,32
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-60,15	0,04	0,00	-0,71	-0,39	0,60	0,03	0,60	-0,39
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-60,15	0,03	0,00	-0,57	-0,31	0,48	0,02	0,48	-0,31
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-60,15	0,01	0,00	-0,45	-0,25	0,37	0,01	0,37	-0,25
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-60,15	0,02	0,00	-0,93	-0,52	0,77	0,02	0,77	-0,52
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-60,15	0,01	0,00	-0,34	-0,19	0,28	0,01	0,28	-0,19
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-60,15	0,01	0,00	-0,58	-0,33	0,48	0,01	0,48	-0,33
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-60,15	0,02	0,00	-0,83	-0,47	0,69	0,01	0,69	-0,47
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-60,15	0,02	0,00	-0,77	-0,43	0,63	0,01	0,63	-0,43
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-60,15	0,02	0,00	-0,67	-0,38	0,56	0,01	0,56	-0,38
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-60,15	0,02	0,00	-0,83	-0,47	0,69	0,01	0,69	-0,47
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-60,15	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-60,15	0,00	0,00	-1,08	-0,62	0,88	0,00	0,88	-0,62
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-60,15	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-60,15	0,00	0,00	-0,89	-0,51	0,72	0,00	0,72	-0,51
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-60,15	0,00	0,00	-0,82	-0,47	0,67	0,00	0,67	-0,47
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-60,15	0,00	0,00	-0,80	-0,46	0,65	0,00	0,65	-0,46
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-60,15	0,00	0,00	-1,16	-0,67	0,95	0,00	0,95	-0,67
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-60,15	0,00	0,00	-1,17	-0,68	0,96	0,00	0,96	-0,68
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-60,15	0,00	0,00	-1,05	-0,61	0,86	0,00	0,86	-0,61
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,15	0,07	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,15	0,08	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,15	0,08	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,15	0,06	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,15	0,07	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,15	0,08	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,15	0,07	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,15	0,07	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,15	0,06	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-69,17	0,07	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-69,17	0,07	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-69,17	0,08	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-69,17	0,07	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-69,17	0,06	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-69,17	0,07	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-69,17	0,03	0,00	-0,06	-0,02	0,06	0,02	0,06	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-69,17	0,04	0,00	-0,07	-0,02	0,08	0,03	0,07	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-69,17	0,05	0,00	-0,09	-0,03	0,10	0,03	0,09	-0,03
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-69,17	0,03	0,00	-0,06	-0,02	0,06	0,02	0,06	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-69,17	0,04	0,00	-0,07	-0,02	0,08	0,03	0,07	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-69,17	0,05	0,00	-0,09	-0,03	0,10	0,03	0,10	-0,03
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-69,17	0,04	0,00	-0,20	-0,09	0,18	0,03	0,18	-0,09
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-69,17	0,04	0,00	-0,20	-0,09	0,18	0,03	0,18	-0,09
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-69,17	0,04	0,00	-0,20	-0,09	0,18	0,03	0,18	-0,09
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-69,17	0,04	0,00	-0,20	-0,09	0,18	0,03	0,18	-0,09
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-69,17	0,02	0,00	-0,22	-0,11	0,19	0,02	0,19	-0,11
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-69,17	0,02	0,00	-0,23	-0,12	0,20	0,02	0,20	-0,12
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-69,17	0,03	0,00	-0,33	-0,17	0,28	0,02	0,28	-0,17

Fortsetzung Tabelle B.9: Versuchswerte von Hampel [36]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-69,17	0,03	0,00	-0,30	-0,16	0,26	0,02	0,26	-0,16
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-69,17	0,04	0,00	-0,36	-0,19	0,31	0,03	0,31	-0,19
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-69,17	0,04	0,00	-0,44	-0,23	0,38	0,03	0,38	-0,23
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-69,17	0,02	0,00	-0,48	-0,26	0,40	0,02	0,40	-0,26
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-69,17	0,03	0,00	-0,57	-0,31	0,48	0,02	0,48	-0,31
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-69,17	0,03	0,00	-0,56	-0,31	0,47	0,02	0,47	-0,31
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-69,17	0,02	0,00	-0,45	-0,25	0,38	0,02	0,38	-0,25
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-69,17	0,02	0,00	-0,49	-0,27	0,41	0,02	0,41	-0,27
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-69,17	0,03	0,00	-0,51	-0,28	0,42	0,02	0,42	-0,28
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-69,17	0,03	0,00	-0,55	-0,30	0,46	0,02	0,46	-0,30
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-69,17	0,01	0,00	-0,44	-0,25	0,37	0,01	0,37	-0,25
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-69,17	0,02	0,00	-0,75	-0,42	0,62	0,01	0,62	-0,42
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-69,17	0,01	0,00	-0,36	-0,20	0,29	0,01	0,29	-0,20
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-69,17	0,02	0,00	-0,66	-0,37	0,54	0,01	0,54	-0,37
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-69,17	0,02	0,00	-0,69	-0,39	0,57	0,01	0,57	-0,39
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-69,17	0,03	0,00	-1,06	-0,60	0,88	0,02	0,88	-0,60
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-69,17	0,02	0,00	-0,66	-0,37	0,55	0,01	0,55	-0,37
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-69,17	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-69,17	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-69,17	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-69,17	0,00	0,00	-1,03	-0,60	0,84	0,00	0,84	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-69,17	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-69,17	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-87,44	0,06	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-87,44	0,06	0,00	0,00	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-87,44	0,06	0,00	0,00	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-87,44	0,05	0,00	0,00	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-87,44	0,06	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-87,44	0,06	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-87,44	0,03	0,00	-0,06	-0,02	0,07	0,02	0,06	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-87,44	0,03	0,00	-0,07	-0,02	0,07	0,02	0,07	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-87,44	0,04	0,00	-0,08	-0,02	0,08	0,03	0,08	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-87,44	0,05	0,00	-0,09	-0,03	0,10	0,03	0,10	-0,03
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-87,44	0,04	0,00	-0,08	-0,02	0,08	0,03	0,08	-0,02
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-87,44	0,03	0,00	-0,07	-0,02	0,07	0,02	0,07	-0,02
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-87,44	0,02	0,00	-0,11	-0,05	0,10	0,02	0,10	-0,05
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-87,44	0,02	0,00	-0,12	-0,05	0,11	0,02	0,11	-0,05
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-87,44	0,04	0,00	-0,18	-0,08	0,16	0,03	0,16	-0,08
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-87,44	0,03	0,00	-0,17	-0,08	0,15	0,02	0,15	-0,08
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-87,44	0,03	0,00	-0,16	-0,07	0,14	0,02	0,14	-0,07
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-87,44	0,05	0,00	-0,25	-0,12	0,23	0,04	0,23	-0,12
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-87,44	0,02	0,00	-0,19	-0,10	0,17	0,01	0,17	-0,10
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-87,44	0,03	0,00	-0,30	-0,16	0,26	0,02	0,26	-0,16
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-87,44	0,04	0,00	-0,44	-0,23	0,38	0,03	0,38	-0,23
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-87,44	0,03	0,00	-0,28	-0,14	0,24	0,02	0,24	-0,14
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-87,44	0,02	0,00	-0,25	-0,13	0,21	0,02	0,21	-0,13
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-87,44	0,03	0,00	-0,34	-0,18	0,29	0,02	0,29	-0,18
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-87,44	0,01	0,00	-0,30	-0,16	0,25	0,01	0,25	-0,16
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-87,44	0,02	0,00	-0,41	-0,23	0,35	0,01	0,35	-0,23
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-87,44	0,02	0,00	-0,42	-0,23	0,35	0,01	0,35	-0,23
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-87,44	0,03	0,00	-0,67	-0,37	0,56	0,02	0,56	-0,37
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-87,44	0,02	0,00	-0,33	-0,18	0,28	0,01	0,28	-0,18
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-87,44	0,01	0,00	-0,16	-0,09	0,14	0,01	0,14	-0,09
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-87,44	0,01	0,00	-0,39	-0,22	0,32	0,01	0,32	-0,22
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-87,44	0,01	0,00	-0,53	-0,30	0,44	0,01	0,44	-0,30
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-87,44	0,02	0,00	-0,75	-0,42	0,62	0,01	0,62	-0,42
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-87,44	0,02	0,00	-0,94	-0,53	0,78	0,02	0,78	-0,53
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-87,44	0,01	0,00	-0,44	-0,25	0,37	0,01	0,37	-0,25
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-87,44	0,01	0,00	-0,35	-0,20	0,29	0,01	0,29	-0,20
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-87,44	0,00	0,00	-1,03	-0,60	0,84	0,00	0,84	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-87,44	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-87,44	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-87,44	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-87,44	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-87,44	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-61,17	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-61,17	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-61,17	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-61,17	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-61,17	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-61,17	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,81	0,00	0,81	-0,58
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-61,17	0,00	-0,06	-1,19	-0,72	0,94	0,04	0,94	-0,72
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-61,17	0,00	-0,06	-1,15	-0,70	0,92	0,04	0,92	-0,70
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-61,17	0,00	-0,05	-1,07	-0,65	0,85	0,04	0,85	-0,65
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-61,17	0,00	-0,06	-1,18	-0,71	0,94	0,04	0,94	-0,71
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-61,17	0,00	-0,06	-1,11	-0,68	0,89	0,04	0,88	-0,68
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-61,17	0,00	-0,06	-1,17	-0,71	0,93	0,04	0,93	-0,71
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-61,17	0,00	-0,26	-1,23	-0,86	0,92	0,18	0,90	-0,86
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-61,17	0,00	-0,27	-1,30	-0,91	0,97	0,19	0,95	-0,91
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-61,17	0,00	-0,26	-1,27	-0,88	0,95	0,19	0,93	-0,88
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-61,17	0,00	-0,28	-1,33	-0,93	0,99	0,20	0,97	-0,93
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-61,17	0,00	-0,27	-1,28	-0,89	0,96	0,19	0,94	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-61,17	0,00	-0,27	-1,29	-0,90	0,96	0,19	0,94	-0,90
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-61,17	0,00	-0,56	-1,35	-1,10	0,96	0,40	0,87	-1,10
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-61,17	0,00	-0,56	-1,35	-1,10	0,96	0,40	0,87	-1,10

Fortsetzung Tabelle B.9: Versuchswerte von Hampel [36]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-61,17	0,00	-0,54	-1,29	-1,05	0,91	0,38	0,83	-1,05
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-61,17	0,00	-0,55	-1,33	-1,09	0,95	0,39	0,86	-1,09
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-61,17	0,00	-0,59	-1,41	-1,16	1,00	0,42	0,91	-1,16
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-61,17	0,00	-0,55	-1,32	-1,08	0,94	0,39	0,85	-1,08
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-61,17	0,00	-0,84	-1,35	-1,26	0,96	0,59	0,76	-1,26
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-61,17	0,00	-0,88	-1,40	-1,31	1,00	0,62	0,78	-1,31
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-61,17	0,00	-0,82	-1,32	-1,24	0,94	0,58	0,74	-1,24
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-61,17	0,00	-0,88	-1,40	-1,32	1,00	0,62	0,79	-1,32
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-61,17	0,00	-0,92	-1,47	-1,38	1,05	0,65	0,82	-1,38
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-61,17	0,00	-0,91	-1,45	-1,36	1,04	0,64	0,81	-1,36
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-61,17	0,00	-1,15	-1,38	-1,46	1,05	0,81	0,66	-1,46
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-61,17	0,00	-1,16	-1,39	-1,48	1,06	0,82	0,66	-1,48
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-61,17	0,00	-1,17	-1,40	-1,48	1,06	0,82	0,66	-1,48
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-61,17	0,00	-1,10	-1,32	-1,39	1,00	0,78	0,63	-1,39
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-61,17	0,00	-1,14	-1,36	-1,44	1,03	0,80	0,65	-1,44
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-61,17	0,00	-1,19	-1,42	-1,50	1,08	0,84	0,68	-1,50
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-61,17	0,00	-1,25	-1,27	-1,45	1,03	0,88	0,52	-1,45
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-61,17	0,00	-1,29	-1,30	-1,49	1,05	0,91	0,53	-1,49
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-61,17	0,00	-1,33	-1,34	-1,55	1,09	0,94	0,55	-1,55
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-61,17	0,00	-1,15	-1,17	-1,34	0,95	0,82	0,48	-1,34
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-61,17	0,00	-1,22	-1,23	-1,42	1,00	0,86	0,51	-1,42
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-61,17	0,00	-1,23	-1,25	-1,43	1,01	0,87	0,52	-1,43
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,44	0,00	0,00	-0,90	-0,52	0,74	0,00	0,74	-0,52
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,44	0,00	0,00	-1,00	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,44	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,44	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,44	0,00	0,00	-1,05	-0,61	0,86	0,00	0,86	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,44	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-72,44	0,00	-0,06	-1,26	-0,76	1,01	0,04	1,00	-0,76
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-72,44	0,00	-0,06	-1,24	-0,75	0,99	0,04	0,99	-0,75
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-72,44	0,00	-0,06	-1,23	-0,74	0,98	0,04	0,98	-0,74
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-72,44	0,00	-0,27	-1,38	-0,95	1,03	0,19	1,01	-0,95
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-72,44	0,00	-0,25	-1,25	-0,86	0,94	0,18	0,92	-0,86
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-72,44	0,00	-0,26	-1,29	-0,89	0,97	0,18	0,95	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-72,44	0,00	-0,25	-1,24	-0,86	0,93	0,17	0,91	-0,86
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-72,44	0,00	-0,27	-1,34	-0,93	1,00	0,19	0,99	-0,93
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-72,44	0,00	-0,26	-1,30	-0,90	0,98	0,18	0,96	-0,90
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-72,44	0,00	-0,27	-1,36	-0,94	1,02	0,19	1,00	-0,94
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-72,44	0,00	-0,54	-1,36	-1,10	0,97	0,38	0,89	-1,10
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-72,44	0,00	-0,51	-1,27	-1,03	0,90	0,36	0,83	-1,03
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-72,44	0,00	-0,56	-1,40	-1,14	1,00	0,40	0,92	-1,14
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-72,44	0,00	-0,55	-1,37	-1,10	0,97	0,39	0,89	-1,10
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-72,44	0,00	-0,49	-1,22	-0,99	0,87	0,34	0,80	-0,99
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-72,44	0,00	-0,53	-1,33	-1,08	0,95	0,38	0,87	-1,08
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-72,44	0,00	-0,66	-1,10	-1,01	0,78	0,46	0,63	-1,01
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-72,44	0,00	-0,81	-1,35	-1,25	0,96	0,57	0,77	-1,25
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-72,44	0,00	-0,76	-1,27	-1,18	0,91	0,54	0,73	-1,18
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-72,44	0,00	-0,75	-1,25	-1,15	0,89	0,53	0,72	-1,15
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-72,44	0,00	-0,80	-1,33	-1,23	0,95	0,56	0,76	-1,23
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-72,44	0,00	-0,74	-1,24	-1,14	0,88	0,52	0,71	-1,14
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-72,44	0,00	-0,77	-1,29	-1,19	0,92	0,54	0,74	-1,19
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-72,44	0,00	-0,97	-1,21	-1,26	0,91	0,68	0,59	-1,26
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-72,44	0,00	-0,93	-1,17	-1,21	0,87	0,66	0,57	-1,21
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-72,44	0,00	-0,87	-1,09	-1,13	0,81	0,61	0,53	-1,13
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-72,44	0,00	-0,93	-1,16	-1,21	0,87	0,66	0,57	-1,21
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-72,44	0,00	-0,95	-1,18	-1,23	0,89	0,67	0,58	-1,23
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-72,44	0,00	-0,92	-1,15	-1,20	0,86	0,65	0,57	-1,20
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-72,44	0,00	-1,08	-1,14	-1,28	0,91	0,76	0,49	-1,28
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-72,44	0,00	-1,06	-1,12	-1,26	0,89	0,75	0,48	-1,26
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-72,44	0,00	-1,04	-1,10	-1,24	0,88	0,74	0,47	-1,24
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-72,44	0,00	-1,04	-1,10	-1,23	0,87	0,73	0,47	-1,23
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-72,44	0,00	-1,13	-1,20	-1,35	0,95	0,80	0,51	-1,35
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-72,44	0,00	-1,03	-1,08	-1,22	0,86	0,73	0,46	-1,22
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-94,20	0,00	0,00	-0,96	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-94,20	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-94,20	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-94,20	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-94,20	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-94,20	0,00	0,00	-0,96	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-94,20	0,00	-0,06	-1,19	-0,72	0,95	0,04	0,95	-0,72
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-94,20	0,00	-0,06	-1,14	-0,69	0,91	0,04	0,90	-0,69
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-94,20	0,00	-0,06	-1,09	-0,66	0,87	0,04	0,87	-0,66
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-94,20	0,00	-0,05	-1,03	-0,62	0,82	0,04	0,82	-0,62
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-94,20	0,00	-0,06	-1,14	-0,69	0,90	0,04	0,90	-0,69
DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	-94,20	0,00	-0,06	-1,11	-0,68	0,89	0,04	0,89	-0,68
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-94,20	0,00	-0,27	-1,31	-0,91	0,97	0,19	0,96	-0,91
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-94,20	0,00	-0,26	-1,25	-0,87	0,94	0,18	0,92	-0,87
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-94,20	0,00	-0,24	-1,14	-0,80	0,85	0,17	0,84	-0,80
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-94,20	0,00	-0,24	-1,15	-0,80	0,86	0,17	0,84	-0,80
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-94,20	0,00	-0,25	-1,18	-0,82	0,88	0,17	0,86	-0,82
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-94,20	0,00	-0,24	-1,15	-0,80	0,86	0,17	0,84	-0,80
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-94,20	0,00	-0,56	-1,33	-1,09	0,95	0,39	0,86	-1,09
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-94,20	0,00	-0,52	-1,26	-1,03	0,90	0,37	0,81	-1,03
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-94,20	0,00	-0,51	-1,22	-1,00	0,87	0,36	0,79	-1,00
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-94,20	0,00	-0,52	-1,25	-1,02	0,89	0,37	0,81	-1,02

Fortsetzung Tabelle B.9: Versuchswerte von Hampel [36]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-94,20	0,00	-0,46	-1,09	-0,89	0,78	0,32	0,71	-0,89
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-94,20	0,00	-0,53	-1,28	-1,04	0,91	0,38	0,82	-1,04
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-94,20	0,00	-0,77	-1,23	-1,16	0,88	0,54	0,69	-1,16
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-94,20	0,00	-0,81	-1,30	-1,22	0,93	0,58	0,73	-1,22
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-94,20	0,00	-0,72	-1,15	-1,08	0,82	0,51	0,64	-1,08
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-94,20	0,00	-0,76	-1,21	-1,14	0,87	0,54	0,68	-1,14
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-94,20	0,00	-0,71	-1,14	-1,07	0,82	0,50	0,64	-1,07
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-94,20	0,00	-0,78	-1,25	-1,17	0,89	0,55	0,70	-1,17
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-94,20	0,00	-0,97	-1,17	-1,23	0,88	0,69	0,56	-1,23
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-94,20	0,00	-1,01	-1,21	-1,28	0,92	0,71	0,58	-1,28
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-94,20	0,00	-0,99	-1,19	-1,26	0,90	0,70	0,57	-1,26
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-94,20	0,00	-0,96	-1,15	-1,22	0,87	0,68	0,55	-1,22
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-94,20	0,00	-1,00	-1,21	-1,27	0,91	0,71	0,58	-1,27
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-94,20	0,00	-1,10	-1,11	-1,27	0,90	0,78	0,46	-1,27
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-94,20	0,00	-1,07	-1,08	-1,24	0,88	0,76	0,45	-1,24
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-94,20	0,00	-1,03	-1,04	-1,20	0,85	0,73	0,43	-1,20
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-94,20	0,00	-1,10	-1,11	-1,27	0,90	0,78	0,46	-1,27
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-94,20	0,00	-1,07	-1,08	-1,24	0,88	0,76	0,45	-1,24
DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	-94,20	0,00	-1,16	-1,17	-1,34	0,95	0,82	0,48	-1,34
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,09	0,00	0,00	-1,06	-0,61	0,87	0,00	0,87	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,09	0,00	0,00	-1,10	-0,64	0,90	0,00	0,90	-0,64
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,09	0,00	0,00	-0,92	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,09	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,09	0,00	0,00	-0,94	-0,55	0,77	0,00	0,77	-0,55
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-46,09	-0,11	-0,44	-2,20	-1,59	1,59	0,23	1,57	-1,59
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-46,09	-0,11	-0,45	-2,24	-1,61	1,62	0,24	1,60	-1,61
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-46,09	-0,12	-0,48	-2,40	-1,73	1,74	0,26	1,72	-1,73
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-46,09	-0,11	-0,44	-2,21	-1,59	1,59	0,23	1,58	-1,59
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-46,09	-0,11	-0,44	-2,22	-1,60	1,61	0,24	1,59	-1,60
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-46,09	-0,10	-0,41	-2,10	-1,51	1,52	0,22	1,50	-1,51
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-46,09	-0,11	-1,37	-2,28	-2,17	1,54	0,89	1,26	-2,17
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-46,09	-0,12	-1,41	-2,35	-2,23	1,58	0,91	1,29	-2,23
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-46,09	-0,11	-1,29	-2,15	-2,05	1,45	0,84	1,19	-2,05
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-46,09	-0,12	-1,46	-2,44	-2,32	1,65	0,95	1,35	-2,32
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-46,09	-0,12	-1,44	-2,40	-2,29	1,62	0,94	1,33	-2,29
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-46,09	-0,11	-1,33	-2,22	-2,12	1,50	0,87	1,23	-2,12
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-46,09	-0,10	-1,96	-2,06	-2,38	1,56	1,31	0,84	-2,38
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-46,09	-0,10	-1,96	-2,06	-2,38	1,56	1,31	0,84	-2,38
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-46,09	-0,10	-1,92	-2,02	-2,34	1,53	1,29	0,83	-2,34
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-46,09	-0,10	-1,93	-2,03	-2,34	1,54	1,29	0,83	-2,34
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-46,09	-0,10	-1,94	-2,05	-2,36	1,55	1,30	0,84	-2,36
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-46,09	-0,07	-1,81	-1,90	-2,19	1,46	1,23	0,79	-2,19
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-46,09	-0,32	-0,64	-3,23	-2,42	2,25	0,23	2,24	-2,42
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-46,09	-0,32	-0,65	-3,25	-2,44	2,27	0,23	2,26	-2,44
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-46,09	-0,32	-0,64	-3,20	-2,40	2,24	0,23	2,22	-2,40
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-46,09	-0,29	-0,58	-2,91	-2,18	2,03	0,21	2,02	-2,18
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-46,09	-0,32	-0,64	-3,23	-2,42	2,26	0,23	2,24	-2,42
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-46,09	-0,30	-0,60	-2,99	-2,24	2,09	0,21	2,08	-2,24
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-46,09	-0,37	-2,24	-3,74	-3,67	2,39	1,32	1,99	-3,67
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-46,09	-0,36	-2,17	-3,61	-3,54	2,30	1,28	1,92	-3,54
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-46,09	-0,36	-2,19	-3,65	-3,59	2,33	1,29	1,94	-3,59
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-46,09	-0,35	-2,14	-3,57	-3,50	2,28	1,26	1,90	-3,50
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-46,09	-0,35	-2,10	-3,51	-3,44	2,24	1,24	1,86	-3,44
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-46,09	-0,36	-2,16	-3,61	-3,54	2,30	1,28	1,92	-3,54
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-46,09	-0,30	-2,87	-3,02	-3,58	2,16	1,82	1,17	-3,58
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-46,09	-0,30	-2,82	-2,97	-3,52	2,13	1,79	1,15	-3,52
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-46,09	-0,28	-2,72	-2,86	-3,38	2,05	1,72	1,11	-3,38
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-46,09	-0,29	-2,80	-2,95	-3,49	2,11	1,78	1,15	-3,49
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-46,09	-0,31	-2,91	-3,06	-3,63	2,19	1,85	1,19	-3,63
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-46,09	-0,29	-2,73	-2,87	-3,40	2,05	1,73	1,11	-3,40
DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	-46,09	-0,68	-0,90	-4,53	-3,53	3,06	0,16	3,05	-3,53
DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	-46,09	-0,71	-0,95	-4,76	-3,71	3,21	0,17	3,21	-3,71
DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	-46,09	-0,63	-0,84	-4,20	-3,27	2,83	0,15	2,83	-3,27
DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	-46,09	-0,65	-0,87	-4,36	-3,40	2,94	0,16	2,94	-3,40
DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	-46,09	-0,65	-0,87	-4,36	-3,40	2,95	0,15	2,94	-3,40
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-46,09	-0,81	-3,22	-5,36	-5,42	3,22	1,70	2,73	-5,42
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-46,09	-0,74	-2,95	-4,91	-4,96	2,95	1,56	2,51	-4,96
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-46,09	-0,80	-3,20	-5,33	-5,38	3,21	1,70	2,72	-5,38
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-46,09	-0,70	-2,81	-4,69	-4,73	2,82	1,49	2,39	-4,73
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-46,09	-0,72	-2,90	-4,83	-4,88	2,91	1,54	2,47	-4,88
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-46,09	-0,76	-3,05	-5,09	-5,14	3,06	1,62	2,60	-5,14
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-46,09	-0,59	-3,77	-3,96	-4,81	2,68	2,25	1,46	-4,81
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-46,09	-0,62	-3,93	-4,13	-5,01	2,79	2,34	1,52	-5,01
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-46,09	-0,62	-3,92	-4,13	-5,00	2,79	2,34	1,52	-5,00
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-46,09	-0,57	-3,62	-3,82	-4,62	2,58	2,16	1,40	-4,62
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-46,09	-0,60	-3,81	-4,02	-4,87	2,71	2,27	1,48	-4,87
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-46,09	-0,63	-3,97	-4,18	-5,07	2,82	2,37	1,53	-5,07
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,73	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,73	0,00	0,00	-0,94	-0,54	0,77	0,00	0,77	-0,54
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,73	0,00	0,00	-1,11	-0,64	0,91	0,00	0,91	-0,64
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-72,73	0,00	0,00	-1,00	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,73	-0,10	-0,40	-2,02	-1,46	1,46	0,21	1,45	-1,46
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,73	-0,10	-0,41	-2,04	-1,47	1,47	0,22	1,45	-1,47
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,73	-0,11	-0,43	-2,17	-1,56	1,57	0,23	1,55	-1,56
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,73	-0,09	-0,37	-1,86	-1,34	1,35	0,20	1,33	-1,34

Fortsetzung Tabelle B.9: Versuchswerte von Hampel [36]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,73	-0,09	-0,38	-1,92	-1,39	1,39	0,20	1,38	-1,39
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-72,73	-0,09	-0,37	-1,85	-1,33	1,34	0,20	1,32	-1,33
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,73	-0,11	-1,29	-2,16	-2,05	1,46	0,84	1,19	-2,05
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,73	-0,11	-1,34	-2,24	-2,13	1,51	0,87	1,24	-2,13
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,73	-0,12	-1,42	-2,36	-2,25	1,59	0,92	1,30	-2,25
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,73	-0,12	-1,42	-2,36	-2,25	1,59	0,92	1,30	-2,25
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-72,73	-0,12	-1,44	-2,39	-2,28	1,62	0,93	1,32	-2,28
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,73	-0,10	-1,99	-2,09	-2,42	1,58	1,33	0,86	-2,42
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,73	-0,10	-1,94	-2,05	-2,36	1,55	1,30	0,84	-2,36
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,73	-0,10	-1,90	-2,01	-2,32	1,52	1,28	0,82	-2,32
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,73	-0,10	-1,97	-2,07	-2,39	1,57	1,32	0,85	-2,39
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-72,73	-0,10	-1,95	-2,05	-2,37	1,55	1,31	0,84	-2,37
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-72,73	-0,26	-0,53	-2,68	-2,01	1,87	0,19	1,86	-2,01
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-72,73	-0,27	-0,54	-2,70	-2,03	1,89	0,19	1,88	-2,03
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-72,73	-0,28	-0,56	-2,82	-2,11	1,97	0,20	1,96	-2,11
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-72,73	-0,29	-0,59	-2,94	-2,21	2,05	0,21	2,04	-2,21
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-72,73	-0,29	-0,58	-2,91	-2,18	2,03	0,21	2,02	-2,18
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-72,73	-0,27	-0,55	-2,75	-2,06	1,92	0,19	1,91	-2,06
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-72,73	-0,31	-1,85	-3,09	-3,03	1,97	1,09	1,64	-3,03
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-72,73	-0,30	-1,80	-3,00	-2,95	1,92	1,06	1,59	-2,95
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-72,73	-0,29	-1,76	-2,93	-2,87	1,87	1,04	1,56	-2,87
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-72,73	-0,32	-1,95	-3,24	-3,18	2,07	1,15	1,72	-3,18
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-72,73	-0,32	-1,91	-3,19	-3,13	2,03	1,13	1,69	-3,13
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-72,73	-0,28	-2,67	-2,81	-3,33	2,01	1,69	1,09	-3,33
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-72,73	-0,27	-2,59	-2,73	-3,23	1,95	1,64	1,06	-3,23
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-72,73	-0,27	-2,57	-2,70	-3,20	1,93	1,62	1,05	-3,20
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-72,73	-0,28	-2,68	-2,82	-3,34	2,02	1,70	1,09	-3,34
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-72,73	-0,29	-2,73	-2,87	-3,40	2,05	1,73	1,11	-3,40
DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	-72,73	-0,54	-0,72	-3,62	-2,82	2,44	0,13	2,44	-2,82
DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	-72,73	-0,56	-0,75	-3,73	-2,91	2,52	0,13	2,52	-2,91
DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	-72,73	-0,54	-0,72	-3,63	-2,83	2,45	0,13	2,44	-2,83
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-72,73	-0,57	-2,28	-3,80	-3,84	2,29	1,21	1,94	-3,84
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-72,73	-0,53	-2,14	-3,56	-3,60	2,14	1,13	1,82	-3,60
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-72,73	-0,54	-2,17	-3,62	-3,65	2,17	1,15	1,84	-3,65
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-72,73	-0,57	-2,29	-3,82	-3,85	2,30	1,21	1,95	-3,85
DDD	-0,150	-0,600	-1,000	28,1	-72,73	-0,55	-2,20	-3,67	-3,71	2,21	1,17	1,87	-3,71
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-72,73	-0,50	-3,18	-3,34	-4,05	2,26	1,89	1,23	-4,05
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-72,73	-0,51	-3,22	-3,38	-4,10	2,28	1,92	1,24	-4,10
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-72,73	-0,49	-3,09	-3,25	-3,94	2,19	1,84	1,19	-3,94
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-72,73	-0,47	-2,98	-3,14	-3,80	2,12	1,78	1,15	-3,80
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,44	0,00	0,00	-1,08	-0,63	0,89	0,00	0,89	-0,63
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,44	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,44	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,44	0,00	0,00	-1,01	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,44	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,44	0,00	0,00	-0,90	-0,52	0,73	0,00	0,73	-0,52
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-83,44	-0,10	-0,41	-2,05	-1,48	1,48	0,22	1,46	-1,48
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-83,44	-0,09	-0,38	-1,92	-1,39	1,39	0,20	1,38	-1,39
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-83,44	-0,10	-0,41	-2,06	-1,48	1,49	0,22	1,47	-1,48
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-83,44	-0,10	-0,39	-1,96	-1,41	1,41	0,21	1,40	-1,41
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-83,44	-0,10	-0,39	-1,97	-1,42	1,43	0,21	1,41	-1,42
DDD	-0,050	-0,200	-1,000	51,6	-83,44	-0,10	-0,42	-2,11	-1,52	1,53	0,22	1,51	-1,52
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-83,44	-0,10	-1,27	-2,12	-2,02	1,43	0,82	1,17	-2,02
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-83,44	-0,11	-1,30	-2,17	-2,06	1,46	0,84	1,20	-2,06
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-83,44	-0,09	-1,08	-1,81	-1,72	1,22	0,70	1,00	-1,72
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-83,44	-0,10	-1,19	-1,99	-1,90	1,34	0,78	1,10	-1,90
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-83,44	-0,10	-1,21	-2,02	-1,92	1,36	0,78	1,11	-1,92
DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	-83,44	-0,11	-1,34	-2,23	-2,13	1,51	0,87	1,23	-2,13
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-83,44	-0,09	-1,83	-1,92	-2,22	1,46	1,23	0,79	-2,22
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-83,44	-0,09	-1,77	-1,87	-2,15	1,41	1,19	0,76	-2,15
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-83,44	-0,10	-1,88	-1,98	-2,29	1,50	1,26	0,81	-2,29
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-83,44	-0,09	-1,75	-1,85	-2,13	1,40	1,18	0,75	-2,13
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-83,44	-0,09	-1,76	-1,86	-2,14	1,40	1,18	0,76	-2,14
DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	-83,44	-0,09	-1,70	-1,79	-2,07	1,35	1,14	0,73	-2,07
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-83,44	-0,28	-0,57	-2,84	-2,13	1,98	0,20	1,97	-2,13
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-83,44	-0,28	-0,55	-2,77	-2,08	1,94	0,20	1,93	-2,08
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-83,44	-0,27	-0,54	-2,72	-2,04	1,90	0,19	1,89	-2,04
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-83,44	-0,26	-0,51	-2,58	-1,93	1,80	0,18	1,79	-1,93
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-83,44	-0,26	-0,53	-2,66	-2,00	1,86	0,19	1,85	-2,00
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-83,44	-0,29	-0,58	-2,89	-2,17	2,02	0,20	2,01	-2,17
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-83,44	-0,29	-1,72	-2,88	-2,82	1,83	1,02	1,53	-2,82
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-83,44	-0,26	-1,57	-2,62	-2,57	1,67	0,93	1,39	-2,57
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-83,44	-0,28	-1,70	-2,84	-2,78	1,81	1,00	1,51	-2,78
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-83,44	-0,28	-1,66	-2,76	-2,71	1,76	0,98	1,47	-2,71
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-83,44	-0,28	-1,68	-2,81	-2,76	1,79	0,99	1,49	-2,76
DDD	-0,100	-0,600	-1,000	26,3	-83,44	-0,30	-1,81	-3,01	-2,95	1,92	1,06	1,60	-2,95
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-83,44	-0,25	-2,43	-2,56	-3,03	1,83	1,54	0,99	-3,03
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-83,44	-0,26	-2,50	-2,63	-3,11	1,88	1,58	1,02	-3,11
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-83,44	-0,26	-2,50	-2,63	-3,11	1,88	1,58	1,02	-3,11
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-83,44	-0,24	-2,27	-2,40	-2,83	1,71	1,44	0,93	-2,83
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-83,44	-0,25	-2,40	-2,52	-2,99	1,81	1,52	0,98	-2,99
DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	-83,44	-0,25	-2,37	-2,50	-2,96	1,79	1,50	0,97	-2,96
DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	-83,44	-0,53	-0,70	-3,51	-2,74	2,37	0,12	2,37	-2,74
DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	-83,44	-0,51	-3,22	-3,39	-4,11	2,29	1,92	1,25	-4,11

Hussein [44]

- Probekörper: Scheibe 15 cm × 15 cm × 4 cm
- Wichtung: Mittelwert aus 3 Einzelwerten

Tabelle B.10: Versuchswerte von Hussein [44]

SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-42,40	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-42,40	0,00	-0,25	-1,22	-0,85	0,91	0,17	0,90	-0,85
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-42,40	0,00	-0,66	-1,31	-1,14	0,93	0,47	0,80	-1,14
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-42,40	0,00	-1,19	-1,19	-1,37	0,97	0,84	0,48	-1,37
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-42,40	0,02	0,00	-0,91	-0,51	0,75	0,02	0,75	-0,51
ZD	0,048	0,000	-1,000	57,7	-42,40	0,04	0,00	-0,77	-0,42	0,65	0,03	0,65	-0,42
ZD	0,070	0,000	-1,000	56,6	-42,40	0,04	0,00	-0,59	-0,32	0,50	0,03	0,50	-0,32
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-42,40	0,05	0,00	-0,52	-0,27	0,45	0,04	0,44	-0,27
ZD	0,190	0,000	-1,000	51,5	-42,40	0,06	0,00	-0,33	-0,16	0,30	0,04	0,30	-0,16
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-42,40	0,08	0,00	0,00	0,04	0,06	0,06	0,03	0,04
ZZ	1,000	0,500	0,000	30,0	-42,40	0,08	0,04	0,00	0,07	0,06	0,03	0,05	0,07
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-42,40	0,08	0,08	0,00	0,09	0,06	0,00	0,06	0,09
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-73,65	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-73,65	0,00	-0,26	-1,22	-0,85	0,91	0,18	0,89	-0,85
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-73,65	0,00	-0,67	-1,32	-1,15	0,94	0,47	0,81	-1,15
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-73,65	0,00	-1,14	-1,14	-1,32	0,93	0,81	0,47	-1,32
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-73,65	0,02	0,00	-0,73	-0,41	0,60	0,01	0,60	-0,41
ZD	0,048	0,000	-1,000	57,7	-73,65	0,02	0,00	-0,53	-0,29	0,45	0,02	0,45	-0,29
ZD	0,070	0,000	-1,000	56,6	-73,65	0,03	0,00	-0,38	-0,20	0,32	0,02	0,32	-0,20
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-73,65	0,03	0,00	-0,34	-0,17	0,29	0,02	0,29	-0,17
ZD	0,190	0,000	-1,000	51,5	-73,65	0,04	0,00	-0,20	-0,09	0,19	0,03	0,18	-0,09
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-73,65	0,06	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
ZZ	1,000	0,500	0,000	30,0	-73,65	0,06	0,03	0,00	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-73,65	0,05	0,05	0,00	0,06	0,04	0,00	0,04	0,06
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-96,54	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-96,54	0,00	-0,25	-1,24	-0,87	0,93	0,18	0,91	-0,87
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-96,54	0,00	-0,68	-1,35	-1,17	0,96	0,48	0,83	-1,17
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-96,54	0,00	-1,09	-1,09	-1,26	0,89	0,77	0,45	-1,26
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-96,54	0,02	0,00	-0,66	-0,37	0,54	0,01	0,54	-0,37
ZD	0,048	0,000	-1,000	57,7	-96,54	0,02	0,00	-0,46	-0,25	0,38	0,02	0,38	-0,25
ZD	0,070	0,000	-1,000	56,6	-96,54	0,02	0,00	-0,32	-0,17	0,27	0,02	0,27	-0,17
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-96,54	0,03	0,00	-0,30	-0,16	0,26	0,02	0,26	-0,16
ZD	0,190	0,000	-1,000	51,5	-96,54	0,04	0,00	-0,19	-0,09	0,18	0,03	0,17	-0,09
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-96,54	0,05	0,00	0,00	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03
ZZ	1,000	0,500	0,000	30,0	-96,54	0,05	0,03	0,00	0,05	0,04	0,02	0,03	0,05
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-96,54	0,05	0,05	0,00	0,06	0,04	0,00	0,04	0,06

Kless [51]

- Probekörper: Würfel 15 cm × 15 cm × 15 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.11: Versuchswerte von Kless [51]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,00	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
ZZD	0,050	0,050	-1,000	60,0	-41,56	0,04	0,04	-0,75	-0,39	0,64	0,00	0,64	-0,39
ZZD	0,087	0,087	-1,000	60,0	-40,52	0,05	0,05	-0,55	-0,26	0,49	0,00	0,49	-0,26
ZZD	0,087	0,087	-1,000	60,0	-43,17	0,05	0,05	-0,56	-0,27	0,50	0,00	0,50	-0,27
ZZD	0,175	0,175	-1,000	60,0	-40,25	0,05	0,05	-0,28	-0,11	0,27	0,00	0,27	-0,11
ZZD	0,175	0,175	-1,000	60,0	-41,56	0,05	0,05	-0,31	-0,11	0,29	0,00	0,29	-0,11
ZZD	0,175	0,175	-1,000	60,0	-44,00	0,06	0,06	-0,32	-0,12	0,31	0,00	0,31	-0,12
ZZD	0,263	0,263	-1,000	60,0	-40,52	0,06	0,06	-0,22	-0,06	0,22	0,00	0,22	-0,06
ZZD	0,263	0,263	-1,000	60,0	-43,17	0,06	0,06	-0,22	-0,06	0,23	0,00	0,23	-0,06
ZZD	0,300	0,300	-1,000	60,0	-41,56	0,06	0,06	-0,20	-0,05	0,21	0,00	0,21	-0,05
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-40,00	0,07	0,07	0,00	0,08	0,06	0,00	0,06	0,08

Kulik [56]

- Probekörper: Würfel 6 cm × 6 cm × 6 cm
- Wichtung: Mittelwert aus 5 Einzelwerten

Tabelle B.12: Versuchswerte von Kulik [56]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-15,90	0,10	0,00	0,00	0,06	0,08	0,07	0,04	0,06
ZZ	1,000	0,250	0,000	13,9	-15,90	0,09	0,02	0,00	0,07	0,07	0,05	0,05	0,07
ZZ	1,000	0,450	0,000	26,7	-15,90	0,09	0,04	0,00	0,07	0,06	0,03	0,05	0,07
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-15,90	0,07	0,07	0,00	0,08	0,06	0,00	0,06	0,08
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-15,70	0,12	0,00	0,00	0,07	0,10	0,08	0,05	0,07
ZZ	1,000	0,250	0,000	13,9	-15,70	0,11	0,03	0,00	0,08	0,08	0,06	0,06	0,08
ZZ	1,000	0,450	0,000	26,7	-15,70	0,10	0,05	0,00	0,09	0,07	0,04	0,06	0,09
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-15,70	0,09	0,09	0,00	0,10	0,07	0,00	0,07	0,10
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-28,20	0,09	0,00	0,00	0,05	0,08	0,07	0,04	0,05
ZZ	1,000	0,250	0,000	13,9	-28,20	0,09	0,02	0,00	0,07	0,07	0,05	0,05	0,07
ZZ	1,000	0,450	0,000	26,7	-28,20	0,09	0,04	0,00	0,08	0,07	0,04	0,05	0,08
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-28,20	0,09	0,09	0,00	0,10	0,07	0,00	0,07	0,10
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-23,70	0,12	0,00	0,00	0,07	0,09	0,08	0,05	0,07
ZZ	1,000	0,250	0,000	13,9	-23,70	0,11	0,03	0,00	0,08	0,08	0,06	0,06	0,08
ZZ	1,000	0,450	0,000	26,7	-23,70	0,11	0,05	0,00	0,09	0,08	0,04	0,07	0,09
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-23,70	0,10	0,10	0,00	0,12	0,08	0,00	0,08	0,12
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-30,60	0,10	0,00	0,00	0,06	0,08	0,07	0,04	0,06
ZZ	1,000	0,250	0,000	13,9	-30,60	0,09	0,02	0,00	0,07	0,07	0,05	0,05	0,07
ZZ	1,000	0,450	0,000	26,7	-30,60	0,09	0,04	0,00	0,07	0,06	0,03	0,05	0,07
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-30,60	0,07	0,07	0,00	0,08	0,06	0,00	0,06	0,08
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-41,40	0,09	0,00	0,00	0,05	0,08	0,07	0,04	0,05
ZZ	1,000	0,250	0,000	13,9	-41,40	0,09	0,02	0,00	0,07	0,07	0,05	0,05	0,07
ZZ	1,000	0,450	0,000	26,7	-41,40	0,09	0,04	0,00	0,07	0,06	0,03	0,05	0,07
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-41,40	0,08	0,08	0,00	0,09	0,06	0,00	0,06	0,09
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-55,50	0,08	0,00	0,00	0,05	0,07	0,06	0,03	0,05
ZZ	1,000	0,250	0,000	13,9	-55,50	0,08	0,02	0,00	0,06	0,06	0,04	0,04	0,06
ZZ	1,000	0,450	0,000	26,7	-55,50	0,08	0,04	0,00	0,07	0,06	0,03	0,05	0,07
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-55,50	0,07	0,07	0,00	0,08	0,06	0,00	0,06	0,08

Kupfer [57]

- Probekörper: Scheibe 20 cm × 20 cm × 5 cm
- Wichtung: Mittelwert aus 3 Einzelwerten

Tabelle B.13: Versuchswerte von Kupfer [57]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-19,10	0,00	-1,18	-1,18	-1,36	0,96	0,83	0,48	-1,36
DD	0,000	-0,520	-1,000	28,7	-19,10	0,00	-0,66	-1,27	-1,11	0,90	0,47	0,77	-1,11
DD	0,000	-0,220	-1,000	47,9	-19,10	0,00	-0,28	-1,25	-0,88	0,93	0,19	0,91	-0,88
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-19,10	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
ZD	0,052	0,000	-1,000	57,5	-19,20	0,05	0,00	-0,94	-0,51	0,78	0,03	0,78	-0,51
ZD	0,070	0,000	-1,000	56,6	-19,20	0,06	0,00	-0,86	-0,46	0,72	0,04	0,72	-0,46
ZD	0,103	0,000	-1,000	55,2	-19,20	0,07	0,00	-0,73	-0,38	0,63	0,05	0,62	-0,38
ZD	0,202	0,000	-1,000	51,0	-19,20	0,09	0,00	-0,43	-0,20	0,39	0,06	0,38	-0,20
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-19,20	0,10	0,00	0,00	0,06	0,09	0,07	0,04	0,06
ZZ	1,000	0,230	0,000	12,7	-16,90	0,13	0,03	0,00	0,09	0,09	0,07	0,06	0,09
ZZ	1,000	0,540	0,000	32,6	-16,90	0,13	0,07	0,00	0,11	0,09	0,04	0,08	0,11
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-16,90	0,12	0,12	0,00	0,14	0,10	0,00	0,10	0,14
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-32,40	0,00	-1,15	-1,15	-1,33	0,94	0,81	0,47	-1,33
DD	0,000	-0,520	-1,000	28,7	-32,40	0,00	-0,64	-1,24	-1,09	0,88	0,46	0,75	-1,09
DD	0,000	-0,220	-1,000	47,9	-32,40	0,00	-0,26	-1,19	-0,84	0,88	0,19	0,86	-0,84
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-32,40	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
ZD	0,052	0,000	-1,000	57,5	-32,30	0,04	0,00	-0,85	-0,47	0,71	0,03	0,71	-0,47
ZD	0,070	0,000	-1,000	56,6	-32,30	0,05	0,00	-0,77	-0,41	0,65	0,04	0,65	-0,41
ZD	0,103	0,000	-1,000	55,2	-32,30	0,06	0,00	-0,62	-0,32	0,54	0,05	0,53	-0,32
ZD	0,202	0,000	-1,000	51,0	-32,30	0,07	0,00	-0,37	-0,17	0,34	0,05	0,33	-0,17
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-32,30	0,09	0,00	0,00	0,05	0,07	0,06	0,04	0,05
ZZ	1,000	0,230	0,000	12,7	-29,10	0,11	0,03	0,00	0,08	0,08	0,06	0,05	0,08
ZZ	1,000	0,540	0,000	32,6	-29,10	0,10	0,06	0,00	0,09	0,07	0,03	0,07	0,09
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-29,10	0,10	0,10	0,00	0,12	0,08	0,00	0,08	0,12
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-61,90	0,00	-1,15	-1,15	-1,33	0,94	0,81	0,47	-1,33
DD	0,000	-0,520	-1,000	28,7	-61,90	0,00	-0,67	-1,29	-1,13	0,91	0,47	0,78	-1,13
DD	0,000	-0,220	-1,000	47,9	-61,90	0,00	-0,27	-1,23	-0,87	0,91	0,19	0,89	-0,87
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-61,90	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
ZD	0,052	0,000	-1,000	57,5	-60,00	0,04	0,00	-0,76	-0,42	0,64	0,03	0,64	-0,42
ZD	0,070	0,000	-1,000	56,6	-60,00	0,04	0,00	-0,62	-0,33	0,52	0,03	0,52	-0,33
ZD	0,103	0,000	-1,000	55,2	-60,00	0,05	0,00	-0,44	-0,23	0,38	0,03	0,38	-0,23
ZD	0,202	0,000	-1,000	51,0	-60,00	0,06	0,00	-0,30	-0,14	0,27	0,04	0,27	-0,14
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-60,00	0,09	0,00	0,00	0,05	0,07	0,06	0,04	0,05
ZZ	1,000	0,230	0,000	12,7	-55,00	0,10	0,02	0,00	0,07	0,07	0,05	0,05	0,07
ZZ	1,000	0,540	0,000	32,6	-55,00	0,09	0,05	0,00	0,08	0,06	0,03	0,06	0,08
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-55,00	0,09	0,09	0,00	0,11	0,08	0,00	0,08	0,11

Lee [65]

- Probekörper: Scheibe 20 cm × 20 cm × 6 cm
- Wichtung: Mittelwert aus 4 Einzelwerten

Tabelle B.14: Versuchswerte von Lee [65]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-39,00	0,00	-1,17	-1,17	-1,35	0,96	0,83	0,48	-1,35
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-39,00	0,00	-0,64	-1,28	-1,11	0,91	0,45	0,78	-1,11
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-39,00	0,00	-0,25	-1,25	-0,87	0,94	0,18	0,92	-0,87
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-39,00	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-39,00	0,04	0,00	-0,81	-0,44	0,68	0,03	0,67	-0,44
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-39,00	0,06	0,00	-0,59	-0,31	0,51	0,04	0,50	-0,31
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-39,00	0,08	0,00	-0,38	-0,18	0,34	0,05	0,34	-0,18
ZD	0,300	0,000	-1,000	47,3	-39,00	0,08	0,00	-0,26	-0,10	0,25	0,05	0,24	-0,10
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-39,00	0,11	0,00	0,00	0,06	0,09	0,08	0,04	0,06
ZZ	1,000	0,200	0,000	10,9	-39,00	0,12	0,02	0,00	0,08	0,09	0,07	0,06	0,08
ZZ	1,000	0,500	0,000	30,0	-39,00	0,11	0,05	0,00	0,09	0,07	0,04	0,06	0,09

Fortsetzung Tabelle B.14: Versuchswerte von Lee [65]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-39,00	0,08	0,08	0,00	0,09	0,07	0,00	0,07	0,09
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,30	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-30,30	0,00	-0,25	-1,27	-0,88	0,95	0,18	0,93	-0,88
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-30,30	0,00	-0,67	-1,33	-1,15	0,94	0,47	0,81	-1,15
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,30	0,00	-1,16	-1,16	-1,34	0,95	0,82	0,48	-1,34
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-30,30	0,04	0,00	-0,82	-0,45	0,69	0,03	0,69	-0,45
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-30,30	0,05	0,00	-0,48	-0,25	0,41	0,03	0,41	-0,25
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-30,30	0,06	0,00	-0,32	-0,15	0,29	0,04	0,28	-0,15
ZD	0,300	0,000	-1,000	47,3	-30,30	0,07	0,00	-0,23	-0,09	0,22	0,05	0,22	-0,09
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-30,30	0,10	0,00	0,00	0,06	0,08	0,07	0,04	0,06
ZZ	1,000	0,200	0,000	10,9	-30,30	0,10	0,02	0,00	0,07	0,07	0,06	0,05	0,07
ZZ	1,000	0,500	0,000	30,0	-30,30	0,10	0,05	0,00	0,09	0,07	0,04	0,06	0,09
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-30,30	0,10	0,10	0,00	0,11	0,08	0,00	0,08	0,11

Liang [66]

- Probekörper: Würfel 10 cm × 10 cm × 10 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.15: Versuchswerte von Liang [66]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
ZZD	0,109	0,100	-1,000	59,6	-47,35	0,03	0,02	-0,24	-0,11	0,22	0,00	0,22	-0,11
ZZD	0,107	0,096	-1,000	59,5	-47,35	0,02	0,02	-0,22	-0,10	0,20	0,00	0,20	-0,10
ZZD	0,051	0,049	-1,000	59,9	-47,35	0,01	0,01	-0,28	-0,15	0,24	0,00	0,24	-0,15
ZZD	0,054	0,052	-1,000	59,9	-47,35	0,01	0,01	-0,26	-0,13	0,22	0,00	0,22	-0,13
ZZD	0,148	0,147	-1,000	59,9	-47,35	0,04	0,04	-0,30	-0,12	0,28	0,00	0,28	-0,12
ZZD	0,156	0,149	-1,000	59,7	-47,35	0,04	0,04	-0,25	-0,10	0,23	0,00	0,23	-0,10
ZZD	0,221	0,201	-1,000	59,2	-47,35	0,04	0,04	-0,20	-0,07	0,20	0,00	0,20	-0,07
ZZD	0,208	0,196	-1,000	59,5	-47,35	0,03	0,03	-0,16	-0,06	0,16	0,00	0,16	-0,06
ZZD	0,253	0,247	-1,000	59,8	-47,35	0,04	0,04	-0,17	-0,05	0,17	0,00	0,17	-0,05
ZZD	0,291	0,289	-1,000	60,0	-47,35	0,05	0,05	-0,17	-0,04	0,18	0,00	0,18	-0,04
ZZD	0,308	0,299	-1,000	59,7	-47,35	0,04	0,04	-0,15	-0,03	0,15	0,00	0,15	-0,03
ZZD	0,079	0,079	-1,000	60,0	-47,35	0,02	0,02	-0,31	-0,15	0,27	0,00	0,27	-0,15
ZZD	0,044	0,041	-1,000	59,9	-47,35	0,02	0,02	-0,38	-0,20	0,32	0,00	0,32	-0,20
ZZD	0,210	0,208	-1,000	59,9	-47,35	0,03	0,03	-0,16	-0,05	0,16	0,00	0,16	-0,05
ZZD	0,296	0,103	-1,000	52,1	-47,35	0,07	0,02	-0,23	-0,08	0,23	0,03	0,23	-0,08
ZZD	0,481	0,097	-1,000	45,5	-47,35	0,07	0,01	-0,15	-0,04	0,17	0,04	0,16	-0,04
ZZD	0,174	0,171	-1,000	59,9	-47,35	0,03	0,03	-0,15	-0,06	0,14	0,00	0,14	-0,06
ZZD	0,296	0,110	-1,000	52,4	-47,35	0,05	0,02	-0,15	-0,05	0,15	0,02	0,15	-0,05
ZZD	0,022	0,022	-1,000	60,0	-47,35	0,01	0,01	-0,33	-0,18	0,28	0,00	0,28	-0,18
ZZD	0,097	0,097	-1,000	60,0	-47,35	0,02	0,02	-0,25	-0,12	0,23	0,00	0,23	-0,12
ZZD	0,202	0,199	-1,000	59,9	-47,35	0,05	0,05	-0,25	-0,09	0,25	0,00	0,25	-0,09
ZZD	0,025	0,025	-1,000	60,0	-47,35	0,01	0,01	-0,41	-0,22	0,34	0,00	0,34	-0,22
ZZD	0,496	0,494	-1,000	59,9	-47,35	0,06	0,06	-0,12	0,00	0,14	0,00	0,14	0,00
ZZD	0,545	0,504	-1,000	58,7	-47,35	0,05	0,05	-0,10	0,00	0,12	0,00	0,12	0,00
ZZD	0,298	0,286	-1,000	59,5	-47,35	0,06	0,06	-0,21	-0,05	0,22	0,00	0,22	-0,05
ZZD	0,125	0,106	-1,000	59,2	-29,61	0,03	0,03	-0,28	-0,12	0,25	0,00	0,25	-0,12
ZZD	0,112	0,101	-1,000	59,5	-29,61	0,03	0,03	-0,28	-0,13	0,26	0,00	0,26	-0,13
ZZD	0,152	0,138	-1,000	59,4	-29,61	0,06	0,05	-0,38	-0,16	0,36	0,00	0,36	-0,16
ZZD	0,104	0,092	-1,000	59,5	-29,61	0,03	0,03	-0,27	-0,13	0,24	0,00	0,24	-0,13
ZZD	0,052	0,049	-1,000	59,9	-29,61	0,02	0,02	-0,38	-0,20	0,33	0,00	0,33	-0,20
ZZD	0,185	0,165	-1,000	59,1	-29,61	0,04	0,04	-0,24	-0,09	0,23	0,00	0,23	-0,09
ZZD	0,189	0,188	-1,000	59,9	-29,61	0,05	0,05	-0,25	-0,09	0,24	0,00	0,24	-0,09
ZZD	0,052	0,047	-1,000	59,8	-29,61	0,03	0,02	-0,49	-0,26	0,42	0,00	0,42	-0,26
ZZD	0,050	0,050	-1,000	60,0	-29,61	0,03	0,03	-0,53	-0,27	0,45	0,00	0,45	-0,27
ZZD	0,142	0,141	-1,000	60,0	-29,61	0,03	0,03	-0,24	-0,10	0,22	0,00	0,22	-0,10
ZZD	0,143	0,137	-1,000	59,7	-29,61	0,04	0,04	-0,26	-0,11	0,25	0,00	0,25	-0,11
ZZD	0,046	0,041	-1,000	59,8	-29,61	0,02	0,01	-0,34	-0,18	0,29	0,00	0,29	-0,18
ZZD	0,048	0,046	-1,000	59,9	-29,61	0,02	0,02	-0,47	-0,25	0,40	0,00	0,40	-0,25
ZZD	0,169	0,164	-1,000	59,8	-29,61	0,04	0,04	-0,22	-0,08	0,21	0,00	0,21	-0,08
ZZD	0,210	0,194	-1,000	59,4	-29,61	0,03	0,03	-0,14	-0,05	0,14	0,00	0,14	-0,05
ZZD	0,095	0,094	-1,000	60,0	-29,61	0,03	0,03	-0,34	-0,16	0,30	0,00	0,30	-0,16
ZZD	0,146	0,137	-1,000	59,6	-29,61	0,05	0,04	-0,31	-0,13	0,29	0,00	0,29	-0,13
ZZD	0,246	0,244	-1,000	59,9	-29,61	0,04	0,04	-0,17	-0,05	0,18	0,00	0,18	-0,05
ZZD	0,253	0,238	-1,000	59,4	-29,61	0,04	0,04	-0,16	-0,05	0,16	0,00	0,16	-0,05
ZZD	0,255	0,249	-1,000	59,7	-29,61	0,04	0,04	-0,15	-0,04	0,16	0,00	0,16	-0,04
ZZZ	1,000	1,000	0,522	60,0	-53,43	0,05	0,05	0,03	0,07	0,02	0,00	0,02	0,07

Fortsetzung Tabelle B.15: Versuchswerte von Liang [66]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
ZZZ	1,000	0,995	0,512	59,5	-53,43	0,05	0,05	0,03	0,08	0,02	0,00	0,02	0,08
ZZZ	1,000	0,998	0,997	26,3	-53,43	0,05	0,05	0,05	0,09	0,00	0,00	0,00	0,09
ZZZ	1,000	0,994	0,984	37,3	-53,43	0,04	0,04	0,04	0,07	0,00	0,00	0,00	0,07
ZZZ	1,000	0,979	0,979	0,0	-53,43	0,06	0,05	0,05	0,09	0,00	0,00	0,00	0,09
ZZZ	1,000	0,984	0,983	4,5	-53,43	0,06	0,06	0,06	0,11	0,00	0,00	0,00	0,11

Linse & Aschl [70]

- Probekörper: Würfel 10 cm × 10 cm × 10 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.16: Versuchswerte von Linse & Aschl [70]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-43,20	0,07	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
ZZD	0,067	-0,505	-1,000	27,6	-39,50	0,03	-0,24	-0,47	-0,39	0,36	0,19	0,30	-0,39
ZZD	0,069	-0,248	-1,000	43,2	-43,60	0,03	-0,12	-0,48	-0,33	0,37	0,11	0,35	-0,33
ZDD	0,022	-0,503	-1,000	29,1	-43,60	0,01	-0,26	-0,52	-0,45	0,38	0,19	0,32	-0,45
ZDD	0,031	-0,249	-1,000	44,8	-41,80	0,02	-0,16	-0,66	-0,46	0,49	0,13	0,48	-0,46
ZDD	0,031	-0,252	-1,000	44,6	-43,60	0,02	-0,18	-0,69	-0,49	0,52	0,14	0,50	-0,49
ZDD	0,028	-0,467	-1,000	31,2	-39,20	0,02	-0,29	-0,62	-0,51	0,45	0,22	0,39	-0,51
ZDD	0,117	-0,659	-1,000	17,3	-47,90	0,02	-0,09	-0,14	-0,12	0,11	0,08	0,08	-0,12
ZDD	0,132	-0,881	-1,000	5,5	-44,30	0,03	-0,19	-0,21	-0,21	0,19	0,15	0,11	-0,21
ZDD	0,051	-0,494	-1,000	28,8	-39,20	0,01	-0,09	-0,18	-0,15	0,13	0,07	0,11	-0,15
ZDD	0,113	-0,628	-1,000	19,2	-47,90	0,01	-0,07	-0,11	-0,10	0,09	0,06	0,07	-0,10
ZDD	0,344	-0,511	-1,000	21,1	-41,80	0,01	-0,01	-0,03	-0,02	0,03	0,02	0,02	-0,02
ZDD	0,398	-0,498	-1,000	20,8	-41,80	0,04	-0,05	-0,10	-0,06	0,10	0,06	0,07	-0,06
ZZD	0,284	0,277	-1,000	59,7	-43,60	0,02	0,02	-0,08	-0,02	0,08	0,00	0,08	-0,02
ZZD	0,331	0,321	-1,000	59,6	-43,60	0,03	0,03	-0,08	-0,02	0,08	0,00	0,08	-0,02

Linse & Aschl [71]

- Probekörper: Würfel 10 cm × 10 cm × 10 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.17: Versuchswerte von Linse & Aschl [71]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,80	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,80	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,80	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,81	0,00	0,81	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,80	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,80	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,80	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,330	-1,000	41,1	-30,80	0,00	-0,44	-1,35	-1,03	0,97	0,31	0,92	-1,03
DD	0,000	-0,330	-1,000	41,1	-30,80	0,00	-0,43	-1,30	-1,00	0,94	0,30	0,89	-1,00
DD	0,000	-0,330	-1,000	41,1	-30,80	0,00	-0,42	-1,26	-0,97	0,91	0,29	0,86	-0,97
DD	0,000	-0,330	-1,000	41,1	-30,80	0,00	-0,43	-1,31	-1,00	0,94	0,31	0,89	-1,00
DD	0,000	-0,330	-1,000	41,1	-30,80	0,00	-0,41	-1,23	-0,94	0,89	0,29	0,84	-0,94
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,80	0,00	-0,92	-1,37	-1,32	0,99	0,65	0,74	-1,32
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,80	0,00	-0,90	-1,34	-1,29	0,96	0,63	0,73	-1,29

Fortsetzung Tabelle B.17: Versuchswerte von Linse & Aschl [71]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,80	0,00	-0,91	-1,36	-1,31	0,98	0,65	0,74	-1,31
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,80	0,00	-0,92	-1,38	-1,33	0,99	0,65	0,75	-1,33
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,80	0,00	-0,83	-1,23	-1,19	0,89	0,58	0,67	-1,19
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,80	0,00	-0,98	-1,46	-1,41	1,06	0,69	0,80	-1,41
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,80	0,00	-1,15	-1,15	-1,32	0,94	0,81	0,47	-1,32
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,80	0,00	-1,05	-1,05	-1,21	0,86	0,74	0,43	-1,21
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,80	0,00	-1,10	-1,10	-1,27	0,90	0,78	0,45	-1,27
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,80	0,00	-1,28	-1,28	-1,48	1,05	0,91	0,52	-1,48
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,80	0,00	-1,10	-1,10	-1,27	0,90	0,78	0,45	-1,27
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,80	0,00	-1,26	-1,26	-1,46	1,03	0,89	0,52	-1,46
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-35,00	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-35,00	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DDD	-0,060	-0,070	-1,000	59,5	-35,00	-0,09	-0,11	-1,52	-0,99	1,16	0,01	1,16	-0,99
DDD	-0,060	-0,090	-1,000	58,4	-35,00	-0,11	-0,16	-1,79	-1,19	1,36	0,04	1,36	-1,19
DDD	-0,060	-0,100	-1,000	57,8	-35,00	-0,11	-0,19	-1,89	-1,27	1,42	0,05	1,42	-1,27
DDD	-0,070	-0,100	-1,000	58,4	-35,00	-0,13	-0,18	-1,82	-1,23	1,36	0,04	1,36	-1,23
DDD	-0,080	-0,260	-1,000	49,4	-35,00	-0,16	-0,53	-2,05	-1,59	1,41	0,26	1,39	-1,59
DDD	-0,060	-0,500	-1,000	32,1	-35,00	-0,12	-1,00	-2,00	-1,80	1,33	0,62	1,18	-1,80
DDD	-0,070	-0,500	-1,000	32,5	-35,00	-0,20	-1,44	-2,88	-2,61	1,90	0,88	1,68	-2,61
DDD	-0,090	-0,090	-1,000	60,0	-35,00	-0,15	-0,15	-1,71	-1,17	1,27	0,00	1,27	-1,17
DDD	-0,090	-0,090	-1,000	60,0	-35,00	-0,15	-0,15	-1,71	-1,17	1,27	0,00	1,27	-1,17
DDD	-0,100	-0,100	-1,000	60,0	-35,00	-0,19	-0,19	-1,92	-1,33	1,41	0,00	1,41	-1,33
DDD	-0,100	-0,100	-1,000	60,0	-35,00	-0,19	-0,19	-1,92	-1,33	1,41	0,00	1,41	-1,33
DDD	-0,120	-0,120	-1,000	60,0	-35,00	-0,27	-0,27	-2,28	-1,63	1,64	0,00	1,64	-1,63
DDD	-0,120	-0,120	-1,000	60,0	-35,00	-0,27	-0,27	-2,28	-1,63	1,64	0,00	1,64	-1,63
DDD	-0,140	-0,140	-1,000	60,0	-35,00	-0,39	-0,39	-2,77	-2,05	1,95	0,00	1,95	-2,05
DDD	-0,110	-0,220	-1,000	53,5	-35,00	-0,29	-0,58	-2,63	-2,02	1,81	0,20	1,80	-2,02
DDD	-0,100	-0,240	-1,000	51,7	-35,00	-0,25	-0,59	-2,46	-1,90	1,68	0,24	1,67	-1,90
DDD	-0,100	-0,260	-1,000	50,4	-35,00	-0,27	-0,71	-2,75	-2,16	1,86	0,31	1,84	-2,16
DDD	-0,090	-0,490	-1,000	34,0	-35,00	-0,24	-1,28	-2,61	-2,38	1,68	0,74	1,51	-2,38
DDD	-0,090	-0,540	-1,000	30,4	-35,00	-0,24	-1,43	-2,65	-2,49	1,70	0,84	1,48	-2,49
DDD	-0,130	-0,510	-1,000	34,2	-35,00	-0,52	-2,04	-3,99	-3,78	2,46	1,07	2,22	-3,78
DDD	-0,150	-1,000	-1,000	0,0	-35,00	-0,44	-2,94	-2,94	-3,65	2,04	1,77	1,02	-3,65
DDD	-0,160	-1,000	-1,000	0,0	-35,00	-0,47	-2,94	-2,94	-3,67	2,02	1,75	1,01	-3,67
DDD	-0,190	-0,190	-1,000	60,0	-35,00	-0,73	-0,73	-3,85	-3,07	2,55	0,00	2,55	-3,07
DDD	-0,200	-0,200	-1,000	60,0	-35,00	-0,56	-0,56	-2,80	-2,27	1,83	0,00	1,83	-2,27
DDD	-0,220	-0,940	-1,000	4,0	-35,00	-0,57	-2,45	-2,61	-3,25	1,60	1,33	0,89	-3,25
DDD	-0,200	-1,000	-1,000	0,0	-35,00	-0,52	-2,61	-2,61	-3,31	1,70	1,47	0,85	-3,31

Liu [72]

- Probekörper: Würfel 10 cm × 10 cm × 10 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.18: Versuchswerte von Liu [72]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-55,20	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DDD	-0,120	-0,120	-1,000	60,0	-55,20	-0,33	-0,33	-2,73	-1,96	1,96	0,00	1,96	-1,96
DDD	-0,120	-0,120	-1,000	60,0	-55,20	-0,31	-0,31	-2,59	-1,85	1,86	0,00	1,86	-1,85
DDD	-0,120	-0,120	-1,000	60,0	-55,20	-0,31	-0,31	-2,56	-1,83	1,84	0,00	1,84	-1,83
DDD	-0,150	-0,150	-1,000	60,0	-55,20	-0,42	-0,42	-2,77	-2,08	1,92	0,00	1,92	-2,08
DDD	-0,150	-0,150	-1,000	60,0	-55,20	-0,43	-0,43	-2,86	-2,15	1,99	0,00	1,99	-2,15
DDD	-0,210	-0,210	-1,000	60,0	-55,20	-0,91	-0,91	-4,31	-3,53	2,78	0,00	2,78	-3,53
DDD	-0,210	-0,210	-1,000	60,0	-55,20	-0,86	-0,86	-4,09	-3,36	2,64	0,00	2,64	-3,36
DDD	-0,210	-0,210	-1,000	60,0	-55,20	-0,91	-0,91	-4,31	-3,53	2,78	0,00	2,78	-3,53
DDD	-0,210	-0,210	-1,000	60,0	-55,20	-0,89	-0,89	-4,24	-3,48	2,73	0,00	2,73	-3,48
DDD	-0,235	-0,235	-1,000	60,0	-55,20	-1,13	-1,13	-4,80	-4,07	3,00	0,00	3,00	-4,07
DDD	-0,235	-0,235	-1,000	60,0	-55,20	-1,15	-1,15	-4,89	-4,15	3,06	0,00	3,06	-4,15
DDD	-0,250	-0,250	-1,000	60,0	-55,20	-1,81	-1,81	-7,23	-6,26	4,43	0,00	4,43	-6,26
DDD	-0,250	-0,250	-1,000	60,0	-55,20	-1,86	-1,86	-7,43	-6,43	4,55	0,00	4,55	-6,43
DDD	-0,300	-0,300	-1,000	60,0	-55,20	-2,68	-2,68	-8,95	-8,27	5,11	0,00	5,11	-8,27
DDD	-0,300	-0,300	-1,000	60,0	-55,20	-2,45	-2,45	-8,15	-7,53	4,66	0,00	4,66	-7,53
DDD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	0,00	-1,05	-1,05	-1,21	0,86	0,74	0,43	-1,21
DDD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	0,00	-1,22	-1,22	-1,41	0,99	0,86	0,50	-1,41
DDD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	0,00	-1,15	-1,15	-1,33	0,94	0,81	0,47	-1,33
DDD	-0,127	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-0,33	-2,61	-2,61	-3,20	1,86	1,61	0,93	-3,20
DDD	-0,127	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-0,34	-2,64	-2,65	-3,25	1,89	1,63	0,94	-3,25

Fortsetzung Tabelle B.18: Versuchswerte von Liu [72]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,127	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-0,30	-2,34	-2,34	-2,87	1,67	1,44	0,83	-2,87
DDD	-0,150	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-0,58	-3,84	-3,84	-4,77	2,67	2,31	1,33	-4,77
DDD	-0,150	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-0,63	-4,17	-4,17	-5,17	2,89	2,50	1,45	-5,17
DDD	-0,200	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-0,76	-3,80	-3,80	-4,83	2,48	2,15	1,24	-4,83
DDD	-0,200	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-0,86	-4,28	-4,28	-5,43	2,79	2,42	1,40	-5,43
DDD	-0,200	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-0,86	-4,31	-4,31	-5,48	2,82	2,44	1,41	-5,48
DDD	-0,250	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-1,81	-7,23	-7,23	-9,39	4,43	3,83	2,21	-9,39
DDD	-0,250	-1,000	-1,000	0,0	-55,20	-1,68	-6,70	-6,70	-8,71	4,10	3,55	2,05	-8,71
DDD	-0,100	-0,550	-1,000	30,0	-55,20	-0,26	-1,43	-2,60	-2,48	1,66	0,83	1,43	-2,48
DDD	-0,100	-0,550	-1,000	30,0	-55,20	-0,23	-1,29	-2,34	-2,23	1,49	0,74	1,29	-2,23
DDD	-0,100	-0,550	-1,000	30,0	-55,20	-0,28	-1,55	-2,82	-2,69	1,79	0,90	1,55	-2,69
DDD	-0,150	-0,575	-1,000	30,0	-55,20	-0,54	-2,08	-3,62	-3,60	2,18	1,09	1,88	-3,60
DDD	-0,150	-0,575	-1,000	30,0	-55,20	-0,55	-2,13	-3,70	-3,68	2,22	1,11	1,92	-3,68
DDD	-0,150	-0,575	-1,000	30,0	-55,20	-0,59	-2,25	-3,91	-3,90	2,35	1,18	2,04	-3,90
DDD	-0,200	-0,600	-1,000	30,0	-55,20	-0,85	-2,54	-4,24	-4,41	2,40	1,20	2,08	-4,41
DDD	-0,200	-0,600	-1,000	30,0	-55,20	-0,88	-2,65	-4,42	-4,59	2,50	1,25	2,17	-4,59
DDD	-0,200	-0,600	-1,000	30,0	-55,20	-0,91	-2,72	-4,53	-4,71	2,56	1,28	2,22	-4,71
DDD	-0,100	-0,300	-1,000	47,8	-55,20	-0,25	-0,75	-2,50	-2,02	1,67	0,35	1,64	-2,02
DDD	-0,100	-0,300	-1,000	47,8	-55,20	-0,25	-0,76	-2,52	-2,04	1,68	0,36	1,64	-2,04
DDD	-0,100	-0,300	-1,000	47,8	-55,20	-0,24	-0,71	-2,37	-1,92	1,59	0,34	1,55	-1,92
DDD	-0,200	-0,300	-1,000	53,4	-55,20	-0,91	-1,36	-4,53	-3,92	2,79	0,32	2,77	-3,92
DDD	-0,200	-0,300	-1,000	53,4	-55,20	-0,91	-1,36	-4,53	-3,92	2,79	0,32	2,77	-3,92
DDD	-0,200	-0,300	-1,000	53,4	-55,20	-0,79	-1,18	-3,95	-3,42	2,43	0,28	2,42	-3,42
DDD	-0,150	-0,750	-1,000	16,6	-55,20	-0,53	-2,65	-3,53	-3,88	2,18	1,50	1,59	-3,88
ZDD	0,101	-0,997	-1,000	0,2	-55,20	0,03	-0,32	-0,32	-0,35	0,29	0,25	0,15	-0,35
ZDD	0,097	-0,920	-1,000	3,7	-55,20	0,03	-0,32	-0,35	-0,36	0,30	0,25	0,17	-0,36
ZDD	0,069	-0,657	-1,000	18,3	-55,20	0,03	-0,33	-0,50	-0,46	0,38	0,26	0,29	-0,46
ZDD	0,193	-0,992	-1,000	0,4	-55,20	0,04	-0,21	-0,22	-0,22	0,21	0,18	0,11	-0,22
ZDD	0,197	-0,966	-1,000	1,4	-55,20	0,04	-0,19	-0,20	-0,20	0,19	0,16	0,10	-0,20
ZDD	0,198	-0,991	-1,000	0,4	-55,20	0,04	-0,18	-0,18	-0,19	0,17	0,15	0,09	-0,19
ZDD	0,301	-0,974	-1,000	1,0	-55,20	0,05	-0,16	-0,17	-0,16	0,17	0,15	0,09	-0,16
ZDD	0,305	-0,956	-1,000	1,7	-55,20	0,05	-0,16	-0,17	-0,16	0,17	0,15	0,09	-0,16
ZDD	0,156	-0,986	-1,000	0,6	-55,20	0,03	-0,16	-0,17	-0,18	0,16	0,13	0,08	-0,18
ZDD	0,195	-0,363	-1,000	32,2	-55,20	0,06	-0,12	-0,32	-0,21	0,27	0,13	0,24	-0,21
ZDD	0,196	-0,391	-1,000	30,6	-55,20	0,05	-0,09	-0,23	-0,16	0,19	0,10	0,17	-0,16
ZDD	0,220	-0,391	-1,000	29,9	-55,20	0,06	-0,10	-0,26	-0,18	0,22	0,11	0,19	-0,18
ZDD	0,097	-0,438	-1,000	30,8	-55,20	0,04	-0,18	-0,40	-0,31	0,31	0,15	0,27	-0,31
ZDD	0,094	-0,451	-1,000	30,1	-55,20	0,04	-0,18	-0,40	-0,32	0,31	0,16	0,27	-0,32
ZDD	0,100	-0,459	-1,000	29,5	-55,20	0,03	-0,12	-0,27	-0,21	0,21	0,11	0,18	-0,21
ZDD	0,447	-0,343	-1,000	27,0	-55,20	0,05	-0,04	-0,12	-0,06	0,12	0,07	0,10	-0,06
ZDD	0,429	-0,300	-1,000	29,3	-55,20	0,06	-0,04	-0,14	-0,07	0,15	0,07	0,13	-0,07
ZDD	0,108	-0,998	-1,000	0,1	-55,20	0,04	-0,35	-0,35	-0,38	0,32	0,27	0,16	-0,38
ZDD	0,199	-0,988	-1,000	0,5	-55,20	0,04	-0,18	-0,19	-0,19	0,18	0,16	0,09	-0,19
ZDD	0,286	-0,946	-1,000	2,1	-55,20	0,05	-0,17	-0,17	-0,17	0,18	0,15	0,10	-0,17
ZDD	0,856	-0,398	-1,000	18,5	-55,20	0,09	-0,04	-0,10	-0,03	0,14	0,09	0,10	-0,03
ZDD	0,103	-0,440	-1,000	30,5	-55,20	0,04	-0,18	-0,41	-0,32	0,32	0,16	0,28	-0,32
ZDD	0,204	-0,398	-1,000	30,0	-55,20	0,04	-0,08	-0,20	-0,14	0,17	0,08	0,15	-0,14
ZDD	0,051	-0,993	-1,000	0,3	-55,20	0,02	-0,47	-0,47	-0,53	0,40	0,35	0,20	-0,53
ZDD	0,058	-0,999	-1,000	0,0	-55,20	0,03	-0,48	-0,48	-0,54	0,42	0,36	0,21	-0,54
ZDD	0,441	-0,297	-1,000	29,2	-55,20	0,05	-0,03	-0,12	-0,06	0,12	0,06	0,10	-0,06
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-55,20	0,08	0,00	0,00	0,05	0,06	0,06	0,03	0,05
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-33,70	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DDD	-0,100	-0,100	-1,000	60,0	-33,70	-0,28	-0,28	-2,82	-1,96	2,08	0,00	2,08	-1,96
DDD	-0,100	-0,100	-1,000	60,0	-33,70	-0,29	-0,29	-2,91	-2,01	2,14	0,00	2,14	-2,01
DDD	-0,100	-0,100	-1,000	60,0	-33,70	-0,25	-0,25	-2,47	-1,71	1,81	0,00	1,81	-1,71
DDD	-0,150	-0,150	-1,000	60,0	-33,70	-0,62	-0,62	-4,12	-3,10	2,86	0,00	2,86	-3,10
DDD	-0,150	-0,150	-1,000	60,0	-33,70	-0,60	-0,60	-3,98	-2,98	2,76	0,00	2,76	-2,98
DDD	-0,200	-0,200	-1,000	60,0	-33,70	-0,95	-0,95	-4,74	-3,83	3,10	0,00	3,10	-3,83
DDD	-0,200	-0,200	-1,000	60,0	-33,70	-1,01	-1,01	-5,04	-4,08	3,30	0,00	3,30	-4,08
DDD	-0,200	-0,200	-1,000	60,0	-33,70	-1,11	-1,11	-5,53	-4,47	3,61	0,00	3,61	-4,47
DDD	-0,200	-0,200	-1,000	60,0	-33,70	-1,07	-1,07	-5,34	-4,31	3,49	0,00	3,49	-4,31
DDD	-0,250	-0,250	-1,000	60,0	-33,70	-3,18	-3,18	-12,73	-11,02	7,80	0,00	7,80	-11,02
DDD	-0,250	-0,250	-1,000	60,0	-33,70	-2,55	-2,55	-10,21	-8,84	6,25	0,00	6,25	-8,84
DDD	-0,250	-0,250	-1,000	60,0	-33,70	-2,54	-2,54	-10,15	-8,79	6,21	0,00	6,21	-8,79
DDD	-0,300	-0,300	-1,000	60,0	-33,70	-3,83	-3,83	-12,76	-11,79	7,29	0,00	7,29	-11,79
DDD	-0,300	-0,300	-1,000	60,0	-33,70	-3,69	-3,69	-12,31	-11,37	7,03	0,00	7,03	-11,37
DDD	-0,300	-0,300	-1,000	60,0	-33,70	-4,63	-4,63	-15,43	-14,25	8,82	0,00	8,82	-14,25
DDD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	0,00	-1,16	-1,16	-1,34	0,95	0,82	0,47	-1,34
DDD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	0,00	-1,19	-1,19	-1,37	0,97	0,84	0,48	-1,37
DDD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	0,00	-1,14	-1,14	-1,32	0,93	0,81	0,47	-1,32
DDD	-0,100	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-0,32	-3,20	-3,20	-3,89	2,35	2,04	1,18	-3,89
DDD	-0,100	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-0,29	-2,85	-2,85	-3,46	2,10	1,82	1,05	-3,46
DDD	-0,100	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-0,26	-2,60	-2,60	-3,15	1,91	1,65	0,96	-3,15
DDD	-0,100	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-0,28	-2,80	-2,80	-3,39	2,05	1,78	1,03	-3,39
DDD	-0,150	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-0,85	-5,64	-5,64	-7,00	3,91	3,39	1,96	-7,00
DDD	-0,150	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-0,76	-5,09	-5,09	-6,31	3,53	3,06	1,77	-6,31
DDD	-0,200	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-1,10	-5,49	-5,49	-6,97	3,59	3,11	1,79	-6,97
DDD	-0,200	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-1,22	-6,11	-6,11	-7,76	3,99	3,46	2,00	-7,76
DDD	-0,200	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-1,26	-6,29	-6,29	-7,99	4,11	3,56	2,05	-7,99
DDD	-0,250	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-2,60	-10,39	-10,39	-13,49	6,36	5,51	3,18	-13,49
DDD	-0,250	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	-2,67	-10,68	-10,68	-13,88	6,54	5,67	3,27	-13,88
DDD	-0,100	-0,550	-1,000	30,0	-33,70	-0,40	-2,18	-3,96	-3,78	2,52	1,26	2,18	-3,78
DDD	-0,100	-0,550	-1,000	30,0	-33,70	-0,38	-2,09	-3,80	-3,62	2,42	1,21	2,09	-3,62
DDD	-0,100	-0,550	-1,000	30,0	-33,70	-0,37	-2,06	-3,74	-3,57	2,38	1,19	2,06	-3,57
DDD	-0,150	-0,575	-1,000	30,0	-33,70	-0,98	-3,75	-6,53	-6,50	3,92	1,96	3,40	-6,50

Fortsetzung Tabelle B.18: Versuchswerte von Liu [72]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,150	-0,575	-1,000	30,0	-33,70	-0,88	-3,39	-5,90	-5,88	3,55	1,77	3,07	-5,88
DDD	-0,200	-0,600	-1,000	30,0	-33,70	-1,95	-5,86	-9,77	-10,16	5,53	2,76	4,79	-10,16
DDD	-0,200	-0,600	-1,000	30,0	-33,70	-1,66	-4,99	-8,31	-8,63	4,70	2,35	4,07	-8,63
DDD	-0,200	-0,600	-1,000	30,0	-33,70	-1,77	-5,31	-8,84	-9,19	5,00	2,50	4,33	-9,19
DDD	-0,100	-0,300	-1,000	47,8	-33,70	-0,37	-1,12	-3,72	-3,01	2,49	0,53	2,43	-3,01
DDD	-0,100	-0,300	-1,000	47,8	-33,70	-0,37	-1,10	-3,68	-2,97	2,46	0,52	2,40	-2,97
DDD	-0,150	-0,300	-1,000	50,5	-33,70	-0,71	-1,42	-4,72	-3,95	3,03	0,50	2,99	-3,95
DDD	-0,150	-0,750	-1,000	16,6	-33,70	-0,84	-4,19	-5,59	-6,13	3,45	2,37	2,51	-6,13
DDD	-0,150	-0,750	-1,000	16,6	-33,70	-0,81	-4,06	-5,41	-5,94	3,34	2,30	2,43	-5,94
ZDD	0,096	-0,990	-1,000	0,5	-33,70	0,03	-0,31	-0,31	-0,34	0,28	0,24	0,14	-0,34
ZDD	0,100	-0,999	-1,000	0,1	-33,70	0,04	-0,45	-0,45	-0,49	0,40	0,35	0,20	-0,49
ZDD	0,102	-0,970	-1,000	1,4	-33,70	0,02	-0,23	-0,23	-0,25	0,21	0,18	0,11	-0,25
ZDD	0,104	-0,996	-1,000	0,2	-33,70	0,03	-0,30	-0,31	-0,33	0,27	0,24	0,14	-0,33
ZDD	0,211	-0,994	-1,000	0,3	-33,70	0,06	-0,27	-0,27	-0,28	0,27	0,23	0,14	-0,28
ZDD	0,187	-0,951	-1,000	2,1	-33,70	0,05	-0,27	-0,29	-0,29	0,27	0,23	0,14	-0,29
ZDD	0,195	-0,989	-1,000	0,4	-33,70	0,05	-0,27	-0,27	-0,28	0,27	0,23	0,13	-0,28
ZDD	0,270	-0,908	-1,000	3,7	-33,70	0,06	-0,19	-0,21	-0,20	0,21	0,17	0,12	-0,20
ZDD	0,307	-0,990	-1,000	0,4	-33,70	0,06	-0,18	-0,19	-0,18	0,20	0,17	0,10	-0,18
ZDD	0,299	-0,972	-1,000	1,1	-33,70	0,06	-0,21	-0,21	-0,21	0,23	0,19	0,12	-0,21
ZDD	0,109	-0,446	-1,000	30,0	-33,70	0,06	-0,24	-0,54	-0,42	0,42	0,21	0,37	-0,42
ZDD	0,100	-0,441	-1,000	30,6	-33,70	0,05	-0,24	-0,53	-0,41	0,42	0,20	0,36	-0,41
ZDD	0,102	-0,447	-1,000	30,1	-33,70	0,06	-0,25	-0,56	-0,44	0,44	0,22	0,38	-0,44
ZDD	0,208	-0,403	-1,000	29,6	-33,70	0,08	-0,15	-0,37	-0,25	0,31	0,16	0,27	-0,25
ZDD	0,208	-0,418	-1,000	28,8	-33,70	0,06	-0,13	-0,30	-0,21	0,26	0,13	0,22	-0,21
ZDD	0,188	-0,376	-1,000	31,7	-33,70	0,05	-0,11	-0,29	-0,20	0,24	0,12	0,21	-0,20
ZDD	0,365	-0,250	-1,000	33,3	-33,70	0,08	-0,06	-0,23	-0,12	0,22	0,10	0,20	-0,12
ZDD	0,390	-0,302	-1,000	30,2	-33,70	0,07	-0,06	-0,18	-0,10	0,18	0,09	0,16	-0,10
ZDD	0,398	-0,274	-1,000	31,3	-33,70	0,10	-0,07	-0,26	-0,13	0,26	0,12	0,22	-0,13
ZDD	0,051	-0,988	-1,000	0,6	-33,70	0,03	-0,53	-0,53	-0,60	0,45	0,39	0,23	-0,60
ZDD	0,072	-0,988	-1,000	0,5	-33,70	0,03	-0,40	-0,40	-0,45	0,35	0,30	0,18	-0,45
ZDD	0,208	-0,971	-1,000	1,2	-33,70	0,06	-0,29	-0,30	-0,31	0,29	0,25	0,15	-0,31
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-33,70	0,10	0,00	0,00	0,06	0,08	0,07	0,04	0,06

Mahmood & Hannant [77]

- Probekörper: Zylinder 10,2 cm × 61 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.19: Versuchswerte von Mahmood & Hannant [77]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
ZDD	0,215	-1,000	-1,000	0,0	-22,20	0,08	-0,38	-0,38	-0,39	0,38	0,33	0,19	-0,39
ZDD	0,047	-1,000	-1,000	0,0	-25,20	0,04	-0,91	-0,91	-1,03	0,78	0,68	0,39	-1,03
ZDD	0,215	-1,000	-1,000	0,0	-22,30	0,08	-0,52	-0,52	-0,55	0,49	0,42	0,24	-0,55
ZDD	0,071	-1,000	-1,000	0,0	-29,60	0,05	-0,71	-0,71	-0,79	0,62	0,54	0,31	-0,79
ZDD	0,036	-1,000	-1,000	0,0	-27,50	0,03	-0,89	-0,89	-1,01	0,75	0,65	0,38	-1,01
ZDD	0,239	-1,000	-1,000	0,0	-24,90	0,07	-0,29	-0,29	-0,30	0,29	0,26	0,15	-0,30
ZDD	0,101	-1,000	-1,000	0,0	-31,10	0,05	-0,53	-0,53	-0,58	0,48	0,41	0,24	-0,58
ZDD	0,073	-1,000	-1,000	0,0	-31,10	0,05	-0,66	-0,66	-0,74	0,58	0,50	0,29	-0,74
ZDD	0,049	-1,000	-1,000	0,0	-31,10	0,04	-0,81	-0,81	-0,91	0,69	0,60	0,35	-0,91
ZDD	0,094	-1,000	-1,000	0,0	-32,50	0,06	-0,62	-0,62	-0,68	0,55	0,48	0,27	-0,68
ZDD	0,054	-1,000	-1,000	0,0	-32,50	0,04	-0,76	-0,76	-0,85	0,65	0,56	0,33	-0,85
ZDD	0,048	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	0,03	-0,70	-0,70	-0,79	0,60	0,52	0,30	-0,79
ZDD	0,077	-1,000	-1,000	0,0	-33,70	0,05	-0,60	-0,60	-0,66	0,52	0,45	0,26	-0,66

Mills & Zimmermann [82]

- Probekörper: Würfel 5,72 cm × 5,72 cm × 5,72 cm
- Wichtung: Mittelwert aus 5 Einzelwerten

Tabelle B.20: Versuchswerte von Mills & Zimmermann [82]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-23,03	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,83	0,00	0,83	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-23,03	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-23,03	0,00	0,00	-1,16	-0,67	0,95	0,00	0,95	-0,67
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-23,03	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-23,03	0,00	0,00	-0,95	-0,55	0,77	0,00	0,77	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-23,03	0,00	0,00	-0,92	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
DD	0,000	-0,917	-1,000	4,3	-23,03	0,00	-1,15	-1,26	-1,39	0,99	0,82	0,56	-1,39
DD	0,000	-0,833	-1,000	8,9	-23,03	0,00	-1,05	-1,26	-1,33	0,95	0,74	0,60	-1,33
DD	0,000	-0,923	-1,000	4,0	-23,03	0,00	-1,26	-1,36	-1,51	1,07	0,89	0,60	-1,51
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-23,03	0,00	-0,75	-1,26	-1,16	0,90	0,53	0,72	-1,16
DD	0,000	-0,481	-1,000	31,3	-23,03	0,00	-0,75	-1,57	-1,34	1,11	0,53	0,97	-1,34
DD	0,000	-0,480	-1,000	31,3	-23,03	0,00	-0,75	-1,57	-1,34	1,11	0,53	0,98	-1,34
DD	0,000	-0,369	-1,000	38,6	-23,03	0,00	-0,50	-1,36	-1,08	0,97	0,36	0,91	-1,08
DD	0,000	-0,346	-1,000	40,1	-23,03	0,00	-0,50	-1,45	-1,13	1,04	0,36	0,98	-1,13
DD	0,000	-0,328	-1,000	41,2	-23,03	0,00	-0,50	-1,53	-1,18	1,11	0,36	1,05	-1,18
DD	0,000	-0,171	-1,000	50,8	-23,03	0,00	-0,25	-1,47	-0,99	1,11	0,18	1,10	-0,99
DD	0,000	-0,164	-1,000	51,2	-23,03	0,00	-0,25	-1,53	-1,03	1,16	0,18	1,15	-1,03
DD	0,000	-0,173	-1,000	50,7	-23,03	0,00	-0,25	-1,46	-0,99	1,10	0,18	1,09	-0,99
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-26,92	0,00	0,00	-1,02	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-26,92	0,00	0,00	-0,99	-0,57	0,81	0,00	0,81	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-26,92	0,00	0,00	-0,83	-0,48	0,68	0,00	0,68	-0,48
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-26,92	0,00	0,00	-1,11	-0,64	0,91	0,00	0,91	-0,64
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-26,92	0,00	0,00	-1,03	-0,60	0,84	0,00	0,84	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-26,92	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,947	-1,000	2,7	-26,92	0,00	-1,61	-1,70	-1,91	1,36	1,14	0,73	-1,91
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-26,92	0,00	-1,61	-1,61	-1,86	1,32	1,14	0,66	-1,86
DD	0,000	-0,450	-1,000	33,3	-26,92	0,00	-0,81	-1,79	-1,50	1,27	0,57	1,13	-1,50
DD	0,000	-0,409	-1,000	36,0	-26,92	0,00	-0,81	-1,97	-1,60	1,40	0,57	1,28	-1,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-36,10	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-36,10	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-36,10	0,00	0,00	-0,92	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-36,10	0,00	0,00	-0,83	-0,48	0,68	0,00	0,68	-0,48
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-36,10	0,00	0,00	-1,05	-0,61	0,86	0,00	0,86	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-36,10	0,00	0,00	-1,13	-0,65	0,92	0,00	0,92	-0,65
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-36,10	0,00	-1,40	-1,40	-1,62	1,15	0,99	0,57	-1,62
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-36,10	0,00	-1,00	-1,00	-1,16	0,82	0,71	0,41	-1,16
DD	0,000	-0,455	-1,000	33,0	-36,10	0,00	-0,67	-1,47	-1,24	1,04	0,47	0,93	-1,24
DD	0,000	-0,476	-1,000	31,6	-36,10	0,00	-0,67	-1,40	-1,20	0,99	0,47	0,87	-1,20
DDD	-0,109	-0,109	-1,000	60,0	-23,03	-0,25	-0,25	-2,31	-1,62	1,68	0,00	1,68	-1,62
DDD	-0,114	-0,114	-1,000	60,0	-23,03	-0,25	-0,25	-2,20	-1,56	1,59	0,00	1,59	-1,56
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-23,03	-0,25	-0,50	-2,51	-1,89	1,75	0,18	1,75	-1,89
DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	-23,03	-0,25	-0,50	-2,51	-1,89	1,75	0,18	1,75	-1,89
DDD	-0,109	-0,327	-1,000	46,4	-23,03	-0,25	-0,75	-2,31	-1,91	1,51	0,36	1,47	-1,91
DDD	-0,092	-0,277	-1,000	48,9	-23,03	-0,25	-0,75	-2,72	-2,15	1,85	0,36	1,81	-2,15
DDD	-0,089	-0,356	-1,000	43,5	-23,03	-0,25	-1,01	-2,83	-2,36	1,87	0,53	1,80	-2,36
DDD	-0,086	-0,429	-1,000	38,2	-23,03	-0,25	-1,26	-2,93	-2,57	1,92	0,71	1,78	-2,57
DDD	-0,086	-0,514	-1,000	32,1	-23,03	-0,25	-1,51	-2,93	-2,71	1,90	0,89	1,68	-2,71
DDD	-0,096	-0,672	-1,000	21,0	-23,03	-0,25	-1,76	-2,62	-2,67	1,70	1,07	1,32	-2,67
DDD	-0,102	-0,842	-1,000	9,5	-23,03	-0,25	-2,08	-2,47	-2,77	1,67	1,29	1,06	-2,77
DDD	-0,057	-1,000	-1,000	0,0	-23,03	-0,13	-2,20	-2,20	-2,61	1,69	1,47	0,85	-2,61
DDD	-0,113	-0,875	-1,000	7,5	-23,03	-0,38	-2,93	-3,35	-3,85	2,28	1,81	1,39	-3,85
DDD	-0,138	-0,138	-1,000	60,0	-23,03	-0,38	-0,38	-2,72	-2,01	1,92	0,00	1,92	-2,01
DDD	-0,120	-0,200	-1,000	55,3	-23,03	-0,38	-0,63	-3,14	-2,40	2,16	0,18	2,16	-2,40
DDD	-0,109	-0,255	-1,000	51,2	-23,03	-0,38	-0,88	-3,46	-2,72	2,34	0,36	2,31	-2,72
DDD	-0,109	-0,327	-1,000	46,4	-23,03	-0,38	-1,13	-3,46	-2,87	2,27	0,53	2,21	-2,87
DDD	-0,113	-0,413	-1,000	40,6	-23,03	-0,38	-1,38	-3,35	-2,95	2,14	0,71	2,02	-2,95
DDD	-0,106	-0,459	-1,000	36,9	-23,03	-0,38	-1,63	-3,56	-3,22	2,27	0,89	2,09	-3,22
DDD	-0,106	-0,529	-1,000	31,7	-23,03	-0,38	-1,89	-3,56	-3,36	2,25	1,07	1,98	-3,36
DDD	-0,106	-0,600	-1,000	26,5	-23,03	-0,38	-2,14	-3,56	-3,51	2,26	1,24	1,88	-3,51
DDD	-0,107	-0,684	-1,000	20,4	-23,03	-0,38	-2,42	-3,54	-3,66	2,27	1,44	1,75	-3,66
DDD	-0,103	-0,741	-1,000	16,3	-23,03	-0,37	-2,64	-3,56	-3,79	2,33	1,61	1,68	-3,79
DDD	-0,120	-1,000	-1,000	0,0	-23,03	-0,38	-3,14	-3,14	-3,85	2,26	1,96	1,13	-3,85
DDD	-0,071	-0,071	-1,000	60,0	-23,03	-0,13	-0,13	-1,78	-1,17	1,35	0,00	1,35	-1,17
DDD	-0,055	-0,164	-1,000	53,9	-23,03	-0,13	-0,38	-2,31	-1,62	1,69	0,18	1,68	-1,62
DDD	-0,055	-0,281	-1,000	46,8	-23,03	-0,13	-0,65	-2,31	-1,78	1,61	0,37	1,57	-1,78
DDD	-0,050	-0,417	-1,000	37,5	-23,03	-0,13	-1,05	-2,51	-2,13	1,70	0,65	1,57	-2,13
DDD	-0,052	-0,365	-1,000	41,1	-23,03	-0,13	-0,88	-2,41	-1,97	1,65	0,53	1,56	-1,97
DDD	-0,050	-0,550	-1,000	28,3	-23,03	-0,13	-1,38	-2,51	-2,32	1,69	0,89	1,44	-2,32
DDD	-0,052	-0,671	-1,000	20,0	-23,03	-0,13	-1,62	-2,41	-2,40	1,64	1,05	1,26	-2,40
DDD	-0,052	-0,783	-1,000	12,6	-23,03	-0,13	-1,89	-2,41	-2,55	1,69	1,24	1,15	-2,55
DDD	-0,050	-0,851	-1,000	8,4	-23,03	-0,13	-2,14	-2,51	-2,76	1,82	1,42	1,13	-2,76
DDD	-0,055	-1,000	-1,000	0,0	-23,03	-0,13	-2,31	-2,31	-2,73	1,78	1,54	0,89	-2,73
DDD	-0,067	-0,067	-1,000	60,0	-23,03	-0,13	-0,13	-1,89	-1,23	1,44	0,00	1,44	-1,23
DDD	-0,136	-0,136	-1,000	60,0	-23,03	-0,38	-0,38	-2,77	-2,03	1,95	0,00	1,95	-2,03

Fortsetzung Tabelle B.20: Versuchswerte von Mills & Zimmermann [82]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,089	-0,979	-1,000	1,2	-23,03	-0,25	-2,77	-2,83	-3,38	2,08	1,78	1,08	-3,38
DDD	-0,012	-1,000	-1,000	0,0	-26,92	-0,02	-1,88	-1,88	-2,19	1,52	1,31	0,76	-2,19
DDD	-0,014	-1,030	-1,000	1,5	-26,92	-0,02	-1,70	-1,75	-2,01	1,39	1,19	0,73	-2,01
DDD	-0,023	-0,935	-1,000	3,4	-26,92	-0,05	-1,84	-1,97	-2,23	1,52	1,27	0,84	-2,23
DDD	-0,024	-1,000	-1,000	0,0	-26,92	-0,05	-1,88	-1,88	-2,20	1,50	1,30	0,75	-2,20
DDD	-0,046	-1,000	-1,000	0,0	-26,92	-0,11	-2,33	-2,33	-2,75	1,82	1,57	0,91	-2,75
DDD	-0,046	-1,000	-1,000	0,0	-26,92	-0,11	-2,33	-2,33	-2,75	1,82	1,57	0,91	-2,75
DDD	-0,035	-0,035	-1,000	60,0	-26,92	-0,05	-0,05	-1,54	-0,95	1,22	0,00	1,22	-0,95
DDD	-0,069	-0,069	-1,000	60,0	-26,92	-0,11	-0,11	-1,55	-1,02	1,18	0,00	1,18	-1,02
DDD	-0,086	-0,093	-1,000	59,6	-26,92	-0,18	-0,19	-2,09	-1,42	1,55	0,01	1,55	-1,42
DDD	-0,078	-0,085	-1,000	59,6	-26,92	-0,18	-0,19	-2,29	-1,54	1,71	0,01	1,71	-1,54
DDD	-0,102	-0,102	-1,000	60,0	-26,92	-0,27	-0,27	-2,65	-1,84	1,94	0,00	1,94	-1,84
DDD	-0,102	-0,102	-1,000	60,0	-26,92	-0,27	-0,27	-2,64	-1,84	1,94	0,00	1,94	-1,84
DDD	-0,025	-0,369	-1,000	39,6	-26,92	-0,05	-0,81	-2,19	-1,76	1,53	0,53	1,43	-1,76
DDD	-0,044	-0,547	-1,000	28,2	-26,92	-0,11	-1,34	-2,46	-2,26	1,66	0,87	1,41	-2,26
DDD	-0,024	-0,353	-1,000	40,6	-26,92	-0,05	-0,81	-2,29	-1,82	1,61	0,53	1,52	-1,82
DDD	-0,042	-0,421	-1,000	36,9	-26,92	-0,11	-1,08	-2,56	-2,16	1,74	0,68	1,60	-2,16
DDD	-0,013	-1,025	-1,000	1,2	-36,10	-0,02	-1,30	-1,34	-1,54	1,06	0,91	0,55	-1,54
DDD	-0,012	-1,028	-1,000	1,4	-36,10	-0,02	-1,43	-1,47	-1,68	1,17	1,00	0,61	-1,68
DDD	-0,020	-0,984	-1,000	0,8	-36,10	-0,03	-1,67	-1,70	-1,97	1,35	1,16	0,69	-1,97
DDD	-0,024	-0,989	-1,000	0,6	-36,10	-0,03	-1,40	-1,42	-1,65	1,12	0,97	0,57	-1,65
DDD	-0,042	-0,982	-1,000	0,9	-36,10	-0,08	-1,87	-1,91	-2,23	1,48	1,27	0,76	-2,23
DDD	-0,042	-0,975	-1,000	1,3	-36,10	-0,08	-1,85	-1,89	-2,20	1,46	1,25	0,76	-2,20
DDD	-0,027	-0,027	-1,000	60,0	-36,10	-0,04	-0,04	-1,51	-0,92	1,20	0,00	1,20	-0,92
DDD	-0,049	-0,049	-1,000	60,0	-36,10	-0,08	-0,08	-1,64	-1,04	1,28	0,00	1,28	-1,04
DDD	-0,023	-0,344	-1,000	41,2	-36,10	-0,04	-0,60	-1,75	-1,38	1,23	0,40	1,17	-1,38
DDD	-0,040	-0,397	-1,000	38,4	-36,10	-0,08	-0,80	-2,02	-1,68	1,39	0,51	1,29	-1,68
DDD	-0,075	-0,082	-1,000	59,7	-36,10	-0,13	-0,15	-1,77	-1,18	1,33	0,01	1,33	-1,18
DDD	-0,066	-0,066	-1,000	60,0	-36,10	-0,13	-0,13	-2,02	-1,32	1,54	0,00	1,54	-1,32
DDD	-0,022	-0,400	-1,000	37,5	-36,10	-0,04	-0,74	-1,84	-1,51	1,28	0,49	1,19	-1,51
DDD	-0,042	-0,421	-1,000	36,9	-36,10	-0,08	-0,80	-1,91	-1,61	1,30	0,51	1,20	-1,61
DDD	-0,053	-0,053	-1,000	60,0	-36,10	-0,08	-0,08	-1,51	-0,96	1,16	0,00	1,16	-0,96
DDD	-0,028	-0,028	-1,000	60,0	-36,10	-0,04	-0,04	-1,43	-0,87	1,14	0,00	1,14	-0,87

Nelissen [84]

- Probekörper: Prisma 17,7 cm × 17,7 cm × 12 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.21: Versuchswerte von Nelissen [84]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-34,53	0,00	-1,15	-1,15	-1,33	0,94	0,82	0,47	-1,33
DD	0,000	-0,833	-1,000	9,0	-34,53	0,00	-1,12	-1,35	-1,42	1,02	0,79	0,64	-1,42
DD	0,000	-0,894	-1,000	5,5	-34,53	0,00	-0,99	-1,11	-1,21	0,86	0,70	0,50	-1,21
DD	0,000	-0,653	-1,000	20,0	-34,53	0,00	-0,89	-1,36	-1,30	0,98	0,63	0,75	-1,30
DD	0,000	-0,540	-1,000	27,4	-34,53	0,00	-0,74	-1,37	-1,22	0,97	0,52	0,82	-1,22
DD	0,000	-0,551	-1,000	26,6	-34,53	0,00	-0,73	-1,33	-1,19	0,94	0,52	0,78	-1,19
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-34,53	0,00	-0,49	-1,23	-0,99	0,88	0,35	0,80	-0,99
DD	0,000	-0,374	-1,000	38,3	-34,53	0,00	-0,42	-1,12	-0,89	0,80	0,30	0,75	-0,89
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-34,53	0,00	-0,23	-1,18	-0,81	0,88	0,16	0,87	-0,81
DD	0,000	-0,100	-1,000	54,8	-34,53	0,00	-0,10	-1,00	-0,64	0,78	0,07	0,78	-0,64
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-34,53	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
ZD	0,005	0,000	-1,000	59,8	-34,53	0,01	0,00	-0,93	-0,53	0,76	0,01	0,76	-0,53
ZD	0,001	0,000	-1,000	60,0	-34,53	0,01	0,00	-0,86	-0,49	0,70	0,00	0,70	-0,49
ZD	0,020	0,000	-1,000	59,0	-34,53	0,02	0,00	-0,79	-0,45	0,65	0,01	0,65	-0,45
ZD	0,040	0,000	-1,000	58,1	-34,53	0,02	0,00	-0,64	-0,36	0,53	0,01	0,53	-0,36
ZD	0,054	0,000	-1,000	57,4	-34,53	0,03	0,00	-0,52	-0,28	0,43	0,02	0,43	-0,28
ZD	0,115	0,000	-1,000	54,6	-34,53	0,04	0,00	-0,34	-0,17	0,30	0,03	0,29	-0,17
ZD	0,330	0,000	-1,000	46,2	-34,53	0,05	0,00	-0,15	-0,05	0,15	0,04	0,14	-0,05
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-34,53	0,05	0,00	-0,09	-0,03	0,10	0,03	0,10	-0,03
ZD	1,000	0,000	-1,000	30,0	-34,53	0,06	0,00	-0,06	0,00	0,08	0,04	0,07	0,00
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-34,53	0,05	0,00	0,00	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03
ZZ	1,000	0,264	0,000	14,8	-34,53	0,06	0,02	0,00	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04
ZZ	1,000	0,630	0,000	38,5	-34,53	0,05	0,03	0,00	0,04	0,03	0,01	0,03	0,04
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-34,53	0,06	0,06	0,00	0,07	0,05	0,00	0,05	0,07
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-25,02	0,00	-1,19	-1,19	-1,37	0,97	0,84	0,49	-1,37
DD	0,000	-0,900	-1,000	5,2	-25,02	0,00	-1,04	-1,15	-1,26	0,90	0,74	0,52	-1,26

Fortsetzung Tabelle B.21: Versuchswerte von Nelissen [84]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	-25,02	0,00	-0,94	-1,17	-1,22	0,88	0,66	0,58	-1,22
DD	0,000	-0,700	-1,000	17,0	-25,02	0,00	-0,87	-1,24	-1,22	0,90	0,61	0,66	-1,22
DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	-25,02	0,00	-0,82	-1,37	-1,27	0,98	0,58	0,79	-1,27
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-25,02	0,00	-0,66	-1,31	-1,14	0,93	0,47	0,80	-1,14
DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	-25,02	0,00	-0,51	-1,26	-1,02	0,90	0,36	0,83	-1,02
DD	0,000	-0,300	-1,000	43,0	-25,02	0,00	-0,37	-1,24	-0,93	0,90	0,26	0,86	-0,93
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-25,02	0,00	-0,23	-1,17	-0,81	0,87	0,16	0,86	-0,81
DD	0,000	-0,100	-1,000	54,8	-25,02	0,00	-0,10	-1,11	-0,70	0,87	0,07	0,86	-0,70
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-25,02	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
ZD	0,005	0,000	-1,000	59,8	-25,02	0,00	0,00	-0,87	-0,50	0,71	0,00	0,71	-0,50
ZD	0,040	0,000	-1,000	58,1	-25,02	0,03	0,00	-0,76	-0,42	0,64	0,02	0,64	-0,42
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-25,02	0,04	0,00	-0,39	-0,20	0,33	0,03	0,33	-0,20
ZD	0,200	0,000	-1,000	51,1	-25,02	0,06	0,00	-0,28	-0,13	0,26	0,04	0,25	-0,13
ZD	0,330	0,000	-1,000	46,2	-25,02	0,07	0,00	-0,20	-0,08	0,19	0,05	0,19	-0,08
ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	-25,02	0,08	0,00	-0,16	-0,05	0,17	0,05	0,16	-0,05
ZD	1,000	0,000	-1,000	30,0	-25,02	0,08	0,00	-0,08	0,00	0,11	0,06	0,10	0,00
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-25,02	0,08	0,00	0,00	0,04	0,06	0,05	0,03	0,04
ZZ	1,000	0,330	0,000	18,9	-25,02	0,08	0,03	0,00	0,06	0,06	0,04	0,04	0,06
ZZ	1,000	0,670	0,000	41,1	-25,02	0,08	0,05	0,00	0,08	0,06	0,02	0,05	0,08
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-25,02	0,07	0,07	0,00	0,08	0,06	0,00	0,06	0,08

Rogge [100]

- Probekörper: Zylinder 15 cm × 40 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.22: Versuchswerte von Rogge [100]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,123	-0,122	-1,000	60,0	-39,20	-0,28	-0,28	-2,28	-1,64	1,63	0,00	1,63	-1,64
DDD	-0,121	-0,121	-1,000	60,0	-39,20	-0,30	-0,30	-2,47	-1,77	1,77	0,00	1,77	-1,77
DDD	-0,097	-0,097	-1,000	60,0	-46,30	-0,18	-0,18	-1,84	-1,27	1,35	0,00	1,35	-1,27
DDD	-0,097	-0,097	-1,000	60,0	-46,30	-0,18	-0,18	-1,83	-1,26	1,35	0,00	1,35	-1,26
DDD	-0,147	-0,147	-1,000	60,0	-46,30	-0,39	-0,39	-2,63	-1,97	1,83	0,00	1,83	-1,97
DDD	-0,147	-0,147	-1,000	60,0	-46,30	-0,39	-0,39	-2,64	-1,97	1,84	0,00	1,84	-1,97
DDD	-0,165	-0,165	-1,000	60,0	-46,30	-0,50	-0,50	-3,03	-2,33	2,07	0,00	2,07	-2,33
DDD	-0,071	-0,071	-1,000	60,0	-46,30	-0,12	-0,12	-1,61	-1,06	1,22	0,00	1,22	-1,06
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,60	0,00	0,00	-1,01	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,60	0,00	0,00	-1,09	-0,63	0,89	0,00	0,89	-0,63
DDD	-0,161	-0,161	-1,000	60,0	-46,60	-0,52	-0,52	-3,26	-2,49	2,23	0,00	2,23	-2,49
DDD	-0,164	-0,164	-1,000	60,0	-46,60	-0,53	-0,53	-3,20	-2,46	2,19	0,00	2,19	-2,46
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,60	0,00	0,00	-1,14	-0,66	0,93	0,00	0,93	-0,66
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-46,60	0,00	0,00	-1,17	-0,67	0,95	0,00	0,95	-0,67
DDD	-0,124	-0,124	-1,000	60,0	-46,60	-0,31	-0,31	-2,47	-1,78	1,76	0,00	1,76	-1,78
DDD	-0,123	-0,123	-1,000	60,0	-46,60	-0,30	-0,30	-2,42	-1,74	1,74	0,00	1,74	-1,74
DDD	-0,073	-0,073	-1,000	60,0	-49,60	-0,13	-0,13	-1,84	-1,22	1,39	0,00	1,39	-1,22
DDD	-0,098	-0,098	-1,000	60,0	-49,60	-0,21	-0,21	-2,12	-1,46	1,56	0,00	1,56	-1,46
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-47,10	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-47,10	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
DDD	-0,147	-0,147	-1,000	60,0	-47,10	-0,46	-0,46	-3,14	-2,35	2,18	0,00	2,18	-2,35
DDD	-0,148	-0,147	-1,000	60,0	-47,10	-0,42	-0,42	-2,86	-2,14	1,99	0,00	1,99	-2,14
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-47,10	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-47,20	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
DDD	-0,148	-0,148	-1,000	60,0	-47,10	-0,45	-0,45	-3,03	-2,27	2,11	0,00	2,11	-2,27
DDD	-0,147	-0,147	-1,000	60,0	-47,10	-0,45	-0,45	-3,06	-2,29	2,14	0,00	2,14	-2,29
DDD	-0,098	-0,098	-1,000	60,0	-67,20	-0,19	-0,19	-1,96	-1,36	1,45	0,00	1,45	-1,36
DDD	-0,099	-0,099	-1,000	60,0	-67,20	-0,19	-0,19	-1,93	-1,34	1,42	0,00	1,42	-1,34
DDD	-0,123	-0,123	-1,000	60,0	-67,20	-0,28	-0,28	-2,27	-1,64	1,63	0,00	1,63	-1,64
DDD	-0,123	-0,123	-1,000	60,0	-67,20	-0,28	-0,28	-2,30	-1,66	1,65	0,00	1,65	-1,66
DDD	-0,074	-0,074	-1,000	60,0	-67,20	-0,13	-0,13	-1,74	-1,15	1,31	0,00	1,31	-1,15
DDD	-0,073	-0,073	-1,000	60,0	-67,20	-0,13	-0,13	-1,74	-1,15	1,32	0,00	1,32	-1,15
DDD	-0,127	-0,127	-1,000	60,0	-78,40	-0,29	-0,29	-2,25	-1,63	1,61	0,00	1,61	-1,63
DDD	-0,129	-0,129	-1,000	60,0	-78,40	-0,30	-0,30	-2,32	-1,68	1,65	0,00	1,65	-1,68
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-78,40	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-78,40	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
DDD	-0,124	-0,124	-1,000	60,0	-78,40	-0,29	-0,29	-2,31	-1,66	1,65	0,00	1,65	-1,66
DDD	-0,123	-0,123	-1,000	60,0	-78,40	-0,28	-0,28	-2,26	-1,63	1,62	0,00	1,62	-1,63
DDD	-0,048	-0,048	-1,000	60,0	-78,40	-0,07	-0,07	-1,51	-0,95	1,17	0,00	1,17	-0,95

Fortsetzung Tabelle B.22: Versuchswerte von Rogge [100]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,049	-0,049	-1,000	60,0	-78,40	-0,07	-0,07	-1,47	-0,93	1,14	0,00	1,14	-0,93
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-78,40	0,00	0,00	-0,82	-0,47	0,67	0,00	0,67	-0,47
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-78,40	0,00	0,00	-0,93	-0,54	0,76	0,00	0,76	-0,54
DDD	-0,124	-0,124	-1,000	60,0	-78,40	-0,27	-0,27	-2,19	-1,58	1,57	0,00	1,57	-1,58
DDD	-0,123	-0,123	-1,000	60,0	-78,40	-0,27	-0,27	-2,16	-1,55	1,55	0,00	1,55	-1,55
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-83,10	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
DDD	-0,071	-0,071	-1,000	60,0	-104,10	-0,11	-0,11	-1,51	-1,00	1,15	0,00	1,15	-1,00
DDD	-0,075	-0,075	-1,000	60,0	-104,10	-0,11	-0,11	-1,45	-0,97	1,10	0,00	1,10	-0,97
DDD	-0,074	-0,074	-1,000	60,0	-104,10	-0,12	-0,12	-1,61	-1,07	1,22	0,00	1,22	-1,07
DDD	-0,087	-0,087	-1,000	60,0	-104,10	-0,14	-0,14	-1,62	-1,10	1,21	0,00	1,21	-1,10
DDD	-0,074	-0,074	-1,000	60,0	-104,10	-0,12	-0,12	-1,63	-1,08	1,23	0,00	1,23	-1,08
DDD	-0,084	-0,084	-1,000	60,0	-104,10	-0,14	-0,14	-1,67	-1,13	1,25	0,00	1,25	-1,13
DDD	-0,098	-0,098	-1,000	60,0	-96,90	-0,19	-0,19	-1,97	-1,36	1,45	0,00	1,45	-1,36
DDD	-0,098	-0,098	-1,000	60,0	-100,00	-0,18	-0,18	-1,84	-1,27	1,36	0,00	1,36	-1,27
DDD	-0,098	-0,098	-1,000	60,0	-100,00	-0,18	-0,18	-1,81	-1,25	1,34	0,00	1,34	-1,25
DDD	-0,048	-0,048	-1,000	60,0	-95,30	-0,06	-0,06	-1,31	-0,83	1,02	0,00	1,02	-0,83
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-95,30	0,00	0,00	-0,92	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-95,30	0,00	0,00	-0,91	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
DDD	-0,074	-0,074	-1,000	60,0	-95,30	-0,11	-0,11	-1,50	-0,99	1,14	0,00	1,14	-0,99
DDD	-0,048	-0,048	-1,000	60,0	-95,30	-0,06	-0,06	-1,32	-0,83	1,02	0,00	1,02	-0,83
DDD	-0,099	-0,099	-1,000	60,0	-95,30	-0,17	-0,17	-1,76	-1,22	1,29	0,00	1,29	-1,22
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-95,30	0,00	0,00	-0,92	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
DDD	-0,099	-0,099	-1,000	60,0	-92,40	-0,18	-0,18	-1,86	-1,29	1,37	0,00	1,37	-1,29
DDD	-0,099	-0,099	-1,000	60,0	-92,40	-0,18	-0,18	-1,83	-1,27	1,35	0,00	1,35	-1,27
DDD	-0,048	-0,048	-1,000	60,0	-92,40	-0,06	-0,06	-1,28	-0,81	1,00	0,00	1,00	-0,81
DDD	-0,048	-0,048	-1,000	60,0	-92,40	-0,07	-0,07	-1,36	-0,86	1,06	0,00	1,06	-0,86
DDD	-0,074	-0,074	-1,000	60,0	-102,20	-0,12	-0,12	-1,65	-1,09	1,25	0,00	1,25	-1,09
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-105,70	0,00	0,00	-0,92	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
DDD	-0,099	-0,099	-1,000	60,0	-105,70	-0,19	-0,19	-1,91	-1,32	1,40	0,00	1,40	-1,32
DDD	-0,098	-0,098	-1,000	60,0	-105,70	-0,18	-0,18	-1,87	-1,29	1,38	0,00	1,38	-1,29
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-105,70	0,00	0,00	-0,96	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-105,70	0,00	0,00	-0,91	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-105,70	0,00	0,00	-0,94	-0,54	0,77	0,00	0,77	-0,54
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-105,70	0,00	0,00	-0,78	-0,45	0,64	0,00	0,64	-0,45
DDD	0,000	0,000	-1,000	60,0	-105,70	0,00	0,00	-0,82	-0,47	0,67	0,00	0,67	-0,47
DDD	-0,098	-0,098	-1,000	60,0	-105,70	-0,18	-0,18	-1,79	-1,23	1,31	0,00	1,31	-1,23
DDD	-0,099	-0,099	-1,000	60,0	-105,70	-0,18	-0,18	-1,80	-1,25	1,33	0,00	1,33	-1,25

Schickert & Winkler [110]

- Probekörper: Würfel 10 cm × 10 cm × 10 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.23: Versuchswerte von Schickert & Winkler [110]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,60	0,00	0,00	-1,07	-0,62	0,87	0,00	0,87	-0,62
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,60	0,00	0,00	-0,95	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,60	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,60	0,00	0,00	-1,05	-0,61	0,86	0,00	0,86	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,60	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-30,60	0,00	0,00	-0,97	-0,56	0,79	0,00	0,79	-0,56
DD	0,000	-0,330	-1,000	41,1	-30,60	0,00	-0,49	-1,45	-1,12	1,05	0,34	0,99	-1,12
DD	0,000	-0,340	-1,000	40,5	-30,60	0,00	-0,50	-1,48	-1,14	1,07	0,35	1,00	-1,14
DD	0,000	-0,330	-1,000	41,1	-30,60	0,00	-0,45	-1,35	-1,04	0,97	0,32	0,92	-1,04
DD	0,000	-0,320	-1,000	41,7	-30,60	0,00	-0,46	-1,44	-1,10	1,04	0,33	0,99	-1,10
DD	0,000	-0,320	-1,000	41,7	-30,60	0,00	-0,47	-1,47	-1,12	1,06	0,34	1,01	-1,12
DD	0,000	-0,320	-1,000	41,7	-30,60	0,00	-0,40	-1,26	-0,96	0,91	0,28	0,87	-0,96
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,60	0,00	-1,07	-1,58	-1,53	1,14	0,75	0,86	-1,53
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,60	0,00	-1,02	-1,52	-1,46	1,09	0,72	0,83	-1,46
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,60	0,00	-0,87	-1,30	-1,25	0,93	0,61	0,71	-1,25
DD	0,000	-0,660	-1,000	19,5	-30,60	0,00	-0,82	-1,24	-1,19	0,89	0,58	0,68	-1,19
DD	0,000	-0,640	-1,000	20,8	-30,60	0,00	-0,91	-1,43	-1,35	1,03	0,64	0,80	-1,35
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-30,60	0,00	-0,85	-1,27	-1,23	0,92	0,60	0,69	-1,23
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,60	0,00	-1,42	-1,42	-1,63	1,16	1,00	0,58	-1,63
DD	0,000	-0,990	-1,000	0,5	-30,60	0,00	-1,26	-1,27	-1,46	1,03	0,89	0,53	-1,46
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,60	0,00	-1,18	-1,18	-1,36	0,96	0,83	0,48	-1,36
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,60	0,00	-1,20	-1,20	-1,38	0,98	0,85	0,49	-1,38

Fortsetzung Tabelle B.23: Versuchswerte von Schickert & Winkler [110]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,60	0,00	-1,16	-1,16	-1,34	0,95	0,82	0,47	-1,34
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-30,60	0,00	-1,06	-1,06	-1,22	0,86	0,75	0,43	-1,22
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-29,10	0,00	0,00	-1,04	-0,60	0,85	0,00	0,85	-0,60
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-29,10	0,00	0,00	-1,09	-0,63	0,89	0,00	0,89	-0,63
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-29,10	0,00	0,00	-0,98	-0,57	0,80	0,00	0,80	-0,57
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-29,10	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-29,10	0,00	0,00	-0,93	-0,54	0,76	0,00	0,76	-0,54
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-29,10	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
DD	0,000	-0,340	-1,000	40,5	-29,10	0,00	-0,43	-1,26	-0,98	0,90	0,31	0,85	-0,98
DD	0,000	-0,350	-1,000	39,8	-29,10	0,00	-0,45	-1,27	-0,99	0,91	0,32	0,85	-0,99
DD	0,000	-0,340	-1,000	40,5	-29,10	0,00	-0,45	-1,34	-1,03	0,96	0,32	0,91	-1,03
DD	0,000	-0,340	-1,000	40,5	-29,10	0,00	-0,44	-1,29	-1,00	0,93	0,31	0,88	-1,00
DD	0,000	-0,340	-1,000	40,5	-29,10	0,00	-0,43	-1,26	-0,98	0,91	0,30	0,86	-0,98
DD	0,000	-0,340	-1,000	40,5	-29,10	0,00	-0,45	-1,31	-1,02	0,94	0,32	0,89	-1,02
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-29,10	0,00	-0,92	-1,39	-1,34	1,00	0,65	0,76	-1,34
DD	0,000	-0,660	-1,000	19,5	-29,10	0,00	-0,85	-1,27	-1,22	0,92	0,60	0,70	-1,22
DD	0,000	-0,670	-1,000	18,9	-29,10	0,00	-0,85	-1,27	-1,23	0,92	0,60	0,69	-1,23
DD	0,000	-0,660	-1,000	19,5	-29,10	0,00	-0,79	-1,20	-1,15	0,86	0,56	0,65	-1,15
DD	0,000	-0,680	-1,000	18,3	-29,10	0,00	-0,86	-1,25	-1,22	0,91	0,61	0,67	-1,22
DD	0,000	-0,690	-1,000	17,6	-29,10	0,00	-0,95	-1,36	-1,33	0,99	0,67	0,73	-1,33
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-29,10	0,00	-1,23	-1,24	-1,43	1,01	0,87	0,51	-1,43
DD	0,000	-0,990	-1,000	0,5	-29,10	0,00	-1,18	-1,19	-1,37	0,97	0,83	0,49	-1,37
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-29,10	0,00	-1,16	-1,17	-1,35	0,95	0,82	0,48	-1,35
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-29,10	0,00	-1,21	-1,21	-1,40	0,99	0,86	0,50	-1,40
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-29,10	0,00	-1,15	-1,16	-1,33	0,94	0,81	0,48	-1,33
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-29,10	0,00	-1,11	-1,12	-1,28	0,91	0,78	0,46	-1,28

Scholz et al. [113]

- Probekörper: Würfel 10 cm × 10 cm × 10 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.24: Versuchswerte von Scholz et al. [113]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-47,95	0,00	0,00	-0,86	-0,50	0,70	0,00	0,70	-0,50
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-47,95	0,00	0,00	-1,17	-0,68	0,96	0,00	0,96	-0,68
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-52,80	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-52,80	0,00	0,00	-0,85	-0,49	0,70	0,00	0,70	-0,49
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-52,80	0,00	0,00	-0,82	-0,48	0,67	0,00	0,67	-0,48
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-52,80	0,00	0,00	-0,96	-0,55	0,78	0,00	0,78	-0,55
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-52,80	0,00	0,00	-0,91	-0,52	0,74	0,00	0,74	-0,52
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-52,80	0,00	0,00	-0,85	-0,49	0,69	0,00	0,69	-0,49
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-42,93	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-42,93	0,00	0,00	-0,98	-0,56	0,80	0,00	0,80	-0,56
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-42,93	0,00	0,00	-1,06	-0,61	0,87	0,00	0,87	-0,61
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-44,17	0,00	0,00	-0,78	-0,45	0,64	0,00	0,64	-0,45
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,22	0,00	0,00	-1,03	-0,59	0,84	0,00	0,84	-0,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,22	0,00	0,00	-0,93	-0,54	0,76	0,00	0,76	-0,54
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,22	0,00	0,00	-0,91	-0,52	0,74	0,00	0,74	-0,52
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,22	0,00	0,00	-0,85	-0,49	0,69	0,00	0,69	-0,49
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,22	0,00	0,00	-0,92	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,22	0,00	0,00	-0,91	-0,53	0,75	0,00	0,75	-0,53
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-44,33	0,05	0,00	0,00	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-44,33	0,06	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-44,33	0,07	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-51,30	0,05	0,00	0,00	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-51,30	0,06	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,02	0,03
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-51,30	0,03	0,00	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-44,74	0,10	0,00	0,00	0,06	0,08	0,07	0,04	0,06
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-48,31	0,05	0,00	0,00	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-44,74	0,05	0,05	0,00	0,05	0,04	0,00	0,04	0,05
ZZ	1,000	0,994	0,000	59,7	-44,74	0,08	0,08	0,00	0,10	0,07	0,00	0,07	0,10
ZZ	1,000	0,997	0,000	59,9	-51,19	0,04	0,04	0,00	0,05	0,03	0,00	0,03	0,05
ZZ	1,000	0,609	0,000	37,2	-51,19	0,05	0,03	0,00	0,05	0,03	0,01	0,03	0,05
ZZ	1,000	0,475	0,000	28,3	-44,74	0,06	0,03	0,00	0,05	0,04	0,02	0,03	0,05
ZZ	1,000	0,384	0,000	22,4	-44,74	0,08	0,03	0,00	0,06	0,06	0,03	0,04	0,06
ZZ	1,000	0,378	0,000	22,0	-51,19	0,05	0,02	0,00	0,04	0,04	0,02	0,03	0,04

Fortsetzung Tabelle B.24: Versuchswerte von Scholz et al. [113]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
ZZ	1,000	0,358	0,000	20,7	-48,31	0,07	0,02	0,00	0,05	0,05	0,03	0,04	0,05
ZZ	1,000	0,091	0,000	4,7	-42,93	0,05	0,00	0,00	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03
ZD	1,000	0,000	-0,561	20,8	-42,93	0,06	0,00	-0,03	0,01	0,06	0,04	0,05	0,01
ZD	0,582	0,000	-1,000	38,7	-42,93	0,05	0,00	-0,09	-0,02	0,10	0,04	0,09	-0,02
ZD	0,240	0,000	-1,000	49,5	-42,93	0,03	0,00	-0,11	-0,05	0,10	0,02	0,10	-0,05
ZD	0,225	0,000	-1,000	50,1	-48,31	0,05	0,00	-0,24	-0,11	0,22	0,04	0,22	-0,11
ZD	0,203	0,000	-1,000	50,9	-48,31	0,05	0,00	-0,23	-0,11	0,21	0,03	0,21	-0,11
ZD	0,150	0,000	-1,000	53,1	-43,27	0,02	0,00	-0,11	-0,05	0,10	0,01	0,10	-0,05
ZD	0,129	0,000	-1,000	54,0	-43,27	0,02	0,00	-0,19	-0,10	0,17	0,02	0,17	-0,10
ZD	0,104	0,000	-1,000	55,1	-44,17	0,05	0,00	-0,45	-0,23	0,38	0,03	0,38	-0,23
ZD	0,078	0,000	-1,000	56,3	-43,27	0,03	0,00	-0,34	-0,18	0,29	0,02	0,29	-0,18
ZD	0,043	0,000	-1,000	57,9	-44,17	0,03	0,00	-0,77	-0,42	0,64	0,02	0,64	-0,42
ZD	0,041	0,000	-1,000	58,0	-43,27	0,02	0,00	-0,59	-0,33	0,49	0,02	0,49	-0,33
ZD	0,038	0,000	-1,000	58,2	-43,27	0,03	0,00	-0,85	-0,47	0,71	0,02	0,71	-0,47
ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	-44,17	0,02	0,00	-0,66	-0,37	0,54	0,01	0,54	-0,37
ZD	0,020	0,000	-1,000	59,0	-44,74	0,02	0,00	-1,09	-0,62	0,90	0,02	0,90	-0,62
ZD	0,019	0,000	-1,000	59,1	-44,74	0,02	0,00	-1,02	-0,58	0,84	0,01	0,84	-0,58
DD	0,000	-0,998	-1,000	0,1	-45,00	0,00	-0,99	-0,99	-1,15	0,81	0,70	0,41	-1,15
DD	0,000	-0,995	-1,000	0,2	-45,00	0,00	-0,96	-0,96	-1,11	0,78	0,68	0,39	-1,11
DD	0,000	-0,992	-1,000	0,4	-52,80	0,00	-0,91	-0,92	-1,06	0,75	0,65	0,38	-1,06
DD	0,000	-0,990	-1,000	0,5	-44,17	0,00	-1,03	-1,04	-1,19	0,84	0,73	0,43	-1,19
DD	0,000	-0,989	-1,000	0,5	-52,80	0,00	-0,97	-0,98	-1,13	0,80	0,69	0,40	-1,13
DD	0,000	-0,989	-1,000	0,5	-42,93	0,00	-1,08	-1,09	-1,25	0,88	0,76	0,45	-1,25
DD	0,000	-0,988	-1,000	0,6	-52,80	0,00	-1,00	-1,01	-1,16	0,82	0,70	0,42	-1,16
DD	0,000	-0,987	-1,000	0,6	-52,80	0,00	-0,85	-0,86	-0,99	0,70	0,60	0,36	-0,99
DD	0,000	-0,987	-1,000	0,6	-52,80	0,00	-1,00	-1,01	-1,16	0,82	0,71	0,42	-1,16
DD	0,000	-0,987	-1,000	0,6	-52,80	0,00	-0,85	-0,86	-0,99	0,70	0,60	0,36	-0,99
DD	0,000	-0,986	-1,000	0,7	-42,93	0,00	-0,99	-1,00	-1,15	0,81	0,70	0,41	-1,15
DD	0,000	-0,982	-1,000	0,9	-45,00	0,00	-1,17	-1,19	-1,36	0,96	0,83	0,49	-1,36
DD	0,000	-0,968	-1,000	1,6	-52,80	0,00	-0,79	-0,82	-0,93	0,66	0,56	0,35	-0,93
DD	0,000	-0,954	-1,000	2,3	-45,00	0,00	-0,82	-0,86	-0,97	0,69	0,58	0,37	-0,97
DD	0,000	-0,785	-1,000	11,8	-51,30	0,00	-0,77	-0,98	-1,01	0,73	0,54	0,48	-1,01
DD	0,000	-0,781	-1,000	12,0	-51,30	0,00	-0,80	-1,02	-1,05	0,76	0,56	0,51	-1,05
DD	0,000	-0,781	-1,000	12,0	-50,53	0,00	-0,73	-0,93	-0,96	0,69	0,51	0,46	-0,96
DD	0,000	-0,775	-1,000	12,4	-50,53	0,00	-0,78	-1,00	-1,03	0,75	0,55	0,50	-1,03
DD	0,000	-0,548	-1,000	26,8	-44,33	0,00	-0,70	-1,27	-1,14	0,90	0,49	0,75	-1,14
DD	0,000	-0,543	-1,000	27,2	-44,33	0,00	-0,75	-1,39	-1,23	0,98	0,53	0,82	-1,23
DD	0,000	-0,542	-1,000	27,2	-44,33	0,00	-0,59	-1,09	-0,97	0,77	0,42	0,65	-0,97
DD	0,000	-0,542	-1,000	27,2	-50,53	0,00	-0,56	-1,02	-0,91	0,73	0,39	0,61	-0,91
DD	0,000	-0,539	-1,000	27,4	-45,00	0,00	-0,61	-1,13	-1,00	0,80	0,43	0,67	-1,00
DD	0,000	-0,536	-1,000	27,6	-44,33	0,00	-0,71	-1,32	-1,17	0,93	0,50	0,79	-1,17
DD	0,000	-0,536	-1,000	27,6	-44,33	0,00	-0,67	-1,25	-1,11	0,89	0,47	0,75	-1,11
DD	0,000	-0,536	-1,000	27,6	-44,17	0,00	-0,60	-1,13	-1,00	0,80	0,43	0,67	-1,00
DD	0,000	-0,535	-1,000	27,7	-45,00	0,00	-0,67	-1,25	-1,10	0,88	0,47	0,75	-1,10
DD	0,000	-0,534	-1,000	27,8	-45,00	0,00	-0,44	-0,82	-0,73	0,58	0,31	0,49	-0,73
DD	0,000	-0,532	-1,000	27,9	-44,33	0,00	-0,66	-1,23	-1,09	0,87	0,46	0,74	-1,09
DD	0,000	-0,512	-1,000	29,2	-45,00	0,00	-0,55	-1,07	-0,94	0,76	0,39	0,65	-0,94
DD	0,000	-0,494	-1,000	30,4	-45,00	0,00	-0,27	-0,55	-0,47	0,39	0,19	0,34	-0,47
DD	0,000	-0,463	-1,000	32,4	-45,00	0,00	-0,54	-1,17	-0,99	0,83	0,38	0,74	-0,99
DD	0,000	-0,307	-1,000	42,6	-50,53	0,00	-0,31	-1,00	-0,76	0,73	0,22	0,69	-0,76
DD	0,000	-0,306	-1,000	42,6	-50,53	0,00	-0,31	-1,01	-0,76	0,73	0,22	0,70	-0,76
DD	0,000	-0,218	-1,000	48,0	-44,33	0,00	-0,20	-0,94	-0,66	0,70	0,14	0,68	-0,66
DD	0,000	-0,211	-1,000	48,5	-44,33	0,00	-0,27	-1,30	-0,91	0,97	0,19	0,95	-0,91
DD	0,000	-0,210	-1,000	48,5	-41,82	0,00	-0,25	-1,19	-0,83	0,89	0,18	0,87	-0,83
DD	0,000	-0,205	-1,000	48,8	-41,82	0,00	-0,23	-1,12	-0,78	0,84	0,16	0,82	-0,78
DD	0,000	-0,199	-1,000	49,2	-44,33	0,00	-0,23	-1,18	-0,81	0,88	0,17	0,86	-0,81
DD	0,000	-0,112	-1,000	54,1	-51,30	0,00	-0,12	-1,06	-0,68	0,82	0,08	0,81	-0,68
DD	0,000	-0,110	-1,000	54,2	-51,30	0,00	-0,12	-1,10	-0,71	0,86	0,09	0,85	-0,71
DD	0,000	-0,108	-1,000	54,4	-51,30	0,00	-0,09	-0,82	-0,52	0,64	0,06	0,63	-0,52
DD	0,000	-0,103	-1,000	54,6	-41,82	0,00	-0,11	-1,11	-0,71	0,86	0,08	0,86	-0,71
DD	0,000	-0,099	-1,000	54,8	-41,82	0,00	-0,11	-1,13	-0,71	0,88	0,08	0,87	-0,71
DD	0,000	-0,058	-1,000	57,0	-41,82	0,00	-0,07	-1,21	-0,74	0,96	0,05	0,96	-0,74
DD	0,000	-0,043	-1,000	57,8	-41,82	0,00	-0,05	-1,11	-0,67	0,89	0,03	0,88	-0,67
ZZD	1,000	0,965	-0,001	58,2	-44,55	0,04	0,04	-0,01	0,05	0,04	0,00	0,04	0,05
ZZD	1,000	0,567	-0,911	47,5	-44,55	0,04	0,02	-0,03	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01
ZZD	0,798	0,794	-1,000	59,9	-51,19	0,04	0,04	-0,06	0,02	0,08	0,00	0,08	0,02
ZZD	0,590	0,587	-1,000	59,9	-51,19	0,04	0,04	-0,07	0,01	0,09	0,00	0,09	0,01
ZZD	0,318	0,318	-1,000	60,0	-51,19	0,05	0,04	-0,14	-0,03	0,15	0,00	0,15	-0,03
ZDD	1,000	-0,019	-0,019	0,0	-44,55	0,02	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01
ZDD	1,000	-0,135	-0,255	5,0	-44,55	0,05	-0,01	-0,01	0,02	0,05	0,04	0,03	0,02
ZDD	0,428	-0,521	-1,000	19,3	-44,55	0,04	-0,05	-0,09	-0,06	0,09	0,06	0,07	-0,06
DDD	-0,190	-0,192	-1,000	59,9	-50,46	-0,77	-0,78	-4,04	-3,22	2,67	0,01	2,67	-3,22
DDD	-0,191	-0,193	-1,000	59,9	-50,46	-0,77	-0,78	-4,02	-3,21	2,65	0,01	2,65	-3,21
DDD	-0,191	-0,193	-1,000	59,9	-51,19	-0,77	-0,77	-4,01	-3,20	2,64	0,01	2,64	-3,20
DDD	-0,145	-0,989	-1,000	0,6	-51,12	-0,30	-2,02	-2,05	-2,52	1,42	1,22	0,72	-2,52
DDD	-0,128	-0,504	-1,000	34,5	-49,82	-0,35	-1,39	-2,77	-2,61	1,71	0,74	1,54	-2,61
DDD	-0,115	-0,506	-1,000	33,8	-49,82	-0,29	-1,27	-2,52	-2,36	1,58	0,70	1,42	-2,36
DDD	-0,099	-0,269	-1,000	49,8	-49,82	-0,21	-0,56	-2,08	-1,64	1,41	0,25	1,38	-1,64
DDD	-0,091	-0,270	-1,000	49,3	-50,53	-0,18	-0,54	-2,01	-1,58	1,37	0,25	1,35	-1,58
DDD	-0,104	-0,105	-1,000	59,9	-48,80	-0,19	-0,19	-1,84	-1,29	1,35	0,00	1,35	-1,29
DDD	-0,103	-0,107	-1,000	59,8	-44,17	-0,21	-0,21	-2,01	-1,40	1,47	0,01	1,47	-1,40
DDD	-0,093	-0,094	-1,000	59,9	-48,80	-0,16	-0,17	-1,77	-1,21	1,31	0,00	1,31	-1,21
DDD	-0,087	-0,508	-1,000	32,6	-48,31	-0,18	-1,03	-2,03	-1,87	1,31	0,60	1,16	-1,87
DDD	-0,077	-0,475	-1,000	34,5	-47,14	-0,19	-1,17	-2,46	-2,20	1,61	0,69	1,45	-2,20
DDD	-0,087	-0,246	-1,000	50,6	-44,17	-0,20	-0,57	-2,31	-1,78	1,60	0,26	1,57	-1,78

Fortsetzung Tabelle B.24: Versuchswerte von Scholz et al. [113]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DDD	-0,083	-0,271	-1,000	48,8	-50,53	-0,16	-0,52	-1,91	-1,49	1,31	0,25	1,28	-1,49
DDD	-0,083	-0,269	-1,000	48,9	-51,12	-0,16	-0,51	-1,90	-1,48	1,30	0,25	1,28	-1,48
DDD	-0,080	-0,268	-1,000	48,8	-48,87	-0,16	-0,53	-1,99	-1,55	1,37	0,26	1,34	-1,55
DDD	-0,076	-0,275	-1,000	48,2	-49,82	-0,16	-0,57	-2,09	-1,63	1,44	0,29	1,41	-1,63
DDD	-0,076	-0,274	-1,000	48,3	-49,82	-0,16	-0,57	-2,07	-1,62	1,43	0,29	1,40	-1,62
DDD	-0,074	-0,275	-1,000	48,1	-50,70	-0,15	-0,57	-2,09	-1,63	1,44	0,30	1,41	-1,63
DDD	-0,073	-0,270	-1,000	48,4	-50,53	-0,15	-0,54	-1,99	-1,54	1,37	0,28	1,35	-1,54
DDD	-0,071	-0,268	-1,000	48,4	-48,87	-0,16	-0,59	-2,21	-1,71	1,53	0,31	1,50	-1,71
DDD	-0,087	-0,089	-1,000	59,9	-48,80	-0,15	-0,16	-1,74	-1,18	1,30	0,00	1,30	-1,18
DDD	-0,057	-0,513	-1,000	31,1	-42,57	-0,13	-1,13	-2,21	-2,00	1,47	0,71	1,29	-2,00
DDD	-0,058	-0,506	-1,000	31,6	-42,57	-0,12	-1,02	-2,02	-1,83	1,35	0,64	1,19	-1,83
DDD	-0,058	-0,506	-1,000	31,6	-42,57	-0,12	-1,07	-2,11	-1,90	1,41	0,67	1,24	-1,90
DDD	-0,058	-0,506	-1,000	31,6	-50,53	-0,10	-0,86	-1,70	-1,54	1,14	0,54	1,00	-1,54
DDD	-0,062	-0,099	-1,000	58,0	-48,80	-0,10	-0,15	-1,55	-1,04	1,16	0,04	1,16	-1,04
DDD	-0,065	-0,095	-1,000	58,4	-48,80	-0,10	-0,15	-1,53	-1,02	1,15	0,03	1,15	-1,02
DDD	-0,063	-0,094	-1,000	58,3	-44,17	-0,10	-0,15	-1,62	-1,08	1,22	0,04	1,22	-1,08
DDD	-0,066	-0,068	-1,000	59,9	-44,17	-0,10	-0,10	-1,52	-0,99	1,16	0,00	1,16	-0,99
DDD	-0,063	-0,066	-1,000	59,8	-42,57	-0,11	-0,12	-1,78	-1,16	1,36	0,00	1,36	-1,16
DDD	-0,058	-0,064	-1,000	59,7	-42,57	-0,11	-0,12	-1,81	-1,18	1,39	0,01	1,39	-1,18
DDD	-0,060	-0,060	-1,000	60,0	-42,57	-0,10	-0,10	-1,69	-1,09	1,29	0,00	1,29	-1,09

Schröder [114]

- Probekörper: Würfel 15 cm × 15 cm × 15 cm
- Wichtung: Einzelwerte

Tabelle B.25: Versuchswerte von Schröder [114]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,02	-0,71	-0,71	-0,82	0,60	0,52	0,30	-0,82
ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,02	-1,02	-1,02	-1,16	0,85	0,73	0,42	-1,16
ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,01	-0,63	-0,63	-0,73	0,53	0,46	0,26	-0,73
ZDD	0,040	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,01	-0,40	-0,40	-0,45	0,34	0,29	0,17	-0,45
ZDD	0,040	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,03	-0,63	-0,63	-0,72	0,54	0,47	0,27	-0,72
ZDD	0,040	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,02	-0,63	-0,63	-0,72	0,54	0,47	0,27	-0,72
ZDD	0,040	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,03	-0,71	-0,71	-0,81	0,61	0,53	0,30	-0,81
ZDD	0,040	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,03	-0,56	-0,56	-0,63	0,47	0,41	0,24	-0,63
ZDD	0,040	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,02	-0,56	-0,56	-0,63	0,47	0,41	0,24	-0,63
ZDD	0,040	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,04	-0,91	-0,91	-1,03	0,78	0,67	0,39	-1,03
ZDD	0,060	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,04	-0,63	-0,63	-0,71	0,55	0,48	0,27	-0,71
ZDD	0,060	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,03	-0,52	-0,52	-0,58	0,45	0,39	0,22	-0,58
ZDD	0,060	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,03	-0,52	-0,52	-0,58	0,45	0,39	0,22	-0,58
ZDD	0,060	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,02	-0,40	-0,40	-0,44	0,34	0,30	0,17	-0,44
ZDD	0,080	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,03	-0,36	-0,36	-0,40	0,31	0,27	0,16	-0,40
ZDD	0,080	-1,000	-1,000	0,0	-28,00	0,03	-0,36	-0,36	-0,40	0,31	0,27	0,16	-0,40
ZD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-33,30	0,00	-0,63	-1,26	-1,09	0,89	0,45	0,77	-1,09
ZD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-33,30	0,00	-0,67	-1,33	-1,15	0,94	0,47	0,82	-1,15
ZDD	0,010	-0,500	-1,000	29,7	-33,30	0,01	-0,60	-1,20	-1,03	0,86	0,43	0,74	-1,03
ZDD	0,010	-0,500	-1,000	29,7	-33,30	0,01	-0,70	-1,40	-1,21	1,00	0,50	0,87	-1,21
ZDD	0,030	-0,500	-1,000	29,0	-33,30	0,03	-0,48	-0,99	-0,83	0,72	0,36	0,63	-0,83
ZDD	0,050	-0,500	-1,000	28,4	-33,30	0,04	-0,36	-0,72	-0,60	0,54	0,28	0,46	-0,60
ZDD	0,070	-0,500	-1,000	27,8	-33,30	0,04	-0,28	-0,53	-0,45	0,41	0,23	0,34	-0,45
ZDD	0,090	-0,500	-1,000	27,3	-33,30	0,05	-0,25	-0,50	-0,41	0,39	0,21	0,33	-0,41
ZDD	0,110	-0,500	-1,000	26,7	-33,30	0,04	-0,18	-0,37	-0,29	0,29	0,16	0,24	-0,29
ZD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-33,50	0,00	-0,65	-1,29	-1,12	0,91	0,46	0,79	-1,12
ZDD	0,010	-0,500	-1,000	29,7	-33,50	0,01	-0,60	-1,19	-1,03	0,85	0,43	0,74	-1,03
ZDD	0,020	-0,500	-1,000	29,4	-33,50	0,02	-0,39	-0,80	-0,67	0,57	0,29	0,50	-0,67
ZDD	0,030	-0,500	-1,000	29,0	-33,50	0,02	-0,39	-0,80	-0,67	0,58	0,29	0,50	-0,67
ZDD	0,050	-0,500	-1,000	28,4	-33,50	0,03	-0,33	-0,66	-0,55	0,49	0,26	0,42	-0,55
ZDD	0,079	-0,562	-1,000	23,8	-33,50	0,04	-0,30	-0,53	-0,45	0,41	0,24	0,33	-0,45
ZDD	0,150	-0,500	-1,000	25,7	-33,50	0,05	-0,18	-0,36	-0,28	0,30	0,17	0,25	-0,28
ZDD	0,200	-0,500	-1,000	24,5	-33,50	0,06	-0,14	-0,28	-0,21	0,24	0,14	0,19	-0,21
ZDD	0,040	-2,000	-4,000	29,7	-33,20	0,01	-0,60	-1,20	-1,04	0,86	0,43	0,74	-1,04
ZDD	0,090	-1,300	-2,700	30,1	-33,20	0,03	-0,39	-0,81	-0,68	0,59	0,30	0,52	-0,68
ZDD	0,130	-0,900	-1,800	27,8	-33,20	0,04	-0,27	-0,54	-0,45	0,41	0,22	0,35	-0,45
ZDD	0,180	-0,300	-0,700	27,0	-33,20	0,05	-0,09	-0,21	-0,14	0,19	0,10	0,16	-0,14

Tasuji [119]

- Probekörper: Scheiben 12,7 cm × 12,7 cm × 1,2 cm
- Wichtung: Mittelwert aus 3 Einzelwerten

Tabelle B.26: Versuchswerte von Tasuji [119]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-33,28	0,00	-1,06	-1,06	-1,22	0,86	0,75	0,43	-1,22
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-33,28	0,00	-0,61	-1,22	-1,06	0,86	0,43	0,75	-1,06
DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	-33,28	0,00	-0,24	-1,20	-0,83	0,90	0,17	0,88	-0,83
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-33,28	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-33,28	0,04	0,00	-0,73	-0,40	0,61	0,03	0,61	-0,40
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-33,28	0,05	0,00	-0,49	-0,25	0,42	0,04	0,42	-0,25
ZD	0,250	0,000	-1,000	49,1	-33,28	0,08	0,00	-0,30	-0,13	0,29	0,05	0,28	-0,13
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-33,28	0,09	0,00	0,00	0,05	0,07	0,06	0,04	0,05
ZZ	1,000	0,500	0,000	30,0	-33,28	0,10	0,05	0,00	0,09	0,07	0,04	0,06	0,09
ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	-33,28	0,09	0,09	0,00	0,11	0,08	0,00	0,08	0,11

Traina [122]

- Probekörper: Würfel 7,6 cm × 7,6 cm × 7,6 cm
- Wichtung: Mittelwert aus 4 Einzelwerten

Tabelle B.27: Versuchswerte von Traina [122]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,20	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-40,20	0,00	-0,56	-1,13	-0,98	0,80	0,40	0,69	-0,98
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-40,20	0,00	-1,08	-1,08	-1,25	0,88	0,76	0,44	-1,25
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-52,26	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-52,26	0,00	-0,59	-1,18	-1,02	0,83	0,42	0,72	-1,02
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-52,26	0,00	-1,12	-1,12	-1,29	0,91	0,79	0,46	-1,29
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-52,26	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-52,26	0,00	-0,69	-1,38	-1,20	0,98	0,49	0,85	-1,20
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-52,26	0,00	-1,22	-1,22	-1,40	0,99	0,86	0,50	-1,40
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-49,45	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-49,45	0,00	-0,74	-1,48	-1,28	1,05	0,52	0,91	-1,28
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-49,45	0,00	-1,50	-1,50	-1,74	1,23	1,06	0,61	-1,74
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,20	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-40,20	0,00	-0,78	-1,55	-1,34	1,10	0,55	0,95	-1,34
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-40,20	0,00	-1,38	-1,38	-1,59	1,13	0,98	0,56	-1,59
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,20	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-40,20	0,00	-0,76	-1,53	-1,33	1,08	0,54	0,94	-1,33
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-40,20	0,00	-1,40	-1,40	-1,62	1,14	0,99	0,57	-1,62
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-40,20	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
DD	0,000	-0,500	-1,000	30,0	-40,20	0,00	-0,76	-1,52	-1,32	1,07	0,54	0,93	-1,32
DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	-40,20	0,00	-1,38	-1,38	-1,59	1,13	0,98	0,56	-1,59

Wang & Song [125]

- Probekörper: Prisma 15 cm × 15 cm × 30 cm
- Wichtung: Mittelwert aus 3 Einzelwerten

Tabelle B.28: Versuchswerte von Wang & Song [125]

	SPV			$\widetilde{\varphi}$	f_c	$\sigma_1/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_2/\lvert f_c\rvert$	$\sigma_3/\lvert f_c\rvert$	$\xi/\lvert f_c\rvert$	$\rho/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_1/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_2/\lvert f_c\rvert$	$\widetilde{\sigma}_3/\lvert f_c\rvert$
	α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm²]								
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-23,31	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-23,31	0,11	0,00	0,00	0,06	0,09	0,08	0,05	0,06
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-23,31	0,03	0,00	-0,74	-0,41	0,62	0,02	0,62	-0,41
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-23,31	0,05	0,00	-0,61	-0,33	0,52	0,03	0,52	-0,33
ZD	0,250	0,000	-1,000	49,1	-23,31	0,06	0,00	-0,32	-0,15	0,29	0,04	0,29	-0,15
ZD	0,271	0,000	-1,000	48,3	-23,31	0,08	0,00	-0,30	-0,12	0,28	0,06	0,27	-0,12
D	0,000	0,000	-1,000	60,0	-17,54	0,00	0,00	-1,00	-0,58	0,82	0,00	0,82	-0,58
Z	1,000	0,000	0,000	0,0	-17,54	0,09	0,00	0,00	0,05	0,08	0,07	0,04	0,05
ZD	0,050	0,000	-1,000	57,6	-17,54	0,02	0,00	-0,64	-0,36	0,54	0,01	0,54	-0,36
ZD	0,100	0,000	-1,000	55,3	-17,54	0,04	0,00	-0,60	-0,32	0,51	0,03	0,51	-0,32
ZD	0,250	0,000	-1,000	49,1	-17,54	0,06	0,00	-0,31	-0,14	0,28	0,04	0,27	-0,14
ZD	0,301	0,000	-1,000	47,2	-17,54	0,08	0,00	-0,25	-0,10	0,24	0,05	0,23	-0,10
ZDD	0,050	-1,000	-1,000	0,0	-23,31	0,02	-0,63	-0,63	-0,71	0,53	0,46	0,27	-0,71
ZDD	0,100	-1,000	-1,000	0,0	-23,31	0,03	-0,46	-0,46	-0,52	0,41	0,35	0,20	-0,52
ZDD	0,250	-0,250	-1,000	36,6	-23,31	0,05	-0,08	-0,29	-0,18	0,25	0,09	0,23	-0,18
ZDD	0,250	-0,500	-1,000	23,4	-23,31	0,04	-0,13	-0,26	-0,20	0,21	0,12	0,17	-0,20
ZDD	0,154	-0,716	-1,000	13,7	-23,31	0,04	-0,16	-0,23	-0,21	0,19	0,14	0,13	-0,21
ZDD	0,250	-1,000	-1,000	0,0	-23,31	0,05	-0,29	-0,29	-0,31	0,28	0,24	0,14	-0,31
ZDD	0,400	-1,000	-1,000	0,0	-23,31	0,06	-0,20	-0,20	-0,20	0,21	0,18	0,11	-0,20
ZDD	0,050	-1,000	-1,000	0,0	-17,54	0,01	-0,49	-0,50	-0,57	0,42	0,36	0,21	-0,57
ZDD	0,100	-1,000	-1,000	0,0	-17,54	0,03	-0,35	-0,35	-0,38	0,31	0,27	0,15	-0,38
ZDD	0,250	-0,250	-1,000	36,6	-17,54	0,05	-0,07	-0,27	-0,17	0,23	0,08	0,22	-0,17
ZDD	0,250	-0,500	-1,000	23,4	-17,54	0,05	-0,14	-0,27	-0,21	0,22	0,13	0,18	-0,21
ZDD	0,250	-0,750	-1,000	10,9	-17,54	0,05	-0,20	-0,27	-0,25	0,23	0,18	0,15	-0,25
ZDD	0,250	-1,000	-1,000	0,0	-17,54	0,05	-0,28	-0,28	-0,29	0,27	0,23	0,13	-0,29
ZDD	0,400	-1,000	-1,000	0,0	-17,54	0,06	-0,20	-0,20	-0,20	0,21	0,18	0,10	-0,20

B.3 Darstellung der bezogenen maximalen Festigkeitswerte der mehraxialen Versuchswerte der einzelnen Betonfestigkeitsklassen

Druckfestigkeitsklasse von $0-20\,\mathrm{N/mm^2}$

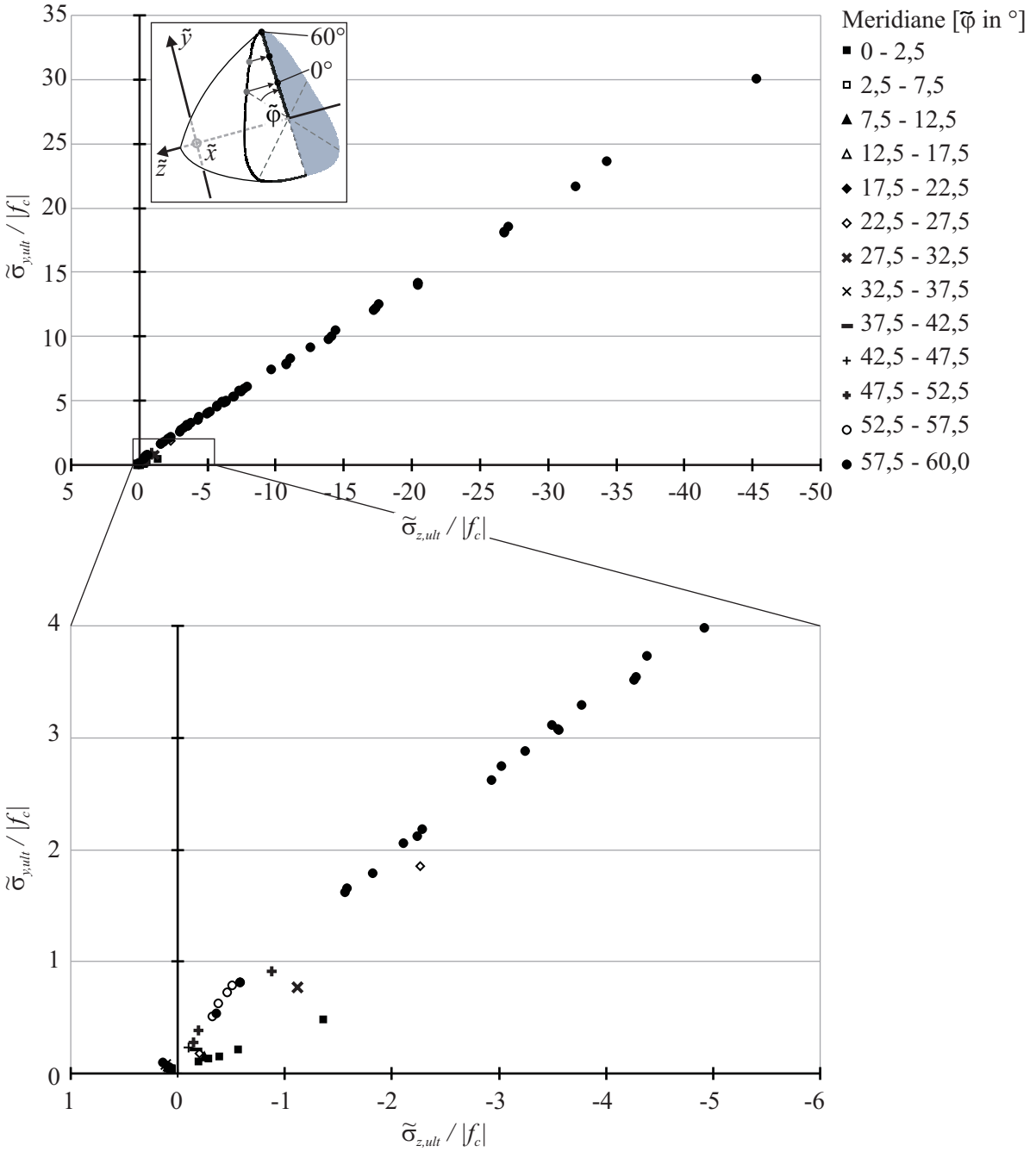


Abbildung B.1: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $0-20\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $20-30\,\mathrm{N/mm^2}$

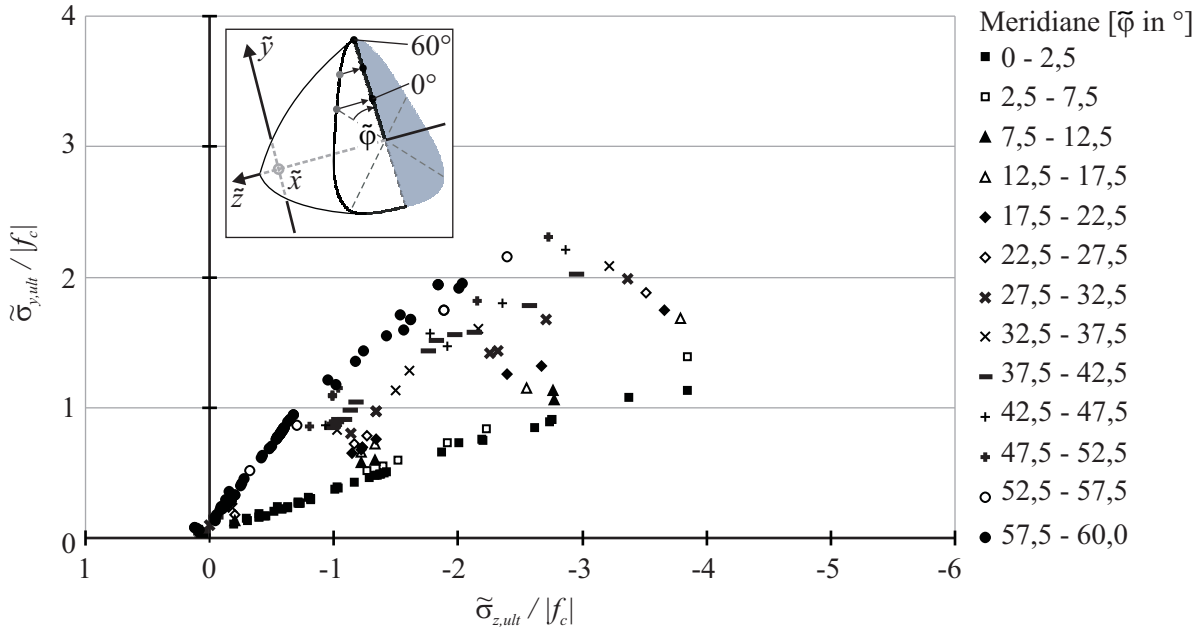


Abbildung B.2: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $20-30\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $30-40\,\mathrm{N/mm^2}$

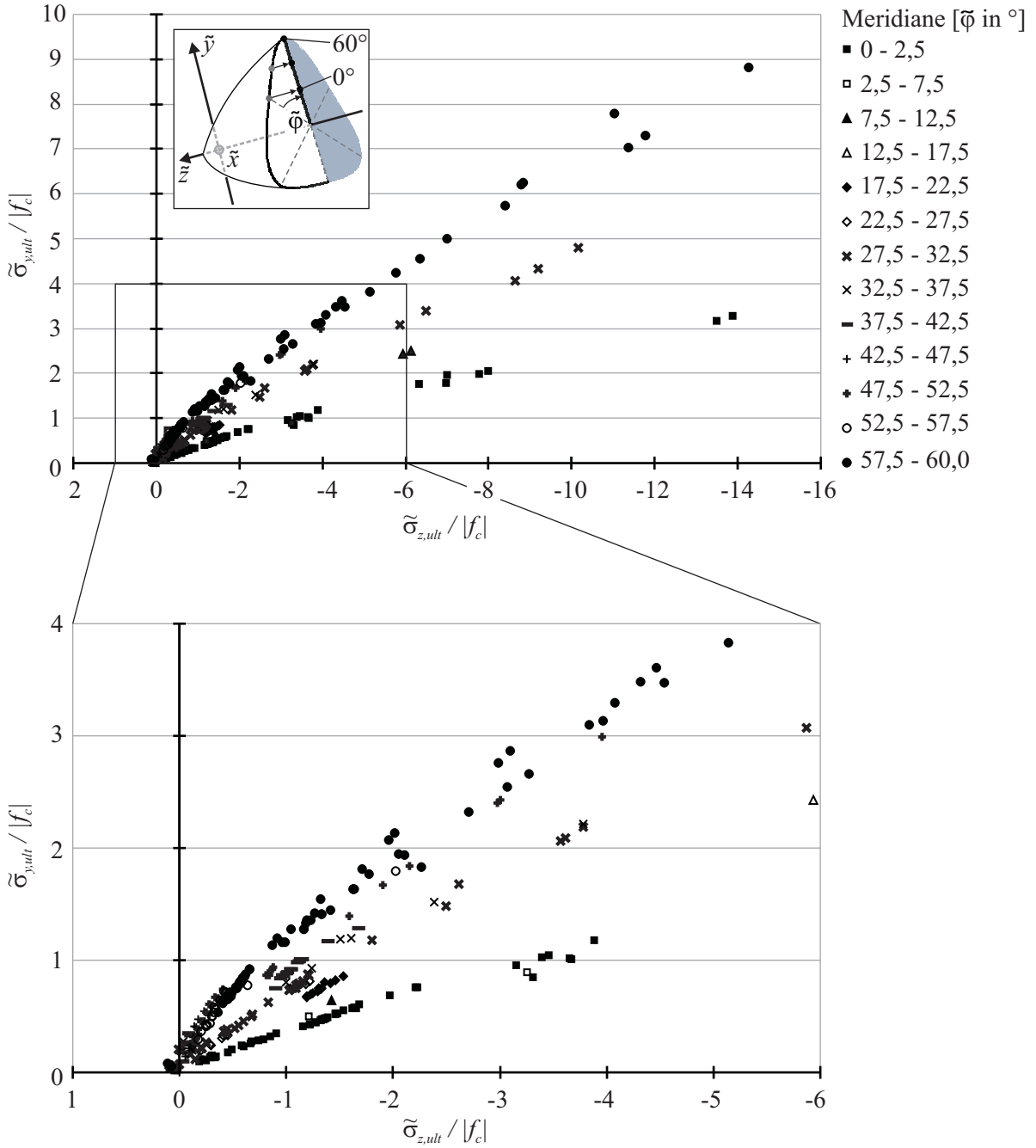


Abbildung B.3: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $30-40\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $40-50\,\mathrm{N/mm^2}$

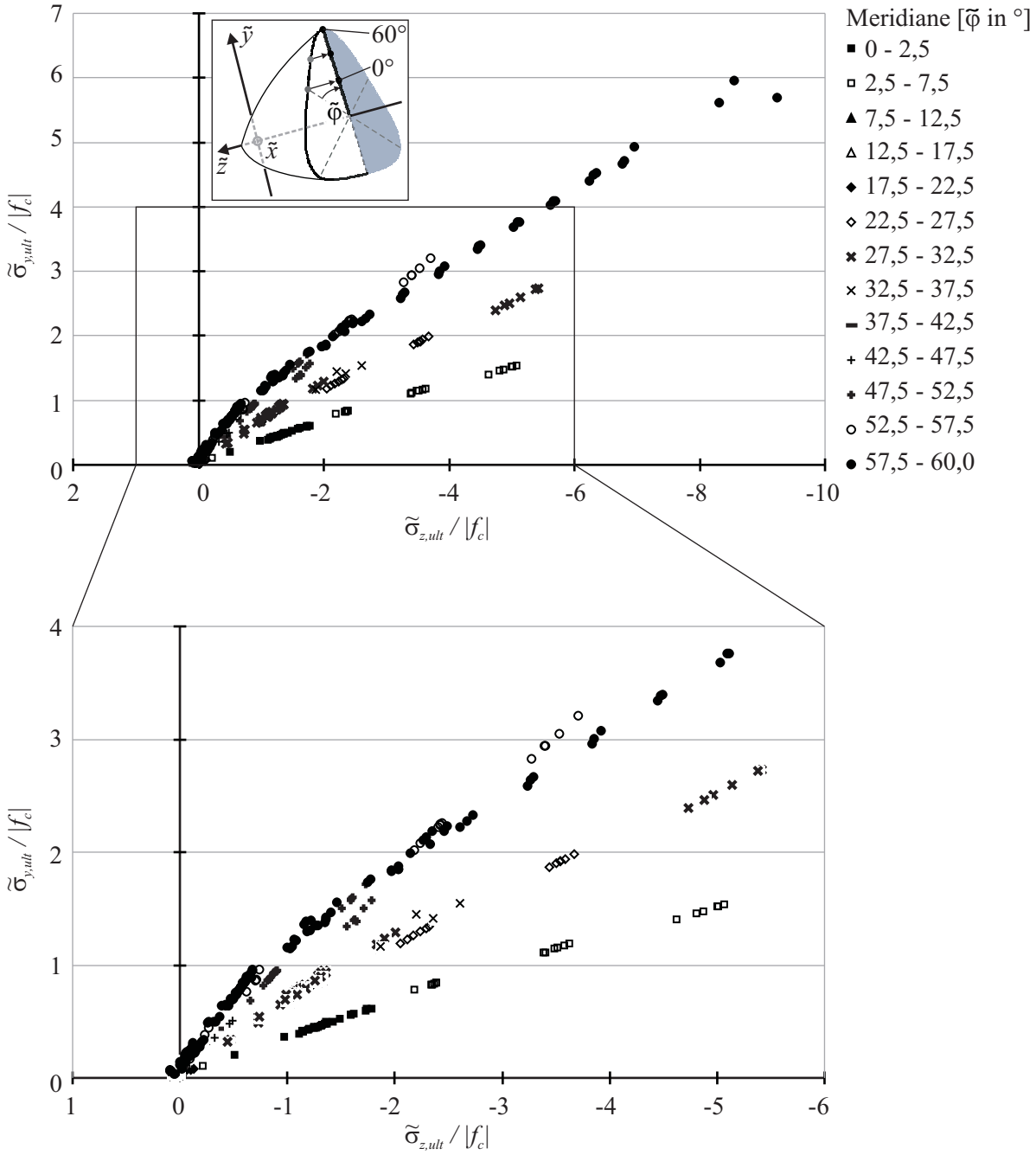


Abbildung B.4: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $40-50\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $50-60\,\mathrm{N/mm^2}$

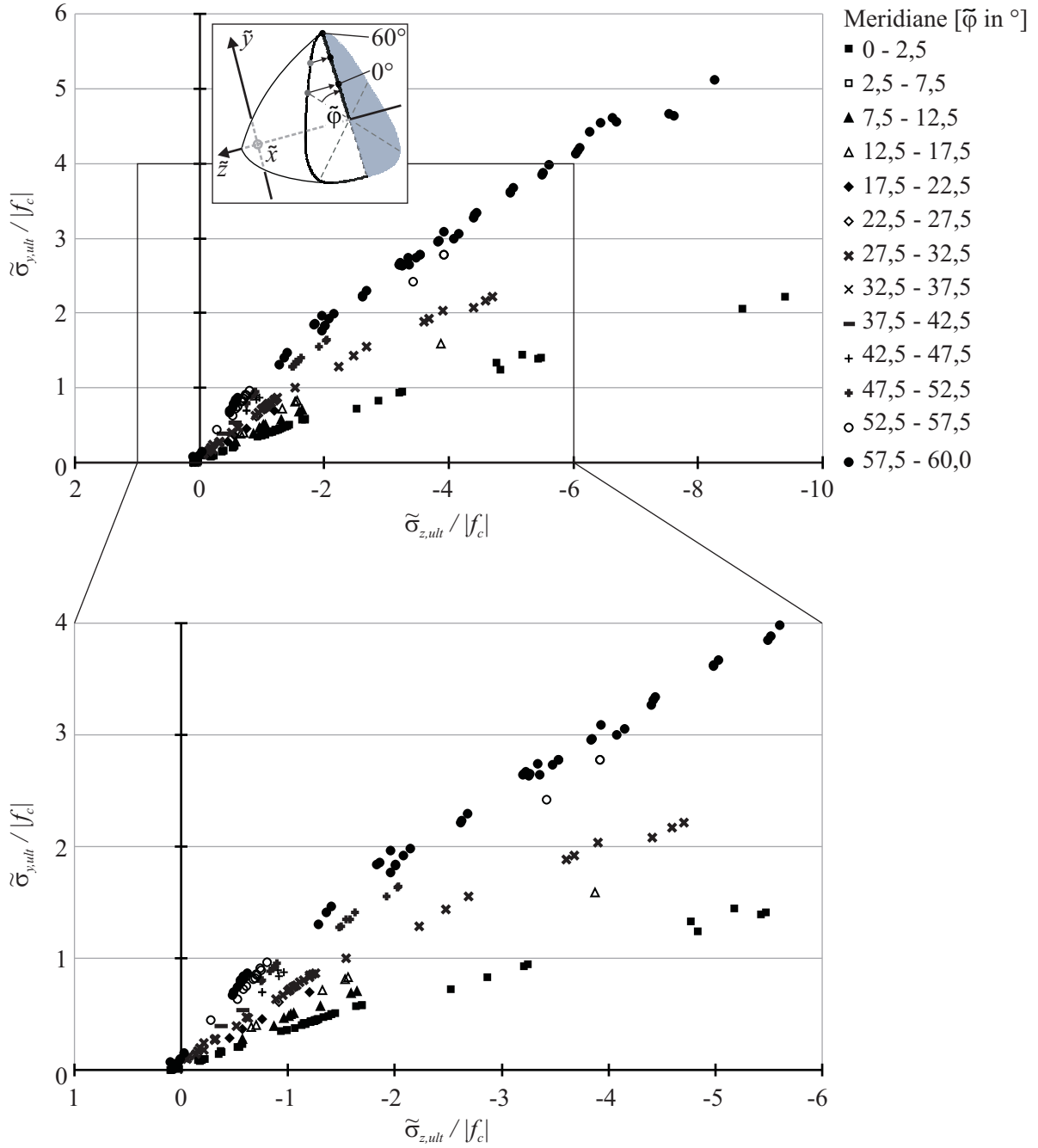


Abbildung B.5: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $50-60\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $60-70\,\mathrm{N/mm^2}$

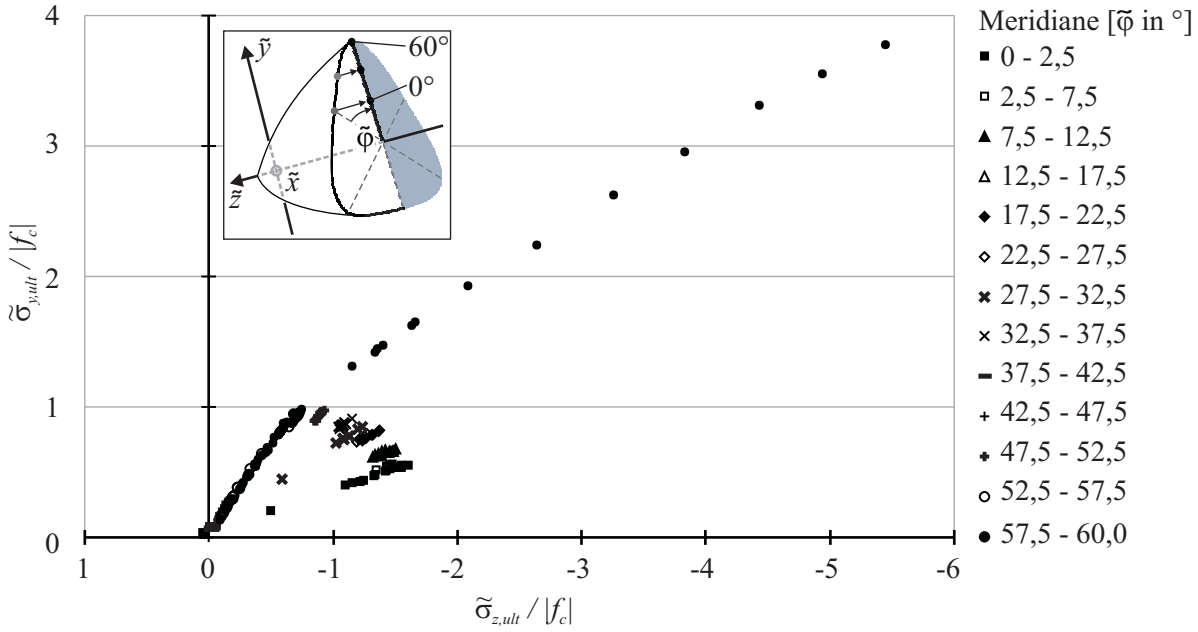


Abbildung B.6: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $60-70\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $70-80\,\mathrm{N/mm^2}$

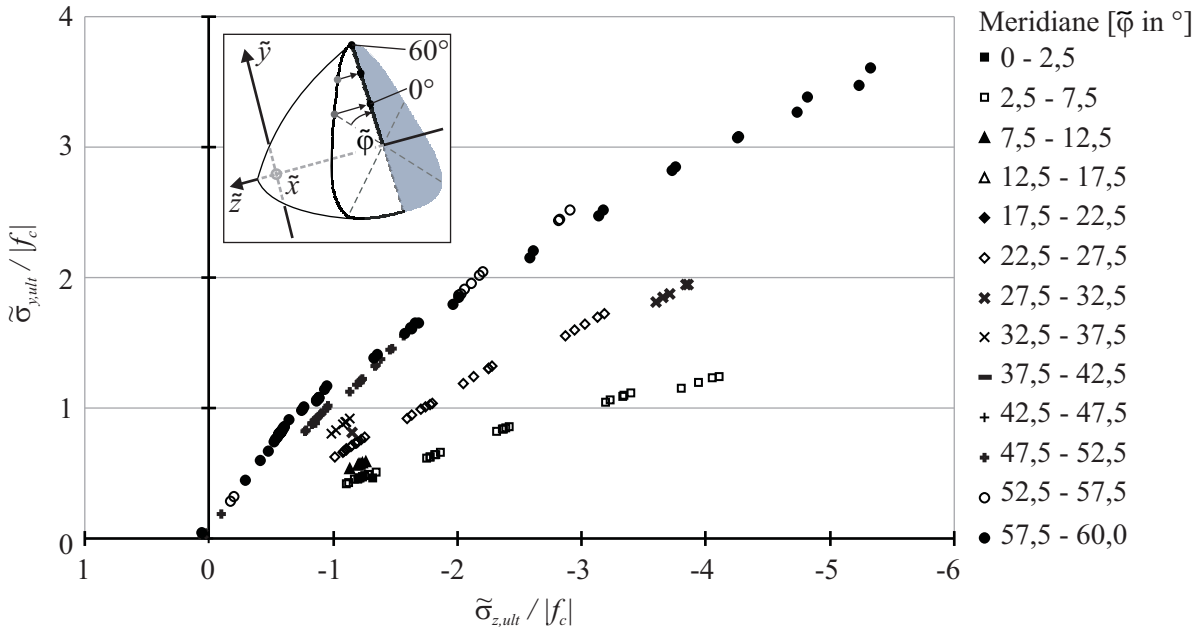


Abbildung B.7: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $70-80\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $80-90\,\mathrm{N/mm^2}$

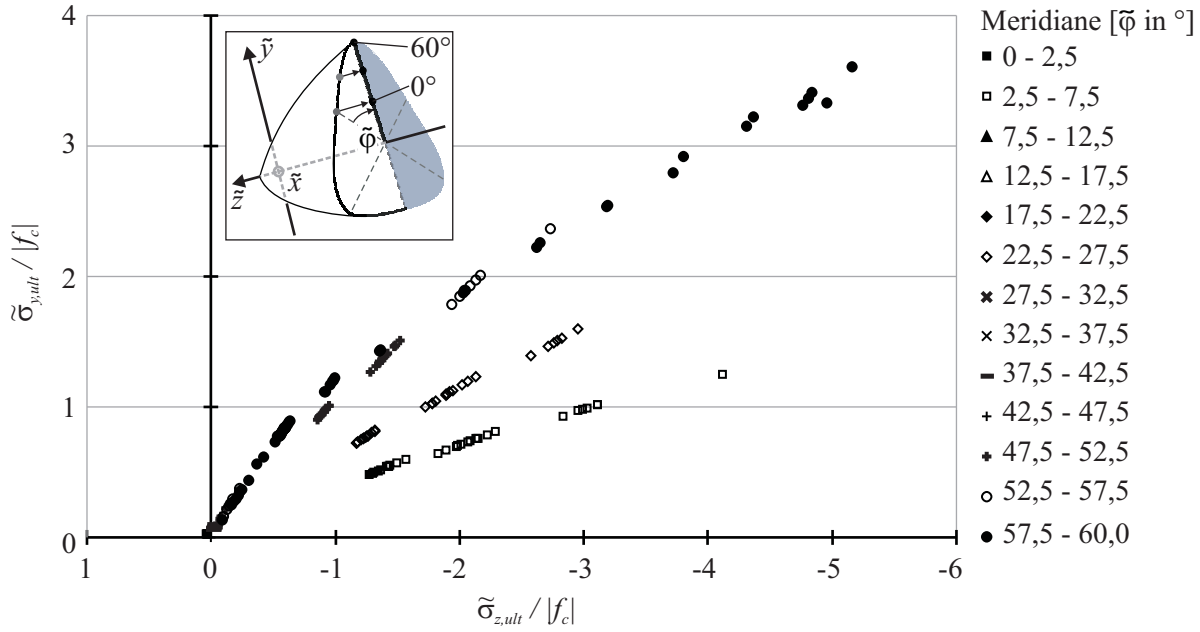


Abbildung B.8: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $80-90\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $90-100\,\mathrm{N/mm^2}$

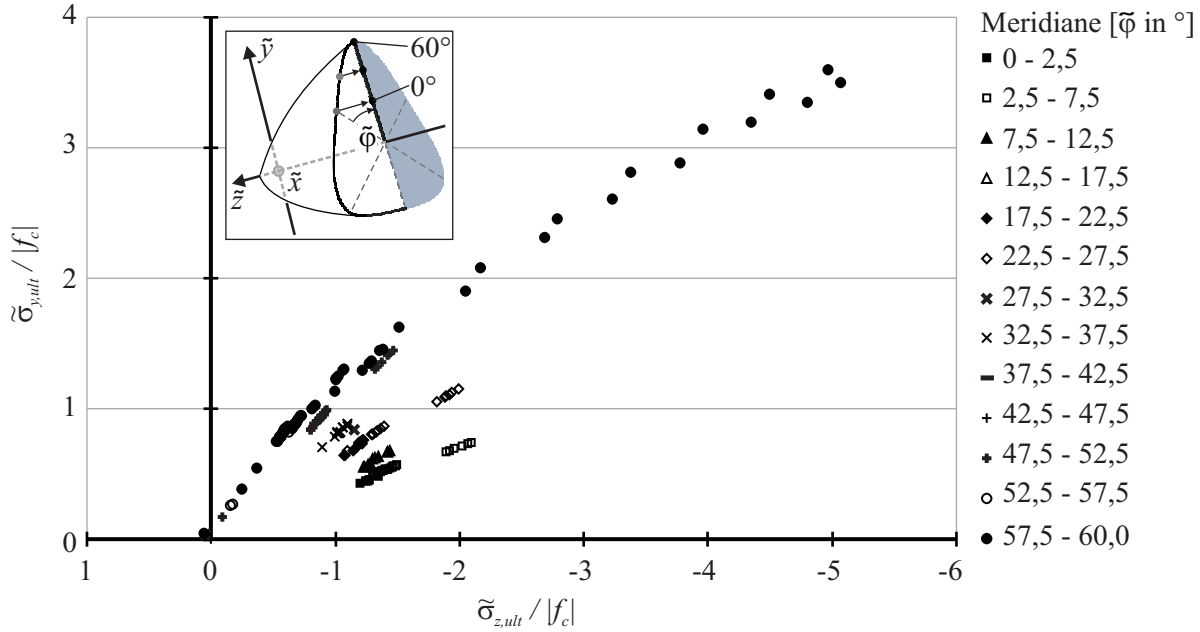


Abbildung B.9: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $90-100\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $100-110\,\mathbf{N/mm^2}$

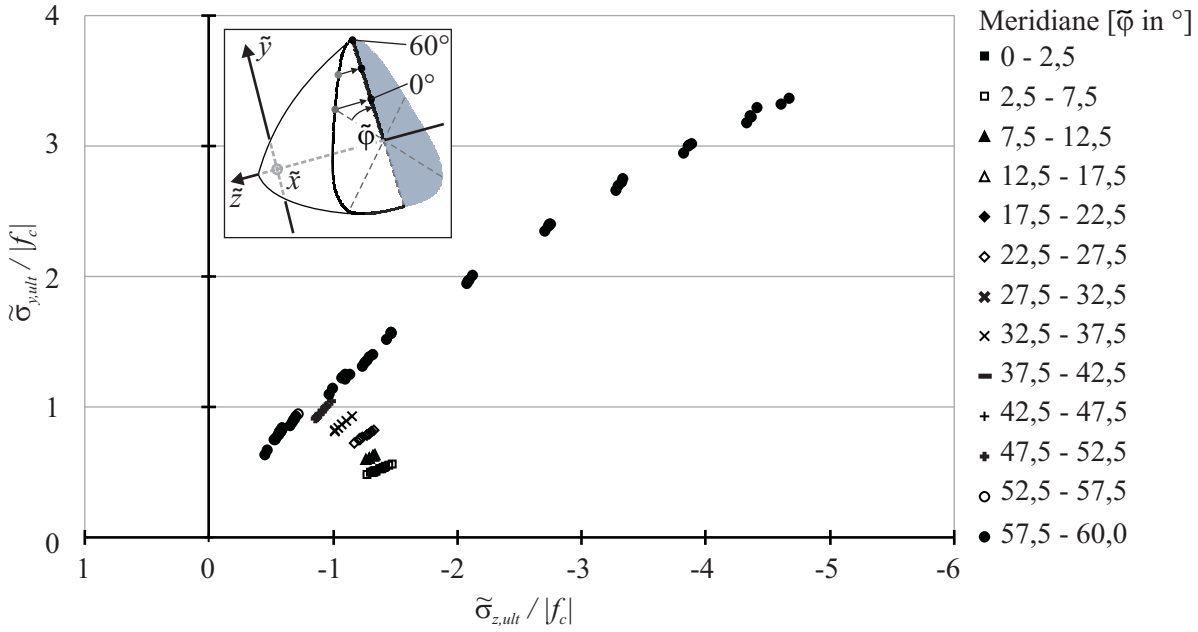


Abbildung B.10: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $100-110\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $150-160\,\mathbf{N/mm^2}$

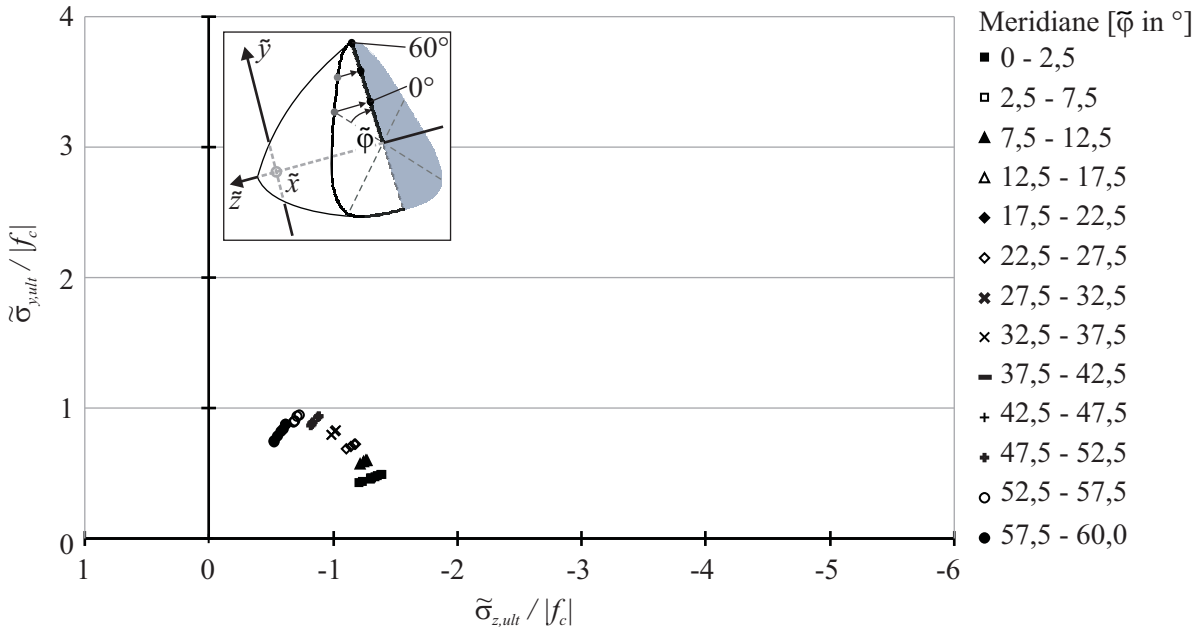


Abbildung B.11: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $150-160\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $160-170\,\mathrm{N/mm^2}$

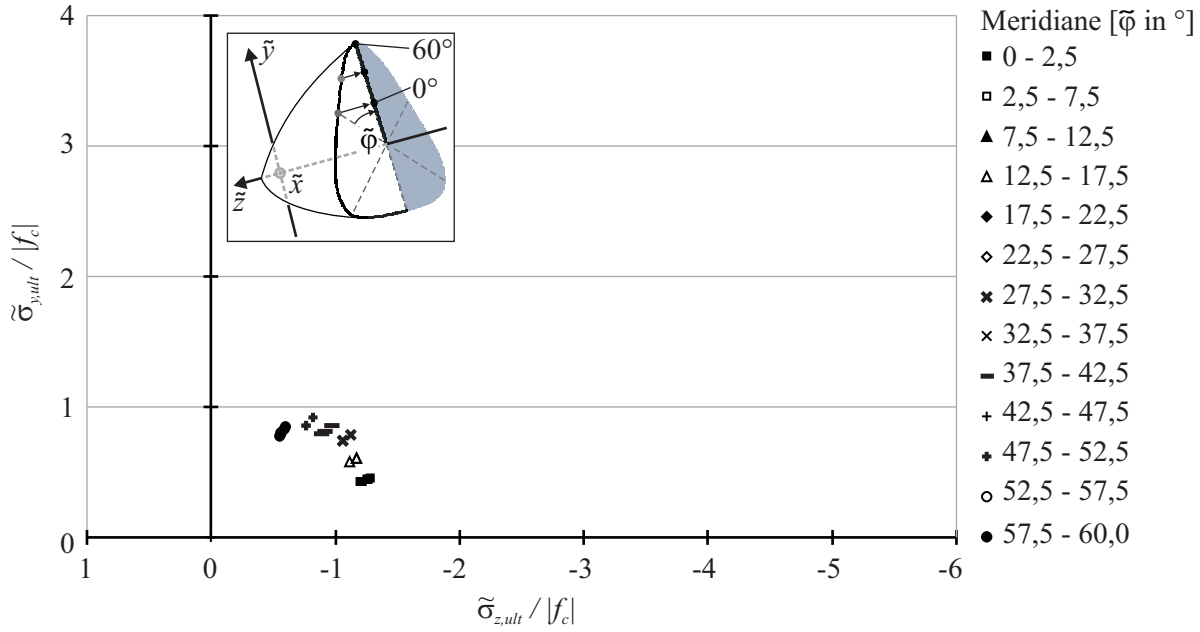


Abbildung B.12: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $160-170\,\mathrm{N/mm^2}$

Druckfestigkeitsklasse von $170-180\,\mathrm{N/mm^2}$

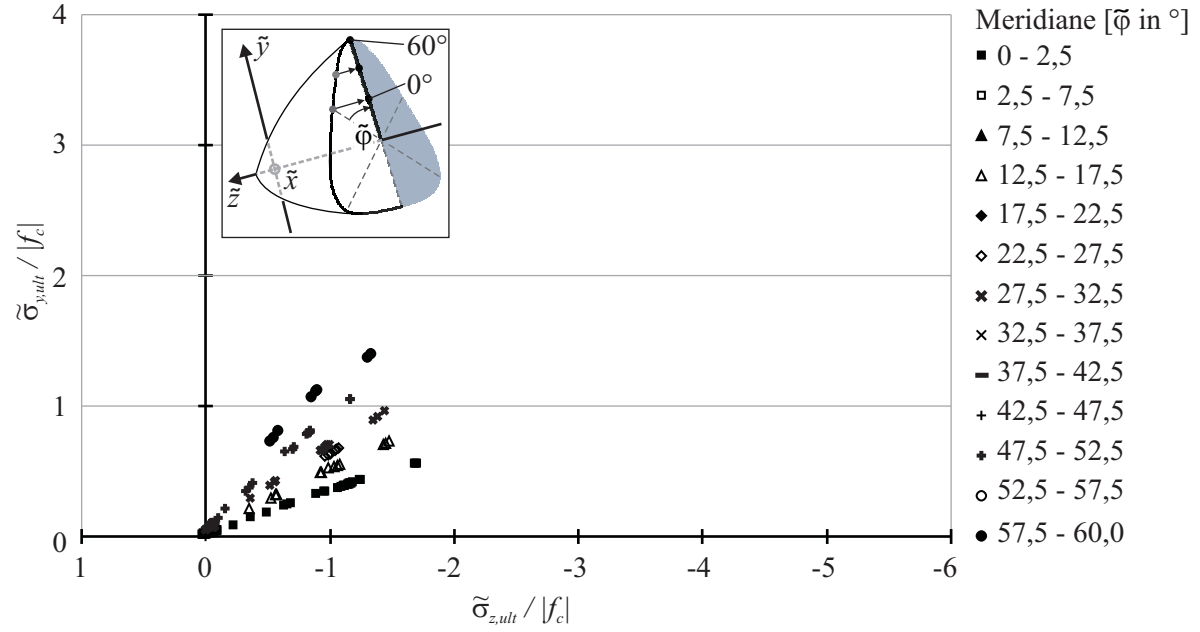


Abbildung B.13: Bezogene mehraxiale Festigkeitswerte von Betonen mit einaxialen Druckfestigkeiten von $170-180\,\mathrm{N/mm^2}$

C Vergleich zwischen experimentellen und berechneten mehraxialen Festigkeitswerten

C.1 Festigkeitswerte der mehraxialen Referenzenversuche

Tabelle C.1: Festigkeitswerte mehraxialer Versuche verschiedener Autoren als Referenzwerte für das Grenzkriterium

Nr.	Quelle	Versuch	SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\lvert f_c \rvert$	σ_{ult}
			α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]
1	[19]	DDD	-0,109	-0,109	-1,000	60,0	9,79	-21,76
2	[19]	DDD	-0,247	-0,247	-1,000	60,0	9,79	-199,08
3	[19]	DDD	-0,268	-0,268	-1,000	60,0	17,08	-516,22
4	[56]	ZZ	1,000	0,450	0,000	26,7	15,70	1,64
5	[57]	DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	19,10	-22,54
6	[57]	ZD	0,070	0,000	-1,000	56,6	19,20	-16,43
7	[57]	ZZ	1,000	1,000	0,000	60,0	16,90	2,01
8	[125]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	17,54	-17,54
9	[125]	ZDD	0,250	-0,250	-1,000	36,6	17,54	-4,78
10	[125]	ZDD	0,250	-0,750	-1,000	10,9	17,54	-4,69
11	[66]	ZZD	0,152	0,138	-1,000	59,4	29,61	-11,29
12	[66]	ZZD	0,104	0,092	-1,000	59,5	29,61	-8,05
13	[77]	ZDD	0,047	-1,000	-1,000	0,0	25,20	-23,00
14	[82]	DD	0,000	-0,409	-1,000	36,0	26,92	-53,09
15	[82]	DDD	-0,044	-0,547	-1,000	28,2	26,92	-66,12
16	[82]	DDD	-0,024	-0,353	-1,000	40,6	26,92	-61,57
17	[82]	DDD	-0,042	-0,421	-1,000	36,9	26,92	-68,81
18	[84]	ZD	0,005	0,000	-1,000	59,8	25,02	-21,64
19	[84]	ZZ	1,000	0,670	0,000	41,1	25,02	2,03
20	[108]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	29,10	-31,70
21	[19]	DDD	-0,245	-0,245	-1,000	60,0	37,39	-275,65
22	[21]	Z	1,000	0,000	0,000	0,0	30,03	4,14
23	[21]	ZD	0,710	0,000	-1,000	35,6	30,03	-5,21
24	[65]	ZZ	1,000	0,500	0,000	30,0	30,30	3,15
25	[70]	ZZD	0,067	-0,505	-1,000	27,6	39,50	-18,68
26	[73]	DDD	-0,200	-1,000	-1,000	0,0	33,70	-212,00
27	[77]	ZDD	0,101	-1,000	-1,000	0,0	31,10	-16,50
28	[82]	DDD	-0,028	-0,028	-1,000	60,0	36,10	-51,64
29	[114]	ZDD	0,130	-0,900	-1,800	27,8	33,20	-18,00
30	[114]	ZDD	0,180	-0,300	-0,700	27,0	33,20	-7,00
31	[9]	DDD	-0,020	-1,000	-1,000	0,0	43,60	-66,70
32	[9]	ZDD	0,010	-0,100	-1,000	54,3	44,50	-43,50

Fortsetzung Tabelle C.1: Festigkeitswerte mehraxialer Versuche verschiedener Autoren als Referenzwerte für das Grenzkriterium

Nr.	Quelle	Versuch	SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\lvert f_c \rvert$	σ_{ult}
			α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]
33	[19]	DDD	-0,249	-0,249	-1,000	60,0	42,11	-338,53
34	[36]	DDD	-0,100	-0,200	-1,000	54,2	46,09	-147,60
35	[66]	ZZD	0,025	0,025	-1,000	60,0	47,35	-19,19
36	[70]	Z	1,000	0,000	0,000	0,0	43,20	3,11
37	[70]	ZDD	0,022	-0,503	-1,000	29,1	43,60	-22,72
38	[70]	ZDD	0,031	-0,249	-1,000	44,8	41,80	-27,38
39	[113]	ZZD	1,000	0,567	-0,911	47,5	44,55	1,58
40	[113]	ZDD	1,000	-0,019	-0,019	0,0	44,55	1,05
41	[9]	ZDD	0,100	-0,300	-1,000	38,9	54,00	-28,90
42	[13]	DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	51,87	-56,02
43	[19]	DDD	-0,210	-0,210	-1,000	60,0	51,54	-246,67
44	[66]	ZZZ	1,000	0,995	0,512	59,5	53,43	2,87
45	[66]	ZZZ	1,000	0,998	0,997	26,3	53,43	2,90
46	[73]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	55,20	-55,20
47	[73]	ZDD	0,058	-0,999	-1,000	0,0	55,20	-26,64
48	[73]	Z	1,000	0,000	0,000	0,0	55,20	4,32
49	[113]	ZZ	1,000	0,609	0,000	37,2	51,19	2,50
50	[113]	ZZD	0,590	0,587	-1,000	59,9	51,19	-3,73
51	[9]	ZDD	0,030	-0,500	-1,000	29,0	64,60	-45,50
52	[9]	ZDD	0,020	-1,000	-1,000	0,0	64,30	-61,70
53	[18]	DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	66,70	-82,29
54	[19]	DDD	-0,243	-0,243	-1,000	60,0	64,12	-368,95
55	[36]	ZD	0,500	0,000	-1,000	40,9	60,15	-4,62
56	[36]	Z	1,000	0,000	0,000	0,0	69,17	5,03
57	[36]	ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	69,17	-45,71
58	[57]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	61,90	-61,90
59	[57]	ZD	0,070	0,000	-1,000	56,6	60,00	-37,14
60	[100]	DDD	-0,123	-0,123	-1,000	60,0	67,20	-152,76
61	[17]	DDD	-0,050	-0,050	-1,000	60,0	72,90	-101,20
62	[17]	DDD	-0,050	-0,950	-1,000	2,7	72,90	-115,26
63	[19]	DDD	-0,274	-0,274	-1,000	60,0	76,73	-449,33
64	[36]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	72,44	-65,49
65	[36]	DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	72,44	-98,63
66	[36]	DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	72,73	-228,23
67	[44]	ZD	0,190	0,000	-1,000	51,5	73,65	-15,05
68	[44]	Z	1,000	0,000	0,000	0,0	73,65	4,15
69	[44]	ZZ	1,000	0,500	0,000	30,0	73,65	4,44
70	[100]	DDD	-0,123	-0,123	-1,000	60,0	78,40	-177,08
71	[18]	DDD	-0,050	-0,600	-1,000	24,8	84,95	-161,09
72	[17]	DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	83,10	-103,80
73	[19]	DDD	-0,238	-0,238	-1,000	60,0	89,46	-452,84
74	[19]	DDD	-0,105	-0,105	-1,000	60,0	88,39	-173,30

Fortsetzung Tabelle C.1: Festigkeitswerte mehraxialer Versuche verschiedener Autoren als Referenzwerte für das Grenzkriterium

Nr.	Quelle	Versuch	SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\lvert f_c \rvert$	σ_{ult}
			α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]
75	[36]	Z	1,000	0,000	0,000	0,0	87,44	4,80
76	[36]	ZD	0,025	0,000	-1,000	58,8	87,44	-46,58
77	[36]	DDD	-0,100	-0,950	-1,000	2,8	83,44	-208,44
78	[36]	DDD	-0,150	-0,200	-1,000	57,0	83,44	-292,97
79	[36]	DDD	-0,150	-0,950	-1,000	3,0	83,44	-283,02
80	[100]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	83,10	-81,28
81	[17]	DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	97,27	-127,71
82	[17]	DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	97,27	-114,95
83	[19]	DDD	-0,103	-0,103	-1,000	60,0	90,36	-179,83
84	[19]	DDD	-0,241	-0,241	-1,000	60,0	99,82	-579,69
85	[36]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	94,20	-96,68
86	[44]	ZD	0,190	0,000	-1,000	51,5	96,54	-18,63
87	[44]	Z	1,000	0,000	0,000	0,0	96,54	4,82
88	[44]	ZZ	1,000	0,500	0,000	30,0	96,54	5,06
89	[100]	DDD	-0,098	-0,098	-1,000	60,0	96,90	-190,41
90	[100]	DDD	-0,048	-0,048	-1,000	60,0	95,30	-124,56
91	[17]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	106,28	-109,06
92	[17]	DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	106,28	-146,82
93	[17]	DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	106,28	-136,72
94	[17]	DD	0,000	-0,950	-1,000	2,5	102,25	-126,61
95	[19]	DDD	-0,097	-0,097	-1,000	60,0	106,20	-225,30
96	[19]	DDD	-0,214	-0,214	-1,000	60,0	106,20	-499,93
97	[100]	DDD	-0,074	-0,074	-1,000	60,0	104,10	-167,97
98	[100]	DDD	-0,099	-0,099	-1,000	60,0	105,70	-190,36
99	[18]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	151,02	-152,25
100	[18]	DD	0,000	-0,050	-1,000	57,5	151,02	-180,15
101	[18]	DD	0,000	-0,200	-1,000	49,1	151,02	-180,77
102	[18]	DD	0,000	-0,400	-1,000	36,6	151,02	-183,71
103	[18]	DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	151,02	-192,27
104	[18]	DD	0,000	-0,600	-1,000	23,4	151,02	-186,08
105	[18]	DD	0,000	-0,800	-1,000	10,9	151,02	-185,46
106	[18]	DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	151,02	-181,70
107	[18]	D	0,000	0,000	-1,000	60,0	168,20	-170,88
108	[18]	DD	0,000	-0,158	-1,000	51,5	168,20	-191,24
109	[18]	DD	0,000	-0,325	-1,000	41,4	168,20	-200,93
110	[18]	DD	0,000	-0,510	-1,000	29,3	168,20	-204,23
111	[18]	DD	0,000	-0,727	-1,000	15,3	168,20	-197,16
112	[18]	DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	168,20	-183,14
113	[18]	DD	0,000	-1,000	-1,000	0,0	179,50	-179,85
114	Eigene	Z	1,000	0,000	0,000	0,0	170,83	7,89
115	Eigene	ZDD	-0,027	-0,287	-1,000	45,0	164,04	-250,27
116	Eigene	ZDD	-0,027	-0,739	-1,000	15,0	170,49	-239,80

Fortsetzung Tabelle C.1: Festigkeitswerte mehraxialer Versuche verschiedener Autoren als Referenzwerte für das Grenzkriterium

Nr.	Quelle	Versuch	SPV			$\widetilde{\varphi}$	$\lvert f_c \rvert$	σ_{ult}
			α_1	α_2	α_3	[°]	[N/mm^2]	[N/mm^2]
117	Eigene	ZDD	0,075	-0,463	-1,000	30,0	188,07	-84,97
118	Eigene	ZDD	0,050	-0,231	-1,000	45,0	188,07	-104,91
119	Eigene	ZDD	0,225	-0,388	-1,000	30,0	180,87	-18,28
120	Eigene	ZDD	0,110	-1,000	-1,000	0,0	181,55	-34,04
121	Eigene	ZDD	0,075	-0,463	-1,000	30,0	181,55	-66,58
122	Eigene	ZDD	0,050	-1,000	-1,000	0,0	170,83	-103,72

C.2 Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit den Versuchswerten

Tabelle C.2: Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit $r(\hat{z})$ gemäß Gl. (4.18) ($r_4 = 1$) mit den Versuchswerten

Nr.	Versuch		Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
		σ_{ult} [N/mm^2]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]
1	DDD	-22	-21	-5	-25	15	-26	20
2	DDD	-199	-98	-51	-300	51	-119	-40
3	DDD	-516	-190	-63	-287	-44	-214	-59
4	ZZ	2	3	71	1	-45	5	177
5	DD	-23	-26	16	-55	142	-27	20
6	ZD	-16	-14	-12	-9	-46	-18	7
7	ZZ	2	3	29	1	-53	4	115
8	D	-18	-17	-6	-11	-35	-20	14
9	ZDD	-5	-9	85	-4	-19	-11	138
10	ZDD	-5	-9	98	-4	-12	-11	143
11	ZZD	-11	-13	15	-9	-19	-16	38
12	ZZD	-8	-16	93	-11	40	-18	126
13	ZDD	-23	-24	6	-20	-15	-24	4
14	DD	-53	-36	-32	-33	-38	-35	-34
15	DDD	-66	-52	-22	-75	13	-48	-27
16	DDD	-62	-42	-31	-43	-30	-40	-34
17	DDD	-69	-50	-27	-61	-11	-47	-32
18	ZD	-22	-22	1	-17	-21	-24	12
19	ZZ	2	3	59	2	-14	5	154
20	D	-32	-25	-20	-21	-34	-27	-15
21	DDD	-276	-259	-6	-242	-12	-269	-3
22	Z	4	4	-13	2	-46	5	29

Fortsetzung Tabelle C.2: Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit $r(\hat{z})$ gemäß Gl. (4.18) ($r_4 = 1$) mit den Versuchswerten

Nr.	Versuch		Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
		σ_{ult} [N/mm^2]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]
23	ZD	-5	-5	-7	-3	-43	-6	23
24	ZZ	3	4	11	2	-27	5	73
25	ZZD	-19	-33	76	-23	24	-29	57
26	DDD	-212	-240	13	-882	316	-240	13
27	ZDD	-17	-22	32	-14	-13	-21	26
28	DDD	-52	-37	-28	-35	-33	-37	-29
29	ZDD	-18	-28	54	-19	7	-26	47
30	ZDD	-7	-13	85	-8	18	-14	103
31	DDD	-67	-56	-16	-44	-34	-45	-33
32	ZDD	-44	-45	4	-40	-7	-41	-5
33	DDD	-339	-287	-15	-272	-20	-295	-13
34	DDD	-148	-118	-20	-124	-16	-108	-27
35	ZZD	-19	-34	78	-32	65	-33	72
36	Z	3	4	33	4	20	6	90
37	ZDD	-23	-47	108	-35	54	-40	75
38	ZDD	-27	-41	50	-33	20	-37	35
39	ZZD	2	4	151	4	139	6	248
40	ZDD	1	4	298	4	269	6	466
41	ZDD	-29	-34	19	-27	-6	-30	5
42	DD	-56	-57	2	-39	-31	-44	-22
43	DDD	-247	-249	1	-253	3	-254	3
44	ZZZ	3	4	33	5	88	7	134
45	ZZZ	3	4	26	6	95	7	148
46	D	-55	-47	-14	-45	-18	-43	-22
47	ZDD	-27	-43	60	-28	5	-33	23
48	Z	4	5	5	5	20	6	47
49	ZZ	3	4	66	5	95	6	154
50	ZZD	-4	-6	70	-7	87	-8	126
51	ZDD	-46	-64	41	-45	-1	-49	8
52	ZDD	-62	-61	-1	-38	-38	-45	-27
53	DD	-82	-68	-17	-65	-21	-58	-29
54	DDD	-369	-353	-4	-377	2	-359	-3
55	ZD	-5	-10	108	-10	124	-11	141
56	Z	5	5	-2	7	41	7	35
57	ZD	-46	-55	20	-54	19	-48	5
58	D	-62	-54	-13	-52	-16	-48	-23
59	ZD	-37	-38	3	-37	-1	-35	-4
60	DDD	-153	-162	6	-169	11	-152	0
61	DDD	-101	-97	-4	-94	-7	-83	-18
62	DDD	-115	-116	0	-68	-41	-89	-23

Fortsetzung Tabelle C.2: Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit $r(\hat{z})$ gemäß Gl. (4.18) ($r_4 = 1$) mit den Versuchswerten

Nr.	Versuch		Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
		σ_{ult} [N/mm^2]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]
63	DDD	-449	-458	2	-523	16	-458	2
64	D	-65	-64	-2	-63	-3	-55	-15
65	DD	-99	-90	-9	-65	-34	-69	-30
66	DDD	-228	-280	23	-223	-2	-263	15
67	ZD	-15	-27	77	-29	93	-26	72
68	Z	4	5	21	8	86	7	67
69	ZZ	4	5	7	8	82	7	59
70	DDD	-177	-188	6	-199	12	-181	2
71	DDD	-161	-155	-4	-94	-42	-127	-21
72	DD	-104	-102	-2	-84	-19	-82	-21
73	DDD	-453	-411	-9	-508	12	-422	-7
74	DDD	-173	-184	6	-190	10	-175	1
75	Z	5	5	12	10	103	7	52
76	ZD	-47	-72	54	-73	56	-61	31
77	DDD	-208	-200	-4	-110	-47	-180	-14
78	DDD	-293	-271	-8	-304	4	-275	-6
79	DDD	-283	-317	12	-199	-30	-299	6
80	D	-81	-75	-7	-75	-8	-64	-21
81	DD	-128	-120	-6	-99	-22	-99	-22
82	DD	-115	-118	3	-72	-37	-89	-23
83	DDD	-180	-185	3	-192	7	-178	-1
84	DDD	-580	-443	-24	-580	0	-457	-21
85	D	-97	-87	-10	-88	-9	-74	-24
86	ZD	-19	-34	82	-41	121	-31	68
87	Z	5	6	15	11	131	8	56
88	ZZ	5	5	3	12	133	8	52
89	DDD	-190	-191	1	-198	4	-185	-3
90	DDD	-125	-130	4	-127	2	-114	-8
91	D	-109	-100	-8	-102	-6	-86	-21
92	DD	-147	-129	-12	-77	-47	-99	-33
93	DD	-137	-123	-10	-68	-51	-92	-33
94	DD	-127	-111	-12	-60	-52	-82	-35
95	DDD	-225	-208	-8	-219	-3	-206	-9
96	DDD	-500	-403	-19	-536	7	-421	-16
97	DDD	-168	-173	3	-174	3	-163	-3
98	DDD	-190	-209	10	-220	16	-207	9
99	D	-152	-151	-1	-159	4	-143	-6
100	DD	-180	-172	-4	-173	-4	-167	-7
101	DD	-181	-191	5	-158	-13	-184	2
102	DD	-184	-188	2	-126	-31	-175	-5

Fortsetzung Tabelle C.2: Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit $r(\hat{z})$ gemäß Gl. (4.18) ($r_4 = 1$) mit den Versuchswerten

Nr.	Versuch		Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
		σ_{ult} [N/mm^2]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]
103	DD	-192	-184	-4	-104	-46	-168	-13
104	DD	-186	-184	-1	-104	-44	-168	-10
105	DD	-185	-176	-5	-90	-51	-159	-14
106	DD	-182	-161	-11	-80	-56	-146	-20
107	D	-171	-170	0	-182	7	-170	-1
108	DD	-191	-211	10	-186	-3	-216	13
109	DD	-201	-211	5	-152	-24	-212	6
110	DD	-204	-207	1	-125	-39	-206	1
111	DD	-197	-200	2	-104	-47	-199	1
112	DD	-183	-181	-1	-88	-52	-181	-1
113	DD	-180	-194	8	-93	-48	-207	15
114	Z	8	7	-13	24	204	9	17
115	ZDD	-250	-248	-1	-186	-26	-261	4
116	ZDD	-240	-248	4	-117	-51	-273	14
117	ZDD	-85	-138	62	-105	24	-120	42
118	ZDD	-105	-169	61	-145	38	-163	55
119	ZDD	-18	-55	198	-66	263	-44	139
120	ZDD	-34	-99	191	-68	99	-78	128
121	ZDD	-67	-133	100	-101	52	-113	70
122	ZDD	-104	-132	28	-76	-27	-114	9

Tabelle C.3: Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit $r(\hat{z})$ gemäß Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$) mit den Versuchswerten

Nr.	Versuch		Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
		σ_{ult} [N/mm^2]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]
1	DDD	-22	-49	127	-40	82	-172	689
2	DDD	-199	-816	310	-452	127	-333	67
3	DDD	-516	-460	-11	-435	-16	-382	-26
4	ZZ	2	2	33	2	42	2	-8
5	DD	-23	-25	12	-16	-31	-25	11
6	ZD	-16	-16	-3	-16	-2	-14	-17
7	ZZ	2	2	5	3	27	2	-21
8	D	-18	-20	16	-20	16	-18	4
9	ZDD	-5	-8	66	-7	46	-6	19
10	ZDD	-5	-8	69	-6	30	-5	15

Fortsetzung Tabelle C.3: Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit $r(\hat{z})$ gemäß Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$) mit den Versuchswerten

Nr.	Versuch		Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
		σ_{ult} [N/mm^2]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]
11	ZZD	-11	-13	12	-15	32	-11	0
12	ZZD	-8	-16	94	-18	122	-14	75
13	ZDD	-23	-23	1	-17	-26	-21	-8
14	DD	-53	-37	-30	-31	-41	-36	-33
15	DDD	-66	-55	-17	-43	-35	-66	-1
16	DDD	-62	-45	-26	-39	-37	-45	-26
17	DDD	-69	-54	-22	-45	-35	-60	-13
18	ZD	-22	-24	13	-26	20	-22	3
19	ZZ	2	3	31	3	71	2	8
20	D	-32	-27	-13	-30	-6	-26	-19
21	DDD	-276	-277	0	-291	6	-334	21
22	Z	4	3	-27	4	-7	3	-39
23	ZD	-5	-4	-20	-5	-5	-3	-34
24	ZZ	3	3	-6	4	27	3	-19
25	ZZD	-19	-32	70	-29	57	-29	53
26	DDD	-212	-300	42	-235	11	-229	8
27	ZDD	-17	-20	24	-17	2	-17	6
28	DDD	-52	-40	-22	-44	-15	-39	-25
29	ZDD	-18	-27	48	-24	32	-23	30
30	ZDD	-7	-12	67	-12	70	-9	35
31	DDD	-67	-57	-14	-50	-25	-69	3
32	ZDD	-44	-46	6	-49	13	-45	4
33	DDD	-339	-303	-11	-313	-8	-338	0
34	DDD	-148	-123	-17	-127	-14	-126	-14
35	ZZD	-19	-34	78	-39	102	-33	72
36	Z	3	4	17	5	68	3	9
37	ZDD	-23	-47	106	-43	91	-46	104
38	ZDD	-27	-41	50	-41	49	-39	42
39	ZZD	2	4	126	5	226	3	115
40	ZDD	1	4	252	5	408	3	231
41	ZDD	-29	-33	14	-35	20	-30	3
42	DD	-56	-57	3	-53	-6	-65	16
43	DDD	-247	-250	2	-254	3	-256	4
44	ZZZ	3	3	21	7	127	4	40
45	ZZZ	3	3	15	7	135	4	42
46	D	-55	-47	-14	-52	-5	-47	-15
47	ZDD	-27	-42	56	-39	46	-41	53
48	Z	4	4	-5	6	48	4	-4
49	ZZ	3	4	50	6	145	4	56
50	ZZD	-4	-6	56	-9	132	-6	55

Fortsetzung Tabelle C.3: Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit $r(\hat{z})$ gemäß Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$) mit den Versuchswerten

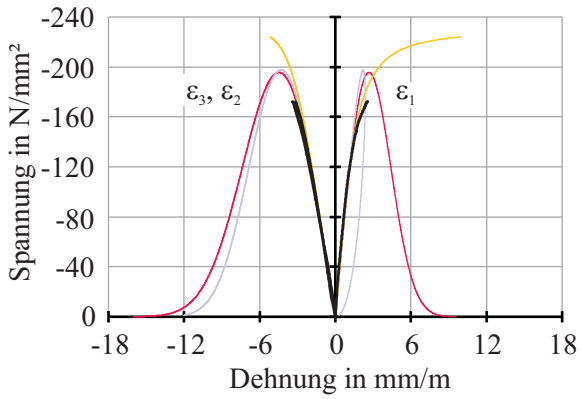
Nr.	Versuch		Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
		σ_{ult} [N/mm^2]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]
51	ZDD	-46	-63	38	-62	36	-63	38
52	ZDD	-62	-61	-2	-58	-6	-64	4
53	DD	-82	-67	-18	-71	-13	-68	-18
54	DDD	-369	-365	-1	-355	-4	-350	-5
55	ZD	-5	-9	93	-12	165	-9	84
56	Z	5	5	-9	8	53	5	-1
57	ZD	-46	-54	18	-59	29	-52	14
58	D	-62	-53	-14	-58	-6	-53	-15
59	ZD	-37	-37	0	-43	15	-35	-5
60	DDD	-153	-162	6	-164	8	-177	16
61	DDD	-101	-96	-5	-99	-2	-102	1
62	DDD	-115	-120	4	-118	3	-135	18
63	DDD	-449	-503	12	-461	3	-442	-2
64	D	-65	-63	-4	-68	3	-62	-5
65	DD	-99	-89	-10	-88	-10	-93	-5
66	DDD	-228	-313	37	-274	20	-259	14
67	ZD	-15	-25	69	-32	110	-24	58
68	Z	4	5	14	8	95	5	27
69	ZZ	4	5	2	8	84	5	18
70	DDD	-177	-188	6	-187	6	-212	20
71	DDD	-161	-158	-2	-156	-3	-172	7
72	DD	-104	-100	-3	-101	-3	-104	0
73	DDD	-453	-433	-4	-408	-10	-434	-4
74	DDD	-173	-183	6	-180	4	-212	22
75	Z	5	5	7	9	93	6	26
76	ZD	-47	-70	50	-74	59	-67	43
77	DDD	-208	-213	2	-204	-2	-208	0
78	DDD	-293	-273	-7	-268	-9	-302	3
79	DDD	-283	-351	24	-297	5	-272	-4
80	D	-81	-74	-9	-77	-5	-72	-11
81	DD	-128	-119	-7	-118	-8	-123	-3
82	DD	-115	-117	2	-117	2	-121	5
83	DDD	-180	-185	3	-182	1	-215	19
84	DDD	-580	-473	-18	-441	-24	-479	-17
85	D	-97	-85	-12	-88	-9	-83	-14
86	ZD	-19	-33	75	-41	118	-30	63
87	Z	5	5	12	10	109	7	36
88	ZZ	5	5	1	10	101	7	29
89	DDD	-190	-192	1	-186	-2	-224	17
90	DDD	-125	-128	3	-126	1	-138	11

Fortsetzung Tabelle C.3: Vergleich der berechneten Festigkeitswerte mit $r(\hat{z})$ gemäß Gl. (4.20) ($r_4 \geq 1$) mit den Versuchswerten

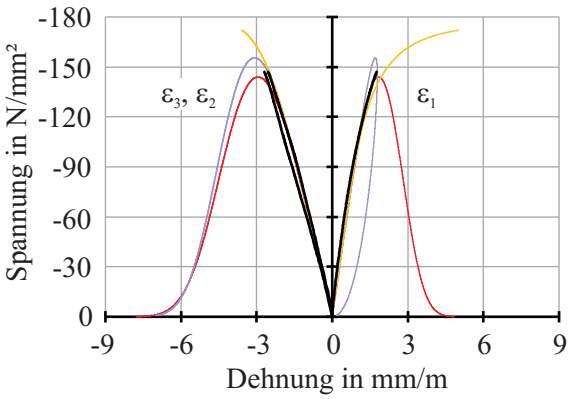
Nr.	Versuch		Ansatz 1 (Gl. (4.25))		Ansatz 2 (Gl. (4.26))		Ansatz 3 (Gl. (4.27))	
		σ_{ult} [N/mm^2]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]	$\sigma_{ult,cal}$ [N/mm^2]	$\Delta\sigma_{ult}$ [%]
91	D	-109	-99	-9	-99	-10	-95	-13
92	DD	-147	-128	-13	-127	-13	-129	-12
93	DD	-137	-122	-11	-122	-11	-122	-11
94	DD	-127	-111	-13	-110	-13	-111	-12
95	DDD	-225	-209	-7	-201	-11	-247	10
96	DDD	-500	-423	-15	-401	-20	-462	-8
97	DDD	-168	-173	3	-166	-1	-197	17
98	DDD	-190	-210	11	-202	6	-248	31
99	D	-152	-151	-1	-140	-8	-142	-7
100	DD	-180	-173	-4	-159	-12	-171	-5
101	DD	-181	-191	6	-179	-1	-193	7
102	DD	-184	-187	2	-178	-3	-181	-2
103	DD	-192	-182	-5	-174	-9	-167	-13
104	DD	-186	-182	-2	-174	-6	-167	-10
105	DD	-185	-173	-7	-166	-11	-153	-17
106	DD	-182	-159	-13	-152	-16	-139	-24
107	D	-171	-172	0	-155	-9	-160	-6
108	DD	-191	-212	11	-195	2	-215	12
109	DD	-201	-210	5	-197	-2	-204	1
110	DD	-204	-205	0	-193	-5	-187	-8
111	DD	-197	-197	0	-185	-6	-169	-14
112	DD	-183	-177	-3	-166	-10	-148	-19
113	DD	-180	-189	5	-174	-3	-154	-15
114	Z	8	7	-8	16	102	10	33
115	ZDD	-250	-250	0	-233	-7	-259	3
116	ZDD	-240	-246	3	-223	-7	-206	-14
117	ZDD	-85	-134	57	-132	56	-113	33
118	ZDD	-105	-167	59	-157	50	-147	41
119	ZDD	-18	-53	189	-64	251	-47	160
120	ZDD	-34	-94	177	-97	186	-79	131
121	ZDD	-67	-129	94	-128	92	-110	65
122	ZDD	-104	-128	23	-125	21	-108	4

D Vergleich der experimentell und rechnerisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien

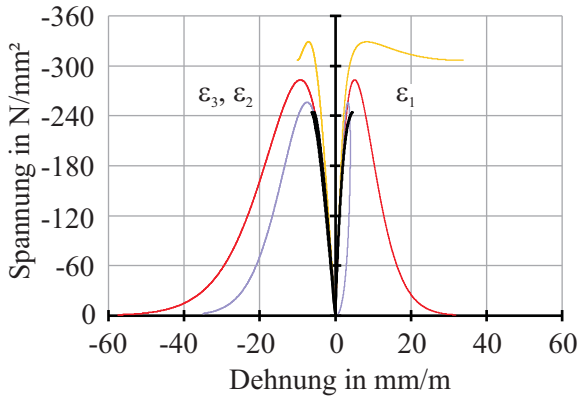
D.1 Spannungs-Dehnungs-Linien mit weggesteuerter Beanspruchung



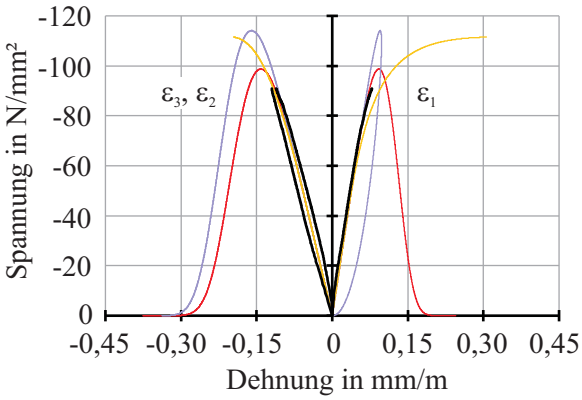
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -1 / -1$



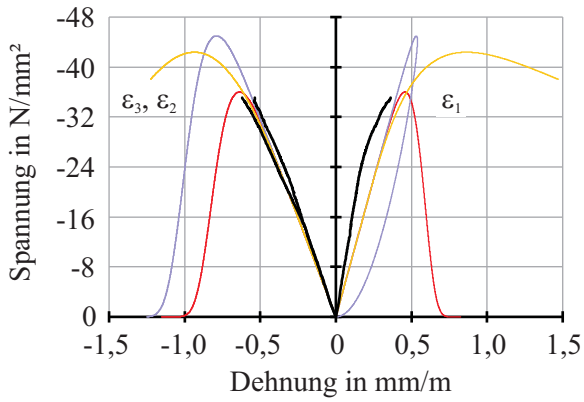
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}025 / -1 / -1$



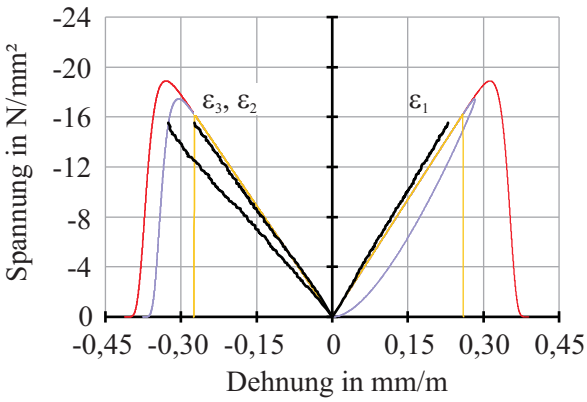
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}039 / -1 / -1$



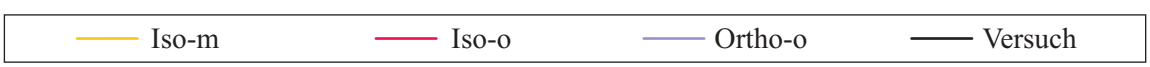
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}05 / -1 / -1$

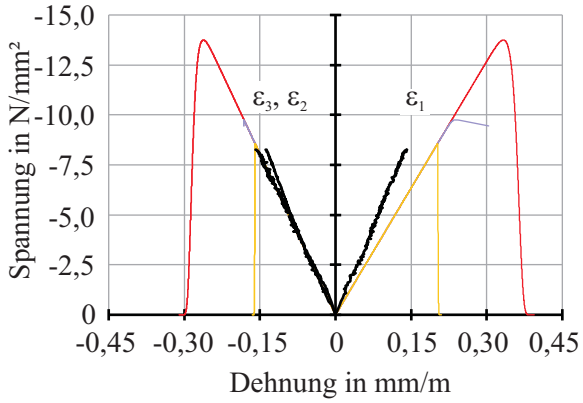


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}11 / -1 / -1$

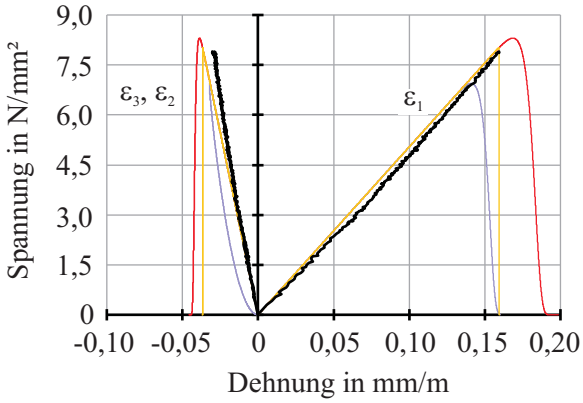


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}345 / -1 / -1$

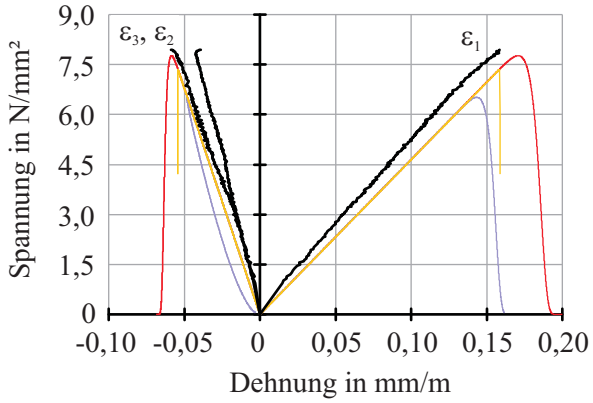




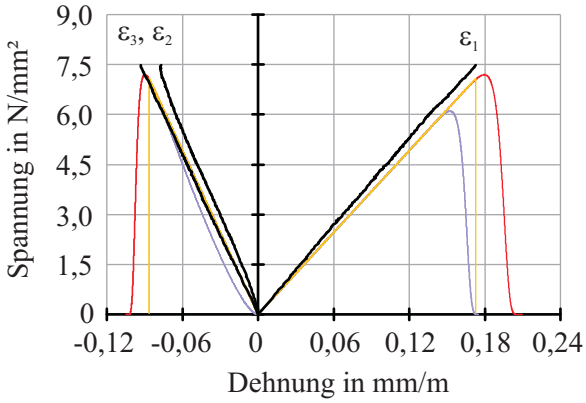
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}732 / -1 / -1$



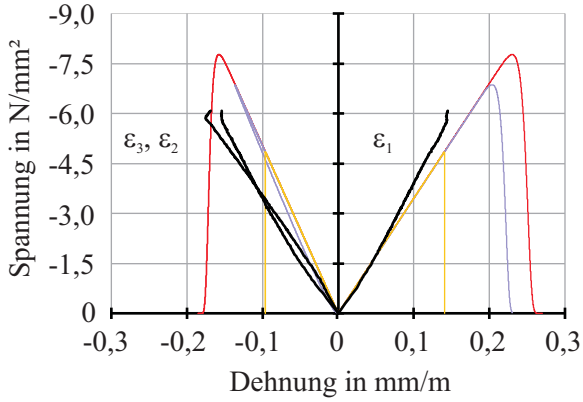
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / 0 / 0$



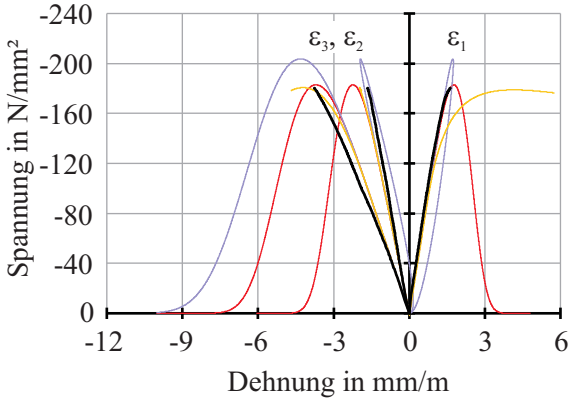
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -0{,}183 / -0{,}183$



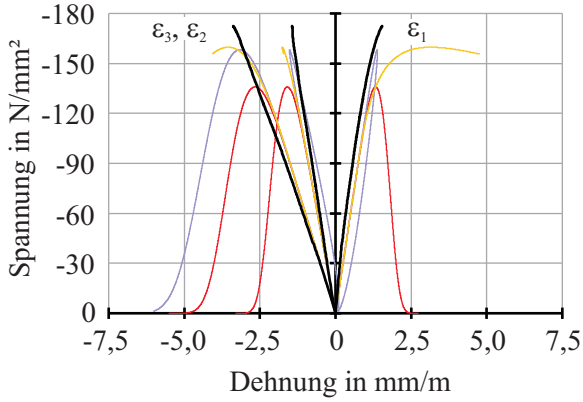
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -0{,}5 / -0{,}5$



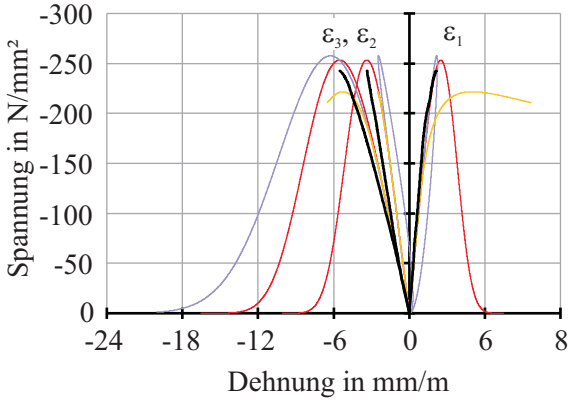
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -1 / -1$



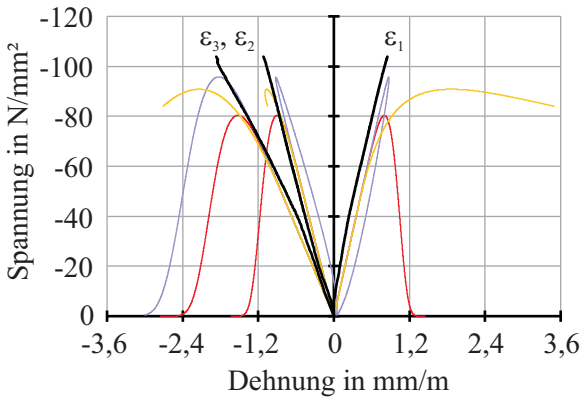
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -0{,}732 / -1$



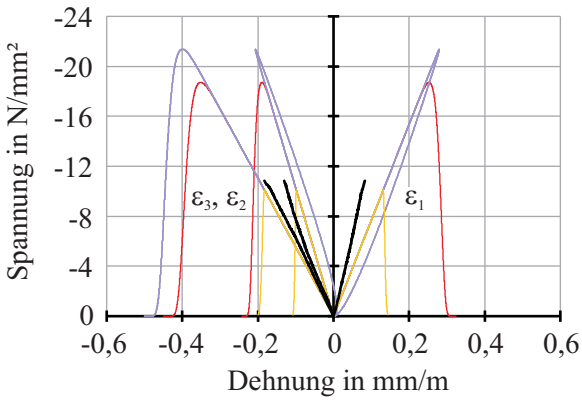
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}02 / -0{,}727 / -1$



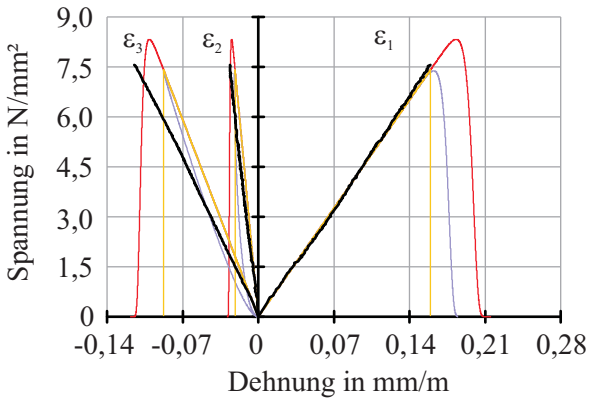
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}027 / -0{,}739 / -1$



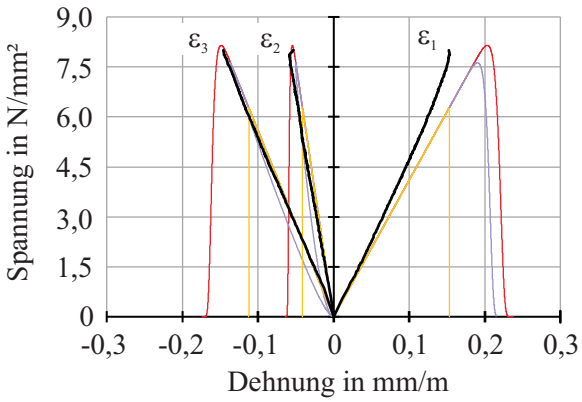
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}05 / -0{,}719 / -1$



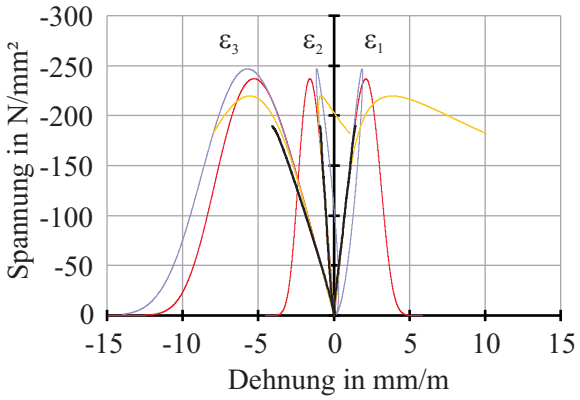
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}275 / -0{,}658 / -1$



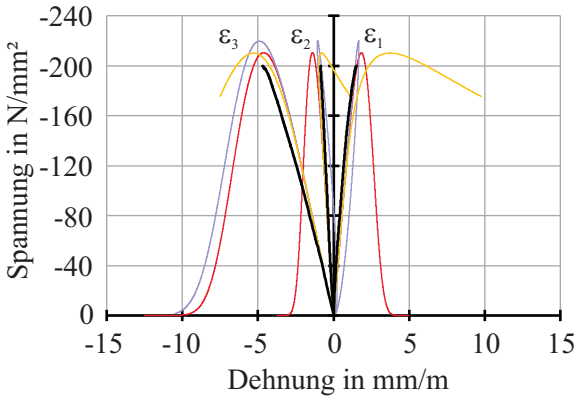
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / 0 / -0{,}366$



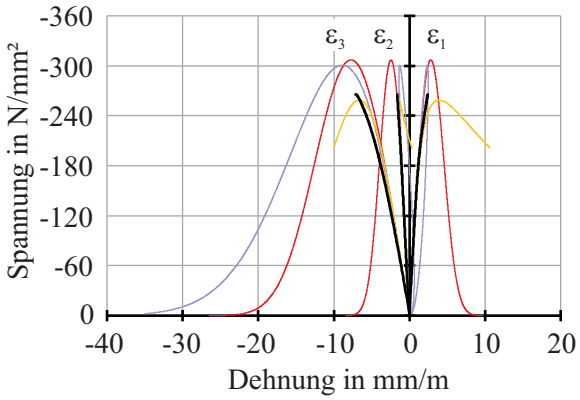
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -0{,}268 / -0{,}732$



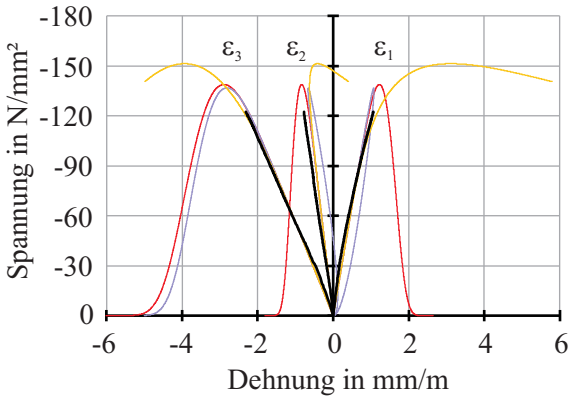
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -0{,}5 / -1$



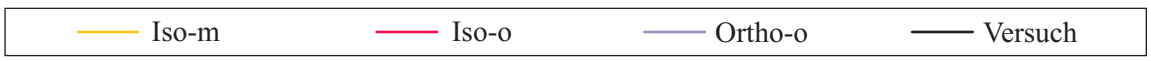
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}01 / -0{,}495 / -1$

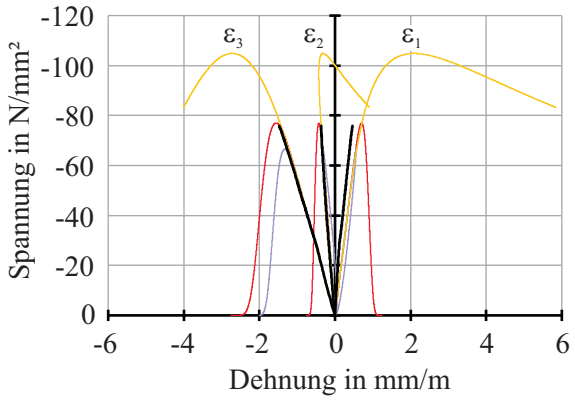


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}029 / -0{,}514 / -1$

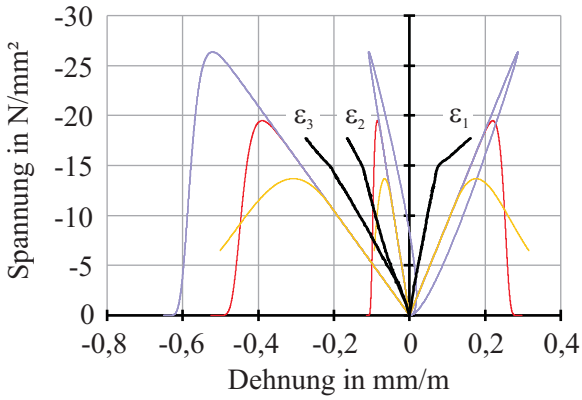


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}04 / -0{,}48 / -1$

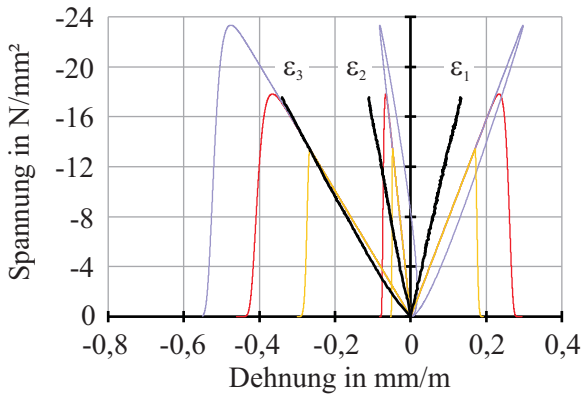




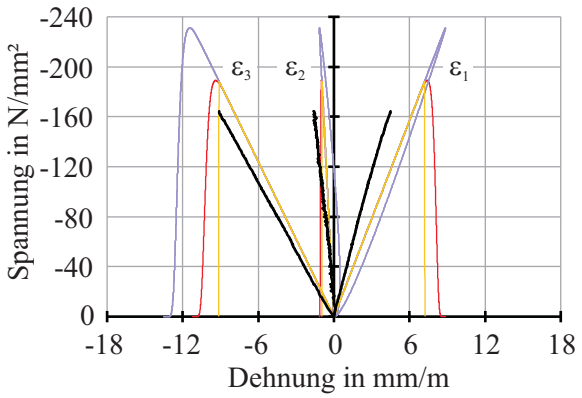
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}075 / -0{,}463 / -1$



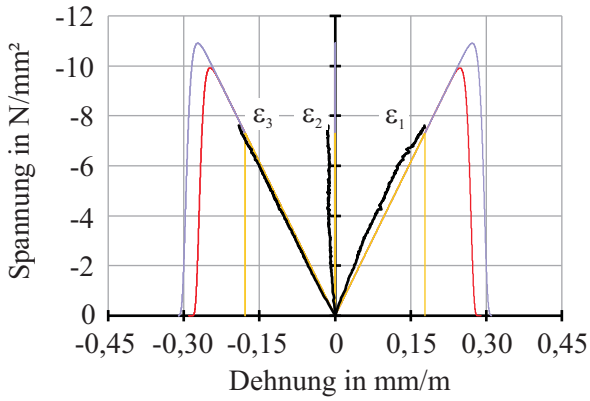
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}225 / -0{,}388 / -1$



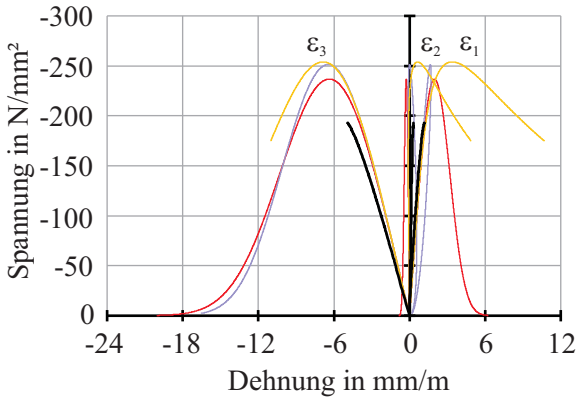
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}333 / -0{,}333 / -1$



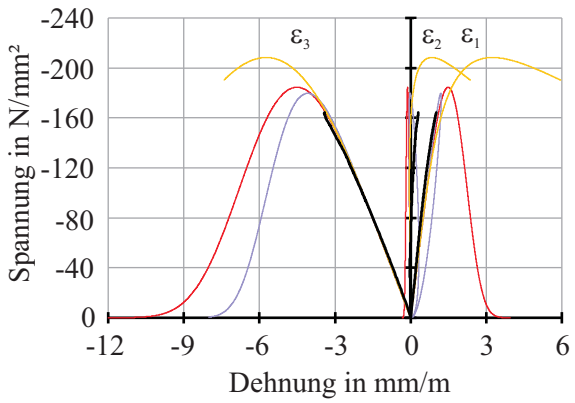
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}577 / -0{,}211 / -1$



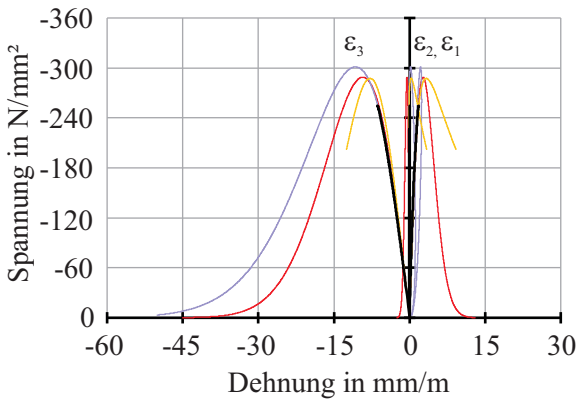
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / 0 / -1$



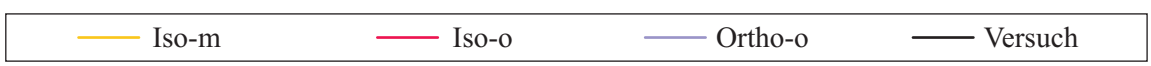
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -0{,}268 / -1$

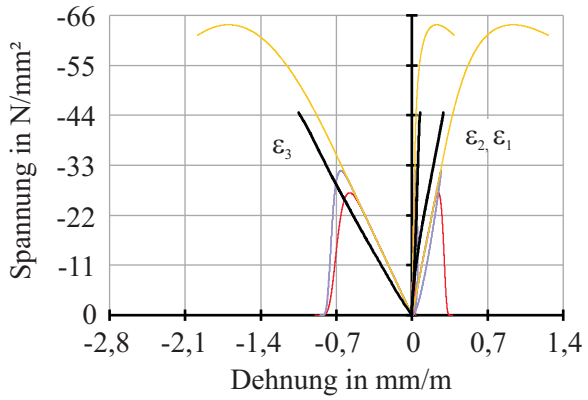


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}025 / -0{,}25 / -1$

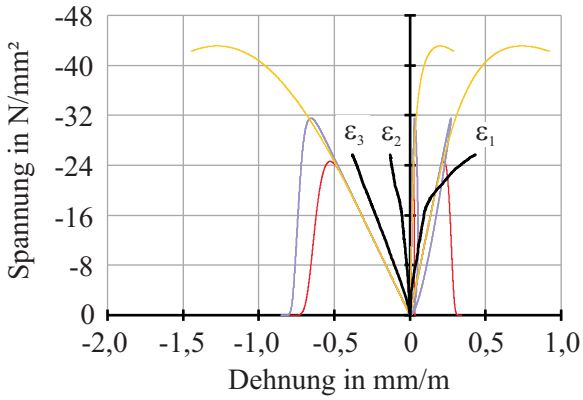


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}027 / -0{,}287 / -1$

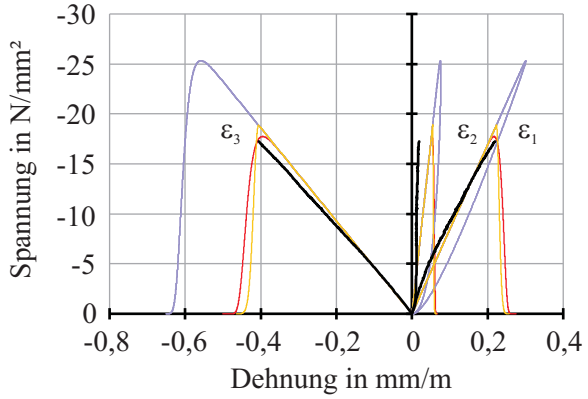




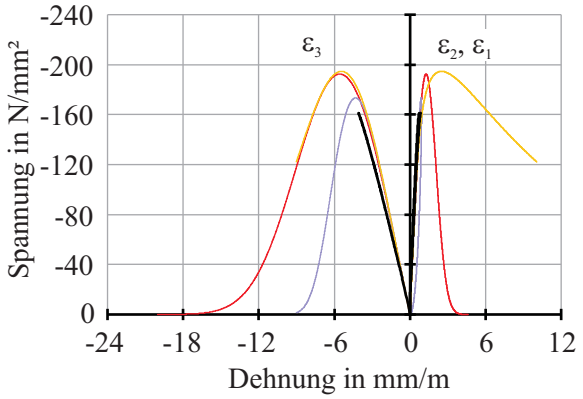
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}155 / -0{,}155 / -1$



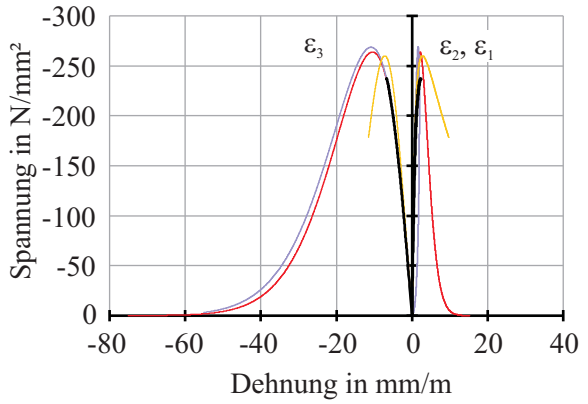
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}165 / -0{,}147 / -1$



$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}366 / 0 / -1$



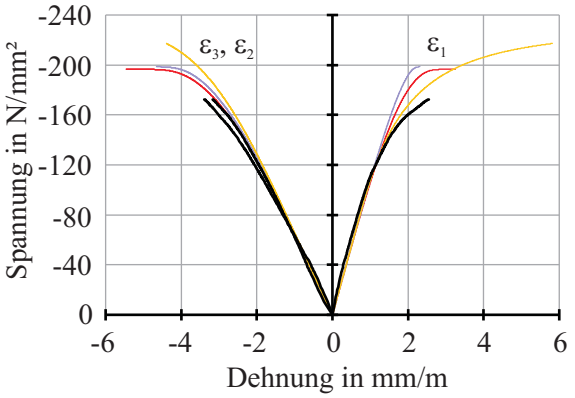
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / 0 / -1$



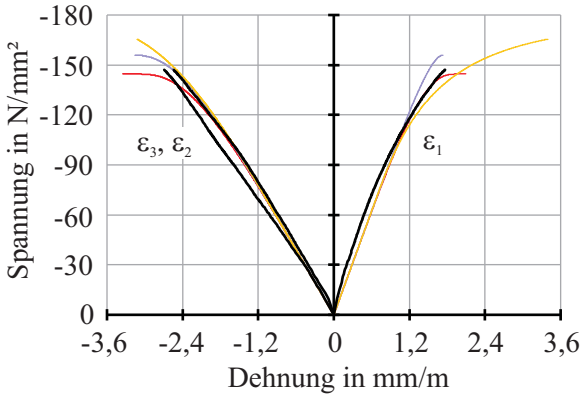
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}04 / -0{,}04 / -1$

Iso-m Iso-o Ortho-o Versuch

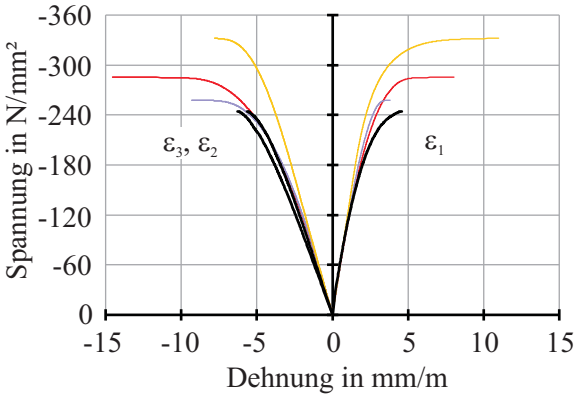
D.2 Spannungs-Dehnungs-Linien mit kraftgesteuerter Beanspruchung



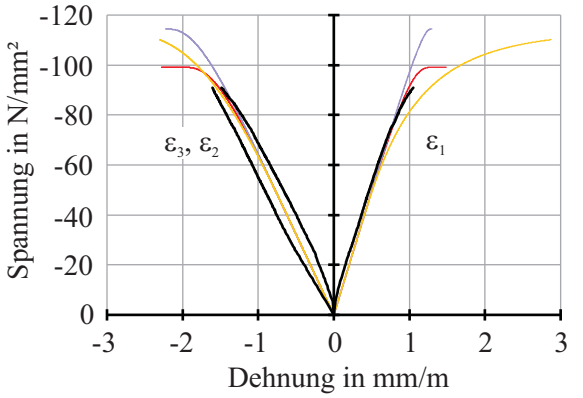
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -1 / -1$



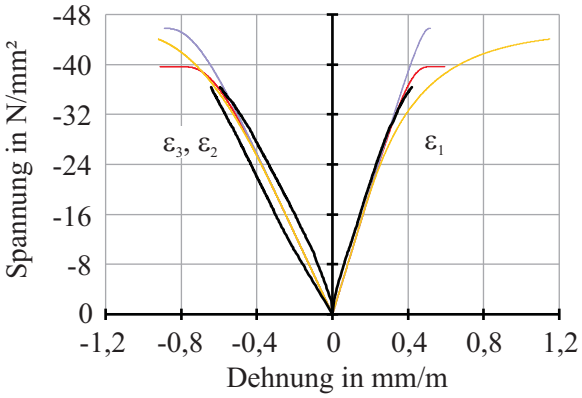
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}025 / -1 / -1$



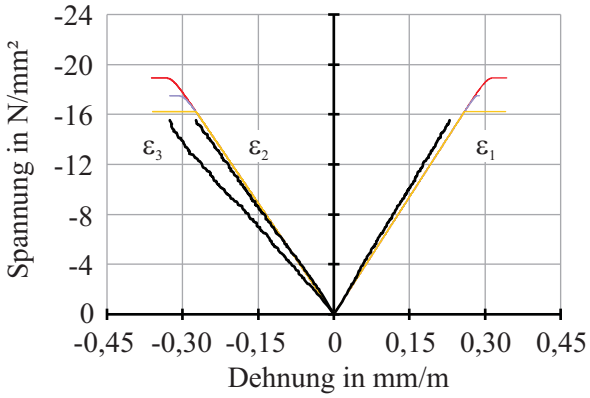
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}039 / -1 / -1$



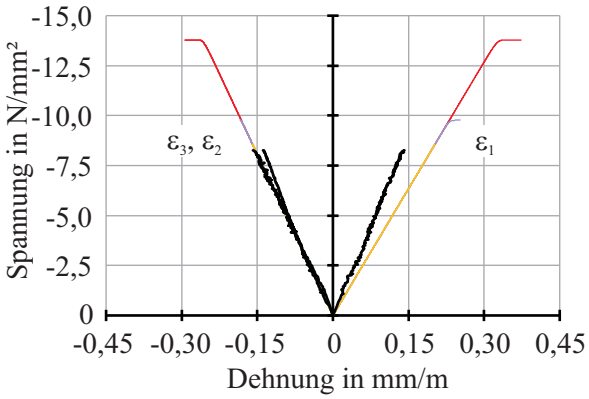
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}05 / -1 / -1$



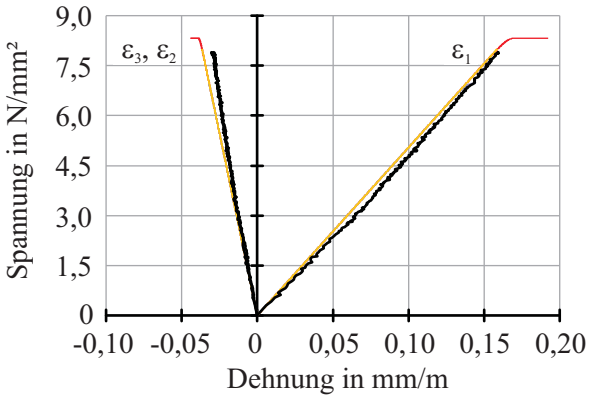
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}11 / -1 / -1$



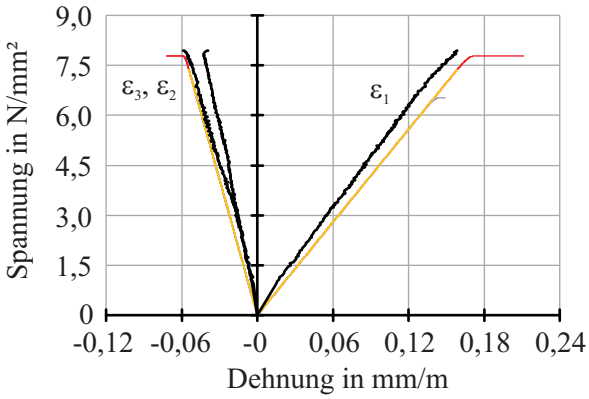
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}345 / -1 / -1$



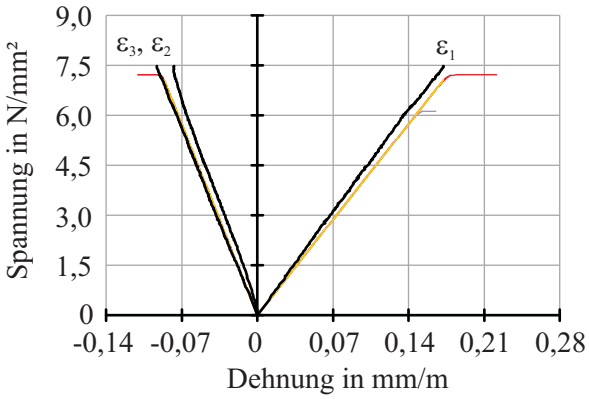
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}732 / -1 / -1$



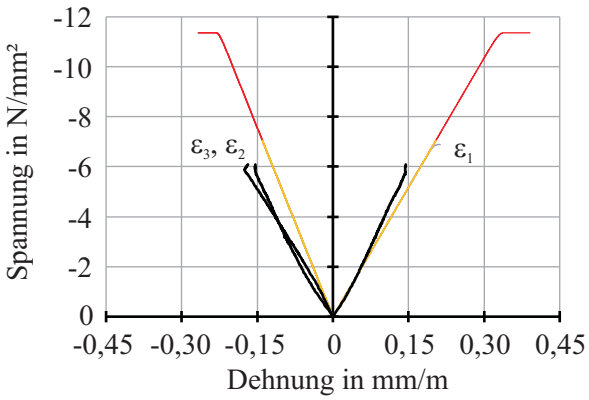
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / 0 / 0$



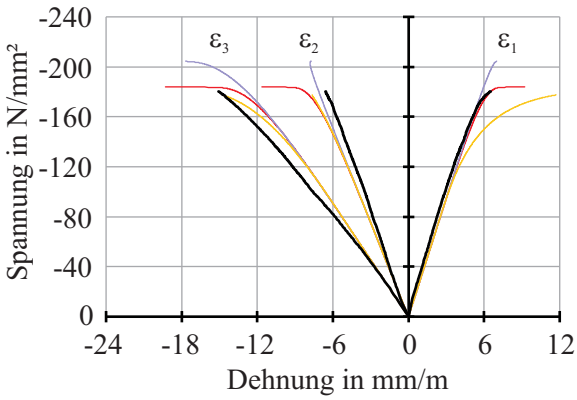
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -0{,}183 / -0{,}183$



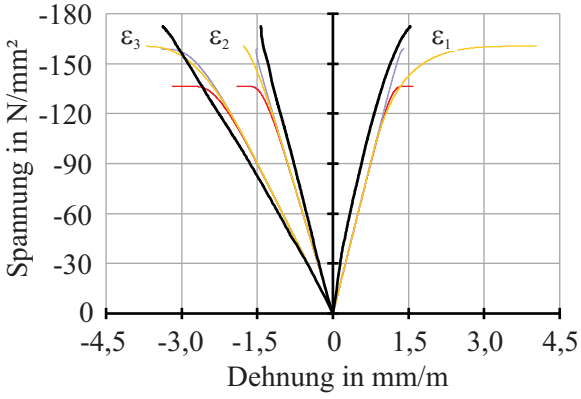
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -0{,}5 / -0{,}5$



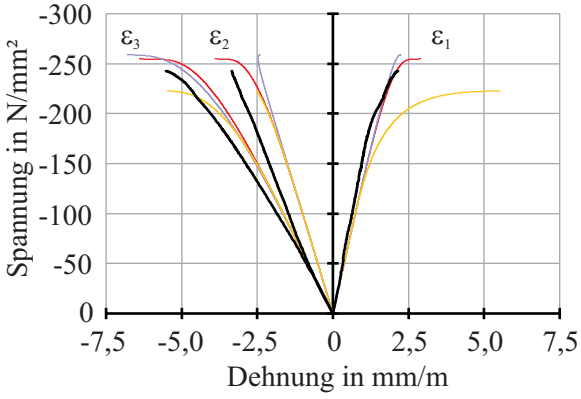
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -1 / -1$



$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -0{,}732 / -1$

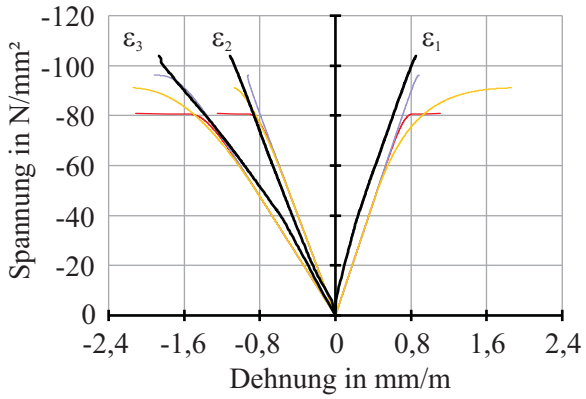


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}02 / -0{,}727 / -1$

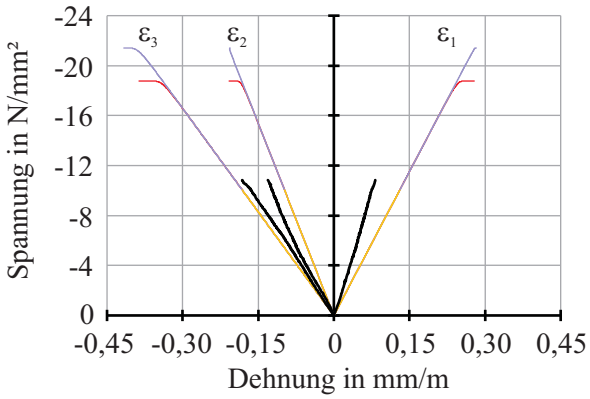


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}027 / -0{,}739 / -1$

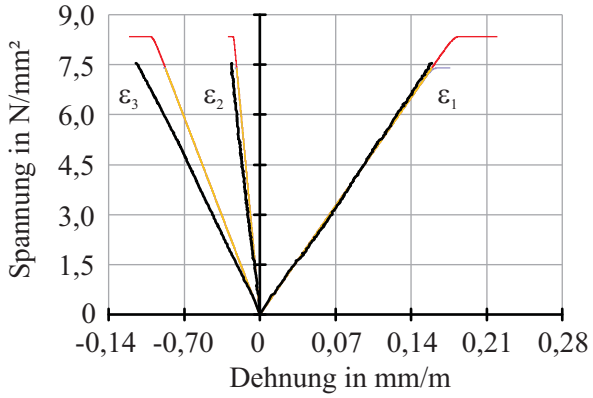
Iso-m Iso-o Ortho-o Versuch



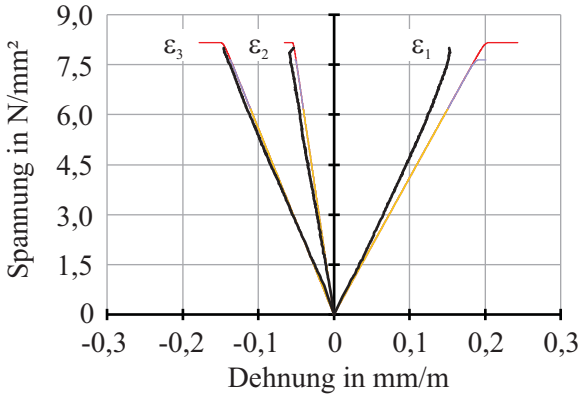
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}05 / -0{,}719 / -1$



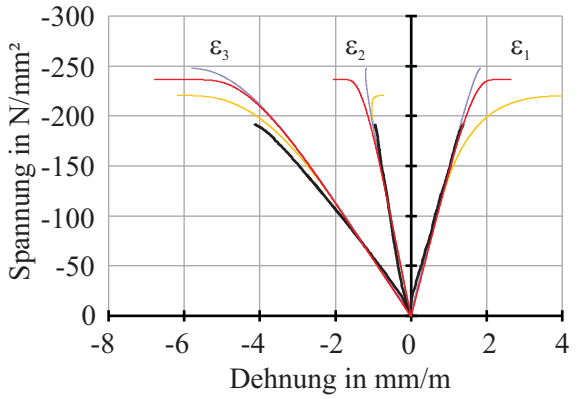
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}275 / -0{,}658 / -1$



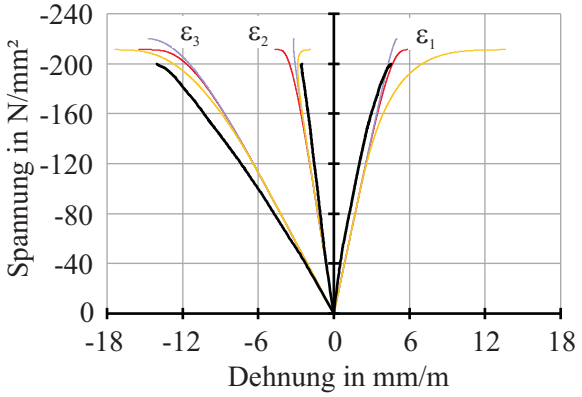
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / 0 / -0{,}366$



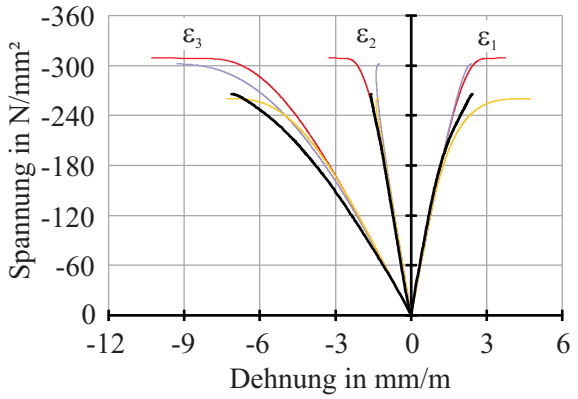
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / -0{,}268 / -0{,}732$



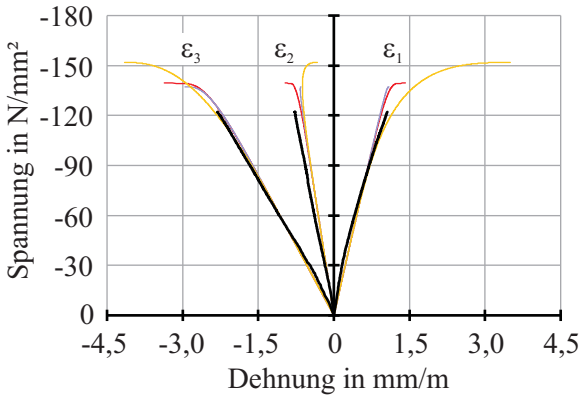
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -0{,}5 / -1$



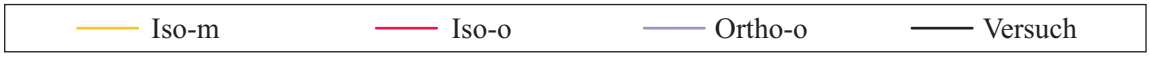
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}01 / -0{,}495 / -1$

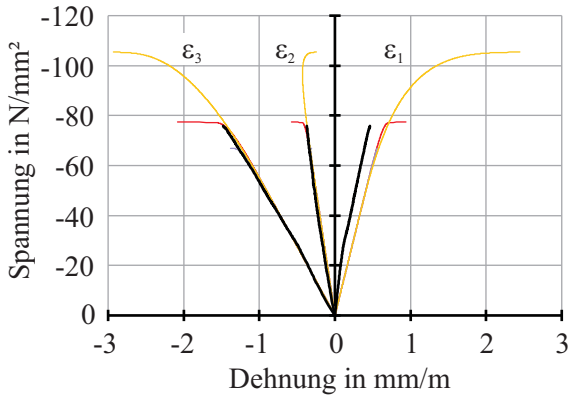


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}029 / -0{,}514 / -1$

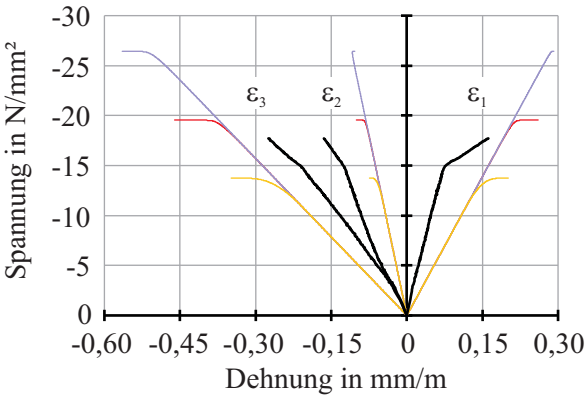


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}04 / -0{,}48 / -1$

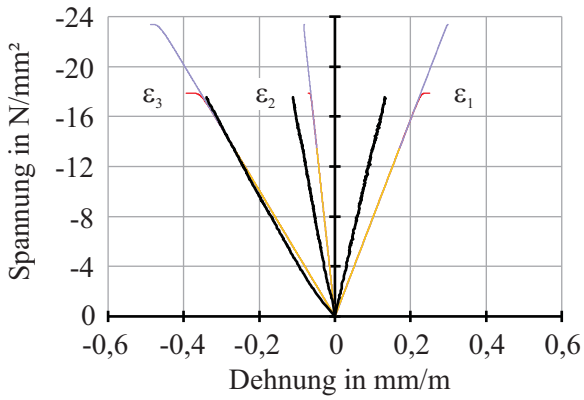




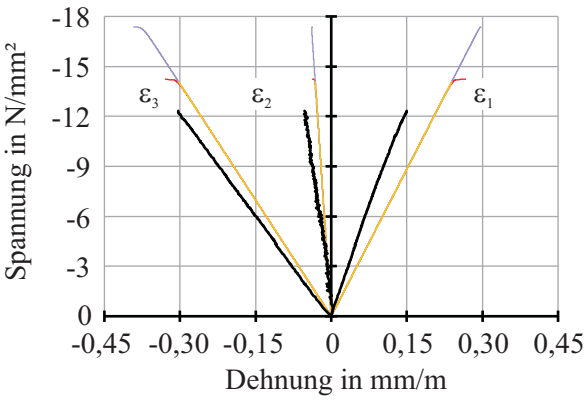
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}075 / -0{,}463 / -1$



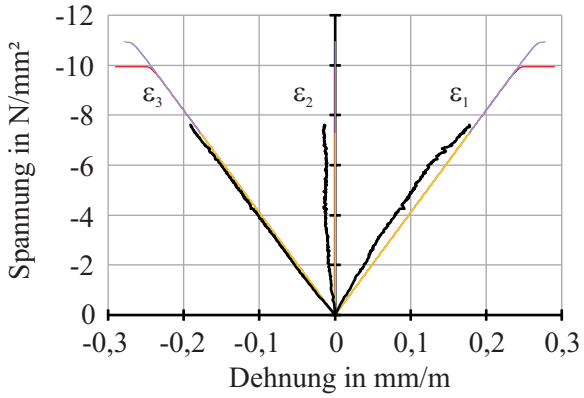
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}225 / -0{,}388 / -1$



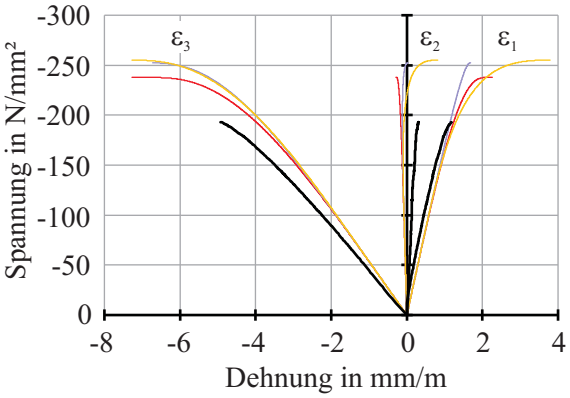
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}333 / -0{,}333 / -1$



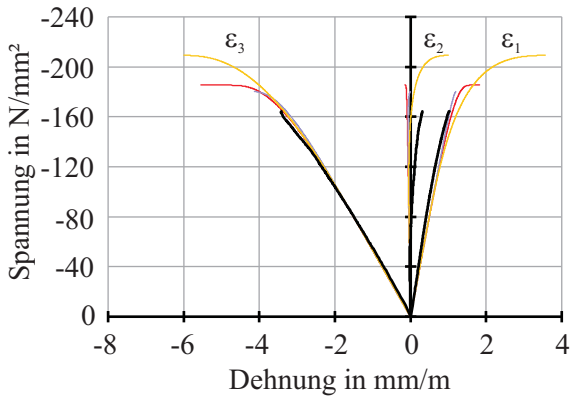
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}577 / -0{,}211 / -1$



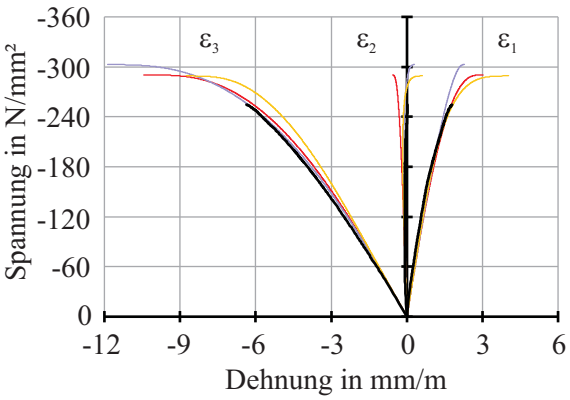
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 1 / 0 / -1$



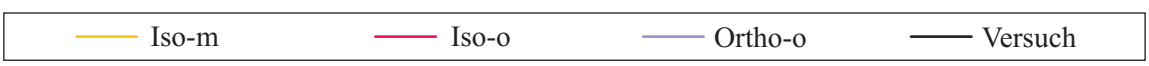
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / -0{,}268 / -1$

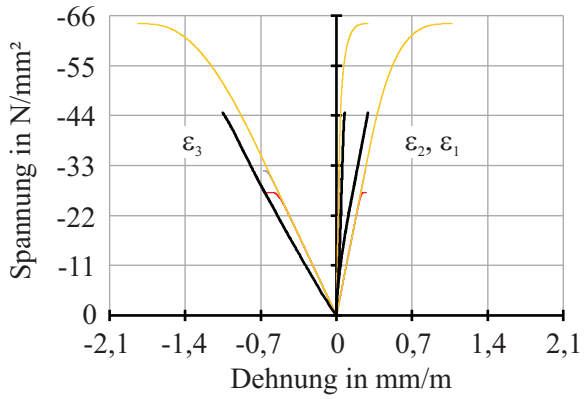


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}025 / -0{,}25 / -1$

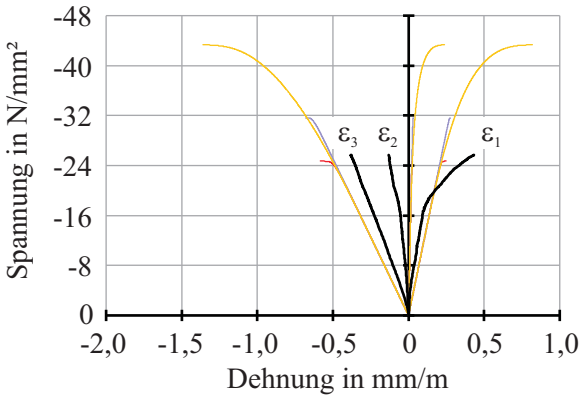


$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}027 / -0{,}287 / -1$

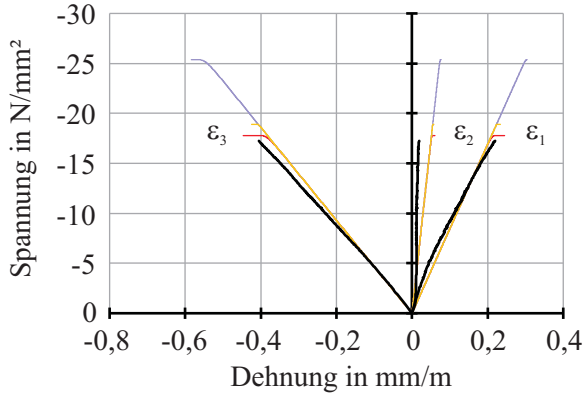




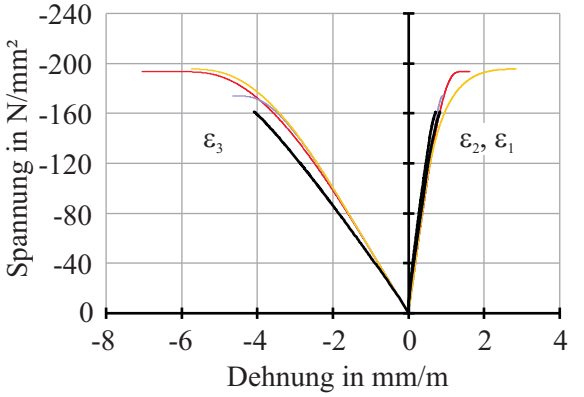
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}155 / -0{,}155 / -1$



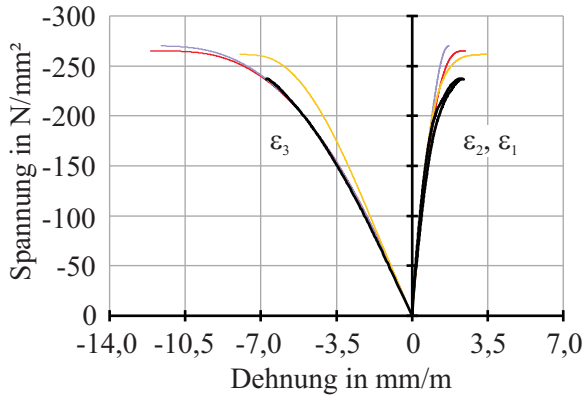
$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}165 / -0{,}147 / -1$



$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0{,}366 / 0 / -1$



$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = 0 / 0 / -1$



$\alpha_1 / \alpha_2 / \alpha_3 = -0{,}04 / -0{,}04 / -1$

D.3 Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen zwischen den experimentell und rechnerisch ermittelten maximalen Festigkeiten und den zugehörigen Dehnungen

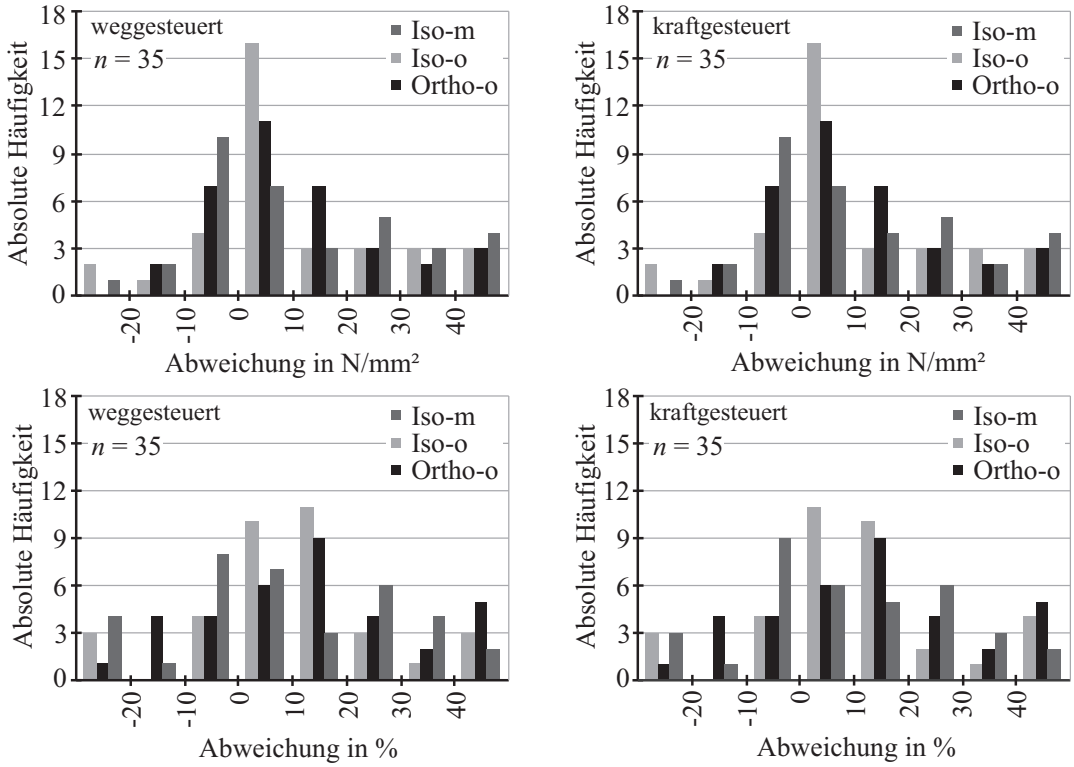


Abbildung D.1: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen experimentell und rechnerisch ermittelter maximaler Festigkeit

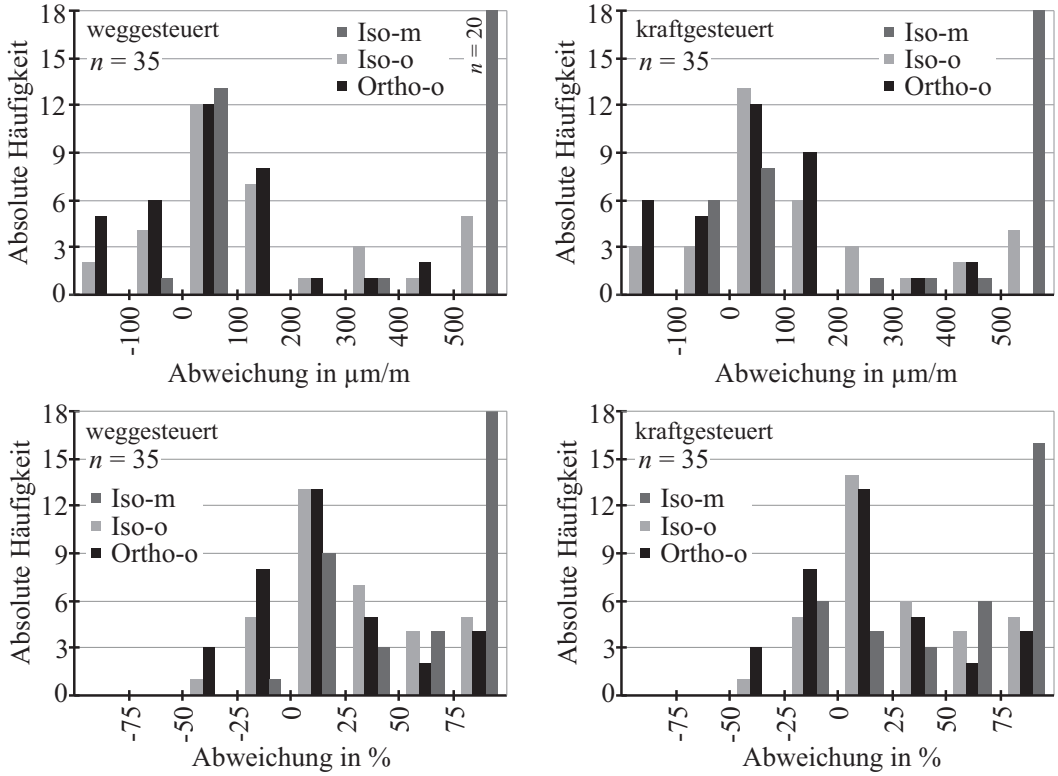


Abbildung D.2: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen experimentell und rechnerisch ermittelter Dehnung ε_1 bei maximaler Festigkeit

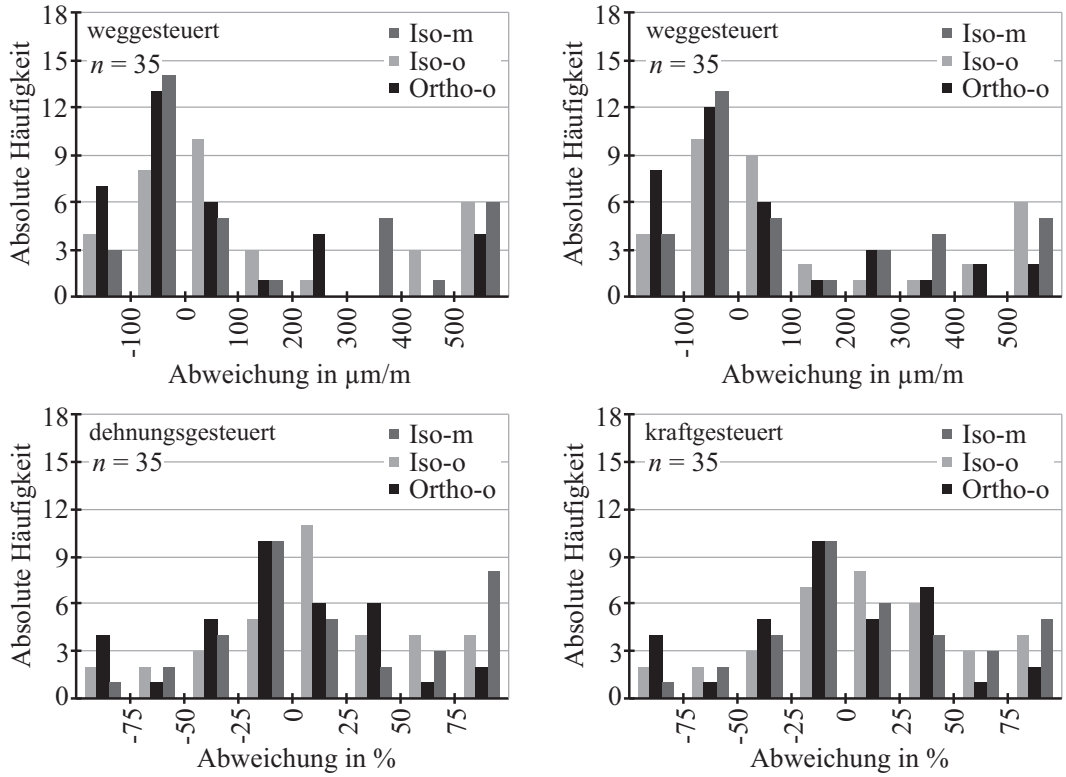


Abbildung D.3: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen experimentell und rechnerisch ermittelter Dehnung ε_2 bei maximaler Festigkeit

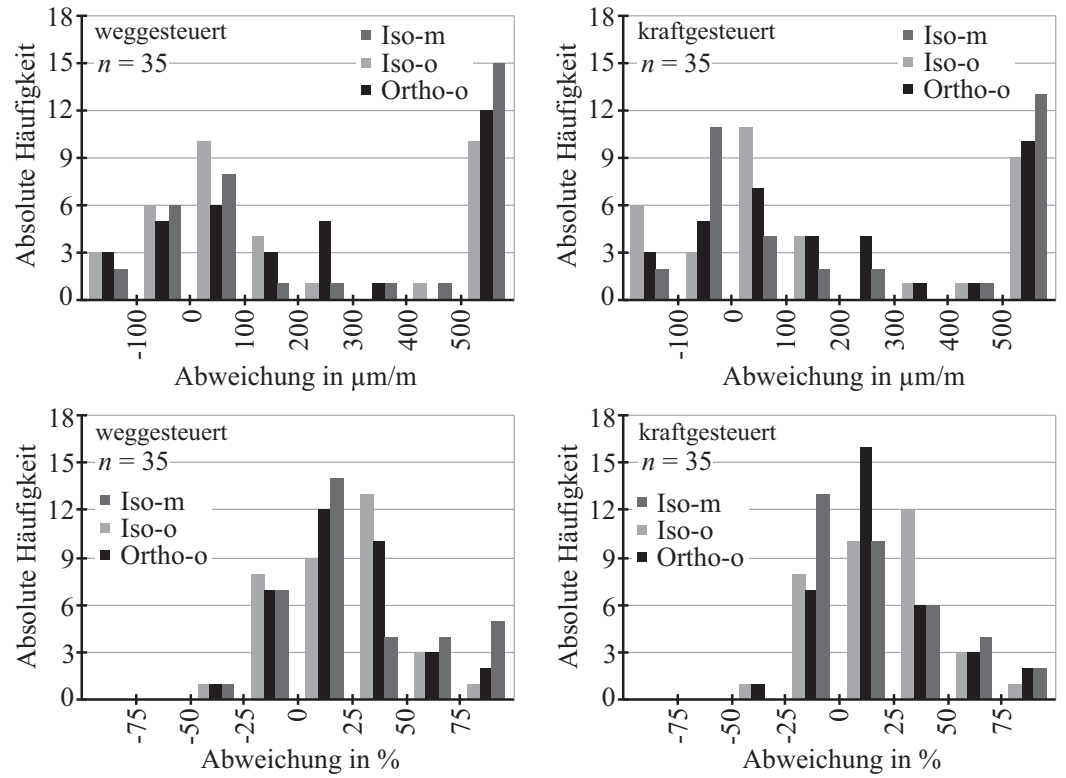


Abbildung D.4: Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen experimentell und rechnerisch ermittelter Dehnung ε_3 bei maximaler Festigkeit