

**Einleitung hoher Lasten
in Glaskanten -
Ein Beitrag zum Einsatz von Kunststoffen
als Klotzungsmaterial**

The application of heavy loads
into glass edges -
A contribution to the use of solid plastics
as a block material

An der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jan Ebert
geboren am 29.08.1978 in Bautzen

Erster Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller Technische Universität Dresden
Zweiter Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider Technische Universität Darmstadt
Tag der Verteidigung	21.01.2014

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Jan Ebert

Einleitung hoher Lasten in Glaskanten – Ein Beitrag zum Einsatz von Kunststoffen als Klotzungsmaterial

Dissertation. Dresden: Technische Universität, 2014

© 2014 Jan Ebert

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
D-01062 Dresden

Telefon +49 351 463 34845
Telefax +49 351 463 35039

www.bauko.bau.tu-dresden.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baukonstruktion der Technischen Universität Dresden. Diese Arbeit hat ihren Ursprung in dem vom VDI/VDE-IT geförderten Forschungsverbundprojekt G.L.A.S. und einem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Kooperationsprojekt.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Bernhard Weller, für die Möglichkeit der Erstellung dieser Arbeit am Institut für Baukonstruktion, für das entgegengebrachte Vertrauen und die stetige Unterstützung und Förderung während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Herrn Professor Jens Schneider danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme der Begutachtung und der fachlichen Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit.

Allen Institutskolleginnen und –kollegen danke ich für die zahlreichen Ratschläge, die Unterstützung und den stets freundschaftlichen Stimmung am Institut. Besonderer Dank gilt meinem langjährigen Kollegen Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Reich für die hervorragende Zusammenarbeit in den Forschungsprojekten, die Grundlage für diese Arbeit sind. Weiterhin gilt ein besonderer Dank den technischen Mitarbeitern des Instituts für Baukonstruktion Herrn Felix Hege- wald, Herrn Falk Brandt und Herrn Gino Gesell ohne deren Unterstützung die Vorbereitung und Durchführung der zahlreichen Laborversuche nicht möglich gewesen wären.

Abschließend danke ich meiner Familie für das entgegengebrachte Verständnis, den Zuspruch und die Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

Dresden, Januar 2014

Jan Ebert

Kurzfassung

In der Architektur gibt es seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts immer wieder Bestrebungen den Baustoff Glas als tragendes Bauteil einzusetzen. So werden beispielsweise Glasträger in Dachkonstruktionen oder Glasschwerter in Fassadenkonstruktionen verbaut, um die Transparenz und damit den Eindruck der Filigranität zu erhöhen.

Aufgrund des spröden Bruchverhaltens und der hohen Druckfestigkeit von Glas ist das Material für den Einsatz als ein auf Druckkraft beanspruchtes Bauteil prädestiniert. Erste Anwendungen von Glas als tragendes Bauteil in einer Konstruktion lassen sich in das 19. Jahrhundert zurückverfolgen. Bei den Pflanzen- und Gewächshäusern nach Loudonscher Bauart wurden kleinformatige Glasscheiben zur Aussteifung der gusseisernen Tragskelette genutzt.

In der Moderne gibt es, wenn auch nur vereinzelt, Bemühungen, großformatige Gläser zur Aussteifung von Glasfassaden oder im druckkraftbeanspruchten Obergurt von Dachkonstruktionen am Lastabtrag zu beteiligen. Bei jeder Anwendung stellt sich für die Ingenieure die Frage, wie Kräfte aus der benachbarten Konstruktion in die Glasscheibe eingetragen werden. Die im Glasbau übliche Verklotzung der Gläser mit der Rahmenkonstruktion kann hierzu ein profanes Mittel sein. Da die zu erwartenden Klotzungskräfte bei aussteifenden Glasscheiben deutlich höher sind, als die normalerweise mit den Klotzungen aufzunehmenden Belastungen aus dem Eigengewicht der Glasscheibe, sind die üblichen Verglasungsklotze aus PVC oder Hartholz hier ungeeignet. Es stellt sich daher immer die Frage nach einem geeigneten Material und einem geeigneten Aufbau der Klotzung.

Die vorliegende Arbeit beschreibt Materialuntersuchungen an Kunststoffen hinsichtlich der Eignung als hoch belastbares Klotzungsmaterial. An einer Auswahl von zehn potentiell geeigneten Kunststoffen werden Materialeigenschaften unter Zug- und Druckbeanspruchung, bei unterschiedlichen Temperaturen und bei Langzeitbelastung gegenübergestellt. Anhand der Ergebnisse werden Empfehlungen zur Eignung getroffen und die Einsatzgrenzen der Kunststoffe aufgezeigt.

Neben der Tragfähigkeit der Klotzung ist vor allem die Belastbarkeitsgrenze des Glases bei der Bemessung relevant. Anhand von Finite-Element-Modellen wird die Spannungsverteilung in der Glasscheibe im Bereich der Klotzung simuliert. Durch Variation geometrischer und materialbezogener Parameter werden hier die Einflüsse auf die Spannungsverteilung in der Glasscheibe dargestellt.

Nur durch einen flächigen Kontakt zwischen Klotzung und Glasscheibenkante ist eine optimale Kraftübertragung möglich. Eine Klotzungs konstruktion für hohe Lasten muss daher in der Lage sein, Maßtoleranzen und Bewegungen der Glasscheibenkante ausgleichen zu können. Anhand von Beispielen an Klotzungs konstruktionen werden Vorschläge gemacht, wie diese Problemstellung konstruktiv gelöst werden kann.

Mit dem Entstehen dieser Arbeit wurde 2009 mit der Innenhofüberdachung des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin eine neuartige Dachkonstruktion mit tragenden Glasscheiben im Obergurt verwirklicht. Abschließend wird, anhand der vom Autor für dieses Projekt entwickelten Klotzungs konstruktion, durch Bauteilversuche die Leistungsfähigkeit derartiger Klotzungen auch unter Verwendung unterschiedlicher Materialien dargestellt.

Abstract

Since the nineteen-fifties architects are attempting to use the building material glass as a structural member. For example, glass beams are used in roof constructions, and glass fins are part of façade constructions in order to achieve a higher level of transparency and to ensure a filigree appearance.

Due to its brittle fracture behaviour and its high compressive strength, glass is predestined for the use as compression member. First documented applications of glass as a structural member in a construction can be found in the nineteenth century. In the greenhouses architecture built in the style of Loudon small glass panes were used for stiffening the cast-iron frame structure.

In modern times, there are sporadic efforts to utilize large-scale glass panes as a means of stiffening glass façades, or as part of the load-bearing upper chord of roof constructions where it is under compression forces. With each application, engineers have to consider how forces are to be transferred from the surrounding construction into the glass pane. In the field of glass structures, the common method of blocking a glass pane with its frame construction can be a suitable means. Because the blocking forces of stiffening glass panes are expected to be much higher than the forces which normally occur when transferring the dead load of glass panes into blocks, the commonly used materials PVC and hardwood are not sufficient. The question of a suitable block material and suitable blocking design must be answered.

This dissertation presents material tests on plastics relating to their applicability as a highly resilient block material. Out of a selection of ten potentially suitable plastics the material properties under tensile and compressive load, under different temperatures, and under long-term load are examined. The results of these tests are used to formulate recommendations on suitability and limits of the tested materials.

In addition to the bearing capacity of the blocking, mainly the strength of glass is relevant for the dimensioning. Using finite-element-models, the stress distribution in the glass pane near the blocking is simulated. By varying geometric

and material related parameters, the influence on the stress distribution is studied.

Optimal load-bearing is only possible when the edge of a glass pane is in contact with the whole surface of the block material. This means, that a high-load-bearing blocking structure has to be able to compensate tolerances and movements of the glass pane. Some examples are presented to show how this problem can be solved constructionally.

In 2009 – while this dissertation was being written – the roofing above the inner courtyard of the former Reichstagspräsidentenpalais in Berlin was built using a new type of roof construction, which uses load-bearing glass panes in the upper chord of the truss. Finally, the performance of the blocking construction, which the author developed for this project, is analysed by means of component tests and the use of different block materials.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Abgrenzung	3
2	Stand der Kenntnisse	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Pflanzen- und Gewächshäuser im Europa des 19. Jahrhunderts	5
2.3	Konstruktiver Glasbau	8
2.3.1	Allgemeines	8
2.3.2	Glasdach der Lindener Volksbank	8
2.3.3	Glaskuppel des Weltbildverlages und Glastonne des Maximilianmuseums in Augsburg	10
3	Ein Glasdach über dem Innenhof des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin	13
3.1	Einleitung	13
3.2	Zur Geschichte	13
3.3	Entwurf	14
3.4	Tragwerk	18
3.5	Genehmigungsverfahren	26
3.6	Ausführung	30
4	Aufbau und Wirkungsweise der Klotzung	35
4.1	Die Klotzung im Glasbau	35
4.2	Glas	38
4.2.1	Flachglas im Bauwesen	38
4.2.2	Glasarten für die Anwendung im Bauwesen	38
4.2.3	Thermisch vorgespanntes Glas	39
4.2.4	Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas	44
4.2.5	Qualität der Glaskanten	45
4.2.6	Bemessungsverfahren im Glasbau	46
4.3	Materialien für Klotzungsstrukturen	54
4.3.1	Allgemeine Anforderungen	54
4.3.2	Kunststoffe	55
4.3.3	Kurzfaserverstärkte Thermoplaste	60
4.3.4	Mörtelsysteme	67
5	Substanzuntersuchungen an Kunststoffen	69
5.1	Materialauswahl	69

5.2	Eigenschaften der Kunststoffe	69
5.2.1	POM Polyacetal	70
5.2.2	PA Polyamid	72
5.2.3	PET Polyethylenterephthalat	75
5.2.4	PI Polyimide	76
5.2.5	PEEK Polyetheretherketon	78
5.3	Uniaxiale Zugkraftbeanspruchung	80
5.3.1	Allgemeines	80
5.3.2	Prüfkörper	80
5.3.3	Prüfmaschine und Konditionierung	81
5.3.4	Eingangswerte	82
5.3.5	Versuchsdurchführung	82
5.3.6	Versuchsergebnisse bei 23°C	83
5.3.7	Versuchsergebnisse bei +50°C	91
5.3.8	Versuchsergebnisse bei -20°C	92
5.3.9	Zusammenfassung	93
5.4	Uniaxiale Druckkraftbeanspruchung	100
5.4.1	Allgemeines	100
5.4.2	Versuchsdurchführung	101
5.4.3	Versuchsergebnisse	102
5.4.4	Zusammenfassung	108
5.5	Technisch nutzbare Kurzzeit-Druckfestigkeit	110
5.5.1	Allgemeines	110
5.5.2	Bestimmung der Kurzzeit-Druckfestigkeit nach dem Prinzip der maximalen Druckspannung	112
5.5.3	Bestimmung der Kurzzeit-Druckfestigkeit durch Begrenzung der Stauchung	113
5.5.4	Bestimmung der Kurzzeit-Druckfestigkeit durch Begrenzung des Steifigkeitsverlustes	114
5.5.5	Bestimmung der Kurzzeit-Druckfestigkeit durch Begrenzung der viskosen Dehnung	115
5.6	Verformungsverhalten unter statischer Langzeitbelastung	120
5.6.1	Allgemeines	120
5.6.2	Mathematische Modelle zur Abbildung des viskoelastischen Materialverhaltens	122
5.6.3	Zeitstand-Druckversuch	124
5.6.4	Kriechversuche an Rohrquerschnitten mit geringer Höhe	128
5.6.5	Kriechversuche mit PEI an schlanken Prüfkörpern mit Rechteckquerschnitt	135
5.7	Dynamisch-Mechanische Analyse	141
5.7.1	Grundlagen	141
5.7.2	DMA - 3-Punktbiegung	145

5.7.3	DMA - Zugversuch	147
5.7.4	Auswertung	148
5.8	Reibkoeffizient Kunststoff auf Glas	151
5.9	Zusammenfassung und Wertung	153
6	Konstruktive Ausbildungen von Klotzungenkonstruktionen	157
6.1	Lasteinleitung in eine ideal plane Scheibenkante	157
6.1.1	Definition der ideal planen Scheibenkante	157
6.1.2	Klotzung einer Einzelscheibe	157
6.1.3	Klotzung eines VSG ohne Versatz	158
6.2	Ausgleich von Schiefstellungen der Scheibenkante durch die Klotzungenkonstruktion	159
6.3	Ausgleich von Maßtoleranzen durch die Klotzungenkonstruktion	160
6.4	Gleichmäßige Lasteinleitung in Scheibenkanten mit Versatz	163
6.4.1	Allgemeines	163
6.4.2	Klotzung eines VSG mit Kantenversatz durch die Verwendung von Mörtelsystemen	164
6.4.3	Klotzung einer Einzelscheibe eines VSG	165
6.4.4	Klotzung eines VSG mit Versatz durch ein Mehrfach-Scharniergelenk	168
6.5	Konstruktionsleitfaden	169
6.5.1	Anforderungen und Empfehlungen an die Klotzung	169
6.5.2	Anforderungen und Empfehlungen an die Glasscheibe	171
6.5.3	Geometrische Anforderungen und Empfehlungen	171
6.5.4	Vorgehen	172
7	Numerische Berechnungen	174
7.1	Spannungsverteilung in der Glaskante bei Einleitung von Klotzungenlasten	174
7.1.1	Allgemeines	174
7.1.2	Vereinfachtes Modell der Lasteinleitung in die Glaskante	174
7.1.3	Einfluss des Randabstandes der Klotzung auf die Spannungsverteilung an der Glaskante	179
7.1.4	Einfluss des Reibkoeffizienten μ zwischen Kontaktmaterial und Glaskante auf die Spannungsverteilung an der Glaskante	184
7.2	FE-Modell der Klotzung für das Glasdach des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais	187

7.2.1	Einleitung	187
7.2.2	FE-Modell	187
7.2.3	Ergebnisse der FE-Berechnung	190
8	Experimentelle Untersuchungen an Klotzungskonstruktionen	201
8.1	Keilförmiger Kontaktklotz	201
8.1.1	Grundlagen	201
8.1.2	Versuchsaufbau	201
8.1.3	Versuchsdurchführung	202
8.1.4	Versuchsergebnisse	203
8.1.5	Zusammenfassung	206
8.2	Klotzungskonstruktion der Innenhofüberdachung des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin	207
8.2.1	Grundlagen	207
8.2.2	Versuchsaufbau	208
8.2.3	Versuchsdurchführung	210
8.2.4	Versuchsergebnisse	212
8.3	Last-Verformungs-Verhalten einer 3-teiligen Klotzung	222
8.3.1	Grundlagen	222
8.3.2	Versuchsaufbau	222
8.3.3	Versuchsdurchführung	223
8.3.4	Versuchsergebnisse	223
9	Ergebnisse und Bewertung	228
10	Ausblick	230
11	Literatur	231
11.1	Fachbücher und Fachaufsätze	231
11.2	Normen und Richtlinien	233
11.3	Zulassungen und Gutachten	235
11.4	Produktdatenblätter	235
12	Abbildungsnachweis	236
13	Bezeichnungen	237
13.1	Formelzeichen	237
13.2	Abkürzungen	238

1 Einleitung

1.1 Motivation

Glas, der Baustoff mit dem wir spontan Transparenz und Zerbrechlichkeit verbinden, wird nahezu an allen modernen Gebäuden verbaut. Ob im Fassaden- oder Dachbereich fasziniert er vor allem dann, wenn große Flächen in Glas ausgeführt sind. Ziel von Architekten und Ingenieuren ist es oft, die Tragstrukturen dieser Glasflächen möglichst filigran zu gestalten.



Bild 1

Ganzglasfassade des Einkaufszentrums The Gate in Newcastle upon Tyne (GB)

Mögliche Mittel dazu sind, die tragenden Bauwerksteile ebenfalls in Glas auszuführen oder die Glasflächen für den Lastabtrag heranzuziehen, um somit auf andere Baustoffe wie Stahl oder Beton verzichten zu können. In beiden Fällen stellt sich die zentrale Frage, wie der Lastabtrag erfolgen soll und wie die Lasten in die Bauteile aus Glas ein- bzw. ausgeleitet werden können.

Im Glaserhandwerk sind das Verklotzen bzw. die Klotzung etablierte Begriffe und beschreiben das Ausfüllern einer Glasscheibe mit dem umgebenden Rahmen¹. Dabei werden kleine Klötze, meist aus Kunststoff, in den Raum zwischen Glaskante und dem umgebenden Rahmen eingelegt, so dass die Glasscheibe nicht mehr verrutschen kann. Steht die

¹ Zum Beispiel dem Fensterflügel.

Glasscheibe vertikal, so überträgt sie über die untere Glaskante ihr Eigengewicht in den Rahmen.

Soll die Scheibentragwirkung von Glas, zum Beispiel als aussteifendes Element in der Fassade, aktiviert werden, so ist es erforderlich die Glasscheibe kraft- und formschlüssig mit den benachbarten Bauteilen zu verbinden. Das kann entweder entlang der gesamten Scheibenkante oder nur punktuell durch Klotzung, zum Beispiel in den Ecken der Glasscheibe, erfolgen.

Wie eine Klotzung zur Übertragung hoher Lasten ausgeführt werden muss, welche Materialien zu bevorzugen sind und wo die Einsatzgrenzen liegen sind Fragestellungen, die bei bisher umgesetzten Projekten mit lastabtragenden Gläsern² individuell erarbeitet und gelöst wurden. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der lastabtragenden Verglasungen³ stellen mehrfach heraus, welcher Stellenwert der Klotzung und der optimalen Einleitung der Kräfte in die Glaskante zukommt.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung und Darstellung der Leistungsfähigkeit hochbelastbarer Klotzungskonstruktionen für den konstruktiven Glasbau. Besondere Beachtung soll dabei dem Aufbau der Klotzung und dem Einsatz von Kunststoffen als Klotzungsmaterial gelten.

Die im Glasbau verwendeten gängigen Klotzungen und deren Materialien sind vorrangig für den Eigengewichtsabtrag der Glasscheiben ausgelegt und stoßen bei höheren Belastungen schnell an ihre Leistungsgrenze. Für die Entwicklung und Ausführung von Klotzungen, die ein Vielfaches des Glaseigenwichtes abtragen können, ist der Ingenieur deshalb gezwungen auf andere Materialien zurückzugreifen. Auf der Suche nach einem Material, das sowohl eine hohe Druckfestigkeit und Steifigkeit aber gleichzeitig eine mit dem Baustoff

² Vergleiche Ludwig 1998, Ludwig 2000, Weller 2010.

³ Vergleiche Wellershof 2006, Wurm 2007.

Glas verträgliche Härte⁴ ausweist, wird man vor allem bei Kunststoffen eine größere Anzahl potenziell geeigneter Materialien finden. Grundlage der Materialauswahl sind dann Datenblätter oder Angaben der Literatur zu den mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe. Bei Durchsicht dieser ist festzustellen, dass Materialkennwerte vorrangig bei Raumtemperatur und für eine Beanspruchung auf Zugkraft angegeben werden. Für eine Beanspruchung auf Druckkraft lässt sich in einzelnen Fällen noch Angaben zur Druckfestigkeit finden, aber spätestens bei der Suche nach Werten zum Steifigkeitsverhalten oder der Kriechneigung eines Kunststoffes unter Druckbeanspruchung finden sich hier nur noch unzureichende Angaben.

Hauptziel dieser Arbeit ist es, durch die Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Material- und Bauteilversuche an ausgewählten Kunststoffen und Klotzungsstrukturen dem Leser ein Hilfsmittel für eine bedarfsgerechte Materialauswahl zur Verfügung zu stellen. Dabei sollen die bestimmten Materialkennwerte als Datenbasis für eine spätere Bemessung hochbelasteter Klotzungen dienen können.

Welche Belastung durch eine Klotzung schadfrei in eine Glasscheibe übertragen werden kann, ist neben der Materialauswahl auch von deren konstruktivem Aufbau abhängig. Dieser bestimmt auch maßgebend die Anwendbarkeit. Nicht jede auf Papier entwickelte Lösung ist für den baupraktischen Einsatz geeignet. Ein Kapitel dieser Arbeit widmet sich daher der Konstruktion von Klotzungen und soll Wege aufzeigen, wie eine Klotzung auf viele Anforderungen abgestimmt werden kann.

1.3 Abgrenzung

Die vorliegende Arbeit hat ihren Schwerpunkt in der Bestimmung des last-, temperatur- und zeitabhängigen Verformungsverhaltens von Kunststoffen. Anhand der Ergebnisse wird festgestellt, ob und in welchen Anwendungsgren-

⁴ Die Oberflächenhärte eines Materials ist entscheidend dafür, ob dieses bei einem Kontakt mit Glas eine Oberflächenbeschädigung, wie zum Beispiel Kratzer oder Kerben, hervorruft. Derartige Beschädigungen können zu einem sofortigen Bruch der Glasscheibe führen, die effektive Festigkeit des Glases herabsetzen oder auch erst Jahre später zu einem Bruch der Glasscheibe führen.

zen der Kunststoff für den Einsatz als hochbelastetes Klotzungsmaterial im konstruktiven Glasbau geeignet ist.

Aufgrund der Vielzahl von Kunststoffen und den technischen Möglichkeiten, deren Eigenschaften gezielt an gestellte Anforderungen anzupassen⁵, können die untersuchten Kunststoffe nur eine Auswahl potenziell geeigneter Materialien darstellen. Die Auswahl erfolgte aus einer Reihe von im Maschinenbau und Bauwesen bevorzugt eingesetzten, kurzfristig lieferbaren und als Halbzeuge verfügbaren Kunststoffen.

Untersuchungen zum temperaturabhängigen Verhalten der Kunststoffe beschränken sich mit Ausnahme der Dynamisch-Mechanischen-Analysen auf den erwarteten Einsatztemperaturbereich einer Klotzung von -20°C bis $+50^{\circ}\text{C}$.

Die Bestimmung des zeitabhängigen Dehnungsverhaltens unter konstanter Belastung ist ein zeitintensiver Prozess. Die Bewertung, ob ein Kunststoff eine hohe oder niedrige Kriechneigung aufweist, erfolgt nur für eine Belastungsstufe und bei Raumtemperatur. Detailliertere Untersuchungen mit unterschiedlichen Lastniveaus und auch bei erhöhter Temperatur erfolgen nur für ein ausgewähltes Material mit besonders geringer Kriechneigung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Bauteilversuche und FE-Berechnungen mit Klotzungen an kleinteiligen Prüfkörpern und Modellen behandelt, da diese Versuche und Modelle für die Darstellung und Untersuchung der Klotzungsproblematik und der Benennung eines geeigneten Klotzungsmaterial ausreichend sind. Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten der in Scheibenebene durch hohe Druckkräfte belastete Glasscheiben oder dem Gesamttragverhalten derartiger Konstruktionen ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

⁵ Zum Beispiel durch Beimischung von Füllstoffen oder Glasfasern.

2 Stand der Kenntnisse

2.1 Einleitung

Obwohl die Druckfestigkeit von Glas deutlich höher als die nutzbare Zugfestigkeit ist, wird diese Materialeigenschaft bei der bautechnischen Anwendung von Glas nur sehr selten genutzt. Der überwiegende Einsatz von Glas im Bauwesen erfolgt als raumabschließendes Flächenelement, das auf die Tragstruktur aufgesetzt wird. Dabei wird dem Glas keinerlei Funktion in der Lastabtragkette zugeteilt, obwohl sich Glas aufgrund der hohen Druckfestigkeit vor allem zur Übertragung von Druckkräften eignet. Der wohl einfachste Anwendungsfall wäre die Nutzung von Glasscheiben als scheibenartiges Aussteifungselement in der Fassade. Voraussetzung für die Ausbildung einer Druckdiagonalen in der Scheibenfläche ist die kraft- und formschlüssige Verbindung zwischen Glasscheibe und Tragwerk, die entweder linienförmig entlang der gesamten Scheibenkante oder konzentriert über sogenannte Klotzungen hergestellt wird.

Erste Anwendungen von Glasscheiben zur Übertragung von Druckkräften und zur Aussteifung von Tragwerken lassen sich in die Zeit der Industrialisierung der 1. Hälfte des 19. Jahrhunderts zurückverfolgen. In dieser Zeit entwickelte sich, vorangetrieben durch neue Erkenntnisse und Fertigungstechnologien der Eisen- und Glasverarbeitung in England, die Glas-Eisenarchitektur. Bekannteste Vertreter dieser Bauweise sind die Pflanzen- und Gewächshäuser des 19. Jahrhunderts in England, Frankreich und Deutschland.⁶

2.2 Pflanzen- und Gewächshäuser im Europa des 19. Jahrhunderts

Im Zeitraum von 1817 bis 1872 entwickelte der Landschaftsarchitekt und Botaniker John Claudius Loudon in Zusammenarbeit mit der Eisenbaufirma W. and D. Bailey zahlreiche Gewächshausbauten aus Gusseisen und Glas. Als Vertreter dieses Bautyps kann der heute noch existierende Kibble Crystal Art Palace in Glasgow bewundert werden. Die Glasscheiben wurden bei den Vertretern dieser Bauweise zur Übertragung von Schubkräften zwischen dem gusseisernen Stabwerk herangezogen. Die kleinformatischen,

⁶ Vergleiche Ullrich 1989, Koppelkamm 1981, Kohlmaier 1988.

meist nur 3 mm dicken Glasscheiben wurden nach dem Einsetzen in das Stabwerk aus Gusseisen formschlüssig verkitet, was die Schubkraftübertragung über die gesamte Scheibenkante ermöglichte.⁷ Der zähelastische Kitt verhindert die Bildung von Spannungsspitzen im Bereich der Glaskanten, so dass von einer annähernd gleichmäßig verteilten Lasteintragung in die Glaskanten auszugehen ist.⁸

Bild 2
Kibble Palace in Glasgow
(GB)



Kohlmaier beschreibt die auch als Loudonsche Art bezeichnete Bauweise wie folgt: „Es ist wahrscheinlich eine bewunderungswürdige Kühnheit, eine Konstruktion zu erstellen, in der das Material Glas eine wesentliche statische Funktion übernimmt. Diese Verwendung von Glas ist in der Architekturgeschichte ein einmaliges Novum und wurde nur in den Schalenkonstruktionen Loudonscher Art für Gewächshausbauten praktiziert. Ihr praktisches Ergebnis war eine bis dahin unerreichte Transparenz.“ Anzumerken ist, dass die Entwicklung und Formfindung der Schalenträgerwerke durch Loudon nicht aus baustatischer Sicht vorangetrieben wurde, sondern von den Anforderungen optimaler Sonneneinstrahlung und klimatischer Verhältnisse in den Gewächshäusern. Die Schubkraftübertragung durch die Glasscheiben scheint dabei ein eher zufälliges Produkt zu sein, da selbst Loudon 1833 den Effekt in seiner *Encyclopaedia of Cottage, Farm*

⁷ Vergleiche Kohlmaier 1988, Seite 220 – 221; Ullrich 1989, Seite 250.

⁸ Vergleiche Knaack 1998, Seite 47.

and Villa Architecture derart beschreibt: „Als das Eisengerüst aufgestellt war, ehe es verglast wurde, konnte der leichteste Wind das Gewölbe vom Boden bis zur Spitze in Bewegung setzen ... Sobald das Glas eingesetzt war, stand es, wie auch immer, völlig fest und stark gegründet.“⁹

Zeitgleich erfolgte mit der Entwicklung des Stahlskelettbau im 19. Jahrhundert aber auch eine Entkopplung von Wand- und Dachkonstruktionen in eine tragende Struktur und eine raumabschließende Hülle. Ab der Mitte des 19. Jahrhunderts wurde Glas fast ausschließlich als Sekundärtrageelement ohne statische Funktion verwendet.¹⁰ Erst in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts sind wieder erste Bestrebungen erkennbar, das Material Glas zur Abtragung von Lasten im Bauwerk heranzuziehen. Beispiel hierfür ist der 1951 errichtete Ganzglaspavillon der Glasbaufirma Hahn aus Frankfurt am Main. Dieses Bauwerk wird als Startpunkt des konstruktiven Glasbaus angesehen.¹¹

⁹ Vergleiche Kohlmaier 1988, Seite 221.

¹⁰ Vergleiche Knaack 1998, Seite 46 – 57.

¹¹ Vergleiche Knaack 1998, Seite 62.

2.3 Konstruktiver Glasbau

2.3.1 Allgemeines

In den 80er und 90er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden in Europa mehrere Einzelprojekte verwirklicht, bei denen Glasscheiben und Glasstützen zur Abtragung von Lasten aus einer Deckenkonstruktion herangezogen wurden. Die Einleitung der Kräfte wurde meist durch elastische Zwischenlagen oder über Lochleibungsverbindungen realisiert. Als Beispiele dieser Einzelprojekte seien der „Temple de l'Amour“ bei Noyers in Frankreich¹², der Skulpturenpavillon in Arnhem¹³ und die Glasstützen im Gebäude der Stadtverwaltung St. Germain-en-Laye¹⁴ genannt.

2.3.2 Glasdach der Lindener Volksbank

Bei dem 1996 errichteten Glasdach auf dem Gebäude der Lindener Volksbank in Hannover wurden zum ersten Mal in Deutschland auch die Tragglieder eines Dachtragwerkes in Glas ausgeführt. Das Glasdach in den Abmessungen 14,20 m x 9,07 m wird von fünf Dreigelenkbögen aus Glasschwertern getragen. Je zwei etwa 4,5 m lange und fischbauchförmige Glasschwerter sind zu einem Dreigelenkbogen zusammengefügt. Die Glasschwerter aus VSG besitzen einen Aufbau von 10 mm TVG, PVB-Folie, 15 mm ESG, PVB-Folie, 10 mm TVG, wobei statisch nur die 15 mm dicke ESG-Scheibe angesetzt wurde. Die Kopfenenden der Glasträger sind zum Anschluss der Glasschwerter an die Auflagerepunkte und zur Verbindung der Glasschwerter im mittleren Gelenkpunkt in Stahlschuhe eingegossen. Gegen seitliches Ausknicken dienen Stahlrohre zwischen den Glasschwertern, auf denen über je sechs Punkthalter die Isolierglasscheiben der Dacheindeckung gelagert sind.¹⁵

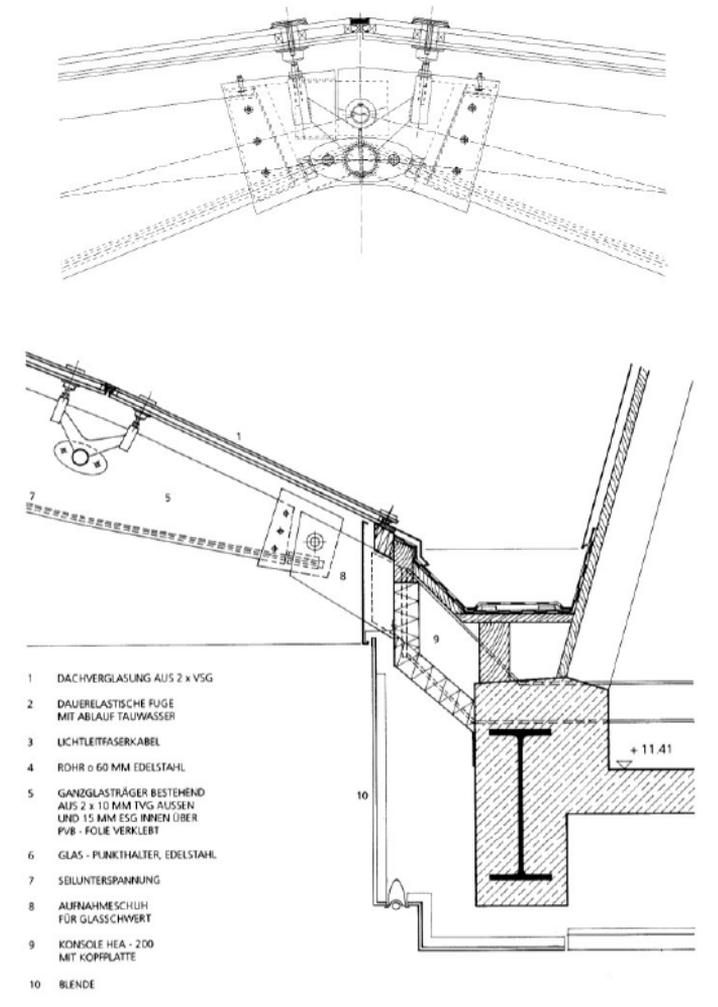
¹² Vergleiche Wurm 2007, Seite 106.

¹³ Vergleiche Knaack 1998, Seite 206 – 209.

¹⁴ Vergleiche Knaack 1998, Seite 366.

¹⁵ Vergleiche Bünemann 1997; Wurm 2007 Seite 210.

Bild 3
Darstellung des Firstpunktes
und des Auflagers der Drei-
gelenkbögen aus VSG beim
Glasdach der Lindener
Volksbank in Hannover



Die Glasschwerter unterliegen in dem Tragwerk einer Überlagerung aus Biegemoment und Normalkraft. Die Einleitung der Normalkräfte erfolgt an den Kopfpunkten über die Stahlschuhe. Über die Vergussmasse oder ggf. zum Einsatz gekommene elastische Zwischenlagen¹⁶ liegen keine Angaben vor, ebenso bleibt hier ungeklärt ob und in welcher Form die drei Bolzenverbindungen an den Kopfpunkten zur Einleitung der Normalkräfte herangezogen wurden. Überschlägliche Berechnungen an einem Dreigelenkbogen mit einer Spannweite von 9 m und einer Stichhöhe von 1 m ergaben für den

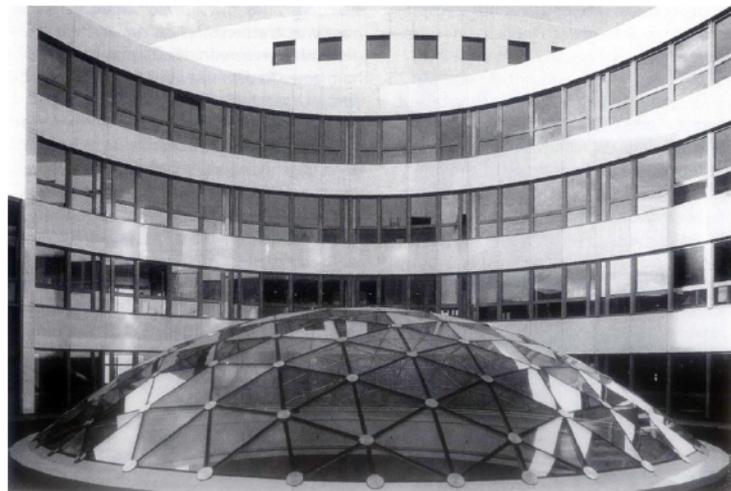
¹⁶ Denkbar wären hier Platten aus EDPM oder Klingsil.

Eigengewichtslastfall¹⁷ eine charakteristische Normalkraft von etwa 28 kN. Unter Ansatz einer gleichmäßig verteilten Schneelast von 0,85 kN/m² erhöht sich die charakteristische Normalkraft auf etwa 50 kN.

2.3.3 Glaskuppel des Weltbildverlages und Glastonne des Maximilianmuseums in Augsburg

Mit der zwischen 1998 und 2000 errichteten Glaskuppel des Weltbildverlages in Augsburg und der Glastonne der Innenhofüberdachung des Maximilianmuseums ebenfalls in Augsburg wurden erstmals nach den Gewächshäusern des 19. Jahrhunderts wieder Glasscheiben als tragendes Bauteil einer Schalenkonstruktion verwendet. Beide Bauwerke basieren auf dem gleichen Tragprinzip und wurden durch das Ingenieurbüro Ludwig & Weiler Ingenieurgesellschaft mbH aus Augsburg entwickelt.

Bild 4
Glaskuppel des Weltbildverlages in Augsburg



Die Glaskuppel des Weltbildverlages in Augsburg überspannt eine kreisrunde Dachöffnung mit einem Durchmesser von 12,30 m. Die Kuppelform wurde durch die Verwendung von 282 dreieckförmigen Mehrscheiben-Isoliergläsern erzielt. Die Ecken von jeweils sechs Glasscheiben treffen sich in einem Knotenpunkt. Diese dienen als Koppellelemente zur Übertragung der Druckkräfte in der Schalenkonstruktion von einer Scheibe zur nächsten. Ein Ringträger aus Stahl bildet

¹⁷ Glas- und Stahlmengen wurden überschlagen und für den Lastfall Eigengewicht eine Einwirkung von 2,5 kN/m bestimmt, die Einflussbreite betrug 2,5 m.

das äußere, unverschiebliche Auflager der Kuppel. Für eine optimale Kräfteinleitung wurde in den Eckpunkten der Mehrscheiben-Isoliergläser die obere Einzelscheibe zurückgesetzt und das untere VSG mit einem Stahlschuh vergossen. Zur Stabilisierung ist die Glaskuppel mit Stahlseilen unterspannt, die direkt unterhalb der Fugen zwischen den Glasscheiben verlaufen und an den Knotenpunkten fixiert sind. Zur Übertragung der Druckkräfte werden ausschließlich die VSG-Scheiben aus 2 x 10 mm TVG herangezogen. Der Berechnungsansatz geht von einer gleichmäßigen Verteilung der Kräfte auf beide Einzelscheiben des VSG aus. Je Scheibenecke werden planmäßig Druckkräfte bis 25 kN übertragen.¹⁸

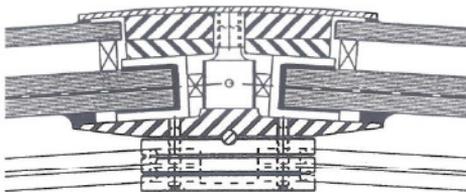


Bild 5
Glaskuppel des Weltbildverlages in Augsburg – Schnittdarstellung des Knotenpunktes

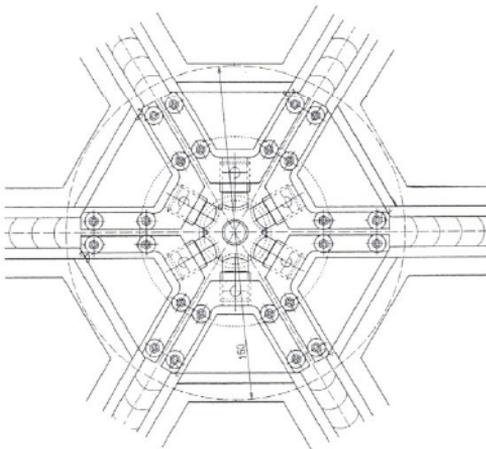


Bild 6
Glaskuppel des Weltbildverlages in Augsburg – Grundrissdarstellung des Knotenpunktes

Das Tragsystem der Glaskuppel wurde zwei Jahre nach deren Errichtung auf ein weiteres Bauvorhaben in Augsburg übertragen. Die Glastonne über dem Innenhof des Maximilianmuseums überspannt eine Fläche von 37 m x 13,5 m. Da die Tonne nur einachsig gekrümmt ist, konnten rechteckige Glasscheiben zum Einsatz kommen. Je Knotenpunkt treffen

¹⁸ Vergleiche Ludwig 1998 und Gahr 1999.

somit vier Scheiben zusammen und übertragen die Druckkräfte von bis zu 50 kN von einer Scheibe zur nächsten. Im Unterschied zur Glaskuppel wurden bei der Glastonne keine Isoliergläser, sondern Verbund-Sicherheitsglas aus 2 x 12 mm TVG verwendet. Die Fugen zwischen den Glasscheiben wirken so im Gegensatz zur Glaskuppel deutlich filigraner. Die Seilunterspannung erfolgte wieder direkt unterhalb der Glasebene, dieses Mal aber nicht entlang der Fugen zwischen zwei Glasscheiben, sondern diagonal von einem Eckpunkt zum anderen. Die Seilunterspannung sticht so deutlicher aus dem Gesamttragwerk hervor.¹⁹

Bild 7
Glastonne des Maximilian-
museums in Augsburg



Bei beiden Projekten wurden die Ecken der tragenden Glasscheiben im Winkel von 60° bzw. 45° gefast und im Werk ein Edelstahlschuh mit einer Vergussmasse aufgesetzt. Die Übertragung der Druckkräfte erfolgt von der Glaskante über eine Vergussmasse aus Hilti HIT HY 50 in den Edelstahlschuh. Dieser leitet die Kräfte über ein Kalottenlager in den Knotenpunkt ein, wo die Kraftweiterleitung an die benachbarten Scheiben erfolgt.

¹⁹ Vergleiche Ludwig 2000 und Schittich 2001.

3 Ein Glasdach über dem Innenhof des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin

3.1 Einleitung

Im Zuge eines durch das Institut für Baukonstruktion begleiteten Forschungsprojektes zur Entwicklung eines Glasdachsystems mit lastabtragender Verglasung ergab sich in 2007 die Möglichkeit, am Entwurf und der Ausführung der Überdachung des Innenhofes des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin mitzuwirken.

3.2 Zur Geschichte

Das ehemalige Reichstagspräsidentenpalais in Berlin steht am Friedrich-Ebert-Platz gegenüber dem Reichstagsgebäude. Es wurde durch den Architekten Paul Wallot entworfen, zwischen 1899 und 1904 errichtet und diente bis 1919 als Wohn- und Arbeitssitz des Reichstagspräsidenten. Nach Ende des zweiten Weltkrieges lag das Gebäude direkt an der Zonengrenze im östlichen Teil Berlins. Die Grenze verlief zwischen Reichstagsgebäude und dem ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais. Nach 1945 wurde das Gebäude nur teilweise instandgesetzt und unterlag mehreren Nutzungen. So fehlte bis zur Restaurierung ab 1997 zum Beispiel das Satteldach des Gebäudes. Durch den Abriss des im Süden angrenzenden Gebäudekomplexes nach 1945 war der einstige Innenhof des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais nach Süden hin geöffnet. Seit Fertigstellung der Sanierungsmaßnahmen 1999, die das Gebäude weitestgehend in den ursprünglichen Zustand zurückversetzten, wird das ehemalige Reichstagspräsidentenpalais als Sitz der Deutschen Parlamentarischen Gesellschaft genutzt. Mit der Errichtung des Jakob-Kaiser-Hauses im Süden des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais wurde dann der nach Süden offene Innenhof wieder geschlossen. Im Zuge weiterer Umbaumaßnahmen in 2007 war unter anderem geplant, den durch das Jakob-Kaiser-Haus wieder geschlossenen Innenhof zu überdachen und den dadurch entstehenden Raum als Nutzfläche zu erschließen.

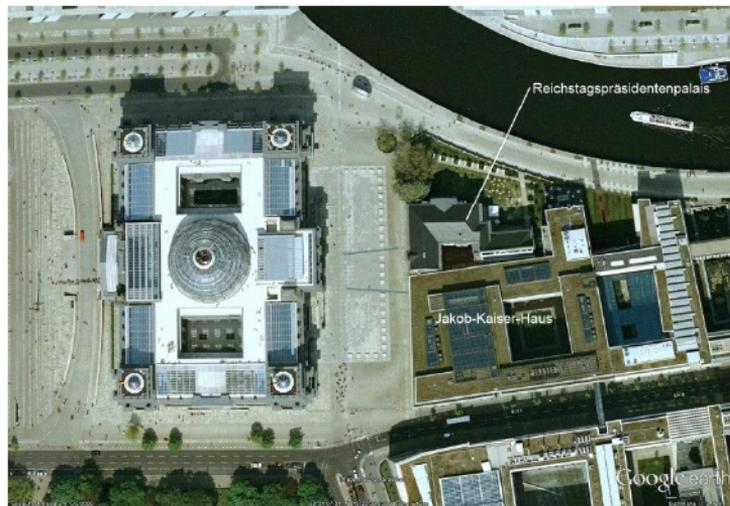
Bild 8

Luftaufnahme des Friedrich-Ebert-Platzes in Berlin vom 21.03.1945 mit dem teilweise zerstörten Reichstagsgebäude, dem Reichstagspräsidentenpalais und im Süden des Reichstagspräsidentenpalais einem nach 1945 abgerissenen Gebäudekomplex



Bild 9

Luftaufnahme des Friedrich-Ebert-Platzes in Berlin vom 05.05.2006 mit dem sanierten Reichstagsgebäude, dem Reichstagspräsidentenpalais und im Süden des Reichstagspräsidentenpalais dem 2002 fertiggestellten Jakob-Kaiser-Haus



3.3 Entwurf

In Zusammenarbeit mit dem Architekturbüro Brenne Architekten aus Berlin wurde im Jahr 2006 eine Entwurfsplanung für ein Glasdach über dem Innenhof erstellt. Die Grundrissform des Innenhofes, die baukonstruktiven Gegebenheiten sowie Nutzeranforderungen machte dies zu einer anspruchsvollen Aufgabe. Hier ein Auszug der wichtigsten Randbedingungen:

- Viereckige Grundfläche des Innenhofes mit nur einem rechten Winkel
- Historische Fassade an den Wandflächen zum ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais

- Glasfassade am Jakob-Kaiser-Haus über die gesamte Gebäudehöhe
- das Flachdach des Jakob-Kaiser-Hauses durfte nicht zur Auflagerung der Glasdachkonstruktion herangezogen werden
- in den Bestand durften durch die Dachkonstruktion nur geringe horizontale Kräfte eingeleitet werden
- hohe Nutzeranforderungen an das Raumklima im durch das Glasdach abgeschlossenen Innenhof
- hohe brandschutztechnische Anforderungen vor allem hinsichtlich der Entrauchung im Brandfall

Ein weiterer maßgeblicher Aspekt bei der Entwurfsplanung waren die durch den Bauherrn vorgegebenen kurzen Bauzeiten von jeweils nur etwa einem Monat, die große Baumaßnahmen nur in den parlamentarischen Urlaubszeiten zuließen.

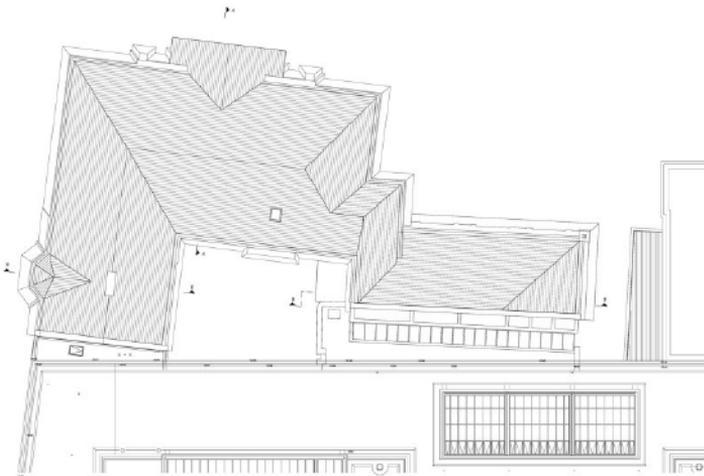


Bild 10
Dachaufsicht des ehemaligen Reichspräsidentenpalais mit Darstellung des Innenhofes und des anschließenden Jakob-Kaiser-Hauses

Im Ergebnis des Entwurfes stand eine Tonnendachkonstruktion aus einem Raumfachwerk, bei dem die Glasscheiben im Obergurt zum Abtrag der Druckkräfte herangezogen werden. Die Tonne mit einem konstanten Außenradius ist um etwa zwei Grad in Richtung der Längsachse geneigt und besteht aus neun einzelnen Raumfachwerkbögen mit einer Breite von 1,8 m und zwei Giebelbögen zum Abschluss der Tonne auf der West- und Ostseite. Die Seitenflächen der Giebelbögen werden mit RWA-Glaselementen bestückt und dienen zum einen der Belüftung als auch im Brandfall der Entrauchung des Innenhofes. In der Draufsicht schließt die Tonne durch ihre Neigung in der Längsachse mit der Au-

ßenkubatur des Innenhofes auf der Nord- und Südseite ab. Der deckungsgleiche Abschluss des Tonnendaches mit der Grundrissform des Innenhofes auf der West- und Ostseite wird durch die Grundrissform der Giebelbögen erreicht.

Der Obergurt der Raumfachwerkbögen besteht aus elf Isolierglasscheiben, die in den Eckpunkten in Knotenpunkten auf den Pfosten des Raumfachwerks gelagert sind. In den Knotenpunkten werden die Druckkräfte aus dem Fachwerk über Klotzungen im Eckbereich in die Glasscheiben eingeleitet. Die Pfosten und der Untergurt des Raumfachwerkträgers bestehen aus Flachstahl und Stahlrohren. Der Fußpunktanschluss der Pfosten an den Untergurt und der Kopfpunktanschluss an den Knoten sind biegesteif ausgeführt. Das Tragsystem des Raumfachwerkes entspricht dem Strukturtyp Halb-Vierendee²⁰.

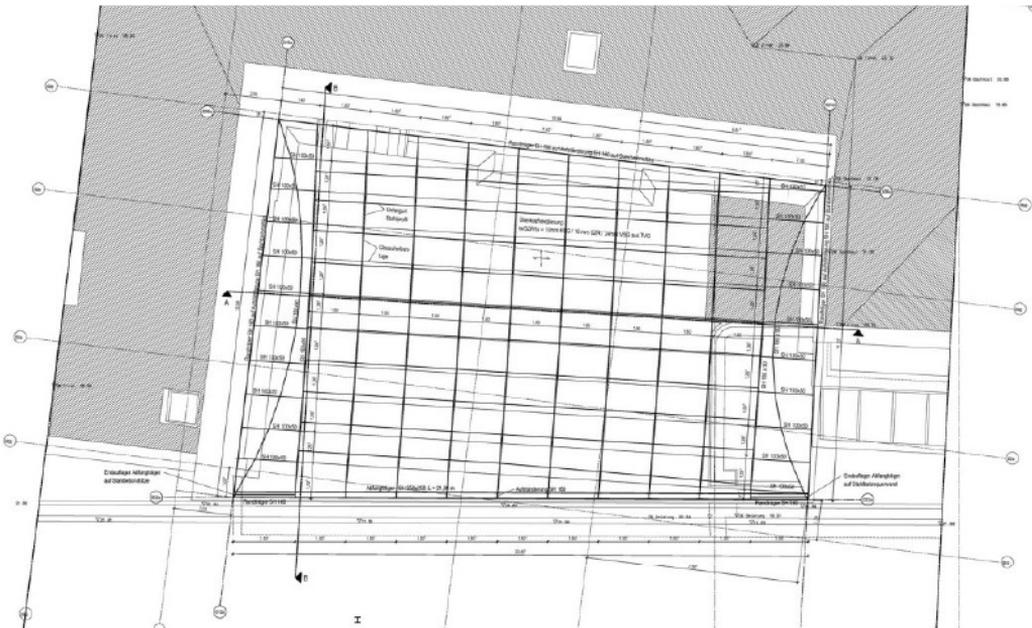


Bild 11
Grundrissdarstellung der geplanten Glasdachkonstruktion

Die Auflagerung des Glasdaches erfolgt auf der West-, Nord-, und Ostseite des Innenhofes auf den Außenwänden des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais. Da auf der Südseite eine Auflagerung des Glasdaches auf dem Flach-

²⁰ Vergleiche Reich 2010, Seite 108.

dach des Jakob-Kaiser-Hauses nicht möglich war, erfolgt die Auflagerung hier auf einem Abfangträger aus Stahl der vor der Stirnfläche des Flachdaches des Jakob-Kaiser-Haus installiert wird. Der Abfangträger besitzt eine Bauhöhe von 950 mm und eine Spannweite von 20,5 m.

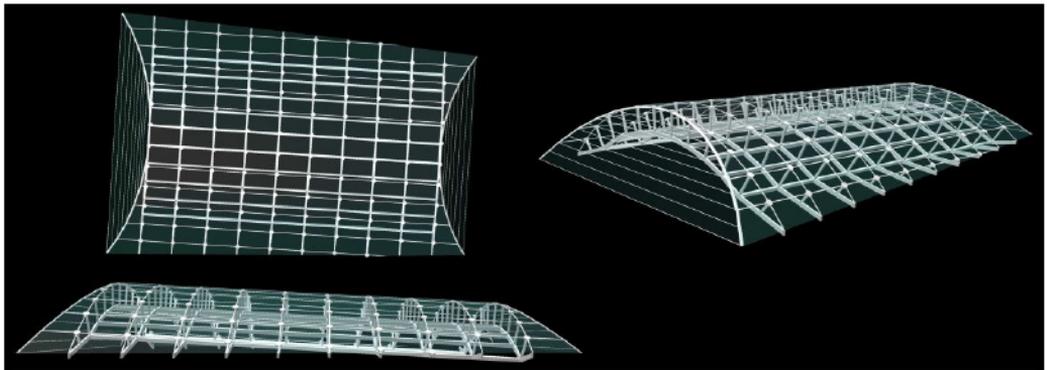


Bild 12
Ein 3D-Arbeitsmodell des Glasdaches aus der Entwurfsphase

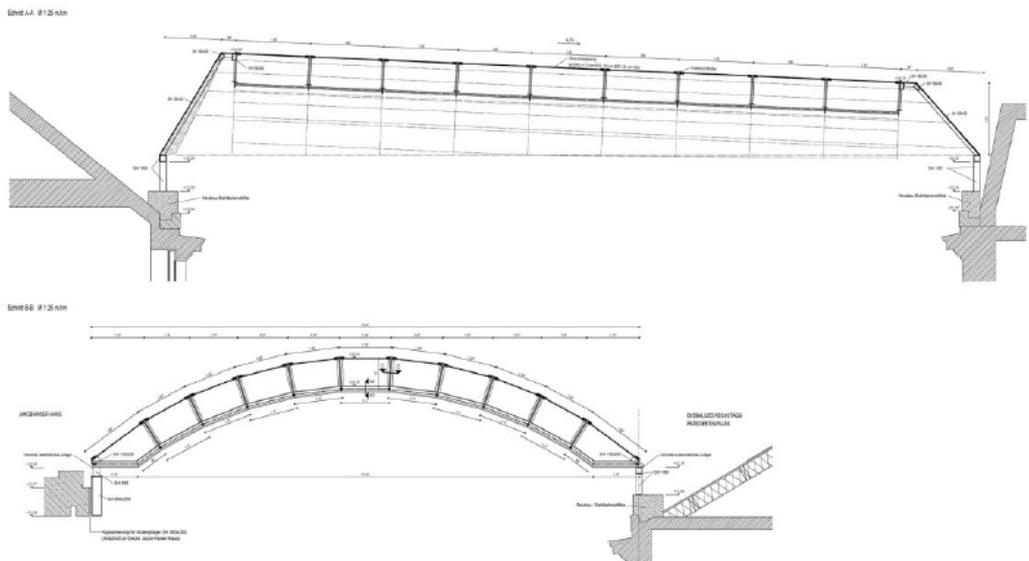


Bild 13
Schnittdarstellung der geplanten Glasdachkonstruktion in einer frühen Entwurfsphase

Der Entwurf sah vor, zur Einhaltung der kurzen zur Verfügung stehenden Baufenster die neun Einzelbögen und zwei Giebelbögen komplett im Werk vorzufertigen und am Einbauort nur noch einzusetzen und die Einzelsegmente miteinander zu verschrauben.

Auf der Grundlage des erarbeiteten Entwurfes erhielt das Architekturbüro Brenne Architekten den Zuschlag für die Bauplanung und Ausführung der Innenhofüberdachung.

3.4 Tragwerk

Das Dachtragwerk unterteilt sich in elf Segmente, die, wenn sie einzeln für sich stehen, tragfähig sind. Die mittleren neun Dachsegmente sind kreisförmig gebogene symmetrische Raumbachwerkträger, deren Raumstruktur einem Halb-Vierendeel entspricht. Die Knotenpunkte des Ober- und Untergurtes liegen deckungsgleich übereinander. Die Knotenpunkte des Untergurtes sind biegesteif, die Knotenpunkte des Obergurtes gelenkig. Der Obergurt jedes Raumbachwerkträgers wird durch elf Isolierglasscheiben gebildet, die in den Knotenpunkten auf den Pfosten aufgelagert sind. Die Glasscheiben werden zu 100% am Abtrag der Druckkräfte im Obergurt herangezogen. Die Einleitung der Druckkräfte in die Isolierglasscheiben erfolgt über Klotzungen in den Obergurtknoten. Zusätzlich verläuft im Obergurt direkt unterhalb der Glasebene, entlang der Glaskanten eine Unterspannung mit Zugstangen von Knotenpunkt zu Knotenpunkt zur Stabilisierung und zur Aufnahme von Zugkräften infolge von Windsog- und Temperaturlastfällen. Die Pfosten und alle Stäbe des Untergurtes bestehen aus Stahl. Die Stabanschlüsse sind biegesteif ausgeführt. Die ebenen Glasscheiben und die geraden Stahlprofile folgen der kreisförmigen Bogenform des Raumbachwerkträgers polygonartig.

Die Randfelder der Dachkonstruktion, im Weiteren als Giebelbögen bezeichnet, sind in konventioneller Stahlskelettbauweise ausgeführt, bei dem jede Glasscheibe aufgrund der komplizierten Geometrie eine Modellscheibe ist und keine Lasten aus dem Tragwerk übernimmt.

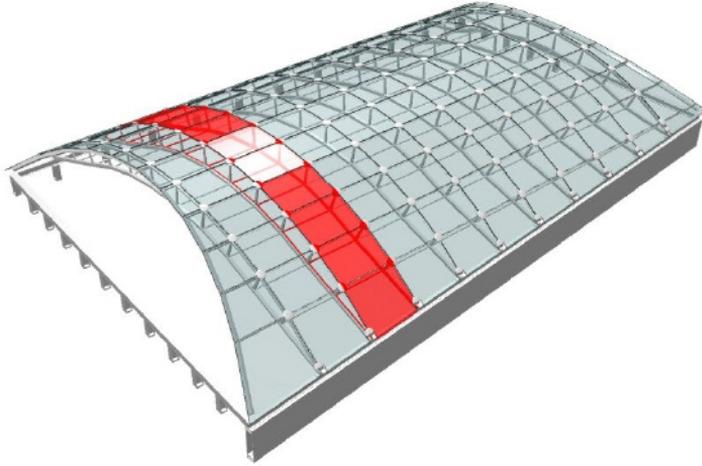


Bild 14
Rendermodell des Dach-
tragwerks ohne Füllung der
Giebelflächen, der Raum-
fachwerkträger
Nr. 2 ist exemplarisch rot
eingefärbt

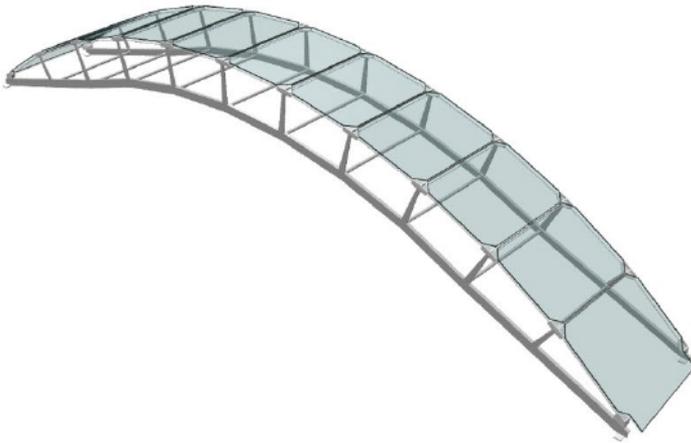


Bild 15
Rendermodell des Raum-
fachwerkträgers Nr. 2

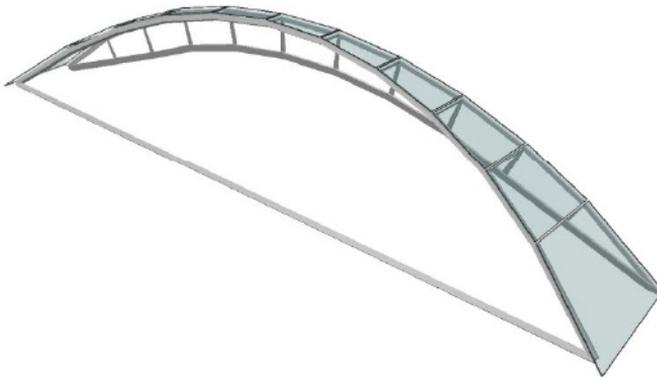
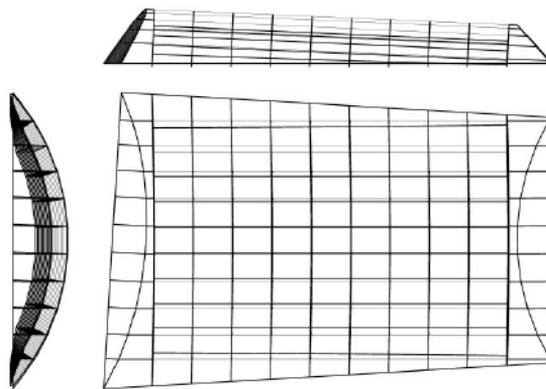


Bild 16
Rendermodell des Giebel-
bogens auf der Westseite

Die Tonnenkonstruktion ist um zwei Grad in der Längsrichtung geneigt. Die Neigung der Tonne ergibt sich aus den geometrischen Zwangsbedingungen. Die Grundform des Innenhofes entspricht einem Viereck, bei dem keine Seiten parallel zueinander sind. Die Mittelachse der Tonnenkonstruktion wurde in die Winkelhalbierende zwischen der Nord- und Südseite des Innenhofes gelegt. Wird die Tonne mit konstantem Radius entlang der Längsachse geneigt, so entsteht bei einem horizontalen Schnitt in der Aufsicht die Form eines symmetrischen Trapezes. Der Neigungswinkel der Tonne wurde im Entwurf soweit verändert, bis in der Aufsicht die Außenformen der Längsrichtung der Tonne mit denen der Nord- und Südseite des Innenhofes übereinstimmen. Die horizontale Schnittebene wurde etwa 2,70 m unter den höchsten Punkt der geneigten Tonne gelegt. Die Anpassung der Grundrissform von Tonne und Innenhof auf der West- und Ostseite erfolgt durch die Geometrie der Giebelbögen.

Bild 17
Linienmodell der geneigten
Tonnenkonstruktion in der
Aufsicht und Seitenansichten



Die neun Raumfachwerkträger mit Spannweiten von 11,90 m bis 13,55 m sind 1,80 m breit und bestehen je aus zwei durchlaufenden Untergurtstäben aus L-förmig verschweißtem Flachstahl, je 20 Pfosten aus Flachstahl, je 20 Halb- und vier Viertelknoten sowie je elf Isolierglasscheiben. Die Raumfachwerkträger sind symmetrisch aufgebaut. Die neun mittleren Isoliergläser entsprechen dem Regelformat 1,26 m x 1,78m. Die Randscheiben des Raumfachwerkträgers sind Modelscheiben.

Bei der Tragwerksplanung war die Ausbildung der Knotenpunkte, als auch die Entwicklung einer geeigneten Klotzungsstruktur zur Übertragung der hohen Druckkräfte ein interessanter aber auch zeitintensiver Entwicklungspro-

zess. Bemühungen, eine möglichst materialgerechte und dauerhafte Kraftereinleitung in die Glaskante zu erzielen, standen im Gegensatz zu Gestaltungsansprüchen, bei denen die Größe der Knotenpunkte und die Dicke der Fugen zwischen den Isolierglasscheiben möglichst gering gehalten werden sollten.

Die Knotenpunkte zur Aufnahme der Verglasung wurden als Halbknoten entwickelt, die jeweils zwei Ecken von in Tonnenquerrichtung benachbarten Isolierglasscheiben ein Auflager bieten und eine Kraftweiterleitung in der Scheibenebene in Tonnenlängs- und Tonnenquerrichtung ermöglichen. Die Halbknoten besitzen im Grundriss die Form eines Halbkreises mit einem Durchmesser von 260 mm und bestehen vollständig aus Edelstahl. Die Halbknoten waren aufgrund der anspruchsvollen Geometrie ursprünglich als Gussteil konzipiert worden, in der Ausführung dann aber als Frästeil hergestellt. Die Isolierglasscheiben besitzen von oben nach unten einen Aufbau von:

8 mm	ESG
16 mm	Scheibenzwischenraum
19 mm	ESG
3,04 mm	PVB-Folie
8 mm	TVG

Der Lastabtrag in Scheibenebene erfolgt über die 19 mm dicke ESG-Scheibe. Die 8 mm dicke TVG-Scheibe dient zusammen mit der PVB-Folie der Sicherstellung einer Resttragfähigkeit. Mit der Dicke der tragenden ESG-Scheibe von 19 mm wurde ein konservativer Ansatz verfolgt, der sich vor allem aus den Berechnungen zum Stabilitätsverhalten mit einem globalen Sicherheitsfaktor von 3,0 und ohne Ansatz eines Verbundes ergab. Die Ergebnisse der durchgeführten Bauteilversuche zeigten im Nachgang, dass die Dicke der ESG-Tragscheibe wohl auch auf 15 mm hätte reduziert werden können.

Der Halbknoten stellt das zentrale Verbindungselement aller Bauteile des Obergurtes dar. Neben der Auflagerung der Isolierglasscheiben dient der Halbknoten als Verankerungspunkt für die Unterspannung mit dünnen Zugstangen unterhalb der Verglasungsebene. Die Halbknoten selbst sind über Kopfplatten mit den Pfosten des Raumfachwerkes verschraubt. Die Ecken der Isolierglasscheiben liegen über eine

elastische Zwischenlage in den Halbknoten auf einer halbkreisförmigen Fläche mit Radius von etwa 110 mm auf. Die beiden Auflageflächen je Halbknoten sind in Tonnenquer- richtung entsprechend der polygonartig durch die ebenen Glasscheiben nachempfundenen Tonnenform geneigt. Der planmäßig zwischen den Stirseiten der beiden Glaskanten je Scheibenecke und dem Halbknoten entstehende Freiraum wird an jeder Scheibenkante mit einer 80 mm langen Klotz- form- und kraftschlüssig geschlossen.

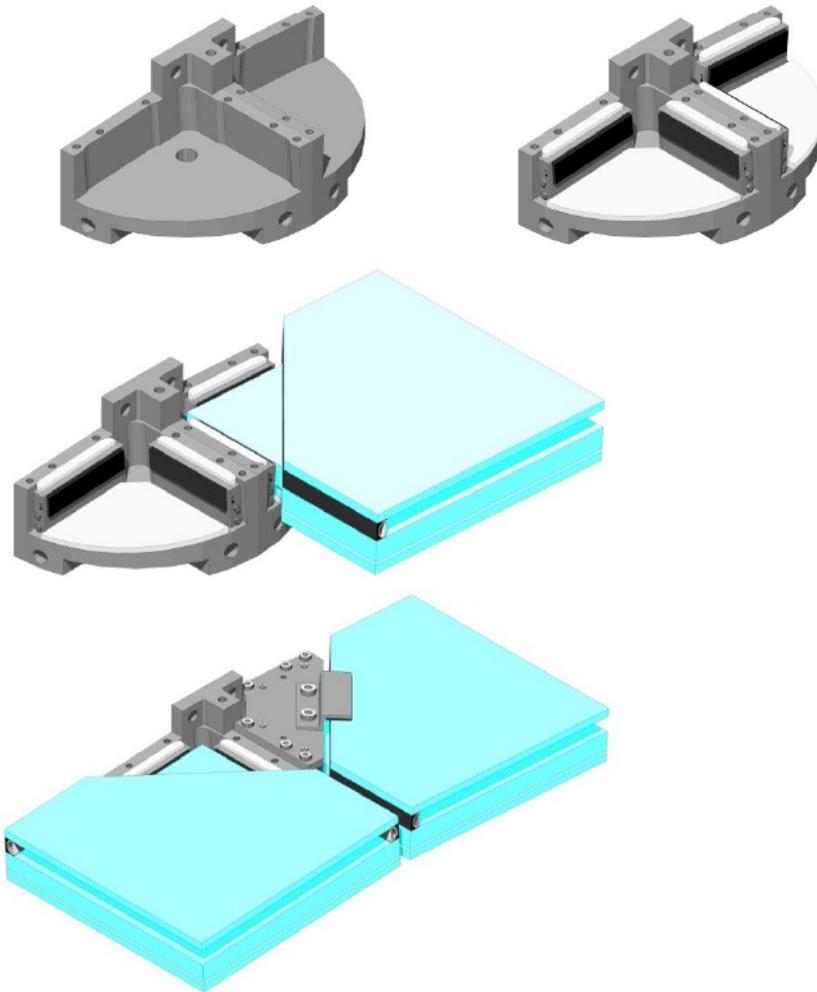


Bild 18
CAD-Modell des Halbkno-
tens mit den Anbauteilen,
Klotzungen und der Vergla-
sung

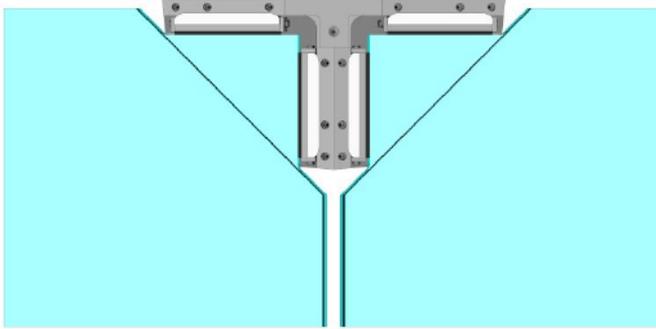


Bild 19
Draufsicht auf den Halbknoten mit Verglasung und Klotzungen

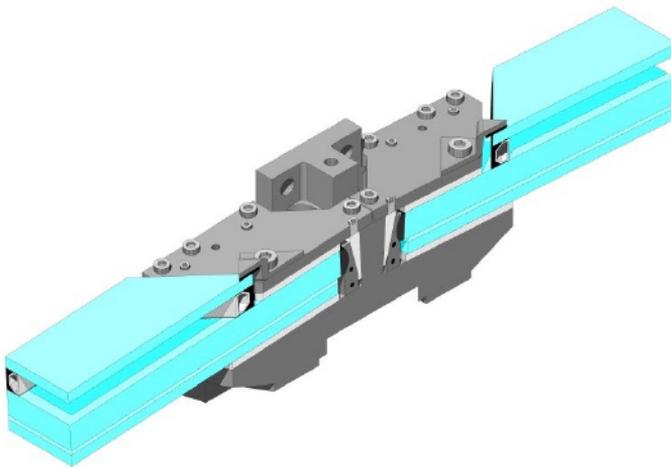


Bild 20
Isometrische Schnittdarstellung des Halbknotens mit Verglasung, Klotzungen und Klemmplatten

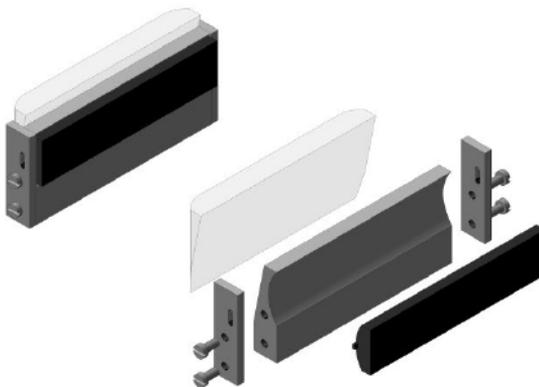


Bild 21
CAD-Modell der Klotzungs-konstruktion

Die Ecken der Isolierglasscheiben wurden zur Reduzierung der Fugenbreite zwischen den Isolierglasscheiben um etwa 20 mm zurückgesetzt. Die Fugenbreite zwischen den Isolierglasscheiben wurde somit von etwa 53 mm im Klotzungsbe-
reich auf etwa 10 mm bis 17 mm im Bereich zwischen den

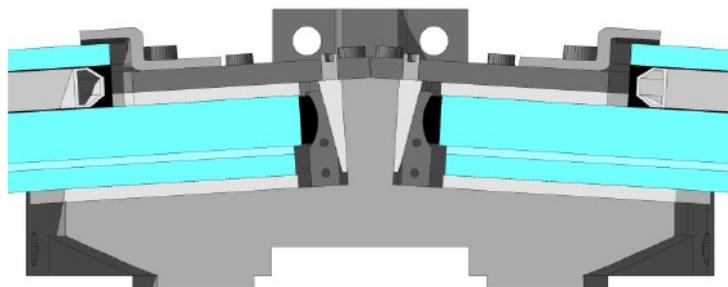
Knotenpunkten reduziert. Für eine optimierte Klemmung der Isolierglasscheiben in den Halbknoten sind die Ecken der oberen Einzelscheibe des Isolierglases zurückgesetzt, so dass die auf den Halbknoten aufgeschraubten Klemmplatten nur die VSG-Scheibe des Isolierglases halten.

Die verwendete Klotzungsstruktur wurde speziell für die Anwendung in diesem Bauvorhaben mit dem Ziel einer möglichst materialgerechten und dauerhaften Lasteinleitung in die Scheibenkante entwickelt. Die Klotzung ist aus fünf Einzelbauteilen aufgebaut:

- einem Kontaktklotz aus Kunststoff,
- einem Mittelstück mit Lagerschale aus Aluminium,
- einem keilförmigen Futterstück aus Aluminium,
- zwei Seitenblechen aus Aluminium.

Der Kontaktklotz ist in der Lagerschale des Mittelstücks um $\pm 6^\circ$ verdrehbar gelagert. Dies dient dem Ausgleich von Schiefstellungen der Scheibenkante infolge der Durchbiegung der Verglasung oder der Schiefstellungen infolge von Toleranzen bei der Kantenbearbeitung der Glasscheiben. Über kleine Nasen an den Stirnseiten des Kontaktklotzes und Nuten in den Seitenblechen wird verhindert, dass der Kontaktklotz aus der Lagerschale des Mittelstücks herausrutscht. Durch das keilförmige Futterstück kann die Dicke der Klotzung in einem Bereich von 16,4 mm bis 17,4 mm stufenlos angepasst werden. Dies dient dem Ausgleich von Maßtoleranzen der Verglasung und der Lagetoleranz der Halbknoten. Der Kontaktklotz hat eine Länge von 80 mm und eine Breite von 18 mm. Die effektive Kontaktfläche zur Glaskante ergibt sich aus der Dicke der Glasscheibe von 19 mm und Abzug der Glasfasen links und rechts von je 1,5 mm zu $80 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} = 1280 \text{ mm}^2$.

Bild 22
Schnittdarstellung der Klotzung



Infolge der Eigengewichtsbelastung der Tonnenkonstruktion ergeben sich in Tonnenquerrichtung die höchsten Beanspruchungen für die Klotzungskonstruktion. Die maximale charakteristische Druckkraftbeanspruchung eines einzelnen Klotzungspunktes aus Eigengewichtslasten liegt bei 36,6 kN. Durch Überlagerung mit veränderlichen Einwirkungen erhöht sich diese auf 66,7 kN.



Bild 23
Verkleinerte Modellscheibe (Ausführung der Scheibenecken im Maßstab 1:1) mit 4 Halbknoten und den Klotzungen sowie Anbauteilen



Bild 24
Untersicht des Halbknotens mit den Verankerungen der Unterspannung der Glasebene und Abdeckkappen

3.5 Genehmigungsverfahren

Die Genehmigung der Dachkonstruktion mit lastabtragender Verglasung erfolgte über ein Zustimmungsverfahren im Einzelfall durch die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin. Im Rahmen des Zustimmungsverfahrens waren folgende Einzelnachweise zum Tragverhalten des Gesamtsystems und der Einzelkomponenten durch experimentelle Bauteilversuche zu erbringen:

- experimentelle Bestimmung der Tragfähigkeit der Klotzungskonstruktion an Einzelproben im Maßstab 1:1
- experimentelle Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens des verwendeten Klotzungsmaterials an Einzelproben des Materials
- experimenteller Nachweis der Betretbarkeit der Verglasung zu Reinigungs- und Wartungszwecken an Modellscheiben im Maßstab 1:1
- experimentelle Bestimmung des Beulverhaltens der VSG-Scheibe bei Belastung in der Scheibenebene (Stabilitätsnachweis) an Modellscheiben im Maßstab 1:1
- experimenteller Nachweis der Tragsicherheit des Raumfachwerkträgers mit der größten Spannweite im Maßstab 1:1
- experimenteller Nachweis des Resttragverhaltens des Raumfachwerkträgers mit einer gebrochenen Tragscheibe im Maßstab 1:1

Der umfangreichste Nachweis hierbei war der Nachweis der Tragsicherheit des Raumfachwerkträgers mit der größten Spannweite. Nach den Vorgaben der genehmigenden Behörde musste für die druckkraftbeanspruchten Glaselemente eine Tragsicherheit mit dem Faktor 3,0 gegenüber den Eigengewichts- und Schneeeinwirkungen nachgewiesen werden. Dazu sollte der Raumfachwerkträger mit der größten Spannweite als Versuchsträger im Maßstab 1:1 errichtet und an diesem Belastungsversuche durchgeführt werden.

Auf die Durchführung von Belastungsversuchen an Stahl-Glas-Konstruktionen wird immer dann zurückgegriffen, wenn es noch keine Vergleichswerte zur Verifizierung der aufgestellten Rechenmodelle oder Zweifel an deren Richtigkeit gibt. Bei der Vorbereitung und Durchführung solcher Großversuche an Stahl-Glas-Konstruktionen werden die Prüfinstitute vor anspruchsvolle Aufgaben gestellt. Neben der Aus-

wahl geeigneter Belastungssysteme war bei Stahl-Glas-Konstruktionen bisher zumeist eine nochmalige Bemessung des Versuchsaufbaus notwendig. Der Grund dafür ist in den noch unterschiedlichen Bemessungsansätzen für Stahl- und Glasbauteile zu finden. Während die Bemessung von Stahlbauteilen mit Teilsicherheitsbeiwerten auf Einwirkungs- und Widerstandsseite erfolgte, wurden Glasbauteile bisher nach dem System zulässiger Spannungen bemessen. Versuchskonzepte für Stahl-Glas-Konstruktionen zielen fast ausschließlich darauf ab, Tragfähigkeiten bzw. die Tragsicherheit der Glasbauteile zu bestimmen. Im Regelfall wird dabei gegenüber den charakteristischen Einwirkungen ein Tragsicherheitsfaktor von 2,4 bis 3,0 gefordert. Dieses Sicherheitsniveau ist etwa doppelt so groß wie das Sicherheitsniveau bei der Bemessung der Stahlbauteile nach dem Prinzip der Teilsicherheitsbeiwerte. Wird dies bei der Planung von Großversuchen nicht beachtet, besteht die Gefahr, dass im Versuch zuerst ein Bauteil versagt, dessen Tragfähigkeit gar nicht nachzuweisen war. In dem vorliegenden Fall wurde für den Raumbachwerkträger mit der größten Spannweite eine gesonderte Bemessung der Stahlunterkonstruktion vorgenommen, so dass diese genügend Tragreserven gegenüber der dreifachen Einwirkung von Eigengewichts- und Schneelasten aufwies. Aus der Bemessung ergab sich, dass für den Versuchsträger die Blechstärken aller Pfosten und Untergurtstäbe verdoppelt werden mussten.

Aufgrund der Größe und Anzahl aufzubringender Flächen- und Einzellasten wurden zum Aufbringen der Belastung auf den Versuchsbogen Ballastgewichte verwendet. Zum Einsatz kamen Sandsäcke, die wegen der besseren Handhabbarkeit in „Big Bags“ mit einer Grundfläche von etwa 1 m² je nach notwendiger Ballastgröße zu großen Einzelgewichten zusammengepackt wurden. Das Aufbringen bzw. Anhängen der Ballastgewichte im Versuch erfolgte in zwei Stufen.

In Stufe 1 wurden zunächst Ballastgewichte an die Knotenpunkte des Untergurtes angehängt. Dies diente dazu, die durch die Verglasungen im Obergurt abzutragenden Druckkräfte gegenüber der realen Belastung aus Eigengewichtskräften auf den Faktor 3,0 zu erhöhen.

Bild 25

Versuchsmodell des Raumfachwerkträgers für den Nachweis der Tragsicherheit durch einen Großversuch im Maßstab 1:1



Bild 26

An die Stahlunterkonstruktion angehängte Ballastgewichte zur Erhöhung der Eigengewichtsbelastung auf den Faktor 3,0



In Stufe 2 wurde zusätzlich auf jede Glasscheibe ein Ballastgewicht aufgelegt. Die Ballastgewichte entsprachen je Einzelscheibe der Belastung aus der 3-fachen gleichmäßig verteilten Schneelast und der 3-fachen Schneeanhäufung zu einer Seite des Raumfachwerkträgers. In Summe wurden etwa 12 t Ballastgewichte auf den Versuchsträger aufgelegt bzw. angehängt. Nach dem Aufbringen der Belastung war eine Standzeit von 24 h gefordert. Der Versuch wurde insgesamt dreimal durchgeführt, wobei bei jedem Versuch die drei Verglasungen in Feldmitte durch neue ersetzt wurden. In allen drei Großversuchen konnte die Tragsicherheit der Glaselemente mit dem Faktor 3,0 erfolgreich nachgewiesen werden. Positiver Nebeneffekt dieser Versuche war, dass die Abläufe der Montage und des Scheibenaustausches vor der eigentlichen Fertigung der Dachkonstruktion schon er-

probt wurden und in einzelnen Punkten noch Verbesserungen vorgenommen werden konnten. Vor allem im Hinblick auf die zeitlich engen Montagefenster am Einbauort war so eine abgesicherte Planung der späteren Vormontage der Raumfachwerkträger im Werk möglich.



Bild 27
Raumfachwerkträger im Großversuch unter einer Belastung aus insgesamt 12 t Ballastgewichten zur Simulation der Druckkräfte in der Verglasungsebene infolge der 3-fachen Eigengewichts- und Schneebelastung

3.6 Ausführung

Die Ausführung der Dachkonstruktion erfolgte im Frühjahr 2009. In einem ersten Bauabschnitt wurde im Februar 2009 die Auflagerkonstruktion des späteren Glasdaches auf dem Bestand montiert. Auf die Attika des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais wurde ein aufgeständerter Auflagerbalken aus Stahl aufgesetzt. Teilweise waren hierzu Ertüchtigungen und Verstärkungen der Altbauwandkonstruktion nötig. Vor der Stirnfläche des Flachdaches des den Innenhof nach Süden abschließenden Jakob-Kaiser-Hauses wurde der 20,5 m lange Abfangträger aus einer Stahlhohlkastenkonstruktion installiert.

Bild 28
Installation der Auflagerkonstruktion im Februar 2009



Im März 2009 wurden in den Werkhallen der MBM Metallbau Dresden GmbH in Dresden die einzelnen Raumfachwerkträger montiert. Nach dem Aufbau der Stahlunterkonstruktion jedes Raumfachwerkträgers wurde die Knotenpunktage einnivelliert und der Raumfachwerkträger anschließend verglast. Der Aufbau aufwendiger Leegerüste war hierzu nicht notwendig, da die Stahlkonstruktion auch vor dem Verglasen eine ausreichende Steifigkeit aufwies. Lediglich in den Viertelpunkten wurde die Stahlunterkonstruktion mit Montagestützen unterstützt. Bei den Verglasungsarbeiten musste besondere Sorgfalt auf den korrekten Einbau der Klotzungen gelegt werden. Die Einbaulage jeder einzelnen Klotzung wurde fotografisch festgehalten und als Referenz für spätere Kontrollen des Tragwerkes dokumentiert. Schlüssel für den schnellen und reibungsfreien Ablauf der Montagearbeiten waren die Vorkenntnisse, die bei der Montage des

Versuchsträgers ein halbes Jahr zuvor gesammelt werden konnten. Nach der Fertigstellung der neun Raumfachwerkträger wurden die in Tonnenlängsrichtung verlaufenden Fugen zwischen den Glasscheiben versiegelt und die Raumfachwerkträger für den späteren Transport von Dresden nach Berlin vorbereitet.



Bild 29
Montage und Verglasungsarbeiten an den Raumfachwerkträgern in den Werkhallen der MBM Metallbau Dresden GmbH



Bild 30
Montierte und für den Transport vorbereitete Raumfachwerkträger auf dem Werksgelände der MBM Metallbau Dresden GmbH

In den ersten beiden Aprilwochen 2009 stand ein weiteres Baufenster zur Verfügung, in dem die neun Raumfachwerkträger und die zwei Giebelbögen über dem Innenhof des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais eingebaut wurden. Innerhalb der ersten fünf Werktage wurden die vorgefertig-

ten Elemente montiert. Dazu wurden diese per Tieflader von Dresden „just in time“ angeliefert, mit einem Mobilkran vom Tieflader aufgenommen und an der entsprechenden Einbauposition abgesetzt.

Bild 31
Anlieferung der vorgefertigten Raumfachwerkträger auf dem Friedrich-Ebert-Platz in Berlin





Bild 32
Einheben der vorgefertigten
Elemente mit einem Mobil-
kran

Direkt im Anschluss wurden die in Tonnenquerrichtung verlaufenden Fugen zwischen den Glasscheiben versiegelt und die Abdeckkappen auf die Kontenpunkte des Obergurtes aufgesetzt. Nach Einbau der RWA-Fensterelemente in die Giebelflächen der fertigen Tonnendachkonstruktion wurden die eigentlichen Montagearbeiten vor Ort der etwa 20 m x 13 m großen Dachkonstruktion nach zwei Wochen abgeschlossen.



Bild 33
Fertiggestellte Innenhof-
überdachung am ehemali-
gen Reichstagspräsidenten-
palais in Berlin

Bild 34

Der Innenhof des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais nach Fertigstellung der Umbau- und Sanierungsmaßnahmen



4 **Aufbau und Wirkungsweise der Klotzung**

4.1 **Die Klotzung im Glasbau**

In fast allen Anwendungsbereichen von Flachglas im Bauwesen werden Klotzungen zur Lagesicherung der Verglasungen eingesetzt. Der Begriff "Klotzung" ist ein Fachbegriff des Glashandwerks und stammt daher, dass Klötzchen aus einem geeigneten Material wie Holz oder Kunststoff zwischen Glaskante und den umgebenden Bauteilen, wie zum Beispiel Fensterrahmen oder Fassendprofilen, eingelegt werden. Es wird dabei in Tragklötze und Distanzklötze unterschieden. Tragklötze werden zum Abtrag des Eigengewichtes der Verglasung in die Tragkonstruktion (Fensterrahmen, Fassadenprofile) verwendet. Distanzklötze sichern die Verglasung gegen Verrutschen oder Verdrehen innerhalb des Glasauflegers²¹.

Die Ausführung der Klotzung ist durch die Technische Richtlinie des Glashandwerks²² und Verarbeitungsrichtlinien von Herstellern²³ der Klötze und Verglasungen geregelt. Weitere Angaben zur Ausführung von Klotzungen finden sich in der DIN EN ISO 14439²⁴, welche bislang aber nur in der Entwurfsfassung vorliegt.

An die für die Klotzung zum Einsatz kommenden Materialien stellen sich folgende Anforderungen:

- ausreichende Druckfestigkeit und Steifigkeit
- Materialverträglichkeit zu Glas (geringe Oberflächenhärte)
- Materialverträglichkeit zu PVB-Folien
- Materialverträglichkeit zum Randverbund von Mehrscheiben-Isoliergläsern
- Alterungsbeständigkeit (Feuchtigkeitsaufnahme, UV-Beständigkeit, Verwitterung)
- Temperaturbeständigkeit im zu erwartenden Einsatztemperaturbereich

Im Regelfall werden heute Klötze aus Kunststoff verwendet. Vereinzelt kommen aber auch noch Klötze aus Hartholz zur

²¹ Vergleiche Roto Gluske 2011, Seite 6.

²² Vergleiche TR Glas 3.

²³ Vergleiche Roto Gluske 2011.

²⁴ Vergleiche DIN EN ISO 14439.

Anwendung. Die Tragfähigkeiten dieser Klötze sind dabei auf die im Normalfall zu erwartenden Lasten ausgelegt. Im Bereich der Fassadenverglasungen sind dabei die Eigengewichtslasten der Verglasung bemessungsrelevant.

Durch die Klotzung soll sichergestellt werden, dass die Verglasung im Regelfall keine tragende Funktion übernimmt²⁵. Ausnahme sind hier Verglasungen von Drehfenstern, bei denen die Verglasung planmäßig als aussteifendes Bauteil in der Fensterflügelkonstruktion verwendet wird. Die Verglasung bildet im Fensterflügel durch entsprechende Klotzung eine Druckdiagonale aus, die einer Schiefstellung des Fensterflügels entgegenwirkt.

Der Klotzhersteller Roto Gluske GmbH²⁶ gibt für seine Klötze für Standardanwendungen Tragfähigkeiten bei Raumtemperatur und vollflächiger Kraftübertragung von 1223 kg bis 1376 kg an. Bei einer für Fassaden realistischen Temperatur von 80°C sinken die Tragfähigkeiten auf 336 kg bis 398 kg ab. Für die Klotzung von Verglasungen mit höheren Eigengewichtslasten wird ein Verglasungsklotz mit Edelstahl einlage angeboten, dessen Tragfähigkeit bei 80°C Umgebungstemperatur 902 kg beträgt.

Gemäß den technischen Richtlinien des Glaserhandwerks ist bei Verbundgläsern und Verbund-Sicherheitsgläsern mit mehr als zwei Scheiben ein Klotzmaterial mit tragfähigem Sockel und elastischer Auflage einzusetzen²⁷, durch das der herstellungsbedingte Kantenversatz ausgeglichen werden kann. Entsprechend DIN EN ISO 12543, Teil 5 ist für Verbundglas bzw. Verbund-Sicherheitsglas ein Kantenversatz von 2,0 mm bis 6,0 mm in Abhängigkeit der Länge der Glasscheibe senkrecht zur betrachteten Glaskante zulässig²⁸.

Für die Anordnung der Klotzungen am Scheibenrand werden in der technischen Richtlinie Empfehlungen für unterschiedliche Verglasungsanwendungen gegeben. Der minimale Abstand der Klotzung von der Ecke der Verglasungseinheit wird mit 20 mm angegeben. Verglasungseinheiten

²⁵ Vergleiche TR Glas 3, Seite 7.

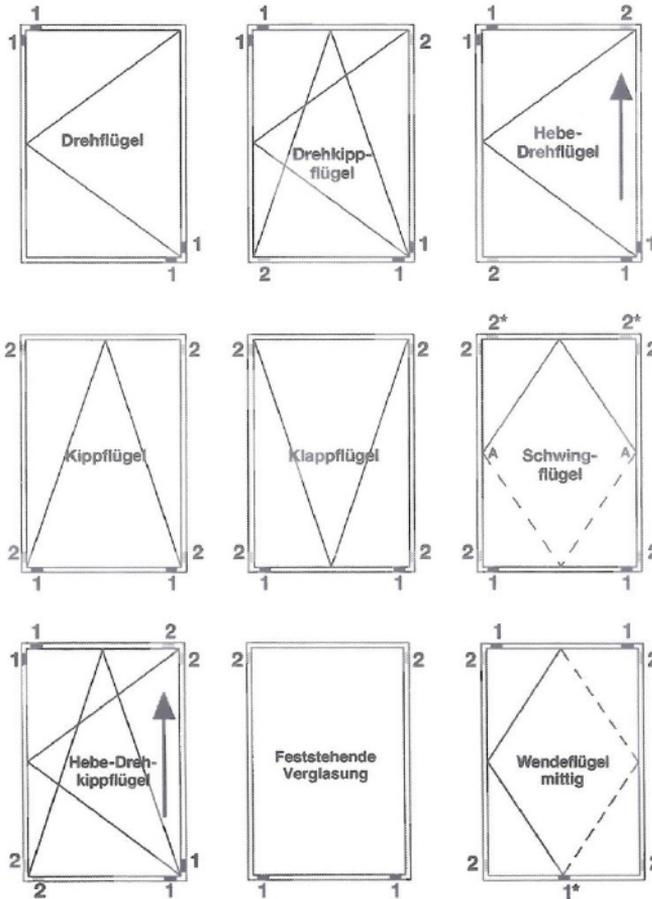
²⁶ Vergleiche Roto Gluske 2011, Seite 10 ff.

²⁷ Vergleiche TR Glas 3, Seite 15.

²⁸ Vergleiche DIN EN ISO 12543-5, Seite 8

mit rechteckigem Grundriss werden durch vier bis acht Klotzungen in der Lage gesichert, wovon mindesten zwei Tragklötze sind.

1  Tragklötze 2  Distanzklötze



1* bei über 1m breiten Verglasungseinheiten sollen 2 Tragklötze von mindestens 10cm Länge über dem Drehlager liegen.

2* werden bei umgeschwungenem Flügel zu Tragklötzen

Bild 35

Empfohlene Klotzungspositionen für ebene Verglasungen nach den technischen Richtlinien des Glaserhandwerks Nr. 3

4.2 Glas

4.2.1 Flachglas im Bauwesen

Für die Anwendung von Flachglas im Bauwesen wird heute fast ausschließlich Floatglas nach DIN EN 572-2 verwendet. Die Bezeichnung "Floatglas" ist auf das um 1960 eingeführte Herstellungsverfahren zurückzuführen. Genauere Ausführungen zum Herstellungsverfahren von Floatglas finden sich unter anderem bei Wörner²⁹ und Siebert³⁰.

Das Bauprodukt Floatglas kann aber eine Vielzahl von Anforderungen, die an Verglasungen gestellt werden nicht erfüllen. Aufgrund des spröden Bruchverhaltens und fehlender Duktilität dürfen Einzelscheiben aus Floatglas nur bedingt oder gar nicht im Fassaden- und Überkopfbereich³¹ verwendet werden.

Durch Weiterverarbeitung von Floatglas zu Verbundgläsern, Verbund-Sicherheitsgläsern, thermisch vorgespannten Gläsern und Mehrscheiben-Isoliergläsern hat die Glasindustrie in den letzten 50 Jahren Wege gefunden, die Eigenschaften des Bauproduktes Glas hinsichtlich des Bruchverhaltens, der Resttragfähigkeit, der Bruchfestigkeit und des Wärmedurchgangswiderstandes auf die Anforderungen im Bauwesen besser abzustimmen.

4.2.2 Glasarten für die Anwendung im Bauwesen

Die für die Anwendung im Bauwesen geregelten Glasarten und Glasprodukte werden in Deutschland in der Bauregelliste³² durch das Deutsche Institut für Bautechnik bekannt gegeben. In der Bauregelliste A Teil 1 werden unter der laufenden Nummer 11³³ die Bauprodukte aus Glas benannt.

²⁹ Vergleiche Wörner 2001 Seite 4 ff.

³⁰ Vergleiche Siebert 2001 Seite 10 ff.

³¹ Vergleiche TRLV 2006.

³² Vergleiche BRL 2010.

³³ Vergleiche BRL 2011 Seite 44-46.

Lfd. Nr.	Bauprodukt
11.10	Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronsilicatglas nach EN 572-9 - Floatglas - Poliertes Drahtglas - Ornamentglas - Drahtornamentglas - Profilbauglas für die Verwendung nach TRLV
11.11	Beschichtetes Glas nach EN 1096-4 für die Verwendung nach TRLV
11.12	Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas nach EN 12150-2 für die Verwendung nach TRLV
11.13	Heißgelagertes Kalknatron.-Einscheibensicherheitsglas (ESG-H)
11.14	Verbund-Sicherheitsglas mit PVB-Folie nach EN 14449 für die Verwendung nach TRLV
11.15	Verbundglas nach EN 14449 für die Verwendung nach TRLV
11.16	Mehrscheiben-Isolierglas nach EN 1279 für die Verwendung nach TRLV

Tafel 1

Auszug aus der Bauregelliste A Teil 1 – Ausgabe 2010/1

4.2.3 Thermisch vorgespanntes Glas

Thermisch vorgespanntes Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) ist ein geregeltes Bauprodukt nach der Bauregelliste und muss den Anforderungen der EN 12150 entsprechen. Teilvorgespanntes Glas (TVG) nach DIN EN 1863 ist kein geregeltes Bauprodukt nach Bauregelliste. Die Hersteller von TVG bedürfen für den Vertrieb ihres Produktes in Deutschland einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ). Die Ausgangsprodukte für ESG oder TVG können sein:

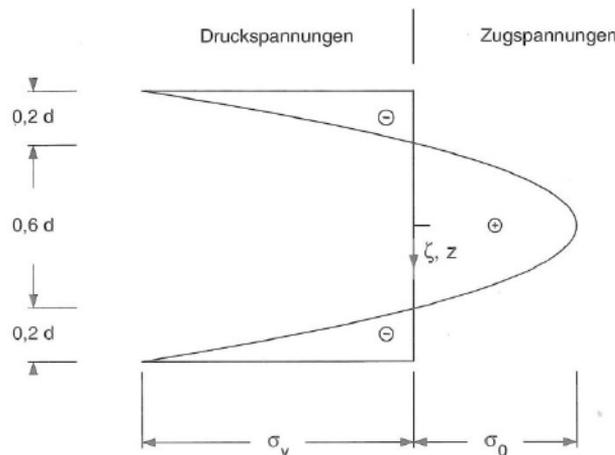
- Kalknatron-Glas nach EN 572-1
- Floatglas nach EN 572-2
- gezogenes Flachglas nach EN 572-4
- Ornamentglas nach EN 572-5
- beschichtetes Glas nach EN 1096-1

Hauptsächlich wird Floatglas für die Herstellung von ESG und TVG verwendet. Die Herstellung erfolgt durch nochmaliges Erhitzen des Basisglases bis zum Transformationspunkt von 650°C und anschließendes schnelles Abkühlen

mit Blasluft auf 150°C. Dadurch wird das Glas in einen Eigenspannungszustand versetzt³⁴. Dieser Eigenspannungszustand wird als thermisch eingeprägte Vorspannung bezeichnet. In diesem Eigenspannungszustand stehen die Glasoberflächen unter Druckspannung und der Kern der Glasscheibe unter Zugspannung. Der Spannungsverlauf über die Glasscheibendicke ist parabelförmig, wobei der Übergang von Druckspannung zu Zugspannung ausgehend von der Glasoberfläche bei 0,2 x Glasdicke (d) erfolgt. Ausführlichere Angaben zum Herstellungsprozess von thermisch vorgespanntem Glas und den physikalischen Hintergründen finden sich unter anderem in Laufs 2001³⁵.

Die Größe der eingepprägten Vorspannung ist von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Je schneller die Glasscheibe abgekühlt wird, desto höher ist die eingepprägte Vorspannung. Technologisch ist so eine Druckvorspannung an der Glasoberfläche von 200 MPa möglich³⁶. Aufgrund der enorm hohen Eigenfestigkeit von Glas im ungestörten Bereich³⁷ von 10.000 – 30.000 MPa sind die durch das Vorspannen eingepprägten Zugspannungen im inneren des Glases irrelevant. Bei der Angabe der Höhe der Vorspannung wird immer der zahlenmäßige Wert der Druckspannung an der Glasoberfläche angegeben, da dieser bemessungsrelevant ist.

Bild 36
Verlauf der thermisch eingepprägten Vorspannung über die Glasscheibendicke



³⁴ Vergleiche Wörner 2001, Seite 10.

³⁵ Vergleiche Laufs 2001, Seite 16 ff.

³⁶ Vergleiche Siebert 2001, Seite 58.

³⁷ Im Inneren der Glasscheibe.

Durch die eingeprägte Vorspannung wird die Eigenfestigkeit des Glases nicht verändert. Glas bricht, wenn die Glasoberfläche unter Zugbeanspruchung steht und ein kritisches Risswachstum stattfindet. Durch die eingeprägte Vorspannung steht die Oberfläche eines unbelasteten thermisch vorgespannten Glases planmäßig unter Druckspannung. Beim Aufbringen einer Zugbeanspruchung in das Glasbauteil muss erst die Druckspannungen abgebaut werden, bis eine Zugspannung an der Glasoberfläche auftritt.

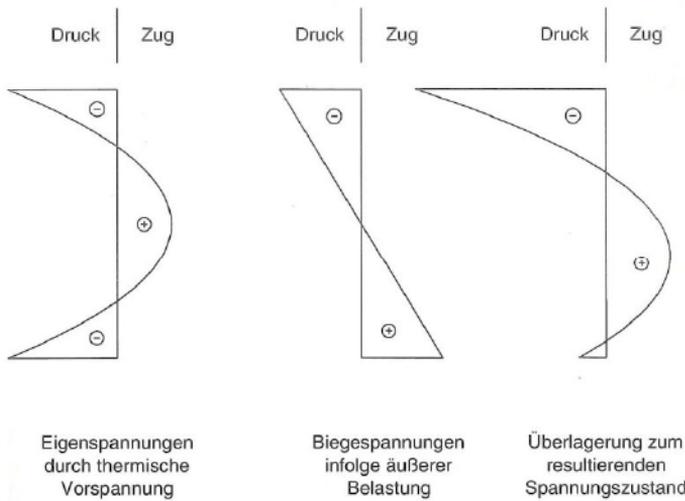


Bild 37
Überlagerung von thermisch eingepprägter Vorspannung mit einer Biegebeanspruchung infolge äußerer Belastung

Die resultierende Biegefestigkeit von thermisch vorgespanntem Glas ergibt sich somit aus der Summe der Beträge der eingepprägten Druckvorspannung an der Glasoberfläche und der Eigenfestigkeit des Glases an der Glasoberfläche. Nach EN 12150-1 wird für ESG aus Floatglas ein Mindestwert der charakteristischen Biegefestigkeit von 120 N/mm² gefordert. Für TVG liegt der Mindestwert der charakteristischen Biegefestigkeit nach DIN EN 1863-1 bei 70 N/mm². Die charakteristische Biegefestigkeit von Floatglas ohne thermische Vorspannung beträgt nach DIN EN 572-1 45 N/mm² und entspricht bei thermisch vorgespanntem Glas dem Anteil der Glaseigenfestigkeit.

Dass es sich bei einer Glasscheibe um ein thermisch vorgespanntes Glas handelt, lässt sich auf mehreren Wegen feststellen. Zunächst müssen alle zu ESG verarbeiteten Glasscheiben nach EN 12150 mit einem Stempelaufdruck als Übereinstimmungsnachweis versehen sein. Fehlt dieser Stempelaufdruck, so dürfen diese Gläser nicht als ESG nach

Bauregelliste verwendet werden. TVG muss einen Stempelaufdruck mit der Zulassungsnummer der abZ besitzen.

Qualitativ lässt sich am einfachsten durch einen Bruchversuch feststellen, ob eine Glasscheibe zu ESG vorgespannt wurde. Durch Anschlagen von ESG an einem beliebigen Punkt auf der Glasoberfläche mit einem spitzen und harten Gegenstand³⁸ zerfällt die gesamte Glasscheibe schlagartig in Bruchstücke mit einer Kantenlänge von etwa 10 mm. Diese Bruchstücke sind nicht scharfkantig, so dass eine geringe Schnittverletzungsgefahr besteht. Dies ist auch der Grund für die Bezeichnung von ESG als Sicherheitsglas. Bei TVG lässt sich die Vorspannung im Bruchversuch nicht so deutlich nachweisen, da die Bruchstücke ähnlich denen von nicht vorgespanntem Floatglas entsprechen. Ein Indiz dafür, dass es sich bei einer gebrochenen Scheibe um TVG handelt, findet man an den Rissausläufern am Scheibenrand. Ein auf den Scheibenrand zulaufender Riss teilt sich oft kurz vor dem Scheibenrand auf und läuft dann in einem flachen Winkel aus.

Zerstörungsfrei lässt sich eine thermische Vorspannung von Glas durch eine Betrachtung der Glasscheibe mittels zweier Polfilter nachweisen. Hierzu wird die Glasscheibe vom Betrachter aus gesehen zwischen zwei Polfilter gestellt. Dabei werden im Bereich der Glaskanten und noch deutlicher im Bereich der Glasecken durch die Lichtbrechung Isochromaten sichtbar. Durch Verwendung eines entsprechenden Messgerätes³⁹ lässt sich mit diesem Verfahren die Höhe der eingepprägten Druckvorspannung im Bereich von Glaskanten und Bohrungen auch zahlenmäßig bestimmen.

³⁸ Zum Beispiel ein Körner oder Nothammer.

³⁹ Zum Beispiel dem "Sharples edge stress meter".



Bild 38
Isochromaten einer ESG
Scheibe bei Betrachtung
mittels zweier Polfilter

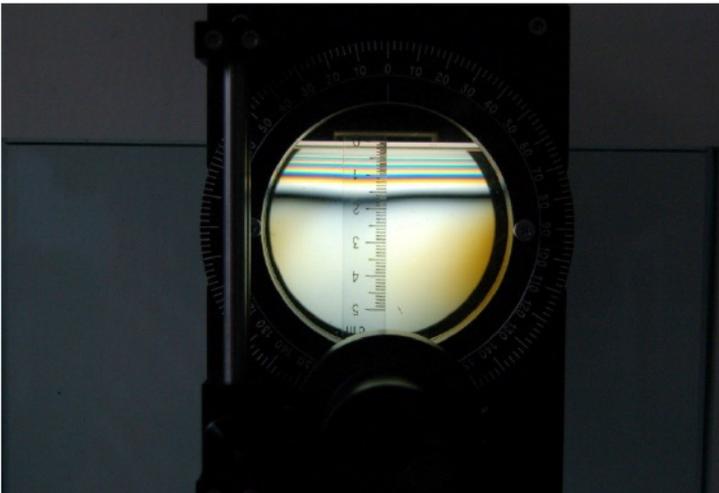


Bild 39
Isochromaten im Bereich
der Scheibenkante bei
Betrachtung durch das
"Sharples edge stress
meter"

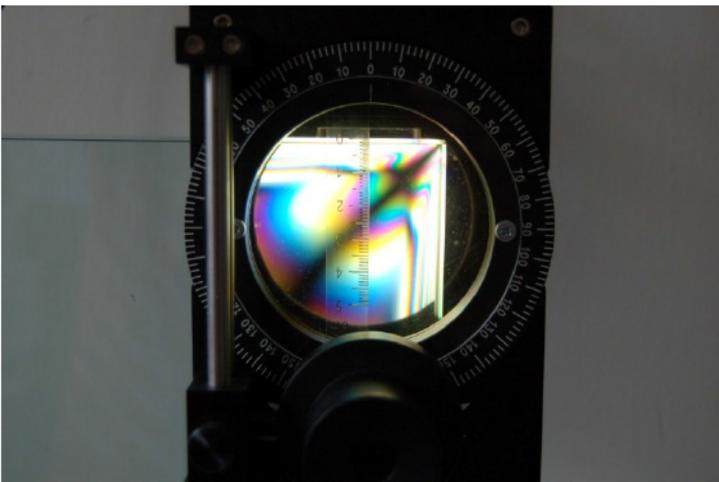


Bild 40
Isochromaten im Eckbereich
einer ESG-Scheibe bei
Betrachtung durch das
"Sharples edge stress
meter"

Ein weiteres zerstörungsfreies Messverfahren zur quantitativen Bestimmung der eingepprägten Druckvorspannung ist das Streulichtmessverfahren⁴⁰. Mit Hilfe dieses Verfahrens kann der Spannungsverlauf der thermisch eingepprägten Vorspannung über die gesamte Glasscheibendicke ermittelt werden. Ein Messgerät, welches auf diesem Verfahren beruht, ist das "SCALP-03" der Firma GlasStress Ltd.

Das im Rahmen von Erstprüfungen und werkseigenen Produktionskontrollen eingesetzte Prüfverfahren zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Floatglas, ESG und TVG ist der Vierpunkt-Biegeversuch nach DIN EN 1288-3. In diesem Versuch werden Glasscheiben 360 mm x 1100 mm mittig über zwei Biegerollen mit einem Achsabstand von 200 mm und zwei Auflagerrollen im Achsabstand von 1000 mm um die schwache Achse bis zum Bruch belastet. Mit der im Versuch ermittelten maximalen Bruchkraft, dem Eigengewicht der Glasscheibe und den vor dem Versuch gemessenen Scheibenabmessungen wird die maximale Zugspannung an der Glasoberfläche zum Zeitpunkt des Bruches berechnet. Dieser Wert wird dann als Biegezugfestigkeit unter Einschluss der Kantenfestigkeit angegeben. Die Erweiterung unter Einschluss der Kantenfestigkeit ist hier wichtig, da allgemein angenommen wird, dass die geringste Glasfestigkeit an der Kante einer Scheibe vorliegt und ein Riss dort seinen Ursprung hat. Für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit in der Scheibenfläche stehen der große und der kleine Doppelringbiegeversuch nach DIN EN 1288-Teil 2 bzw. DIN EN 1288-Teil 5 zur Verfügung, die aber aufgrund der hohen Streuungen beim kleinen Doppelringbiegeversuch und einer aufwendigen Prüftechnik beim großen Doppelringbiegeversuch nur selten herangezogen werden, zumal die Biegezugfestigkeit in der Scheibenfläche baupraktisch eher selten relevant ist.

4.2.4 Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas

Für die Herstellung von Verbundglas (VG) und Verbund-Sicherheitsglas (VSG) werden mindestens zwei Glasscheiben über eine Zwischenschicht zu einem Verbundquerschnitt zusammengefügt. Die Zwischenschicht dient als eine Art Klebschicht zwischen den Glasscheiben und soll diese

⁴⁰ Vergleiche Laufs 2001, Seite 64 – 66.

dauerhaft miteinander verbinden. Die Unterscheidung zwischen VG und VSG erfolgt über die verwendete Zwischenschicht. Für VSG müssen elastische, reißfeste Hochpolymerfolien verwendet werden⁴¹. Nach Bauregelliste sind für VSG Poly-Vinyl-Butyral-Folien (PVB-Folien) zu verwenden. Über Einzelzulassungen haben sich aber weitere Folien zur Herstellung von VSG am Markt etabliert. Alle mit anderen Zwischenschichten verbundenen Gläser tragen die Bezeichnung VG. Normative Regelungen zu VG und VSG finden sich in DIN EN 14449 und DIN EN ISO 12543.

Durch die Verarbeitung von Glas zu VSG lässt sich vor allem das Resttragverhalten von Glasscheiben sicherstellen. Bricht eine monolithische Glasscheibe, so weist diese nach dem Bruch keinerlei Tragfähigkeit mehr auf. Die Bruchstücke fallen ungehindert heraus und stellen ein erhebliches Verletzungsrisiko dar. Durch die Verbindung zweier Glasscheiben über die reißfeste PVB-Folie wird dieses Risiko fast vollständig reduziert. Selbst beim Bruch aller Einzelschichten eines VSG werden die Bruchstücke über die Folie zusammengehalten. Wird zur Herstellung von VSG Floatglas oder TVG verwendet, so weisen die Gläser aufgrund des grobscholligen Bruchbildes auch nach dem Bruch noch eine beachtliche Tragfähigkeit auf.

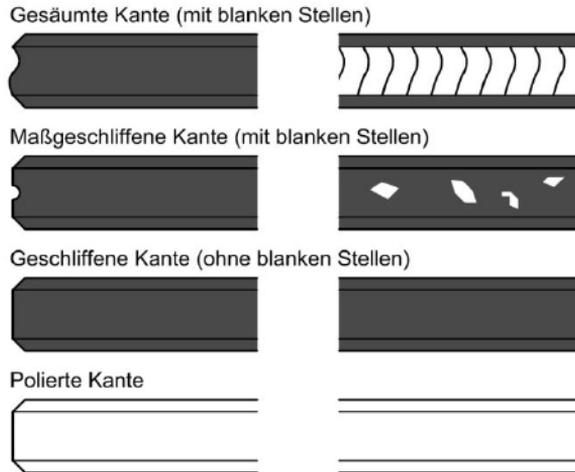
Die zu VG oder VSG verarbeiteten Gläser sind Verbundquerschnitte, deren Verbundwirkung derzeit bei den statischen Nachweisen, zumindest für Bauvorhaben in Deutschland, nicht angesetzt werden darf. Dies liegt vor allem am ungünstigen Materialverhalten der PVB-Folien bei Temperaturen oberhalb von 50°C und dem Kriechverhalten der PVB-Folie unter Langzeitbelastung.

4.2.5 Qualität der Glaskanten

Bei der Bearbeitung der Glaskanten wird nach DIN EN 12150-1 in vier Qualitätsstufen unterschieden. Die Kanten von thermisch vorgespanntem Glas müssen mindestens der Güte "gesäumte Kante" entsprechen.

⁴¹ Vergleiche Wörner 2001, Seite 16.

Bild 41
Qualitätsstufen der Kantenbearbeitung nach DIN EN 12150-1



Die DIN EN 12150-1 ist im November 2000 eingeführt worden und ersetzte die bis dahin gültigen Teile der DIN 1249. Im Unterschied zur DIN EN 12150-1 erfolgte in DIN 1249-11 die Benennung von fünf Qualitätsstufen der Kantenbearbeitung, wobei die zusätzliche Qualitätsstufe die "gebrochene Kante" darstellt, so wie sie nach dem Zuschnitt der Gläser entsteht. Des Weiteren wurden für die Kantenqualität Kurzzeichen deklariert, die hier der Vollständigkeit halber benannt werden und immer noch weit verbreitet sind, obwohl DIN EN 12150-1 diese nicht mehr vorsieht.

Tafel 2
Kurzzeichen der Kantenqualitätsstufen nach DIN 1249-11

Benennung	Kurzzeichen
Gebrochene Kante	KG
Gesäumte Kante	KGS
Maßgeschliffene Kante	KMG
Geschliffene Kante	KGN
Polierte Kante	KPO

4.2.6 Bemessungsverfahren im Glasbau

Die theoretische Festigkeit von Kalknatron-Silicatglas liegt im Bereich von 10.000 N/mm^2 - 30.000 N/mm^2 ⁴². Dieser theoretische Wert ist aber aufgrund des spröden Bruchverhaltens von Glas nicht nutzbar. Die effektive Festigkeit von Glas wird durch seine Oberflächenqualität bestimmt und ist in eigentlichem Sinn keine feste Materialkonstante. Mikro-

⁴² Vergleiche Siebert 2001, Seite 19.

skopisch kleine Risse und Kerben an der Glasoberfläche sind Ausgangspunkte für den spröden Bruch des Glases. Wird die Oberfläche von Glas unter Zugbeanspruchung gestellt, weiten sich Risse und Oberflächendefekte auf. Bei Überschreiten einer kritischen Rissausbreitungsgeschwindigkeit kommt es zum spontanen Bruch des Glases⁴³. Diese Stelle des Bruchsprunges muss nicht zwangsläufig an der Stelle der höchsten lokalen Zugbeanspruchung liegen, sondern an einem Punkt ungünstiger Überlagerung tiefer Oberflächendefekte mit einer Zugbeanspruchung. Vereinfacht lässt sich festhalten, je größer die Oberflächenschädigungen des Glases sind, desto geringer ist die effektiv vorhandene Zugfestigkeit. Für die Bemessung von Glas hat man sich auf Biegezugfestigkeiten festgelegt, die unter definierten Oberflächendefekten und Bearbeitungsqualitäten der Glaskante im Biegeversuch nach DIN EN 1288 ermittelt wurden. Der Wert der Biegezugfestigkeit wird mit einer 5%-igen Bruchwahrscheinlichkeit in einem Vertrauensbereich von 95% analytisch aus den Belastungen bestimmt, die zum Bruch der Proben führten.

Die Festlegungen zu den charakteristischen Biegezugfestigkeiten von Glas im Bauwesen finden sich in den einschlägigen Normen.

Glasart	charakt. Biegezugfestigkeit	zugehörige Norm
Floatglas	45 N/mm ²	EN 572-1: 2004, Tabelle 1
TVG aus Floatglas	70 N/mm ²	EN 1863-1: 2000, Tabelle 5
ESG aus Floatglas	120 N/mm ²	EN 12150-1: 2000, Tabelle 6

Tafel 3

Charakteristische Biegezugfestigkeit für Floatglas, TVG und ESG nach den Normen

⁴³ Vergleiche Siebert 2001, Seite 22.

Bemessung nach TRLV

Bis zur Einführung der DIN 18008 erfolgt die Bemessung von Glas im Bauwesen über die Technischen Richtlinien für linienförmig gelagerte Verglasungen (TRLV) nach dem Prinzip der zulässigen Biegezugspannungen. Dabei wird eine Unterscheidung nach der Einbaulage der Verglasung und somit der primären Tragwirkung als Platte oder Scheibe vorgenommen.

Tafel 4

Auszug aus Tabelle 2 der TRLV 08/2006, zulässige Biegezugspannungen

Glassorte	Überkopfverglasung	Vertikalverglasung
ESG aus SPG(Floatglas)	50 N/mm ²	50 N/mm ²
SPG(Floatglas)	12 N/mm ²	18 N/mm ²
VSG aus SPG(Floatglas)	15 N/mm ²	22,5 N/mm ²

Ausgehend von den charakteristischen Biegezugfestigkeiten der Glasarten nach Tafel 3 beträgt der globale Sicherheitsfaktor für ESG = 2,4. Für Floatglas wird je nach Verwendungsart ein globaler Sicherheitsfaktor von 2,0 bis 3,75 angewandt. Durch die Unterscheidung in Scheiben- und Plattentragwirkung wird indirekt der Einfluss der verringerten Festigkeit an der Glaskante berücksichtigt. Der Bemessungsnachweis erfolgte als Vergleich der charakteristischen Einwirkungen mit den zulässigen Biegezugspannungen. Die Herstellung, Verwendung und Bemessung von TVG wird über die entsprechende allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Herstellers geregelt. In Anlehnung an die TRLV werden die zulässigen Biegezugspannungen von TVG bei Anwendung als Vertikal- oder Überkopfverglasung mit 29 N/mm² angegeben.

Bemessung nach DIN 18008

Durch die DIN 18008 wird nun auch im Glasbau ein Bemessungskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten eingeführt. Die Bemessung erfolgt als Nachweis:

$$E_d \leq R_d$$

Gleichung 1

mit E_d : Bemessungswert einer Einwirkung nach DIN 1055-100
 R_d : Bemessungswert des Tragwiderstandes

Bei der Ermittlung des Bemessungswertes für den Tragwiderstand wird danach unterschieden, ob es sich um ein vorgespanntes oder nicht vorgespanntes Glasprodukt handelt.

Bestimmung des Bemessungswertes für den Tragwiderstand bei Gläsern ohne thermische Vorspannung:

$$R_d = \frac{k_{mod} \cdot k_c \cdot f_k}{\gamma_m}$$

Gleichung 2

mit γ_m : Materialsicherheitsbeiwert $\gamma_m = 1,8$
 k_{mod} : Lastfaktor für die Berücksichtigung der Einwirkungsdauer
 k_c : Beiwert zur Berücksichtigung der Art der Konstruktion⁴⁴, bei linienförmig gelagerten Verglasungen $k_c = 1,8$ sonst $k_c = 1,0$
 f_k : charakteristischer Wert der Biegezugfestigkeit (Vergleiche Tafel 3)

Einwirkungsdauer	Beispiel	k_{mod}
lang	Eigengewicht	0,25
mittel	Schnee	0,40
kurz	Wind	0,70

Tafel 5
 Modifikationsbeiwert k_{mod}
 nach DIN 18008-1, Tabelle 6

⁴⁴ Vergleiche DIN 18008 Teile 2 bis 7.

Bestimmung des Bemessungswertes für den Tragwiderstand bei Gläsern mit thermischer Vorspannung:

Gleichung 3

$$R_d = \frac{k_c \cdot f_k}{\gamma_m}$$

- mit γ_m : Materialsicherheitsbeiwert $\gamma_m = 1,5$
 k_c : Beiwert zur Berücksichtigung der Art der Konstruktion, für thermisch vorgespannte Gläser $k_c = 1,0$
 f_k : charakteristischer Wert der Biegezugfestigkeit (vergleiche Tafel 3)

Bemessungswerte des Tragwiderstandes von Glasbauteilen nach DIN 18008⁴⁵

Tafel 6
Bemessungswerte des Tragwiderstandes R_d nach DIN 18008

Einwirkungs- dauer	Floatglas linienförmig gelagert	Floatglas nicht linien- förmig gelagert	TVG	ESG
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
lang	11,25	6,25	46,6	80
mittel	18	10	46,6	80
kurz	31,5	17,5	46,6	80

Bei der Verwendung von VSG oder VG darf der Bemessungswert des Tragwiderstandes pauschal um 10% erhöht werden⁴⁶.

⁴⁵ Die Angaben beruhen auf einem Normungsstand, bei dem nur die Teile 1 und 2 der DIN 18008 als Weißdruck und die Normenteile 3 bis 5 in der Entwurfsfassung vorlagen. Die Entwürfe der Normenteile 3 bis 5 enthielten zu dem Zeitpunkt aber keine ergänzenden Angaben zum Beiwert k_c . Insofern ist es möglich, dass es hier zu einem späteren Zeitpunkt eine Änderung gibt. Denkbar wäre dies vor allem bei der Ermittlung des Bemessungswertes für den Tragwiderstand von punktgehaltenen Gläsern mit thermischer Vorspannung, vor dem Hintergrund, dass im Bohrungsbereich nicht die volle Vorspannung aufgebaut wird und die maximalen Spannungen bei punktgehaltenen Gläsern zumeist im Lochleibungsbereich auftreten.

⁴⁶ Vergleiche DIN 18008-1, Abschnitt 8.3.9.

Vorschlag eines Bemessungskonzeptes für thermisch vorgespanntes Glas durch Laufs

In den Bemessungsverfahren nach TRLV und DIN 18008 wird für die gesamte Glasoberfläche ein konstanter Tragwiderstand des Glases angenommen. Untersuchungen von Laufs⁴⁷ zeigen aber, dass innerhalb einer Glasscheibe die Glaseigenfestigkeiten und Vorspannungswerte variieren. Daher nimmt Laufs eine Einteilung der Glasscheibe in vier für eine Bemessung relevante Zonen vor.

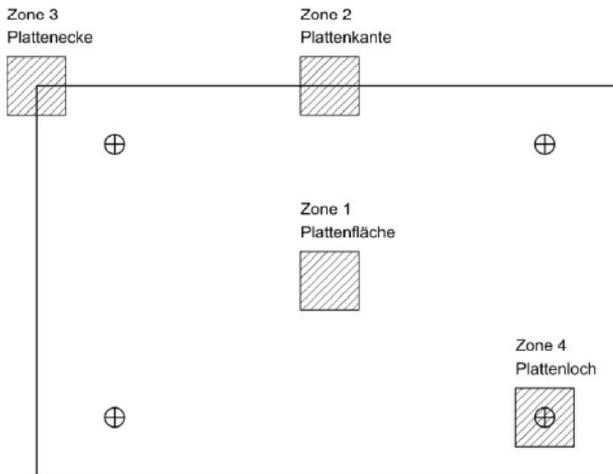


Bild 42
Einteilung Glasscheibe in Zonen nach Laufs 2001, Bild 1.4

Durch Spannungsoptische Messverfahren und Biegeversuche in Anlehnung an die in DIN EN 1288 beschriebenen Versuchsaufbauten wurden für die Zonen 1 bis 4 die Werte der Glaseigenfestigkeit und die eingprägten thermischen Vorspannungen bestimmt. In folgender Tafel sind die Ergebnisse⁴⁸ für die Zonen 1 bis 4 zusammengefasst.

⁴⁷ Vergleiche Laufs 2000

⁴⁸ Vergleiche Laufs 2001, Seite 112 ff, Tabelle 6.9 bis 6.12

Zone	Glaseigenfestigkeit	Vorspannung TVG	Vorspannung ESG
Zone 1	51,1 N/mm ²	32,4 N/mm ²	87,2 N/mm ²
Zone 2			
Biegung um schwache Achse	45,4 N/mm ²	49,3 N/mm ²	75,3 N/mm ²
Zone 2			
Biegung um starke Achse	22,7 N/mm ²	45,6 N/mm ²	65,4 N/mm ²
Zone 3			
Biegung um schwache Achse	45 N/mm ²	–	–
Zone 3			
Biegung um starke Achse	22 N/mm ²	–	–
Zone 4			
Biegung um schwache Achse	39 N/mm ²	42 N/mm ²	68,1 N/mm ²
Zone 4			
Biegung um starke Achse	29 N/mm ²	37 N/mm ²	58,1 N/mm ²

Tafel 7

5% Fraktile der Glaseigenfestigkeit bzw. der thermisch eingepprägten Vorspannung nach I aufs

Auffällig sind hier besonders die Werte der Glaseigenfestigkeit bei Biegung um die starke Achse in Zone 2 und Zone 4. Die Werte liegen mit 22,7 N/mm² bzw. 29,0 N/mm² deutlich unter der in DIN 572-1 geforderten charakteristischen Biegezugfestigkeit von 45 N/mm². Der Grund hierfür liegt zweifelsfrei in der Qualität der Kantenbearbeitung der Bohrlöcher und Glaskanten. Für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit um die schwache Achse im Vierpunkt-Biegeverfahren nach DIN 1288-3 wird für die Prüfkörper eine gebrochene und gesäumte Kantenbearbeitung gefordert. Diese entspricht den Minimalforderungen an die Güte der Kantenbearbeitung einer thermisch vorgespannten Glasscheibe. Über die Güte der Kantenbearbeitung der untersuchten Gläser finden sich in der Arbeit von Laufs keine Angaben. Vergleichbare Untersuchungen am Institut für Baukonstruktion der Technischen Universität Dresden, bei denen die Kantenfestigkeit von Gläsern unterschiedlicher Güten der Kantenbearbeitung geprüft wurden, zeigen für die gesäumte Kante eine gute Übereinstimmung mit den von Laufs ermittelten Werten. Die Versuche zeigten aber auch, dass die Biegezugfestigkeit von Gläsern mit plangeschliffenen Kanten deutlich über den geforderten 45 N/mm² liegen.

Im Ergebnis seiner Arbeit stellt Laufs ein Bemessungskonzept auf Grundlage von Teilsicherheitsbeiwerten vor. Zur Ermittlung des Bemessungswertes des Tragwiderstandes werden die Teilsicherheitsbeiwerte nach Beanspruchungsart⁴⁹ und der jeweiligen Zone unterschieden. Als charakteristische Festigkeitsgrößen werden die Werte aus Tafel 8 herangezogen.

Zone	Floatglas		TVG		ESG	
	$R_{Mk,i}/\gamma_{M,i}$		$R_{Mk,i}/\gamma_{M,i} + R_{Vk,i}/\gamma_{V,i}$		$R_{Mk,i}/\gamma_{M,i} + R_{Vk,i}/\gamma_{V,i}$	
	Plattenbeanspruchung	Scheibenbeanspruchung	Plattenbeanspruchung	Scheibenbeanspruchung	Plattenbeanspruchung	Scheibenbeanspruchung
Zone 1	45/1,50 = 30	45/1,50 = 30	45/1,50 + 30/1,50 = 50	45/1,50 + 30/1,50 = 50	45/1,50 + 84/1,20 = 100	45/1,50 + 84/1,20 = 100
Zone 2	45/1,80 = 25	22/1,50 = 15	45/1,80 43/1,70 = 50	22/1,50 45/1,20 = 53	45/1,80 75/1,15 = 90	22/1,50 63/1,20 = 67
Zone 3	45/2,40 = 19	22/2,40 = 9	45/2,40 + 0 = 19	22/2,40 + 0 = 9	45/3,00 + 0 = 15	22/3,00 + 0 = 7
Zone 4	35/1,40 = 25	25/1,70 = 15	35/1,40 + 40/1,60 = 50	25/1,70 + 37/1,50 = 39	35/1,40 + 68/1,50 = 70	25/1,70 + 57/1,60 = 50

Tafel 8

Charakteristische Festigkeitsgrößen, Teilsicherheitswerte und Bemessungswerte des Tragwiderstandes in N/mm² nach Laufs⁵⁰

⁴⁹ Platten- oder Scheibenbeanspruchung

⁵⁰ Vergleiche Laufs 2000, Seite 128 ff, Tabelle 7.2, Tabelle 7.3, Tabelle 7.6

4.3 Materialien für Klotzungsstrukturen

4.3.1 Allgemeine Anforderungen

An die Materialien einer Klotzung, die zur Übertragung hoher Lasten in die Glaskante genutzt wird, werden besondere Anforderungen gestellt. Die Auswahl geeigneter Materialien ist maßgebend für die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit einer Klotzung. Die Klotzungsstrukturen können dabei aus mehreren Bauteilen bestehen. Das Material des Bauteils, welches in direktem Kontakt zur Glaskante steht, wird im Weiteren als Kontaktmaterial bezeichnet. Im konstruktiven Glasbau gilt der Grundsatz stets einen Glas-Metall-Kontakt zu verhindern. Neben den Metallen ist dieser Grundsatz aber auf alle Materialien erweiterbar, welche im Kontakt mit Glas aufgrund ihrer Oberflächenhärte eine Beschädigung in der Glasoberfläche hervorrufen können.

Anforderungen an das Kontaktmaterial:

- hohe Druckfestigkeit
- hohe Steifigkeit
- möglichst konstante Materialeigenschaften im Einsatztemperaturbereich von -20°C bis + 80°C
- deutlich geringere Oberflächenhärte als Glas
- geringe Kriechneigung unter Dauerlast
- geringer Reibungskoeffizient im Kontakt zu Glas
- Alterungsbeständigkeit (UV-Stabilität)
- Beständigkeit gegen Reinigungsmittel
- Korrosionsbeständigkeit
- Materialverträglichkeit zu im Glasbau verwendeten Kunststoffen (z. B. PVB-Folien, Randverbundsystemen)
- gute Be- und Verarbeitbarkeit für die Formgebung

Die Auswahl geeigneter Materialien, die alle gestellten Anforderungen optimal erfüllen, stellt den Ingenieur vor eine anspruchsvolle Aufgabe.

4.3.2 Kunststoffe

Das folgende Kapitel stellt einen kurzen Überblick über die Kunststoffe dar, an das aber nicht der Anspruch der Vollständigkeit gestellt wird. Genauere Ausführungen zum Aufbau, der Herstellung und der Verarbeitung von Kunststoffen finden sich unter anderem in Dominghaus 2005, Ehrenstein 1999, Kaiser 2006 und Schwarz 2007.

Kunststoffe sind Polymere und bestehen aus zu Makromolekülen verketteten bzw. verzweigten Monomeren/Molekülen. Der Wortstamm "Kunst" verdeutlicht, dass diese Stoffe synthetisch hergestellt werden. Innerhalb eines Makromoleküls sind laut Definition mindestens 1000 Atome gebunden. Die einfachste Form eines Makromoleküls ist die lineare Aneinanderreihung bzw. die lineare Verkettung von Molekülen. Weitere Hauptformen sind verzweigte Makromoleküle und vernetzte Makromoleküle. Die chemische Reaktion, die zur Bildung dieser Makromoleküle führt, trägt den Oberbegriff Polymerisation. Die Einteilung der Kunststoffe erfolgt nach ihren Eigenschaften und Vernetzungsarten in Thermoplaste, Elastomere, thermoplastische Elastomere und Duroplaste.⁵¹

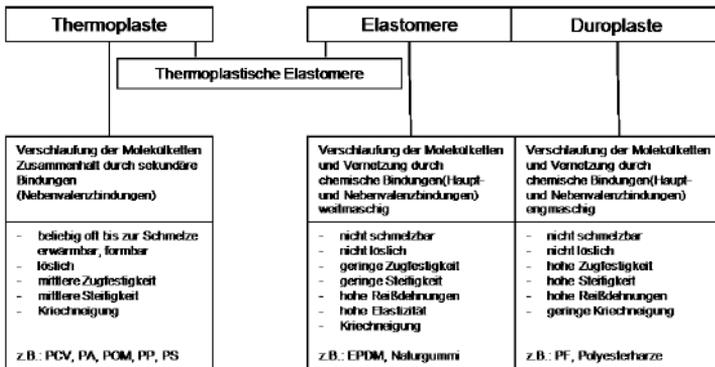


Bild 43
Einteilung der Kunststoffe

Quellen:
Dominghaus 2005,
Kaiser 2006,
Ehrenstein 1999.

Thermoplaste

Thermoplaste sind nicht vernetzte Kunststoffe, die aus linearen oder verzweigten Makromolekülen bestehen. Der Zusammenhalt der Makromoleküle erfolgt über physikalische Bindungen⁵² und durch Verschlaufung der Makromolekülketten. Diese Struktur ist maßgebend für die Eigenschaften von

⁵¹ Vergleiche Dominghaus 2005, Seite. 3 ff; Kaiser 2006, Seite 28 ff; Ehrenstein 1999 Seite 12 ff.

⁵² Auch Sekundär- oder Nebenvalenzbindungen.

Thermoplasten. Durch Zufuhr von Wärme, Lösungsmitteln und mechanischen Kräften lassen sich die in Knäuel-Form angeordneten und miteinander verschlaufte Makromoleküle strecken, wodurch die physikalischen Bindungen gelöst werden. Bei Abkühlung läuft der Prozess umgekehrt ab. Der Vorgang des Formbarmachens ist durch Erhitzen bis zum Schmelzpunkt beliebig oft wiederholbar. Die mechanischen Eigenschaften der Thermoplaste wie Zug-/Druckfestigkeit und Steifigkeit sind stark temperaturabhängig.⁵³

Elastomere

Elastomere sind weitmaschig vernetzte und zusätzlich verschlaufte Makromoleküle, deren Eigenschaften durch die chemischen Bindungen⁵⁴ bestimmt werden. Nach der chemischen Vernetzung der Makromoleküle sind diese nicht mehr löslich. Oberhalb der Glasübergangstemperatur sind Bewegungen der Kettensegmente möglich. Bei Raumtemperatur weisen die meisten Elastomere ein gummiartiges Verhalten auf. Ein plastischer Zustand kann durch Vorhandensein der chemischen Bindungen bzw. der Vernetzung nicht erreicht werden. Die mechanischen Eigenschaften sind von hohen Reißdehnungen und geringen Steifigkeiten geprägt.⁵⁵

Duroplaste

Duroplaste sind durch die Reaktion mehrerer Komponenten entstehende, engmaschig vernetzte und zusätzlich verschlaufte Makromoleküle. Die mechanischen Eigenschaften werden maßgeblich von den engmaschigen, chemischen Bindungen bestimmt. Physikalische Bindungen haben nur einen geringen Einfluss auf das Materialverhalten. Nach der Vernetzung sind die chemischen Bindungen nicht mehr lösbar. Bei Raumtemperatur weisen Duroplaste eine hohe Festigkeit und Steifigkeit auf. Im Unterschied zu den Thermoplasten und Elastomere zeigen Duroplaste ein deutlich geringeres Kriechverhalten.⁵⁶

⁵³ Vergleiche Domininghaus 2005, Seite 5; Kaiser 2006, Seite 103 ff; Ehrenstein 1999, Seite 14.

⁵⁴ Auch Hauptvalenzbindungen.

⁵⁵ Vergleiche Domininghaus, 2005 Seite 6 ff; Kaiser 2006, Seite 105 ff; Ehrenstein 1999 Seite, 14 ff.

⁵⁶ Vergleiche Domininghaus 2005, Seite 8 ff; Kaiser 2006, Seite 105 ff; Ehrenstein 1999, Seite 14.

Polymerisation

Polymerisation ist der Oberbegriff für die chemische Reaktion von einzelnen Molekülen/Monomeren zu Makromolekülen und wird in Kettenpolymerisation⁵⁷, Kondensationspolymerisation⁵⁸ und Additionspolymerisation⁵⁹ unterschieden. Bei der Kettenpolymerisation werden Doppelbindungen von reaktionsfähigen Monomeren durch Zugabe von Katalysatoren aufgespalten. Durch die dabei entstehenden freien Valenzen verbinden sich mehrere Monomere in einer Kette zu einem Makromolekül.⁶⁰

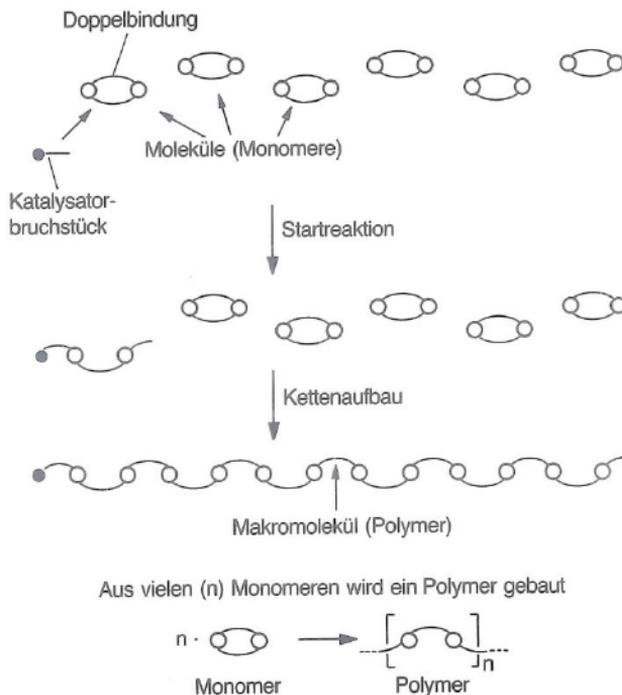


Bild 44

Modellbeispiel einer Kettenpolymerisation nach Schwarz 2007, S. 27

Der Index n wird als Polymerisationsgrad bezeichnet und gibt die Anzahl von Monomeren an die in einer Molekülkette gebunden sind. Das in der Literatur häufig verwendet Beispiel für eine solche Kettenpolymerisation ist die Reaktion von Ethylen zu Polyethylen.

⁵⁷ auch Polymerisation

⁵⁸ auch Polykondensation

⁵⁹ auch Polyaddition

⁶⁰ Vergleiche Schwarz 2007, Seite 26 ff; Ehrenstein 1999, Seite 38 ff.

Valenzen führen zu einer Verknüpfung der beiden Monomere.⁶⁶

Bindungskräfte

Die mechanischen Werkstoffeigenschaften von Kunststoffen, wie Zugfestigkeit, Steifigkeit oder Dehnbarkeit werden durch die Bindungskräfte im makromolekularen System bestimmt. Diese unterteilen sich in Hauptvalenzbindungen und Nebervalenzbindungen. Hauptvalenzbindungen beschreiben die Bindungskräfte innerhalb eines Makromoleküls von Atom zu Atom. Sie sind chemische Bindungen und somit für den inneren Zusammenhalt der Makromoleküle verantwortlich. Die Bindungsenergie der chemischen Bindungen beträgt 40-800 kJ/mol. Bei thermoplastischen Verarbeitungsvorgängen bleiben die Hauptvalenzbindungen in voller Stärke erhalten. Erst durch weiteres Erhitzen bis zur Zersetzungstemperatur werden die chemischen Bindungen gelöst. Nebervalenzbindungen beschreiben die Anziehungskräfte zwischen einzelnen Makromolekülen und werden auch als physikalische Bindungen bezeichnet. Die Höhe der Bindungsenergie hängt maßgeblich vom räumlichen Abstand der Makromoleküle zueinander ab. Vereinfacht kann gesagt werden, je geringer der Abstand zwischen den Makromolekülketten ist, desto höher ist die Bindungskraft. Die Bindungsenergie der Nebervalenzbindungen beträgt 2-20 kJ/mol.⁶⁷

Klassische im Glasbau eingesetzte Elastomere wie EPDM oder Silikon sind als Klotzungsmaterial ungeeignet. Aufgrund des gummielastischen Verhaltens sind die Materialien unter einaxialer Druckbeanspruchung immer bestrebt der Belastung durch hohe Verformungen auszuweichen⁶⁸. In einem begrenzten Kraftbereich ist es zwar möglich Lasten unbeschadet in die Kanten von Glasscheiben einzutragen, dies geht aber immer mit starken Verformungen im Klotzungsmaterial einher. Elastomere scheiden daher aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit für den Einsatz als Klotzungsmaterial aus.

⁶⁶ Vergleiche Kaiser 2006, Seite 54 ff; Schwarz 2007, Seite 32 ff; Ehrenstein 1999, Seite 46 ff.

⁶⁷ Vergleiche Ehrenstein 1999, Seite 29 ff; Kaiser 2006, Seite 59 ff; Schwarz 2007, Seite 35 ff.

⁶⁸ Hohe Stauchung in Druckkraftrichtung, hohe Querdehnungen.

Im Gegensatz zu den Elastomeren sind die Duroplaste aufgrund der hohen Festigkeit und Steifigkeit besonders gut als Klotzungsmaterial geeignet. Duroplaste werden durch Zugabe von Härtern und Zusatzstoffen aus Reaktionsharzen als fertige Formteile hergestellt. Dieser Fertigungsprozess ist zeitaufwendig und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten erst bei sehr hohen zu fertigenden Stückzahlen rentabel.

Aus der Vielzahl von am Markt verfügbaren Thermoplasten gibt es eine überschaubare Menge an Kunststoffen, deren Eignung als Klotzungsmaterial bei Betrachtung der Materialkennwerte möglich erscheint. Technische Thermoplaste sind am Markt meist als Formteil⁶⁹ oder aber als Halbzeug⁷⁰ verfügbar und sind somit wirtschaftlich für Groß- und Kleinserien geeignet.

4.3.3 Kurzfaserverstärkte Thermoplaste

Die Materialeigenschaften von Thermoplasten können durch Zugabe von bis zu 60% Verstärkungsfasern⁷¹ gezielt verändert und somit den an das Material gestellten Anforderungen angepasst werden. Kurzfaserverstärkte Thermoplaste zählen aber nicht zu den Faserverbundwerkstoffen, obwohl sie in vielerlei Hinsicht vergleichbare Eigenschaften aufweisen.⁷²

Durch die Zugabe oder besser der Einbettung der Verstärkungsfasern in die Polymermatrix werden die Steifigkeit, Festigkeit und die Kriechneigung gegenüber dem unverstärkten Polymer verbessert.⁷³ Voraussetzung dafür ist, dass die Verstärkungsfasern eine höhere Festigkeit und Steifigkeit als die Polymermatrix aufweisen und zwischen Polymermatrix und Verstärkungsfasern ein ausreichender Verbund besteht. Bei Erfüllung dieser Voraussetzungen erfolgt eine Kräfteinleitung von der Polymermatrix in die Verstärkungsfasern über Schubkräfte.⁷⁴ Der Grenzfläche zwischen

⁶⁹ Im Gieß- bzw. Spritzgießverfahren hergestellt, für hohe Stückzahlen geeignet.

⁷⁰ Halbzeuge sind Platten oder Profile als Rohteil für die weitere Bearbeitung zum Endprodukt durch spanabhebende Bearbeitung (Sägen, Bohren, Fräsen, Drehen).

⁷¹ Glasfasern, Kohlenstofffasern, Stahlfasern.

⁷² Vergleiche Schürmann 2007, Seite 150-151.

⁷³ Vergleiche Erhard 2008, Seite 103.

⁷⁴ Vergleiche Erhard 2008, Seite 56-57.

Faser und Polymermatrix und damit dem wirksamen Verbund kommt eine hohe Bedeutung zu, da durch diese das Versagensverhalten und somit auch die nutzbare Festigkeit und Steifigkeit bestimmt wird.

Matrix

Als Matrix wird das Polymer bezeichnet, welches durch die Zugabe der Verstärkungsfasern verändert wird. Die Matrix übernimmt in dem Faser-Kunststoff-Verbund folgende Aufgaben:⁷⁵

- Fixieren der Fasern
- Verbindungsglied zwischen den Fasern
- Übertragung mechanischer Lasten quer zur Faserrichtung
- Stützung der Fasern bei Druckbeanspruchung
- Schutz der Fasern vor Umgebungseinflüssen

Die Verwendung von Thermoplasten als Matrix ist gegenüber der Verwendung von Duromeren verfahrenstechnisch schwieriger. Dies liegt vor allem an der höheren Viskosität und den hohen Verarbeitungstemperaturen der Thermoplaste. Die Verarbeitung der Thermoplaste ist nur noch maschinell unter hohen Drücken möglich.⁷⁶ Dem gegenüber steht eine deutlich schnellere Verarbeitungszeit als bei den Duroplasten.⁷⁷

Als für die Matrix geeignete Thermoplaste sind unter anderem POM, PET, PEI, PA, PPS, PSU und PEEK zu nennen.

Verstärkungsfasern

Gängige Fasern zur Verstärkung von Polymeren sind Glasfasern, Kohlenstoff-Fasern, organische Aramidfasern oder Stahlfasern, wobei den Glasfasern aufgrund des niedrigen Preises die größte Bedeutung zugesprochen werden kann.⁷⁸

Die Faserlänge kurzfaserverstärkter Kunststoffe beträgt 0,1 mm bis 1 mm. Der Durchmesser der Fasern ist materialabhängig. Für Glasfasern beträgt dieser 5 µm bis 24 µm.

⁷⁵ Vergleiche Schürmann 2007, Seite 83.

⁷⁶ Vergleiche Schürmann 2007, Seite 129.

⁷⁷ Vergleiche Neitzel 2004, Seite 43.

⁷⁸ Vergleiche Erhard 2008, Seite 103; Schürmann 2007, Seite 28.

Tafel 9

Eigenschaften einiger thermoplastischer Polymermatrixes und ausgewählter Verstärkungsfasern im Vergleich⁷⁹

Material	E-Modul (Zug) [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Dehnung [%]	Dichte [g/cm ³]	T _{max} [C°]
Thermoplastische Polymermatrix	2800-3800	55-105	>20	1,20-1,40	65-155
Glasfasern S-Typ	90000	4500	5,7	2,46	250-300
Glasfasern E-Typ	80000	3500	4,0	2,54	300-350
Kohlenstoff Pan-HT	240000	3750	1,6	1,78	500
Aramid Kevlar 49	135000	3500	2,8	1,45	250-300
Stahl	200000	2800	4,8	7,8	1000

Versagensverhalten

Das Versagen faserverstärkter Thermoplaste lässt sich in drei Arten einteilen.⁸⁰

- Fließen der Matrix infolge Überschreitung der Schubfestigkeit in der Grenzfläche zwischen Matrix und Faser
- Grenzflächengleiten, Verlust der Oberflächenhaftung zwischen Matrix und Faser, Herausziehen der einzelnen Fasern aus der Matrix unter Zugbeanspruchung. Durch Verwendung längerer Fasern kann das Risiko einer Grenzflächengleitung verringert werden, da eine größere Oberfläche zur Übertragung der Schubkräfte vorhanden ist.
- Faserbruch bei Überschreitung der Eigenfestigkeit der Verstärkungsfaser

Zur Erhöhung der Haftung in der Grenzfläche zwischen Polymermatrix und Faser werden die Fasern vor der Verarbeitung mit Haftvermittlern beschichtet.⁸¹

Fertigungsverfahren kurzfaserverstärkter Thermoplaste

Bei der Fertigung kurzfaserverstärkter Thermoplaste kommt dem Spritzgießverfahren zur Herstellung von Formteilen die größte Bedeutung zu. Es werden aber auch Halbzeuge in Form von einfachen Profilformen und Platten im Extrudierverfahren hergestellt. Ausgangsprodukt für beide Verfahren

⁷⁹ Vergleiche Neitzel 2004, Tabelle 2.1 und Tabelle 2.3.

⁸⁰ Vergleiche Erhard 2008, Seite 57.

⁸¹ Vergleiche Schürmann 2007, Seite 56.

sind der pulver- oder granulatförmig vorliegende Thermoplast und der Verstärkungsstoff in Form einzelner Fasern. Die Ausgangsprodukte werden im gewünschten Massenverhältnis gemischt und anschließend im Extruder- oder Spritzgießvorgang weiter verarbeitet.

Beim Extrudierverfahren wird das Stoffgemisch aus Thermoplast-Granulat und Verstärkungsfasern in einen Zylinder mit einer innenliegenden, angetriebenen Schnecke eingefüllt. Durch die Drehbewegung der Schnecke wird das Stoffgemisch durch den Zylinder gefördert und dabei bis zur Schmelztemperatur des Thermoplasts erwärmt.

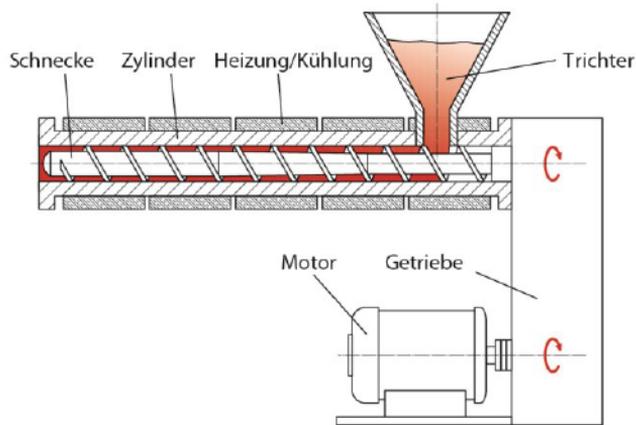
Im Inneren des Extruders wird der Kunststoff

- gefördert
- verdichtet
- plastifiziert
- homogenisiert

Am Ende der Schnecke befindet sich ein Werkzeug zur Formgebung des gewünschten Profils. Die thermoplastische Schmelze mit den Verstärkungsfasern wird durch die kontinuierliche Förderbewegung der Schnecke durch das Formwerkzeug gepresst. Der Förderdruck der Schmelze liegt beim Extrudierverfahren deutlich unter dem des Spritzgießverfahrens. Das Extrudierverfahren ist ein kontinuierliches Verfahren. Die theoretisch endlos langen Halbzeuge werden nach Austritt aus dem Werkzeug kalibriert, abgekühlt und getrennt.⁸²

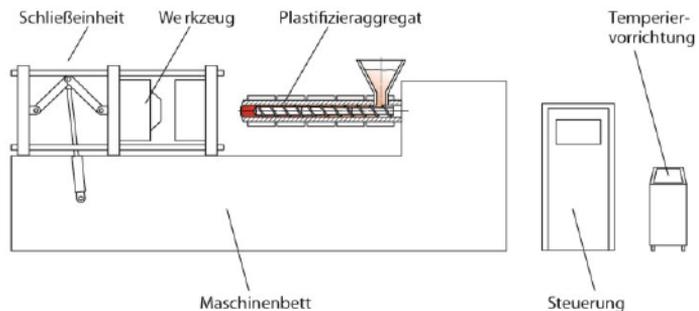
⁸² Vergleiche Kaiser 2008, Seite 133 ff.

Bild 46
Aufbau eines Extruders



Der prinzipielle Aufbau einer Spritzgießanlage ist in Bild 47 dargestellt. Das Stoffgemisch aus Thermoplast und Verstärkungsfasern wird hier einem Plastifizieraggregat zugeführt. Die Funktionsweise dieses Aggregates ist ähnlich dem eines Extruders. Die plastische Schmelze aus Kunststoff und Verstärkungsfaser wird aus dem Plastifizieraggregat unter hohem Druck⁸³ in ein Formwerkzeug gepresst⁸⁴ und verdichtet. Durch Abkühlung erstarrt der Kunststoff und kann aus dem Formwerkzeug entnommen werden. Der Aufbau des benötigten Förderdruckes und die Dosierung der benötigten Kunststoffmenge erfolgt über das Plastifizieraggregat.⁸⁵

Bild 47
Aufbau einer Spritzgießanlage



⁸³ bis zu mehreren kbar
⁸⁴ oder eingespritzt
⁸⁵ Vergleiche Kaiser 2008, Seite 148 ff.

Anisotropie

Kurzfaserverstärkte Thermoplaste zeigen ein ausgeprägt anisotropes Materialverhalten. Die Anisotropie hat bei diesen Kunststoffen zwei Ursachen, zum einen die Molekülorientierung und zum anderen die Orientierung der Verstärkungsfasern. Beide Ursachen sind auf den Verarbeitungsprozess zurückzuführen.

Eine Molekülorientierung entsteht durch die Strömung der Polymerschmelze vorrangig beim Spritzgießen. Durch Scherkräfte werden die in Knäuel-Form angeordneten Moleküle gestreckt und in Strömungsrichtung ausgerichtet. Durch schnelle Abkühlung, vor allem in den Oberflächen, erstarren die Moleküle in dieser Lage. Die Festigkeit und Steifigkeit des Kunststoffes steigt in Orientierungsrichtung der Moleküle bzw. der Strömungsrichtung im Verarbeitungsprozess an, da nun die energiereicheren, chemischen Bindungskräfte einen höheren Einfluss haben. Senkrecht zur Orientierungsrichtung kann die Festigkeit und Steifigkeit unter Umständen absinken.⁸⁶

Eine Orientierung der Verstärkungsfasern wird ebenfalls durch die Strömung der Polymerschmelze im Verarbeitungsprozess hervorgerufen und ist bei den kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten besonders ausgeprägt.

Der Einfluss auf das Festigkeits- und Steifigkeitsverhalten wirkt sich weit deutlicher aus als bei Molekülorientierungen.

Bei der Faserorientierung spricht man eher von einer Vorzugsorientierung, da nicht alle Fasern ausgerichtet werden. Durch die Strömung der Polymerschmelze im Verarbeitungsprozess beim Spritzgießen richten sich vor allem die Fasern in den oberflächennahen Bereichen in Strömungsrichtung aus. In den Übergängen zum Kernbereich sind die Fasern regellos und im Kernbereich selbst bevorzugt senkrecht zur Strömungsrichtung ausgerichtet.⁸⁷

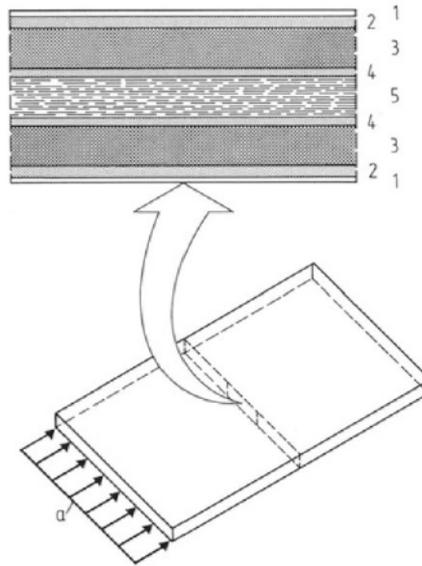
⁸⁶ Vergleiche Erhard 2008, Seite 64 ff.

⁸⁷ Vergleiche Erhard 2008, Seite 255 ff.

Bild 48

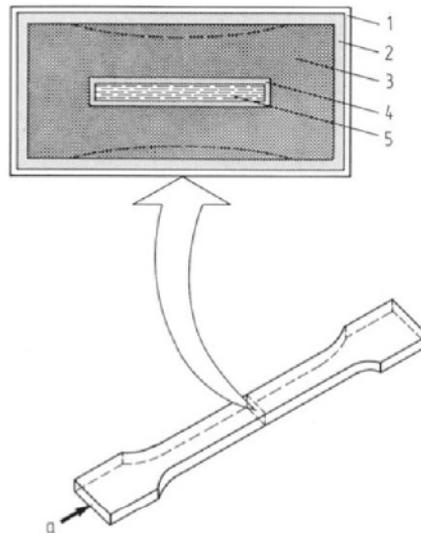
Faserorientierung in einer Rechteckplatte mit Bandanguss

- 1 faserarmer Randfilm
- 2 regellose Faserorientierung
- 3 Fasern überwiegend in Fließrichtung
- 4 regellose Faserorientierung
- 5 Fasern überwiegend senkrecht zur Fließrichtung
- a Anschnitt

**Bild 49**

Faserorientierung in einem Schulterstab für die Zugprüfung nach DIN EN ISO 527

- 1 faserarmer Randfilm
- 2 regellose Faserorientierung
- 3 Fasern überwiegend in Fließrichtung
- 4 regellose Faserorientierung
- 5 Fasern überwiegend senkrecht zur Fließrichtung
- a Anschnitt



Die tatsächlich vorhandene Orientierung der Fasern in einem spritzgegossenen Bauteil hängt sehr stark von dessen Geometrie und der Position der Einspritzöffnung im Werkzeug ab. Bei dem im Bild 49 dargestellten Schulterstab liegt eine für die Zugprüfung optimale Faserorientierung vor, bei der mit sehr hohen Steifigkeits- und Festigkeitsgewinnen gegenüber dem unverstärkten Material zu rechnen ist.

Auch für im Extrusionsverfahren hergestellte, kurzfaserverstärkte Thermoplaste kann von einer vorwiegenden Faser-

orientierung, in oberflächennahen Schicht in Extrusionsrichtung und im Kern senkrecht dazu, ausgegangen werden.⁸⁸

4.3.4 Mörtelsysteme

Punktgehaltene Verglasungen erfreuen sich im konstruktiven Glasbau seit Jahren zunehmender Beliebtheit. Zum Toleranzausgleich und zur Lagesicherung bei der Befestigung der Glasscheiben in Punkthaltern haben sich dabei vor allem die Injektionsmörtelsysteme der Firma HILTI HIT-HY 50 und das Nachfolgeprodukt HIT-HY 70 etabliert. Diese Injektionsmörtelsysteme wurden ursprünglich für den Einsatz in der Dübeltechnik entwickelt und besitzen für diese Anwendung eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung⁸⁹. Die Verwendbarkeit dieser Injektionsmörtelsysteme in den Punkthaltern wurde im Rahmen von Produktzulassungen⁹⁰, Gutachten⁹¹ und Zustimmungsverfahren im Einzelfall geregelt.

In den Punkthaltern dient der Injektionsmörtel als Ausgleichsschicht zwischen Glasbohrung und dem metallischen Bolzen des Punkthalters. Bohrungen in Glasscheiben können verfahrenstechnisch mit sehr hoher Genauigkeit hergestellt werden, sind im Bauwesen aber nur an thermisch vorgespannten Gläsern zulässig⁹². Werden diese Gläser zur Realisierung einer Redundanz zu Verbund- oder Verbund-Sicherheitsglas weiterverarbeitet, sind geringe Kantenversätze der Bohrungen der Einzelscheiben nicht zu vermeiden. Vor allem bei der Verwendung von punktförmig gelagerten Vertikalverglasungen sollen in den Bohrungen über die Lochleibungsverbindung Kräfte von der Verglasung in die Punkthalter abgetragen werden. Im Sinne einer gleichmäßigen Kraftübertragung müssen die Versätze durch konstruktive Maßnahmen ausgeglichen werden. Der Einsatz des Injektionsmörtelsystems stellt hier eine praktikable Lösung dar. Der beim Einbringen plastische Injektionsmörtel passt sich der vorhandenen Geometrie an und härtet inner-

⁸⁸ Vergleiche Gausepohl, 1996 Seite 216.

⁸⁹ Vergleiche Z-21.3-1830.

⁹⁰ Vergleiche Z-70.2-19.

⁹¹ Vergleiche Bucak 2007.

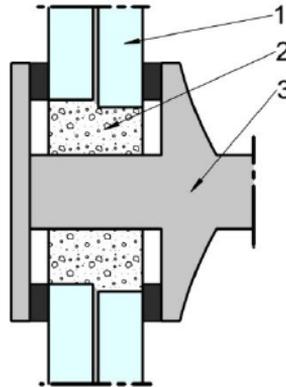
⁹² Bohrungen in thermisch vorgespannten Gläsern müssen vor dem Vorspannprozess hergestellt werden, ein nachträgliches Setzen von Bohrungen ist bei TVG oder ESG nicht möglich.

halb eines kurzen Zeitraumes aus. Im gleichen Arbeitsschritt werden Maßtoleranzen zwischen Unterkonstruktion und Verglasung ausgeglichen und ein Glas-Metall-Kontakt dauerhaft vermieden.

Bild 50

Schematischer Aufbau einer punktgehaltenen Verglasung mit Injektionsmörtelsschicht

- 1 VSG
- 2 Injektionsmörtel
- 3 Punkthalter



Der Injektionsmörtel übernimmt im Punkthaltersystem im übertragenen Sinn die Funktion einer Klotzung. Über den Injektionsmörtel sollen Kräfte sicher von der Bohrlochkante in den Punkthalter eingetragen und dabei ein Glas-Metall-Kontakt verhindert werden. Der Injektionsmörtel Hilti HIT-HY 70 oder vergleichbare Produkte sind als Klotzungsmaterial für hohe mechanische Klotzungskräfte prinzipiell geeignet, wenn sie wie im Fall von Hilti HIT-HY70 über eine ausreichende Druckfestigkeit und Steifigkeit verfügen und Spannungsspitzen in der Glaskante vermieden werden können. In Untersuchungen der FH München wurde für Hilti HIT HY70 eine Druckfestigkeit von 65 N/mm^2 bei einem E-Modul von 1750 N/mm^2 bestimmt⁹³.

⁹³ Vergleiche Bucak 2007, Seite 16.

5 Substanzuntersuchungen an Kunststoffen

5.1 Materialauswahl

Für die Auswahl potenziell als Klotzungsmaterial geeigneter Kunststoffe wurden die unter 4.3.1 benannten Anforderungen zugrunde gelegt. Die Auswahl erfolgte durch Produktrecherche anhand von Produktdatenblättern der Kunststoffindustrie. Hinsichtlich der Festigkeit und Steifigkeit des Materials wurden folgende explizite Auswahlkriterien festgelegt:

- E-Modul: > 3000 N/mm²,
- Streckspannung⁹⁴: > 60 N/mm²,
- Einsatztemperaturbereich: -20°C bis +80°C.

Zusätzlich wurde die Auswahl auf handelsübliche technische Kunststoffe beschränkt, die sowohl als Spritzguss, als auch als Halbzeug kurzfristig erhältlich sind.

Material	E-Modul Zug [N/mm ²]	Streck- spannung [N/mm ²]	Einsatztempera- tur [°C]
POM-C	3000	70	-50 bis +100
POM-C GF25	9000	130	-20 bis +100
PET	3000	85	-20 bis +115
PEEK	3900	100	-60 bis +250
PEEK GF30	9700	156	-20 bis +250
PEI	3100	110	-50 bis +170
PA6	3200	80	-40 bis +85
PA6 GF30	9500	180	-30 bis +95
PA66	3300	85	-30 bis +95
PA66 GF30	10000	185	-20 bis +120

Tafel 10

Für weiterführende Untersuchungen ausgewählte Kunststoffe

Aus der Vielzahl handelsüblicher Kunststoffe wurden zehn Materialvertreter für weiterführende Untersuchungen zur Eignung als Klotzungsmaterial ausgewählt. Die Auswahl umfasst fünf technische Thermoplaste POM-C, PET, PEI, PA6 und PA66, sowie den Hochleistungskunststoff PEEK, welcher wegen seiner Temperaturstabilität und Festigkeit vor allem in der Raumfahrtindustrie Anwendung findet. Weiterhin wurden für vier dieser Materialien glasfaserverstärkte

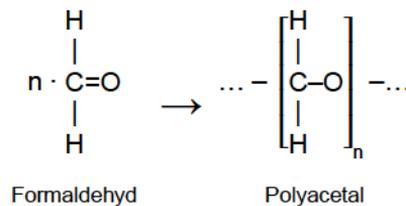
⁹⁴ Spannung bei der Streckdehnung

Varianten ausgewählt, bei denen durch die Glasfaserzugabe die Materialeigenschaften Festigkeit und Steifigkeit nach den Angaben der Datenblätter deutlich verbessert werden.

5.2 Eigenschaften der Kunststoffe

5.2.1 POM Polyacetal⁹⁵

Polyacetal gehört zur Gruppe der teilkristallinen Thermoplaste und wurde in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts von DuPont de Nemours entwickelt. Die Herstellung von POM erfolgt durch Kettenpolymerisation aus Formaldehyd bzw. Trioxan.



Polyacetale besitzen folgende Materialeigenschaften:

- hohe Härte und Steifigkeit
- hohe Formbeständigkeit bei Wärmezufuhr
- Beständigkeit gegen Spannungsrissbildung
- gutes Gleit- und Verschleißverhalten
- geringe Wasseraufnahme
- hohe Lösungsmittelbeständigkeit
- Einsatztemperaturbereich -40°C bis $+100^{\circ}\text{C}$
- Farbe: weiß

POM ist nicht beständig gegen UV-Strahlung. Durch eine Zugabe von UV-Stabilisatoren⁹⁶ wird eine verbesserte Beständigkeit gegen UV-Strahlung erzielt. UV-stabilisierte Polyacetale lassen sich durch ihre meist schwarze Farbgebung leicht von nicht UV-stabilisierten Polyacetalen unterscheiden.

Neben dem POM-Homopolymerisat (POM), welches ausschließlich aus Formaldehyd bzw. Trioxan gewonnen wird,

⁹⁵ Vergleiche Dominginghaus 2005, Seite 813 ff; Kaiser 2006, Seite 364 ff; Schwarz 2007, Seite 106 ff

⁹⁶ Zum Beispiel Rußpartikel

ist auf dem Markt auch POM-Copolymerisat (POM-C) erhältlich. Bei der Polymerisation werden dem Formaldehyd etwa 2% bis 4% Ringether Monomere zugesetzt. Das dabei entstehende POM-Copolymer zeichnen sich durch eine verbesserte Wärmebeständigkeit aus.

Die mechanischen Eigenschaften von POM und POM-C lassen sich durch Zusatzstoffe gezielt verändern. So hat die Zugabe von bis zu 30% Glasfaseranteilen enorme Steifigkeits- und Zugfestigkeitszuwächse zur Folge.

Eigenschaft	Einheit	POM	POM-C	POM-C GF30%
Streckspannung	N/mm ²	65 - 70	67 - 72	140
Reißdehnung	%	25 - 70	25 - 70	3
E-Modul (Zug)	N/mm ²	2800	3200	10000
Kugeldruckhärte	N/mm ²	145	160	180
max. Einsatztemperatur	°C	90 - 110	90 - 110	90 - 110
Schmelztemperatur	°C	175	164 - 167	164-167

Tafel 11
Materialeigenschaften von Polyacetal⁹⁷

Die Anwendung von POM ist sehr vielfältig. So wird POM im Maschinenbau zum Beispiel für Zahnräder, Schaltwerke oder auch Kleinstteile und Lager in Uhrwerken genutzt. Im konstruktiven Glasbau ist POM ein etabliertes Material für Hülsen und Buchsen von Punkthaltern.

Polyacetal wird durch die Kunststoffindustrie als Granulat für die weitere Verarbeitung im Spitzgieß- oder Extrudierverfahren zur Verfügung gestellt. Im Spritzgießverfahren eignet sich Polyacetal zur Herstellung von Kleinteilen mit hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit. Im Extrudierverfahren werden Halbzeuge⁹⁸ für die weitere Verarbeitung gefertigt. Die Zerspanbarkeit von Polyacetal ist sehr gut, wodurch es auch für Einzelfertigungen in Kleinserien sehr gut geeignet ist.

Typische Handelsnamen für Polyacetale sind Derlin (POM, PuPont), Hostaform (POM-C, Ticona) oder Ultraform (POM-C, BASF).

⁹⁷ Vergleiche Dominghaus, 2005 Seite 818, Tabelle 2-63.

⁹⁸ Platten, Profilstäbe

POM, POM-C und POM-C mit Glasfaserverstärkung ist bei Betrachtung der Materialkennwerte und der Verarbeitungsmöglichkeiten grundsätzlich als Klotzungsmaterial geeignet. Um die Eignung als Klotzungsmaterial abschließend bewerten zu können, müssen Materialkennwerte wie E-Modul (Druck), Druckfestigkeit und das Verformungsverhalten unter Dauerlast⁹⁹ für den Einsatztemperaturbereich¹⁰⁰ im konstruktiven Glasbau bestimmt werden. Für FEM-Simulationen fehlen aus der Literatur Angaben zum Querdehnungsverhalten¹⁰¹. Durch die häufige Anwendung von POM bei punktgehaltenen Verglasungen kann davon ausgegangen werden, dass die Materialverträglichkeit zu PVB-Folien gegeben ist. Die Materialverträglichkeit zu Randverbundsystemen von Mehrscheiben-Isolierverglasungen muss aber für jeden Anwendungsfall gesondert betrachtet werden.

5.2.2 PA Polyamid¹⁰²

Polyamide sind teilkristalline Thermoplaste, die seit 1937 unter den Bezeichnungen Nylon (PA66) oder Perlon (PA6) industriell hergestellt werden. Die unterschiedlichen Arten von Polyamiden werden nach der Art und Anzahl der zur Herstellung herangezogenen Reaktionspartner unterschieden. Die Kennzeichnung erfolgt mit dem Kurzzeichen PA und einer Zahlenfolge, die die Anzahl der Kohlenstoffatome der zur Herstellung verwendeten Reaktionspartner angibt. Zu den Polyamiden, die aus einem Ausgangsstoff hergestellt werden, zählen PA 6, PA 11 und PA 12. Polyamide aus zwei Ausgangsstoffen sind PA 66, PA 612 und PA 46. Aus der Gruppe dieser Polyamide stellen PA 6 und PA 66 mit 97% Produktionsanteil die größte Anwendungsgruppe dar.

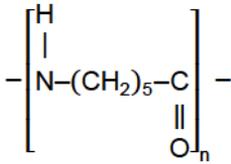
PA 6 wird durch Polyaddition aus dem Ausgangsprodukt Epsilon-Caprolactam gewonnen. Polyamid 66 wird durch Polykondensation aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure gewonnen.

⁹⁹ Kriechverhalten

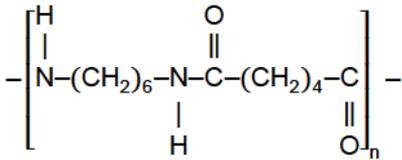
¹⁰⁰ Für Fassaden und Dächer kann ein Einsatztemperaturbereich von -20°C bis +80°C angesetzt werden.

¹⁰¹ Querkontraktionszahl

¹⁰² Vergleiche Domininghaus 2005, Seite 909 ff; Kaiser 2006, Seite 337 ff; Schwarz 2007, Seite 118 ff.



Polyamid 6



Polyamid 66

Polyamid besitzt folgende Materialeigenschaften:

- hohe Festigkeit und Steifigkeit
- Einsatztemperaturbereich -30°C bis +80°C
- gute Gleitfähigkeit
- Lösemittelbeständig gegen viele Stoffe
- nicht beständig gegen dauernden Angriff von heißem Wasser
- hohe Wasseraufnahme

Ähnlich wie Polyacetal ist Polyamid nicht beständig gegen UV-Strahlung. Auch hier kann durch Zugabe von UV-Stabilisatoren, meist Rußpartikel, die UV-Beständigkeit verbessert werden.

Die Zugabe von Glasfaseranteilen verbessert die Steifigkeit und Zugfestigkeit von Polyamid. Auf dem Markt sind Polyamide mit 30% Glasfaseranteil handelsübliche Produkte.

Tafel 12
 Materialeigenschaften von
 Polyamid 6 und Polyamid
 66¹⁰³

Eigenschaft	Einheit	PA 6	PA 6 GF30%	PA 66	PA 66 GF30%
Streckspannung	N/mm ²	40	100	65	160
Reißdehnung	%	200	-	150	5
E-Modul (Zug)	N/mm ²	1400	5000	2000	10000
Kugeldruckhärte	N/mm ²	70	110	90	170
max. Einsatztemperatur	°C	80-100	100-130	170-200	190-240
Schmelztemperatur	°C	220	220	255	255

Formteile lassen sich aus Polyamid im Spritzgießverfahren, Halbzeuge im Extrudierverfahren herstellen. Die Zerspanbarkeit ist gut, aber im Vergleich zu POM schlechter.

Die Anwendungsmöglichkeiten von Polyamid sind ähnlich derer von POM. Polyamid wird ebenfalls für Hülsen und Buchsen bei punktgehaltenen Verglasungen verwendet.

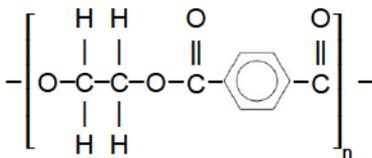
Für die Verwendung als Klotzungsmaterial besitzen nach Analyse der bekannten Materialkennwerte vor allem die glasfaserverstärkten Varianten von Polyamid 6 und Polyamid 66 die größten Potenziale. Zu Beurteilung der tatsächlichen Eignung als Klotzungsmaterial und der Festlegung von Anwendungsgrenzen mussten das Steifigkeits-, Festigkeits- und Langezeitverhalten unter Druckkraftbeanspruchung über den Einsatztemperaturbereich bestimmt werden. Die hohe Wasseraufnahme muss kritisch betrachtet werden, da diese mit signifikanten Änderungen der mechanischen Eigenschaften einhergeht.

¹⁰³ Vergleiche Dominginghaus 2005, Seite 942, Tabelle 2-70.

5.2.3 PET Polyethylenterephthalat¹⁰⁴

Der technische Kunststoff PET mit thermoplastischen Eigenschaften ist durch seinen verbreiteten Einsatz als Verpackungsmaterial sehr bekannt. Durch die langsame Kristallisation von PET kann je nach Verarbeitungsbedingungen amorphes¹⁰⁵ - oder kristallines¹⁰⁶ PET hergestellt werden. Amorphes PET besitzt gegenüber kristallinem PET eine geringere Steifigkeit und Festigkeit, ist aber bis zu Wanddicken von 5 mm hoch transparent. Amorphes PET findet vor allem Anwendung in der Verpackungs- und Folienindustrie, zum Beispiel zur Herstellung von Getränkeflaschen. Kristallines PET findet verbreitet Anwendung als Konstruktionswerkstoff in der Elektrotechnik und im Maschinenbau.

Die Herstellung von PET erfolgt durch 2-stufige Polykondensation aus Terephthalsäure.



Polyethylenterephthalat

Zu den Materialeigenschaften von PET zählen:

- hohe Steifigkeit und Festigkeit
- geringe Kriechneigung
- gute Witterungsbeständigkeit
- sehr gute UV-Beständigkeit
- Lösemittelbeständigkeit
- unbeständig gegen heißes Wasser und heißen Wasserdampf
- niedriger Reibungskoeffizient
- geringe Wasseraufnahme
- leicht brennbar

¹⁰⁴ Vergleiche Dominginghaus 2005, Seite 1053 ff; Kaiser 2006, Seite 308 ff; Schwarz 2007, Seite 129 ff.

¹⁰⁵ PET-A, transparent.

¹⁰⁶ PET-C, opak

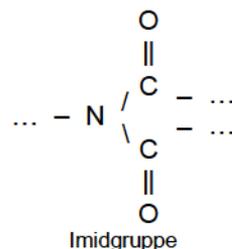
Tafel 13
 Materialeigenschaften von
 PET

Eigenschaft	Einheit	PET
Streckspannung	N/mm ²	81
Reißdehnung	%	70
E-Modul (Zug)	N/mm ²	2800
Kugeldruckhärte	N/mm ²	150
max. Einsatztemperatur	°C	100
Schmelztemperatur	°C	255

PET besitzt ähnliche Materialeigenschaften wie POM oder POM-C und sollte somit als Klotzungsmaterial geeignet sein. Im Hinblick auf die geringere Kriechneigung wäre bei Betrachtung der Materialkennwerte PET gegenüber POM oder POM-C vorzuziehen. Kritisch zu betrachten sind die leichte Brennbarkeit und Unbeständigkeit gegen heißes Wasser oder Wasserdampf.

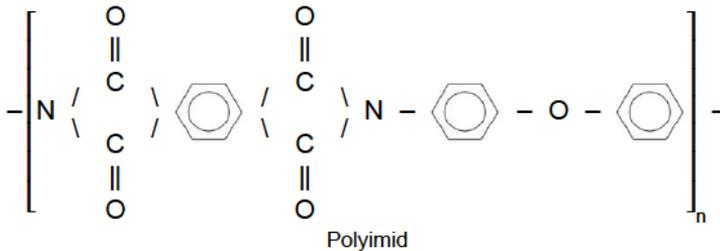
5.2.4 PI Polyimide¹⁰⁷

Polyimide sind auf die Produktionsmenge bezogen die wichtigste Gruppe der hochwärmebeständigen Kunststoffe. Polyimide werden sowohl durch Polykondensationsreaktion als auch durch Polyadditionsreaktion hergestellt. Kondensationsprodukte können den Thermoplasten oder Duroplasten zugeordnet werden. Polyadditionsprodukte gehören ausschließlich zu den Duroplasten. Die Wärmebeständigkeit von Polyimid basiert auf den in die Molekülkette eingebauten Imidgruppen.



Ausgangsstoffe für die Herstellung von Polyimiden sind Diamin und Dianhydrid. Die Strukturformel von Polyimid lautet:

¹⁰⁷ Vergleiche Dominghaus 2005, Seite 1235 ff; Schwarz 2007, Seite 185 ff.



Polyimiden werden folgende Materialeigenschaften zugeordnet:

- hohe Festigkeit in einem großen Temperaturbereich
- elastisches Materialverhalten
- sehr gute UV-Beständigkeit
- selbstverlöschend

Von Polyimiden sind abgewandelte Formen verfügbar, bei denen spezielle Eigenschaften, meist hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, verändert wurden. Gebräuchlich sind hier unter anderem Polybismaleinimid PBI, Polyetherimid PEI und Polyamidimid PAI. PBI und PAI sind hauptsächlich für eine Verarbeitung in Formmassen im Spritzgießverfahren geeignet und werden durch die Kunststoffindustrie als Granulat und Pulvermassen für die weitere Verarbeitung geliefert.

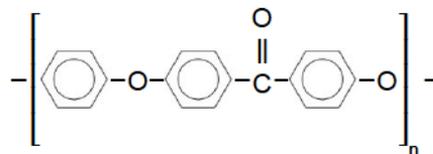
Bei Polyetherimid PEI wird durch Einbau von Ethergruppen eine höhere Flexibilität des Kunststoffes erreicht, die die Verarbeitbarkeit verbessert. PEI weist ein thermoplastisches Materialverhalten auf und lässt sich durch Spritzgießen oder Extrudieren verarbeiten. Neben der Fertigung von Formteilen werden somit auch Halbzeuge aus PEI für die Weiterverarbeitung angeboten. PEI wurde durch General Electric entwickelt und wird seit 1982 unter der Bezeichnung Ultem vertrieben. Der Materialpreis für PEI als Halbzeug lag 2008 etwa um den Faktor 10 höher als der von unverstärktem PA6 oder POM-C.

Tafel 14
 Materialeigenschaften von
 PI

Eigenschaft	Einheit	PEI (Ultem 1000)	PEI GF 30 (Ultem 2300)	PAI GF 30 (Torlon 5030)
Streckspannung	N/mm ²	105	160	205
Reißdehnung	%	60	-	7
E-Modul (Zug)	N/mm ²	3000	9000	11700
Druckfestigkeit	N/mm ²	140	160	260
E-Modul (Druck)	N/mm ²	2900	3800	-
Kugeldruckhärte	N/mm ²	220	-	-
max. Einsatztemperatur	°C	170	170	260
Schmelztemperatur	°C	219	228	-

5.2.5 PEEK Polyetheretherketon¹⁰⁸

Polyetheretherketon ist ein erstmals 1979 vorgestellter Hochleistungskunststoff aus der Materialgruppe der Thermoplaste. PEEK zeichnet sich durch eine sehr hohe Zugfestigkeit und einer für Kunststoffe sehr hohen Einsatztemperatur aus. Anwendung findet PEEK in der Luft- und Raumfahrttechnik als Ersatz für metallische Werkstoffe. Der Materialpreis von PEEK liegt etwa um den Faktor 10 höher als der von glasfaserverstärktem POM-C und um den Faktor 30 höher als der von unverstärktem POM-C oder PA6.



Polyetheretherketon

Zu den Materialeigenschaften von PEEK zählen:

- hohe Zug- und Biegefestigkeit
- hohe Wechselfestigkeit
- hohe Formbeständigkeit in der Wärme

¹⁰⁸ Vergleiche Dominghaus 2005, Seite 1203 ff, Schwarz 2007, Seite 142 und 143

- gute Gleit- und Verschleißeigenschaften
- hohe Chemikalien- und Strahlenbeständigkeit
- schwer entflammbar
- gute Verarbeitbarkeit
- UV-beständig nur durch Modifizierung

Steifigkeit und Festigkeit von PEEK lassen sich, wie bei fast allen Thermoplasten durch Zugabe von Zusatzstoffen wie Glasfasern noch einmal deutlich verbessern.

Eigenschaft	Einheit	PEEK	PEEK GF-30
Streckspannung	N/mm ²	100	156
Reißdehnung	%	5	-
E-Modul (Zug)	N/mm ²	3600	9700
Druckfestigkeit	N/mm ²	118	149
max. Einsatztemperatur	°C	240	240
Schmelztemperatur	°C	340	340

Tafel 15
Materialeigenschaften von PEEK

Bei der Verwendung von PEEK als Klotzungsmaterial müssen UV-stabilisierte Typen zum Einsatz kommen. Aufgrund des hohen Materialpreises von PEEK ist der Einsatz als Klotzungsmaterial aber nur beim Einsatz in extremen Umgebungsbedingungen sinnvoll.

5.3 Uniaxiale Zugkraftbeanspruchung

5.3.1 Allgemeines

Die DIN EN ISO 527-1:1996 und die Entwurfsfassung der DIN EN ISO 527-1:2010-5 beschreiben für die Kunststoffe das Vorgehen zur Bestimmung der Materialeigenschaften im Zugversuch. Das Verfahren wird angewendet, um das für die Berechnung und Bemessung der Kunststoffe relevante Spannungs-, Dehnungsverhalten und die Belastungsgrenzen¹⁰⁹ zu ermitteln.

Die in Abschnitt 5.1 zur Untersuchung als Klotzungsmaterial ausgewählten Kunststoffe, werden in vielen Bereichen des Maschinenbaus und im Bauwesen bereits verwendet. Dem Konstrukteur werden über Datenblätter der Kunststoffindustrie, öffentliche Datenbanken und über Fachliteratur die nach DIN EN ISO 527 bestimmten Materialkennwerte zur Verfügung gestellt. Oftmals liegen diese aber nur für die Verwendung bei Raumtemperatur vor.

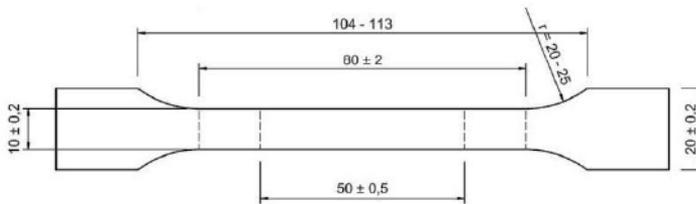
Als Grundlage für die weiteren Untersuchung an den Klotzungsmaterialien aus Kunststoff wurden in einem ersten Schritt Zugproben nach DIN EN ISO 527 bei -20°C, +23°C und +50°C durchgeführt. Die Versuche dienten zum einen der Kontrolle der durch den Hersteller der ausgewählten Kunststoffe angegebenen Materialkennwerte, als auch der Vervollständigung dieser Werte für die Einsatztemperaturen von -20°C und +50°C. Abweichend von den Vorgaben der Norm wurden je Material und Temperatur nur 3 der geforderten 5 Prüfkörper untersucht.

5.3.2 Prüfkörper

Nach DIN EN ISO 527-2 sind für die Zugprüfung von Kunststoffen Prüfkörper in Form von Schulterstäben zu verwenden. Zur Auswahl stehen bevorzugt zwei Arten von Schulterstäben, Typ 1A und Typ 1B. Schulterstäbe vom Typ 1A werden bevorzugt für in Formmassen hergestellte Prüfkörper verwendet. Schulterstäbe vom Typ 1B sind für Prüfkörper geeignet, die durch spanende Bearbeitung aus Halbzeugen gefertigt werden. Die Dicke der Prüfkörper ist durch die Norm nicht vorgegeben.

¹⁰⁹ Streckspannung, Zugfestigkeit, Bruchspannung, Zugdehnung, Streckdehnung, Bruchdehnung.

Schulterstab Typ 1A



Schulterstab Typ 1B

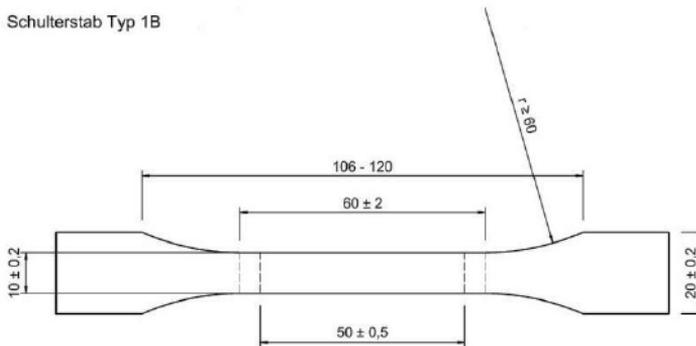


Bild 51

Schulterstäbe Typ 1A und Typ 1B nach DIN EN ISO 527-2, Bild 1

Die Prüfkörper für die durchgeführten Zugprüfungen wurden durch mechanische Bearbeitung aus Platten und Rundstäben der entsprechenden Materialien gefertigt. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Werkzeuge¹¹⁰ wurden Schulterstäbe von Typ 1A hergestellt. Die Dicke der Prüfkörper wurde einheitlich für alle Prüfkörper auf 6 mm festgelegt.

5.3.3 Prüfmaschine und Konditionierung

Die Zugprüfung erfolgte in einer Universalprüfmaschine mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min. Die Kraftmesseinrichtung der Universalprüfmaschine entsprach den Vorgaben nach DIN EN ISO 527-1. Die Dehnungsmessung in Zugrichtung und in der Querachse erfolgte berührungslos mit einem Videoextensometer. Die Prüfkörper wurden über ein Keilspannzeug in der Prüfmaschine geklemmt. Die Prüfung bei Raumtemperatur erfolgte ohne Klimasteuerung bei den vorherrschenden klimatischen Bedingungen im Prüflabor¹¹¹. Die Prüfungen bei -20°C bzw. $+50^\circ\text{C}$ erfolgten an der Universalprüfmaschine mit angeschlossener Klimakammer ohne Luftfeuchtesteuerung. Vor der Tief- bzw. Hochtempe-

¹¹⁰ Fräser

¹¹¹ 23°C bei 40%-50% relativer Luftfeuchte

aturprüfung wurden die Prüfkörper für einen Zeitraum von mindestens 24h in Wärme-/Kälteschränken bei der Prüftemperatur vorkonditioniert.

5.3.4 Eingangswerte

Die Halbzeuge aller untersuchten Kunststoffe wurden von demselben Hersteller geliefert. Aus den zugehörigen Datenblättern waren folgende Eingangswerte für eine Temperatur von 23°C bekannt. Die Angaben decken sich mit den in der Fachliteratur veröffentlichten Werten.

Tafel 16

Eingangswerte für Zugversuche nach DIN EN ISO 527 nach Herstellerdatenblättern zum Zeitpunkt der Materialbestellung

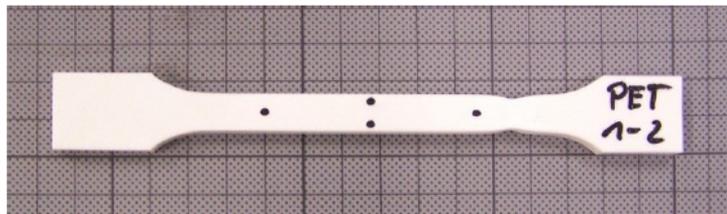
Kunststoff	Rohdichte [g/cm ³]	Zug E-Modul [N/mm ²]	Streck- spannung [N/mm ²]	Reißdeh- nung [%]
POM-C	1,41	3000	70	30
POM-C GF25	1,58	9000	130	3
PET	1,38	3000	85	15
PEEK	1,32	3900	100	25
PEEK GF30	1,49	9700	156	2,7
PEI	1,27	3100	110	12
PA 6	1,14	3200	80	30
PA 6 GF30	1,35	9500	180	3
PA 66	1,15	3300	85	50
PA 66 GF30	1,35	10000	185	3

5.3.5 Versuchsdurchführung

Alle Zugproben wurden mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min belastet. Für die optische Dehnungsmessung wurden alle Prüfkörper mit Messmarken parallel und senkrecht zu Zugrichtung versehen. Die Ausgangslänge zwischen den Messmarken beträgt in Zugrichtung etwa 50 mm und in Querrichtung etwa 7 mm bis 8 mm.

Bild 52

Geprüfter Schulterstab mit aufgezeichneten Messmarken, Einschnürung außerhalb der Messmarken



5.3.6 Versuchsergebnisse bei 23°C

Bei einer Temperatur von 23°C waren die unverstärkten Materialien entsprechend der in Tafel 16 angegebenen Werte von hohen Reißdehnungen und der Ausprägung einer Streckgrenze gekennzeichnet. Die glasfaserverstärkten Materialien zeigten erwartungsgemäß ein steiferes Zugdehnungsverhalten und versagten durch Sprödbbruch. Die ermittelte Bruchspannung entspricht bei diesen Kunststoffen der Streckspannung. Das Vorgehen bei der Auswertung der Versuche bei 23°C wird hier exemplarisch für die unverstärkten Kunststoffe an POM-C und für die glasfaserverstärkten Kunststoffe an POM-C GF25 gezeigt.

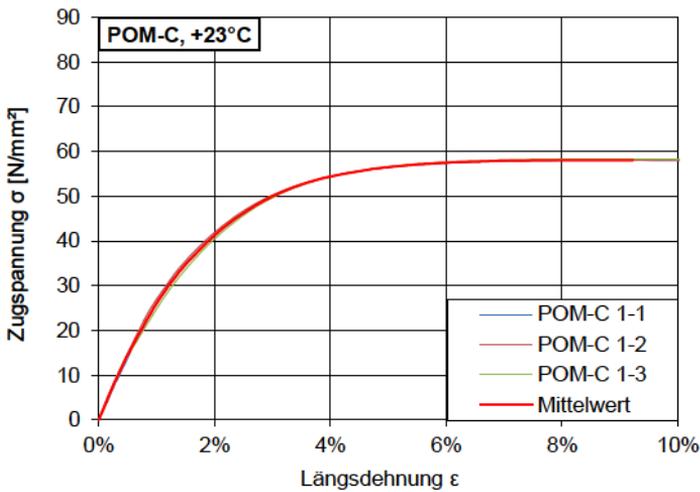


Bild 53
Spannungs-
Längsdehnungsverhalten
von POM-C bei 23°C
(3 Prüfkörper und Mittel-
wertkurve)

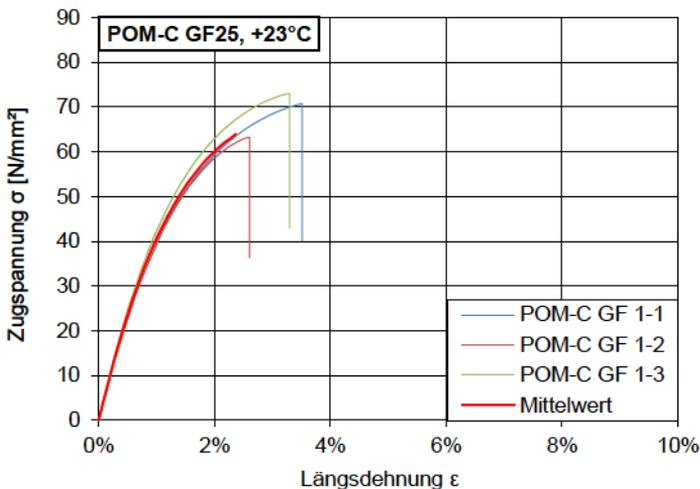


Bild 54
Spannungs-
Längsdehnungsverhalten
von POM-C GF25 bei 23°C
(3 Prüfkörper und Mittel-
wertkurve)

Über die Messwerte wurde bis zum Erreichen der Streckgrenze eine Mittelwertkurve gelegt. Alle weiteren Berech-

nungen und die Vergleiche der Materialien untereinander erfolgen mit der aufgestellten Mittelwertkurve. Bei vielen Prüfkörpern bildeten sich, wie in Bild 52 dargestellt, Einschnürungen außerhalb der Messmarken. Für diese Prüfkörper war eine Ermittlung der Streckdehnung nicht möglich.

Analog folgte das Vorgehen bei der Auswertung des Spannungs-Querdehnungsverhaltens. Wie Bild 55 exemplarisch für alle aufgezeichneten Querdehnungskurven zeigt, sind die Kurven sehr unregelmäßig. Dieses Verhalten ist auf die Messgenauigkeit des verwendeten Videoextensometers zurückzuführen.

Bild 55
Spannungs-Querdehnungsverhalten von POM-C bei 23°C (3 Prüfkörper und Mittelwertkurve)

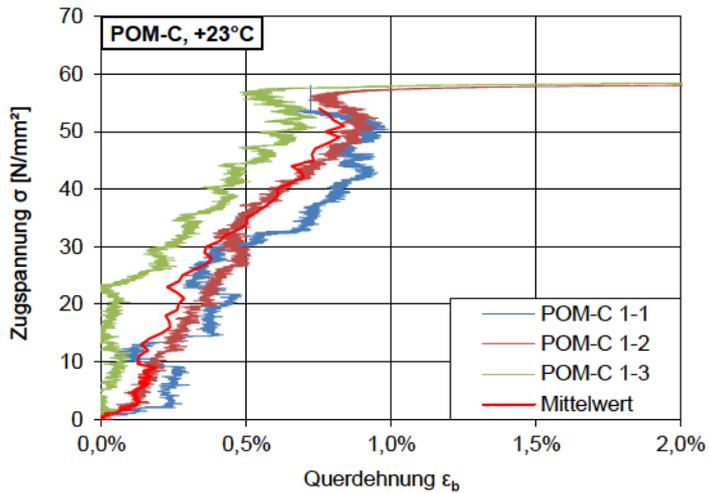
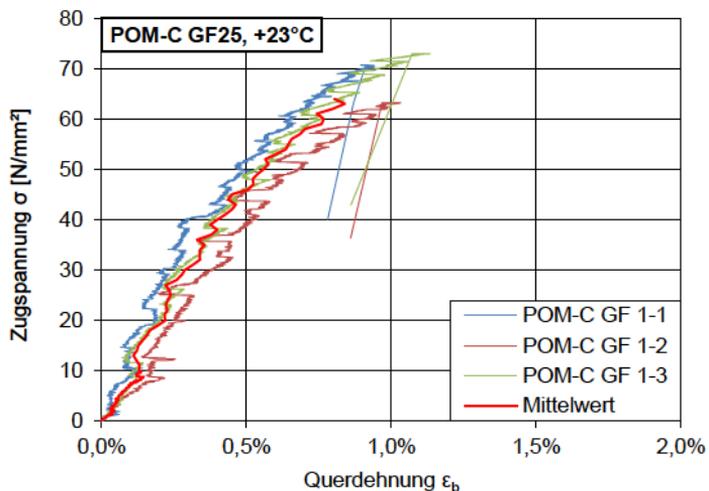


Bild 56
Spannungs-Querdehnungsverhalten von POM-C GF25 bei 23°C (3 Prüfkörper und Mittelwertkurve)



Durch Darstellung der Mittelwertkurve in einem Diagramm mit umgekehrter Anordnung von Ordinate und Abszisse ist es möglich, die unregelmäßige Kurve durch Überlagerung mit einer polynomischen Funktion $\epsilon_b(\sigma)$ für den relevanten Bereich zu glätten. Das Werkzeug zur Bestimmung der Glättfunktion wird durch die Trendlinienfunktion von MS Excel zur Verfügung gestellt. Unter Ansatz der ermittelten Glättfunktion wurden in der weiteren Bearbeitung die Querdehnungen aus der Funktion $\epsilon_b(\sigma)$ in Abhängigkeit von der Zugspannung bestimmt.

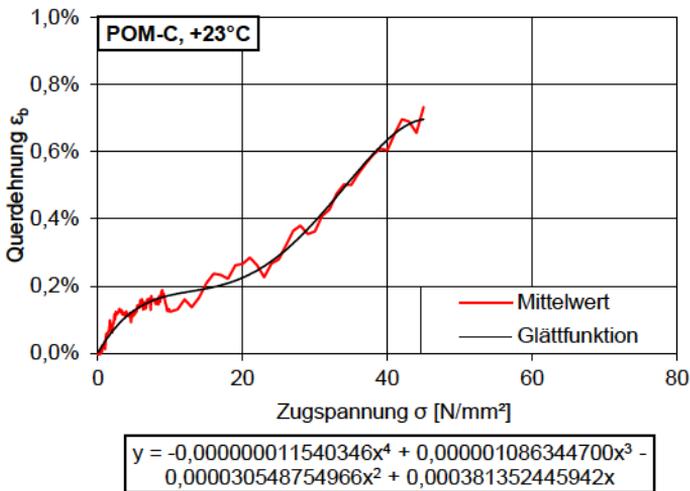


Bild 57
Spannungs-
Querdehnungsverhalten von
POM-C bei 23°C, Mittel-
wertkurve und überla-
gerte
Glättfunktion

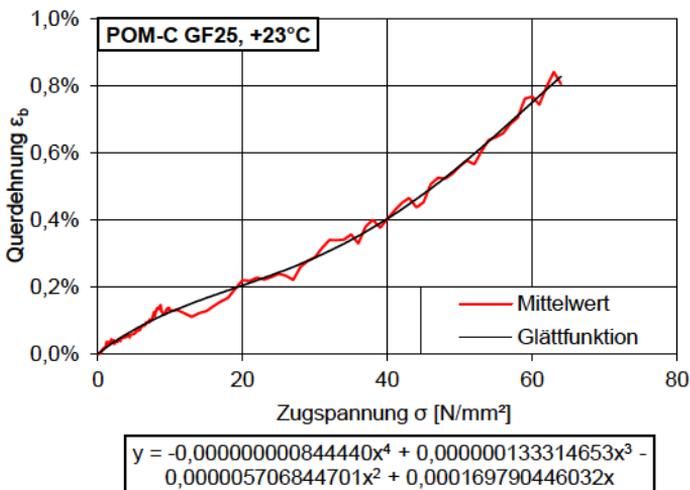


Bild 58
Spannungs-
Querdehnungsverhalten von
POM-C GF25 bei 23°C,
Mittelwertkurve und überla-
gerte
Glättfunktion

Die Bestimmung des Zug-Elastizitätsmoduls E_0 erfolgte nach DIN EN ISO 527 an den Mittelwertkurven im Dehnungsbereich von $0,05\% \leq \epsilon \leq 0,25\%$.

Bild 59

Spannungs-
Längsdehnungsverhalten
von POM-C bei 23°C, Dehnungsbereich 0,05% - 0,25% zur Ermittlung des Zug-E-Moduls E_0

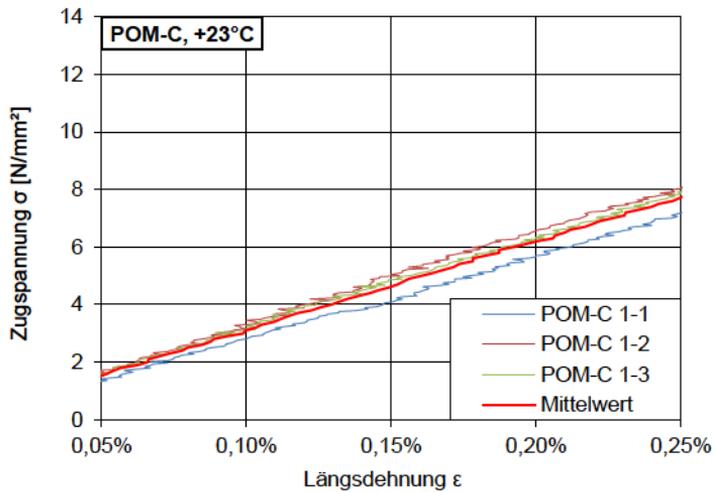
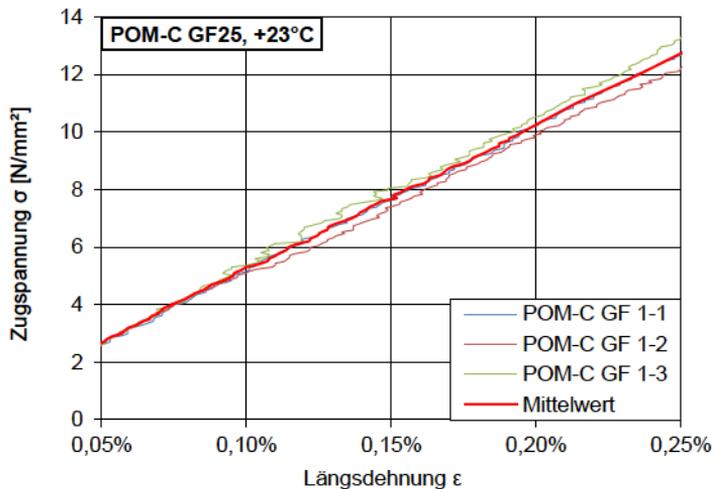


Bild 60

Spannungs-
Längsdehnungsverhalten
von POM-C GF25 bei 23°C, Dehnungsbereich 0,05% - 0,25% zur Ermittlung des Zug-E-Moduls E_0



Für die Berechnung der Spannungsverteilung und der Verformung von Kunststoffen im vereinfachten, linear elastischen Materialmodell wird neben dem Elastizitätsmodul eine Querkontraktionszahl bzw. die Poissonzahl ν benötigt. Diese ist definiert als negativer Quotient aus der Dehnung senk-

recht zur Belastungsrichtung¹¹² und der Dehnung in Belastungsrichtung.

$$\nu = \frac{-\varepsilon_b}{\varepsilon}$$

Gleichung 4

Die Berechnung der Poissonzahl aus den gewonnenen Versuchsergebnissen ist nicht ohne Einschränkungen möglich. Wie Bild 61 für den Kunststoff POM-C zeigt, ist das Verhalten nicht linear. Bild 62 zeigt für POM-C die Poissonzahl in Abhängigkeit der aufgebracht Zugspannung, zum einen aus den Rohmessdaten und zum anderen unter Ansatz der in Bild 57 ermittelten Glättfunktion für die Querdehnungswerte. Erst für Zugspannungen oberhalb von 18 N/mm² kann eine annähernd konstante Poissonzahl von etwa 0,33 – 0,35 bestimmt werden. Nur für die Kunststoffe PET und PA 6 wurde eine von der Zugspannung unabhängige, konstante Poissonzahl festgestellt.

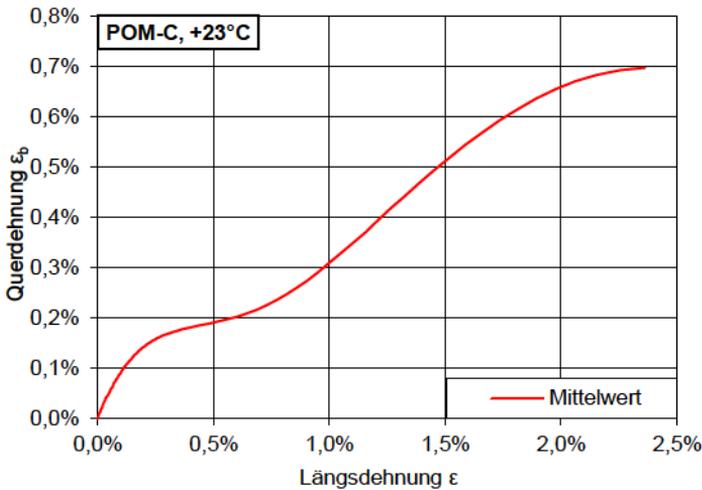


Bild 61
Längsdehnung- zu Querdehnungsverhalten von POM-C bei 23°C

¹¹² Querkontraktion – negative Dehnung oder auch Stauchung senkrecht zur Belastungsrichtung.

Bild 62

Poissonzahl in Abhängigkeit der Zugspannung für POM-C bei 23°C,

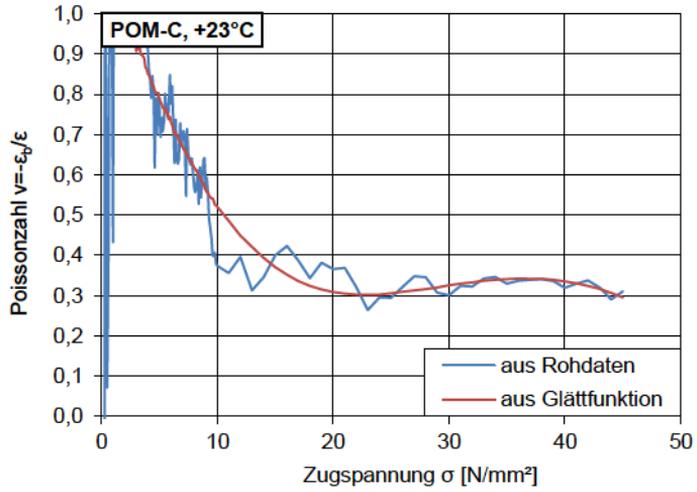
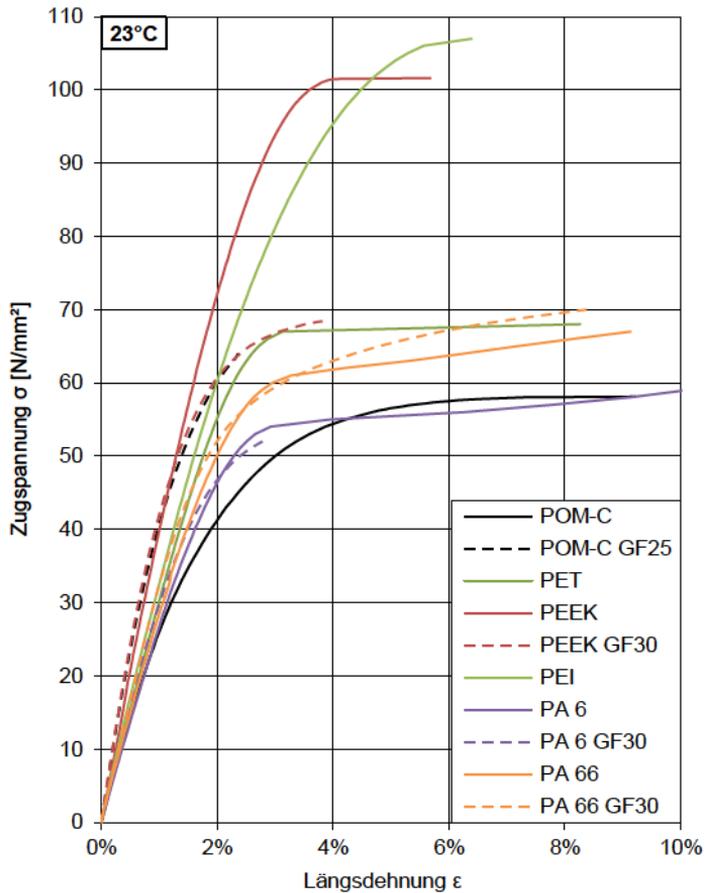


Bild 63

Spannungs- Dehnungsverhalten untersuchter Kunststoffe, Mittelwertkurven bei 23°C



	Zug E-Modul E_0 [N/mm ²]	Streck- span- nung [N/mm ²]	Streck- grenze [%]	Reiß- deh- nung [%]	Pois- sonzahl
POM-C	3084 (3000)	58 (70)	8,6	>50 (30)	0,35
POM-C GF25	5008 (9000)	69 (130)	3,1	3,1 (3)	0,38
PET	3150 (3000)	67,9 (85)	4	>12 (15)	0,34
PEEK	4026 (3900)	101,9 (100)	4,4	- (25)	0,39
PEEK GF30	5174 (9700)	69 (156)	4,8	4,8 (2,7)	0,34
PEI	3529 (3100)	107,5 (110)	6,5	- (12)	0,41
PA 6	2773 (3200)	52 (80)	2,6	>20 (30)	0,38
PA 6 GF30	3202 (9500)	58,9 (180)	3 - 9	3 - 9 (3)	0,40
PA 66	2895 (3300)	59 (85)	3	>30 (50)	0,39
PA 66 GF30	3411 (10000)	72 (185)	12,7	12,7 (3)	0,30

Tafel 17
Im Zugversuch nach DIN EN
ISO 527 bestimmte Materi-
alkennwerte bei +23°C¹¹³

Die Kurvenverläufe der in Bild 63 dargestellten Spannungs-Dehnungsbeziehungen lassen sich in festgelegten Grenzwerten durch polynomische Funktionen abbilden. Für die bei 23°C ermittelten Spannungs-Dehnungsbeziehungen liefern polynomische Funktionen 5. Grades eine gute Approximation an die Kurvenverläufe. Mit Hilfe dieser Ersatzfunktion lassen sich der Sekantenmodul E_s als Quotient aus Spannung und zugehöriger Dehnung, und der Tangentenmodul E_t als Anstieg der Spannungs-Dehnung-Kurve an jedem beliebigen Dehnungswert innerhalb der Gültigkeitsgrenzen bestimmen.

$$\sigma(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^5 + b \cdot \varepsilon^4 + c \cdot \varepsilon^3 + d \cdot \varepsilon^2 + e \cdot \varepsilon$$

Gleichung 5

¹¹³ Die in Klammern stehenden Werte entsprechen den Eingangswerten nach Tafel 16.

Die Bestimmung der Parameter a bis e erfolgte mit Hilfe der Trendlinienfunktion von MS Excel. Die Funktionsverläufe sind nur in den jeweils angegebenen Grenzwerten von $0 < \varepsilon < \varepsilon_{\max}$ gültig.

Material	a	b	c	d	e	ε_{\max}
POM-C	11431851,6	-5082827,3	877428,3	-75162,5	3258,9	9%
POM-C GF25	-4151413568,1	246770802,8	-3402876,8	-114681,9	5350,1	2,3%
PET	700293797,1	-76156322	1522465,6	-30375,8	3249,7	3%
PEEK	285658413,3	-18326815,7	-322055,9	-17224,1	4188,8	5,5%
PEEK GF30	-1355020248,1	121168599,6	-2058348,3	-119940,9	5503,1	3,7%
PEI	78478990,6	-9085601,2	307518,4	-33211,1	3606,3	6,4%
PA6	6773161865,3	-365894703,6	5821638,4	-55460,9	2939,2	2,3%
PA6 GF30	915149408,1	-4655754,4	-1627809,3	-25265,8	3387	2,8%
PA66	5908247310,4	-433653785,1	10404012,7	-129611,9	3470,7	3%
PA66 GF30	1563036625,4	-16167915,5	-2857230,8	10999,8	3410,4	3%

Tafel 18

Parameter a-e der polynomischen Ersatzfunktion $\sigma(\varepsilon)$ in N/mm² bei 23°C und Gültigkeitsgrenze von ε

5.3.7 Versuchsergebnisse bei +50°C

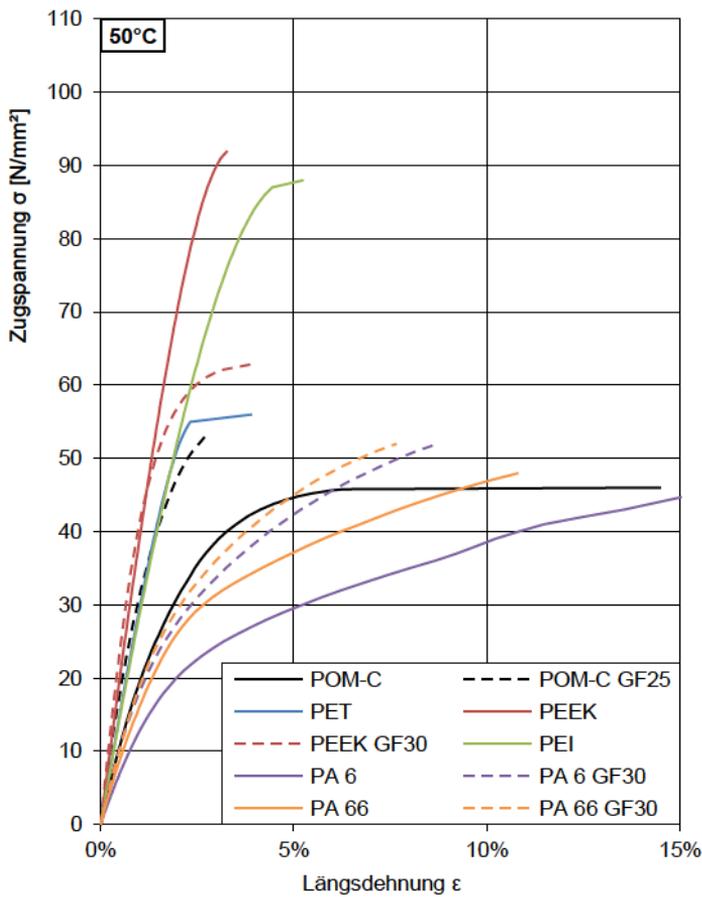


Bild 64
Spannungs- Dehnungsverhalten untersuchter Kunststoffe, Mittelwertkurven bei 50°C

Kunststoff	Zug E-Modul E_0 [N/mm²]	Streckspannung [N/mm²]	Streckgrenze [%]	Reißdehnung [%]	Poissonszahl
POM-C	2284	46	9,5	>15	0,4
POM-C GF25	3919	52-62	3,0-4,3	3,0-4,3	0,4
PET	3050	56	2,8	>15	0,43
PEEK	4150	93	3,5-4,0	-	0,36
PEEK GF30	5000	63	5,0	5,0	0,25
PEI	3000	87-95	6,0	-	0,37
PA 6	1474	25	2,5	>20	0,41
PA 6 GF30	2168	60-63	16-22	16-22	0,19
PA 66	1862	30	2,5	>12	0,4
PA 66 GF30	2164	60-67	16-23	16-23	0,30

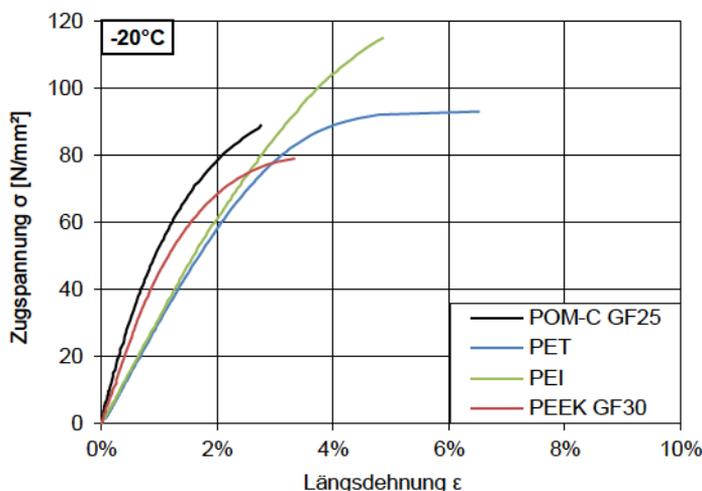
Tafel 19
Im Zugversuch nach DIN EN ISO 526 bestimmte Materialkennwerte bei +50°C

5.3.8 Versuchsergebnisse bei -20°C

Die Zugversuche bei -20°C wurden nur an den Materialien POM-C GF25, PET, PEEK GF30 und PEI durchgeführt, da die optische Dehnungsmessung bei diesen Versuchen nur bedingt funktionierte. Auf den Oberflächen der Kunststoffschulterstäbe bildeten sich in der Temperierkammer der Prüfmaschine bei -20°C Eiskristalle. Durch die Reflektionen der Eiskristalle wurde die Erfassung der Dehnmessmarken durch das Videoextensometer gestört. Eine vollständige Erfassung der Dehnungen war nur bei POM-C GF25 und PEI möglich. Bei PET und PEEK GF30 konnten nur die Längsdehnungen erfasst werden. Die Dehnungsmessung bei PEEK ist vollständig fehlgeschlagen. Auch lagen vor Versuchsbeginn erste Ergebnisse aus den Kriechversuchen an den Kunststoffen vor, aus deren Erkenntnissen eine weitere Untersuchung an den vier Polyamiden und dem unverstärkten POM-C nicht zweckmäßig erschien.

Bild 65

Spannungs- Dehnungsverhalten untersuchter Kunststoffe, Mittelwertkurven bei -20°C



Tafel 20

Im Zugversuch nach DIN EN ISO 526 bestimmte Materialkennwerte bei -20°C

Kunststoff	Zug E-Modul E_0 [N/mm ²]	Streckspannung [N/mm ²]	Streckgrenze [%]	Reißdehnung [%]	Poissonzahl
POM-C GF25	6363	88-96	2,7-3,7	2,7-3,7	0,39
PET	2745	93	6,0	>10	-
PEEK GF30	4785	80-85	4,0-5,0	4,0-5,0	-
PEI	2898	126	6,0-8,0	>8	0,37

5.3.9 Zusammenfassung

Kunststoff		Zug	Streck-	Streck-	Reiß-	Pois-
		E-Modul	span-	grenze	dehnung	sonzahl
		E_0	nung			
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	
POM-C	+23°C	3084 (3000)	58 (70)	8,6	>50 (30)	0,35
	+50°C	2284	46	9,5	>15	0,4
POM-C GF25	-20°C	6363	88-96	2,7-3,7	2,7-3,7	0,39
	+23°C	5008 (9000)	69 (130)	3,1	3,1 (3)	0,38
	+50°C	3919	52-62	3,0-4,3	3,0-4,3	0,4
PET	-20°C	2745	93	6,0	>10	-
	+23°C	3150 (3000)	67,9 (85)	4	>12 (15)	0,34
	+50°C	3050	56	2,8	>15	0,43
PEEK	+23°C	4026 (3900)	101,9 (100)	4,4	- (25)	0,39
	+50°C	4150	93	3,5-4,0	-	0,36
PEEK GF30	-20°C	4785	80-85	4,0-5,0	4,0-5,0	-
	+23°C	5174 (9700)	69 (156)	4,8	4,8 (2,7)	0,34
	+50°C	5000	63	5,0	5,0	0,25
PEI	-20°C	2898	126	6,0-8,0	>8	0,37
	+23°C	3529 (3100)	107,5 (110)	6,5	- (12)	0,41
	+50°C	3000	87-95	6,0	-	0,37
PA 6	+23°C	2773 (3200)	52 (80)	2,6	>20 (30)	0,38
	+50°C	1474	25	2,5	>20	0,41
PA 6 GF30	+23°C	3202 (9500)	58,9 (180)	3 - 9	3 - 9 (3)	0,40
	+50°C	2168	60-63	16-22	16-22	0,19
PA 66	+23°C	2895 (3300)	59 (85)	3	>30 (50)	0,39
	+50°C	1862	30	2,5	>12	0,4
PA 66 GF30	+23°C	3411 (10000)	72 (185)	12,7	12,7 (3)	0,30
	+50°C	2164	60-67	16-23	16-23	0,30

Tafel 21

Im Zugversuch nach DIN EN ISO 526 bestimmte Materialkennwerte bei -20°C, +23°C und +50°C, Werte in Klammern entsprechen den Eingangswerten nach Tafel 16

Tafel 21 zeigt eine Aufstellung der an den Kunststoffen ermittelten Materialkennwerte in Gegenüberstellung der Materialtemperatur und der Eingangswerte aus den Datenblättern der Hersteller. Für die unverstärkten Kunststoffe zeigen die im Versuch ermittelten Werte des Elastizitätsmoduls eine gute Übereinstimmung mit den Angaben der Hersteller. Herstellerangaben zur Zugfestigkeit der unverstärkten Kunststoffe konnten nur für PEI und PEEK bestätigt werden. Bei POM-C, PET, PA6 und PA 66 wurden Festigkeitswerte von 65%-83% der Herstellerangaben ermittelt. In Ergänzung zu den bekannten Materialkennwerten konnte für alle Kunststoffe bei den Temperaturen +23°C und +50°C eine Streckgrenze ermittelt werden. Eine Auswertung der Reißdehnungen war anhand der durchgeführten Versuche nur bedingt möglich. Bei fast alle Proben der unverstärkten Kunststoffe lagen die Stellen der maximalen Dehnungen, mit deutlich sichtbaren Einschnürungen wie in Bild 52 dargestellt, außerhalb der Messmarken zur Dehnungsmessung. Die an diesen Proben ermittelten Dehnungen beim Versagen des Prüfkörpers sind zu niedrig. Die Versuchsergebnisse der Zugprüfung bei -20°C sind unvollständig. Aufgrund von Eiskristallbildung auf den Prüfkörpern konnte die optische Dehnungsmessung nicht mehr exakt erfolgen bzw. war nicht mehr möglich.

Alle untersuchten Kunststoffe zeigten eine mehr oder weniger ausgeprägte Abhängigkeit der Zugfestigkeit und Steifigkeit von der Materialtemperatur. Bei den Kunststoffvertretern der Polyacetale¹¹⁴ und bei denen der Polyamide¹¹⁵ ist die Temperaturabhängigkeit der Materialkennwerte hoch. Eine Erhöhung der Temperatur von 23°C auf 50°C hat eine Verringerung der Steifigkeit um 25%-47% zur Folge. Noch deutlicher ist der Verlust der Zugfestigkeit bei den unverstärkten Polyamiden auf Werte von nur noch 50%. PEEK und PEI zeigten im untersuchten Temperaturbereich nur geringe Änderungen der Steifigkeit und Zugfestigkeit. Bei PET bewirkt eine Temperaturänderung eine deutliche Änderung in der Zugfestigkeit, jedoch kaum eine Änderung der Steifigkeit.

¹¹⁴ POM-C und POM-C GF25.

¹¹⁵ PA6, PA6 GF30, PA66, PA66 GF30.

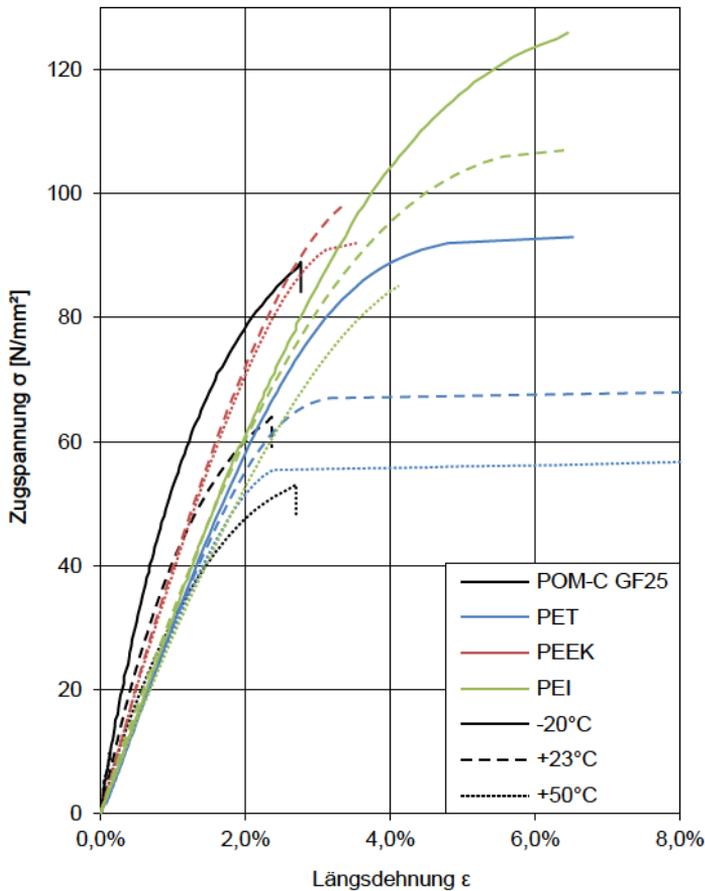


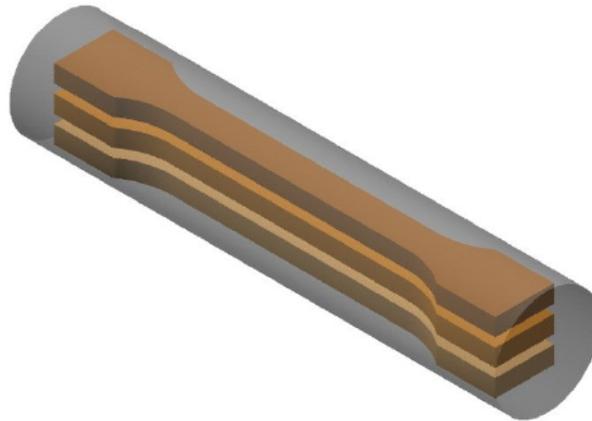
Bild 66
 Spannungs- Dehnungsverhalten untersuchter Kunststoffe, Mittelwertkurven bei -20°C, +23°C und +50°C

Bei den vier untersuchten Kunststoffen mit Glasfaserverstärkung wurden eklatante Unterschiede des Elastizitätsmoduls, der Streckgrenze und auch der Reißdehnung zwischen den an den Kunststoffen im Versuch ermittelten Werten und den Angaben der Hersteller und der Fachliteratur festgestellt. Markant ist hier, dass bei dem Hochleistungskunststoff PEEK durch Zugabe von Glasfasern die Steifigkeit erhöht wird, jedoch die Streckgrenze auf ein Niveau von etwa 70% des unverstärkten Materials absinkt. Zu den Gründen hierfür sei zunächst auf Abschnitt 4.3.3 zu den kurzfaserverstärkten Thermoplasten verwiesen. Die Angaben der Kunststoffhersteller zu Materialsteifigkeit und -festigkeit beruhen auf Messergebnissen, welche an Schulterstäben ermittelt wurden, die im Spritzgießverfahren hergestellt wurden. Es ist davon auszugehen, dass bei diesen Proben eine sehr ausgeprägte Faserorientierung für optimale Festigkeiten und Steifigkeiten in Zugrichtung vorhanden ist.

Die Herstellung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Proben erfolgte durch mechanische Bearbeitung von extrudierten Halbzeugen. Aus Abschnitt 4.3.3 ist bekannt, dass es in spritzgegossenen Formteilen und extrudierten Halbzeugen unterschiedliche Bereiche der Faserorientierungen gibt. Die Proben aus POM-C GF25, PEEK GF30 und PA66 GF30 wurden aus Rundstäben \varnothing 30 mm – 36 mm herausgearbeitet. Die Ausarbeitung der Proben aus PA6 GF30 erfolgte aus einer Platte $d = 10$ mm.

Bild 67

Darstellung der Lage der mechanisch herausgearbeiteter Schulterstäbe aus den Rundstäben



Durch die mechanische Bearbeitung wurden vor allem oberflächennahe Materialbereiche entfernt, in denen die Fasern nach Abschnitt 4.3.3 eine Orientierung in Längsrichtung des Schulterstabes und somit in Zugrichtung beim Versuch aufweisen. Für die hergestellten Schulterstäbe ist daher davon auszugehen, dass in dem Bereich mit konstantem Stabquerschnitt die Fasern eher ungerichtet oder im ungünstigsten Fall sogar senkrecht zur Zugrichtung orientiert waren. Durch Aufnahmen der Bruchflächen der geprüften Schulterstäbe im Rasterelektronenmikroskop (REM) wurde nachgewiesen, dass in den Bereichen der Bruchflächen der geprüften Schulterstäbe keine ausgeprägte Faserorientierung in Zugrichtung vorhanden ist. In allen aufgenommenen Bruchflächen waren die Verstärkungsfasern entweder unregelmäßig oder vorrangig quer zur Zugrichtung orientiert. An den Proben aus PA6 GF30, die im Vergleich mit den Herstellerangaben die größten Festigkeitsunterschiede aufzeigte, waren ausgeprägte Bereiche mit Anhäufungen von Glasfasern und in allen Proben Fehlstellen ohne Glasfaseranteil erkennbar.

Kunststoff	Bruchflächenbild	Glasfaserlänge	Glasfaserdurchmesser
POM-C GF25	vorwiegend liegende Fasern in der Ebene der Bruchfläche homogene Verteilung	370-400 μm	15 μm
PEEK GF30	unregelmäßige Orientierung der Fasern homogene Verteilung	260-400 μm	20 μm
PA 6 GF30	unregelmäßige Orientierung der Fasern Bereiche mit Faseranhäufungen in allen Proben große Bereiche ohne Fasern hoher Luftporenanteil	300-400 μm	10 μm
PA 66 GF30	vorwiegend liegende Fasern in der Ebene der Bruchfläche Bereiche mit vielen Luftporen im Kunststoff Faseranhäufungen	320-360 μm	14 μm

Tafel 22
Bewertung von Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der Bruchflächen

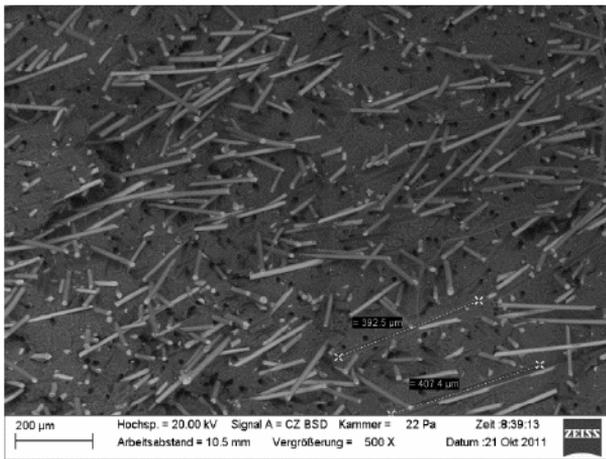


Bild 68
REM-Aufnahme POM-C GF25, Vergrößerung 500x

Bild 69
REM-Aufnahme PEEK
GF30, Vergrößerung 500x

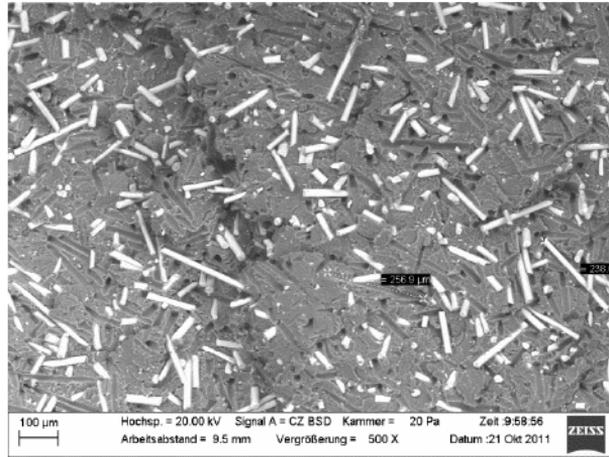


Bild 70
REM-Aufnahme PA6 GF30,
Vergrößerung 500x,
im unteren Bildbereich
Fehlstelle ohne Glasfasern

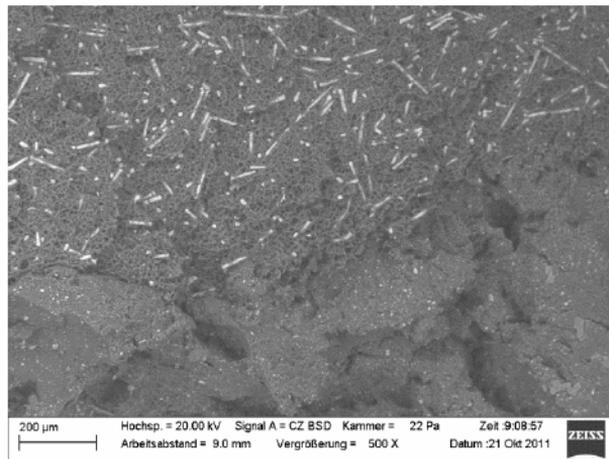
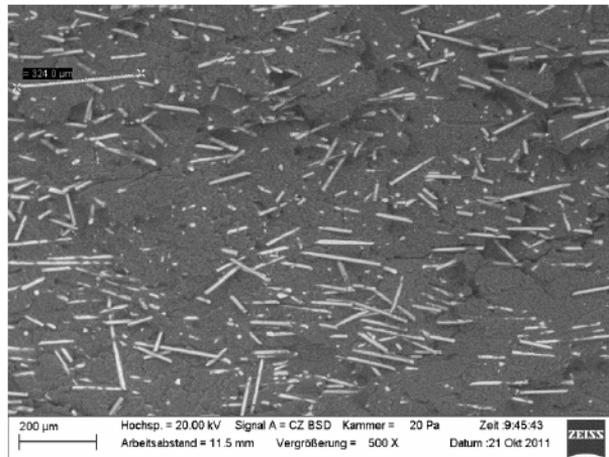


Bild 71
REM-Aufnahme PA66
GF30, Vergrößerung 500x



Die Angaben der Tafel 16 zu den Eingangswerten der Materialeigenschaften nach Datenblättern der Hersteller und die Angaben der Fachliteratur waren ursprünglich Grundlage

der Auswahl und Bestellung der zu untersuchenden Kunststoffe. Zwischenzeitlich hat der Hersteller der Kunststoffgranulate¹¹⁶ in 2011 die Datenblätter der Kunststoffe überarbeitet. In der Überarbeitung wurden für die glasfaserverstärkten Kunststoffe die Werte für Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul deutlich herabgesetzt. Auf Nachfrage wurde bestätigt, dass der Sachverhalt der geringeren Festigkeiten und Steifigkeiten dem Kunststoffhersteller auch vor 2011 bekannt war, aber aus Wettbewerbsgründen in den Datenblättern die maximal erreichbaren Festigkeits- und Steifigkeitswerte angegeben wurden. Die tatsächlichen Materialkennwerte erhielt der Anwender nur nach separater Anforderung eines Werkzeugnisses. In der gängigen Fachliteratur wird auf dieses Problem ebenfalls nur sehr unzureichend eingegangen. Sämtliche Angaben zu Zugfestigkeit und Steifigkeit beruhen auf Ergebnissen von Proben mit optimaler Faserverteilung.

Kunststoff	Datenblätter Stand 2008		Datenblätter Stand 2011	
	Zug E-Modul	Streckspannung	Zug E-Modul	Zug E-Modul
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
POM-C	3000	70	2800	67
POM-C GF25	9000	130	4500	65
PET	3000	85	3000	85
PEEK	3900	100	4000	110
PEEK GF30	9700	156	6000	80
PEI	3100	110	3100	110
PA 6	3200	80	3200	80
PA 6 GF30	9500	180	5000	100
PA 66	3300	85	3300	85
PA 66 GF30	10000	185	5000	100

Tafel 23
Gegenüberstellung der Datenblattangaben des Kunststoffherstellers für 2008 und 2011

¹¹⁶ Stellt das Granulat oder das Granulatgemisch für die weiterverarbeitende Industrie zur Verfügung

5.4 Uniaxiale Druckkraftbeanspruchung

5.4.1 Allgemeines

Das Materialverhalten der Kunststoffe unter Druckbeanspruchung spielt bei den technischen Anwendungen im Maschinenbau und Bauwesen gegenüber der Zugbeanspruchung eine untergeordnete Rolle. Dies ist sicherlich ein Hauptgrund dafür, dass sich die Angaben zu Materialeigenschaften in der Fachliteratur und in Produktdatenblättern zum größten Teil auf Werte aus Zugversuchen beziehen. Benötigt der Konstrukteur Angaben zur Druckfestigkeit, kann er sich meist nur auf die Werte der Zugfestigkeit beziehen, in dem Vertrauen, dass die Druckfestigkeitswerte über denen der Zugfestigkeit liegen¹¹⁷. Problematischer wird es bei der Berechnung von Dehnungen unter Druckbeanspruchung. Wird hier der im Zugversuch ermittelte E-Modul eingesetzt, ist die Berechnung aufgrund nicht vorhandener exakter Materialkennwerte fehlerhaft.

Das Vorgehen zur Bestimmung des Materialverhaltens von Kunststoffen unter uniaxialer Druckkraftbeanspruchung wird in DIN EN ISO 604 beschrieben. Das Verfahren kann sowohl für faserverstärkte, als auch für unverstärkte Kunststoffe angewandt werden. Die Form der Prüfkörper muss einem rechtwinkligen Prisma, einem Zylinder oder einem Rohr entsprechen. Empfohlen wird die Verwendung von rechtwinkligen Prismen, die aus den Schulterstäben nach DIN EN ISO 3167 herausgeschnitten werden. Dabei werden für die Bestimmung des Druck-Elastizitätsmoduls und der Druckfestigkeit unterschiedliche Prüfkörpergeometrien angewandt.

¹¹⁷ Vergleiche Ehrenstein 1999, Seite 168

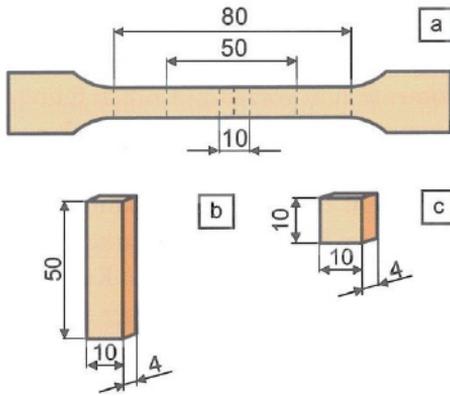


Bild 72
Empfohlene Prüfkörpergeometrien nach DIN EN ISO 604

- a Schulterstab nach DIN EN ISO 3167
- b Prüfkörper für die Bestimmung des E-Moduls
- c Prüfkörper für die Bestimmung des Spannungs-Stauchungsverhaltens

Bei Verwendung anderer Prüfkörpergeometrien muss folgende Gleichung eingehalten sein:

$$e_c \leq 0,4 \cdot \frac{x^2}{l^2}$$

Gleichung 6

- e_c maximale nominelle Stauchung
- x Außendurchmesser des Zylinders oder Rohres, Dicke
- l Länge des Prüfkörpers in Druckkrafttrichtung

Im Versuch wird die Belastung mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 mm/min in den Prüfkörper eingetragen, wobei die Stauchung mit einer Auflösung von 0,1 μm aufzuzeichnen ist.

Die Bestimmung des Druck-Elastizitätsmoduls erfolgt analog dem Vorgehen beim Zugversuch nach DIN EN ISO 527 im Dehnungs- bzw. Stauchungsbereich von 0,05% bis 0,25%.

5.4.2 Versuchsdurchführung

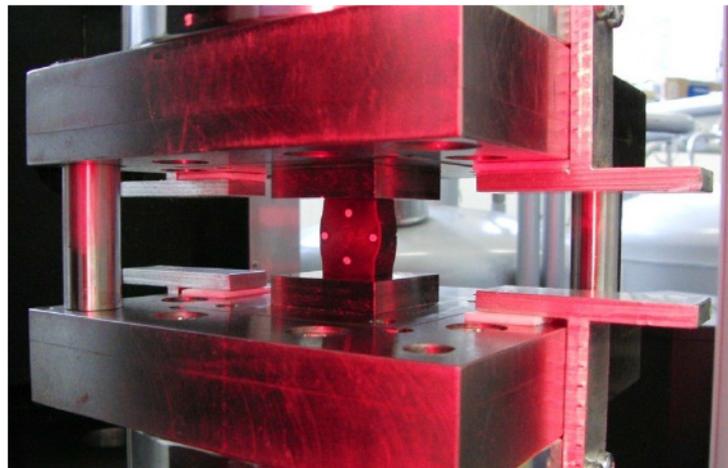
Die für die Versuche notwendigen Prüfkörper wurden ähnlich der Schulterstäbe bei der Zugprüfung aus Platten und Rundstäben durch Sägen und Fräsen herausgearbeitet. Als Prüfkörperform wurde ein prismatischer Prüfkörper in den Abmessungen 10 mm x 20 mm x 30 mm ($l \times b \times h$) ausgewählt. Die Messung der Stauchung und Querdehnung erfolgte im Versuch berührungslos über ein Videoextensometer. Die dazu erforderlichen Messmarken wurden mit einem Lackstift direkt auf die Prüfkörper aufgetragen. Die Ausgangslängen zwischen den Messmarken betragen in Stauchungsrichtung 20 mm und in Querdehnungsrichtung

15 mm. Als Abbruchkriterium für den Druckversuch wurde das Erreichen einer Druckfließgrenze oder eine Stauchung des Prüfkörpers $> 6\%$ festgelegt.

Analog dem Vorgehen bei den Zugversuchen wurden mit den Kunststoffen 3 Messreihen bei den Temperaturen -20°C , $+23^{\circ}\text{C}$ und $+50^{\circ}\text{C}$ gefahren. Bei den kurzfaserverstärkten Kunststoffen erfolgte eine Unterscheidung nach der Extrusionsrichtung des Halbzeuges. Es wurden definierte Prüfkörper hergestellt, bei denen die Druckbelastung im späteren Versuch parallel (II) und senkrecht (T) zur Extrusionsrichtung erfolgte. Bei den Zugversuchen war diese Unterscheidung aufgrund der Form und Größe der Prüfkörper und der dafür zur Verfügung stehenden Halbzeuge nicht möglich. Die Untersuchung des unverstärkten PEEK entfiel, da hierfür zu wenig Ausgangsmaterial zur Verfügung stand.

Die Prüfkörper wurden mit einer Kraft von 100 N vorbelastet und anschließend mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min Traversenweg bis zum Abbruchkriterium belastet. Der Abbruch der Versuche erfolgte bei Erreichen einer Druckfließgrenze oder manuell nach Erreichen einer Stauchung $>6\%$.

Bild 73
Druckprüfung an einem Prüfkörper aus POM-C GF25 mit Messmarken zur Stauchungs-, Dehnungserfassung



5.4.3 Versuchsergebnisse

Alle Kunststoffe zeigen in den untersuchten Temperaturbereichen ein duktileres Materialverhalten. Eine ausgeprägte Druckfließgrenze wurde nur bei PEI in allen drei Temperaturbereichen festgestellt. Alle anderen Materialien zeigten nach Überschreiten einer kritischen Druckspannung ein

Druckspannung-Stauchungs-Verhalten mit nichtlinearem Kurvenanstieg. Die Feststellung einer Druckfestigkeit ist für diese Materialien auf Grundlage der Druckversuche nicht möglich. Im Anfangsbereich zwischen 0,05% und 0,25% Dehnung wurde der Druck-Elastizitätsmodul E_0 bestimmt. Des Weiteren erfolgte die Berechnung einer mittleren Poissonszahl ν aus dem Verhältnis von gemessener Stauchung zur Querdehnung. Die nachfolgenden Diagramme geben die Mittelwertkurven aus jeweils 5 Einzelmessungen wieder. Die Kurven stellen nicht die maximal erreichte Druckspannung dar, sondern enden an dem Punkt, an dem die 1. der fünf Einzelmessungen die Streckgrenze erreicht bzw. der Einzelversuch manuell wegen Überschreitung der festgelegten Stauchungsgrenze abgebrochen wurde.

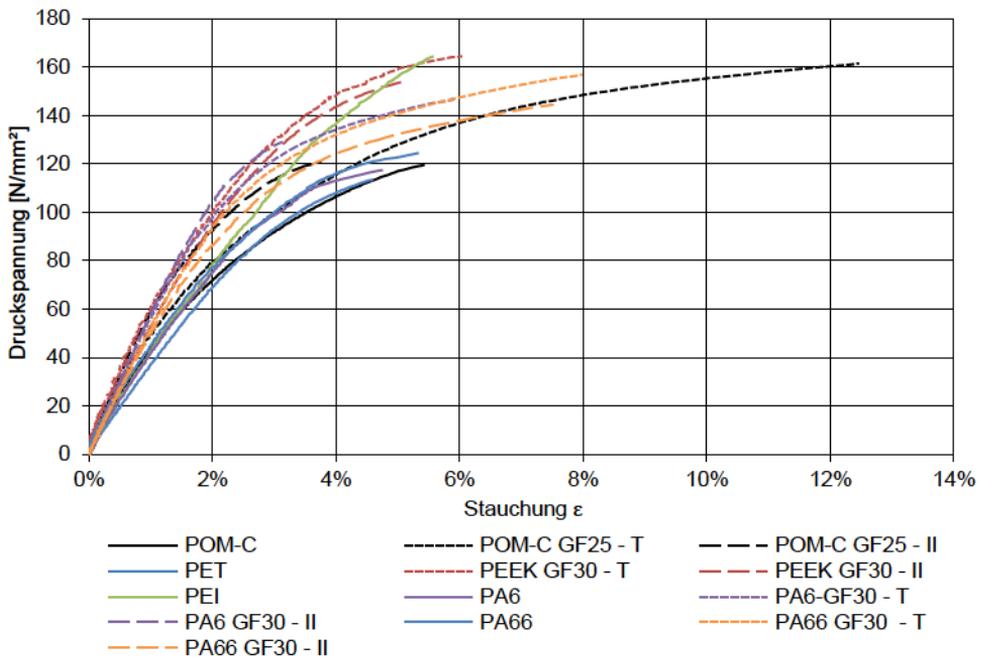


Bild 74
Mittelwertkurven bei -20°C

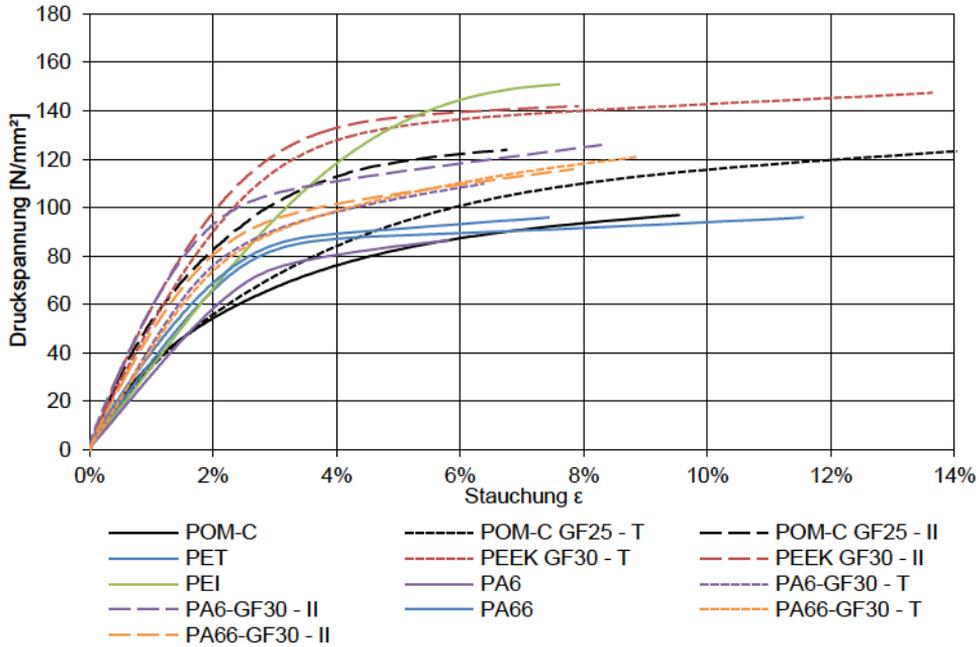


Bild 75
Mittelwertkurven bei +23°C

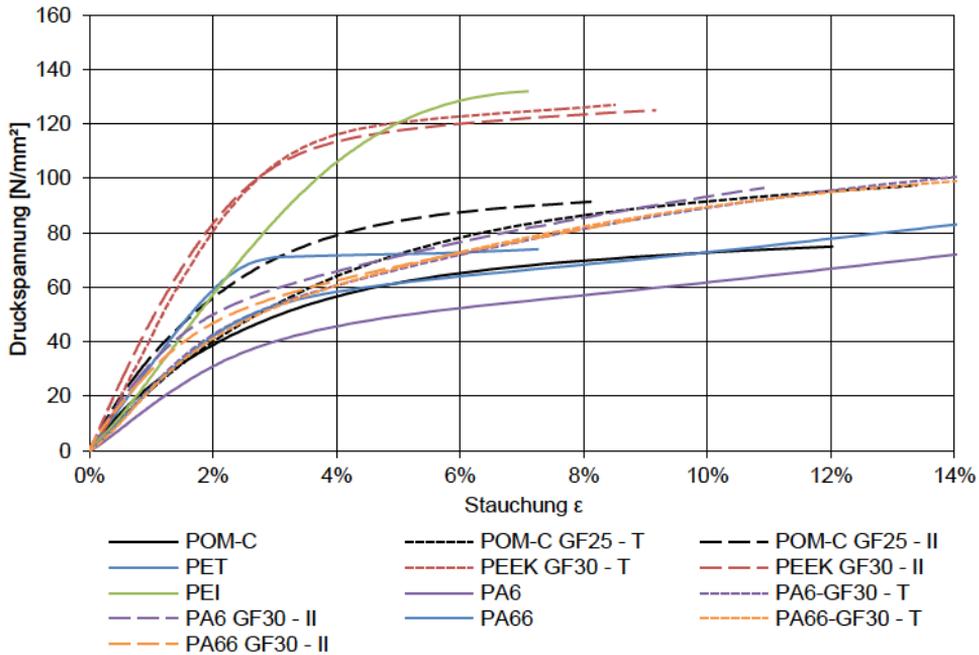


Bild 76
Mittelwertkurven bei +50°C

Die Kurvenverläufe der in Bild 74 bis Bild 76 dargestellten Druckspannungs-Stauchungsbeziehungen lassen sich in festgelegten Grenzwerten von ε durch polynomische Funktionen $\sigma(\varepsilon)$ abbilden. Für die ermittelten Druckspannungs-Stauchungsbeziehungen liefern polynomische Funktionen bis 6. Grades eine gute Approximation an die Kurvenverläufe. Mit Hilfe dieser Ersatzfunktionen lassen sich vereinfacht der Sekantenmodul E_s , als Quotient aus Spannung und zugehöriger Dehnung, und der Tangentenmodul E_t als Anstieg der Spannungs-Dehnung-Kurve an jedem beliebigen Dehnungswert innerhalb der Gültigkeitsgrenzen bestimmen.

$$\sigma(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^6 + b \cdot \varepsilon^5 + c \cdot \varepsilon^4 + d \cdot \varepsilon^3 + e \cdot \varepsilon^2 + f \cdot \varepsilon$$

Gleichung 7

Die Bestimmung der Parameter a bis f erfolgte mit Hilfe der Trendlinienfunktion von MS Excel. Die Funktionsverläufe sind nur in den jeweils angegebenen Grenzwerten von $0 < \varepsilon < \varepsilon_{\max}$ gültig. Druckspannungswerte sowie Dehnungs- bzw. Stauchungswerte sind mit positivem Vorzeichen einzusetzen.

Kunststoff		a	b	c	d	e	f	ϵ_{\max}
POM-C	-20°C	0	-219564091	18316693	317458	-91462	5201	5%
	+23°C	-2509171123	775839222	-94223734	5813382	-206366	5160	9%
	+50°C	-412644695	156259000	-23355745	1822906	-87926	3146	11%
POM-C GF25 T	-20°C	-3627548759	1122598399	-135350624	8164849	-279684	7178	9%
	+23°C	-24292089	18004348	-5312283	814165	-72134	3991	20%
	+50°C	85547554	-32553171	4254703	-137857	-19787	2420	13%
POM-C GF25 II	-20°C	0	0	-29845924	3440001	-203135	7580	4%
	+23°C	-2354645726	737659542	-87987406	5536953	-228778	7102	7%
	+50°C	-2944792350	743369888	-73688965	3896912	-143276	4594	8%
PET	-20°C	0	0	0	-164271	-26911	4049	5%
	+23°C	-103734383757	15349976964	-824685781	19256403	-230041	4675	5%
	+50°C	-67466782592	9354046771	-481051049	9576207	-89996	3494	3%
PEEK GF30 T	-20°C	-180001780153	28363351925	-1713021461	49699004	-762125	10113	5%
	+23°C	282458744	-113417737	14832998	-358716	-73150	6015	12%
	+50°C	228344326826	-28999527258	1452157039	-36710043	428188	2436	4%
PEEK GF30 II	-20°C	0	0	3901160	-295070	-50461	5836	5%
	+23°C	0	0	-1119675	816008	-123967	7062	7%
	+50°C	1788608281	-585484481	69254404	-3156242	-9279	5152	9%
PEI	-20°C	0	0	0	-23838	-26212	4486	7%
	+23°C	0	84426805	-11305586	286173	-14301	3582	7%
	+50°C	213884298	-95098187	19892040	-1947679	60509	2293	7%
PA6	-20°C	0	0	0	40146	-49556	4748	5%
	+23°C	-38986087657	6231258453	-343806995	7380555	-79980	3445	5%
	+50°C	240187415	-101016611	15315181	-921667	5552	1668	14%
PA6-GF30 T	-20°C	0	0	7239463	-101436	-89278	6637	6%
	+23°C	5749405519	-1815600478	194338005	-8447322	85764	4160	6%
	+50°C	41869601	-18609584	2368928	39230	-30241	2587	16%
PA6 GF30 II	-20°C	768565324768	-70890512693	2515659848	-44534475	337179	5034	3%
	+23°C	-964379152	202175937	-25381161	2890071	-211119	7832	7%
	+50°C	1849975	39621728	-13735938	1822018	-117484	4214	10%
PA66	-20°C	0	1925775840	-263508368	13007683	-318942	6776	4%
	+23°C	-134105188555	19803108006	-1084925944	27213665	-367598	5866	5%
	+50°C	89650191707	-10739653836	516739997	-12891772	139491	1763	4%
PA66 GF30 T	-20°C	0	0	0	475604	-91180	6219	8%
	+23°C	5694475516	-1568084117	159085809	-6793455	61904	4113	8%
	+50°C	113885582	-50188944	7538114	-358000	-15636	2380	10%
PA66 GF30 II	-20°C	0	0	0	471900	-88085	5882	7%
	+23°C	1575480009	-505959224	52625300	-1494692	-77155	5797	7%
	+50°C	-350435894	135889494	-22999661	2158025	-117671	3980	8%

Tafel 24
Parameter a bis f und Gren-
zen der Ersatzfunktionen

Kunststoff	-20°C			+23°C			+50°C		
	E ₀	ν	E _{S,-30MPa} E _{S,-60MPa}	E ₀	ν	E _{S,-30MPa} E _{S,-60MPa}	E ₀	ν	E _{S,-30MPa} E _{S,-60MPa}
	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		[N/mm ²]
POM-C	5250 (4920)	0,41	(4110) (2830)	4356 (4580)	0,49	(2840) (1250)	2850 (2890)	0,43	(1580) (520)
POM-C GF25 T	6550 (6400)	0,49	(4840) (3045)	3712 (3780)	0,4	(2900) (1800)	2270 (2350)	0,45	(1810) (1020)
POM-C GF25 II	6930 (6990)	0,37	(6030) (4370)	6450 (6450)	0,49	(5260) (3515)	4000 (4190)	0,40	(3110) (1570)
PET	3500 (3960)	0,42	(3600) (3010)	3686 (4110)	0,49	(3290) (2780)	3160 (3290)	0,43	(3080) (2135)
PEEK GF30 T	6140 (8180)	0,47	(6160) (4260)	5300 (5790)	0,4	(5225) (4230)	3510 (3460)	0,3	(4695) (3910)
PEEK GF30 II	5440 (5680)	0,36	(5280) (4610)	6800 (6690)	0,45	(5940) (4770)	5140 (5100)	0,41	(4880) (3875)
PEI	3680 (4407)	0,49	(4120) (3700)	3300 (3540)	0,4	(3370) (3130)	2320 (2460)	0,35	(2970) (2915)
PA 6	4250 (4600)	0,49	(4080) (3310)	3000 (3250)	0,45	(2970) (2250)	1560 (1670)	0,41	(1360) (300)
PA 6 GF30 T	5950 (6360)	0,49	(5780) (4715)	4040 (4350)	0,4	(4380) (3350)	2080 (2490)	0,36	(1930) (810)
PA 6 GF30 II	5830 (5740)	0,37	(6090) (5355)	6421 (7220)	0,49	(6180) (4315)	3610 (3870)	0,38	(2770) (750)
PA 66	4740 (5915)	0,49	(4200) (2955)	4190 (4950)	0,49	(3480) (2845)	2090 (2090)	0,37	(2220) (1470)
PA 66 GF30 T	5400 (5949)	0,49	(5300) (4345)	4019 (4240)	0,39	(4160) (3120)	1910 (2330)	0,34	(1905) (830)
PA 66 GF30 II	5640 (5621)	0,35	(4915) (3935)	5400 (5550)	0,42	(4800) (3470)	3430 (3640)	0,43	(2150) (620)

Tafel 25

Ermittelte Druck-E-Modulie E₀, mittlere Poissonzahlen ν und Sekantenmodulie E_{S,-30MPa} und E_{S,-60MPa} bei einer Druckspannung von 30 MPa bzw. 60 MPa und -20°C, +23° und +50°C. Werte in Klammern ergeben sich durch Berechnung unter Ansatz der Ersatzfunktionen σ(ε) nach Tafel 24.

5.4.4 Zusammenfassung

Im Ergebnis der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass alle untersuchten Materialien oberhalb einer kritischen Druckspannung ein ausgeprägt nichtlineares Druckspannungs-Stauchungs-Verhalten aufweisen. Die kritische Druckspannung ist abhängig von der Umgebungstemperatur und liegt im Bereich von etwa 30 N/mm² bei +50°C bis 70 N/mm² bei -20°C. Unterhalb der kritischen Druckspannung kann man vor allem für die Materialien PET, PEEK GF30 und PEI von einer annähernd linearen Druckspannungs-Stauchungs-Beziehung ausgehen. Deutlich wird dies bei Vergleich der Werte von E_0 , $E_{S,-25MPa}$ und $E_{S,-60MPa}$ nach Tafel 25. Hier sind bei PET, PEEK GF30 und PEI nur geringe Unterschiede zwischen den Werten der jeweiligen Temperaturgruppe ersichtlich. Werden Steifigkeitswerte für erste Vorbemessungen mit den Kunststoffen benötigt, ist die Verwendung des Sekantenmoduls E_S zu empfehlen. Dieser lässt sich unter Verwendung von polynomischen Ersatzfunktionen und den Parametern und Einsatzgrenzen nach Tafel 24 für beliebige Dehnungen bzw. Druckspannungen einfach bestimmen.

Die untersuchten Vertreter der Kunststoffe POM-C, PA6 und PA66 zeigten sowohl in der glasfaserverstärkten, als auch in der unverstärkten Ausführung eine hohe Temperaturabhängigkeit des Steifigkeitsverhaltens. Durch einen Temperaturanstieg von -20°C auf +50°C nimmt die Steifigkeit um 50% - 70% ab. Anders bei den untersuchten Vertretern von PET, PEEK GF30 und PEI. Hier liegt der Steifigkeitsverlust bei einem Temperaturanstieg von -20°C auf +50°C bei 11% - 30%.

Hinsichtlich der Druckspannung wurden mit PEI und PEEK GF30 bei allen drei Temperaturen die höchsten Werte bei den gleichzeitig geringsten Stauchungen erzielt. Die Beträge der erreichten Druckspannungen liegen bei allen Kunststoffen um 40%-60% über den im Zugversuch ermittelten Beträgen der Streckgrenze. Die Bestimmung einer definierten Druckfestigkeit ist aber anhand der durchgeführten Druckversuche nicht möglich, da sich bis auf PEI keine Druckfließgrenzen eingestellt haben und die Prüfkörper nicht gebrochen sind. Alle Versuche wurden nach Überschreiten der für den Versuchsaufbau kritischen Stauchung manuell abgebrochen. Die in den Versuchen erreichten Druckspannungen

gen nach Bild 74 bis Bild 76 können aber als Ansatz für die Festlegung einer Kurzzeitdruckfestigkeit herangezogen werden.

Das Steifigkeitsverhalten der untersuchten glasfaserverstärkten Kunststoffe POM-C GF25, PA6 GF30 und PA66 GF30 kann als anisotrop bezeichnet werden. Die Druckversuche parallel und senkrecht zur Extrusionsrichtung der Halbzeugmaterialien ergaben deutliche Unterschiede im Steifigkeitsverhalten. Bei PEEK GF30 sind ebenfalls Unterschiede im Steifigkeitsverhalten erkennbar, jedoch so gering, dass dies auch eine Einstufung als isotropes Material zulässt. Zu erwähnen ist auch, dass für POM-C GF25 und PA66 GF30 bei +23°C bzw. +50°C und Belastung senkrecht zur Extrusionsrichtung bis zu einer Druckspannung von etwa 50 N/mm² nahezu kein Unterschied zum unverstärkten Material vorhanden ist. Wenn nicht sichergestellt werden kann, dass die Druckkraftbelastung ausschließlich parallel zur Extrusionsrichtung erfolgt, führt die Verwendung glasfaserverstärkter Materialien nicht zwangsläufig zu einer Verbesserung des Steifigkeitsverhaltens.

Für die Bemessung der Kunststoffe als ein auf Druckkraft beanspruchtes Bauteil ist neben dem Steifigkeitsverhalten auch die Kenntnis der Druckfestigkeit des Materials unverzichtbar. Bei Betrachtung des duktilen Druckspannungs-Stauchungs-Verhaltens der untersuchten Kunststoffe stellt sich daher die Frage, welche Druckspannung die technische Belastungsgrenze darstellt. Die Ergebnisse der durchgeführten Druckversuche lassen nur Rückschlüsse auf die Materialfestigkeit bei kurzzeitiger Belastung zu. Die Bestimmung einer Materialfestigkeit für ständige Belastung muss unter Beachtung des viskoelastischen¹¹⁸ Materialverhaltens der thermoplastischen Kunststoffe erfolgen. Unter ständiger Belastung haben viskose Dehnungen (plastische Dehnungen) und viskoelastische Dehnungen (Kriechen) in Abhängigkeit der Belastungsgröße und der Temperatur einen gro-

¹¹⁸ Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Thermoplaste wird als viskoelastisch bezeichnet. Die Gesamtdehnung unter einer Belastung setzt sich aus 3 Anteilen zusammen. Den elastischen Dehnungen (reversibel), den viskosen, zeitabhängigen Dehnungen (irreversibel) und den viskoelastischen, zeitabhängigen Dehnungen (zeitabhängig reversibel). Ein anschauliches Modell zur mathematischen Abbildung des viskoelastischen Materialverhaltens liefert das 4-Parameter oder Burgers-Modell. Vergleiche Ehrenstein 1999, Seite 160 ff.

ßen Einfluss auf die Dauerfestigkeit bzw. auf die Dehnungen.

5.5 Technisch nutzbare Kurzzeit-Druckfestigkeit

5.5.1 Allgemeines

Das duktile Spannungs-Dehnungs-Verhalten der untersuchten Kunststoffe lässt mehrere Wege zur Festlegung einer Kurzzeitfestigkeit zu. Insofern sich eine Druckfließgrenze wie bei PEI eingestellt hat, so entspricht die Druckspannung an der Druckfließgrenze der Kurzzeitdruckfestigkeit. Dies entspricht dem Vorgehen nach DIN EN ISO 604, wonach die Druckfestigkeit σ_M durch die maximale Druckspannung im Versuch definiert ist. Wird dieses Vorgehen auf Materialien ohne Druckfließgrenze übertragen, so entspricht auch für diese Materialien die maximale im Versuch erreichte Druckspannung der Druckfestigkeit. Da im vorliegenden Fall die Versuche aber manuell nach Überschreiten einer Stauchung von 6% nach Ermessen abgebrochen wurden, stellen diese Werte nicht zwingend die tatsächliche Belastbarkeit dar.

Eine weitere Möglichkeit ist die Festlegung einer maximalen Stauchung. Die zugehörigen Spannungswerte entsprechen der Druckfestigkeit. Die Frage der Höhe der zulässigen Stauchungen muss aber für jeden Anwendungsfall neu betrachtet werden. Dieses Vorgehen stellt nur eine Auswertung nach der Steifigkeit des Materials dar. Bei Festlegung sehr geringer zulässiger Stauchungen würde die Festigkeit eines im Vergleich weichen Materials, wie zum Beispiel PEI, deutlich schlechter bewertet als die eines steiferen Materials.

Einen guten Weg, über die Kurzzeitfestigkeit verschiedene duktile Kunststoffe vergleichen zu können, stellt eine Bestimmung der Kurzzeitfestigkeit im Bezug zum Steifigkeitsverlust des Materials dar. Maßgebender Wert ist hier der Sekantenmodul E_s . Dieser wird im Verhältnis zum Anfangs-E-Modul E_0 gesetzt. Die Festigkeitsgrenze liegt an dem Punkt, an dem das Verhältnis von E_s/E_0 einen festgelegten Wert unterschreitet. Materialien mit einem großen annähernd linearen Druckspannungs-Stauchungs-Verhalten werden so höhere Festigkeitswerte erzielen.

Bei der Bemessung von Bauteilen ist der Ingenieur meist bestrebt diese so zu dimensionieren, dass möglichst keine

inelastischen Dehnungen auftreten. Die Gesamtdehnung eines Kunststoffes, der einer Belastung ausgesetzt ist, setzt sich aus den drei Dehnungsanteilen elastische-, viskoelastische- und viskose Dehnung zusammen¹¹⁹. Die viskose Dehnung ist inelastisch, da diese nach Entfernen der Belastung bestehen bleibt. Die viskoelastische Dehnung wird zeitabhängig aufgebaut und bildet sich nach Entfernen der Belastung in ähnlicher Weise zeitabhängig wieder zurück. Für kurzzeitige Belastungen sind daher viskoelastische Dehnungen eher unrelevant. Die Begrenzung der inelastischen oder viskosen Dehnung ist aus Sicht des Ingenieurs eine geeignete Variante eine Kurzzeit-Festigkeit für Kunststoffe zu bestimmen, bei der die Formstabilität des Materials gewährleistet ist. Daraus ergibt sich aber die Fragestellung, wie die drei Dehnungsanteile zu bestimmen sind. Anhand der unter 5.4 durchgeführten Untersuchungen ist dies nicht möglich, da hier nur die Gesamtdehnung aufgezeichnet wurde.

Im Folgenden werden die Kurzzeit-Druckfestigkeiten gegenübergestellt, die sich aus diesen Vorgehensarten anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse ergeben und es wird ein Verfahren vorgestellt mit dessen Hilfe für die untersuchten Kunststoffe die Dehnungsanteile elastische-, viskoelastische- und viskose Dehnung bei kurzzeitiger Beanspruchung ermittelt wurden.

¹¹⁹ Vergleiche Ehrenstein 1999, Seite 160.

5.5.2 Bestimmung der Kurzzeit-Druckfestigkeit nach dem Prinzip der maximalen Druckspannung

Der angegebene Kurzzeit-Druckfestigkeit liegt der geringste Druckspannungswert aus 5 Einzelmessungen je Material und Temperatur zu Grunde.

Tafel 26

Kurzzeit-Druckfestigkeiten der untersuchten Kunststoffe nach dem Prinzip der maximalen Druckspannungen auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse nach 5.4.3

Material	Druckfestigkeit σ_M [N/mm ²]		
	-20°C	+23°C	+50°C
POM-C	119	96	75
POM-C GF25 - T	161	136	97
POM-C GF25 - II	120	123	91
PET	113	95	73
PEEK GF30 - T	171	147	126
PEEK GF30 - II	154	141	124
PEI ¹²⁰	175	150	132
PA 6	117	86	72
PA 6 GF30 - T	146	123	112
PA 6 GF30 - II	128	125	96
PA 66	124	95	83
PA 66 GF30 - T	156	120	103
PA 66 GF30 - II	144	115	85

¹²⁰ Werte entsprechen der Druckfließgrenze.

5.5.3 Bestimmung der Kurzzeit-Druckfestigkeit durch Begrenzung der Stauchung

Die Festlegung einer maximalen Stauchung ist abhängig von der Nutzungsart des Kunststoffes, sollte jedoch für jeden Anwendungsfall separat erfolgen. Beispielhaft werden im Folgenden die Druckfestigkeitswerte angegeben, die sich bei 2% und 3% maximaler Stauchung ergeben.

Material	Druckfestigkeit σ_M [N/mm ²]					
	$\epsilon_{\max} = -2\%$			$\epsilon_{\max} = -3\%$		
	-20°C	+23°C	+50°C	-20°C	+23°C	+50°C
POM-C	71	54	38	91	67	49
POM-C GF25 - T	79	55	40	99	71	53
POM-C GF25 - II	92	82	56	113	101	70
PET	69	65	59	93	82	71
PEEK GF30 - T	99	90	80	129	115	105
PEEK GF30 - II	95	98	83	125	121	104
PEI	78	66	57	109	95	84
PA 6	75	58	30	98	74	40
PA 6 GF30 - T	97	76	42	121	90	53
PA 6 GF30 - II	103	93	50	127	105	59
PA 66	77	69	42	100	84	53
PA 66 GF30 - T	93	74	41	118	90	52
PA 66 GF30 - II	86	80	46	110	95	56

Tafel 27
Kurzzeit-Druckfestigkeiten der untersuchten Kunststoffe nach dem Prinzip der maximalen Stauchung auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse nach 5.4.3

5.5.4 Bestimmung der Kurzzeit-Druckfestigkeit durch Begrenzung des Steifigkeitsverlustes

Beispielhaft werden die Kurzzeit-Druckfestigkeiten für ein Verhältnis von $E_s/E_0 = 0,8$ und $0,7$ entsprechend 20% bzw. 30% Steifigkeitsverlust bezogen auf den Anfangs-E-Modul E_0 angegeben.

Tafel 28
Kurzzeit-Druckfestigkeiten der untersuchten Kunststoffe nach dem Prinzip des maximalen Steifigkeitsverlustes auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse nach 5.4.3

Material	Druckfestigkeit σ_M [N/mm ²]					
	$E_s/E_0 = 0,8$			$E_s/E_0 = 0,7$		
	-20°C	+23°C	+50°C	-20°C	+23°C	+50°C
POM-C	48	38	27	69	47	37
POM-C GF25 - T	42	50	51	60	63	64
POM-C GF25 - II	68	56	42	89	73	56
PET	105	79	70	113	84	71
PEEK GF30 - T	103	102	117	130	118	120
PEEK GF30 - II	116	77	85	138	102	101
PEI	164	136	132	176	147	132
PA 6	95	76	43	111	80	46
PA 6 GF30 - T	102	87	57	119	93	62
PA 6 GF30 - II	119	83	41	129	95	49
PA 66	80	72	55	101	83	58
PA 66 GF30 - T	107	84	60	121	92	67
PA 66 GF30 - II	78	72	36	100	86	45

5.5.5 Bestimmung der Kurzzeit-Druckfestigkeit durch Begrenzung der viskosen Dehnung

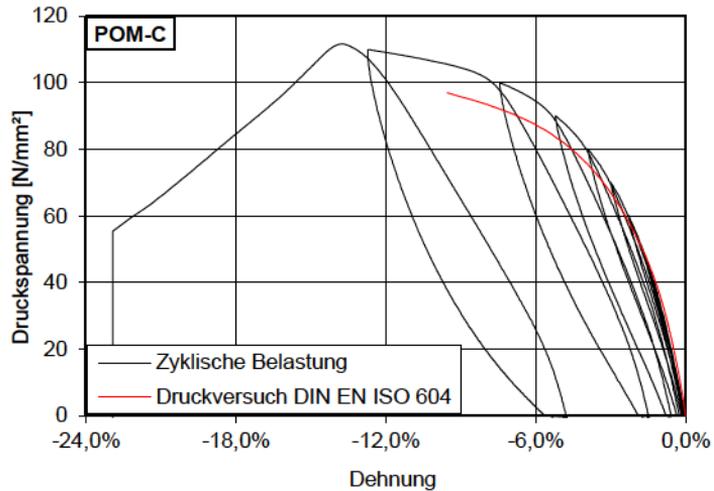
Der einfachste Weg zur Bestimmung plastischer Verformungen ist die Messung der Länge eines Prüfkörpers in Belastungsrichtung vor, während und nach dem Aufbringen einer definierten Belastung. Die Längendifferenz der Messwerte vor und nach der Belastung entspricht der plastischen Verformung bei der aufgebrachten Belastung. Wird dieses Vorgehen bei unterschiedlichen Belastungswerten wiederholt, so lässt sich die plastische Verformung in Abhängigkeit zur Belastungsgröße darstellen. Prinzipiell ist dieses Vorgehen auf alle Materialien unter Zug- und auch Druckbeanspruchung anwendbar.

Bei Anwendung des Verfahrens auf Materialien mit viskoelastischem Verhalten müssen einige Besonderheiten beachtet werden. Entsprechend der Definition setzt sich die Gesamtdehnung bei diesen Materialien aus den 3 Anteilen elastischer, viskoelastischer und viskoser Dehnung zusammen. Um Einflüsse aus den zeitabhängigen, reversiblen viskoelastischen Dehnungen gering zu halten, sollte die Belastung mit einer hohen Belastungsgeschwindigkeit erfolgen und nur kurzzeitig sein. Die Messung der Prüfkörperlänge bzw. der Dehnung nach der Belastung sollte erst nach einer Zeitspanne ohne Belastung des Prüfkörpers erfolgen, so dass sich die zeitabhängig reversiblen viskoelastischen Dehnungen abbauen können.

Exemplarisch wurde dies an je einem Prüfkörper der unter 5.4 untersuchten Materialien durchgeführt. Die Prüfkörper in den Abmessungen 20 mm x 10 mm x 30 mm (b x t x h) wurden in einem zyklischen Modus belastet. Jeder Zyklus beinhaltet eine Belastungs- mit direkt anschließender Entlastungsphase und eine Ruhephase ohne Belastung. Die Belastung und Entlastung wurde über die Druckspannungsrate mit einer Geschwindigkeit von 10 N/mm²/s gesteuert. Beginnend mit einer Druckspannung von 10 N/mm² wurde diese in jedem weiteren Zyklus um 10 N/mm² gesteigert. Die Ruhephase im 1. Zyklus betrug 20 Sekunden und wurde in jedem weiteren Zyklus um 10 s verlängert. Die Dehnungsmessung erfolgte analog dem Vorgehen nach 5.4 über optische Dehnungsmessung mit einem Videoextensiometer.

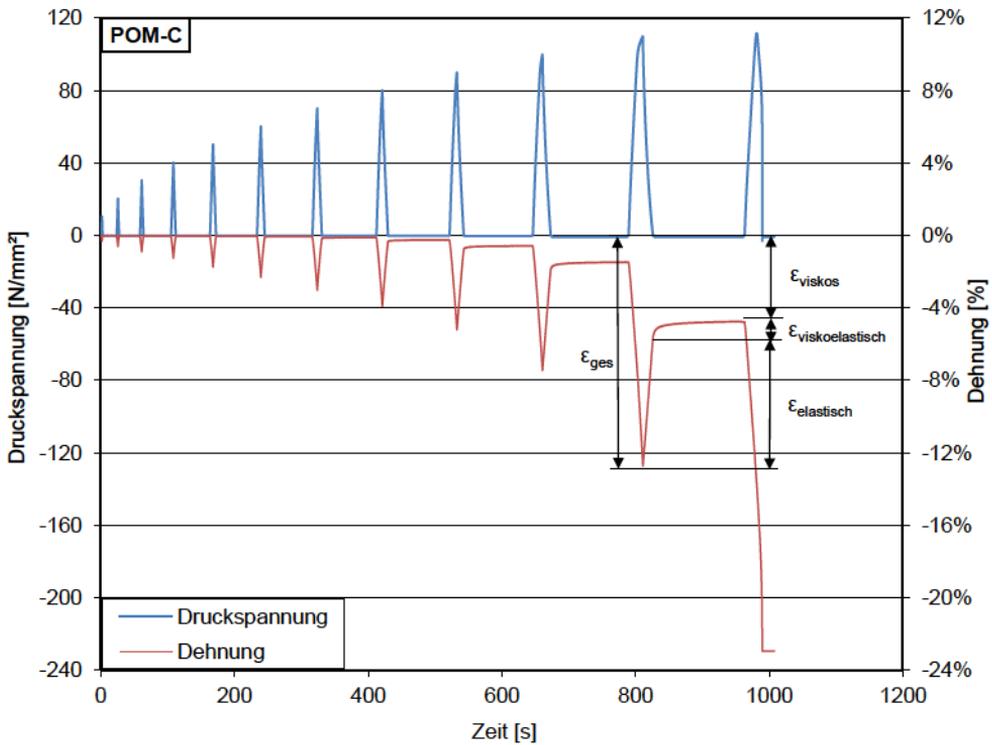
Nachfolgenden Diagrammen können exemplarisch für das Material POM-C die Belastungszyklen und die zugehörigen Dehnungen entnommen werden. Die Überlagerung mit dem Dehnungsverlauf aus den Druckversuchen an POM-C bei 23°C¹²¹ zeigt qualitativ eine gute Übereinstimmung.

Bild 77
Druckspannung – Dehnung
– Verhalten von POM-C im
zyklischen Belastungsversuch
mit ansteigender
Druckspannungsrate im
Vergleich zum Druckspannung –
Dehnung – Verhalten im
Druckversuch nach
DIN EN ISO 604



Aufgrund der höheren Belastungsgeschwindigkeit verhält sich das Material im zyklischen Belastungsversuch etwas steifer. Mit steigender Beanspruchung nimmt, wie zu erwarten war, der viskose Dehnungsanteil zu. Zu bemerken ist, dass nach Entlastung und Wiederbelastung dieser nur zu einer sehr geringen Verschiebung der Dehnungskurve auf der Abszisse führt. Alle untersuchten Materialien zeigten bei den zyklischen Druckversuchen ein ähnliches Verhalten. Wurde einmal eine kurzzeitige Druckspannung aufgebracht, die zu einer deutlich messbaren viskosen Stauchung führt, so verhält sich das Material bei Wiederbelastung bis zum Erreichen der vorher schon einmal aufgegebenen Belastung deutlich steifer. Wird die Belastung dann weiter gesteigert, so geht der Dehnungsverlauf wieder annähernd in die Form über, die sich bei einer Erstbelastung ergibt.

¹²¹ Vergleiche Abschnitt 5.4.3



Werden nur die Extremwerte ϵ_{ges} und ϵ_{viskos} der Belastungsstufen nach Bild 78 herangezogen, lässt sich das Druckspannung – Dehnung – Diagramm durch lineare Verbindung der Datenpunkte vereinfacht darstellen.

Bild 78

Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen am Beispiel von POM-C, exemplarisch die Dehnungsanteile ϵ_{viskos} , $\epsilon_{viskoelastisch}$ und $\epsilon_{elastisch}$ für eine Druckspannung von 110 N/mm²

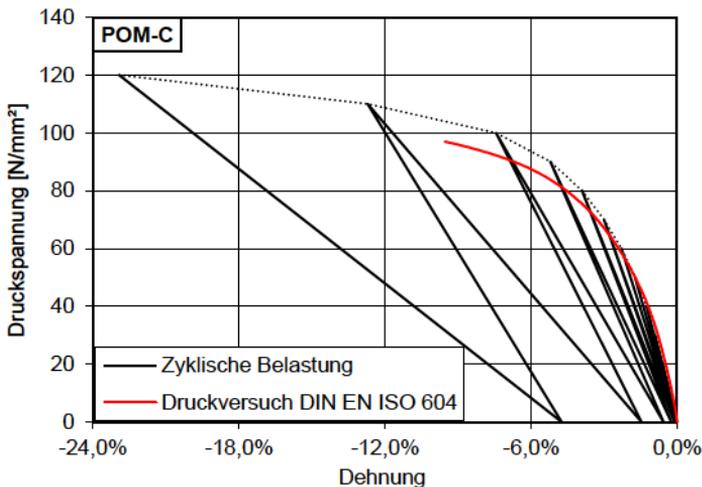


Bild 79

Druckspannung – Dehnung – Verhalten von POM-C im zyklischen Belastungsversuch mit ansteigender Druckspannungsrate in vereinfachter Darstellungsform durch lineare Verbindung der Extremwerte

In der Auswertung der zyklischen Belastungsversuche wurden für jedes untersuchte Material entsprechend dem Vorgehen nach Bild 78 den Druckspannungen in Schrittweiten von 10 N/mm^2 die 3 Dehnungsanteile ϵ_{viskos} , $\epsilon_{\text{viskoelastisch}}$ und $\epsilon_{\text{elastisch}}$ zugeordnet. Die Darstellung der ermittelten Werte in dem Diagramm nach Bild 80 zeigt anschaulich die Grenze, ab welcher Druckspannung viskose und viskoelastische Dehnungsanteile bei kurzzeitiger Belastung einen hohen Anteil an der Gesamtdéhnung aufweisen.

Bild 80
Dehnungsanteile von POM-C bei Druckkraftbeanspruchung

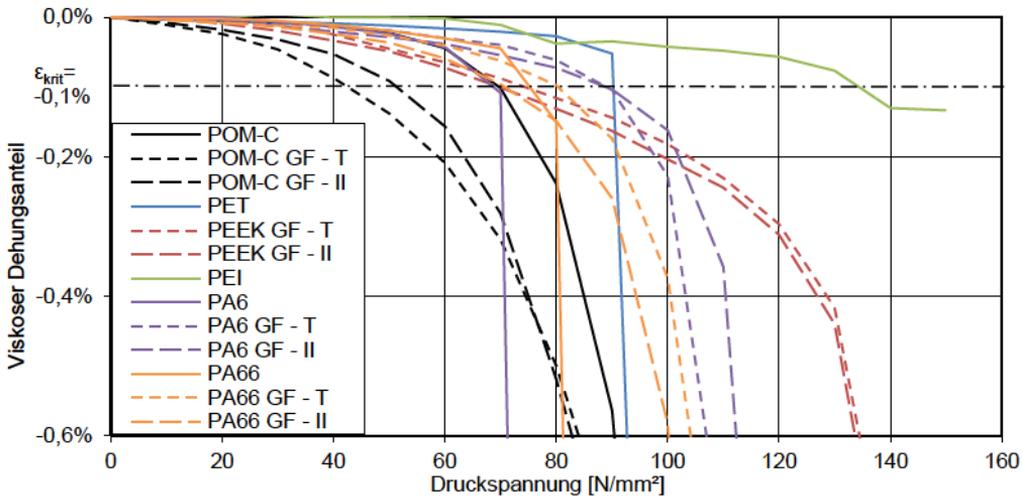
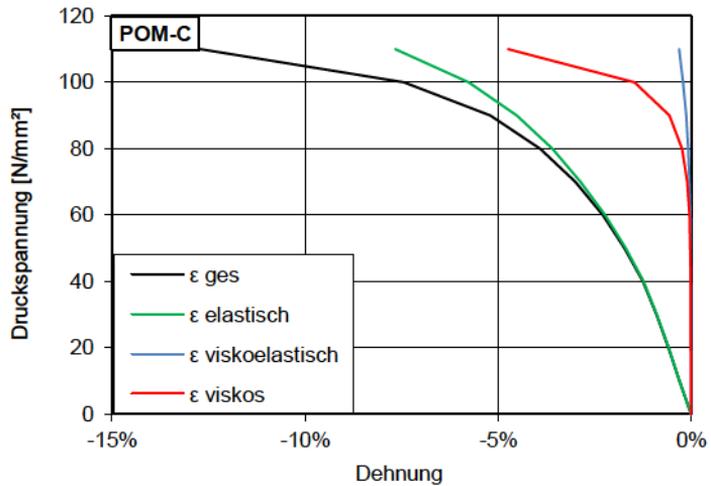


Bild 81
Gegenüberstellung des Dehnungsanteils ϵ_{viskos} für die untersuchten Materialien

Als Grenzwert der viskosen Dehnung für ein auf Druckkraft beanspruchtes Klotzungsmaterial wird eine Dehnung von -0,1% vorgeschlagen. In ähnlicher Weise erfolgt bei Metallen die Festlegung des Endes des linear-elastischen Bereiches bei 0,2% plastischer Dehnung.

Material	Druckfestigkeit [N/mm ²]
	$\epsilon_{\text{viskos}} = -0,1 \%$
POM-C	70
POM-C GF25 - T	42
POM-C GF25 - II	51
PET	90
PEEK GF30 - T	73
PEEK GF30 - II	70
PEI	135
PA 6	70
PA 6 GF30 - T	90
PA 6 GF30 - II	90
PA 66	75
PA 66 GF30 - T	80
PA 66 GF30 - II	70

Tafel 29
 Kurzzeit-Druckfestigkeiten
 der untersuchten Kunststoffe
 durch Begrenzung des
 viskosen Dehnungsanteils
 ϵ_{viskos} auf -0,1 %

5.6 Verformungsverhalten unter statischer Langzeitbelastung

5.6.1 Allgemeines

Das Kriechen, die zeitabhängige Zunahme der Dehnungen unter konstanter Belastung, ist bei Kunststoffen aufgrund ihres makromolekularen Aufbaus besonders ausgeprägt. Unter einer Kräfteinwirkung verändern die Makromoleküle oder Molekülteile eines Polymers zeitabhängig ihre Lage im Stoffgefüge. Die Kenntnis über dieses Verhalten ist für eine dauerhafte Bemessung von Bauteilen aus Kunststoff von hoher Bedeutung.

Wird die Belastung in einem Kunststoff sprunghaft von Null auf einen konstanten Wert σ gesteigert, der deutlich unterhalb der Fließgrenze liegt, so reagiert der Kunststoff auf die Belastung mit einer elastischen Dehnung ϵ_0 und einer zeitabhängigen Dehnung $\epsilon(t)$. Die zeitabhängige Dehnung unterteilt sich in eine viskose Dehnung $\epsilon_v(t)$ und eine relaxierende Dehnung $\epsilon_{rel}(t)$. Die relaxierende Dehnung wird auch als viskoelastisch¹²² bezeichnet. Die relaxierende Dehnung $\epsilon_{rel}(t)$ konvergiert für einen sehr langen Zeitraum gegen einen konstanten Wert. Die viskose Dehnung $\epsilon_v(t)$ steigt in Abhängigkeit der Zeit und der Belastungsgröße konstant an und ist vor allem bei hohen Belastungen nahe der Fließgrenze von Bedeutung. Bei plötzlicher Entlastung reduziert sich die Gesamtdehnung ϵ sprunghaft um den Wert der Anfangsdehnung ϵ_0 . Wie bei der Zunahme des viskoelastischen Dehnungsanteils $\epsilon_{rel}(t)$ bei Belastung nimmt dieser Dehnungsanteil auch nach Entlastung wieder zeitabhängig ab und strebt gegen Null. Der viskose Dehnungsanteil $\epsilon_v(t)$ bleibt nach der Entlastung als plastische Verformung bestehen. Dieses Materialverhalten wird als Viskoelastisch bezeichnet.¹²³

¹²² Vergleiche Ehrenstein 1999, Seite 160.

¹²³ Vergleiche Rösler 2008, Seite 263 ff.

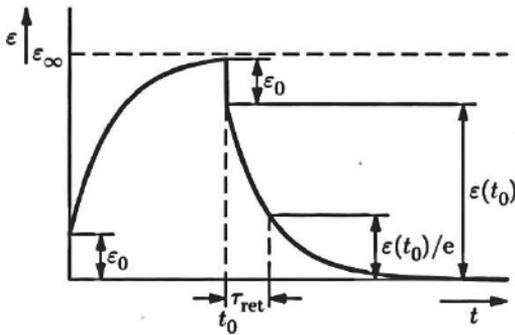


Bild 82
Zeitlicher Verlauf der Dehnungen bei konstanter Spannung für ein viskoelastisches Material nach Rösler 2008

Das Kriechverhalten von Kunststoffen ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig:

- Höhe der aufgetragenen Belastung
- Belastungsart (Zug-, Druck-, Biegebelastung)
- Umgebungstemperatur
- Feuchtegehalt des Kunststoffes
- Faserorientierung faserverstärkter Kunststoffe

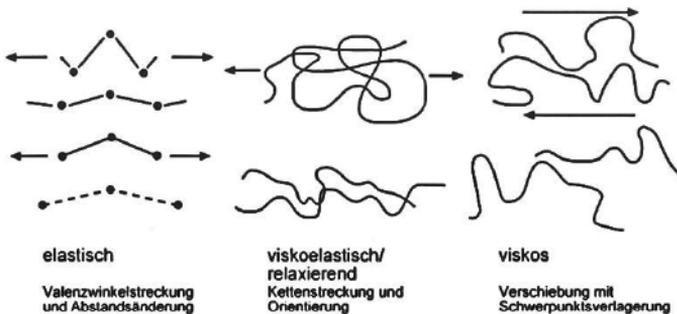


Bild 83
Molekularer Hintergrund des unterschiedlichen Verformungsverhaltens von Polymeren-Werkstoffen nach Ehrenstein 1999

Die Bestimmung des Kriechverhaltens erfolgt in Langzeit-Belastungsversuchen in dem für das Konstruktionsbauteil zu erwartenden Einsatztemperatur- und Belastungsbereich. Das gängigste Verfahren zur Bestimmung des Kriechverhaltens von Kunststoffen ist der Zeitstand-Zugversuch nach EN ISO 899-1, da für die meisten Anwendungsfälle das Verhalten der Kunststoffe unter Zugbeanspruchung maßgebend ist. Bei diesen Versuchen werden Schulterstäbe nach DIN EN ISO 527 mit einer konstanten Zugkraft beaufschlagt und das Dehnungsverhalten in Abhängigkeit der Zeit aufgezeichnet. Ebenso sind Versuche unter konstanter Druckkraft- oder Biegebeanspruchung möglich. Das Vorgehen im Zeitstand-Biegeversuch wird in DIN EN ISO 899-2 beschrieben. Für den Zeitstand-Druckversuch existiert keine speziell-

le normative Vorgabe, prinzipiell kann hier aber das Vorgehen der DIN EN ISO 899-1 aus dem Zugversuch mit geänderter Belastungsrichtung und angepasster Prüfkörpergeometrie als Grundlage verwendet werden.

Zum Erhalt aussagekräftiger Ergebnisse aus Zeitstand-Versuchen sind Versuche mit einer Zeitdauer von mindestens 1000 h notwendig. Für die Dauer des Zeitstand-Versuches liegen dem Konstrukteur gesicherte Ergebnisse zum Verformungsverhalten in Form des in Bild 82 dargestellten Diagrammes vor. Das Kriechverhalten über den im Versuch bestimmten Zeitraum hinaus ist in bestimmten Grenzen durch Extrapolation mit Regressionskurven aus den Versuchswerten möglich. Die Qualität der Extrapolation ist dabei vom mathematischen Modell zur Abbildung des Kriechverhaltens und von der Dauer der zu Grunde liegenden Zeitstand-Versuche abhängig. Für eine Dauer des Zeitstand-Versuches von 1000 h mit exakter Verformungsmessung ist eine Extrapolation auf bis zu 20 Jahre realistisch¹²⁴.

5.6.2 Mathematische Modelle zur Abbildung des viskoelastischen Materialverhaltens

Ein einfaches Modell zur mathematischen Beschreibung der Kriechvorgänge ist das Modell der Potenzfunktion nach Findley. Die Gesamtverformung ϵ_{ges} setzt sich in diesem Modell aus dem spannungsabhängigen, elastischen Anteil ϵ_{el} und einem zeitabhängigen Term in der Form $m \cdot t^n$ zusammen.

Gleichung 8

$$\epsilon_{\text{ges}}(t) = \epsilon_{\text{el}} + m \cdot t^n$$

Der Term $m \cdot t^n$ bildet den viskosen und den viskoelastischen Verformungsanteil ab. Die Parameter m und n sind spannungsabhängig und werden durch lineare Regression aus den zu Grunde liegenden Versuchsdaten der Zeitstandversuche bestimmt.¹²⁵

Ein weiteres, verbreitet angewandtes Modell zur mathematischen Abbildung des Kriechverhaltens ist das 4-Parameter-

¹²⁴ Vergleiche Ehrenstein 1981, Seite 85 ff.

¹²⁵ Vergleiche Erhard 2011, Seite 122; Ehrenstein 1981, Seite 85 ff., Ehrenstein 2007, Seite 28

bzw. Burgers-Modell aus in Reihe- und parallel geschalteten elastischen Federn und viskosen Dämpfern. Die vier auf Grundlage von Versuchswerten zu bestimmenden Parameter sind E_0 , E_r , μ_0 und μ_r . Die Gesamtverformung setzt sich zusammen aus:

$$\varepsilon_{ges}(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_v(t) + \varepsilon_{rel}(t)$$

Gleichung 9

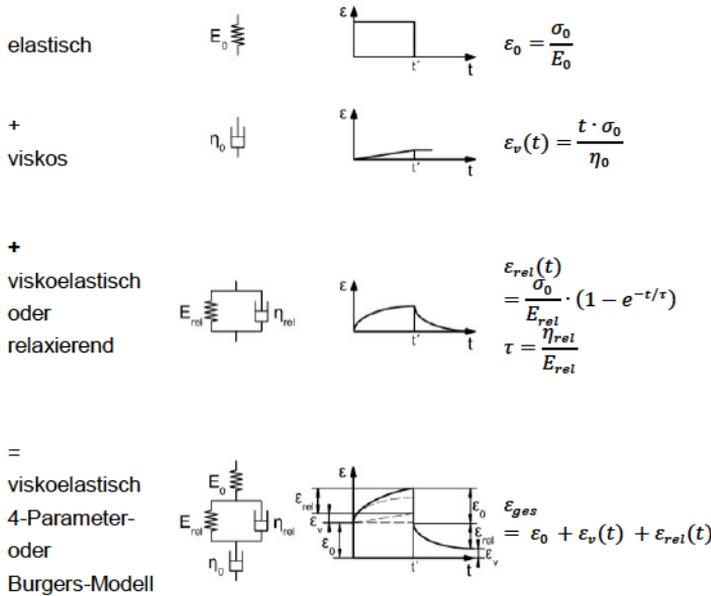


Bild 84

4-Parameter oder Burgers-Modell mit in Reihe und in parallel geschalteten elastischen Federn und viskosen Dämpfern

Der viskose Verformungsanteil wird durch eine zeitabhängige Funktion mit konstantem Anstieg abgebildet. Die Abbildung des viskoelastischen Verformungsanteils erfolgt über eine zeitabhängige Funktion der Form $1 - e^{-x}$, welche auf einen Zielwert konvergiert.

Bild 85

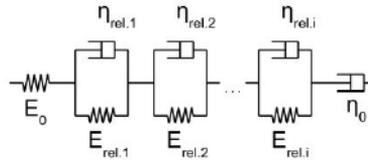
Gegenüberstellung der prinzipiellen Funktionsverläufe der viskosen und viskoelastischen Verformungsanteile zwischen Burgers- und Findelyschem-Modell

Zur möglichst exakten Anpassung des im Versuch aufgezeichneten viskoelastischen Materialverhaltens eines Kunststoffes mit dem Burgers-Modell ist es hilfreich, mehrere relaxierende Verformungsanteile des Burgers-Modells in Reihe zu schalten. Somit erhöht sich zwar die Anzahl der zu bestimmenden Unbekannten, im Gegenzug wird aber die Qualität des mathematischen Ersatzmodelles deutlich gesteigert.

$$\varepsilon_{ges}(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_v(t) + \sum_i \varepsilon_{rel,i}(t)$$

Gleichung 10

Bild 86
Reihenschaltung der relaxierenden Verformungsanteile $\epsilon_{rel,i}(t)$ im Burgers-Modell



5.6.3 Zeitstand-Druckversuch

EN ISO 899-1 beschreibt das Vorgehen zur Bestimmung des Kriechverhaltens in einem Zeitstand-Zugversuch. Für die Bestimmung des Kriechverhaltens von Kunststoffen unter Druckbeanspruchung gibt es keine normativen Vorgaben. Grundlegend kann aber das Vorgehen beim Zeitstand-Zugversuch auch auf einen Zeitstand-Druckversuch übertragen werden, jedoch muss die Geometrie der Prüfkörper überarbeitet werden, um ein Stabilitätsversagen zu verhindern. Bei der Auswahl der Prüfkörpergeometrie empfiehlt es sich, auf die DIN EN OS 609 für den uniaxialen Druckversuch an Kunststoffen zurückzugreifen. Um Stabilitätsversagen der Prüfkörper im Druckversuch zu vermeiden, wird nach DIN EN ISO 609 die maximale nominelle Stauchung im Versuch beschränkt¹²⁶. In gleicher Weise sollte auch für den Zeitstand-Druckversuch die maximale Stauchung anhand der gewählten Prüfkörperabmessungen begrenzt werden.

5.6.3.1 Versuchsstand für Prüfkörper mit Rohrquerschnitt

Um das Kriechverhalten der unter Abschnitt 5.1 ausgewählten Kunststoffe bei Druckkraftbelastung miteinander vergleichen zu können, erfolgte zunächst die Festlegung von Versuchsrandbedingungen.

- Druckspannung von 25 N/mm² bezogen auf den Ausgangsquerschnitt des Prüfkörpers
- Prüfkörperhöhe 6 mm¹²⁷
- Prüfung bei Raumtemperatur
- Möglichkeit der Prüfung bei erhöhter Temperatur

Auf Grundlage dieser Anforderungen wurde im ersten Ansatz ein Prüfstand entwickelt, bei dem die Prüfkörper einen Rohrquerschnitt besitzen. Die Belastung erfolgt über an ei-

¹²⁶ Vergleiche Abschnitt 5.4.1.

¹²⁷ Entspricht etwa der zu erwartenden Dicke eines Kontaktmaterials in der Klotzungskonstruktion.

nem Zugstab hängende Gewichte, wobei der Prüfkörper am Auflagerpunkt des Zugstabes wie eine Unterlegscheibe auf dem Zugstab sitzt. Die Verformungsmessung erfolgt über eine Feinmessuhr mit einer Ablesegenauigkeit von 0,001 mm auf dem oberen Ende des Zugstabes. Bei einer ersten Testreihe an zwei Prüfkörpern aus POM-C GF25 wurde das prinzipielle Vorgehen überprüft. Die Prüfkörper mit Rohrquerschnitt¹²⁸ und einer Querschnittsfläche von 76 mm² wurden mit einer Gewichtskraft von 195 kg belastet. Die aufgebrachte Druckspannung ergibt sich somit zu 25,2 N/mm². Die Messwerte der Feinmessuhren wurden durch manuelles Ablesen aufgenommen. Die Messungen führten zu brauchbaren Ergebnissen. Es zeigte sich jedoch, dass Versuchsstände mit den großen Gewichten für Prüfserien eher ungeeignet sind. Auch ist eine Prüfung unter erhöhter Temperatur mit diesem Prüfstand nur in einer großen begehbaren Klimakammer möglich.

Das Konzept der Belastung durch Gewichte wurde überarbeitet und eine in sich geschlossene Prüfvorrichtung entwickelt, bei der die Belastung in den Prüfkörper über eine Feder eingetragen wird. Vorteil dieses Prüfstandes ist die kompakte und relativ leichte Bauweise, die es ermöglicht den Dauerprüfstand für die Temperaturprüfung auch in einem handelsüblichen Klimaschrank aufzustellen.

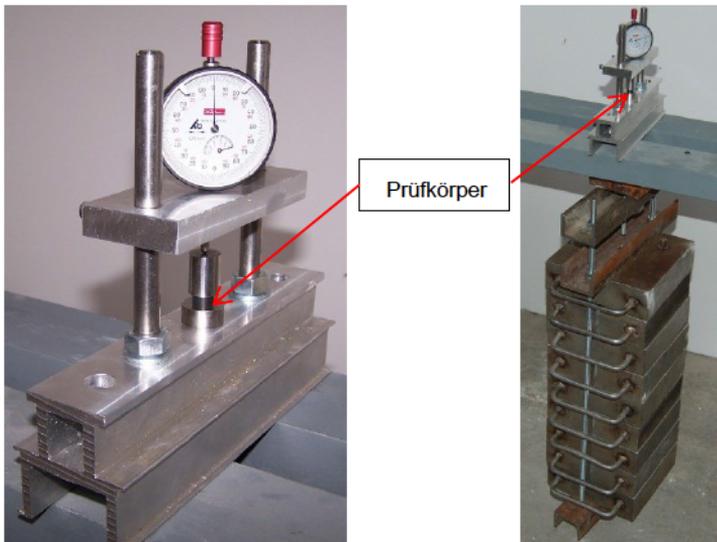
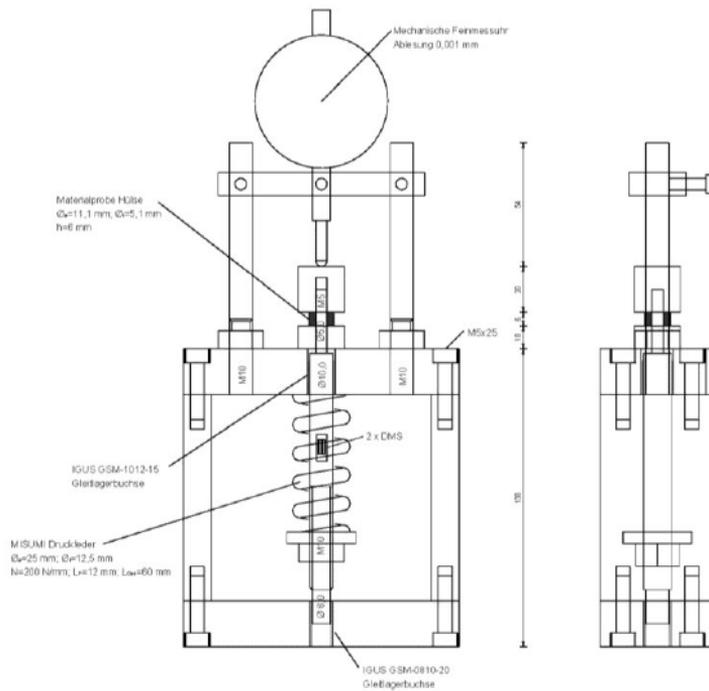


Bild 87
Zeitstand-Druckversuch mit
Belastung durch Gewichte

¹²⁸ $\varnothing_a = 11,1 \text{ mm}$, $\varnothing_i = 5,1 \text{ mm}$, $h = 6 \text{ mm}$

Bild 88
 Prüfvorrichtung für den
 Zeitstand-Druckversuch mit
 Belastung des Prüfkörpers
 durch Federkraft



Durch Vorspannen der Druckfeder mit einer Federkonstante von 200 N/mm wird die Federkraft über den durch die Feder verlaufenden Zugstab in den Prüfkörper umgeleitet und resultiert dort in einer konstanten Druckbeanspruchung. Die Verformung des Prüfkörpers in Richtung der Druckkraft wird durch eine Feinmessuhr über die Lageänderung des Zugstabes erfasst. Die Einstellung der aufgebrachtten Kraft erfolgt durch die Messung der Längenänderung der Feder beim Vorspannen. Durch die Kriechverformung des Prüfkörpers wird über die Dauer des Versuches die Feder leicht entspannt, wodurch auch die Federkraft absinkt. Bei einer zu erwartenden Gesamtlängenänderung des Prüfkörpers infolge der Kriechverformung von etwa 0,1 mm entspricht der Kraftverlust 20 N. Bezogen auf die aufzubringende Gesamtlast von etwa 2000 N ist der entstehende Fehler vernachlässigbar. Die Prüfrahen und Prüfkörper wurden vor Versuchsbeginn für 24 h im gewünschten Prüfklima konditioniert, damit Temperaturdehnungen des Prüfrahmens keinen Einfluss auf die Längenänderungsmessung haben. Im Verlauf des Versuches muss das Umgebungsklima konstant bleiben. Änderungen der Umgebungstemperaturen haben einen direkten Einfluss auf die Messwerte der Verformung.

5.6.3.2 Versuchsstand mit Kraftumlenkung

In der Schlussphase dieser Arbeit ergab sich die Möglichkeit einen Zeitstandsversuchsstand für Kriechversuche mit temperierbarem Prüfraum und videoptischer Dehnungsmessung nutzen zu können. Der Prüfstand ist für die parallele Langzeitbelastung von zehn Schulterstäben konzipiert, wobei die Belastung individuell über Gewichte und ein Hebelsystem als Zugkraft in die Prüfkörper eingetragen wird. Die Dehnungsmessung erfolgt über ein Infrarot-Videoextensiometer und an den Prüfkörpern befestigte Messmarken. Um mit dem vorhandenen Prüfstand Druckprüfungen durchführen zu können, musste zunächst eine Vorrichtung zur Kraftumlenkung entwickelt werden.

Mit der in Bild 89 dargestellten Vorrichtung wird die durch Gewichtskräfte aufgebrachte Zugkraft in eine Druckkraft auf einen kleinen Prüfkörper umgelenkt. Die Abmessungen wurden so gewählt, dass die Gesamtlänge der Vorrichtung der Länge eines Schulterstabs Typ 1A entspricht und so in die vorhandenen Klemmvorrichtungen der Prüfmaschine eingesetzt werden kann. Die maximale Höhe der kleinen, auf Druckkraft belasteten Prüfkörper beträgt 28 mm. Die Querschnittsfläche kann bis zu 9 mm x 9 mm betragen. Die Messmarken zur Dehnungsmessung mussten aufgrund der geringen Abmessungen der Prüfkörper auf der Umlenkvorrichtung aus Edelstahl angebracht werden. Vor Beginn der Prüfung wurden die Ausgangslänge des Prüfkörpers L_0 und die Ausgangslänge zwischen den Messmarken L_{m0} ermittelt. Im Versuch wird kontinuierlich der Abstand zwischen den Messmarken L_m aufgezeichnet. Die Dehnung des Prüfkörpers ergibt sich unter Vernachlässigung minimalster Dehnungen der Umlenkvorrichtung zu:

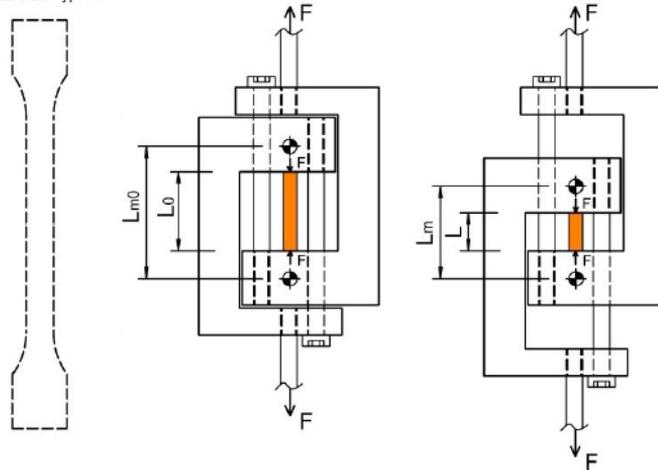
$$\varepsilon = \frac{(L_m - L_{m0})}{L_0}$$

Gleichung 11

Bild 89

Vorrichtung zur Umlenkung von Zug- auf Druckkraftprüfung kleiner Prüfkörper

Schulterstab Typ 1A



5.6.4 Kriechversuche an Rohrquerschnitten mit geringer Höhe

In drei Messreihen wurden für die Kunststoffe das Kriechverhalten unter der Einwirkung einer Druckspannung von 25 N/mm^2 und Raumtemperatur untersucht. In jeder Messreihe wurde je eine Probe pro Kunststoff geprüft. Bei glasfaserverstärkten Kunststoffen entsprach die Belastungsrichtung der Extrusionsrichtung des Halbzeuges, aus dem die Prüfkörper gefertigt wurden.

Bild 90

Messreihe zur Bestimmung des Kriechverhaltens der Kunststoffe im Zeitstand-Druckversuch



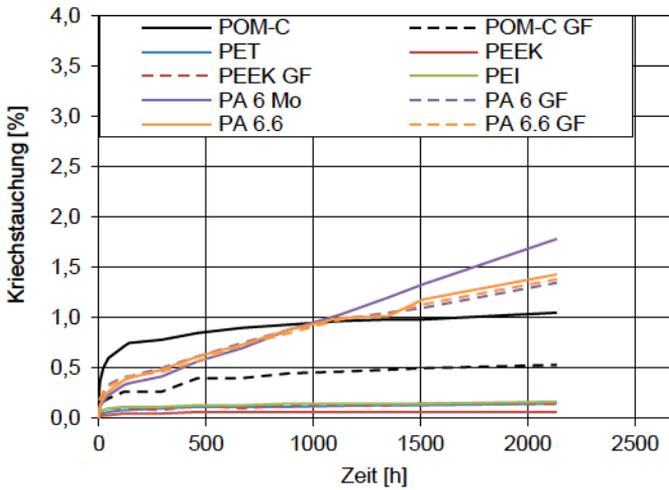


Bild 91
Ergebnisse der Messreihe 1 zur Bestimmung des Kriechverhaltens der Kunststoffe im Zeitstand-Druckversuch

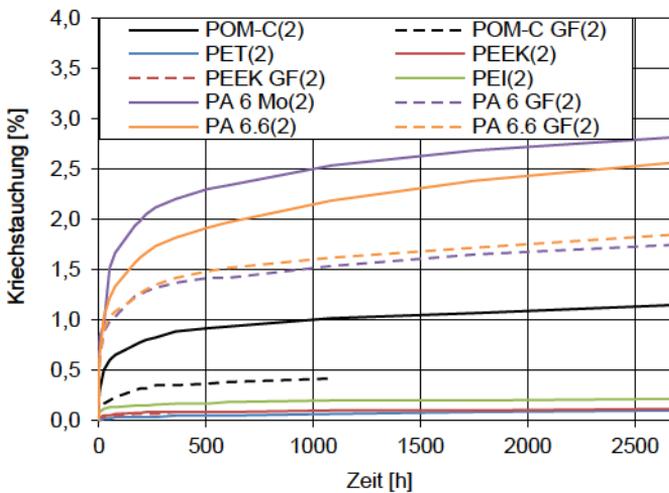


Bild 92
Ergebnisse der Messreihe 2 zur Bestimmung des Kriechverhaltens der Kunststoffe im Zeitstand-Druckversuch

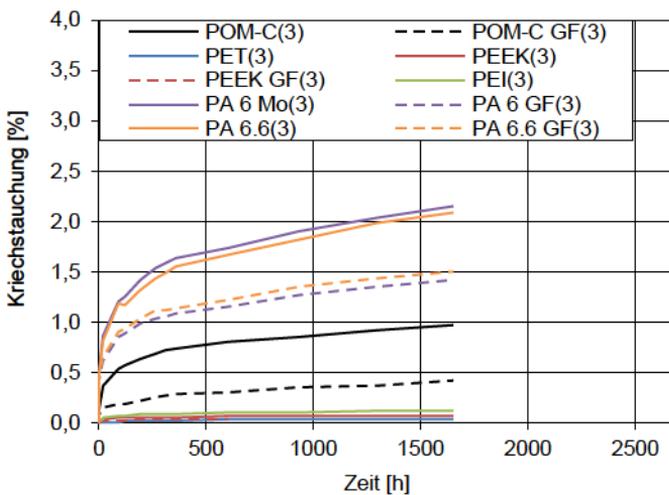


Bild 93
Ergebnisse der Messreihe 3 zur Bestimmung des Kriechverhaltens der Kunststoffe im Zeitstand-Druckversuch

In Bild 91 bis Bild 93 sind die in den 3 Versuchsreihen auf N/mm² gezeichneten Messwerte dargestellt. Zu besseren Ablesbarkeit des Kriechverhaltens ist der elastische Dehnungsanteil nicht mit dargestellt.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse zeigt, dass die Kunststoffe PEEK, PET und PEI mit Kriechdehnungen von 0,1% - 0,2% nach 1000 h die geringsten Kriechverformungen aufweisen. Die Verstärkung von PEEK mit 30% Glasfasern führt anhand der Messwerte zu keiner Verbesserung des Kriechverhaltens. Die Verformungen in Folge von Kriechvorgängen sind geringfügig höher als bei unverstärkten PEEK.

POM-C liegt mit Werten von etwa 1% Kriechdehnung nach 1000 h im Mittelfeld der untersuchten Kunststoffe. Durch die Verstärkung von POM-C mit 25% Glasfaseranteil wird die Kriechdehnung etwa halbiert.

Die höchsten Kriechdehnungen zeigen die Materialvertreter der Polyamide. In allen drei Messreihen wurden für PA6 und PA66 die höchsten Kriechdehnungen festgestellt. Die Zugabe von 30% Glasfasern verringert die Kriechneigung um etwa 30%. Die Werte liegen immer noch deutlich über denen von unverstärktem POM-C. In Messreihe 1 zeigen alle vier Polyamide ein ungewöhnliches Verformungsverhalten mit nahezu linearem Verformungsanstieg über die Zeit. Eine Begründung dafür konnte im Nachgang nicht gefunden werden. In den Messreihen 2 und 3 ist die Verformungskurve vom Verlauf her mit denen der anderen untersuchten Kunststoffe vergleichbar.

Anhand der Daten der Messreihe 2 erfolgte die Regression sowohl für den zeitabhängigen Term des Modells nach Findley, als auch für die zeitabhängigen Dehnungsanteile ϵ_v und ϵ_{rel} des Burgers-Modells.

Zeitabhängiger Term des Modells nach Findley

Gleichung 12

$$\epsilon_t(t) = m \cdot t^n$$

Zeitabhängige Terme des Burgers-Modells

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_v(t) + \varepsilon_{rel}(t) = \frac{t \cdot \sigma_0}{\eta_0} + \sum_1^3 \frac{\sigma_0}{E_{rel,i}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\frac{\eta_{rel,i}}{E_{rel,i}}}} \right)$$

Gleichung 13

Die Bestimmung der Parameter m und n für das Modell nach Findley erfolgte unter Verwendung des Solver Add-Ins von MS Excel. Kriterium für die Parameterbestimmung war die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate aus Versuchswerten und Berechnung. Anhand dieser Regressionskurven erfolgt hier beispielhaft die Extrapolation der Kriechdehnungen für eine im Bauwesen erwartete Lebensdauer von 50 Jahren¹²⁹. Die in Tafel 30 angegebenen Werte gelten nur für eine Druckspannung von 25 N/mm² und bei 23°C.

Kunststoff	Parameter (für t in h)		ε _t (438.000 h)
	m	n	
POM-C	-0,26563488	0,19361847	-3,28%
POM-C GF25	-0,07955871	0,24823363	-1,99%
PET	-0,00388885	0,40990265	-0,79%
PEEK	-0,02782273	0,18160383	-0,29%
PEEK GF30	-0,02407268	0,19406958	-0,30%
PEI	-0,06343919	0,16081876	-0,51%
PA 6	-0,67780189	0,19060542	-8,05%
PA 6 GF30	-0,49111522	0,16737495	-4,31%
PA 66	-0,52409849	0,20616996	-7,62%
PA 66 GF30	-0,4994523	0,17100563	-4,60%

Tafel 30
Parameter m und n nach Regression ε_t(t) = m x tⁿ und daraus berechnete Kriechdehnungen nach 50 Jahren Bauteillebensdauer und 25 N/mm² Druckspannung bei 23°C

Die Bestimmung der Parameter des Burgers-Modells erfolgte getrennt für die Dehnungsanteile ε_v(t) und ε_{rel}(t). Der viskose Dehnungsanteil ε_v(t) beschreibt eine lineare Gerade mit dem Anstieg σ₀/η₀. Für die Versuchswerte wurde vereinfacht und auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass relaxierende Dehnungen nach 1000 h Versuchszeit abgeschlossen sind und der Anstieg der Dehnungen nach 1000 h Versuchslaufzeit rein durch viskose Dehnungen hervorgerufen wird. Der Parameter σ₀ ist bekannt und entspricht der

¹²⁹ 438.000 h

aufgebrachten Spannung von -25 N/mm^2 . Der unbekannte Parameter η_0 lässt sich somit direkt aus dem Kurvenanstieg der Versuchswerte nach 1000 h und σ_0 bestimmen. Für eine möglichst genaue Abbildung der nichtlinearen Kriechkurven mit dem Burgers-Modell ist es erforderlich $\varepsilon_{\text{rel}}(t)$, durch mehrere in Reihe geschaltete Feder-Dämpfer-Elemente abzubilden. Für die vorliegenden Kriechkurven der Kunststoffe wurden ab drei in Reihe geschalteter Feder-Dämpfer-Elemente gute Ergebnisse erzielt. Für den relaxierenden Dehnungsanteil wurden die sechs unbekannt Parameter $E_{\text{rel},i}$ und $\eta_{\text{rel},i}$ (für $i = 1$ bis 3) mit Hilfe des Solver Add-Ins von MS Excel bestimmt.

Parameter	Einheit	POM-C	POM-C GF25	PET	PEEK	PEEK GF30
σ_0	N/mm ²	-25,00	-25,00	-25,00	-25,00	-25,00
η_0	-	288000,00	361875,00	1440000,00	2447250,00	5000000,00
$E_{\text{rel},1}$	N/mm ²	64,55	1254,77	813,66	536,21	488,99
$\eta_{\text{rel},1}$	-	13792,86	1380203,74	510265,42	54505,15	89988,94
$E_{\text{rel},2}$	N/mm ²	100,68	228,83	2456550,18	7614802,65	797,10
$\eta_{\text{rel},2}$	-	125,26	331,89	214956798707,28	3327300,08	86,67
$E_{\text{rel},3}$	N/mm ²	89,49	113,33	1083,66	685,92	25287,71
$\eta_{\text{rel},3}$	-	1491,06	11318,54	31427,76	765,19	2045,77
$\varepsilon_t(438000\text{h})$	%	-38,9	-30,6	-7,7	-4,6	-2,3

Parameter	Einheit	PEI	PA6	PA6 GF30	PA66	PA66 GF30
σ_0	N/mm ²	-25,00	-25,00	-25,00	-25,00	-25,00
η_0	-	2447250,00	180000,00	240000,00	130909,09	180000,00
$E_{\text{rel},1}$	N/mm ²	394,61	35,81	85,44	36,45	44,46
$\eta_{\text{rel},1}$	-	163841,33	35,73	47567,85	16922,06	9781,82
$E_{\text{rel},2}$	N/mm ²	312,36	22,51	37,65	33,87	51,24
$\eta_{\text{rel},2}$	-	428,62	1268,95	55,72	65,17	38,59
$E_{\text{rel},3}$	N/mm ²	560,62	39,01	48,59	39,77	59,23
$\eta_{\text{rel},3}$	-	9195,40	19072,80	3143,07	2032,47	752,60
$\varepsilon_t(438000\text{h})$	%	-4,7	-63,6	-47,1	-85,7	-62,3

Tafel 31

Anhand der Daten der Messreihe 2 bestimmte Parameter des Burgers-Modells und extrapolierte Kriechdehnung nach 50 Jahren

Bild 94 bis Bild 96 vergleicht für die Materialien POM-C, POM-C GF25 und PEI die Ergebnisse der Kurvenregression mit den Modellen nach Findley und Burgers¹³⁰ mit den in Messreihe 2 ermittelten Kriechdehnungen. Mit dem Modell nach Findley wird bis etwa 1000 h für alle zehn untersuchten Materialien eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchswerten erzielt. Für Zeitwerte oberhalb von 1000 h liegen die mit dem Modell nach Findley ermittelten Kriechdehnungen betragsmäßig leicht über den Werten der Versuche. Unter der Voraussetzung, dass der Parameter n größer 0 und kleiner 1 ist, nimmt der Anstieg der Kriechdehnungs-Zeit-Kurve im Modell nach Findley im weiteren Zeitverlauf ab und läuft für einen unendlich langen Zeitraum gegen Null. Die Extrapolation der Kriechdehnungen mit dem Modell nach Findley kann unter Umständen dazu führen, dass die tatsächlichen Kriechdehnungen schon nach relativ kurzen Zeiträumen der Extrapolation kleine angesetzt werden.

Das Burgers-Modells mit drei in Reihe geschalteten Feder-Dämpfer-Elementen ist sehr gut geeignet das Kriechdehnungsverhalten der zehn untersuchten Kunststoffe abzubilden. Für den Zeitraum in dem Vergleichswerte aus der Messreihe 2 vorliegen sind die Dehnungskurven des mathematischen Modells nahezu identisch mit denen der Messreihe 2. Die bei der Parameterermittlung getroffene Annahme, dass relaxierende Dehnungen nach 1000 h abgeschlossen sind und der Dehnungsanstieg nach 1000 h konstant bleibt, ist sehr konservativ. Es ist daher davon auszugehen, dass bei Extrapolation der Kriechdehnungen für einen langen Zeitraum zu hohe Werte ermittelt werden.

Im Vergleich der beiden mathematischen Modelle wird festgestellt, dass durch das Burgers-Modells eine deutlich genauere Abbildung des Kriechdehnungsverhaltens möglich ist, als mit dem Modell nach Findley. Für eine Extrapolation der Kriechdehnungen sollte nur das Burgers-Modell Anwendung finden, da mit diesem Modell die tatsächlichen Kriechdehnungen eher zu groß angesetzt werden.

¹³⁰ Nur für die zeitabhängigen Dehnungsanteile.

Bild 94

Gegenüberstellung der Kriechdehnungen aus Versuch und der Regression nach dem Findley- und dem Burgers-Modell für POM-C

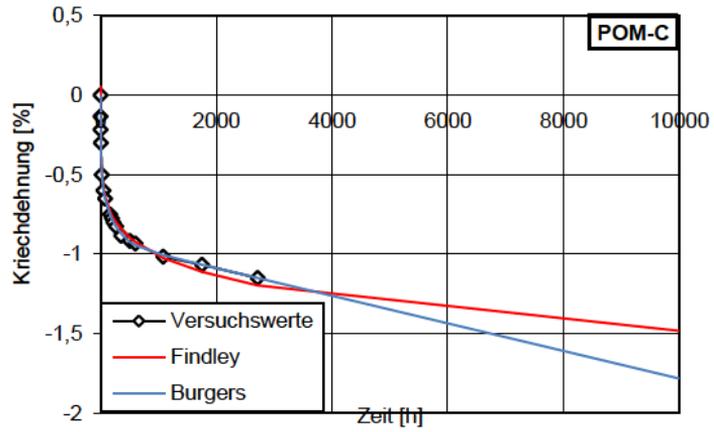


Bild 95

Gegenüberstellung der Kriechdehnungen aus Versuch und der Regression nach dem Findley- und dem Burgers-Modell für POM-C GF25

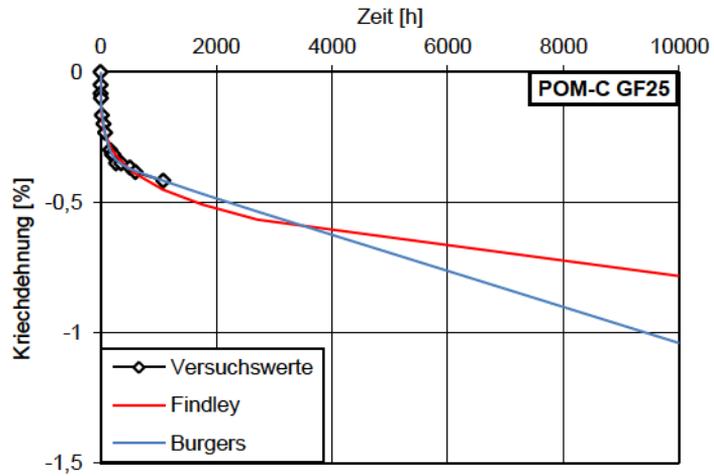
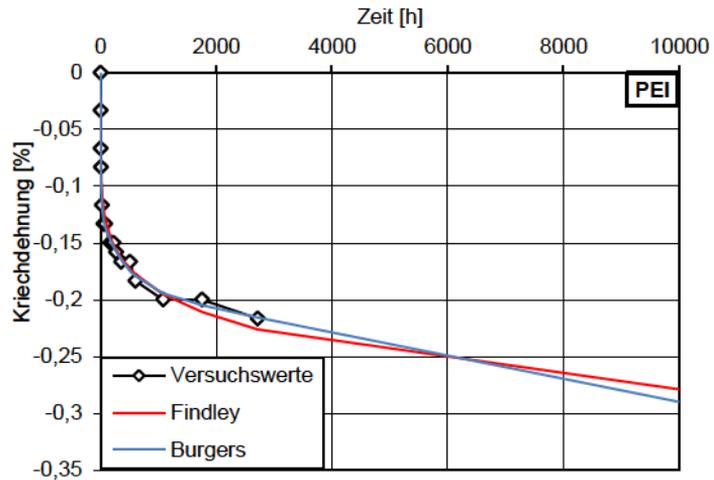


Bild 96

Gegenüberstellung der Kriechdehnungen aus Versuch und der Regression nach dem Findley- und dem Burgers-Modell für PEI



5.6.5 Kriechversuche mit PEI an schlanken Prüfkörpern mit Rechteckquerschnitt

Am Material PEI wurden zwei weitere Prüfreiheiten zur Ermittlung des Kriechverhaltens bei +23°C und +50°C durchgeführt. Je Prüfreiheit wurden parallel neun Prüfkörper in unterschiedlichen Spannungsniveaus für einen Zeitraum von 1000 h belastet. Die Prüfkörper hatten die Form eines rechtwinkligen Prismas mit einer Querschnittsfläche von 5 mm x 5 mm und einer Ausgangslänge von 28 mm. Die Versuche erfolgten in einer Zeitstandanlage mit Videoextensiometer und einer Prüfkammer mit Temperatursteuerung. Die Belastung wurde durch Stahlgewichte und Hebelsysteme aufgebracht. Für die Einspannung der Prüfkörper wurde die Umlenkvorrichtung nach Abschnitt 5.6.3.2 verwendet. Die neun Spannungsstufen wurden von -8 N/mm² bis -20 N/mm² in Schrittweiten von 4 N/mm² und von -20 N/mm² bis -70 N/mm² in Schrittweiten von 10 N/mm² festgelegt. Die Spannungsstufe -70 N/mm² entspricht bei Höchstlast der Zeitstandanlage und dem gewählten Prüfkörperquerschnitt der maximal erreichbaren Belastung.

Bild 97 zeigt die in der Prüfreiheit 1, bei +23°C, aufgezeichneten Gesamtdehnungen ϵ_{ges} . Die Dehnungsmessung der Prüfkörper der Spannungsstufen -40 N/mm² und -60 N/mm² ist aufgrund eines Softwarefehlers in der Kamerasteuerung fehlgeschlagen. Bei allen Prüfkörpern steigen die Dehnungen bei etwa 130 h leicht an und sinken bei etwa 510 h um diesen Betrag wieder ab. In der Zeitspanne zwischen 130 h und 510 h verlaufen die Dehnungskurven in einer regelmäßigen Wellen- bzw. Sinuskurve mit einem Zyklus von 24 h. Da die Temperatur in der Prüfkammer bei +23°C ± 0,5°C konstant gehalten wurde, wird das Verhalten auf Messfehler des Videoextensiometers zurückgeführt, das allem Anschein nach empfindlich auf Änderungen der Raumlufttemperatur reagiert. Im Zeitraum von 130 h bis 510 h waren Tage mit sehr hohen Außentemperaturen, bei denen die Raumlufttemperatur am Aufstellort des Gerätes am Tage auf etwa +29°C anstieg und nachts wieder auf +26°C abfiel. Ab 510 h Stunden wurde der Raum bei +23°C klimatisiert, was zu einer deutlichen Verbesserung der Messergebnisse führte.

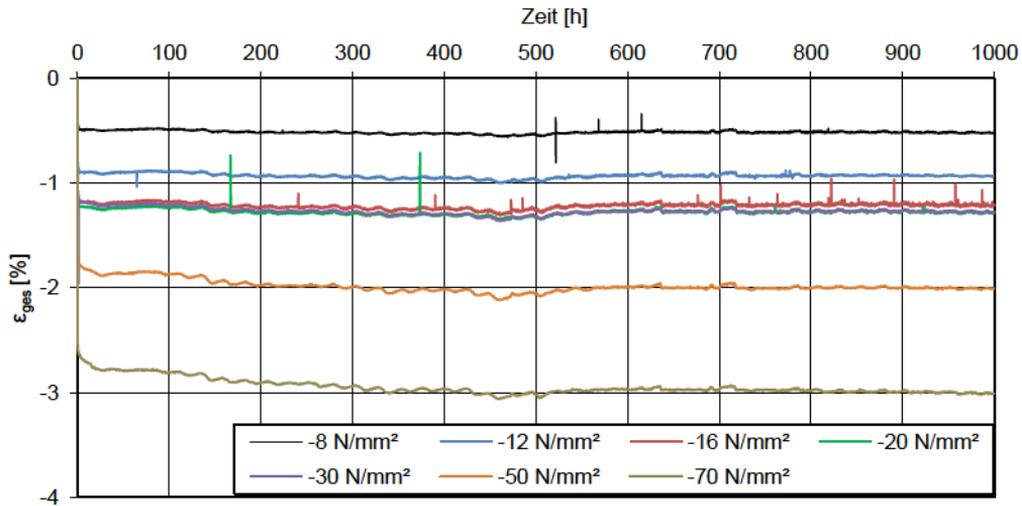


Bild 97

Im Zeitstandversuch bei aufgezeichnete Dehnungen von PEI. Prüfreihe 1, +23°C

Bezogen auf einen Anfangs-Elastizitätsmodul für PEI von 3900 N/mm² bei der Spannungsstufe -8 N/mm², bis 3300 N/mm² bei der Spannungsstufe -70 N/mm² liegen die gemessenen Anfangsdehnungen ϵ_0 der Spannungsstufen -8 N/mm² bis -20 N/mm² bei etwa 200 % - 250% der rechnerischen Werte. Für die Spannungsstufen -30 N/mm² bis -70 N/mm² stimmen die gemessene Anfangsdehnungen ϵ_0 mit den rechnerischen Werten überein.

Für die Auswertung der Kriechversuche wurden die Messwerte in zwei Stufen aufbereitet. In Stufe 1 wurden die Dehnungskurven durch eine geglättete Kurve mit 22 Stützstellen überlagert. Anschließend erfolgte in Stufe 2 die Eliminierung der Anfangsdehnung ϵ_0 . Dazu wurde der Dehnungswert für den Zeitpunkt 30 Sekunden nach Aufbringen der Last als Referenzwert $\epsilon_{0,30\text{sek}}$ herangezogen und im Weiteren von der Gesamtdéhnung ϵ_{ges} abgezogen. Die verbleibende Déhnung $\epsilon(t)$ entspricht der Summe der zeitveränderlichen Déhnungsanteile aus viskoser und relexierender Déhnung. Zur Veranschaulichung ist das Vorgehen für die Spannungsstufe -8 N/mm² in Bild 98 dargestellt.

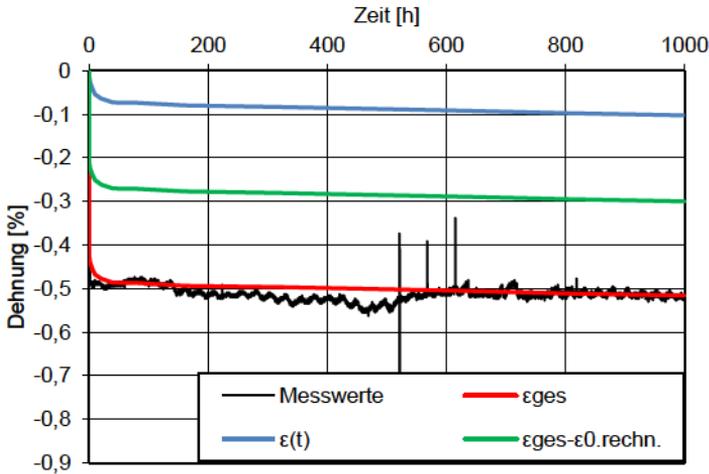


Bild 98
Zeitabhängiges Dehnungsverhalten von PEI bei +23°C in der Spannungsstufe -8 N/mm²

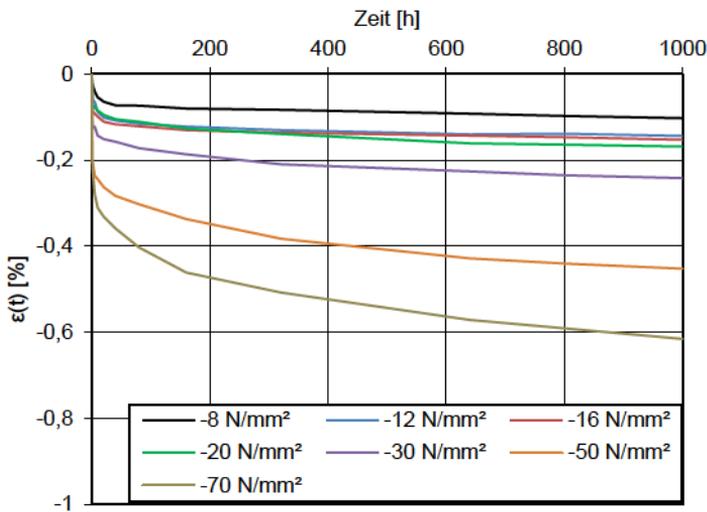


Bild 99
Verlauf der ermittelten zeitabhängigen Dehnungen $\epsilon(t)$ für PEI in den Spannungsstufen -8 N/mm² bis -70 N/mm² bei +23°C

Nach Eliminierung der Anfangsdehnungen $\epsilon_{0.30\text{sek}}$ ergibt sich für die Spannungsstufen der in Bild 99 dargestellte Dehnungsverlauf. Die Dehnungen der unteren Spannungsstufen -12 N/mm², -16 N/mm² und -20 N/mm² liegen auch nach Abzug der Anfangsdehnungen alle betragsmäßig im gleichen Bereich. Für eine genauere Hinterfragung sind hier ggf. weitere Messreihen erforderlich.

Anhand der ermittelten zeitabhängigen Dehnungen $\varepsilon(t)$ wurde eine Regression mit dem Modell nach Burgers in der Form:

Gleichung 14

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_v(t) + \varepsilon_{rel}(t) = \frac{t \cdot \sigma_0}{\eta_0} + \sum_1^3 \frac{\sigma_0}{E_{rel,i}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\frac{\eta_{rel,i}}{E_{rel,i}}}} \right)$$

durchgeführt. Für die Ermittlung des Parameters η_0 wurden die Anstiege der einzelnen Dehnungskurven für die Spannungsstufen -8 N/mm² bis -70 N/mm² im Zeitbereich zwischen 800 h und 1000 h bestimmt. Aus diesen wurde für jede Spannungsstufe ein Wert für η_0 berechnet und ein Mittelwert gebildet. Die Einzelwerte für η_0 streuen spannungsunabhängig im Bereich von 312000 bis 935000, der Mittelwert beträgt 645000. Die Parameter $E_{rel,i}$ und $\eta_{rel,i}$ ($i = 1$ bis 3) wurden mit dem Solver Add-Inn von MS Excel und dem Dehnungsverlauf der Spannungsstufe -70 N/mm² ermittelt.

Tafel 32

Parameter für die Bestimmung der zeitabhängigen Dehnungen von PEI bei 23°C mit dem Modell nach Burgers

Parameter	Wert
η_0	1169,2182
$E_{rel,1}$	3,0202
$\eta_{rel,1}$	300,5853
$E_{rel,2}$	210,4827
$\eta_{rel,2}$	344,5660
$E_{rel,3}$	30840,5582
$\eta_{rel,3}$	1169,2182

Bild 100 vergleicht die zeitabhängigen Dehnungen $\varepsilon(t)$ der Versuche mit denen der Berechnung nach dem Burgers-Modell mit Parametern nach Tafel 32. Für die Spannungsstufen -20 N/mm² bis -70 N/mm² wird eine sehr gute Übereinstimmung aus Berechnung und Versuchswerten erreicht. Für die Spannungsstufen -8 N/mm² bis -16 N/mm² liegen die berechneten Dehnungen unterhalb der Dehnungen aus den Versuchen, wobei die Abweichungen rein auf die Anfangsdehnungen bis etwa 50 h zurückzuführen sind. Im Weiteren verlaufen die Dehnungskurven aus Versuch und Berechnung parallel zueinander. Die Kurve „ $\varepsilon_{rel}(t)$ -70 N/mm²“ zeigt der Verlauf des relaxierenden Dehnungsanteils des Burgers-Modells für die Spannungsstufe -70 N/mm². Ab etwa 700 h

ist praktisch keine Zunahme der Dehnungen aus dem relaxierenden Dehnungsanteil mehr zu verzeichnen. Die Dehnungszunahme von $\epsilon(t)$ ist für Zeiten oberhalb von 700 h konstant mit dem Anstieg σ_0/μ_0 .

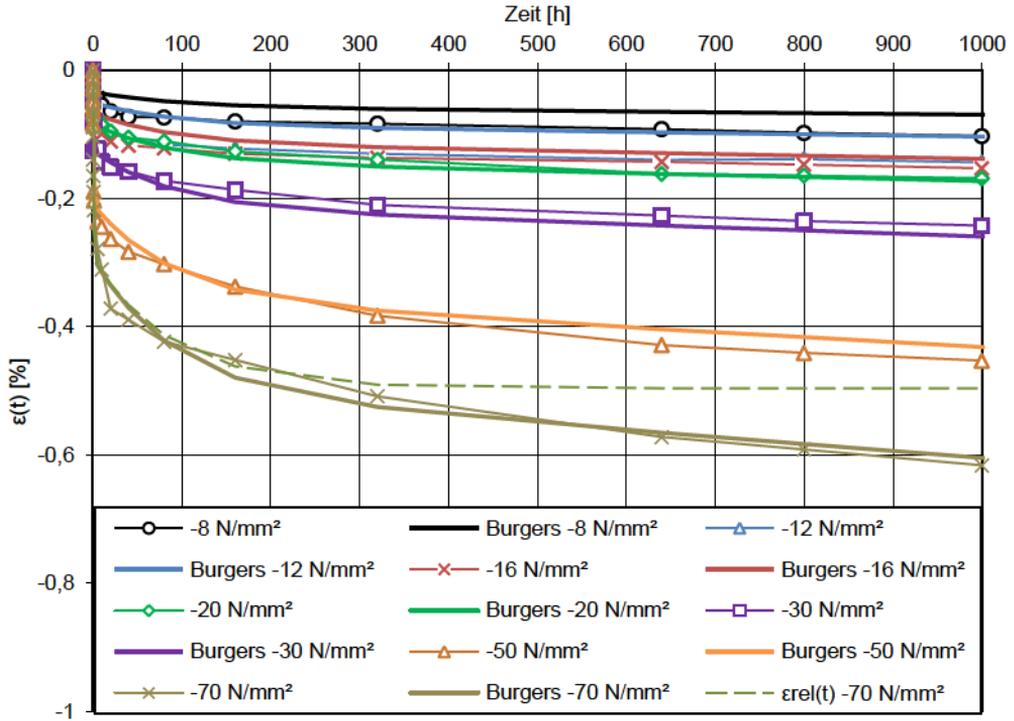


Bild 100
 Vergleich der zeitabhängigen Dehnung $\epsilon(t)$ von PEI aus Versuchsdaten der Prüfreihe 1 bei +23°C und der Berechnung nach dem Burgers-Modell

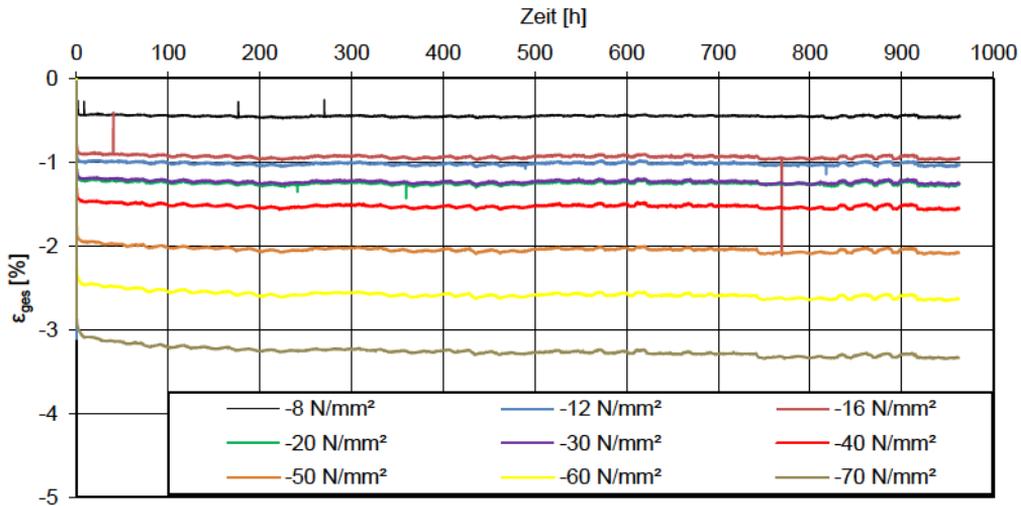


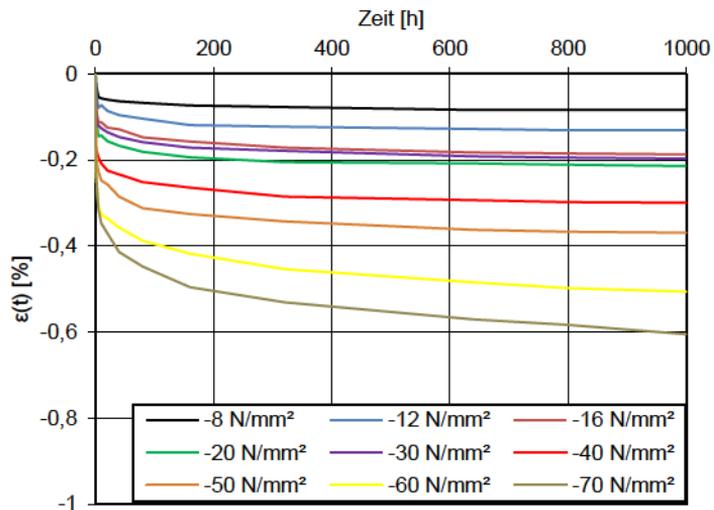
Bild 101

Im Zeitstandversuch bei aufgezeichnete Dehnungen von PEI. Prüfreihe 2, +50°C

Durchführung und Auswertung der Prüfreihe bei +50°C erfolgten in gleicher Art und Weise. Die aufgezeichneten Gesamtdehnungen bei +50°C erreichen etwa die gleichen Werte wie bei +23°C. Weitestgehend gilt dies auch für die zeitabhängigen Dehnungen $\epsilon(t)$. Die Dehnungswerte bei +23°C und +50°C zeigen qualitativ und quantitativ kaum Unterschiede. Wie die Gegenüberstellung der Kurvenverläufe in Bild 103 zeigt, kann das Burgers-Modell mit den Parametern nach Tafel 32 bei PEI auch für eine Materialtemperatur von +50°C verwendet werden.

Bild 102

Verlauf der ermittelten zeitabhängigen Dehnungen $\epsilon(t)$ für PEI in den Spannungsstufen -8 N/mm² bis -70 N/mm² bei +50°C



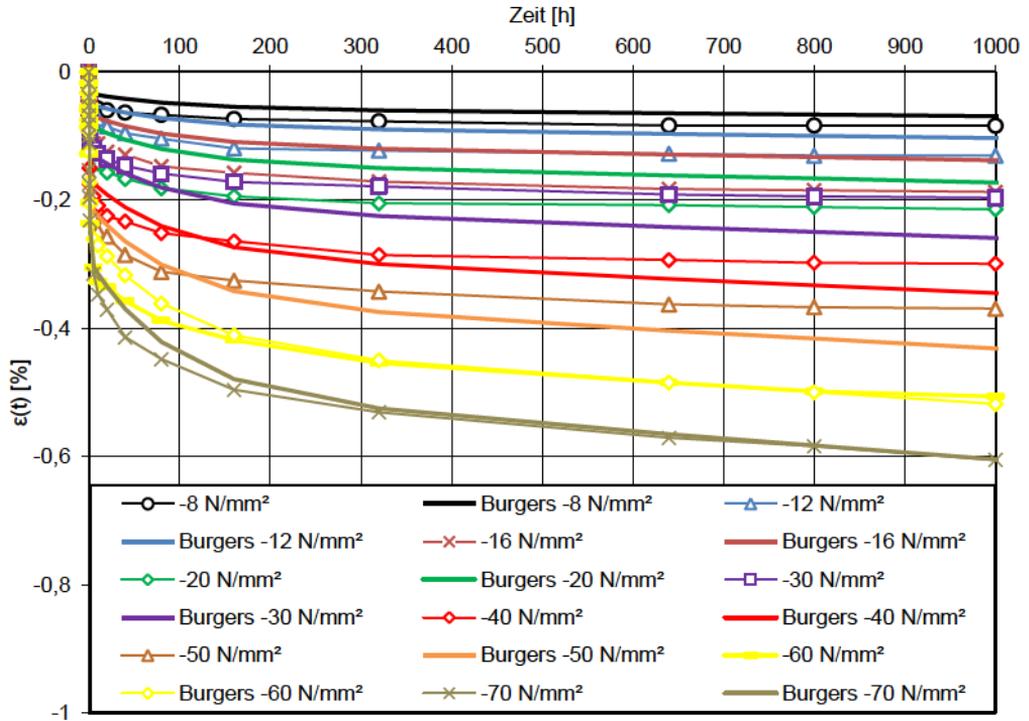


Bild 103

Vergleich der zeitabhängigen Dehnung $\epsilon(t)$ von PEI aus Versuchsdaten der Prüfreihe 2 bei $+50^\circ\text{C}$ und der Berechnung nach dem Burgers-Modell

5.7 Dynamisch-Mechanische Analyse

5.7.1 Grundlagen

Die Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) ist ein Verfahren zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften von Materialien mit viskoelastischem Verhalten, als Funktion der Temperatur, Zeit und Belastungsgeschwindigkeit¹³¹. Nachfolgend erfolgt eine kurze Darstellung der Grundlagen der DMA und der durch DMA ermittelten Parameter¹³². Weiterführende Angaben zur Durchführung, Auswertung und praktischen Anwendung finden sich in Ehrenstein 2003, ab Seite 255.

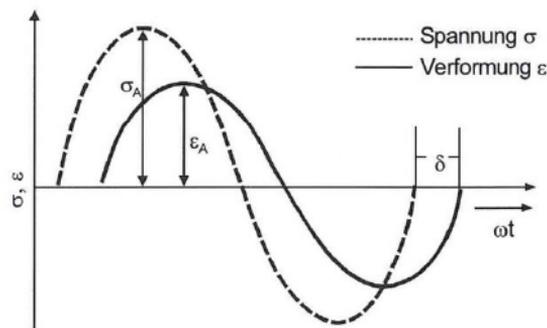
Bei der DMA werden kleine Prüfkörper durch eine sinusförmige Schwingung angeregt. Regelparameter der Schwingung sind die Frequenz und die maximal aufgebrachte

¹³¹ Vergleiche Ehrenstein 2003, Seite 255; Grellmann 2011, Seite 95

¹³² Alle Angaben wurden Ehrenstein 2003, Seite 255 ff und DIN EN ISO 6721-1 entnommen.

Spannung oder die maximal erreichte Dehnung. Ausgewertet wird das Antwortsignal des Prüfkörpers auf die Einwirkung, also die zugehörigen Dehnungen oder Spannungen. Bei Materialien mit viskoelastischem Verhalten erfolgt das Antwortsignal des Prüfkörpers auf eine Einwirkung zeitverzögert, man spricht hier von einer Phasenverschiebung mit dem Phasenwinkel δ . Bei rein elastischen Materialien, wie Stahl oder Glas, erfolgt das Antwortsignal zeitgleich mit der Einwirkung, die Phasenverschiebung ist demzufolge Null. Im Verfahren der DMA werden die Amplitude der Spannung σ_A , die Amplitude der Dehnung ε_A und der Phasenwinkel δ zwischen der Spannungs- und der Dehnungen versuchstechnisch ermittelt.

Bild 104
Sinusförmige Schwingung und Antwortsignal eines linear-viskoelastischen Materials nach Ehrenstein 2003



Die Durchführung der DMA ist nach DIN EN ISO 6721-1 für die Versuchsanordnungen Zugversuch, 3-Punkt-Biegung, eingespannte Biegung, Kompression, Scherung und Torsion möglich. Je nach Versuchstyp lassen sich die komplexen Module E^* , G^* , K^* oder L^* ¹³³ bestimmen.

Der komplexe Modul M^* ¹³⁴ ist definiert als Quotient aus Dehnungsamplitude σ_A zur Spannungsamplitude ε_A bzw. als quadratisches Mittel aus Speichermodul M' und Verlustmodul M'' :

¹³³ E^* Elastizitätsmodul, G^* Schubmodul, K^* Kompressionsmodul, L^* einachsiger Dehnungsmodul

¹³⁴ M^* steht allgemein für E^* , G^* , K^* oder L^* .

$$|M^*| = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} = \sqrt{[M'(\omega)]^2 + [M''(\omega)]^2}$$

$$M'(\omega) = |M^*| \cdot \cos \delta$$

$$M''(\omega) = |M^*| \cdot \sin \delta$$

$$\tan \delta = \frac{M''(\omega)}{M'(\omega)}$$

Nach DIN EN ISO 6721-1 stellt der Speichermodul M' die Steifigkeit eines viskoelastischen Werkstoffs dar und ist ein Maß für speicherbare Energie einer Schwingungsperiode. M' entspricht in etwa dem Elastizitätsmodul bei einmaliger zügiger Beanspruchung im niedrigen Lastniveau. Der Speichermodul E' dient der Beurteilung der elastischen Eigenschaften eines Werkstoffes

Der Verlustmodul M'' entspricht der während einer Schwingungsperiode dissipierten¹³⁵ Energie und kennzeichnet die viskosen Eigenschaften eines Werkstoffes.

Das Verhältnis von M'' zu M' wird als $\tan \delta$ bezeichnet und kennzeichnet die mechanische Dämpfung eines viskoelastischen Systems. Hohe Werte von $\tan \delta$ kennzeichnen ein Material mit hohen nichtelastischen Eigenschaften.

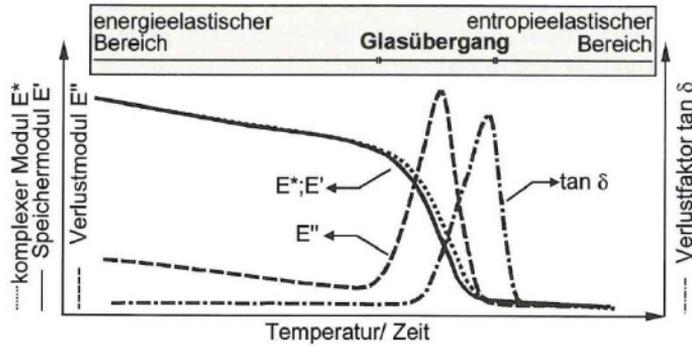
Bei der Durchführung der DMA müssen aufgebrachte Deformationen im linear-viskoelastischen Bereich liegen. Die Starttemperatur sollte 30 °C bis 50 °C unterhalb des erwarteten Glasübergangsbereichs des Materials liegen. Im Verlauf der Prüfung wird eine konstante Heizrate < 3°C/Minute empfohlen. Die Maximale Prüftemperatur ergibt sich auf der Schmelz- bzw. Zersetzungstemperatur der Probe. Die Frequenz der Schwingung ist einstellbar zwischen 0,001 Hz bis 200 Hz, wobei die Standardmessfrequenz 1 Hz beträgt.¹³⁶

¹³⁵ entzogenen

¹³⁶ Vergleiche Ehrenstein 2003, Seite 274-275,

Bild 105

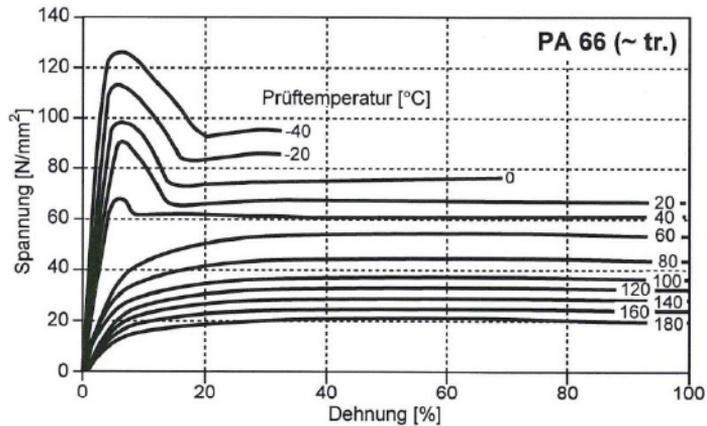
Schematische Darstellung typischer DMA-Kurven eines amorphen Kunststoffes.
Nach Ehrenstein 2003, Seite 259.



Durch DMA ist neben der Bestimmung der Modul- und Dämpfungswerte auch eine Bestimmung der Glasübergangstemperatur möglich. Die Glasübergangstemperatur beschreibt eine Temperaturgrenze, bei der sich der Spannungs-Dehnungs-Verlauf eines Materials signifikant ändert. Unterhalb der Glasübergangstemperatur ist das Material spröde und fest, oberhalb der Glasübergangstemperatur zäh und duktil. Je nach Temperatur kann wie in Bild 106 dargestellt ein- und derselbe Kunststoff unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Verläufe annehmen.¹³⁷

Bild 106

Spannungs-Dehnungskurven von teilkristalinem PA 66 bei unterschiedlichen Prüftemperaturen, $v = 1 \text{ mm/min}$.
Nach Ehrenstein 1999, Seite 174.



Signifikante Änderungen des Spannungs-Dehnungsverhaltens in einem engen Temperaturbereich bedeuten für die Bemessung eines Bauteils einen erhöhten Aufwand. Es ist daher zu empfehlen, schon bei der Materialauswahl der Kunststoffe darauf zu achten, dass die Glasübergangstem-

¹³⁷ Vergleiche Ehrenstein 1999, Seite 173-174.

peratur außerhalb des erwarteten Einsatztemperaturbereiches liegt.

Für die Bestimmung der Glasübergangstemperatur hat sich bisher kein bestimmtes Verfahren durchgesetzt. Vielmehr existieren aus unterschiedlichen Normvorschlägen mehrere Verfahren für die Bestimmung der Glasübergangstemperatur.¹³⁸ Eine Übersicht über die unterschiedlichen Verfahren zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur findet sich in Ehrenstein 2003, ab Seite 263. Für die Bestimmung der Glasübergangstemperatur der in dieser Arbeit vorgestellten Dynamisch-Mechanischen-Analysen an Kunststoffen kamen die Tangentenmethode¹³⁹ und die Methode des Maximums des Verlustfaktors $\tan \delta$ ¹⁴⁰ zum Einsatz.

5.7.2 DMA - 3-Punktbiegung

Für die DMA wurde das Analysegerät DMA 242 C/1G der Firma NETZSCH mit Belastungsvorrichtung für 3-Punktbiegung genutzt.

Mit der Belastungsvorrichtung für 3-Punktbiegung wurden von den Materialien POM-C GF25, PET, PEEK, PEI, PA6 und PA66 je drei Proben in den Abmessungen 20 mm x 10 mm x 5 mm (l x b x d) im Temperaturbereich von -60°C bis +300°C und einer Heizrate von 3 K/min geprüft. Die Analyse erfolgte bei den Frequenzen 0,5 Hz, 1 Hz und 10 Hz. Für die Auswertung und Gegenüberstellung der Ergebnisse wurden für jede Material-Frequenzkombination die Mittelwerte für E' , E'' und $\tan \delta$ aus drei Messungen gebildet. Bild 107 zeigt beispielhaft den temperaturabhängigen Verlauf des Speichermoduls E' , Verlustmoduls E'' und des Verlustfaktors $\tan \delta$ für das Material PET. Für alle untersuchten Materialien wurden bei der Frequenz 10 Hz geringfügig höhere Speichermodule E' als bei 0,5 Hz und 1 Hz festgestellt. Die Steifigkeitsveränderung ist vor allem bei Temperaturen unterhalb 0°C feststellbar und beträgt im Maximum etwa 10%. Für den im Bauwesen relevanten Temperaturbereich von -20°C bis +80°C sind die Steifigkeitsgewinne durch höher Belastungsgeschwindigkeit bei allen untersuchten Kunststoff-

¹³⁸ Vergleiche Ehrenstein 2003, Seite 263.

¹³⁹ Vergleiche Ehrenstein 2003, Seite 266-267.

¹⁴⁰ Vergleiche Ehrenstein 2003, Seite 267-268.

fen vernachlässigbar. Der Vergleich der Materialien untereinander erfolgt daher für die Standardfrequenz 1 Hz.

Bild 107

Speichermodule E' , Verlustmodule E'' und Verlustfaktor $\tan \delta$ von PET in Abhängigkeit der Temperatur. Frequenzen der erzwungen sinusförmigen Schwingung: 0,5 Hz, 1 Hz und 10 Hz 3-Punktbiegung

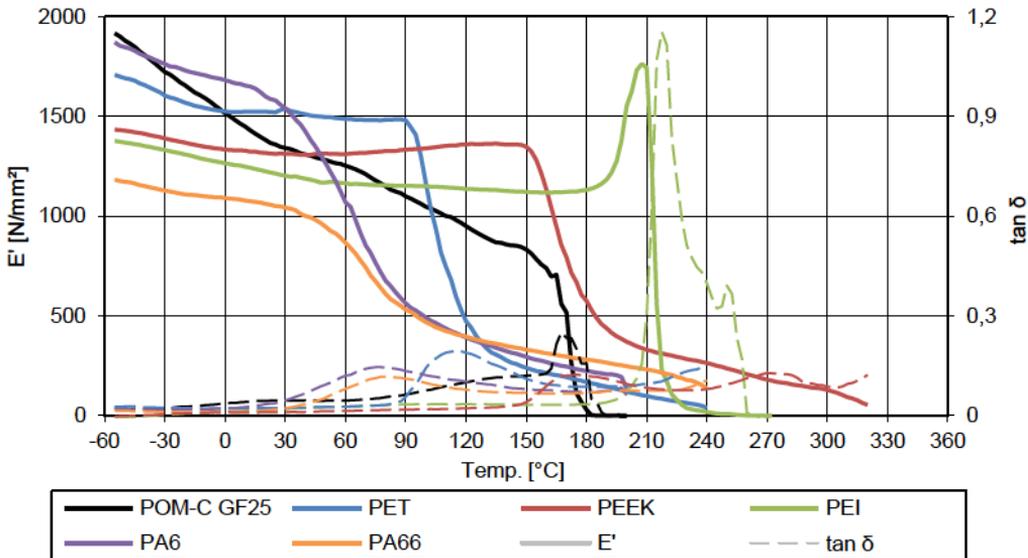
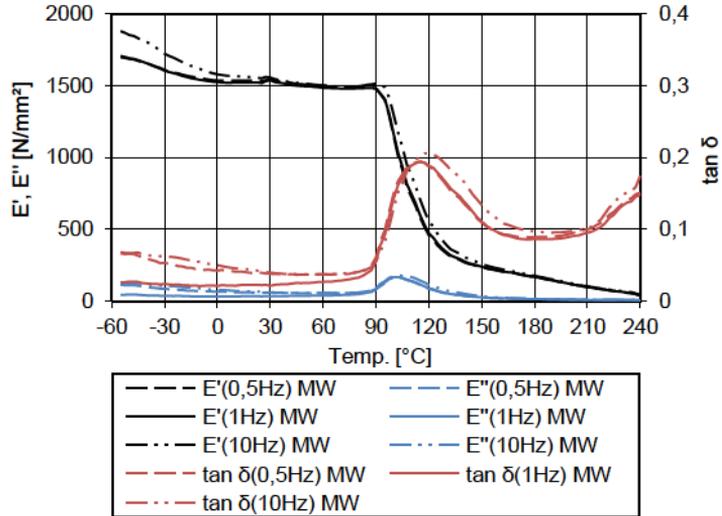


Bild 108

Gegenüberstellung der temperaturabhängigen Verläufe der Speichermodulle E' und Verlustmodule $\tan \delta$ für die Frequenz 1 Hz

5.7.3 DMA - Zugversuch

Für die DMA wurde das Analysegerät DMA 242 C/1G der Firma NETZSCH mit Belastungsvorrichtung für den Zugversuch genutzt.

Mit der Belastungsvorrichtung für den Zugversuch wurden von den Materialien POM-C, PET, PEI, PA6 und PA66 je drei Proben in den Abmessungen 30 mm x 4,8 mm x 0,75 mm (l x b x d) im Temperaturbereich von -30°C bis zur Schmelztemperatur des jeweiligen Materials mit einer Heizrate von 1 K/min geprüft. Die Analyse erfolgte bei den Frequenzen 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz und 50 Hz. Für die Auswertung und Gegenüberstellung der Ergebnisse wurden für jede Material-Frequenzkombination die Mittelwerte für E' , E'' und $\tan \delta$ aus drei Messungen gebildet. Änderungen des Speichermoduls E' und des Verlustmoduls E'' infolge unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeiten sind bei allen Materialien erkennbar, jedoch gering, so dass der Vergleich der Materialien untereinander für die Standardfrequenz 1 Hz erfolgen kann.

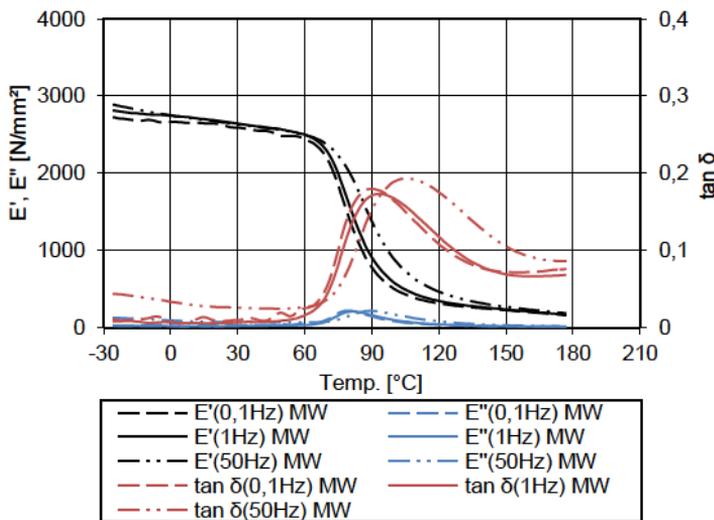


Bild 109

Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan \delta$ von PET in Abhängigkeit der Temperatur. Frequenzen der erzwungen sinusförmigen Schwingung: 0,1 Hz, 1 Hz und 50 Hz Zugversuch

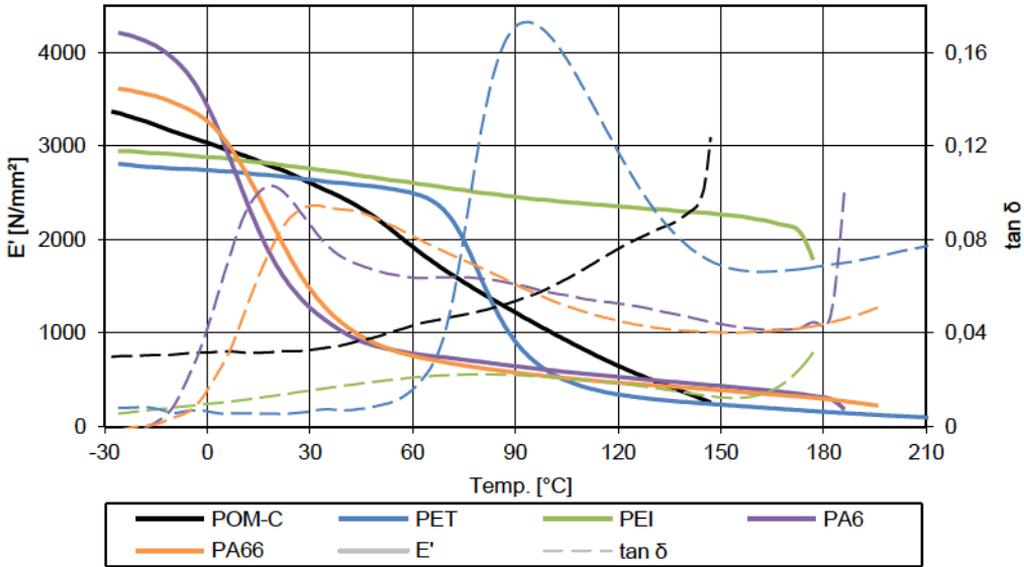


Bild 110
Gegenüberstellung der temperaturabhängigen Verläufe der Speichermodule E' und Verlustmodule $\tan \delta$ für die Frequenz 1 Hz

5.7.4 Auswertung

Die Materialien PA6 und PA66 zeigen bei der 3-Punktbiegung im Temperaturbereich von 30°C bis 120°C einen deutlich Abfall des Speichermoduls E' . Die mit der Methode des Maximums von $\tan \delta$ bestimmte Glasübergangstemperatur T_g liegt hier bei beiden Materialien bei etwa 75°C. Im Zugversuch wurden Glasübergangstemperaturen von 16°C bzw. 30°C festgestellt. Der Abfall des Speichermoduls erfolgt hier im Temperaturbereich von -10°C bis 40°C. Der temperaturabhängige Verlauf des Speichermoduls E' und die Glasübergangstemperatur von PA6 und PA66 sind für einen Einsatz als Klotzungsmaterial kritisch zu bewerten, da im erwarteten Einsatztemperaturbereich mit großen Änderungen der Materialeigenschaften zu rechnen ist. Verstärkend kommt hinzu, dass je nach Wassergehalt von PA6 und PA66 sich die Glasübergangstemperatur bis in den Bereich von etwa -8°C¹⁴¹ verschieben kann. Der Verlustfaktor $\tan \delta$ nimmt im Einsatztemperaturbereich hohe Werte an, was für hohe inelastische Dehnungen von P6 und

¹⁴¹ Vergleiche Ehrenstein 2007, Seite 58 und 61.

PA66 spricht. Im Hinblick darauf ist von der Verwendung von PA6 und PA66 als Klotzungsmaterial für hohe Lasten abzuraten.

Die untersuchten Proben von POM-C GF25 zeigen bei 3-Punktbiegung einen annähernd linearen Abfall des Speichermoduls E' bis zur Schmelztemperatur. Ein ähnlicher Verlauf wurde auch für POM-C im Zugversuch festgestellt, wobei der Speichermodul von POM-C mit steigender Temperatur kontinuierlich gegen Null läuft und bei POM-C GF25 bei Erreichen der Schmelztemperatur noch einmal ein starker Abfall des Speichermoduls zu verzeichnen ist. Hintergrund dafür ist mit hoher Wahrscheinlichkeit das Aufschmelzen der Matrix des Kunststoff-Glasfaser-Verbundes bei POM-C GF25. Der lokale Anstieg von $\tan \sigma$ bei 165°C bzw. 150°C ist auf die Schmelzprozesse zurückzuführen und entspricht in diesem Fall nicht der Glasübergangstemperatur. Im untersuchten Temperaturbereich von -60°C bis 200°C konnte kein Glasübergangsbereich festgestellt werden. Für unverstärktes POM wird in der Literatur eine Glasübergangstemperatur von -70°C genannt¹⁴². Beim Einsatz von POM-C GF25 bzw. POM-C als Klotzungsmaterial müssen etwa 30% bzw. 50% Steifigkeitsänderung durch Temperaturveränderungen von -20°C bis +80°C beachtet werden. Bei der Zugprüfung wurden für POM-C ein konstant hoher Verlustfaktor $\tan \delta$ ermittelt. Für den Einsatz von POM-C ist mit hohen inelastischen Dehnungen zu rechnen.

Für PET wurde im Temperaturbereich von 0° bis +60°C ein sowohl bei 3-Punktbiegung, als auch bei Zugprüfung ein annähernd konstanter Verlauf des Speichermodul E' ermittelt. Die Glasübergangstemperatur T_g liegt bei +110°C bzw. 91°C. Im Bereich der Glasübergangstemperatur nimmt der Speichermodul bei wenigen Grad Temperaturänderung um etwa 85% ab und stagniert bei höheren Temperaturen bis zur Schmelze auf einem niedrigen Niveau. Als Klotzungsmaterial mit Einsatztemperaturen von -20°C bis +80°C ist PET nach den Ergebnissen der DMA geeignet. Aus dem konstanten Verlauf des Speichermoduls E' sind aus Temperaturänderungen keine signifikanten Steifigkeitsveränderungen von PET zu erwarten. Der Verlustfaktor $\tan \sigma$ steigt erst mit Erreichen der Glasübergangstemperatur an. Bei Temperaturen

¹⁴² Vergleiche Ehrenstein 2007, Seite 75.

unterhalb T_g ist nur mit geringen inelastischen Dehnungen zu rechnen.

Der Hochleistungskunststoff PEEK ist bei 3-Punktbiegung durch einen nahezu konstanten Verlauf des Speichermoduls von -60°C bis $+150^\circ\text{C}$ gekennzeichnet. Die Glasübergangstemperatur beträgt $+170^\circ\text{C}$. Im Bereich von T_g nimmt der Speichermodul um etwa 70% ab und hält anschließend ein niedriges Niveau bis zur Schmelze bei 320°C . Die Eignung von PEEK als Klotzungsmaterial ist mit der von PET vergleichbar, wobei die höhere Glasübergangstemperatur von PEEK mehr Sicherheitsreserven bei evtl. auftretenden Temperaturspitzen bietet.

Für PEI wurden sowohl bei 3-Punktbiegung, als auch bei der Zugprüfung ein sehr konstanter Verlauf des Speichermoduls E' über den gesamten Temperaturverlauf bis zur Schmelze festgestellt. Der Verlust des Speichermoduls von -20°C auf $+80^\circ\text{C}$ liegt bei 12% bzw. 15%. Glasübergang und Schmelze von PEI erfolgen im selben Temperaturbereich bei etwa $+200^\circ\text{C}$. Der Verlustfaktor $\tan \delta$ von PEI ist für beide untersuchten Belastungsarten bis zum Erreichen der Schmelztemperatur konstant gering. Inelastische Dehnungen haben somit bei PEI nur geringe Auswirkungen auf das Dehnungsverhalten.

Aus der Reihe der mittels DMA untersuchten Kunststoffe ist PEI aufgrund des annähernd linearen Verlaufs des Speichermoduls, der hohen Glasübergangs- bzw. Schmelztemperatur und des im Vergleich niedrigsten Verlustfaktor $\tan \delta$ als Klotzungsmaterial zu bevorzugen.

Ermittelte Speichermodule E' der im Zugversuch untersuchten Materialien entsprechen in etwa den unter Abschnitt 5.3 bestimmten Elastizitätsmodulen E_0 ¹⁴³. Die bei 3-Punktbiegung ermittelten Speichermodule E' sind betragsmäßig nicht mit den Elastizitätsmodulen E_0 aus Zug- oder Druckversuchen vergleichbar.

¹⁴³ Vergleiche Tafel 21.

5.8 Reibkoeffizient Kunststoff auf Glas

Der Reibkoeffizient des Kontaktmaterials der Klotzung zur Glasoberfläche hat einen großen Einfluss auf die Spannungsverteilung und –höhe der Glaskante in der Kontaktfläche¹⁴⁴. Für die Bemessung einer Klotzungs konstruktion und der Verglasung ist daher die Kenntnis des jeweiligen Reibungskoeffizienten zwischen Kontaktmaterial und Glas unabdingbar. Wird die Reibung zweier Kontaktpartner unterschätzt, hat dies zwangsläufig auch eine Unterschätzung der in der Kontaktfläche entstehenden Spannungen zur Folge.

Zahlenwerte der Reibkoeffizienten für thermoplastische Kunststoffe findet man in der Literatur fast ausschließlich für die Reibung Kunststoff auf Kunststoff oder Kunststoff auf Stahl. Werden Reibkoeffizienten für die Reibung auf anderen Materialien, wie zum Beispiel Glas, benötigt, so muss man diese erst bestimmen.

Für die Bestimmung der Reibkoeffizienten wurde ein Versuchsaufbau gewählt, bei dem ein Gleitschlitten über eine Glasplatte 80 cm x 80 cm gezogen wird. Der Gleitschlitten besitzt drei kreisrunde Füße aus dem jeweiligen Kunststoffmaterial und wird mit einem Gewicht belastet. Über ein handelsübliches Kraftmessgerät wird die Zugkraft gemessen, die notwendig ist, um den Schlitten mit dem Gewicht über die Glasplatte zu ziehen. Der Quotient aus Zugkraft F_H zu Gewichtskraft von Schlitten und Zusatzgewicht F_V ergibt den Reibkoeffizienten μ . Die Versuche wurden unter Laborbedingungen bei 23°C und 45% bis 55% rel. Luftfeuchte durchgeführt. Je Material erfolgten 10 Einzelmessungen, aus denen ein Mittelwert bestimmt wurde.

¹⁴⁴ Vergleiche hierzu Abschnitt 7.1.4.

Tafel 33

Reibungskoeffizient μ für die Gleitreibung von Kunststoff auf Glas bzw. Stahl bei 23°C und 45% bis 55% rel. Luftfeuchte

Kunststoff	Gleitreibungskoeffizient μ für Reibung auf	
	Glas ¹⁴⁵	Stahl ¹⁴⁶
POM-C	k.A.	0,30
POM-C GF25	0,27	k.A.
PET	0,28	0,25 – 0,54
PEEK	k.A.	0,30 – 0,38
PEEK GF	0,19	k.A.
PEI	0,24	k.A.
PA 6	0,31	0,38 - 0,42
PA 6 GF30	0,40	0,30 – 0,35
PA 66	0,38	0,35 - 0,42
PA 66 GF30	0,46	0,32 – 0,36

¹⁴⁵ Werte wurden durch Versuche bestimmt.

¹⁴⁶ Vergleiche Lichharz Gleitlager; Dominghaus 2005, Seite 481.

5.9 Zusammenfassung und Wertung

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen an Substanzproben der Kunststoffe lassen sich Aussagen zur Eignung und zu Anwendungsgrenzen für den Einsatz als Klotzungsmaterial ableiten. Die Substanzuntersuchungen erfolgten auf Grundlage der Materialauswahl in Abschnitt 5.1. Anhand der aus Datenblättern entnommenen Materialkennwerte wurden zehn potenziell geeignete Kunststoffe ausgewählt. Nach den Angaben der Datenblätter waren vor allem die Glasfaserverstärkten Varianten besonders geeignet. Durch die durchgeführten Zug- und Druckprüfungen wurden Materialkennwerte für die Einsatztemperaturen -20°C , $+23^{\circ}\text{C}$ und $+50^{\circ}\text{C}$ bestimmt. Die Annahme aus der Materialauswahl, dass glasfaserverstärkte Varianten der Kunststoffe deutliche Vorteile gegenüber den unverstärkten Kunststoffen haben, konnte nicht bestätigt werden. Für alle vier glasfaserverstärkten Varianten der Kunststoffe wurden deutlich geringere Steifigkeits- und Festigkeitswerte als nach den Datenblättern bestimmt. Die Beimischung von Glasfasern erhöht die Steifigkeit der Kunststoffe. Die Steifigkeitszunahme gegenüber dem unverstärkten Material beträgt bei im Extrusionsverfahren hergestellten Halbzeugen jedoch nur 10% bis 20%. Die Angaben der herstellenden Industrie zu Materialeigenschaften der glasfaserverstärkten Kunststoffe müssen kritisch hinterfragt werden. Aus Wettbewerbsgründen werden in Datenblättern und Materialkatalogen für im Extrudierverfahren hergestellte Halbzeuge bewusst Angaben gemacht, die nur für spritzgegossene Bauteile gelten. Die Werte unterscheiden sich hierbei um den Faktor 2 bis 3.

Durch Langzeitversuche wurde das Verformungsverhalten der Kunststoffe unter dauerhafter Druckkraftbelastung untersucht. Die Materialvertreter der Polyamide haben hier ein besonders kritisches Kriechverhalten aufgezeigt. Die geringsten Kriechverformungen wurden für PET, PEEK und PEI bestimmt.

In der Dynamisch-Mechanischen-Analyse sind Erkenntnisse zum temperaturabhängigen Verlauf der Steifigkeit, den Glasübergangs-, Schmelz- und möglicher Einsatztemperaturen gewonnen worden.

Aus der Gruppe der zehn untersuchten Kunststoffe müssen die vier Vertreter der Polyamide für den Einsatz als Klot-

zungsmaterial für hohe Belastungen ausgeschlossen werden. Ausschlaggebend dafür ist vor allem die hohe Kriechneigung. Je nach Wassergehalt von Polyamid verschiebt sich die Glasübergangstemperatur im Bereich von -8°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ und liegt damit im Einsatztemperaturbereich für eine Klotzung.

POM-C ist in Folge der hohen Kriechneigung nur bedingt als Klotzungsmaterial geeignet. Steifigkeit und Festigkeit liegen innerhalb der Untersuchungsreihen in einem mittleren Niveau, sinken aber mit Temperaturzunahme deutlich ab. Die Verwendung von POM-C als Klotzungsmaterial ist daher nur bei geringen Belastungen bis etwa 10 N/mm^2 Druckspannung und in einem temperaturstabilen Umfeld zu empfehlen.

Die Zugabe von 25% Glasfasern reduziert vor allem ungünstige viskoelastische Eigenschaften von POM-C. POM-C GF25 weist eine deutlich geringere Kriechneigung und eine bessere Temperaturstabilität als POM-C auf. Steifigkeitsänderungen infolge Temperaturveränderungen und Faserorientierung sollten bei der Bemessung beachtet werden. Bei Druckspannungen oberhalb 30 N/mm^2 werden Kriechverformungen bemessungsrelevant.

PET ist vor allem wegen geringer viskoelastischer Eigenschaften als Klotzungsmaterial geeignet. Als einziger der zehn untersuchten Kunststoffe besitzt PET eine ausgeprägte Streck- bzw. Fließgrenze. Die Glasübergangstemperatur bei etwa $+90^{\circ}\text{C}$ liegt etwas oberhalb des Einsatztemperaturbereiches einer Klotzung. Die Unbeständigkeit gegen heißes Wasser oder heißen Wasserdampf könnte bei der Anwendung in der Fassade unter Umständen problematisch sein.

Der Hochleistungskunststoff PEEK zeigte in allen Untersuchungen gute und sehr gute Werte. Als Klotzungsmaterial ist PEEK in UV-stabilsierter Ausführung auch für hohe Temperaturen und Beanspruchungen einsetzbar. Die Verstärkung von PEEK mit Glasfasern bringt bei Herstellung im Extrudierverfahren keine wesentlichen Eigenschaftsverbesserungen des Materials. Im Hinblick auf die im Vergleich zu den anderen Materialien sehr hohen Kosten für PEEK und PEEK GF30 ist die Verwendung jedoch nur bedingt zu empfehlen.

Das Material mit vorrangig sehr guten Eigenschaften ist PEI. Hinsichtlich Festigkeit, Kriechverhalten, Glasübergangstem-

peratur, viskoelastischen Eigenschaften und der Temperaturabhängigkeit der Materialkennwerte hat PEI Vorteile gegenüber allen anderen untersuchten Materialien. Die Steifigkeit von PEI ist im Vergleich zwar nur im mittleren Bereich angesiedelt, jedoch ist diese weitestgehend temperatur- als auch spannungsunabhängig. Für Entwurf und Bemessung einer Klotzung ist dies ein entscheidender Vorteil, da auch für hohe Belastungen mit vereinfachten Modellen berechnet werden kann. Aus den Untersuchungen stellt sich PEI als geeignetstes Klotzungsmaterial für hohe Belastungen heraus.

Tafel 34 stellt die Bewertung noch einmal quantitativ dar. Die Symbole kennzeichnen, wie sich ein Material innerhalb der untersuchten Eigenschaft gegenüber den anderen Materialien verhält.

Material	¹⁴⁷										Endwertung
	Eingangswertung	Zugfestigkeit	E-Modul (Zug)	Druckfestigkeit (kurz)	E-Modul (Druck)	Kriechverhalten	Temperaturabhängigkeit	Einsatztemperaturbereich	Glasübergangstemperatur	Preis [€/kg]	
POM-C	o	+	+	+	+	o	+	+	+	5,50	o
POM-C GF25	++	++	+++	o	++	++	+	+	+	15,80	+
PET	+	++	+	++	+	+++	++	o	o	7,70	+
PEEK	+	+++	++			+++	+++	+++	++	150,40	++
PEEK GF30	++	++	+++	+	+++	+++	+++	+++	++	188,00	++
PEI	+	+++	+	+++	+	+++	+++	+++	+++	17,60	+++
PA6	+	o	o	+	o	-	o	o	-	6,30	-
PA6 GF30	++	+	+	++	++	-	o	+	o	14,30	-
PA66	+	+	o	+	+	-	o	o	-	8,70	-
PA66 GF30	+++	++	+	+	+	-	o	+	o	15,20	-

Tafel 34

Wertung an Substanzproben
gewonnener Materialkenn-
werte hinsichtlich der An-
wendung als Klotzungsma-
terial für hohe Beanspru-
chung

- ungeeignet
- o bedingt geeignet
- + geeignet
- ++ gut geeignet
- +++ sehr gut geeignet

¹⁴⁷ Wertung nach E-Modul und Streckgrenze der Eingangswerte nach Tafel 10.

6 Konstruktive Ausbildungen von Klotzungskonstruktionen

6.1 Lasteinleitung in eine ideal plane Scheibenkante

6.1.1 Definition der ideal planen Scheibenkante

Die ideal plane Scheibenkante ist ein theoretisches Modell der Kantenqualität von Glasscheiben. Die exakt planen Flächen der Scheibenkanten stehen immer lotrecht zur Scheibenfläche. Verdrehungen der Scheibenkanten oder der Klotzungen sind ausgeschlossen.

Dieser theoretische Ansatz ist auch auf die Kantenausführung von laminierten Glasscheiben¹⁴⁸ übertragbar. Somit ist ein Kantenversatz im Modell der ideal planen Scheibenkante nicht zulässig.

6.1.2 Klotzung einer Einzelscheibe

Die Herstellung von Einzelscheiben mit entsprechend planen und lotrechten Kantenflächen ist durch den Einsatz von Bearbeitungsmaschinen, wie zum Beispiel CNC-Bearbeitungszentren, möglich. Die Schwierigkeit der Umsetzung liegt vielmehr in den Einbautoleranzen der Glasscheiben und Klotzungen. Ebenso haben Durchbiegungen in der Scheibenfläche einen direkten Einfluss auf die Kontaktflächen zwischen Scheibenkante und Klotzung.

Der Lastangriff erfolgt lotrecht zur Scheibenkante. Die Kraftresultierende liegt in der Mittelachse der Glasscheibe. Je nach Anwendung und Konstruktion setzt sich die Klotzung aus einem oder mehreren Einzelteilen zusammen. Das Bauteil, welches in direktem Kontakt mit der Glaskante steht, muss dabei den Anforderungen an ein mit der Glaskante verträgliches Kontaktmaterial entsprechen. Als Kontaktmaterial der Klotzung werden druckfeste Kunststoffe, weiche Metalle wie Aluminiumlegierungen oder Verfüllmörtel verwendet.

¹⁴⁸ Verbund-Sicherheitsglas (VSG) oder Verbundglas (VG).

Bild 111

Prinzipdarstellung der Klotzung einer Einzelscheibe mit ideal planer Scheibenkante.

- 1 Einzelscheibe
- 2 Klotzung
- F eingeleitete Kraft



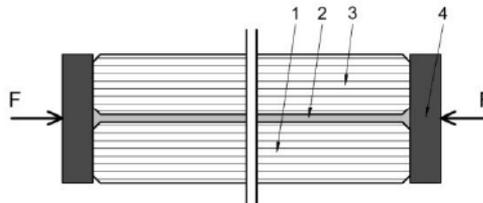
6.1.3 Klotzung eines VSG ohne Versatz

Die Herstellung von ideal planen Scheibenkanten von VSG, bei dem die Kanten der Einzelscheiben des VSG keinen Versatz zueinander besitzen, ist bisher technologisch nur durch einen nachträglichen Kantenschliff nach dem Laminierprozess möglich. Uneingeschränkt anwendbar ist dieses Verfahren nur für VSG aus Spiegelglas. Bei der Herstellung des VSG werden Einzelscheiben mit einem Übermaß in jeder Seitenlänge verwendet. Im Anschluss an den Laminierprozess werden die Kanten des VSG auf das Sollmaß abgeschliffen. Die Größe des Übermaßes ist dabei abhängig vom größten zu erwartenden Versatzmaß.

Bild 112

Prinzipdarstellung der Klotzung einer VSG-Scheibe mit ideal planer Scheibenkante.

- 1 Einzelscheibe 1 des VSG
- 2 PVB-Folie
- 3 Einzelscheibe 2 des VSG
- 4 Klotzung
- F eingeleitete Kraft



Der nachträgliche Kantenschliff von VSG aus TVG oder ESG ist theoretisch ebenso möglich. Es können hier aber nur geringe Schlifftiefen erreicht werden. Für die Verbesserung der optischen Qualität von Glaskanten eines VSG ist dieses Verfahren sicherlich geeignet. Für die Einleitung von hohen Kräften in die Glaskante ist dieses Verfahren aber nicht zielführend. Durch den nachträglichen Kantenschliff wird die zur Glasoberfläche ansteigende Druckzone in vorgespannten Gläsern abgebaut. Das Gleichgewicht zwischen den beim Vorspannprozess eingepprägten Druckkräften an der Glasoberfläche und Zugkräften im inneren des Glaskörpers wird maßgeblich gestört. Es ist daher davon auszugehen, dass schon vergleichsweise geringe Kantenverletzung zu einem Spontanversagen der Glasscheiben führen kann. Der für das Festigkeitsverhalten von Glas positive Effekt der Überdrückung von Mikrorissen in der Oberfläche von vorgespannten Gläsern wird wieder aufgehoben. Ebenso wird die

Zugfestigkeit im Bereich der Glaskante, welche sich bei vorgespannten Gläsern aus der Zugfestigkeit des Grundmaterials Glas und der Druckvorspannung in der Glasoberfläche superponiert, reduziert. Nach DIN EN ISO 12543-5 dürfen die Glaskanten von VG und VSG aus thermisch vorgespannten Gläsern nach dem Vorspannprozess nicht mehr bearbeitet werden.

6.2 Ausgleich von Schiefstellungen der Scheibenkante durch die Klotzungs konstruktion

Die Scheibenkante ist planmäßig als eine lotrecht zur Scheibenebene stehende Fläche definiert. Die Klotzung der Scheibenkante erfolgt über flächigen Kontakt zwischen den Oberflächen der Glaskante und der Klotzung. Von einer Schiefstellung der Scheibenkante wird gesprochen, wenn die Kantenfläche von der planmäßigen Ebene zur Klotzungsfläche abweicht. Mögliche Ursache für eine solche Schiefstellung der Scheibenkante sind Fertigungstoleranzen beim Kantenschliff. Ebenso werden die Scheibenkanten bei Durchbiegung der Glasscheiben aus der planmäßigen Geometrie schiefgestellt. Schon sehr geringe Verdrehungen der Scheibenkante führen dazu, dass die planmäßige flächige Kraftübertragung in der Kontaktfläche zwischen Glas und Klotzung nur noch punktuell über eine schmale Kante erfolgt. Dies führt zwangsläufig zu hohen Spannungskonzentrationen an der Glaskante und im Klotzungsmaterial. Im günstigsten Fall ist das Klotzungsmaterial in der Lage, sich der geänderten Geometrie durch elastische Verformung anzupassen und somit eine punktuelle Kraftübertragung und die Spannungskonzentration teilweise abzubauen.

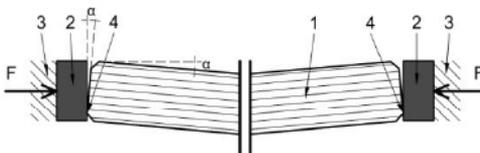


Bild 113

Schiefstellung der Scheibenkante infolge Scheibendurchbiegung

- 1 Einzelscheibe
- 2 Klotzung
- 3 Anschlusskonstruktion
- 4 Kontaktpunkt
- α Schiefstellwinkel
- F eingeleitete Kraft

Gemäß TRLV¹⁴⁹ wird die maximale Durchbiegung von Überkopf- und Vertikalverglasungen auf $L/100$ beschränkt. Infol-

¹⁴⁹ Vergleiche TRLV 2006, Abschnitt 5.3.1.

ge einer Durchbiegung der Scheibe von $L/100$ ergibt sich geometrisch ein Schiefstellwinkel der Glaskante von $2,3^\circ$.

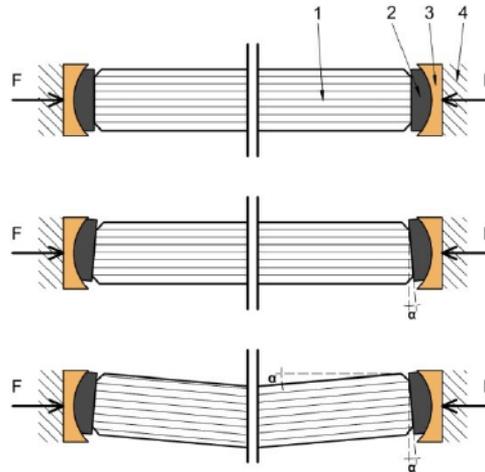
Die Schiefstellung der Scheibenkante durch Fertigungstoleranzen bei der Kantenbearbeitung ist nicht durch eine Normvorgabe begrenzt. In der alten DIN 1249-11¹⁵⁰ wurde die gerade Kante mit einem Winkel von $\approx 90^\circ$ zur Glasoberfläche definiert.

An die Klotzung stellt sich somit die Anforderung, Schiefstellungen der Scheibenkante in einem eingegrenzten Bereich ausgleichen zu können, so dass die Kraftübertragung zwischen Scheibenkante und Kontaktmaterial unabhängig von der Lage der Scheibenkante in der gesamten zur Verfügung stehenden Kontaktfläche erfolgt. Konstruktiv lässt sich diese Anforderung durch die Einführung eines Scharniergelenkes lösen. Die Klotzung wird dazu ein zwei Einzelbauteile, einen Kontaktklotz und einen Lagerklotz aufgelöst. Der Kontaktklotz muss dabei den Anforderungen an ein Kontaktmaterial entsprechen.

Bild 114

Ausbildung eines Scharniergelenkes in der Klotzungs-konstruktion zum Ausgleich von Schiefstellungen der Glasscheibenkante

- 1 Einzelscheibe
- 2 Kontaktklotz
- 3 Lagerklotz
- 4 Anschlusskonstruktion
- α Schiefstellwinkel
- F eingeleitete Kraft



6.3 Ausgleich von Maßtoleranzen durch die Klotzungs-konstruktion

Für den baupraktischen Einsatz von kraftschlüssig geklotzten Verglasungen ist der Ausgleich von Maßtoleranzen von großer Bedeutung. Diese Maßtoleranzen ergeben sich aus

¹⁵⁰ Vergleiche DIN 1249-11, Abschnitt 3.1.

einem Über- oder Untermaß der Verglasung und den Maßtoleranzen der Anschlusskonstruktion. Der Ausgleich dieser Maßtoleranzen muss zwangsläufig im Bereich der Klotzung erfolgen. Die technologisch einfachste und erprobte Lösung hierfür ist der Einsatz von Verfüllmörtel¹⁵¹. Der Verfüllmörtel wird als Kontakt- und Füllmaterial in den Klotzungsbereich eingepresst und passt sich dem zu verfüllenden Zwischenraum an. Vor dem Belasten der durch Verfüllmörtel hergestellten Klotzung muss sichergestellt sein, dass der Verfüllmörtel vollständig abgebunden ist. Gegebenenfalls ist für den Montagezustand eine zusätzliche Stützkonstruktion notwendig, über welche die noch nicht druckfeste Mörtelschicht entlastet wird. Beim Einbringen des Verfüllmörtels muss besonders auf die Herstellung einer homogenen Mörtelschicht geachtet werden.

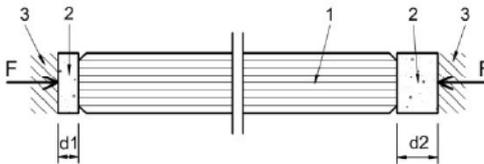


Bild 115

Ausgleich von Maßtoleranzen durch die Verwendung von Glas-mörtel als Klotzungsmaterial

- 1 Einzelscheibe
- 2 Mörtelschicht
- 3 Anschlusskonstruktion
- F eingeleitete Kraft

Werden Klotzungen aus Kunststoffen und Metallen verwendet, kann der Toleranzausgleich grundsätzlich durch einlegen von Futterstücken erfolgen. Die für die Futterstücke verwendeten Materialien müssen ebenso wie die Kontaktmaterialien eine ausreichende Druckfestigkeit, Temperaturstabilität und Alterungsbeständigkeit aufweisen. Für die Montage muss eine ausreichende Anzahl von Futterstücken in unterschiedlichen Dicken vorgehalten werden. Die Klotzung setzt sich dann aus mehreren Teilen zusammen. Im Kontaktbereich zur Glaskante ist ein Streifen des Kontaktmaterials angeordnet. Der Toleranzausgleich durch die Futterstücke erfolgt zwischen der Anschlusskonstruktion und dem Kontaktmaterial. Der durch die Futterstücke einstellbare Bereich und die Schrittweite der möglichen Dickeneinstellung werden durch die Auswahl der vorzuhaltenden Futterstücke bestimmt. Aufgrund der hohen Anzahl von vorzuhaltenden Einzelteilen und der nur schrittweisen Einstellmög-

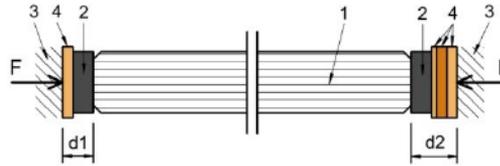
¹⁵¹ Im Glasbau haben sich hierzu die Produkte Hilti Hit HY50/70 und epple 31 etabliert. Für das Produkt Hilti Hit HY 50/70 gibt es Verwendbarkeitsnachweise für den Einsatz im Glasbau, vergleiche Bucak 2007

lichkeit der Klotzungsdicke ist dieses Verfahren für den bau-
praktischen Einsatz nur bedingt geeignet. Für die kraft- und
formschlüssige Klotzung von Glasscheiben ist es notwendig,
mit den Futterstücken die Maßtoleranzen exakt auszuglei-
chen.

Bild 116

Ausgleich von Maßtoleranzen durch Futterstücke

- 1 Einzelscheibe
- 2 Kontaktmaterial
- 3 Anschlusskonstruktion
- 4 Futterstücke
- F eingeleitete Kraft

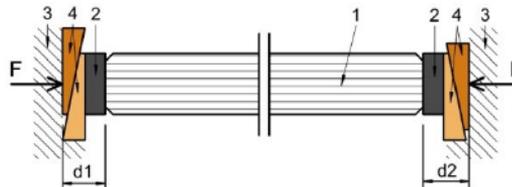


Eine genauere Lösung des Ausgleiches von Maßtoleranzen
ist die Verwendung von keilförmigen Futterstücken. Über
zwei gegenläufige Keile können Maßtoleranzen in einem de-
finierten Bereich stufenlos ausgeglichen werden. In Verbin-
dung mit geraden Futterstücken ist die Dicke der Klotzungs-
konstruktion ausgehend von einem Mindestmaß beliebig
steigerbar.

Bild 117

Ausgleich von Maßtoleranzen durch keilförmige Fut-
terstücke

- 1 Einzelscheibe
- 2 Kontaktmaterial
- 3 Anschlusskonstruktion
- 4 Futterstücke, gegenläu-
fige Einzelkeile
- F eingeleitete Kraft



Alternativ zu der in Bild 117 dargestellten Variante ist es
auch möglich, die Keile parallel zur Scheibenkante anzuord-
nen.

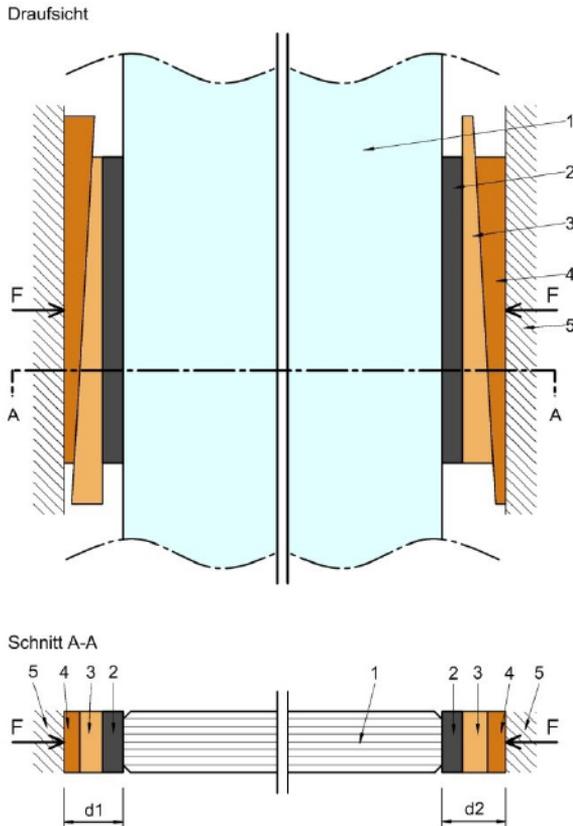


Bild 118
Ausgleich von Maßtoleranzen durch keilförmige Futterstücke parallel zur Scheibenkante

- 1 Einzelscheibe
- 2 Kontaktmaterial
- 3 keilförmiges Futterstück 1
- 4 keilförmiges Futterstück 2
- 5 Anschlusskonstruktion
- F eingeleitete Kraft

6.4 Gleichmäßige Lasteinleitung in Scheibenkanten mit Versatz

6.4.1 Allgemeines

Bei Verbund- und Verbund-Sicherheitsglasscheiben kann bedingt durch das Produktionsverfahren ein Versatz der Glaskanten der Einzelscheiben zueinander nicht ausgeschlossen werden. Das maximal zulässige Versatzmaß ist in DIN EN ISO 12543 Teil 5 beschrieben und abhängig von den Seitenlängen der Glasscheibe.

Nennmaß B oder H [mm]	Höchstmaß für den Versatz d [mm]
$B, H \leq 1000$	2,0
$B < 1000, H \leq 2000$	3,0
$B < 2000, H \leq 4000$	4,0
$B, H > 4000$	6,0

Tafel 35
Zulässiger Versatz d der Glaskanten nach DIN EN ISO 12543-5, Tabelle 5

Die Angaben in der Norm beruhen auf dem Einsatz der Verbund- und Verbund-Sicherheitsglasscheiben als Füllelement in Fassaden und Dachkonstruktionen. Bei der Einleitung von Druckkräften in die Glaskante von Verbund- oder Verbund-Sicherheitsgläsern werden an die Kantenqualität erhöhte Anforderungen gestellt. Die Angaben der DIN EN ISO 12543-5 sollten für diese Verglasungen verschärft werden. Eine Festlegung eines maximalen Versatzmaßes von 2,0 mm ist hier auch unter Beachtung der sich aus dem Versatz ergebenden Maßtoleranzen in den Außenabmessungen der Verglasung sinnvoll.

6.4.2 Klotzung eines VSG mit Kantenversatz durch die Verwendung von Mörtelsystemen

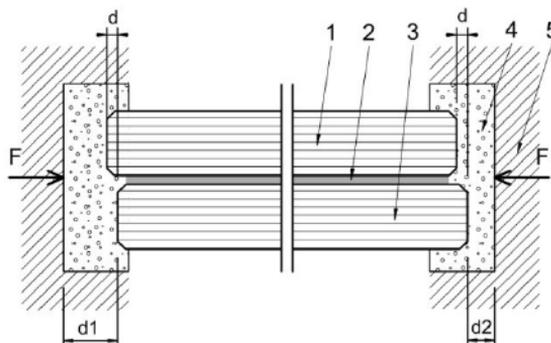
Das technologisch einfachste Vorgehen zur Herstellung der Klotzung eines VSG mit Kantenversatz ist die Verwendung von Mörtelsystemen als Klotzungs- und Ausgleichsmaterial. Entsprechende Mörtelsysteme wurden aus der Dübeltechnik in den Glasbau übernommen und werden seit mehreren Jahren zur Verfüllung im Bohrlochbereich von Punkthaltern angewendet. Bei der Innenhofüberdachung des Maximilian Museums in Augsburg¹⁵² wurden Klotzungen aus Verfüllmörtel zwischen Glaskanten und Knotenpunkten eingesetzt.

Das beim Einbringen plastische Material passt sich bei fachgerechter Verarbeitung einer beliebigen Geometrie im Klotzungsbereich an. Neben dem Kantenversatz werden in einem Arbeitsgang auch die Maßtoleranzen zwischen Verglasung und Anschlusskonstruktion ausgeglichen.

Bild 119

Klotzung eines VSG mit Kantenversatz durch die Verwendung von Glasmörtel

- 1 Einzelscheibe
- 2 Verbundschicht
- 3 Einzelscheibe
- 4 Glasmörtel
- 5 Anschlusskonstruktion
- d Kantenversatzmaß
- F eingeleitete Kraft



¹⁵² Vergleiche Ludwig 2000

Durch Wellershof¹⁵³ wurden Klotzungen von VSG mit Kan-
tenversatz hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit untersucht. Bei
den durchgeführten Versuchen wurden über eine Klotzungs-
fläche von etwa 20 mm x 21,5 mm Druckkräfte über eine
mindestens 3 mm dicke Mörtelschicht übertragen. Für das
Material Hilti Hit HY50¹⁵⁴ wurden im Mittelwert übertragbare
Druckkräfte von 120 kN ermittelt. Bezogen auf die Klot-
zungsfläche von etwa 400 mm² ergibt sich in der Mörtel-
schicht eine rechnerische Druckspannung von 300 N/mm².
Dieser Wert ist um das 4-fache höher als die vom Hersteller
des Mörtels im einaxialen Normdruckversuch ermittelte
Druckfestigkeit von 69 N/mm². In den im Rahmen dieser
Arbeit durchgeführten einaxialen Druckversuchen an Sub-
stanzproben des Materials Hilti Hit HY70 wurden Druckfes-
tigkeiten von 70 N/mm² - 100 N/mm² ermittelt. Die Probekör-
per haben bei diesen Versuchen durch Überschreitung der
Querzugbeanspruchbarkeit versagt. Bei den Versuchen von
Wellershof war der Glasmörtel in einem Stahlschuh quer-
dehnungsbehindert, wodurch die hohe Steigerung der Trag-
fähigkeit zu erklären ist. Bei der Verwendung von Glasmörtel
als Klotzungsmaterial empfiehlt es sich also, die Mörtel-
schicht durch entsprechende Ausführung der Anschlusskon-
struktion in der Querdehnung zu behindern.

Bei der Planung und Ausführung von Klotzungen mit Glas-
mörtel sind besonders die Aushärtezeiten des verwendeten
Mörtelsystems und die fachgerechte Verarbeitung zu beach-
ten. Unzureichende Durchmischung der meist 2-
Komponentigen Systeme oder Lufteinschlüsse im verfüllten
Klotzungsbereich beeinflussen die Tragfähigkeit und Steifig-
keit der Klotzung.

Bisher auf dem Markt befindliche Mörtelsysteme sind nach
der Aushärtung steif und besitzen somit keine Möglichkeit
nachträgliche Lageänderungen der Glaskante, wie zum Bei-
spiel bei Scheibendurchbiegung, auszugleichen.

6.4.3 Klotzung einer Einzelscheibe eines VSG

Abhängig von Verglasungsgröße und Höhe der einzuleiten-
den Kraft ist ein möglicher Ansatz zur Umgehung des Aus-

¹⁵³ Vergleiche Wellershof 2006, Seite 95 ff.

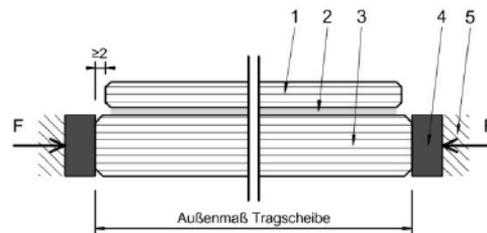
¹⁵⁴ Das Nachfolgeprodukt trägt die Bezeichnung Hilti Hit HY70.

gleiches eines Kantenversatzes, dass nur eine Einzelscheibe des VG oder VSG als Tragscheibe genutzt wird. Die andere Einzelscheibe oder Einzelscheiben haben eine Schutzfunktion für die Tragscheibe und dienen der Sicherstellung einer Resttragfähigkeit bei Glasbruch. Im Weiteren werden diese als Sekundärscheiben bezeichnet. Die Dicke der Sekundärscheibe kann deutlich geringer als die der Tragscheibe sein. Im Bereich der Lasteinleitung sollten die Glaskanten der Sekundärscheiben planmäßig mindestens 2 mm zur Tragscheibe zurückgesetzt werden, so dass auch bei einem Versatz der Einzelscheiben immer die Glaskante der Tragscheibe das Außenmaß der Verglasung bestimmt.

Bild 120

Klotzung einer Einzelscheibe eines VG/VSG, Sekundärscheibe zurückgesetzt

- 1 Sekundärscheibe
- 2 Verbundschicht
- 3 Tragscheibe
- 4 Klotzung
- 5 Anschlusskonstruktion



Bei der Innenhofüberdachung des Reichstagspräsidentenpalais in Berlin wurde für die im Obergurt des Tragwerkes angeordneten Glasscheiben eine derartige Klotzungsvariante gewählt. Die Mehrscheiben-Isolierverglasungen in den Regelabmessungen 1265 mm x 1784 mm haben von oben nach unten folgenden Aufbau:

8 mm ESG-H
 16 mm Scheibenzwischenraum (SZR)
 19 mm ESG-H
 3,04 mm Polyvinyl-Butyralfolie (PVB)
 8 mm TVG

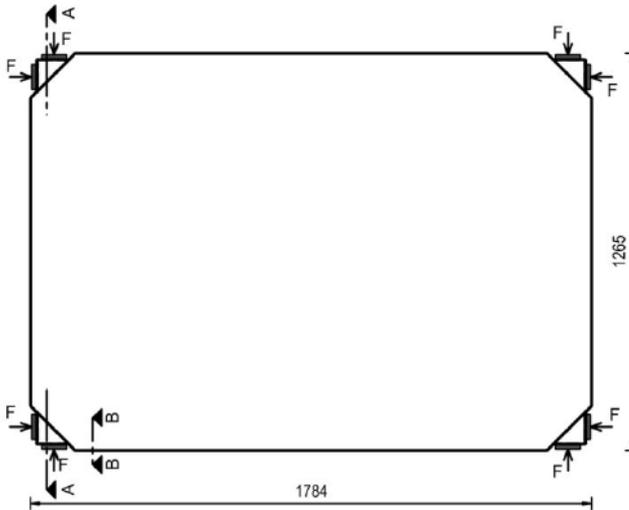


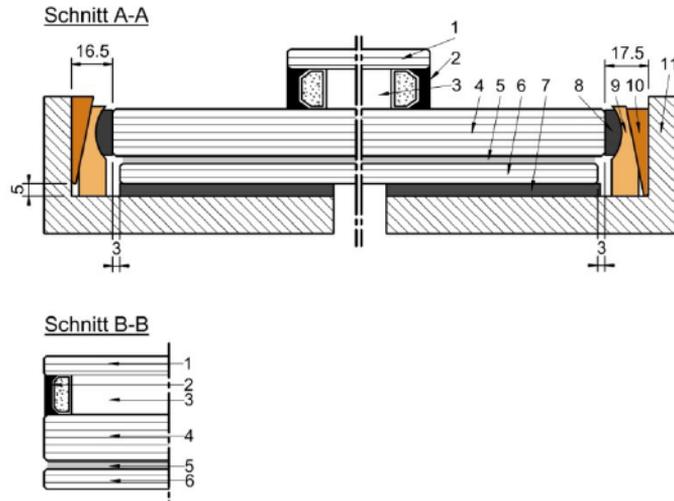
Bild 121
 Regelformat der Mehrscheiben-Isolierverlasungen der Innenhofüberdachung des Reichstagspräsidentenpalaais in Berlin

Der Abtrag der Obergurtkräfte des Fachwerkes erfolgt durch die 19 mm dicke Tragscheibe aus ESG-H. Die 8 mm dicke Sekundärscheibe aus TVG dient durch ihr größeres Bruchbild der Sicherstellung einer Resttragfähigkeit bei Bruch der VSG-Einheit. Die Mehrscheiben-Isolierglasscheiben sind in den Ecken in Knotenpunkten aus Edelstahl gelagert. Die Seitenränder der Glasscheiben bleiben ungestützt. Die Einleitung der Druckkräfte aus der Fachwerkwirkung des Tragwerkes in die 19 mm dicken Tragscheiben aus ESG-H erfolgt in den Knotenpunkten über je zwei 80 mm lange Klotzungen. Die 8 mm dicke Isolierglasscheibe aus ESG-H ist in den Ecken zurückgesetzt.

Bild 122

Schnittdarstellung Klotzungsdetail und freier Scheibenrand

- 1 Isolierglasscheibe
8 mm ESG-H
- 2 Randverbund
- 3 Scheibenzwischenraum
16 mm
- 4 Tragscheibe
19 mm ESG-H
- 5 PVB-Folie
3,04 mm
- 6 Sekundärscheibe
8 mm TVG
- 7 Silikonauflage
- 8 Kontaktklotz
POM-C GF25
- 9 Futterstück mit Lager-
schale für Kontaktklotz
- 10 keilförmiges Futterstück
- 11 Knotenpunkt (verein-
fachte Darstellung)



Das Problem des Kantenversatzes wurde hier dadurch gelöst, dass die Sekundärscheibe im Bereich der Lasteinleitung planmäßig um 3 mm zurückgesetzt wurde. Für die Produktion wurde ein maximal zulässiges Versatzmaß von 2,0 mm in der VSG-Einheit festgelegt. Eine Berührung zwischen Klotzung und Sekundärscheibe kann somit ausgeschlossen werden. Durch die keilförmigen Futterstücke ist es möglich, die Dicke der Klotzung von 16,5 mm bis 17,5 mm stufenlos einzustellen. Nach Herstellung der kraft- und formschlüssigen Klotzung wurde das mit 10 gekennzeichnete keilförmige Futterstück durch von oben aufsetzende Stellerschrauben in der Lage gesichert. Bei den Verglasungsarbeiten wurden an etwa 30% der Klotzungen Dicken größer 17,5 mm benötigt. In diesen Fällen wurden zwischen den beiden Futterstücken Edelstahlbleche je nach Bedarf mit Dicken von 0,5 mm bis 2,0 mm eingelegt.

6.4.4 Klotzung eines VSG mit Versatz durch ein Mehrfach-Scharniergelenk

Der Ansatz zur Einführung eines Scharniergelenkes für den Ausgleich von Schiefstellungen der Scheibenkante lässt sich durch die Kombination von mehreren Scharniergelenken innerhalb der Klotzungsstruktur auch auf die Ausgleichsmöglichkeit eines Scheibenversatzes erweitern.

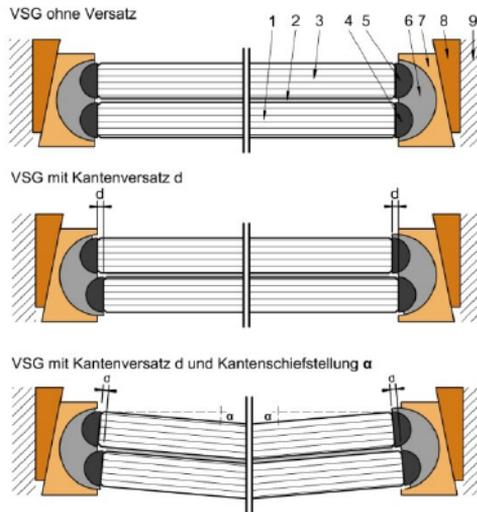


Bild 123

Mehrfach-Schamiergeelenk zum Ausgleich des Scheibenversatzes bei VSG

- 1 Einzelscheibe 1 des VSG
- 2 Verbundfolie
- 3 Einzelscheibe 2 des VSG
- 4 Kontaktklotz zu Einzelscheibe 1
- 5 Kontaktklotz zu Einzelscheibe 2
- 6 Lagerklotz
- 7 Futterstück mit Lager-
schale
- 8 keilförmiges Futterstück
- 9 Anschlusskonstruktion

Neben dem Kantenversatz können durch diese Klotzungs-konstruktion sowohl Verdrehungen der Scheibenkante als auch Maßtoleranzen ausgeglichen werden. Durch die variablen Anpassungsmöglichkeiten wird mit dieser Klotzungs-konstruktion stets ein flächiger Kontakt zwischen Kontakt-klotz und Scheibenkante sichergestellt. Die Anwendungsmöglichkeiten werden aber durch die Dicke der Klotzungs-konstruktion eingeschränkt.

6.5 Konstruktionsleitfaden

Erste und wichtigste Regel bei der Herstellung einer Klotzung für hohe Lasten ist die Einhaltung und Sicherstellung eines flächigen Kontakts zwischen Klotzung und Glasscheibe.

6.5.1 Anforderungen und Empfehlungen an die Klotzung

Die Klotzung kann im einfachsten Fall aus einem flachen Quader eines geeigneten Materials bestehen. Um innerhalb der Klotzung die Möglichkeit zum Ausgleich von Maßtoleranzen und Glasscheibenverformung zu geben, empfiehlt sich die Verwendung von mehrteiligen Klotzungs-konstruktionen. Für den Ausgleich des Kantenversatzes von VSG wurden in der Vergangenheit vorrangig Kunststoffmörtelsysteme verwendet. Einmal ausgehärtet können diese Klotzungen auf Lageänderungen der Glasscheibe nicht reagieren.

Insofern die Platzverhältnisse es zulassen sollten Scharniergelenke¹⁵⁵ in die Klotzung integriert werden.

An das Kontaktmaterial, also das Material des Bauteils, das direkt mit der Glaskante in Kontakt steht, werden besonderen Anforderungen gestellt.

- Der E-Modul sollte 10.000 N/mm² nicht überschreiten. FE-Berechnungen nach 7.2 haben gezeigt, dass mit Zunahme der Steifigkeit die Druckspannung in der Kontaktfläche ungleichmäßiger verteilt ist. Die Glasscheibe wird im Bereich der Klotzung gestaucht. Die Stauchung ist im Mittelpunkt der Klotzung höher als an den Enden. Materialien mit einem E-Modul von bis zu 10.000 N/mm² können die Verformung der Glasscheibe ausgleichen. Bei Materialien mit einem E-Modul oberhalb von 10.000 N/mm² sind Spannungskonzentrationen an den Klotzungsenden feststellbar, die auch Einfluss auf die Spannungsverteilung in der Glasscheibe haben.
- Der Reibungskoeffizient zu Glas sollte so gering wie möglich sein. Wird das Kontaktmaterial gestaucht, so dehnt es sich quer zur Belastungsrichtung aus. Diese Querdehnung führt in Verbindung mit Reibung in der Kontaktfläche zu hohen lokalen Querkraften.¹⁵⁶ Höhere Reibungskoeffizienten haben höhere Querkraften in der Kontaktfläche und damit auch höhere Normalspannungen in der Glasoberfläche zur Folge. Unter Umständen sind diese dann auch bemessungsrelevant.
- Die Querdehnung des Materials sollte so gering wie möglich sein. Bei Kunststoffen kann hier die Verwendung glasfaserverstärkter Varianten eine deutliche Reduzierung der Querdehnung zur Folge haben.

Als Kontaktmaterial sind Kunststoffe zu empfehlen. Die im Glasbau als Lagerhülsen und Abstandhalter verwendeten Kunststoffe aus PA6, PA66, POM-C oder PVC sollten als Klotzungs- bzw. Kontaktmaterial nicht zum Einsatz kommen. Vor allem hinsichtlich der hohen Kriechneigungen sind diese Materialien nur für geringe Belastungen einsetzbar. Nach den Untersuchungen nach Abschnitt 5 ist PEI als Kontaktmaterial zu empfehlen.

¹⁵⁵ Vergleiche Bild 122 und Bild 123.

¹⁵⁶ Querdehnungsbehinderung

6.5.2 Anforderungen und Empfehlungen an die Glasscheibe

An die Glasscheibe stellt sich vorrangig die Anforderung einer planen Glaskante. Zur Sicherstellung der Parallelität der Glaskanten bedürfen die Glasscheiben einer gehobenen Bearbeitungsqualität¹⁵⁷. Die Glaskanten sollten mindestens der Kantenbearbeitung „maßgeschliffen“ entsprechen.

Hinsichtlich des Risswachstums bei den hohen lokalen Oberflächenspannungen an der Glaskante, im Bereich der Klotzung, sollten nur ESG oder TVG verwendet werden.

6.5.3 Geometrische Anforderungen und Empfehlungen

Der Randabstand der Klotzung, also der Abstand zwischen der Ecke der Glasscheibe und dem Rand der Klotzung hat einen Einfluss auf die Normalspannungsverteilung in der Glaskante, hier speziell auf die Normalspannung parallel zur Scheibenkante. Mit geringer werdendem Randabstand steigt der Maximalwert der Normalspannung an der Scheibenkante an¹⁵⁸. Zu empfehlen ist ein Randabstand von 40 mm. Größere Randabstände haben kaum noch eine Reduzierung der Normalspannung in der Scheibenkante zur Folge. Ein Randabstand von 20 mm sollte nicht unterschritten werden.

Die Breite einer Klotzung ergibt sich automatisch aus der Dicke der zu verklotzenden Glasscheibe. Die Länge der Klotzung sollte in Interaktion mit erwarteter Belastung und der Druckfestigkeit des Klotzungsmaterials bestimmt werden.

¹⁵⁷ CNC-Bearbeitung der Glaskanten

¹⁵⁸ Vergleiche Abschnitt 7.1.3.

6.5.4 Vorgehen

Nachfolgend wird ein Vorschlag für ein strukturiertes Vorgehen zu Entwurf und Bemessung eines Tragwerkes mit lastabtragenden Gläsern und hochbeanspruchten Klotzungen unterbreitet. Der Vorschlag soll dem Anwender einen Weg aufzeigen, welche Schritte vom Entwurf über die Entwicklungsphase bis zur Bemessung derartiger Konstruktionen notwendig sind.

1. Entwurf
(gestalterisch und funktional)
2. Entwicklung eines Tragmodells
(Stabwerksmodell, FE-Modell ggf. Kombination aus Beidem)
3. Ermittlung maßgeblicher Einwirkungen und Lastfallkombinationen am Gesamttragwerk
4. Festlegung Verglasungsaufbau
(Einfachglas, Isolierglas, Schichtdicken -> Vordimensionierung nach Flächen bzw. thermischen Lasten)
5. Festlegung eines Klotzungssystems
(Klotzung auf Einzelscheibe oder VSG, mehrteilige Klotzung/Einfachklotzung/Vergussmörtel, Gelenkigkeit Ja/Nein?, Toleranzausgleich Ja/Nein?)
6. Festlegung der Lastpfade und Klotzungspositionen
(max. zwei Klotzungen pro Glaskante)
7. Bestimmung der Klotzungslasten am Tragmodell
(Vorabbestimmung: Annahme einer hohen Steifigkeit der Klotzung -> tendenziell ergeben sich hieraus zu hohe Klotzungslasten)
8. Auswahl eines geeigneten Kontaktmaterials
(Erforderliche Materialkennwerte (bekannt oder durch Versuche zu ermitteln):
 - E-Modul (Druck) bzw.
 - Druckspannung-Dehnung-Verlauf
 - Querdehnung (Druck)
 - Druckfestigkeit (Kurzzeit)
 - Temperaturabhängigkeit (DMA-Versuche)
 - Kriechverhalten im erwarteten Lastbereich
 - Reibungskoeffizient zu Glas)
9. Vordimensionierung der Klotzung
10. Bestimmung der Klotzungslasten am Tragmodell
(Verwendung realer Steifigkeiten der Klotzung)

11. Verformungskontrolle am Tragmodell
(bei zu hohen Verformungen ist ggf. eine Anpassung der Klotzung notwendig)
12. Bemessung der Glasscheibe am Teilsystem
(maßgebliche Glasformate und Glasaufbauten unter maßgeblichen Klotzungslasten:
 - lokaler Spannungsnachweis im Klotzungspunkt
 - globaler Spannungs- und Verformungsnachweis
 - Stabilitätsnachweis)
13. Bemessung der Klotzung
(Spannungs- und Verformungsnachweise für Kurz- und Langzeitbelastung für maßgebliche Lastfallkombinationen)

Die Schritte 9 bis 13 bedürfen ggf. eines iterativen Vorgehens. Insofern sich Änderungen des Verglasungsaufbaus oder in den Dimensionen und damit der Steifigkeit der Klotzung ergeben, hat dies direkten Einfluss auf Verformungen und Klotzungslasten im Tragmodell.

7 Numerische Berechnungen

7.1 Spannungsverteilung in der Glaskante bei Einleitung von Klotzungslasten

7.1.1 Allgemeines

Die Größe der durch eine Klotzung in die Glaskante übertragbaren Druckkraft ist sowohl von der Druckfestigkeit und Steifigkeit des Klotzungsmaterials, als auch von der Spannungsverteilung an der Glaskante abhängig. Durch die Klotzung werden lokal hohe Druckkräfte in die Kante einer Glasscheibe eingepreßt. In diesem Bereich ist davon auszugehen, dass am Rand der Klotzung bemessungsrelevante Spannungsspitzen auftreten.

Im Folgenden wird anhand eines vereinfachten, theoretischen Modells gezeigt, welche Spannungsverteilung an der Glaskante bei Einleitung von Klotzungslasten vorherrscht. Durch Variation von Parametern wie der Klotzungsposition, der Klotzungssteifigkeit und Reibung zwischen Klotzung und Glaskante wird gezeigt, inwieweit diese Parameter Einfluss auf die Verteilung und die Höhe der Spannungen an der Glaskante haben.

Für die Simulation wurde die FEM Software ANSYS Workbench 12.1 verwendet.

7.1.2 Vereinfachtes Modell der Lasteinleitung in die Glaskante

Das vereinfachte Modell bildet eine vertikal stehende Glasscheibe in den Abmessungen 200 mm x 150 mm x 12 mm ($b \times h \times t$) ab. An der Oberkante und Unterkante der Glasscheibe wird eine Klotzung durch je zwei übereinander liegende Quader in den Abmessungen 50 mm x 8 mm x 12 mm ($b \times h \times t$) simuliert. Die Klotzungen liegen an Ober- und Unterkante der Glasscheibe an identischer Position. Durch die Klotzung an der Oberkante der Glasscheibe wird eine lotrechte Druckkraft eingeleitet. Die Klotzung an der Unterkante der Glasscheibe dient als Lagerklotz.

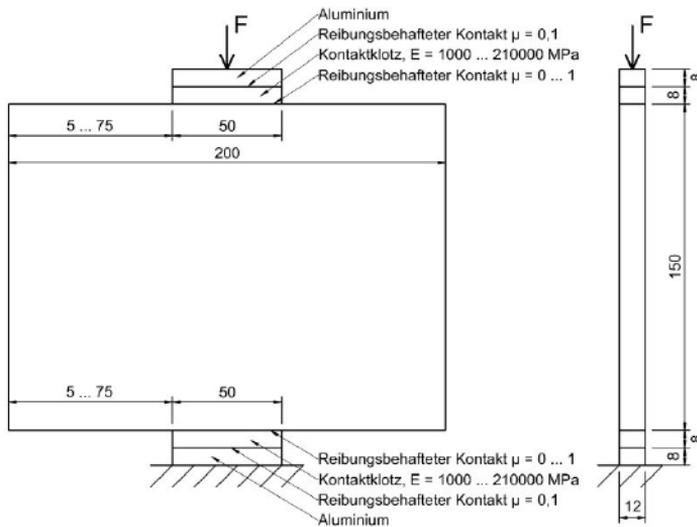


Bild 124
 Aufbau und Abmessungen
 des vereinfachten Modells

In dem gewählten Aufbau dient die Glasscheibe der Durchleitung der Druckkraft. Die Kraftachse verläuft vertikal, so dass von einer identischen Spannungsverteilung an Ober- und Unterkante der Glasscheibe ausgegangen wird.

Zur Reduzierung der Größe des FEM-Modells und der damit einhergehenden Verkürzung der Rechenzeiten empfiehlt es sich, hier Symmetriebedingungen im FEM-Modell einzuführen. Eine erste Symmetrie lässt sich in der horizontalen Mittelachse der Glasscheibe einführen. Eine zweite Symmetrie wird in der vertikalen Ebene in der Mitte der Glasscheibe definiert. Im Resultat dieser beiden Symmetrien wird im FEM-Modell nur noch $\frac{1}{4}$ des Gesamtsystems dargestellt und berechnet. Das Vorgehen bewirkt einen weiteren Vorteil für das FEM-Modell. Durch die Symmetriebedingungen kann die Festlegung sonst notwendiger Auflagerbedingungen entfallen. Unstetigkeitsstellen der numerischen Lösung an gelagerten Punkten, Linien oder Flächen werden so eliminiert und die Ergebnisse der numerischen Berechnung sind deutlich stabiler.

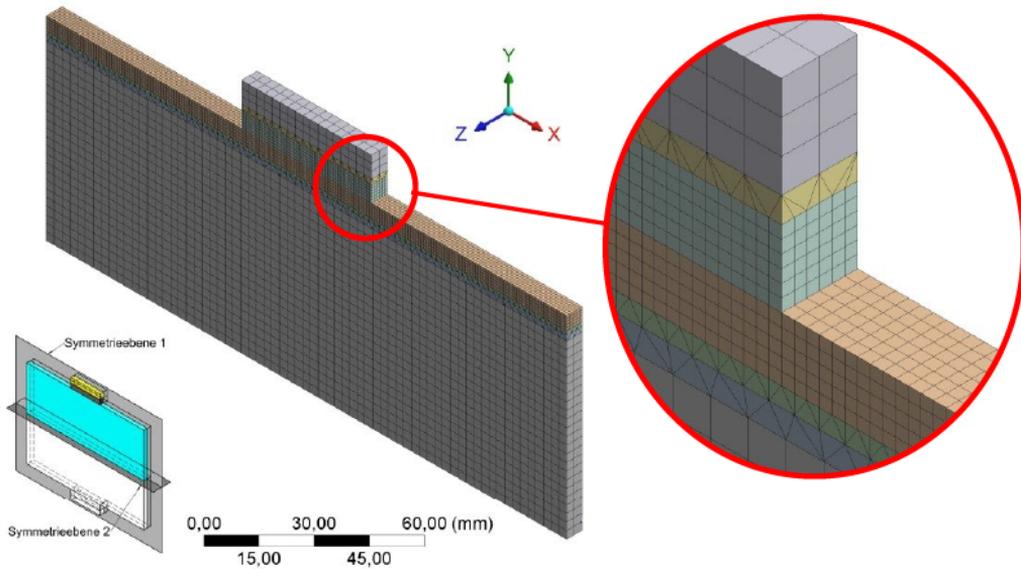


Bild 125

FEM-Modell, durch die Definition von 2 Symmetrieebenen wird die Modellgröße auf $\frac{1}{4}$ reduziert

Das Elementnetz besteht aus Volumenelementen mit 8 bzw. 5 Elementknoten¹⁵⁹. Zu Abbildung der unterschiedlichen Materialien wurden folgende Materialmodelle verwendet:

Glasscheibe: Linear-, elastisch-, isotropes Materialmodell
 $E = 70.000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,3$

Aluminium: Linear-, elastisch-, isotropes Materialmodell
 $E = 71.000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,33$

Kontaktklotz: Linear-, elastisch-, isotropes Materialmodell
 $E = 3.000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,42$

Für den Kontaktklotz wurde eine linear, elastisches, isotropes Materialmodell gewählt, auch wenn dieses Materialmodell das Verhalten thermoplastischer Kunststoffe nur bei geringen Belastungen ausreichend abbildet. Durch die Parameterstudien am vereinfachten Modell sollen diejenigen Einflussgrößen bestimmt werden, die maßgebende Änderungen der Spannungsverteilung an der Glaskante hervorrufen. Un-

¹⁵⁹ Quader- bzw. Tetraeder Elemente.

ter der Voraussetzung geringer Belastung des Kontaktklotzes wird der entstehende Fehler als hinnehmbar angesehen.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Parameterstudien wird in allen Berechnungen die Klotzungslast $F = 10.000 \text{ N}$ festgelegt. Durch Definition der Symmetrieebene ¹⁶⁰ reduziert sich die im FE-Model auf der Oberseite des Aluminiumklotzes angreifende, gleichmäßig verteilte Druckkraft auf 5.000 N . Zusätzlich wird über Lagerbildungen die Beweglichkeit des Aluminiumklotzes auf die vertikale Richtung beschränkt.

A: Static Structural (ANSYS)
Randbedingungen

A Kraft: 5000, N

B Reibungsfreie Lagerung

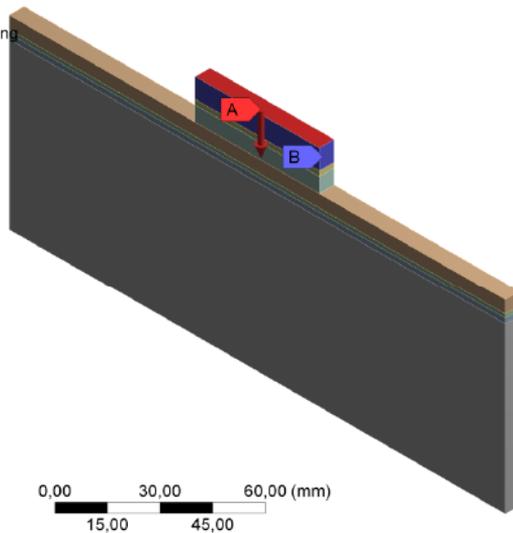


Bild 126

Einwirkungen und Randbedingungen am FE-Model

Die Kontaktfläche zwischen der oberen Glaskante und dem Kontaktklotz ist als reibungsbehaftete Kontaktfläche definiert. Der Kontaktklotz kann auf der Oberkante der Glasplatte gleiten. Entstehende Reibungskräfte werden durch den festgelegten Reibungskoeffizienten berücksichtigt. Über die Kontaktflächen können ausschließlich Druck- und Reibungskräfte übertragen werden. In gleicher Weise ist die Kontaktfläche zwischen Aluminium- und Kontaktklotz definiert, hier aber mit einem konstanten Reibungskoeffizienten von 0,1.

¹⁶⁰ Vergleiche Bild 125

Bei spröden Materialien wie Glas erfolgt eine Auswertung maßgeblicher Spannungen nach den Hauptzugspannungen¹⁶¹ im Material. Eine erste Berechnung des Systems unter Ansatz eines Reibungskoeffizienten von 0 zwischen Glaskante und Kontaktmaterial und der Position der Klotzung genau auf der Mitte der Glaskante führt zu dem Ergebnis, dass sich die Position der maßgeblichen Hauptzugspannung etwa 2-3 mm neben den Klotzungsrand an der Oberfläche der Glaskante befindet. Die Spannungsverteilung im Glas ist symmetrisch zu beiden Seiten der Klotzung. Die maßgebende Spannungskomponente der Hauptzugspannung ist in diesem Fall die Normalspannung S_x , parallel zur Scheibenkante.

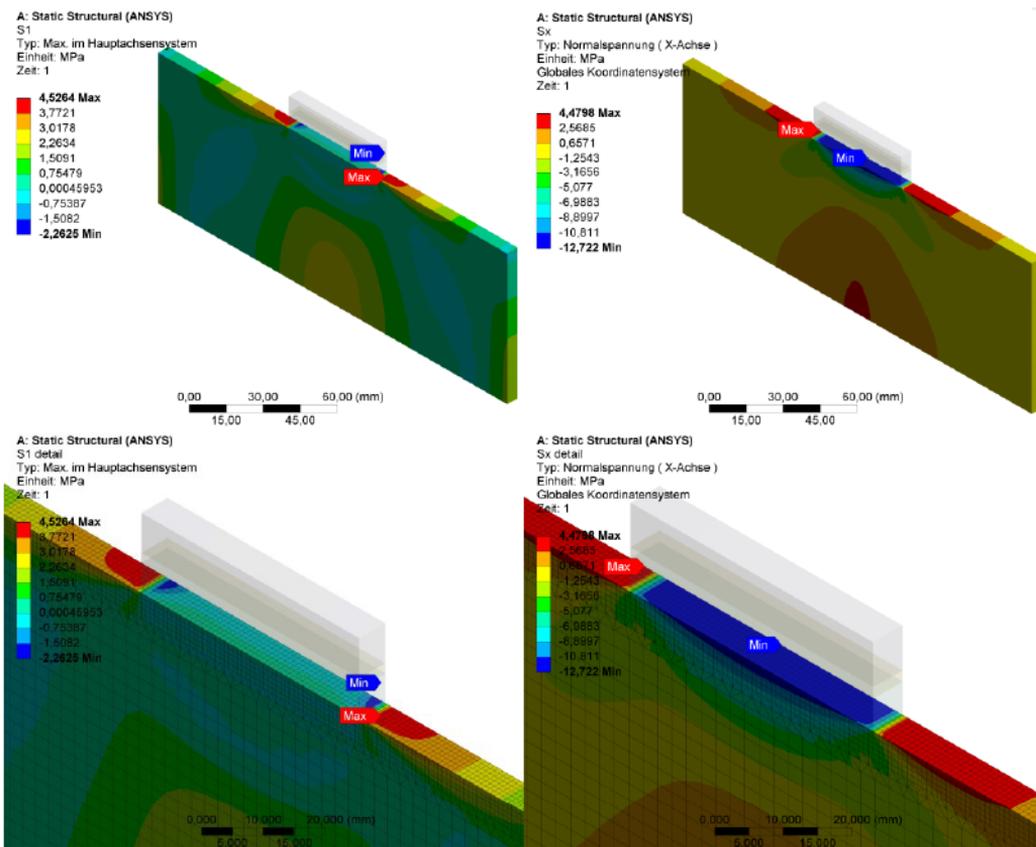


Bild 127
Hauptzugspannung S1 und die Normalspannung S_x

¹⁶¹ Im FEM-System ANSYS Workbench erhalten die Hauptzugspannungen die Kurzbezeichnung S1.

A: Static Structural (ANSYS)
Verformung Glas
Typ: Gesamtverformung
Einheit: mm
Zeit: 1

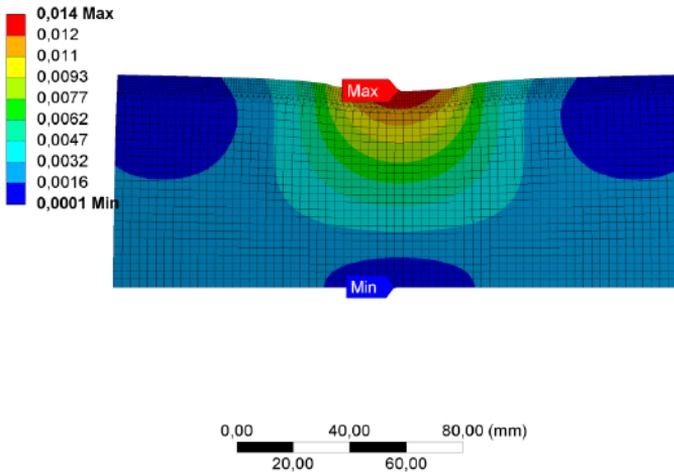


Bild 128

Verformung der Glasscheibe infolge Klotzung auf der Mitte der Scheibenkante, zur besseren Anschauung ist die Darstellung überhöht

7.1.3 Einfluss des Randabstandes der Klotzung auf die Spannungsverteilung an der Glaskante

Die in dieser Parameterstudie durchgeführten Berechnungen sollen zeigen, welchen Einfluss die Position der Klotzung auf die Spannungsverteilung in der Glasscheibe hat. Der Abstand der 50 mm breiten Klotzung zur linken Ecke der 200 mm breiten Glasscheibe (vergleiche Bild 124) wurde zwischen 5 mm und 75 mm variiert. Der Reibungskoeffizient zwischen Glaskante und Kontaktmaterial wurde mit 0 festgelegt. Der Kontaktklotz kann somit reibungsfrei auf der Glaskante gleiten.

In der Auswertung der in Bild 129 dargestellten Ergebnisse der Parameterstudie wird ersichtlich, dass eine Verringerung des Randabstandes der Klotzung zur Ecke der Glasscheibe vor allem einen Anstieg der maximalen Hauptzugspannung bzw. der maßgebenden Spannungskomponente S_x (Normalspannung parallel zur Scheibenkante) zur Folge hat. Durch die Verschiebung der Klotzung von der Scheibenmitte in Richtung zu einer Ecke der Glasscheibe erhöht sich die maximale Normalspannung S_x um bis zu 83 %. Die Maxima der Normalspannungen S_y und S_z werden durch die Verschiebung der Klotzung auf der Scheibenkante nur geringfügig bzw. gar nicht beeinflusst.

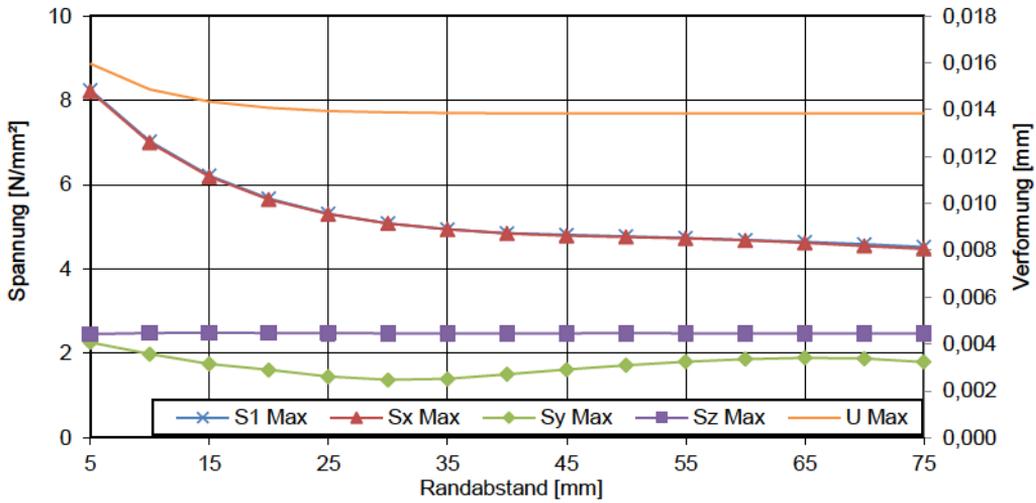


Bild 129
 Ergebnis der Parameterstudie die Randabstand, Maximalwerte der Spannungen S1, Sx, Sy, Sz und der Verformung der Glasscheibe in Abhängigkeit des Randabstandes der Klotzung

Die Stellen der maximalen Hauptzugspannung S1 bzw. der maximalen Normalspannung Sx verschieben sich mit der Klotzungsposition und liegen immer etwa 2 bis 3 mm neben dem Rand der Klotzung. Bei mittiger Klotzung liegen die Maxima symmetrisch zu beiden Seiten neben der Klotzung. Bei außermittiger Klotzung liegt das Maxima auf der Seite der Klotzung mit dem größeren Abstand zur Ecke der Glasscheibe.

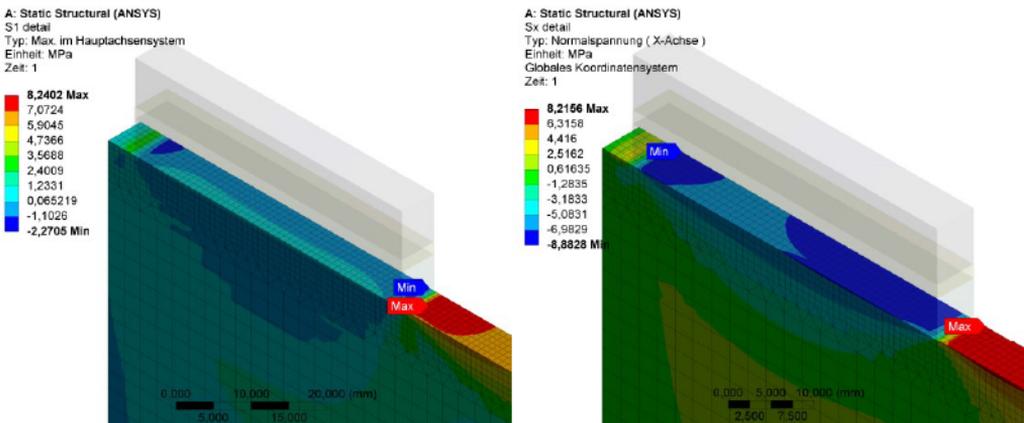


Bild 130
 Hauptzugspannung S1 und Spannungskomponente Sx in der Glasscheibe bei einem Randabstand der Klotzung von 5 mm

A: Static Structural (ANSYS)
Verformung Glas
Typ: Gesamtverformung
Einheit: mm
Zeit: 1

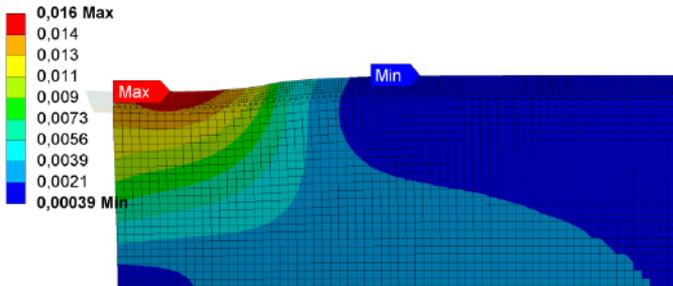


Bild 131
Verformung der Glasscheibe
bei einem Randabstand der
Klotzung von 5 mm

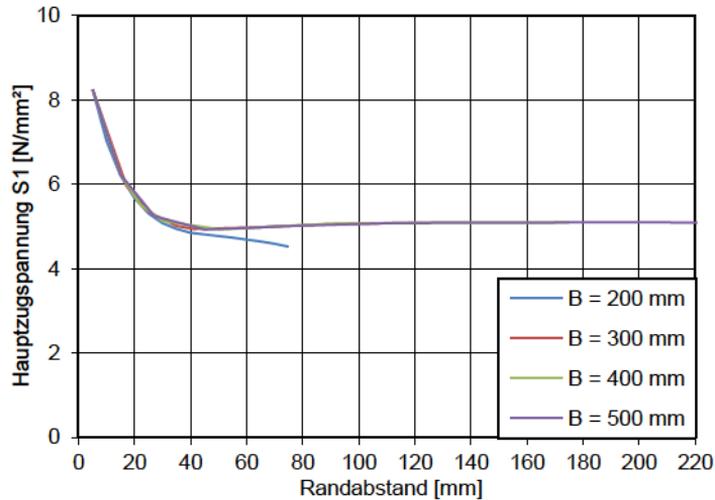
Bild 128 und Bild 131 zeigen die Verformungsbilder der Glasscheibe unter mittlerer Klotzung bzw. einer Klotzung am Rand (Abstand 5 mm) der Glasscheibe. Die Glasscheibe wird durch die Klotzung lokal gestaucht. Die maximale Stauchung liegt etwa in der Mitte der Kontaktfläche zwischen Glaskante und der Klotzung. Infolge der Stauchung wird die Oberfläche der Glaskante neben der Klotzung gedehnt. Dies sind auch die Bereiche der maximalen Spannungen der Spannungskomponente S_x . Durch die Verschiebung der Klotzung von der Mitte der Glasscheibe zur Ecke der Glasscheibe erhöht sich die Stauchung der Glasscheibe um 14%.

In gleicher Weise wurden Parameterstudien an Berechnungsmodellen mit Glasscheibenbreiten von 300 mm, 400 mm und 500 mm durchgeführt. Der Randabstand der Klotzung wurde jeweils im Bereich von 5 mm bis zur mittigen Position auf der Glasscheibenkante variiert. Im Ergebnis dieser Berechnungen zeigt sich, dass die Höhe der bemessungsrelevanten Hauptzugspannung an der Glaskante vom Randabstand der Klotzung, jedoch nicht von der Scheibenbreite abhängig ist. Die Kurvenverläufe nach Bild 132 liegen für alle vier untersuchten Glasscheibenbreiten deckungsgleich übereinander. Für Randabstände der Klotzung zur Ecke der Glasscheibe von 40 mm und größer ist die Hauptzugspannung an der Glaskante konstant. Bei Randabstän-

den der Klotzung kleiner 40 mm steigt die Hauptzugspannung parabelförmig an.

Bild 132

Abhängigkeit der maximalen Hauptzugspannung an der Glaskante vom Randabstand der Klotzung für Glasscheibenbreiten von 200 mm, 300 mm, 400 mm und 500 mm



Im Ergebnis der Parameterstudie wird festgestellt, dass die Position einer Klotzung auf der Scheibenkante einen maßgeblichen Einfluss auf die Normalspannung S_x , der Normalspannung parallel zur Scheibenkante, besitzt. Der hinsichtlich der Spannungsverteilung im Glas günstigste Randabstand der Klotzung zur Ecken der Glasscheibe beträgt 40 mm. Höhere Randabstände führen zu keiner relevanten Änderung der Hauptzugspannung an der Glaskante. Randabstände kleiner 40 mm führen zu einem nichtlinearen Anstieg der Hauptzugspannung an der Glaskante. Als Empfehlung für den minimalen Randabstand der Klotzung von der Glaskante könnte aus Bild 132 ein Wert von 20 mm festgehalten werden. Der Anstieg der Hauptzugspannung gegenüber einem Randabstand von 40 mm, mit der geringsten maximalen Hauptzugspannung, liegt hier bei etwa 20%.

Qualitativ konnte das in der FEM-Simulation ermittelte Verhalten auch durch Bauteilversuche bestätigt werden. Im Zuge des ZiE-Verfahrens für das Glasdach am ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin wurden Belastungsprüfungen der Klotzungsstruktur durchgeführt. Diese Versuche erfolgten an Glasscheiben aus Floatglas in den Abmessungen 200 mm x 150 mm (b x h), jedoch mit einer Dicke von 19 mm. Die Klotzungsbreite entsprach 80 mm. Im Wesentlichen war der Versuchsaufbau mit der Darstellung in Bild 124 vergleichbar. In ersten Versuchsdurchläufen wur-

den bei mittlerer Klotzung Belastungen von 250 kN eingeleitet, ohne dass eine sichtbare Beschädigung an der Glasscheibe entstand. Im weiteren Ablauf der Versuche wurde die Klotzung an die Ecke der Glasscheibe verschoben. Der Randabstand betrug 15 mm. Bei diesen Versuchen kam es zu einem interessanten Effekt. Bei einer Belastung von etwa 200 kN sind an den drei untersuchten Glasscheiben die Bereiche, die nicht unter Druckspannung lagen, als große Bruchstücke abgeplatzt. Der unter Druckspannung stehende Bereich der Glasscheibe blieb intakt und die Belastung konnte weiter bis zum Abbruch der Versuche bei 250 kN gesteigert werden.

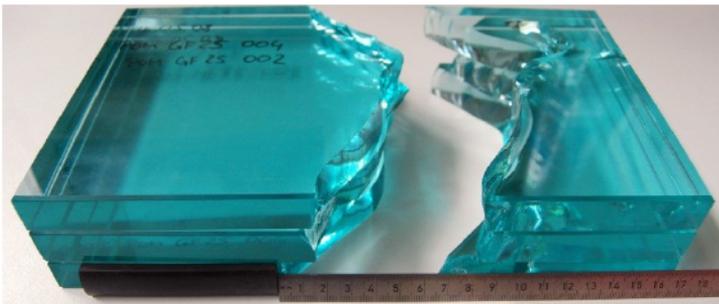


Bild 133
Nahezu identische Bruchbilder von drei geprüften Glasscheiben

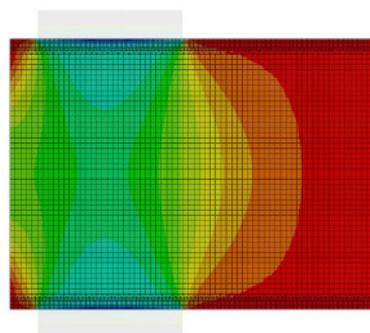
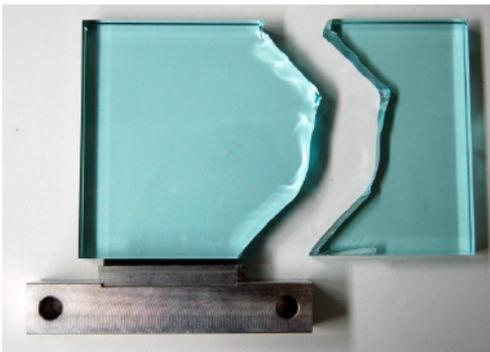


Bild 134
Links: Bruchbild der Scheibe; Rechts: Normalspannung S_y aus FEM-Simulation, der Farbübergang von Rot zu Orange entspricht in etwa der Spannungsnulllinie

Das Bruchbild der drei so geprüften Glasscheiben war fast vollständig identisch. Bruchausgang war mit hoher Wahrscheinlichkeit der Bereich an der Glaskante etwa 2 mm bis 10 mm neben der Klotzung. Im Weiteren verläuft der Riss dann etwa entlang der Nulllinie der Normalspannung S_y , die sich in der FEM-Simulation ergibt.

7.1.4 Einfluss des Reibkoeffizienten μ zwischen Kontaktmaterial und Glaskante auf die Spannungsverteilung an der Glaskante

In dieser Parameterstudie wird der Reibkoeffizient der Kontaktfläche zwischen Klotzungsmaterial und der Glaskante von 0 bis 1,0 variiert. Die Klotzung wird mittig auf der Glaskante, bzw. mit einem minimalen Randabstand zur Ecke der Glasscheibe von 5 mm angesetzt.

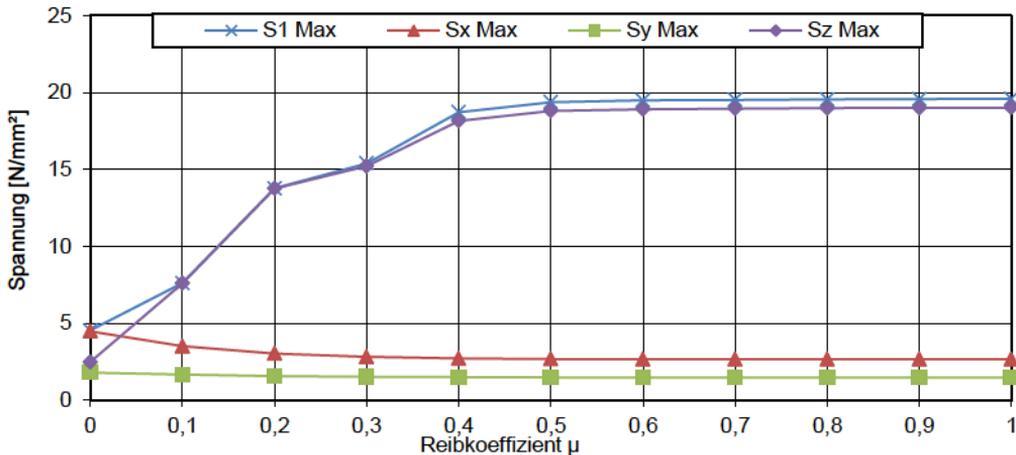


Bild 135

Ergebnis der Parameterstudie Reibungskoeffizient, Maximalwerte der Spannungen S_1 , S_x , S_y , und S_z in Abhängigkeit des Reibkoeffizienten μ zwischen Kontaktmaterial und Glaskante, Klotzung mittig auf der Glaskante

In der Auswertung der Spannungsmaxima in Bild 135 wird deutlich, dass der Reibkoeffizient einen starken Einfluss auf die Spannungs Komponente S_z (Normalspannung in Dickenrichtung der Glasscheibe) besitzt. Ab einem Reibkoeffizienten von $\mu = 0,1$ wird die Normalspannung in S_z die maßgebliche Spannungs Komponente für die bemessungsrelevante Hauptzugspannung. Durch Erhöhung des Reibkoeffizienten von $\mu = 0$ auf $\mu = 0,5$ steigt die Normalspannung S_z im Rechenmodell um etwa 650% an.

Bei einem Reibkoeffizienten von $\mu = 0$ liegt die Stelle der maximalen Normalspannung S_z an der Glaskante im Bereich des Klotzungsrandes. Wie aus 7.1.3 bekannt ist hier die Normalspannung S_z aber nicht bemessungsrelevant. Sobald ein Reibkoeffizient $\mu > 0$ in der Kontaktfläche angesetzt wird, springt der Punkt der maximalen Normalspannung S_z vom Rand der Klotzung in den Mittelpunkt der Kontaktfläche. Bei einem sehr kleinen Reibkoeffizienten ist der Bereich hoher Normalspannung S_z lokal auf den Kontaktflä-

chenmittelpunkt begrenzt. Mit ansteigendem Reibkoeffizienten dehnt sich dieser Bereich ausgehend vom Mittelpunkt der Kontaktfläche aus. Ab einem Reibkoeffizienten von $\mu = 0,4$ steht annähernd die gesamte Kontaktfläche unter hoher Normalspannung S_z . Bei einem Reibkoeffizienten von $\mu = 0,6$ ist das Maximum der Normalspannung S_z erreicht. Höhere Reibkoeffizienten bewirken keine Steigerung der Normalspannung S_z mehr.

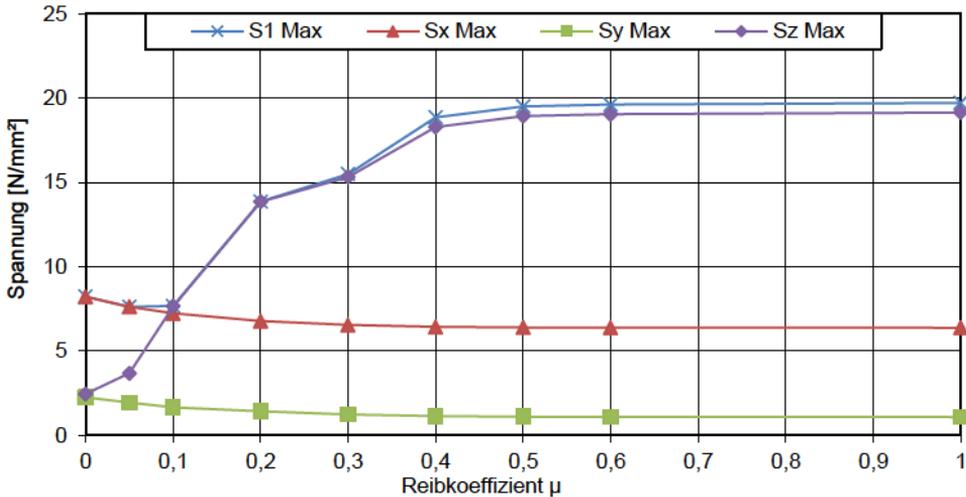


Bild 136

Ergebnis der Parameterstudie Reibungskoeffizient, Maximalwerte der Spannungen S_1 , S_x , S_y , und S_z in Abhängigkeit des Reibkoeffizienten μ zwischen Kontaktmaterial und Glaskante, Klotzung am Scheibenrand, Randabstand 5 mm

Die Veränderung des Randabstandes der Klotzung unter Ansatz eines Reibkoeffizienten $\mu > 0$ hat keinen maßgeblichen Einfluss auf die Normalspannungen S_y und S_z . Wie aus Abschnitt 7.1.3 bekannt ist, erhöht sich durch die Verschiebung der Klotzung zum Rand hin die Normalspannung S_x . Wiederum ab einem Reibkoeffizienten von etwa $\mu = 0,1$ wird die Normalspannung S_z bemessungsrelevante Spannung.

Abschließend wird festgestellt, dass dem Reibkoeffizienten μ zwischen Kontaktmaterial und der Glaskante eine hohe Bedeutung hinsichtlich der Spannungsverteilung in der Glaskante zukommt. Eine Unterschätzung des Reibungskoeffizienten führt zwangsläufig zu einer Unterschätzung der bemessungsrelevanten Spannungen an der Glaskante. Für den Kontaktklotz sollten daher nur Materialien mit sehr guten Gleiteigenschaften und geringen Reibkoeffizienten zu Glas verwendet werden.

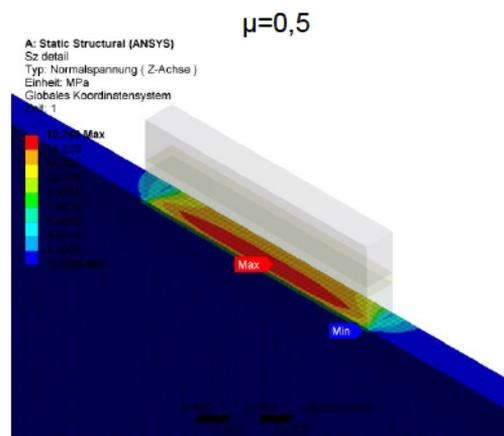
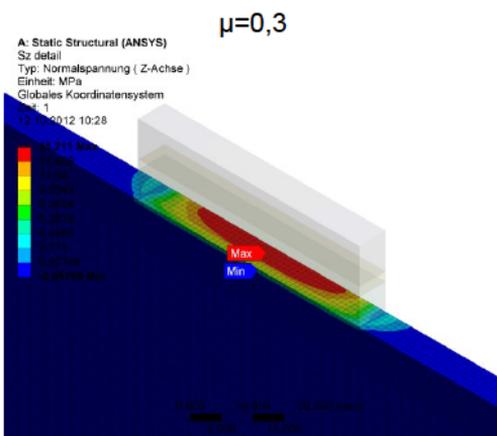
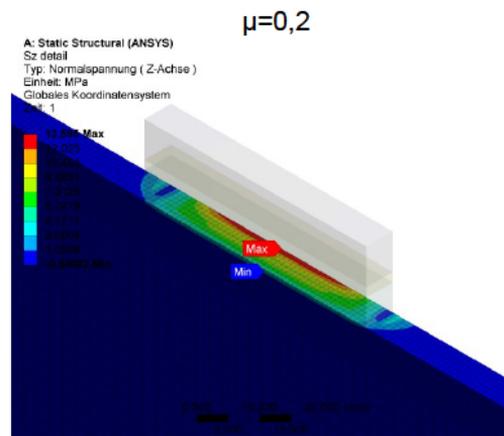
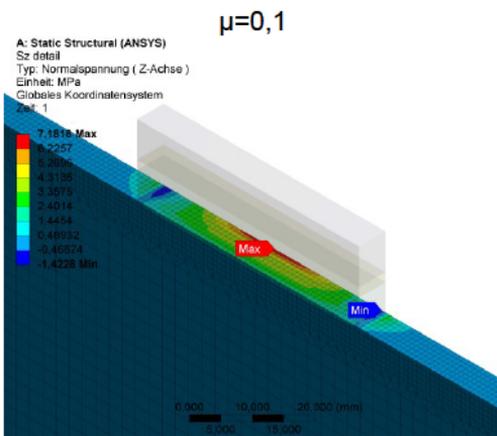
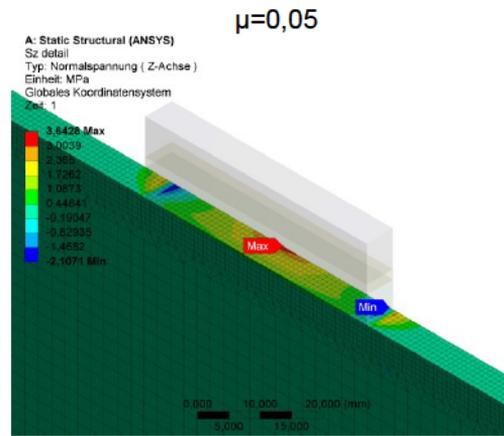
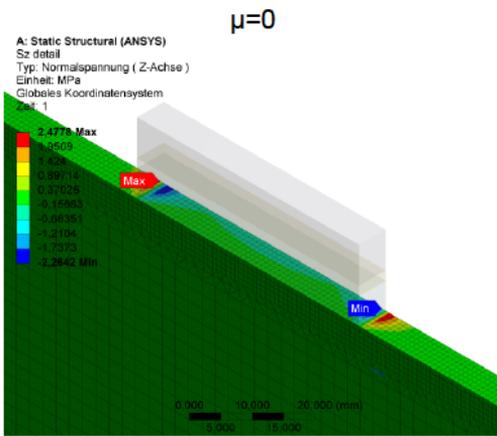


Bild 137
Normalspannung Sz in der Kontaktfläche bei Reibkoeffizienten $\mu = 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5$

7.2 FE-Modell der Klotzung für das Glasdach des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais

7.2.1 Einleitung

Im Zuge des Genehmigungsverfahrens für das Glasdach des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin wurden eine Reihe von Traglastversuchen¹⁶² an kleinformatischen Glasscheiben und den Klotzungen durchgeführt. Im Nachgang zu den experimentellen Versuchen wurde der Versuchsaufbau mit Scheibenposition 1¹⁶³ als FEM-Modell in ANSYS nachgebildet.

Für die Validierung der FE-Berechnung stehen die Verformungs- und Spannungsmessungen der Versuche nach Abschnitt 8.2 und 8.3 zur Verfügung.

7.2.2 FE-Modell

Im FE-Modell wurde der Versuchsaufbau mit leichten Veränderungen abgebildet. Die untere Klotzung aus Keil, Lagerschale und Kontaktklotz wird durch drei Bauteile¹⁶⁴ dargestellt. Im FE-Modell wird der Keil durch einen Quader mit einer Höhe von 5 mm ersetzt. Die Lagerschale hat eine Dicke von 4,3 mm und der Kontaktklotz eine Dicke von 6,6 mm. Die Gesamtdicke der Klotzung entspricht 15,9 mm. Die Lasteinleitung erfolgt über einen 30 mm dicken Druckstempel aus Stahl. Der obere Kontaktklotz wird im FE-Modell durch den Klotzungsaufbau der Unterkante ersetzt. Dieses Vorgehen hat einen entscheidenden Vorteil. Am FE-Modell können drei Symmetrieebenen eingeführt werden, so dass nur 1/8 des Gesamtmodells modelliert und berechnet werden muss.

¹⁶² Vergleiche 8.2

¹⁶³ Vergleiche 8.2.2

¹⁶⁴ Federschicht, Lagerschale und Kontaktklotz, Vergleiche Bild 138

Bild 138
Geometrische Unterschiede
zwischen tatsächlichem
Versuchsaufbau und FE-
Modell

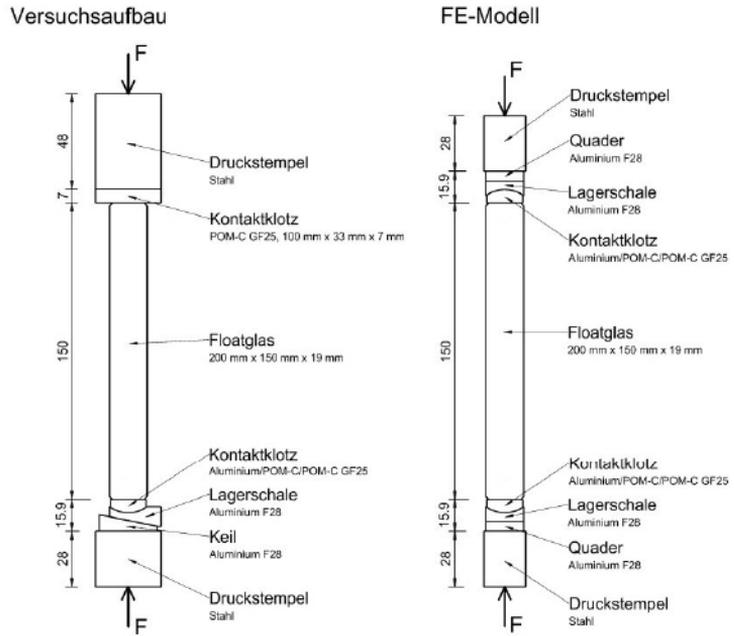
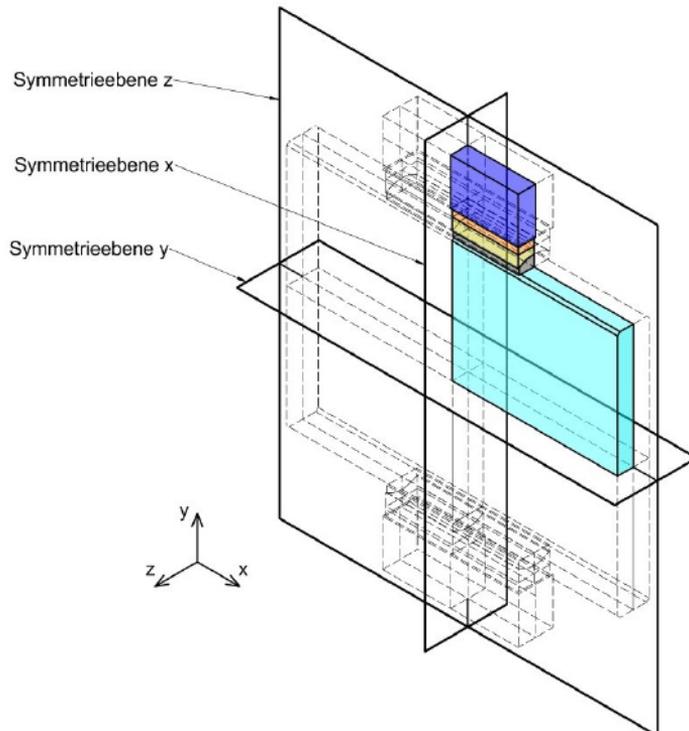


Bild 139
Symmetrieebenen des FE-
Modells



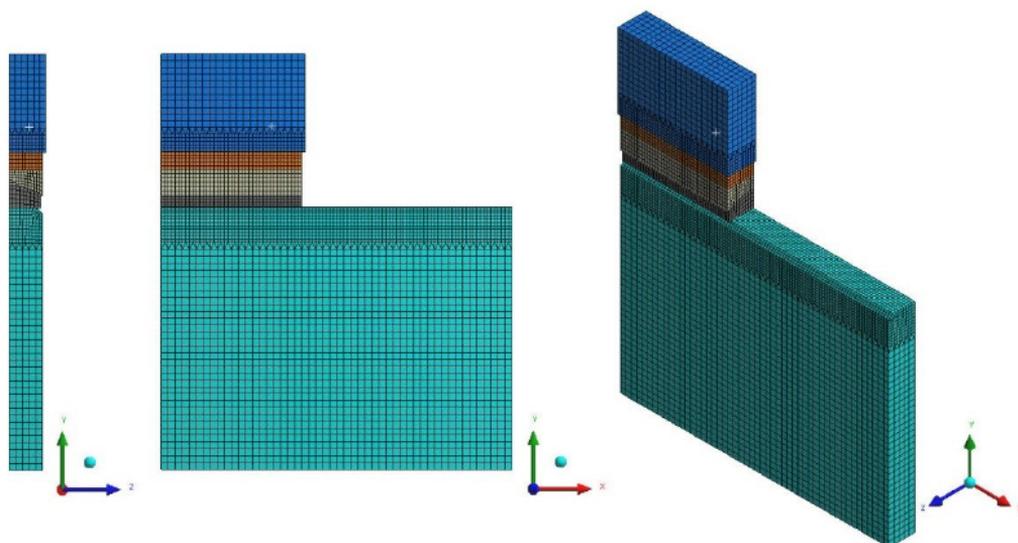


Bild 140
FE-Modell
Elementnetz

Das Elementnetz besteht aus 8-Knoten-Volumenelementen¹⁶⁵. Kontaktflächen zwischen zwei Materialien sind als Reibflächen mit den 8-Knoten-Flächenelementen¹⁶⁶ abgebildet. Durch die Definition der drei Symmetrieebenen ist keine Festlegung von Auflagerbedingungen notwendig. Die Belastung wird als gleichmäßig verteilte Flächenlast auf der Oberseite des Druckstempels eingetragen.

Die Kontaktflächen zwischen Glaskante, Kontaktklotz, Lagerschale, Quader und Druckstempel wurden als Reibflächen mit folgenden Reibungskoeffizienten definiert:

¹⁶⁵ SOLID185

¹⁶⁶ CONTA174, TARGE170

Tafel 36

Für die FE-Berechnung verwendete Reibungskoeffizienten μ

Materialkombination	Reibkoeffizient μ
Glas -POM-C GF25	0,25
Glas - Aluminium ¹⁶⁷	0,11
POM-C GF25 - Aluminium	0,3
Aluminium - Aluminium	1,0

Bei der Berechnung wurde allen Materialien ein linear-elastisch-isotropes Materialverhalten unterstellt.

Tafel 37

Für die FE-Berechnung verwendete Materialkennwerte

Material	E-Modul [N/mm ²]	Poissonzahl
Glas	70.000	0,23
Aluminium	71.000	0,3
POM-C GF25	3000	0,45

7.2.3 Ergebnisse der FE-Berechnung

Am FE-Modell wurden zwei Berechnungen mit den Kontakt-klotzmaterialien Aluminium und POM-C GF25 durchgeführt. Vergleich und Gegenüberstellung der zwei Berechnungen erfolgen für die Laststufe 250 kN anhand folgender ausgewählter Ergebnisse:

- Gesamtverformung des Systems u_{ges} ,
- Verschiebung der Glasscheibe in globaler y-Achse $u_{y,Glas}$,
- globale Verschiebung der Klotzung $u_{Klotzung}$,
- Verschiebung der Klotzung in globaler y-Achse $u_{y,Klotzung}$,
- Hauptzugspannung in der Glasscheibe σ_{S1} ,
- Normalspannung in der Glasscheibe in globaler x-Achse σ_x ,
- Druckspannung in der Kontaktfläche Glas-Klotzung $\sigma_{Kontakt}$.

¹⁶⁷ Experimentell bestimmter Wert, analog dem Vorgehen nach 5.8.

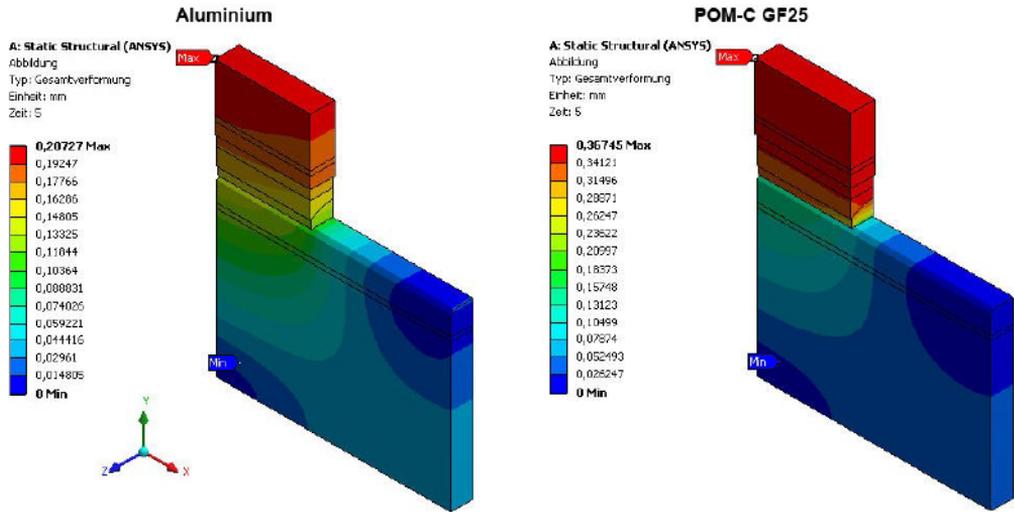


Bild 141
Gesamtverformung des Systems u_{ges}

Mit dem Kontaktklotzmaterial POM-C GF25 ergeben sich im FE-Modell etwa 77% höhere Gesamtverformungen, als mit einem Kontaktklotz aus Aluminium. Neben der Stauchung der Klotzung sind vor allem im Bereich der Glasscheibe signifikante Verformungen erkennbar.

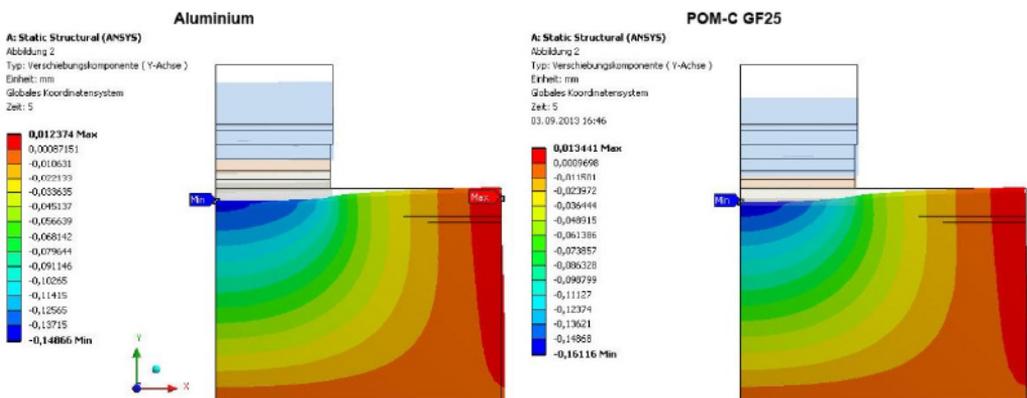


Bild 142
Verschiebung der Glasscheibe in globaler y-Achse $u_{y,Glas}$
Verformungsüberhöhung Faktor 10

Die Verschiebung der Glasscheibe in globaler y-Achse entspricht der Verformung der Glasscheibe in Lastrichtung. Im Bereich der Klotzung wird die Glasscheibe lokal gestaucht. Das Kontaktklotzmaterial hat dabei nur geringfügigen Einfluss auf das Verformungsbild. Ausgehend von der Anfangshöhe der Glasscheibe von 75 mm ergibt sich in der Laststufe

250 kN eine Stauchung von etwa 0,2%. Die Stauchung der Glasscheibe ist linear abhängig von der aufgebrachtene Belastung.

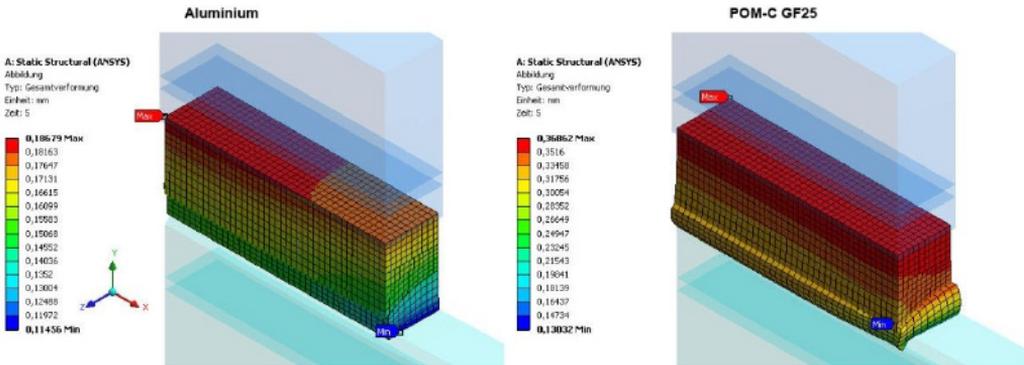


Bild 143
Globale Verformung der Klotzung $u_{Klotzung}$
Verformungsüberhöhung Faktor 30

Bild 143 zeigt mit einem Überhöhungsfaktor von 30 die globale Verformung der 3-teiligen Klotzung mit Kontaktklötzen aus Aluminium und POM-C GF25. Anhand der Farbübergänge ist bei der Klotzung mit Kontaktklotz aus Aluminium eine Schiefstellung der gesamten Klotzung erkennbar. Durch die hohe Steifigkeit von Aluminium ist der Kontaktklotz nicht in der Lage die Verformungen der Glasscheibenkante auszugleichen.

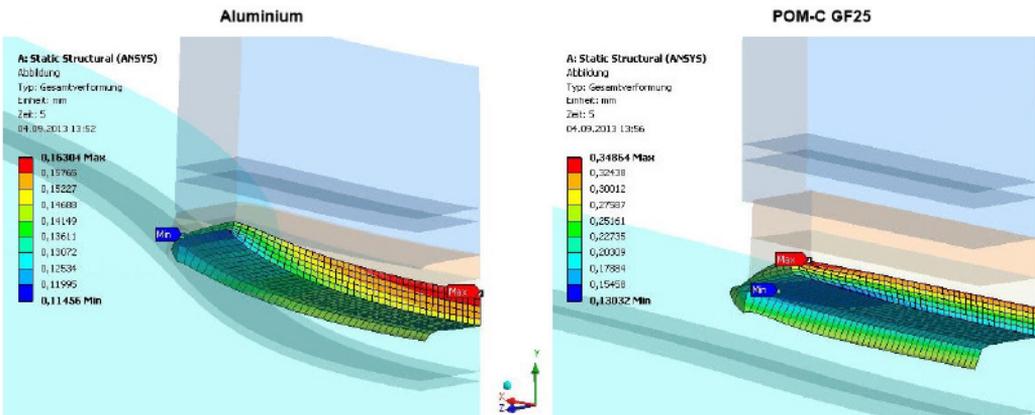


Bild 144
Globale Verformung des Kontaktklotzes
Verformungsüberhöhung: Aluminium Faktor 190
POM-C GF25 Faktor 20

Wie Bild 144 zeigt wird der Kontaktklotz leicht aufgebogen. Die lokale Stauchung an den Klotzungsenden lässt auf eine Beanspruchungskonzentration in diesen Bereichen schließen. Am Kontaktklotz aus POM-C GF25 sind dagegen keine

Anzeichen für ein Aufbiegen erkennbar. Der Kontaktklotz weicht deutlich stärker in Querrichtung aus und wird stärker gestaucht. Durch die geringe Steifigkeit ist der Kontaktklotz aus POM-C GF25 in der Lage die Verformungen der Scheibenkante vollständig auszugleichen. Der Kontaktklotz aus POM-C GF25 wird an den Klotzungsenden ebenfalls stärker gestaucht. Der prozentuale Unterschied zur Stauchung im Mittelpunkt der Klotzung ist bei Aluminium jedoch deutlich höher als bei POM-C GF25. Durch die ungleichmäßige Stauchung des Kontaktklotzes ist bei Aluminium eine Lastkonzentration an den Klotzungsenden zu erwarten. Die Auswertung der Druckspannungen in der Kontaktfläche zwischen Kontaktklotz und Glaskante in Bild 145 bestätigen dies. Die Druckspannungen in der Kontaktfläche bei Aluminium liegen im Mittel bei etwa 155 N/mm² bis 165 N/mm². Auf den äußeren 15 mm der Kontaktfläche steigt die Druckspannung auf Werte um 280 N/mm² an. In der äußeren Ecke der Kontaktfläche bildet sich eine Spannungsspitze. Bei POM-C GF25 liegt die mittlere Druckspannung bei etwa 185 N/mm². Bezogen auf die Belastung von 250 kN und die Kontaktfläche von 17 mm x 80 mm entspricht dies in etwa der theoretischen Druckspannung von 183 N/mm². Auf den äußeren 10 mm der Klotzungsfläche sinkt die Druckspannung auf etwa 140 N/mm² ab. Ein Bereich hoher lokaler Druckspannungen bildet sich entlang der Fase an der Glaskante.

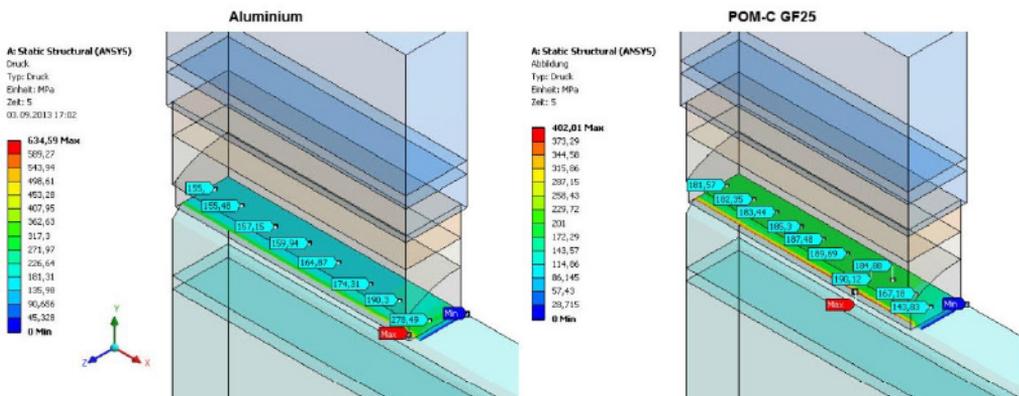


Bild 145
 Druckspannung in der Kontaktfläche zwischen Kontaktklotz und Glaskante
 σ_{Kontakt}

Nach den Ergebnissen der FE-Berechnungen ist die Spannungsverteilung in der Kontaktfläche zwischen Glaskante und Kontaktklotz maßgeblich von der Steifigkeit des Kon-

taktklotzmaterials abhängig. Ein hoher Elastizitätsmodul führt zu einem Anstieg, ein niedriger Elastizitätsmodul des Kontaktklotzmaterials zu einem Absinken der Druckspannungen im Bereich der Klotzungsenden. Ein Optimum, mit möglichst homogener Spannungsverteilung in der Kontaktfläche wurde durch Vergleichsrechnungen mit einem Elastizitätsmodul von 10.000 N/mm² erzielt.

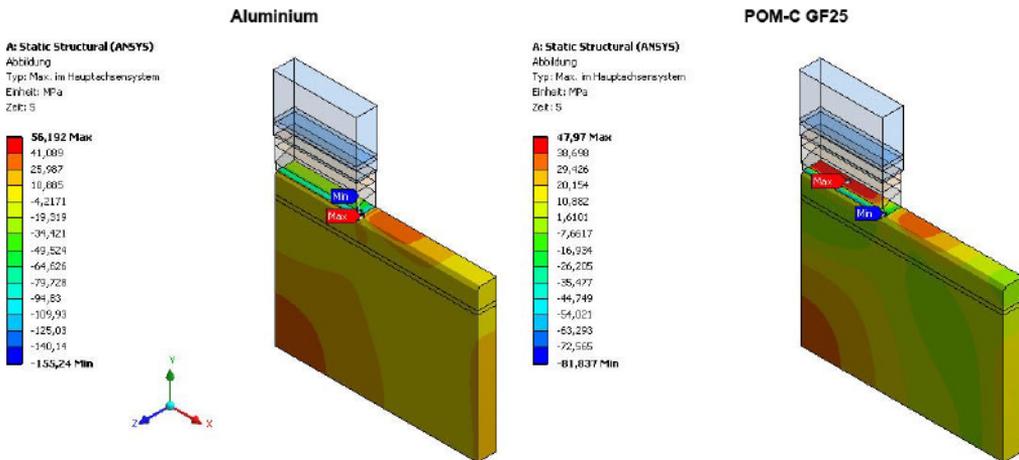


Bild 146
Hauptzugspannungsverteilung in der Glasscheibe σ_{S1}

Die Positionen der maximalen Hauptzugspannungen in der Glasscheibe liegen für beide Kontaktklotzmaterialien in der Kontaktfläche. Bei Aluminium bildet sich eine Spannungsspitze im Bereich der Klotzungsecke, hier an der Position, an der ein lokales Maximum der Druckspannung in der Kontaktfläche¹⁶⁸ ermittelt wurde. Bei POM-C GF25 steht ein großer Bereich der Kontaktfläche unter hoher Hauptzugspannung. Aus 7.1.4 ist bekannt, dass dieser Effekt durch die Reibung in der Kontaktfläche hervorgerufen wird. Der Reibkoeffizient von Aluminium zu Glas wurde mit 0,1 angenommen, der von POM-C GF25 zu Glas mit 0,25. Der scheinbar geringe Unterschied der Reibkoeffizienten hat in der FE-Berechnung einen großen Einfluss auf die Höhe der Hauptzugspannungen im Glas an der Kontaktfläche zur Klotzung. Eine Verifizierung dieses Effektes ist aus den Messverfahren und Ergebnissen der Bauteilversuche nach Abschnitt 8.2 nicht möglich.

¹⁶⁸ Vergleiche Bild 145.

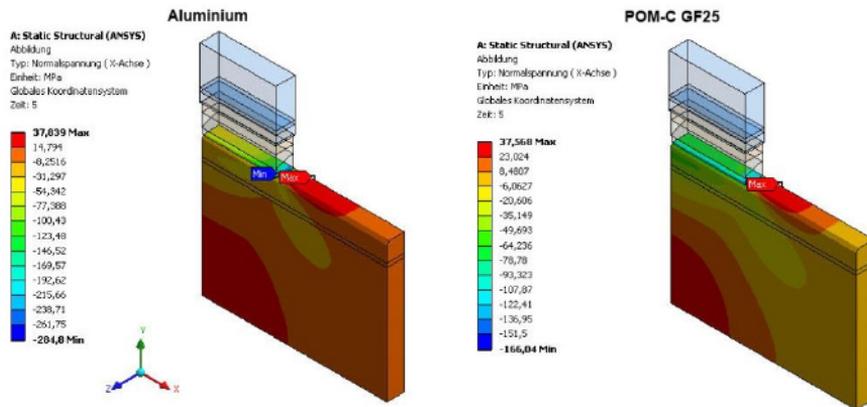
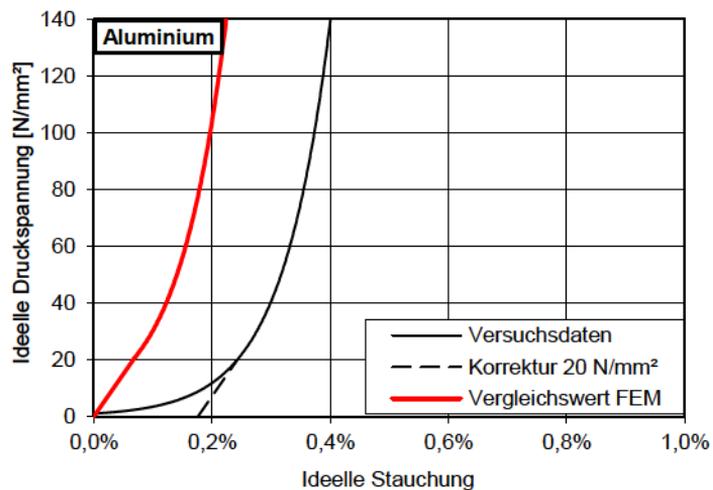


Bild 147
 Normalspannungsverteilung
 in der Glasscheibe in globaler
 x-Achse σ_x

In Bild 147 wird die Verteilung der Normalspannung in der Glasscheibe σ_x für beide untersuchten Kontaktklotzmaterien gegenübergestellt. Die Normalspannung σ_x entspricht der Spannung parallel zur Scheibenkante. In beiden Modellen wurde ein Maximum der Normalspannung in Glaskantenmitte etwa 8 mm neben dem Klotzungsende bestimmt. Für 250 kN Gesamtlast ergeben die Berechnungen maximale Normalspannungen von 37,9 N/mm² bzw. 37,6 N/mm². Die Höhe der maximalen Normalspannung ist linear abhängig von der eingeleiteten Gesamtlast. Bei den Versuchen nach Abschnitt 8.2 wurden bei Kontaktklötzen aus Aluminium und POM-C GF25 an den Positionen der Normalspannungsmaxima die Oberflächendehnungen und damit die Normalspannung an der Glaskante durch Dehnmessstreifen (DMS) ermittelt. In den Versuchen wurden Normalspannungen von 39 N/mm² bei Aluminium und 41 N/mm² bei POM-C GF25 ermittelt. Die Abweichung von etwa 3% bei Aluminium ist vertretbar, die Abweichung von etwa 8% bei POM-C GF25 ist kritischer einzuschätzen. Geringe Variationen von Elastizitätsmodul und Poissonzahl des Kontaktklotzmaterials und vom Reibkoeffizienten des Kontaktklotzmaterials zum Glas haben Einfluss auf die Höhe der maximalen Normalspannung σ_x an der Glaskante. Gegebenenfalls sind hier Anpassungen dieser Parameter im FE-Modell erforderlich.

In der Versuchsreihe nach Abschnitt 8.3 wurde das Verformungsverhalten der 3-teiligen Klotzung unter anderem mit Kontaktklötzen aus Aluminium und POM-C GF25 bestimmt. Aus den Versuchsergebnissen wurde ein ideales Druckspannung-Stauchung-Verhalten bestimmt. Für alle Klotzungen wurde im Anfangsbereich bis zu einer Druckspannung von 20 N/mm² eine Steifigkeitszunahme festgestellt, die auf Geometrietoleranzen der Einzelteile der Klotzung zurückgeführt werden. Mit Hilfe linear elastischer Materialmodelle ist dieses Verformungs- bzw. Steifigkeitsverhalten nicht abbildbar. Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus den Versuchen und den FE-Berechnungen wurden die Kurvenverläufe der Versuchsergebnisse korrigiert. Zu diesem Zweck wurde der Kurvenanstieg zwischen 20 N/mm² und 30 N/mm² aufgenommen und linear bis zur Nulllinie verlängert. In Bild 148 und Bild 149 entspricht dies der Kurve „Korrektur 20 N/mm²“. Anschließend wurde die Gesamte Kurve in den Nullpunkt verschoben. Diese Kurve dient im Weiteren als Vergleichswert für die FE-Berechnungen.

Bild 148
Versuchsdaten und Korrektur des idealen Druckspannung-Stauchung Verlaufs für eine Klotzung mit Kontaktklotz aus Aluminium



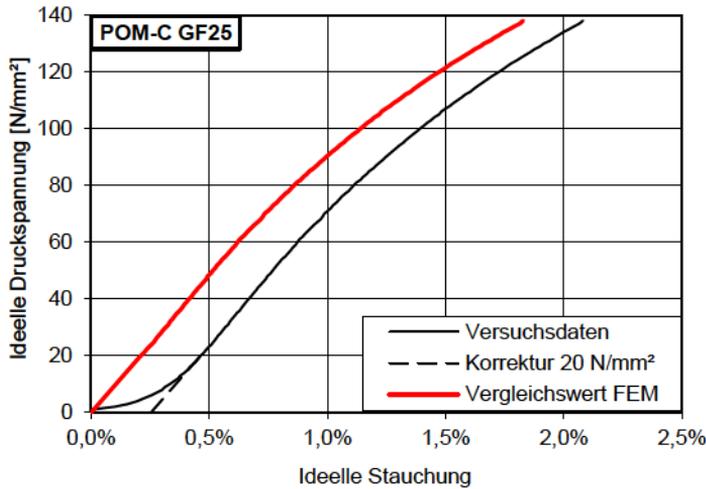


Bild 149
Versuchsdaten und Korrektur des ideellen Druckspannung-Stauchung Verlaufs für eine Klotzung mit Kontaktklotz aus POM-C GF25

Für die FE-Modelle erfolgt die Ermittlung der Stauchung der 3-teiligen Klotzung aus den Differenzen der Verschiebungskomponenten in globaler y-Achse. Als Referenzpunkt dient der Mittelpunkt der Kontaktfläche. Analog dem Vorgehen nach Abschnitt 8.3.4 werden Druckspannung und Stauchung als ideelle Größen bezogen auf die Querschnittfläche des Kontaktklotzes in Krafrichtung¹⁶⁹ und die Ausgangsdicke der 3-teiligen Klotzung¹⁷⁰ bezogen.

Ideelle Druckspannung [N/mm²]	Ideelle Stauchung [%]	
	Aluminium	POM-C GF25
34,7	0,048	0,297
69,4	0,0916	0,564
104,1	0,14	0,791
138,8	0,184	1,0
173,5	0,225	1,22

Tafel 38
Aus den FE-Berechnungen ermittelte ideelle Stauchungen der 3-teiligen Klotzung

¹⁶⁹ 80 mm x 18 mm = 1440 mm².

¹⁷⁰ 15,9 mm.

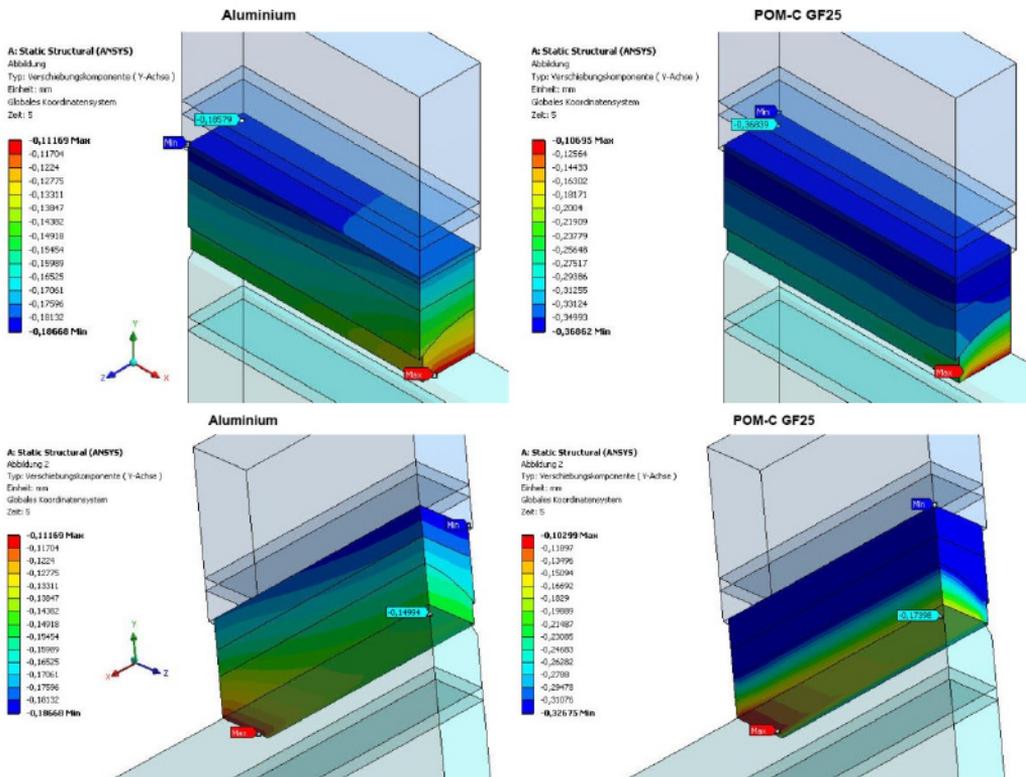


Bild 150
 Verschiebungskomponenten der Klotzung in globaler y-Achse für die Lastgröße 250 kN und Kennzeichnung der für die Ermittlung der Stauchung maßgeblichen Verformungsgrößen

In Bild 151 sind die ideellen Druckspannung-Stauchung-Verläufe aus den Versuchen¹⁷¹ mit den Ergebnissen der FE-Berechnungen nach Tafel 38 gegenübergestellt. Für Aluminium werden mit der FE-Berechnung geringere Stauchungen als in der Versuchen ermittelt. Der leicht nichtlineare Verlauf der Druckspannung-Stauchung-Kurve aus den Versuchen kann mit dem FE-Modell nicht nachempfunden werden. Im Druckspannungsbereich von 40 N/mm² bis 60 N/mm² ist die Abweichung mit etwa 50% am größten. Für höhere Druckspannungen nähern sich die Stauchungswerte aus Versuch und FE-Berechnung aneinander an. Die Klotzung mit einem Kontaktklotz aus POM-C GF25 verhält sich in der FE-Berechnung ebenfalls steifer als in den Versuchen¹⁷². Für hohe Druckspannungen driften die Kurvenverläufe voneinander ab. Die FE-Berechnung zeigt im Kurvenverlauf eine leichte Steifigkeitszunahme, hingegen der Kur-

¹⁷¹ Vergleiche Bild 148 und Bild 149.

¹⁷² Vergleiche Bild 151, Kurve „FEM POM-C GF25 I“.

verlauf der Versuchswerte von einem Steifigkeitsabfall gekennzeichnet ist.

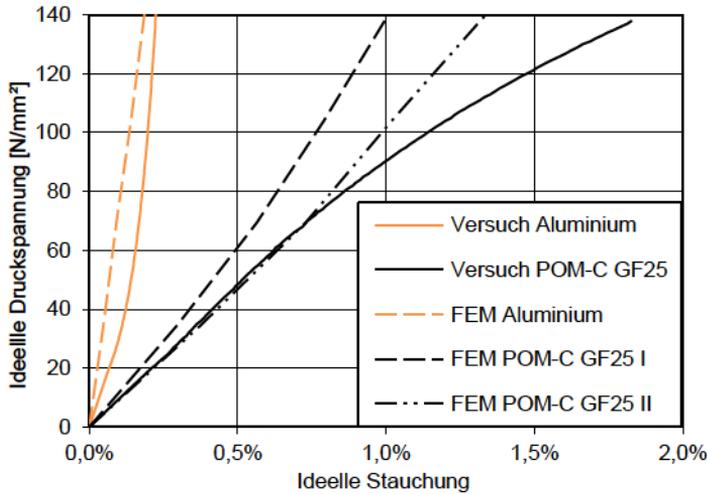


Bild 151
Gegenüberstellung der ideellen Druckspannung-Stauchung-Verläufe aus Versuchen und FE-Berechnung

In weiteren FE-Berechnungen wurden E-Modul und Poissonzahl von POM-C GF25 leicht nach unten korrigiert, um eine Annäherung des Druckspannung-Stauchung-Verlaufs an die Versuchswerte zu erzielen. Für die Kombination aus einem E-Modul von 2750 N/mm² mit einer Poissonzahl von 0,4 wird bis zu Druckspannungen von 70 N/mm² eine sehr gute Übereinstimmung der Kurvenverläufe erreicht¹⁷³. Die im weiteren Druckspannungsverlauf auftretenden Effekte aus viskoelastischem Materialverhalten des POM-C GF25 sind mit dem im FE-Modell gewählten Materialmodell nicht mehr abbildbar. Die Senkung der Poissonzahl führt in der FE-Berechnung zu geringeren Querdehnungen von POM-C GF25. In Verbindung mit den Reibkoeffizienten von POM-C GF25 zu Glas und Aluminium wird dadurch die Querdehnungsbehinderung des Kontaktlotzes reduziert. In Folge dessen sinken die Steifigkeit des Kontaktlotzes aus POM-C GF25. Ein weiterer Effekt besteht in der Redzierung der in der Kontaktfläche zum Glas auftretenden Querspannung¹⁷⁴. Die Verringerung der Querspannungen hat hier eine Reduzierung der maximalen Hauptzugspannung um 22% und eine Verschiebung in den Punkt der maximalen Normalspannung σ_x zur Folge.

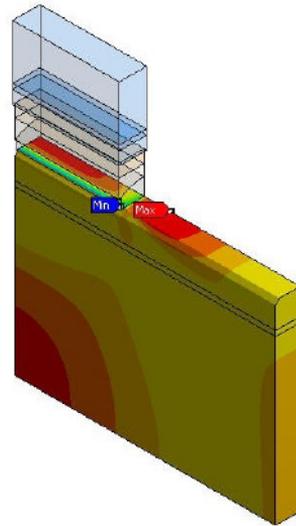
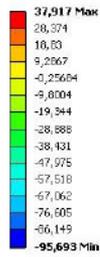
¹⁷³ Vergleiche Bild 151, Kurve „FEM POM-C GF25 II“.

¹⁷⁴ Hier in globaler z-Achse des FE-Modells.

Bild 152

Verteilung der Hauptzugspannung im Glas σ_{s1} bei veränderten Materialkennwerten von POM-C GF25
E-Modul: 2750 N/mm²
 $\nu = 0,4$

A: Static Structural (ANSYS)
Abbildung
Typ: Max. in Hauptachsensystem
Einheit: MPa
Zelle: 5



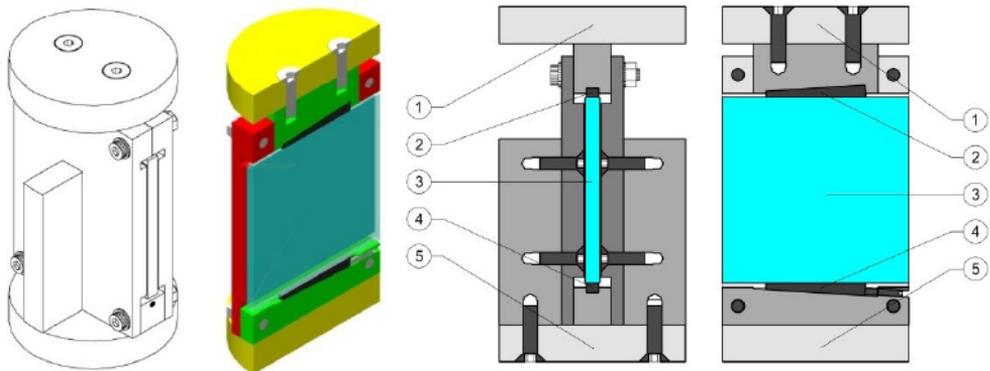
8 Experimentelle Untersuchungen an Klotzungsstrukturen

8.1 Keilförmiger Kontaktklotz

8.1.1 Grundlagen

In einer frühen Phase der Planung des Glasdaches über dem Innenhof des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin wurde die Tragfähigkeit einer Klotzungsstruktur mit keilförmigen Kontaktklotzen im Kleinteilversuch untersucht. Grundlage hierzu waren Überlegungen, eine Klotzung analog der Darstellung in Bild 118 in das Tragsystem des Glasdaches zu integrieren. Im Unterschied zu dem in Bild 118 dargestellten Aufbau war jedoch der Kontaktklotz noch keilförmig ausgeführt. Anhand von kleinformigen Glas-scheiben aus Floatglas wurden die durch eine 80 mm lange und 10 mm breite Klotzung übertragbaren Druckkräfte ermittelt. Innerhalb der Versuchsreihe sind dabei drei unterschiedliche Materialarten des Kontaktklotzes gegenübergestellt worden. Neben dem Kunststoff POM-C wurden auch Zinkdruckguss¹⁷⁵ und Aluminium¹⁷⁶ untersucht.

8.1.2 Versuchsaufbau



Für die Versuche wurde eine Belastungseinrichtung für eine Universalprüfmaschine entwickelt, mit Hilfe derer definiert Druckkräfte in Scheibenebene durch eine Floatglasscheibe in dem Abmessungen 150 mm x 150 mm x 12 mm durchgeleitet werden konnten. Die Einleitung der Druckkräfte in die

¹⁷⁵ Zinkdruckguss ZnAl4Cu1 (Z410)

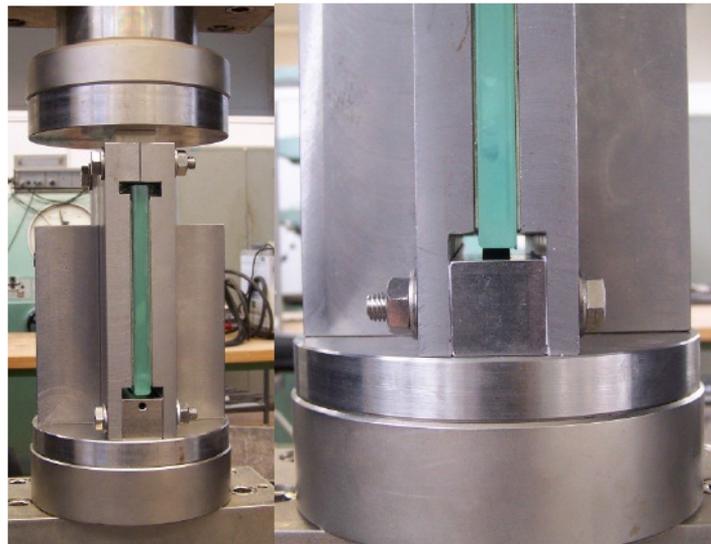
¹⁷⁶ Aluminiumlegierung AlMgSiPb (AL F28), EN AW-6012

Glasscheibe erfolgte an der Ober- bzw. Unterkante über Druckstempel mit keilförmigen Kontaktklötzen. Das seitliche Ausweichen der Glasscheibe wird durch die Belastungseinrichtung verhindert.

8.1.3 Versuchsdurchführung

In einer ersten Versuchsserie wurden die Prüfkörper bei Raumtemperatur kraftgesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1 kN/s bis zum Versagen bzw. bis zur Maximalbelastbarkeit der Prüfmaschine belastet. Dabei wurden jeweils die Pressenkraft und der Verfahrweg der Presse aufgezeichnet. Verformungsmessungen an der Glasscheibe und den Kontaktklötzen waren mit dem gewählten Versuchsaufbau und den zur Verfügung stehenden messtechnischen Geräten nicht möglich. Für jedes Kontaktklotzmaterial erfolgten drei Prüfungen. Die Glasscheiben wurden zur Splitterbindung mit Klarsichtfolie beklebt.

Bild 153
Belastungseinrichtung in der Universalprüfmaschine (links), Unterer Lasteinleitungspunkt (rechts)



In einer zweiten Versuchsreihe wurden an sechs Prüfkörpern mit Klotzungen aus POM-C zyklische Belastungstests mit ansteigendem Lastniveau durchgeführt. Dabei wurden die Prüfkörper lastgesteuert be- und entlastet. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 1 kN/s, die Entlastungsgeschwindigkeit betrug 4 kN/s. Nach Erreichen einer Laststufe wurde die Belastung für 60 s konstant gehalten. Ebenso wurde zwischen Entlastung und Wiederbelastung eine belastungsfrei Phase von 60 s eingehalten. Es wurden Laststufen von 0 kN bis 140 kN in Schrittweiten von 20 kN angefahren.

ren. Als Referenzwert für ein linear elastisches Verformungsverhalten wurde zusätzlich ein Prüfkörper mit Klotzungen aus Aluminium geprüft.

8.1.4 Versuchsergebnisse

Die in der ersten Versuchsreihe erzielten Ergebnisse zeigen deutliche Traglastunterschiede zwischen den metallischen Kontaktklötzen und den Kontaktklötzen aus POM-C.

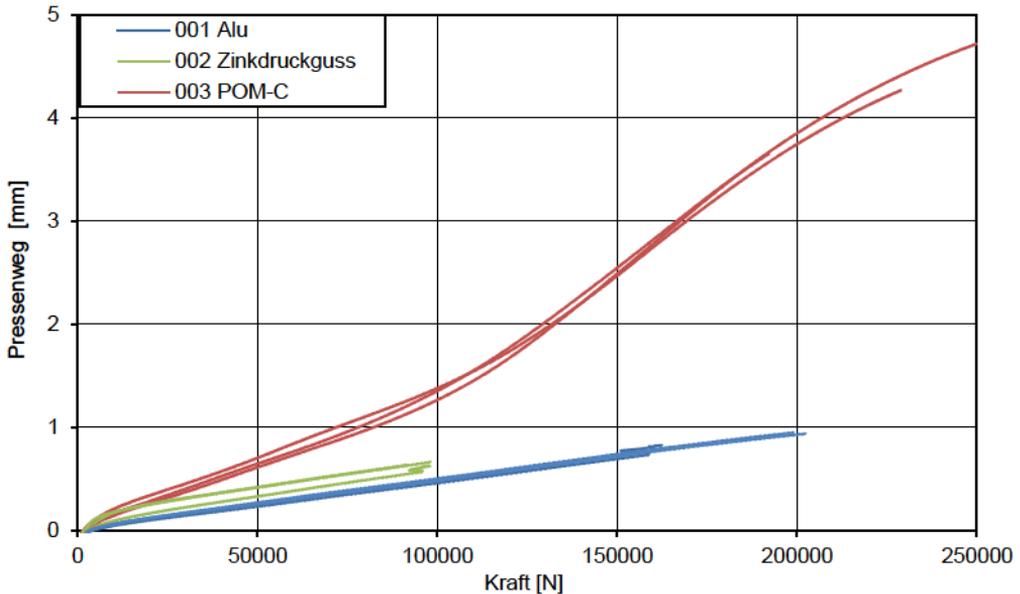
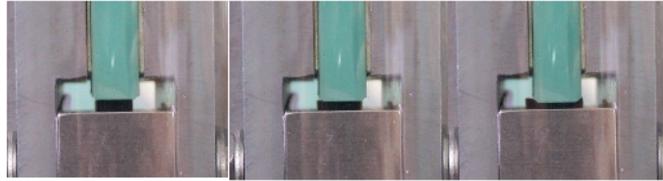


Bild 154
Verformungs-Last-Diagramm der Belastungsversuche mit keilförmigen Klotzungen aus POM-C, Aluminium und Zinkdruckguss

Mit den Kontaktklötzen aus POM-C wurden die höchsten Traglasten im Bereich von 200 kN bis 250 kN erzielt. Bei zwei Prüfkörpern kam es im Bereich von 200 kN bis 230 kN zur Bildung je eines etwa 1 cm bis 2 cm langen Risses an der Glaskante. Der Riss hatte aber keinen direkten Einfluss auf das Tragverhalten. Die Last konnte nach Auftreten des Risses weiter gesteigert werden. Ein vollständiges Versagen der Glasscheibe wurde in keinem Versuch erreicht. Der aufgezeichnete Pressenweg war bei POM-C etwa um den Faktor vier höher als bei Aluminium. Der Verlauf des aufgezeichneten Pressenwegs ist bis etwa 80 kN annähernd linear. Ab 80 kN steigt der Pressenweg stärker an. Ab dieser Lastgröße waren an den Kontaktklötzen deutliche Deformationen in Querrichtung erkennbar. Die Kontaktklötze wurden in den Versuchen stark plastisch verformt.

Bild 155

Untere Klotzung aus POM-C unter niedriger, mittlerer und maximaler Belastung



Mit den Kontaktklötzen aus Aluminium wurden Bruchlasten im Bereich von 160 kN bis 200 kN erreicht. Bei allen drei Prüfungen ist die Glasscheibe ausgehend von den Enden der Kontaktfläche zwischen Glas und Klotzung gebrochen. Bei einem Prüfkörper mit der Trag- bzw. Bruchlasten von 160 kN stellten sich drei vertikale Hauptrisse in der Glasscheibe ein. Zwei Prüfkörper mit Bruchlasten von 200 kN haben im Versuch explosionsartig versagt und sind in sehr kleine Glassplitter zerbrochen. Die Ausrichtung der Risse war vorrangig vertikal. An den Kontaktklötzen wurden keine Beschädigungen festgestellt. Die Bruchstruktur des Prüfkörpers mit 160 kN Bruchlast lassen auf punktuelle Spannungskonzentrationen an den Rändern der Klotzung schließen, infolge derer die Scheibe gebrochen ist. Durch die kleinteilige Bruchstrukturen der Prüfkörper mit 200 kN Bruchlast ist eine exakte Bestimmung der Bruchursprünge nicht mehr zweifelsfrei möglich, jedoch sind auch hier auf die Bereiche der Klotzungsenden zulaufende Risse erkennbar, die einen Bruchausgang an diesen Stellen vermuten lassen.

**Bild 156**

Bruchbilder der Prüfkörper mit Klotzungen aus Aluminium. Bruchlasten von links nach rechts: 160 kN, 200 kN, 200 kN

Die Prüfkörper mit Klotzungen aus Zinkdruckguss haben alle bei Bruchlasten zwischen 93 kN und 95 kN versagt. Die Bruchbilder der Scheiben zeigen vertikale Risse ausgehend von den Klotzungsenden, analog den Rissverläufen die auch bei Aluminium festgestellt wurden. Neben diesen vertikalen Rissen waren bei allen drei Prüfkörpern Muschelbrüche im Scheibenkern ausgehend vom Mittelpunkt der Kontaktfläche vorhanden. Eine schlüssige Begründung für das Entstehen der Muschelbrüche lässt sich mit dem FEM-Berechnungen nach 7.1.4 finden, wonach es bei einem hohen Reibungskoeffizienten zwischen Klotzungsmaterial und Glas zu hohen lokalen Querkzugspannungen in der Kontaktfläche kommt. Das Vorhandensein dieser Querkzugspannungen würde zwangsläufig zu einem derartigen Muschelbruch führen, der bei weiterer Laststeigerung die Glasscheibe praktisch spalten würde.

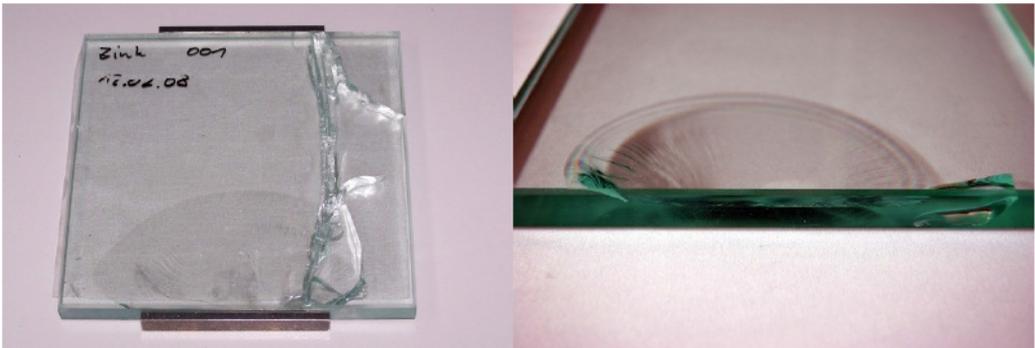


Bild 157

Bruchbilder der zweier Prüfkörper mit Klotzungen aus Zinkdruckguss mit vertikalen Rissen ausgehend von den Klotzungsenden und Muschelbrüchen im Kern der Glasscheibe ausgehend vom Mittelpunkt der Kontaktflächen zwischen Glas und Klotz

In der zweiten Versuchsreihe mit zyklischer, ansteigender Belastung ist das viskoelastische Verformungsverhalten des POM-C deutlich erkennbar. Während sich die Referenzprobe mit Klotzungen aus Aluminium linear elastisch verhält, sind bei den Proben mit POM-C als Klotzungsmaterial schon ab 40 kN Belastung sowohl viskoelastische als auch viskose Verformungen ablesbar. Mit ansteigendem Lastniveau nimmt vor allem der Einfluss viskoser Verformungen zu. Bei 140 kN Druckkraft liegt der viskose Verformungsanteil bereits bei etwa 30% der Gesamtverformung.

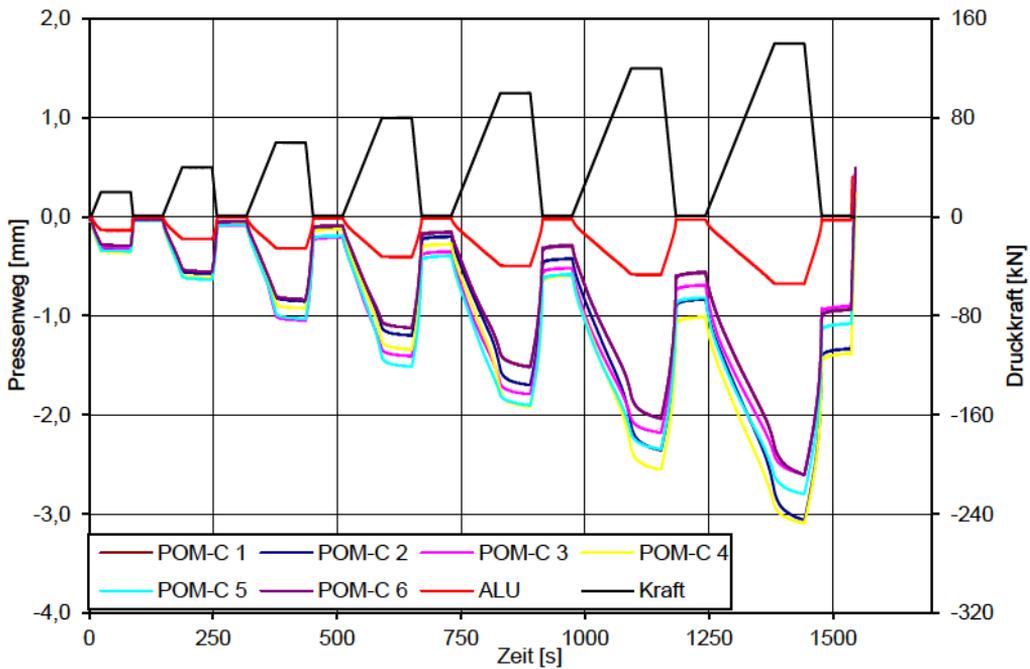


Bild 158

Verformungsverhalten der Glasscheibe mit keilförmiger Klotzung auf POM-C und Aluminium unter zyklischer Belastung mit ansteigendem Lastniveau

8.1.5 Zusammenfassung

Schon an diesen beiden eher einfachen Versuchsreihen zeigt sich wie wichtig und zwingend die Auswahl eines geeigneten Klotzungsmaterials für die Leistungsfähigkeit der Klotzung ist. Aus den Versuchen wird deutlich, dass Zinkdruckguss als Klotzungsmaterial eher ungeeignet ist. Die Bildung von Muschelbrüchen im Scheibeninneren lässt auf einen hohen Reibungskoeffizienten zwischen Glas und dem Klotzungsmaterial Zinkdruckguss schließen.

Obwohl mit den Klotzungen aus Aluminium EN AW-6012 etwa die doppelten Bruchkräfte wie mit Zinkdruckguss erreicht wurden, ist von der Verwendung dieser Legierung als Klotzungsmaterial abzuraten. Die Bruchsprünge zeigen auf die Bereiche der Klotzungsenden und deuten vor allem bei den Proben mit 200 kN Bruchkraft auf punktuelle Spannungskonzentrationen in der Kontaktfläche zwischen Glas und Aluminium hin. Der enorme Zerstörungsgrad der Schei-

ben lässt keine Tragfähigkeitsreserven nach dem Bruch der Scheibe mehr zu.

Die höchsten Bruchlasten bzw. geprüften Kräfte von bis zu 250 kN wurden mit den Klotzungen aus POM-C erreicht. Bei keinem der Prüfkörper kam es zu einem vollständigen Bruch der Glasscheibe. Entstandene einzelne, lokale Risse hatten keinen direkten Einfluss auf das Tragverhalten der Glasscheibe. Das Verformungsverhalten der Klotzung aus POM-C ist für eine reale Anwendung kritischer zu betrachten. Die festgestellten Verformungen lagen um den Faktor 4 höher als bei den untersuchten metallischen Klotzungsmaterialien.

8.2 Klotzungskonstruktion der Innenhofüberdachung des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin

8.2.1 Grundlagen

Im Zuge des Verfahrens zur Zustimmung im Einzelfall für das Glasdach über dem Innenhof des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais in Berlin¹⁷⁷ waren rechnerische und experimentelle Nachweise zur Tragfähigkeit der geplanten Klotzungskonstruktion erforderlich. Anhand kleinformatiger Glasscheiben musste die Tragfähigkeit der für dieses Bauvorhaben neu entwickelten Klotzung in Bauteilversuchen nachgewiesen werden. Aus den aufgestellten statischen Berechnungen lagen die Klotzungslasten aus den Einwirkungskombinationen als Zahlenwerte vor. Ziel der Versuche war es gegenüber diesen Klotzungslasten, eine Tragfähigkeit mit einem Sicherheitsfaktor von mindestens 3,0 nachzuweisen.

In dieser Phase der Projektplanung war noch keine Entscheidung zur Auswahl des Materials des Kontaktklotzes gefallen. Aus den Vorkenntnissen der Versuchsreihen mit den keilförmigen Kontaktklötzen stand für dieses Projekt Aluminium F28¹⁷⁸, POM-C und ein mit 25 Masseprozent glasfaserverstärktes POM-C (POM-C GF25) als Klotzungsmaterial zur Auswahl. Anhand weiterer kleiner Vorversuche hatte sich gezeigt, dass sich die glasfaserverstärkte Ausführung von POM-C hinsichtlich des Verformungsverhaltens,

¹⁷⁷ Vergleiche Abschnitt 3

¹⁷⁸ EN AW-6012

hier vor allem der plastischen Verformungen, deutlich günstiger verhält, als das nicht verstärkte Material.

Für die drei zur Auswahl stehenden Klotzungsmaterialien ergaben sich aufgrund der unterschiedlichen, anhand der Produktdatenblätter angenommenen, Materialsteifigkeiten verschiedene maßgebende Klotzungslasten.

Tafel 39
Charakteristische Klotzungs-
lasten nach den statischen
Berechnungen und FE-
Modellen

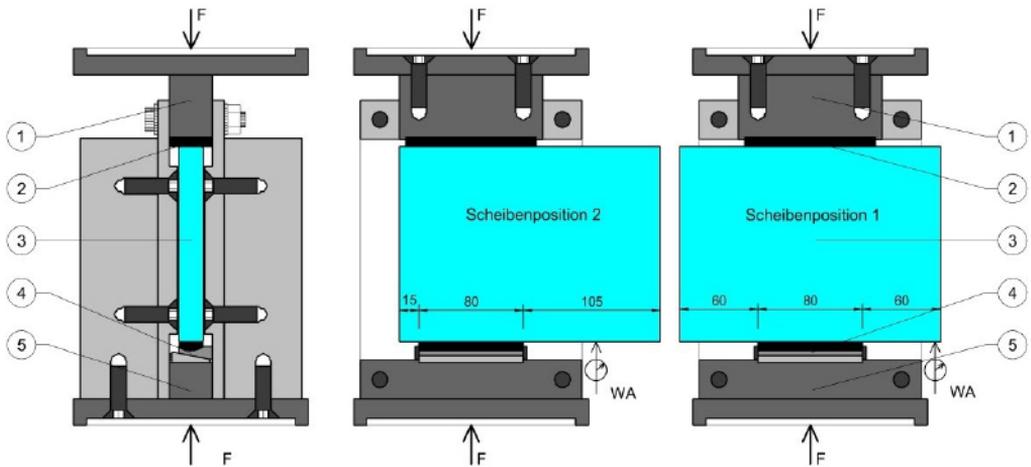
Material	Maximal F_k aus Eigengewicht	Maximal F_k aus Volllast
POM-C	35,0 kN	54,4 kN
POM-C GF25	36,6 kN	66,7 kN
Alu F28	37,5 kN	81,0 kN

Ziel der Versuche war es gegenüber der maximalen charakteristischen Klotzungslast aus dem Volllastzustand eine Tragfähigkeit mit einem Sicherheitsfaktor von mindestens 3,0 nachzuweisen.

8.2.2 Versuchsaufbau

Grundlage für den Versuchsaufbau war die für die keilförmigen Kontaktklötze entwickelte Belastungseinrichtung nach 8.1.2, jedoch wurde dieser in mehreren Punkten verändert. Die Versuche erfolgten nun an 19 mm dicken Floatglas-scheiben in den Abmessungen 200 mm x 150 mm (b x h). Die Tragscheiben der später ausgeführten Verglasungen bestehen aus 19 mm dicken ESG-H Scheiben. Die Verwendung von Floatglas für die Versuche wurde notwendig, da ESG-H in den Abmessungen 200 mm x 150 mm von dem am Projekt beteiligten Glasveredlern nicht lieferbar war. Die Nutzung von Floatglas im Versuch ist aber legitim, da die Festigkeit von Floatglas unter der von ESG-H liegt und somit der Tragfähigkeitsnachweis im Versuch auf der sicheren Seite erfolgt. Die Breite der Scheibe wurde gegenüber den Versuchen nach 8.1 um 50 mm erhöht, so dass die Glas-scheibe aus der Belastungseinrichtung etwas herausragt. An diesen Stellen war nun an den Glasunterkanten eine Verformungsmessungen über Wegtaster direkt an der Glas-scheibe möglich. Alle Kanten der Gläser wurden in der Güte KPO ausgeführt. Eine weitere Änderung ergab sich an den Klotzungen. Am unteren Lasteinleitungspunkt wurde die für die Dachkonstruktion entwickelte Klotzungs-konstruktion im Maßstab 1:1 eingesetzt. Der obere Lasteinleitungspunkt

wurde nur als einfacher Kunststoffklotz aus POM-C GF25 jedoch mit einer größeren Kontaktfläche ausgeführt.



Bei den Versuchen wurden die Glasscheiben in der Belastungsvorrichtung in zwei Positionen angeordnet. In Scheibenposition 1 wurde die 200 mm breite Foatglasscheibe mittig auf die Klotzung aufgesetzt. Somit verblieben links und rechts neben der 80 mm breiten Klotzung ein Abstand zur Ecke der Glasscheibe von 60 mm. In Scheibenposition 2 wurde die Glasscheibe soweit verschoben, bis auf einer Seite der Abstand zwischen der Glasecke und der Klotzung noch 15 mm betrug. Dies entsprach etwa dem geplanten Randabstand der Klotzung in der späteren Einbaulage der Klotzungen.

Bild 159

Schnittdarstellung der Belastungsvorrichtung mit den in den Versuchen gewählten Scheibenpositionen 1 und 2

- 1 Druckstempel oben
- 2 Klotzung oben
- 3 Glasscheibe
- 4 Klotzung unten
- 5 Druckstempel unten
- WA Wegtaster



Bild 160

Unterer Laststempel mit Klotzung und Kontaktklotz aus Aluminium



Bild 161

Unterer Laststempel mit Klotzung und Kontaktklotz aus POM-C

8.2.3 Versuchsdurchführung

8.2.3.1 Prüfablauf

Die Versuche erfolgten in einer 250 kN Universalprüfmaschine mit Druckstempeln. Für den Prüfablauf wurde anhand der charakteristischen Klotzungslasten¹⁷⁹ eine stufenweise Belastung gewählt.

Tafel 40
Belastungsschema

Zeitschritt	Laststufe
Versuchsbeginn	Prüflast 0 kN
Lineare Laststeigerung	1 kN/s
1,0-fache Eigenlast F_k	Haltezeit 600 s
Lineare Laststeigerung	1 kN/s
1,0-fache Volllast F_k	Haltezeit 600 s
Lineare Laststeigerung	1 kN/s
3,0-fache Volllast F_k	Haltezeit 600 s
Lineare Laststeigerung	1 kN/s
Versuchsende	Versagen, maximale Prüflast von 250 kN oder Verformungen über 3 mm

8.2.3.2 Klotzung mit Kontaktklotz aus POM-C

An Klotzungen mit einem Kontaktklotz aus POM-C wurden fünf Versuche durchgeführt. Alle Versuche erfolgten in der Scheibenposition 1. Im Versuch wurden die eingeleitete Druckkraft und die Vertikalbewegung der Glasscheibe an der unteren Ecke aufgezeichnet.

8.2.3.3 Klotzung mit Kontaktklotz aus POM-C GF25

An Klotzungen mit einem Kontaktklotz aus POM-C GF25 wurden drei Versuchsserien durchgeführt. Die erste Versuchsserie bestand aus Vorversuchen an vier Prüfkörpern, zwei Versuche in Scheibenposition 1 und zwei Versuche in Scheibenposition 2. Die zweite Versuchsserie erfolgte an 15 Prüfkörpern in der Scheibenposition 1. In den Versuchen wurden die eingeleitete Druckkraft und die Vertikalbewegungen der Glasscheiben an den unteren Ecken aufgezeichnet. An vier Prüfkörpern erfolgte zusätzlich die Aufzeichnung der Dehnungen an der unteren Glaskante mit Hilfe von zwei Dehnmessstreifen (DMS). Die DMS wurden links und rechts

¹⁷⁹ Vergleiche Tafel 39

etwa 5 mm vom Rand der Klotzung mittig auf der Glasscheibe appliziert. Aus 7.1 ist bekannt, dass an diesen Stellen maximale Normalspannungen parallel zu Scheibenkante auftreten. Die Ausrichtung der DMS erfolgte parallel zur Scheibenkante. Schlechte Materialqualität des Kunststoffes der zweiten Versuchsserie machte die Durchführung einer dritten Versuchsserie mit POM-C GF25 eines anderen Herstellers notwendig. In der dritten Versuchsserie wurden zehn Prüfkörper in Scheibenposition 1 geprüft.

8.2.3.4 Klotzung mit Kontaktklotz aus Aluminium F28

An Klotzungen mit einem Kontaktklotz aus Aluminium EN AW-6012 wurden vier Vorversuche, ein Versuch in Scheibenposition 1 und drei Versuche in Scheibenposition 2 durchgeführt. Die Hauptversuche erfolgten an 5 Prüfkörpern in der Scheibenposition 1. In den Versuchen wurden die eingeleitete Druckkraft und die Vertikalbewegungen der Glasscheiben an den unteren Ecken aufgezeichnet. An zwei Prüfkörpern erfolgte zusätzlich die Aufzeichnung der Dehnungen an der unteren Glaskante mit Hilfe von zwei Dehnmessstreifen (DMS).

Die DMS wurden links und rechts etwa 5 mm vom Rand der Klotzung mittig auf der Glasscheibe appliziert.

8.2.4 Versuchsergebnisse

8.2.4.1 Klotzung mit Kontaktklotz aus POM-C

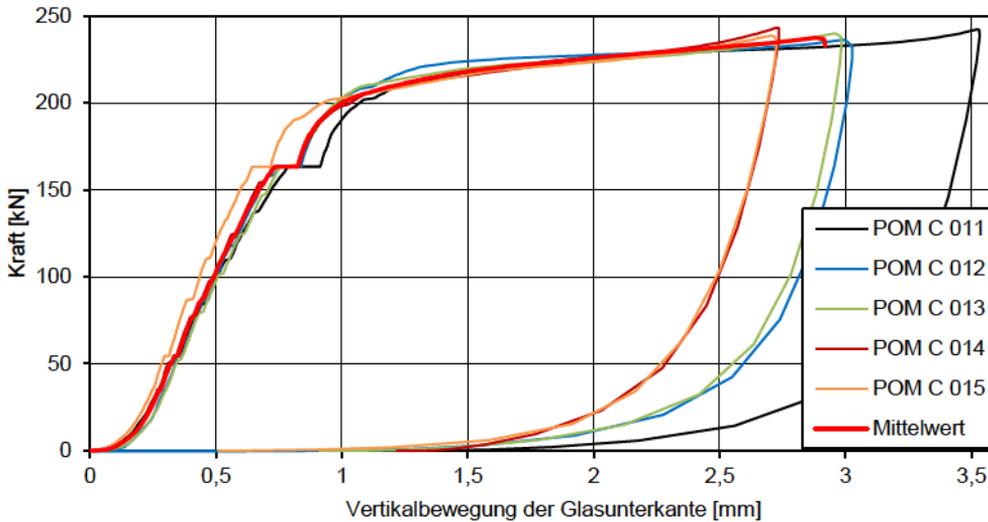


Bild 162
Verformungs-Kraft-
Diagramm für Kontaktklötze
aus POM-C

Bei den fünf durchgeführten Prüfungen mit Kontaktklötzen aus POM-C konnten die drei Laststufen 35,0 kN, 54,4 kN und 163,2 kN ohne Beschädigungen aufgebracht werden. In der Lasthaltephase der Laststufen 2 sind bereits erste Kriechverformungen erkennbar. In der Lasthaltephase der Laststufe 3 bei 163,2 kN wurden deutliche Kriechverformungen festgestellt. Die Belastung konnte in allen fünf Prüfkörpern bis 240 kN gesteigert werden, wobei ab etwa 180 kN ein starkes Ansteigen der Verformungen festzustellen war. Bei 240 kN wurden die Versuche aufgrund der hohen Verformungen von 2,5 mm bis 3,3 mm abgebrochen.

An den Glasscheiben wurden nach den Versuchen keinerlei Beschädigungen festgestellt. Die Kontaktklötze aus POM-C waren hingegen sehr stark plastisch deformiert. Eine weitere Steigerung der Belastung bzw. das Aufrechterhalten einer so großen Last scheint im Nachgang bei Betrachtung der fast zerstörten Kontaktklötze nicht mehr möglich.



Bild 163
Klotzung mit Kontaktklotz aus POM-C nach der Belastung bis 240 kN. Der Kontaktklotz wurde sehr stark plastisch deformiert

8.2.4.2 Klotzung mit Kontaktklotz aus POM-C GF25

Bei den Vorversuchen wurden je zwei Prüfkörper mit den Scheibenpositionen 1 und 2 geprüft. Das aufgezeichnete Verformungs-Kraft-Verhalten ist abgesehen von einer Verfestigung im Anfangsbereich annähernd linear. Für die Prüfkörper 001 und 003 mit Scheibenposition 1 wurde eine Maximalbelastung von 250 kN erreicht.

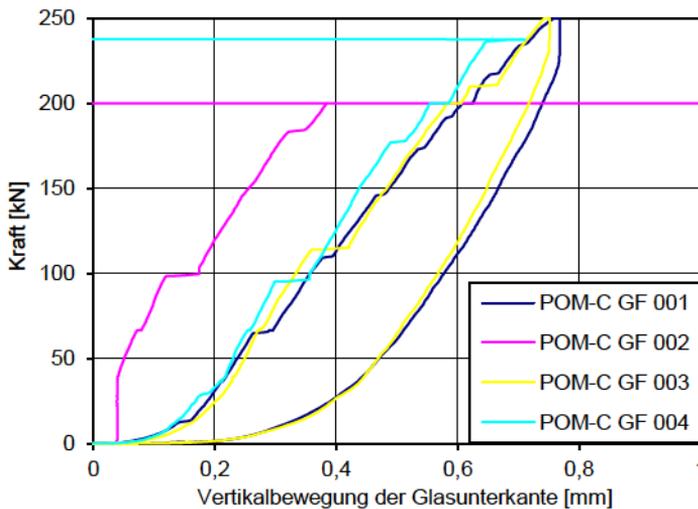


Bild 164
Verformungs-Kraft-Diagramm der Vorversuche an Klotzungen mit POM-C GF25

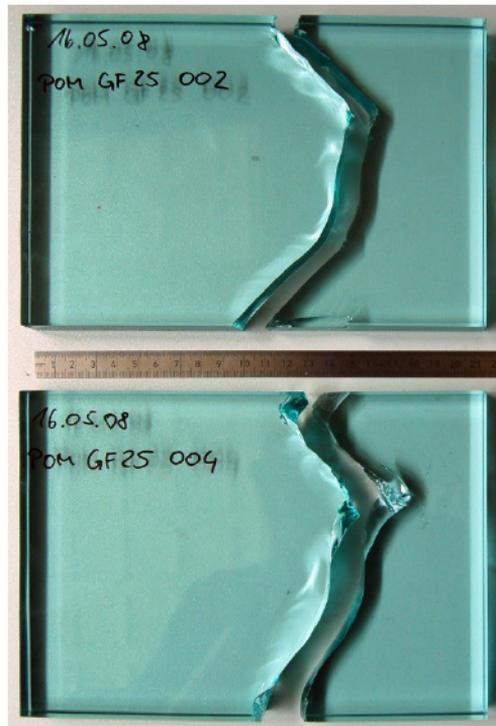
Die dabei aufgebrachtene Verformungen waren nach der Entlastung fast vollständig reversibel. Bei den Prüfkörpern 002 und 004 mit Scheibenposition 2 hat sich zunächst ein ähnliches Verformungs-Last-Verhalten gezeigt¹⁸⁰. Bei einer

¹⁸⁰ Die Verformungsmessung bei Prüfkörper 2 wurde durch Schiefstellungen der Glasschiebe beeinflusst.

Prüflast von 200 kN kam es bei Prüfkörper 002 zu einem Bruch der Glasscheibe, bei dem der aus der Belastungsvorrichtung herausstehende Teil der Glasscheibe abplatze. Der Versuch wurde abgebrochen. Bei Prüfkörper 004 wurde der gleiche Effekt bei einer Last von 237 kN festgestellt. Da nur der unbelastete Teil der Glasscheibe abgebrochen war, konnte die Kraft jedoch weiter bis auf 250 kN gesteigert werden. Die Bruchbilder der beiden gebrochenen Prüfkörper 002 und 004 sind nahezu identisch.

Bild 165

Bruchbilder der Prüfkörper 002 und 004 nach Glasbruch bei 200 kN bzw. 237 kN



Bei den Hauptversuchen mit Kontaktklötzen aus POM-C GF25 wurden 15 Prüfkörper in der Scheibenposition 1 untersucht. An vier Prüfkörpern wurden zusätzlich an der Glasunterkante die Oberflächendehnungen der Glasscheibe mit Hilfe von DMS aufgezeichnet. Die DMS wurden links und rechts etwa 5 mm neben der Klotzung in der Mitte der Glas-kanten positioniert.

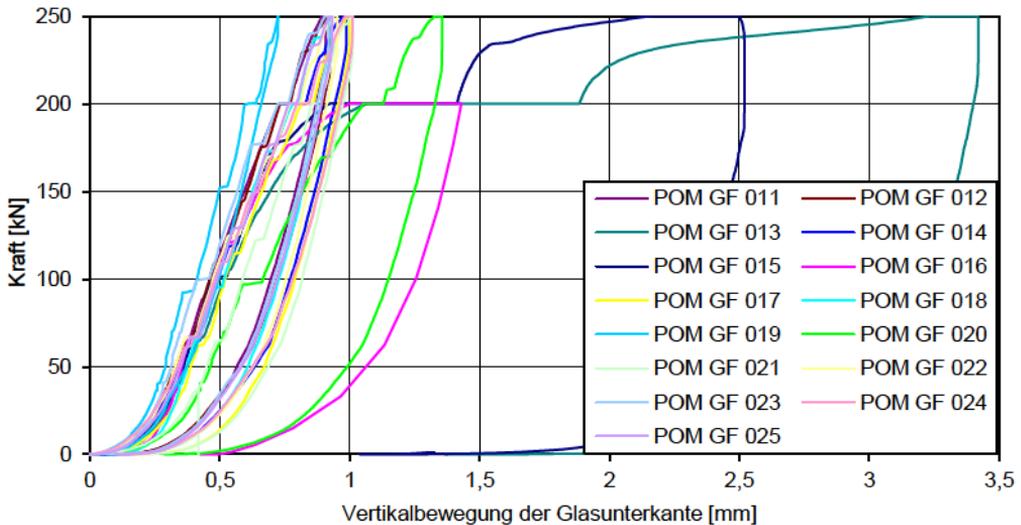


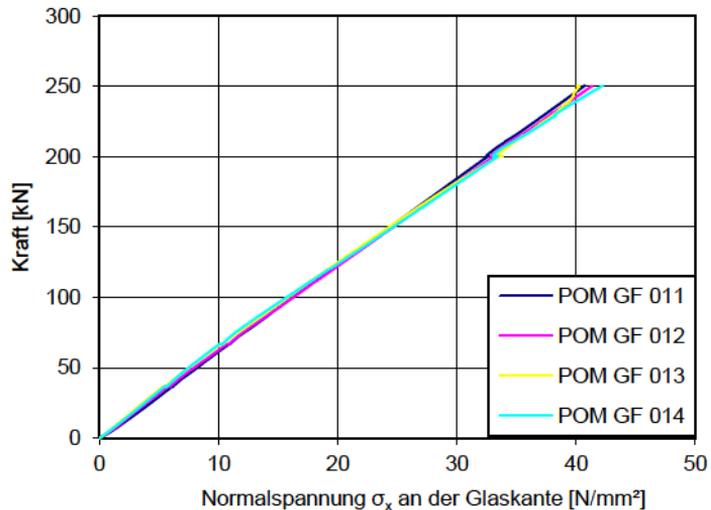
Bild 166
 Verformung-Kraft-Diagramm
 für Kontakklötze aus POM-
 C GF25,
 2. Prüferie

Zehn von 15 Prüfkörpern zeigten in den Versuchen ein nahezu identisches Kraft-Verformungs-Verhalten auf. Der Kurvenverlauf ist bis zur Maximallast von 250 kN annähernd linear, nach Entlastung sind die Verformungen fast vollständig reversibel. In der Lasthaltephase der 3,0-fachen Vollast bei 200 kN sind leichte Kriechverformungen erkennbar. An den Kontakklötzen aus POM-C GF25 wurden nach den Versuchen nur sehr geringe Anzeichen einer plastischen Verformung festgestellt. Anhand der im Versuch aufgezeichneten Oberflächendehnungen an der Glasunterkante wurden die Normalspannungen an den Positionen der DMS unter Ansatz eines E-Modules für Floatglas von 73.000 N/mm² berechnet. In der Auswertung zeigt sich eine lineare Abhängigkeit der Glasspannungen zur aufgetragenen Belastung. Für die Maximalbelastung von 250 kN ergibt sich für den Bereich von etwa 5 mm bis 10 mm neben der Klotzung eine Normalspannung σ_x^{181} von 41 N/mm².

¹⁸¹ Normalspannung parallel zur Scheibenkante.

Bild 167

Aus der aufgezeichneten Oberflächendehnung bestimmte Normalspannung σ_x an der Glasunterkante in Abhängigkeit zur eingeleiteten Kraft



Vier Prüfkörper¹⁸² zeigten im Versuch eine deutlich geringere Steifigkeit auf. Prüfkörper Nr. 013 erreichte bei 250 kN Maximallast etwa die 3,5-fache Verformung. An den vier Prüfkörpern wurden nach der Prüfung starke plastische Deformationen ähnlich denen bei POM-C ohne Glasfaserverstärkung festgestellt. Der Prüfkörper Nr. 19 verhielt sich im Versuch sehr steif. Auf der Suche nach dem Grund der hohen Streuungen innerhalb dieser Prüfserie wurde zuerst vermutet, dass die Prüfkörper aus POM-C GF25 mit denen von POM-C vertauscht wurden. Diese These konnte aber wiederlegt werden. Ein weiterer Grund für das schlechte Steifigkeitsverhalten der vier Prüfkörper wurde in der Menge des Glasfaseranteils in den Proben vermutet. Zu diesem Zweck wurden Teile der Proben verascht. Dazu wurde die Masse der Proben vor der Veraschung auf 0,001 g genau gemessen. Anschließend wurden die Kunststoffbestandteile bei Temperaturen oberhalb von 450°C in einem Muffelofen zersetzt. Zurück blieben die Glasfasern, deren Masse nach dem Veraschen wieder gemessen wurde. Die Auswertung zeigte, dass bei den betreffenden Prüfkörpern der Glasfaseranteil nicht bei 25%, sondern lediglich bei 0,5% lag. Auf Nachfrage beim Hersteller des Kunststoffes wurde bestätigt, dass ein zu geringer Glasfaseranteil oder eine schlechte Durchmischung in der Anfangs- und Endstücken des Extrudierprozesses auftreten kann, diese Abschnitte aber normalerweise nicht in den Verkauf gelangen und wieder einge-

¹⁸² Nr. 013, 015, 016 und 020

schmolzen werden. Man konnte hier aber nicht ausschließen das es sich bei der für diese Prüfungen geordneten Charge um Anfang- bzw. Endstücken der Produktion handelte. In der Konsequenz dessen wurde entschieden für das Bauvorhaben den Lieferanten des Kunststoffes zu wechseln und die Versuche zu wiederholen.

Bei der Wiederholung der Prüfserie wurden noch einmal zehn Prüfkörper mit einem Kontaktklotzmaterial aus POM-C GF25 eines anderen Herstellers geprüft. Alle Prüfungen erfolgten in der Scheibenposition 1.

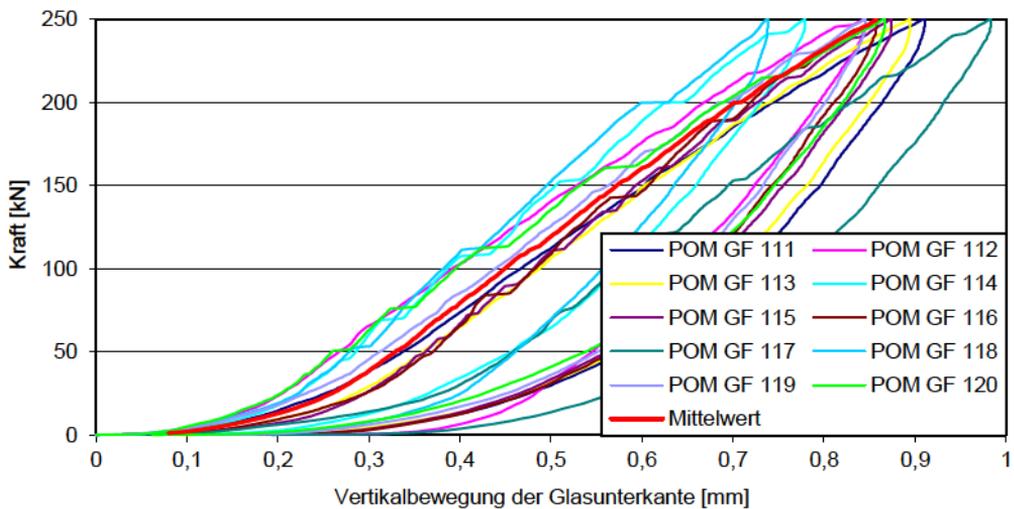


Bild 168
Verformung-Kraft-Diagramm für Kontaktklötze aus POM-C GF25, 3. Prüfserie

Die Streuung der aufgezeichneten Verformungswerte dieser Prüfserie war deutlich geringer. Bei allen Proben konnte eine Maximalbelastung von 250 kN aufgebracht werden. Bis zu einer Belastung von etwa 30 kN zeigen die aufgezeichneten Verformungswerte eine Verfestigung. Ab 30 kN bis 250 kN ist das Verhältnis zwischen aufgezeichneter Vertikalbewegung der Glasunterkante und eingeleiteter Belastung konstant.

8.2.4.3 Klotzung mit Kontaktklotz aus Aluminium F28

Bei den Vorversuchen wurden ein Prüfkörper mit den Scheibenpositionen 1 und 3 Prüfkörper in Scheibenposition 2 geprüft. Das aufgezeichnete Verformungs-Kraft-Verhalten ist abgesehen von einer Verfestigung im Anfangsbereich annähernd linear. Für die Prüfkörper 001 in Scheibenposition 1

wurde eine Maximalbelastung von 240 kN erreicht. Die dabei aufgetragenen Verformungen waren nach der Entlastung vollständig reversibel. An Glasscheibe und Klotzung waren keine Beschädigungen und keine plastischen Deformationen erkennbar. Bei den Prüfkörpern 002 bis 004 mit Scheibenposition 2 sind die Glasscheiben jeweils bei einer Belastung von 242 kN gebrochen. Bei Prüfkörper 002 entstand ein etwa 3 cm langer vertikaler Riss in der Mitte der unteren Klotzungsfläche. Prüfkörper 003 ist vollständig gebrochen, bei Prüfkörper 004 sind Teile der Glasscheibe abgebrochen. Der Rissverlauf in Prüfkörper 004 ist identisch mit dem der Prüfkörper 002 und 004 an Klotzungen aus POM-C GF25.

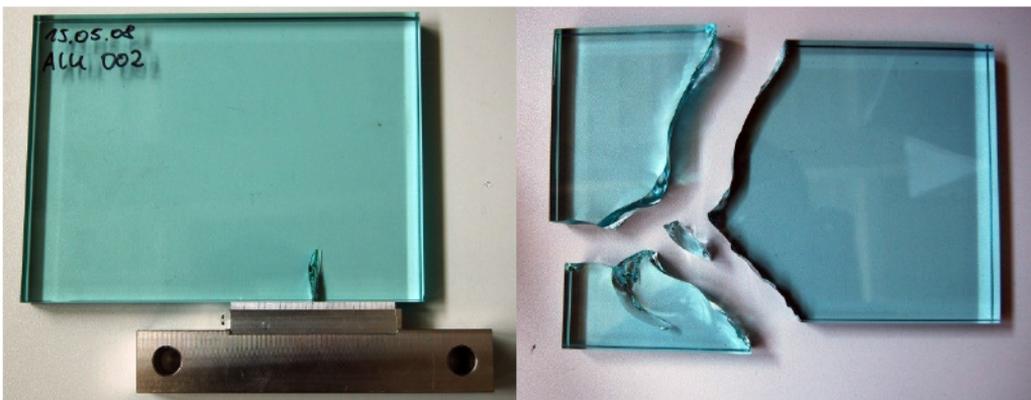


Bild 169

Bruchbilder der Prüfkörper Nr. 002 und 004 mit Kontaktklötzen aus Aluminium F28

Bei den Hauptversuchen mit Kontaktklötzen aus Aluminium F28 wurden 15 Prüfkörper in der Scheibenposition 1 untersucht. An vier Prüfkörpern wurden zusätzlich an der Glasunterkante die Oberflächendehnungen der Glasscheibe mit Hilfe von DMS aufgezeichnet. Die DMS wurden links und rechts etwa 5 mm neben der Klotzung in der Mitte der Glas-kanten positioniert.

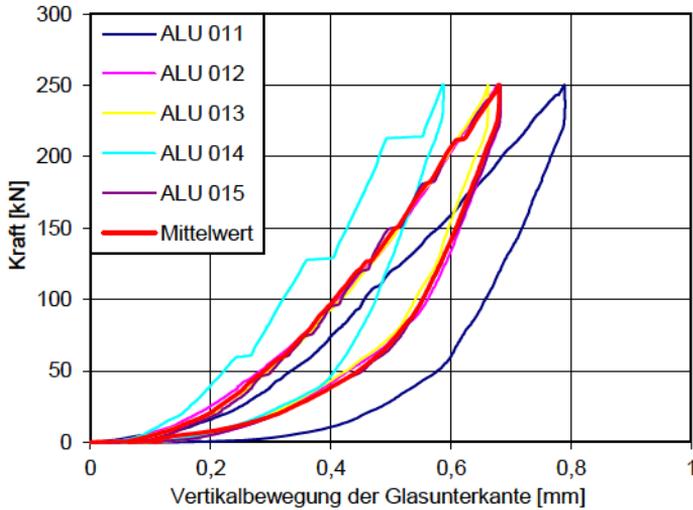


Bild 170
 Verformung-Kraft-Diagramm
 für Kontaktklötze aus Aluminium F28
 Hauptversuche

Alle fünf Prüfkörper wurden bis zu einer Maximalbelastung von 250 kN belastet. Weder an den Glasscheiben noch an den Klotzungen wurden Beschädigungen festgestellt. Die aufgezeichneten Oberflächenspannungen an den Glasunterkanten der Prüfkörper 011 und 012 stehen wie bei den Klotzungsmaterialien aus POM-C GF25 in linearer Abhängigkeit zur eingeleiteten Kraft. Die Berechnung der Normalspannung aus den Oberflächendehnungen an der Glasunterkante bei einer Belastung von 250 kN ergab für Aluminium F28 einen Wert von 39 N/mm². Die Werte mit Klotzungen aus POM-C GF25 lagen mit 41 N/mm² geringfügig darüber.

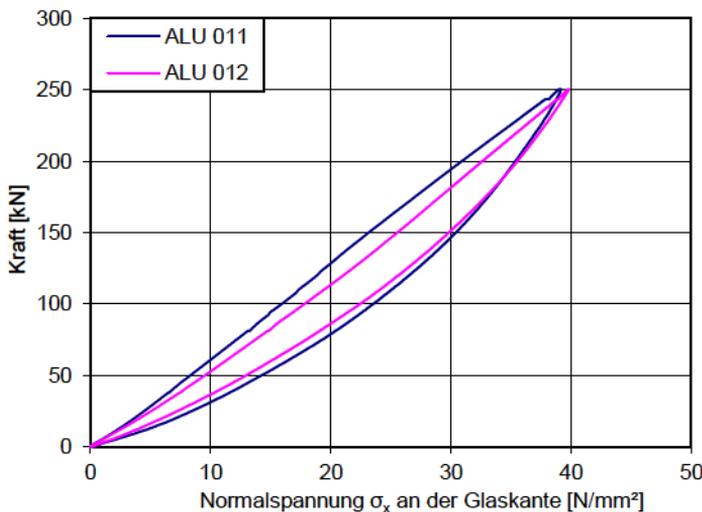


Bild 171
 Aus der aufgezeichneten Oberflächendehnung bestimmte Normalspannung σ_x an der Glasunterkante in Abhängigkeit zur eingeleiteten Kraft

8.2.4.4 Auswertung

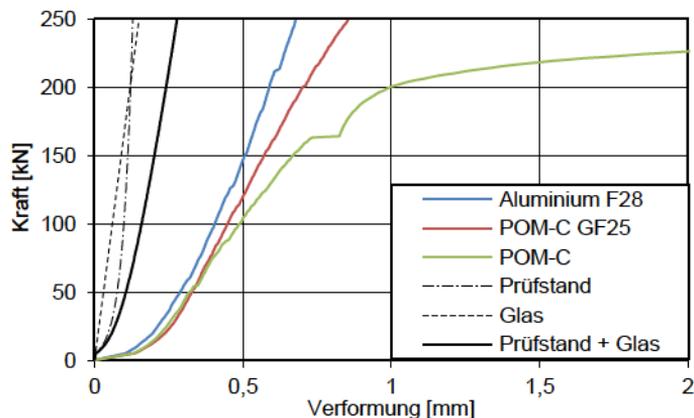
Bei Gegenüberstellung der ermittelten Kraft-Verformungs-Beziehungen der vier untersuchten Klotzungen zeigen sich bis etwa 100 kN Belastung kaum Unterschiede. Grund dafür ist der hohe Anteil von der Klotzung unabhängiger Verformungen an der gemessenen Gesamtverformung u_{Gesamt} . Bild 173 zeigt schematisch das Verformungsbild des Versuchsaufbaus. Die aufgezeichnete Gesamtverformung u_{Gesamt} setzt sich aus mehreren Verformungsanteilen zusammen, deren Trennung im Nachgang zu den Versuchen nicht zweifelsfrei möglich ist. Die Verformungsanteile sind:

- Stauchung der Glasscheibe an der Unterkante
- Stauchung der 3-teiligen Klotzung
- Stauchung der Versuchsvorrichtung
- Ggf. eine Schiefstellung der Glasscheibe

Eine Vergleichsgröße für die Stauchung der Glasscheibe an der Glasunterkante kann den FE-Berechnungen nach Abschnitt 7.2 entnommen werden. Hier wurde eine Verformung der Glasunterkante von 0,0006 mm/kN ermittelt. Bezogen auf die Klotzung mit Aluminium F28 entspricht dies bei 200 kN Belastung etwa 20% der Gesamtverformung.

Die Stauchung der Versuchsvorrichtung wurde im Nachgang zu den Versuchen durch zusätzliche Messreihen mit Verformungsmessungen direkt an der Versuchsvorrichtung bestimmt. Hier zeigte sich eine nichtlineare Abhängigkeit zur aufgetragenen Belastung. Bei 200 kN wurde eine Stauchung der Versuchsvorrichtung von etwa 0,12 mm ermittelt

Bild 172
Gegenüberstellung der
Kraft-Verformungs-
Beziehungen



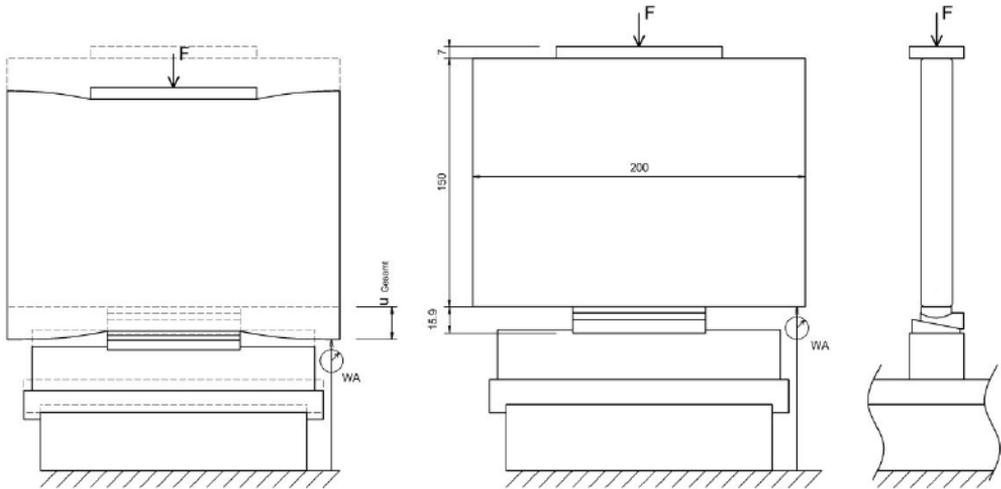


Bild 173

Schematische Darstellung der Verformung von Glasplatte, Klotzung und Versuchseinrichtung im Druckversuch.

Eine exakte Bestimmung der Stauchung der 3-teiligen Klotzungs-konstruktion ist aus den gewonnenen Versuchsdaten nicht zweifelsfrei möglich. Die Bestimmung der Steifigkeit der 3-teiligen Klotzungs-konstruktion kann nur durch separate Kleinteilversuche erfolgen, bei denen eine Verformungs-messung direkt an der Klotzung möglich ist.

In Scheibenposition 1 wurden in den Versuchen bei der Maximallast von 250 kN Normalspannungen entlang der Glaskante von 39 N/mm² bzw. 41 N/mm² ermittelt. Die Dehnungsmessung erfolgte an den Positionen der Spannungs-maxima σ_x aus den FE-Berechnungen nach 7.2. Sowohl in den FE-Berechnungen, als auch in den Versuchen ist die Normalspannung σ_x entlang der Glaskante linear abhängig von der aufgebrachtten Belastung.

In den Versuchsreihen in Scheibenposition 1 konnten mit der 3-teiligen Klotzungs-konstruktion mit Kontaktklötzen aus Aluminium und POM-C GF25 Belastungen von 250 kN schadfrei in die Glaskante eingeleitet werden. Dabei wurde im Glas, an der Glaskante, eine Spannungsauslastung von etwa 90% erreicht. Durch Verschiebung der Glasscheibe in Scheibenposition 2 erhöht sich in FE-Vergleichsrechnungen das Maximum der bemessungsrelevanten Normalspannung an der Glaskante. Durch die Vorversuche in Scheibenposition 2 konnte dies mit den Kontaktklotzmaterialien Aluminium und POM-C GF25 qualitativ bestätigt werden. Hier kam es

bereits bei Belastungen im Bereich zwischen 200 kN und 240 kN zu Brüchen in der Glasscheibe.

An der Klotzung mit POM-C als Kontaktklotzmaterial stellt sich ab etwa 150 kN Belastung ein deutliches Fließen ein. In den Lasthaltephasen sind zudem Kriechverformungen erkennbar.

8.3 Last-Verformungs-Verhalten einer 3-teiligen Klotzung

8.3.1 Grundlagen

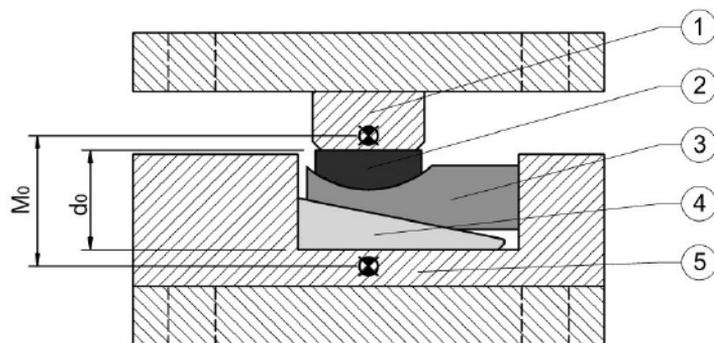
Bei den Versuchen nach 8.2 zeigte sich, dass die Steifigkeit der 3-teiligen Klotzungsstruktur aus den aufgezeichneten Verformungswerten nicht exakt ermittelt werden kann. Für die 3-teilige Klotzung sind daher Belastungsversuche mit Verformungsmessung direkt an der Klotzung erforderlich. Zusätzlich zu den bereits in 8.2 untersuchten Kontaktklotzmaterialien Aluminium F28 und POM-C GF25 wurden in dieser Versuchsreihe Versuche mit Kontaktklotzen aus PET, PEI und PEEK durchgeführt

8.3.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem oberen Druckstempel aus Stahl, der die Kontur einer 19 mm dicken Glasscheibe mit 1,5 mm Fase besitzt und einem unteren Druckstempel aus Stahl in den die 3-teilige Klotzung gelagert ist. Die 3-teilige Klotzung hat eine Länge von 20 mm und im eingebauten Zustand eine Höhe 16,4 mm. Die Verformungsmessung erfolgt berührungslos über Messmarken und Videoextensiomter an den Stirnseiten der Druckstempel.

Bild 174

- Versuchsaufbau mit Druckstempeln aus Stahl
 d_0 Ausgangsdicke Klotzung
 M_0 Ausgangslänge Messmarken
- 1 oberer Druckstempel (Stahl)
 - 2 Kontaktklotz (Alu/Kunststoff)
 - 3 Lagerschale (Alu)
 - 4 Keil (Alu)
 - 5 unterer Druckstempel (Stahl)



8.3.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden als weggesteuerte Versuche mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/Minute bis zu einer Belastung von 49 kN¹⁸³ bzw. einer Stauchung > 6% durchgeführt. Die Verformungsmessung erfolgte berührungslos über ein Videoextensiometer und an den Druckstempeln aufgebrachte Messmarken. Mit Kontaktklötzen aus Kunststoffen wurden je Material fünf Einzelversuche und mit Kontaktklötzen aus Aluminium drei Einzelversuche durchgeführt.

8.3.4 Versuchsergebnisse

Berechnete ideale Druckspannungen beziehen sich auf die Querschnittsfläche des Kontaktklotzes in Krafrichtung von planmäßig 18 mm x 20 mm = 360 mm².

Berechnete ideale Dehnungen/Stauchungen beziehen sich auf die jeweilige Anfangsdicke der gesamten 3-teiligen Klotzung mit Werten im Bereich von 16,4 mm bis 16,7 mm.

Innerhalb der Versuchsserien mit Kontaktklötzen aus den Kunststoffen wurden nur geringe Streuungen der im Stauchung-Druckspannung-Verhalten festgestellt. Für den Vergleich wurde aus jeder Serie der Mittelwert aus fünf Einzelmessungen gebildet. Bild 175 zeigt dieses Vorgehen für eine Serie mit Kontaktklötzen aus POM-C GF25.

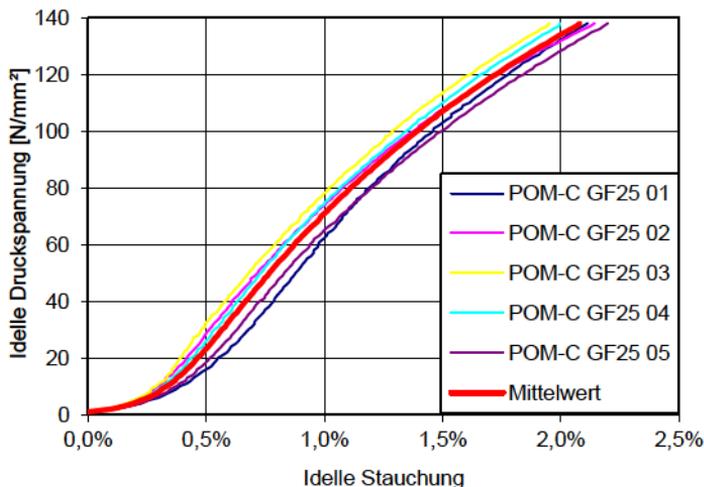
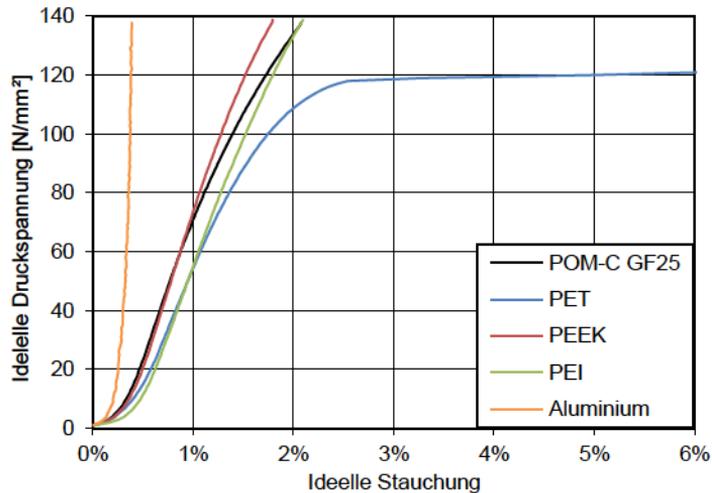


Bild 175
Druckspannung-Stauchung-Verhalten der 3-teiligen Klotzung mit Kontaktklotz aus POM-C GF25

¹⁸³ Maximallast der verwendeten Prüfmaschine.

Bild 176
Druckspannung-Stauchung-
Verhalten der 3-teiligen
Klotzung, Mittelwertkurven



In Bild 176 sind die Mittelwertkurven der ideellen Stauchung-Druckspannung-Verläufe der untersuchten 3-teiligen Klotzungen mit den unterschiedlichen Kontaktklotzmaterialien gegenübergestellt. Alle Klotzungen sind bis zu einer Druckspannung von etwa 20 N/mm² durch eine deutliche Steifigkeitszunahme gekennzeichnet. Dieser Steifigkeitsverlauf wurde auch schon bei den Versuchen nach 8.2 festgestellt und wird auf Maßtoleranzen in den Kontaktflächen der Klotzung zurückgeführt. Bei Aufbringen einer Druckkraft werden zunächst kleine Spalte überdrückt, bis alle Bauteile vollflächig aufeinanderliegen. Bei der Klotzung mit einem Kontaktklotz aus Aluminium setzt sich der nichtlineare Kurvenverlauf bis zu hohen Druckspannungen von 140 N/mm² fort. Im Bereich von etwa 60 N/mm² Druckspannung entspricht der Kurvenanstieg etwa dem Elastizitätsmodul von Aluminium. Die weitere Steifigkeitszunahme bei Druckspannungen oberhalb 60 N/mm² wird auf Querdehnungsbehinderung durch die Druckstempel und die höhere tatsächliche Querschnittsfläche im Bereich der Lagerschale und des Keils zurückgeführt. Für die untersuchten Klotzungen mit Kontaktklötzen aus Kunststoff kann im Druckspannungsbereich von 20 N/mm² bis 60 N/mm² ein annähernd konstanter Steifigkeitsverlauf festgehalten werden. Oberhalb einer Druckspannung von 60 N/mm² sinkt die Steifigkeit bei Klotzungen mit Kontaktklötzen aus PEI und PEEK nur leicht, bei POM-C GF25 etwas stärker ab. Bei PEI wird bei etwa 120 N/mm² Druckspannung eine Fließgrenze erreicht, bei der keine Laststeigerung mehr möglich ist.

In Tafel 41 sind für die untersuchten Klotzungen die Gesamtsteifigkeiten in Form eines ideellen Elastizitätsmoduls¹⁸⁴ der gesamten 3-teiligen Klotzung für Druckspannungen von 10 N/mm² bis 130 N/mm² angegeben. Diese Werte entsprechen bei der jeweiligen ideellen Druckspannung den Tangentenmodulen der Kurven nach Bild 176.

Druckspannung	Ideeller Elastizitätsmodul [N/mm ²]				
	Aluminium F28	POM-C GF25	PET	PEEK	PEI
10 N/mm ²	12253	5334	4348	5521	5725
20 N/mm ²	24418	8586	6645	10239	8914
30 N/mm ²	36679	8586	8096	10625	8914
40 N/mm ²	49310	9644	7656	11263	9780
50 N/mm ²	61187	10667	7914	13735	9918
60 N/mm ²	73624	12352	8096	9545	10060
80 N/mm ²	98377	8382	6839	9386	9028
100 N/mm ²	122834	6835	3892	8939	7572
120 N/mm ²	146889	4993	72	7410	6643
130 N/mm ²	159154	4663	-	7821	5868

Tafel 41
Ideelle Elastizitätsmodulie
der 3-teiligen Klotzung

Für alle Klotzungen mit Kontaktklötzen aus Kunststoff wird im Druckspannungsbereich von 50 N/mm² bis 60 N/mm² ein Steifigkeitsmaximum erreicht. Die Steifigkeitsverluste bei Druckspannungen oberhalb von 60 N/mm² deuten auf die Zunahme viskoser und viskoelastischer Effekte hin. Für alle vier untersuchten Klotzungen mit Kontaktklötzen aus Kunststoffen ist daher die Festlegung einer maximal ausnutzbaren Druckspannung von 60 N/mm² sinnvoll.

In einer weiteren Prüfserie wurde mit dem Versuchsaufbau und den Klotzungen mit Kontaktklotzmaterialien aus Kunststoff an je einem Prüfkörper ein Test mit zyklischer Belastung durchgeführt. Nach Aufbringen einer Druckspannung von 25 N/mm² wurde in einem Zyklus von 60 Sekunden die Druckspannung auf 50 N/mm² gesteigert und wieder auf 25 N/mm² gesenkt. Dieser Zyklus wurde 30-mal wiederholt und dabei die Stauchung der Klotzung aufgezeichnet.

¹⁸⁴ Bezogen auf die Querschnittsfläche des Kontaktklotzes (18 mm x 20 mm) und die Gesamtdicke der 3-teiligen Klotzung.

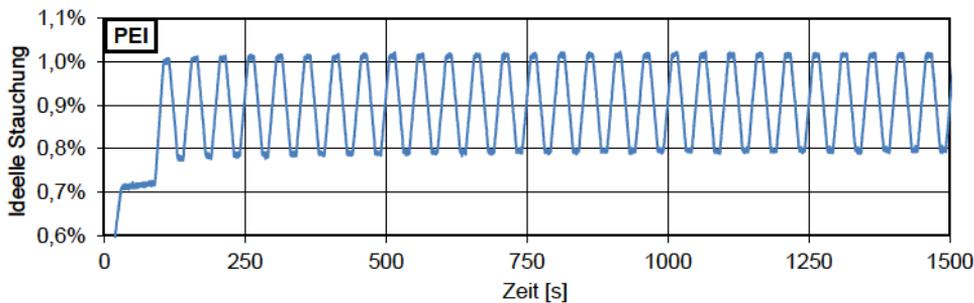
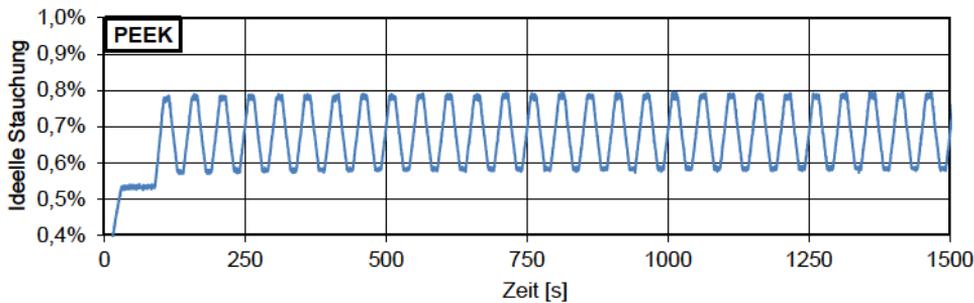
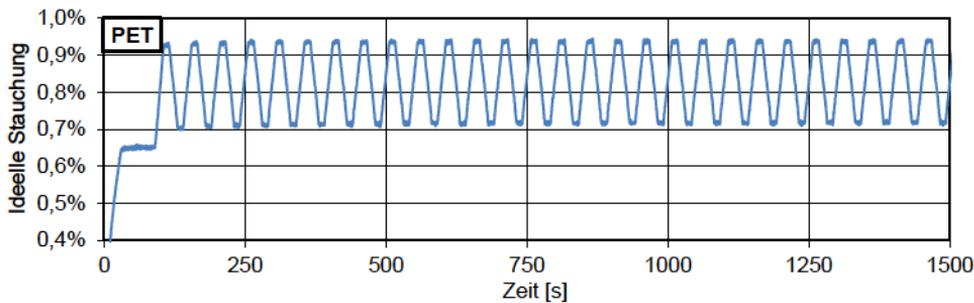
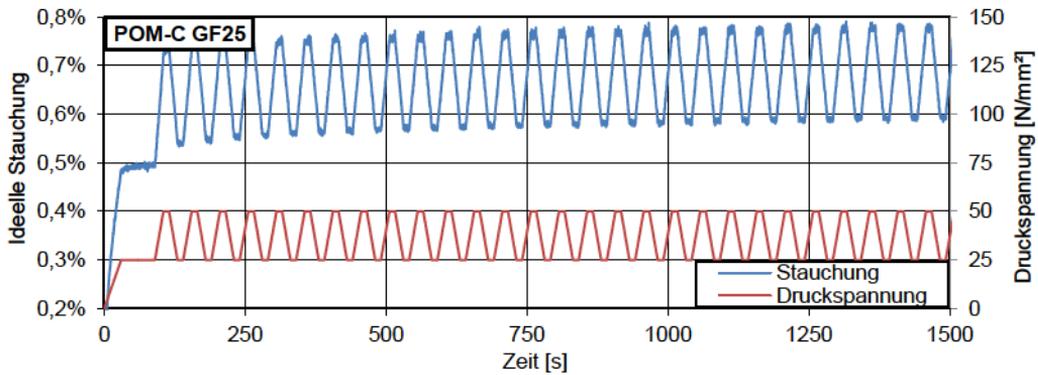


Bild 177
Zeit-Stauchung-Kurven
zyklischer Belastungstest

Aus dem Kurvenverlauf der Klotzung mit einem Kontaktklotz aus POM-C GF25 sind deutlich Effekte infolge viskoser Stauchungen ablesbar. In jedem Zyklus steigt die Stauchung nach Entlastung auf 25 N/mm² gegenüber dem vorherigen Zyklus geringfügig an. Zwischen Zweitem und 30. Zyklus

ergibt sich ein Anstieg der Stauchung bei einer Druckspannung von 25 N/mm^2 um etwa $0,05\%$. Bei den Klotzungen mit Kontaktklötzen aus PET, PEEK und PEI sind viskose Stauchungen weniger ausgeprägt. Nach etwa drei bis fünf Zyklen sind bei diesen Klotzungen praktisch keine Effekte infolge viskoser Stauchungen mehr ablesbar. Allen Klotzungen gemein ist eine Stauchungszunahme nach dem ersten Zyklus von jeweils $0,05\%$. Der Effekt ist unabhängig vom verwendeten Klotzungsmaterial und wird auf Schlupf bzw. Setzungen der Klotzung bei erstmaliger hoher Belastung zurückgeführt. Die Amplituden der Zeit-Stauchungskurven für die Zyklen zwei bis 30 weisen bei allen vier Klotzungen konstante Werte auf. Steifigkeitsveränderungen infolge der zyklischen Be- und Entlastung sind bei den vier untersuchten Klotzungen nur zwischen erstem und zweitem Zyklus feststellbar. Ab dem zweiten Zyklus sind die Tangentenmodule der Druckspannung-Stauchung-Beziehung in jedem Zyklus konstant.

9 Ergebnisse und Bewertung

Anhand der Substanzuntersuchungen konnte aus den zehn ausgewählten Kunststoffen ein hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften als Klotzungsmaterial besonders geeignetes Material bestimmt werden. Der Kunststoff PEI vereint mit sehr hoher kurz- und langzeit Druckfestigkeit, niedriger Kriechneigung und geringer Temperaturabhängigkeit die für ein Klotzungsmaterial wichtigen und erforderlichen Eigenschaften. Das annähernd linear elastische Spannungs-Dehnungs-Verhalten von PEI vereinfacht die Berechnung und Bemessung von Klotzungsstrukturen gegenüber einem Material mit nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verhalten dahingehend, dass auch konventionelle vereinfachte Berechnungsansätze möglich sind. Ähnlich gute Eigenschaften wurden nur für den Hochleistungskunststoff PEEK bestimmt, dessen wirtschaftlicher Einsatz aufgrund des sehr hohen Materialpreises aber unwahrscheinlich ist. Im Maschinen- und Bauwesen häufig zur Anwendung kommende Kunststoffe wie POM oder Polyamide haben vor allem wegen der hohen Kriechneigung für den Einsatz als Klotzungsmaterial nicht überzeugen können.

Mit den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konstruktionen zur Klotzung von VSG-Scheiben werden Systeme vorgestellt, bei denen durch konstruktive Maßnahmen ein optimaler Kontakt zwischen Glas und Klotzung aus bei VSG-Scheiben mit schiefen Kanten, Kantenversatz und bei nachträglicher Lageänderung der Glaskanten sichergestellt ist. Diese konstruktiven Maßnahmen gehen natürlich mit einer gewissen Bauhöhe der Klotzungsstruktur einher. Zur Minimierung von Fugendicken zwischen Glaskanten sind dann im Gegenzug gegebenenfalls eine besondere Formgebung der Glaskante¹⁸⁵ erforderlich

Mit Hilfe von FE-Berechnungen wurden Parameter bestimmt, die maßgeblich das Verformungsverhalten der Klotzung und die Spannungsverteilung in der Glasscheibe beeinflussen. Der Querdehnung des Klotzungsmaterials und dem Reibungskoeffizienten zwischen Klotzungsmaterial und Glas kommt hier eine hohe Bedeutung zu. Die exakte Kenntnis dieser Materialkennwerte und ein geeignetes FE-

¹⁸⁵ Ausklinkung in der Glaskante, wie am Beispiel des Glasdaches des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais praktiziert.

Modell sind Grundlage einer realitätsnahen Berechnung und Bemessung von Klotzung und Verglasung. Bei der FE-Modellierung sollten die Glaskante, der Konatktklotz und die Kontaktfläche zwischen beiden ein engmaschiges Elementnetz aufweisen. In der Kontaktfläche zwischen Klotzung und Glaskante ist im FE-Modell zwingend als Reibfläche mit realistischen Reibkoeffizienten zu definieren, um Einflüsse aus Querdehnung des Kontaktklotzes auf die Spannungsverteilung im Glas zu erfassen. Für die Bemessung empfiehlt sich eine getrennte Betrachtung des lokalen Lasteinleitungsproblems in die Glaskante und dem Gesamttragverhalten der Glasscheibe.

Durch die Belastungsversuche an kleinformatischen Gläsern mit Klotzungen und an einzelnen Klotzungen konnten mit solchen Konstruktionen übertragbare Kräfte und das Verformungsverhalten der Klotzungen bestimmt werden. Anhand der Klotzung für das Glasdach des ehemaligen Reichstagspräsidentenpalais wurden im Versuch Lasten von 250 kN über Klotzungen durch eine Glasscheibe durchgeführt. Die Ergebnisse der Dehnungsmessungen und paralleler FE-Simulation lassen auf eine maximal erreichbare Last von etwa 300 kN schließen. Ausgehend von im Glasbau üblichen Sicherheiten¹⁸⁶ sind Klotzungslasten von etwa 100 kN für diese spezielle Klotzungs konstruktion¹⁸⁷ eine realistisch umsetzbare Größe.

¹⁸⁶ Globaler Sicherheitsfaktor von 2,4 bis 3,0 (TRLV)

¹⁸⁷ Ggf. ist wegen Kriechneigung PEI als Kontaktklotzmaterial erforderlich.

10 Ausblick

Um die Eignung von PEI oder eines anderen Kunststoffes für den Einsatz im konstruktiven Glasbau, hier im Speziellen als Klotzungsmaterial, abschließend bewerten zu können sind noch Untersuchungen zur Materialverträglichkeit und zum Alterungsverhalten erforderlich. Durch die Untersuchungen zur Materialverträglichkeit muss sichergestellt werden, dass der Kunststoff mit anderen bei Verglasungen verwendeten Materialien¹⁸⁸ verträglich ist. Durch Materialunverträglichkeiten kann es in allen Kunststoffen zu unerwarteten Änderungen der Materialeigenschaften oder zu irreparablen Schädigungen führen. Hinsichtlich der Alterung wird PEI eine sehr gute UV-Stabilität zugesprochen. Aussagen zu Reinigungs- und Spülmittelresistenz liegen aber nicht vor.

Das Kriechverhalten von PEI wurde für die Temperaturen von +23°C und +50°C in Druckspannungsstufen bis 70 N/mm² untersucht. Aus den Ergebnissen konnte für die beiden Temperaturen kein signifikanter Unterschied im Kriechverhalten festgestellt werden. Diese Eigenschaft wäre sehr positiv, müsste aber durch weitere Messreihen bestätigt werden, gegebenenfalls auch unter Erweiterung des Temperaturbereiches. Das Kriechverhalten wurde an Substanzproben von PEI mit schlankem Querschnitt ermittelt. Flache, gedrungene Querschnitte mit hoher Querdehnungsbehinderung werden noch geringer Kriechdehnungen aufweisen. Das exakte Kriechverhalten einer Klotzung kann daher nur an maßstäblichen Proben bestimmt werden. Dazu notwendige Versuchsvorrichtungen bedürfen aufgrund der hohen erforderlichen Lasten einer aufwendigen Belastungstechnik und wegen der geringen Verformungen einer sehr exakten und hochauflösenden Dehnungsmessung.

Druckfestigkeit und Kriechverhalten von PEI sind sehr gut. Auch das annähernd linear-elastische Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist sehr positiv. Hinsichtlich der Steifigkeit von PEI gibt es noch Verbesserungspotenzial. Insofern durch Füll- oder Zugabestoffe wie Glaskugeln oder Glasfasern die Steifigkeit erhöht werden könnte, wäre dies hinsichtlich der Stauchung der Klotzung zu begrüßen.

¹⁸⁸ PVB- oder EVA-Folien von VSG, Butyl-,Silikon- oder EDPM-Dichtungen von Isolierverglasungen.

11 Literatur

11.1 Fachbücher und Fachaufsätze

- Achilles 2003 Achilles, Andreas, Barun, Jürgen, Seger, Peter, Stark, Thomas, Volz, Tina: Glasklar. München: Deutsche Verlagsanstalt, 2003.
- Bünemann 1997 Bünemann, Bertram: Umbau der Lindener Volksbank in Hannover. In: Glas – Architektur und Technik, Heft 1/1997 Seite 19 - 24.
- Domininghaus 2005 Domininghaus, Hans, Eyere, Peter, Elsner, Peter, Hirth, Thomas: Kunststoffe und ihre Eigenschaften. Berlin: Springer, 2005.
- Englhardt 2006 Englhardt, O.; Bergmeister, K.: Flächentragwerke aus Glas - Tragverhalten und Stabilität. In: VDI-Berichte Nr. 1933, 2006, Seite 319 - 324.
- Erhard 2008 Erhard, Gunter: Konstruieren mit Kunststoffen. München: Hanser, 2008.
- Ehrenstein 1981 Ehrenstein, Gottfried W: Glasfaserverstärkte Kunststoffe. Grafenau: expert Verlag, 1981.
- Ehrenstein 1999 Ehrenstein, Gottfried W: Polymer-Werkstoffe. München Wien: Hanser, 1999.
- Ehrenstein 2003 Ehrenstein, Gottfried W.; Riedel, Gabriela; Trawiel, Pia: Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen, 2. Auflage. München: Hanser 2003.
- Ehrenstein 2007a Ehrenstein, Gottfried W: Beständigkeit von Kunststoffen, Band 1. München Wien: Hanser, 2007.
- Ehrenstein 2007b Ehrenstein, Gottfried W: Beständigkeit von Kunststoffen, Band 2. München Wien: Hanser, 2007.
- Feldmann 2012 Feldmann, Markus; Kasper, Ruth; Langosch, Katharina: Glas für tragende Bauteile. Köln: Werner Verlag, 2012.
- Fischer 1999 Fischer, Klaus: Sphärische Glasstruktur. In: Glas – Architektur und Technik, Heft 3/1999, Seite 19-21.
- Flemming 2003 Flemming, Manfred; Roth, Siegfried: Faserverbundbauweisen - Eigenschaften. Berlin Heidelberg: Springer, 2003.
- Freitag 2011 Freitag, Claudia; Wörner, Johann-Dietrich: Verwendung von Glas zur Aussteifung von Gebäuden. In: Stahlbau Spezial 2011, Seite 45 - 51.
- Gahr 1999 Gahr, Peter: Glaskuppel im Weltbild Verlag in Augsburg, Heft 3/1999, Seite 39 - 40.
- Gausepohl 1996 Gausepohl, Hermann; Bender, Dietmar: Kunststoff-Handbuch – 4: Polystyrol. München: Hanser, 1996.
- Gebhardt 2009 Gebhardt, Christoph: Konstruktionsbegleitende Berechnung mit ANSYS DesignSpace – FEM-Simulation für Konstrukteure. München: Hanser, 2009.

- Gebhardt 2011 Gebhardt, Christoph: Praxisbuch – FEM mit ANSYS Workbench – Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. München: Hanser, 2011.
- Grellmann 2011 Grellmann, Wolfgang; Seidler, Sabine: Kunststoffprüfung. München: Hanser, 2011.
- Kaiser 2006 Kaiser, Wolfgang: Kunststoffchemie für Ingenieure. München: Hanser, 2006.
- Kohlmaier 1988 Kohlmaier, Georg; Sartory, Barna von: Das Glashaus – ein Bautypus des 19. Jahrhunderts, 2. Auflage. München: Prestel-Verlag, 1988.
- Koppelkamm 1981 Koppelkamm, Stefan: Gewächshäuser und Wintergärten im neunzehnten Jahrhundert. Stuttgart: Hatje, 1981.
- Laufs 2000 Laufs, Wilfried: Ein Bemessungskonzept zur Festigkeit thermisch vorgespannter Gläser. Dissertation. Aachen: Shaker Verlag, 2000.
- Laufs 2001 Laufs, Wilfried; Mohren, Ruth: Neuartige Stahl-Glas-Konstruktionen mit Tragwirkung in der Scheibenebene. In: Bautechnik 78 (2001), Heft 10, Seite 716 – 723.
- Ludwig 1998 Ludwig, Josef J.; Weiler, Hans-Ulrich: Tragstrukturen aus Glas. Ganzglaskugelkalotte – Weltbildkuppel in Augsburg. In: Stahlbau 67 (1998), Heft 4, Seite 319 - 323.
- Ludwig 2000 Ludwig, Josef J.; Weiler, Hans-Ulrich: Tragstrukturen aus Glas am Beispiel einer Ganzglastonne. In: Bautechnik 77 (2000), Heft 4, Seite 246 - 249.
- Neitzler 2004 Neitzler, Manfred; Mitschang, Peter: Handbuch Verbundwerkstoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. München Wien: Hanser 2004.
- Schittich 1998 Schittich, Christian, Staib, Gerald, Balkow, Dieter, Schuler, Matthias, Sobek, Werner: Glasbauatlas. Basel: Birkhäuser, 1998.
- Schittich 2001 Schittich, Christian: Maximilianmuseum in Augsburg. In: DETAIL Zeitschrift für Architektur + Baudetail Heft 5, Serie 2001, Seite 873 - 875.
- Schürmann 2007 Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2. bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- Schwarz 2007 Schwarz, Otto; Ebeling, Friedrich-Wolfhard: Kunststoffkunde. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2007.
- Siebert 2001 Siebert, Gerald: Entwurf und Bemessung von tragenden Bauteilen aus Glas. Berlin: Ernst & Sohn, 2001.
- Sobek 1999 Sobek, Werner; Kutterer, Mathias: Experimenteller Glasbogen auf der glasstec 98. In: Glas – Architektur und Technik Heft 3/1999, Seite 34 - 38.
- Reich 2010 Reich, Stefan: Raumstabwerke mit lastabtragender Verglasung. Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden, 2010.

Rösler 2008	Rösler, Joachim; Harders, Harald; Bäker, Martin: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
Ullrich 1989	Ullrich, Ruth-Maria: Glas-Eisenarchitektur – Pflanzenhäuser des 19. Jahrhunderts. Worms: Wernersche Verlagsgesellschaft mbH, 1989.
Weller 2009	Weller, Bernhard; Reich, Stefan; Ebert, Jan: Selbsttragende Glasdächer mit lastabtragender Verglasung. In: Stahlbau Spezial 2009, Seite 7 -12.
Weller 2010	Weller, Bernhard; Reich, Stefan; Ebert, Jan: Transparentes Raumstabwerk über dem Innenhof des Berliner Reichstagspräsidentenpalais. In: Stahlbau Spezial 2010, Seite 3 -9.
Wellershof 2006	Wellershof, Frank: Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen. Dissertation Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen, Aachen: Shaker, 2006.
Wellershoff 2008	Wellershoff, Frank: Aussteifung von Gebäudehüllen durch randverklebte Glasscheiben. In: Stahlbau 77 (2008), Heft 1, Seite 5 - 16.
Wellershoff 2008	Wellershoff, Frank: Aussteifung von Gebäudehüllen durch eckgeklotzte Glasscheiben. In: Stahlbau 77 (2008), Heft 8, Seite 555 - 565.
Wellershoff 2011	Wellershoff, Frank; Sendelbach, Michael; Schmidt, Felix: Einstanz von tragenden Glaselementen in Glasbrücken und Glaspavillons. In: Stahlbau Spezial 2011, Seite 13 - 23.
Wurm 2007	Wurm, Jan: Glas als Tragwerk – Entwurf und Konstruktion selbsttragender Hüllen. Berlin: Birkhäuser, 2007.
Wörner 2001	Wörner, Johann-Dietrich, Schneider, Jens, Fink, Andreas: Glasbau – Grundlagen, Berechnung, Konstruktion. Berlin: Springer, 2001.

11.2 Normen und Richtlinien

DIN EN ISO 527-1	DIN EN ISO 527-1, April 1996: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Deutsche Norm. Berlin: Beuth 1996.
DIN EN ISO 527-2	DIN EN ISO 527-2, Juli 1996: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth 1996.
DIN EN ISO 604	DIN EN ISO 604, Dezember 2003: Kunststoffe – Bestimmung von Druckeigenschaften. Deutsche Norm. Berlin: Beuth 2003.
DIN EN ISO 899-1	DIN EN ISO 899-1, Oktober 2003: Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens – Teil 1: Zeitstand Zugversuch (ISO 899.1:2003). Deutsche Norm. Berlin: Beuth 2003.
DIN EN ISO 2818	DIN EN ISO 2818, Juni 1997: Kunststoffe – Herstellung von Prüfkörpern durch mechanische Bearbeitung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth 1997.

DIN EN ISO 6721-1	DIN EN ISO 6721-1, Januar 2003: Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften, Teil 1: Allgemeine Grundlagen. Deutsche Fassung EN ISO 6721-1:2002. Berlin: Beuth, 2003.
DIN EN ISO 12543-5	DIN EN ISO 12543-5, August 1998: Glas im Bauwesen – Verbund- und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 5: Maße und Kantenbearbeitung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1998.
DIN EN ISO 14439	DIN En ISO 14339, November 2007: Glas im Bauwesen - Anforderungen für die Verglasung – Verglasungsklotze. Deutsche Fassung prEN 14339:2007. Berlin: Beuth, 2007.
DIN 1249-11	DIN1249-11, September 1986: Flachglas im Bauwesen – Glaskanten - Begriff, Kantenformen und Ausführung. Deutsche Norm, abgelaufen. Berlin: Beuth, 1986.
DIN 18008-1	DIN 18008-1, März 2006: Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen. Deutsche Norm, Entwurf. Berlin: Beuth, 2006.
DIN EN 1288-2	DIN EN 1288-2, September 2000: Glas im Bauwesen – Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas, Teil 2: Doppelringbiegeversuch an plattenförmigen Proben mit großen Prüfflächen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000.
DIN EN 1288-3	DIN EN 1288-3, September 2000: Glas im Bauwesen – Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas, Teil 2: Prüfung von Proben bei zweiseitiger Auflagerung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000.
DIN EN 1288-5	DIN EN 1288-5, September 2000: Glas im Bauwesen – Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas, Teil 2: Doppelringbiegeversuch an plattenförmigen Proben mit kleinen Prüfflächen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000.
BRL 2010	Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C – Ausgabe 2010/1 – In: DIBt Mitteilungen Sonderheft 39. Berlin: Ernst und Sohn, 2010.
TR Glas 3	Technische Richtlinie des Glashandwerks Nr. 3, 2003: Klotzung von Verglasungseinheiten. Hadamar: Bundesinnungsverband des Glashandwerks, 2003.
TRLV 2006	Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV). In: DIBt Mitteilungen 03/2007, Berlin: Ernst und Sohn, 2007

11.3 Zulassungen und Gutachten

Z-21.3-1830	Deutsches Institut für Bautechnik. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-21.3-1830: Hilti Injektionsankersystem HIT-HY 70 zur Verankerung im Mauerwerk. Berlin, 2009
Z-70.2-19	Deutsches Institut für Bautechnik. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-70.2-19: Punktförmig gelagerte Vertikalverglasung LITE-WALL-Mono. Berlin, 2009
Bucak 2007	Bucak, Ömar: Gutachterliche Stellungnahme für die Verwendbarkeit von Hilti Hit®-HY70 im Glasbau. Weingarten, 2007.

11.4 Produktdatenblätter

Delo 4468	DELO Industrie Klebstoffe: Technische Information DELO-PHOTOBOND® 4468. Landsberg 2005.
Roto Gluske 2011	Roto Gluske GmbH: Die Klotzfibel – Grundlagen für eine fachgerechte Verglasung. Wuppertal, 2011.
Lichharz Gleitlager	Lichharz GmbH: Gleitlager aus Kunststoff. Buchholz.

12 Abbildungsnachweis

Bild 3	Bünemann 1997, Seite 22
Bild 4	Gahr 1999, Seite 39.
Bild 5	Gahr 1999, Seite 40.
Bild 6	Ludwig 1998, Seite 320.
Bild 7	Schittich 2001, Seite 873.
Bild 8	Google Earth, Version 6.2.2.6613
Bild 9	Google Earth, Version 6.2.2.6613
Bild 10	Brenne Architekten Berlin.
Bild 23	Institut für Baukonstruktion
Bild 24	Institut für Baukonstruktion
Bild 34	Institut für Baukonstruktion
Bild 35	TR Glas 3 Seite 21.
Bild 36	Wörner 2001, Seite 11.
Bild 37	Wörner 2011, Seite 11.
Bild 44	Schwarz 2007, Seite 27.
Bild 45	Schwarz 2007, Seite 27.
Bild 46	Kaiser 2008, Seite 135.
Bild 47	Kaiser 2008, Seite 150.
Bild 48	Erhard 2008, Seite 256.
Bild 49	Erhard 2008, Seite 258.
Bild 72	Grellmann 2011, Seite 140.
Bild 82	Rösler 2008, Seite 264.
Bild 83	Ehrenstein 1999, Seite 160.
Bild 84	Ehrenstein 1999, Seite 161.
Bild 104	Ehrenstein 2003, Seite 255.
Bild 105	Ehrenstein 2003, Seite 259.
Bild 106	Ehrenstein 199, Seite 174.

Die übrigen Bilder stammen aus dem Archiv des Autors.

13 Bezeichnungen

13.1 Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

A	Fläche
e_c	maximale nominelle Stauchung
E_d	Bemessungswert der Einwirkung nach DIN 1055-100
E_{rel}	Relaxationsparameter/ -modul
E' (M')	Speichermodul
E'' (M'')	Verlustmodul
F	Kraft
f_k	charakteristischer Wert der Biegezugfestigkeit
K_c	Beiwert zur Berücksichtigung der Art der Konstruktion
K_{mod}	Lastfaktor für die Berücksichtigung der Einwirkungsdauer
l	Länge in Druckkrafttrichtung
L_0	Ausgangslänge Prüfkörper
L_m	Messlänge
L_{m0}	Ausgangslänge zwischen Messmarken
R_d	Bemessungswert des Tragwiderstandes
S1	Hauptzugspannung
Sx	Normalspannung in globaler x-Achse
Sy	Normalspannung in globaler y-Achse
Sz	Normalspannung in globaler z-Achse
u	Verformung
t	Zeit
x	Außendurchmesser des Zylinders oder Rohrs, Dicke

Griechische Buchstaben

γ_m	Materialsicherheitsbeiwert
δ	Phasenwinkel
$\tan \delta$	Verlustfaktor
ϵ	Längsdehnung
ϵ_b	Querdehnung
ϵ_{el}	elastische Dehnung
ϵ_{ges}	Gesamtdehnung
ϵ_{rel}	relaxierende/viskoelastische Dehnung
ϵ_t	zeitabhängige Dehnung des Modells nach Findley
ϵ_v	viskose Dehnung
ϵ_0	elastische Dehnung
η_0	Dämpfungsparameter viskos
η_{rel}	Dämpfungsparameter relaxierend/viskoelastisch
μ	Reibbeiwert
σ	Spannung
σ_0	Anfangsspannung (Spannung bezogen auf Ausgangsquerschnitt)
ν	Querdehnzahl/Poissonzahl

13.2 Abkürzungen

ESG	Einscheiben-Sicherheitsglas
TVG	Teilvorgespanntes Glas
PVB	Polyvinyl-Butyral
VSG	Verbund-Sicherheitsglas
abZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
POM	Polyacetal
POM-C	Polyacetal-Copolymer
POM-C GF25	Polyacetal-Copolymer mit 25% Glasfaseranteil
PET	Polyethylenterephthalat
PEEK	Polyetheretherketon
PEEK GF30	Polyetheretherketon mit 30% Glasfaseranteil
PEI	Polyetherimid
PA6	Polyamid 6
PA6 GF30	Polyamid 6 mit 30% Glasfaseranteil
PA66	Polyamid 66
PA66 GF30	Polyamid 66 mit 30% Glasfaseranteil

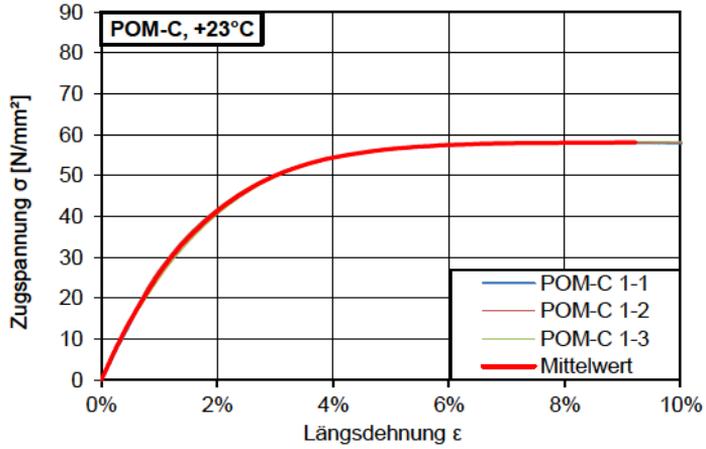
Anlage 1

Ergebnisse der Materialuntersuchungen an Kunststoffen bei uniaxialer Zugkraftbeanspruchung

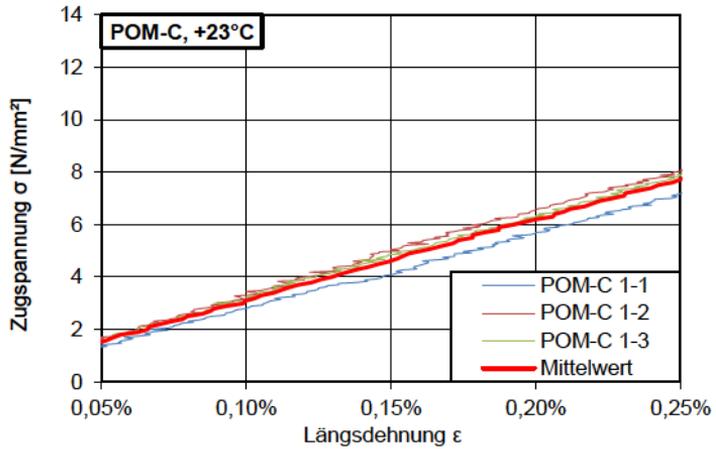
POM-C, +23°C	240
POM-C, +50°C	242
POM-C, Temperaturvergleich	244
POM-C GF25, -20°C	245
POM-C GF25, +23°C	247
POM-C GF25, +50°C	249
POM-C GF25, Temperaturvergleich	251
PET, -20°C	252
PET, +23°C	253
PET, +50°C	255
PET, Temperaturvergleich	257
PEEK, +23°C	258
PEEK, +50°C	260
PEEK, Temperaturvergleich	262
PEEK GF30, -20°C	263
PEEK GF30, +23°C	264
PEEK GF30, +50°C	266
PEEK GF30, Temperaturvergleich	268
PEI, -20°C	269
PEI, +23°C	271
PEI, +50°C	273
PEI, Temperaturvergleich	275
PA6, +23°C	276
PA6, +50°C	278
PA6, Temperaturvergleich	280
PA6 GF30, +23°C	281
PA6 GF30, +50°C	283
PA6 GF30, Temperaturvergleich	285
PA66, +23°C	286
PA66, +50°C	288
PA66, Temperaturvergleich	290
PA66 GF30, +23°C	291
PA66 GF30, +50°C	293
PA66 GF30, Temperaturvergleich	295

POM-C, +23°C

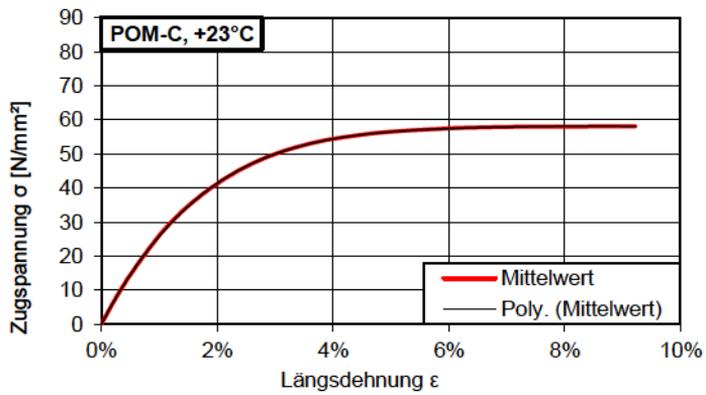
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C, +23°C



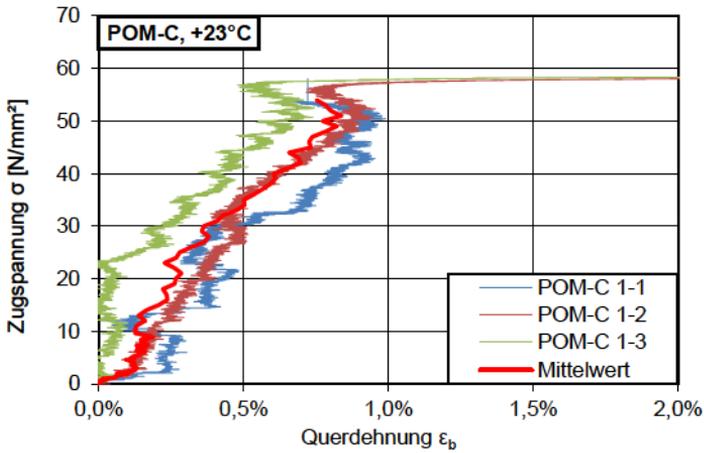
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



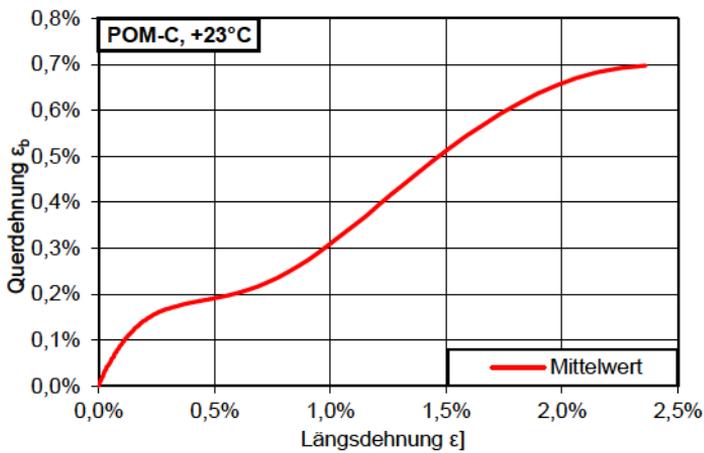
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion



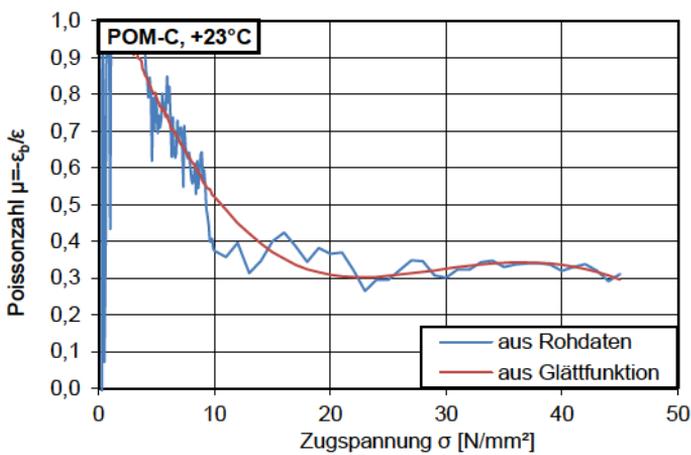
$$y = 11431851,6x^5 - 5082827,3x^4 + 877428,3x^3 - 75162,5x^2 + 3258,9x$$



Querdehnung-Zugspannung-Diagramm
POM-C, +23°C



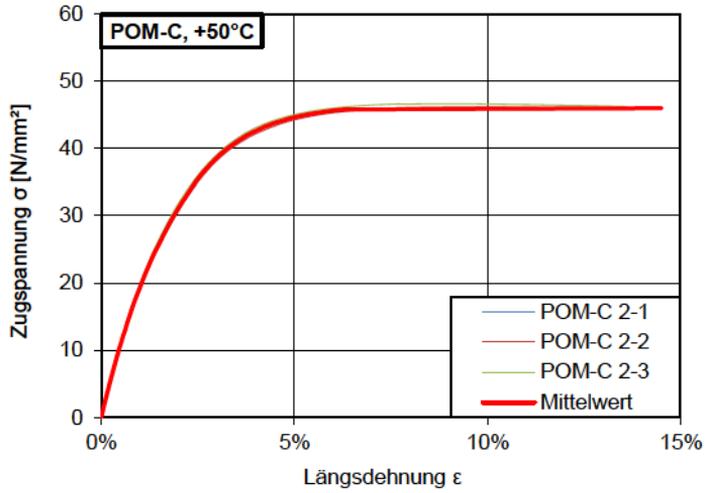
Längsdehnung-Querdehnung-Diagramm
POM-C, +23°C



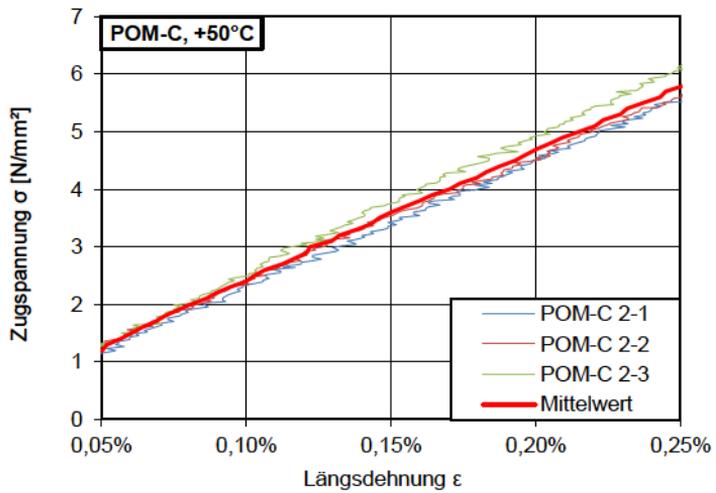
Zugspannung-Poissonszahl-Diagramm
POM-C, +23°C

POM-C, +50°C

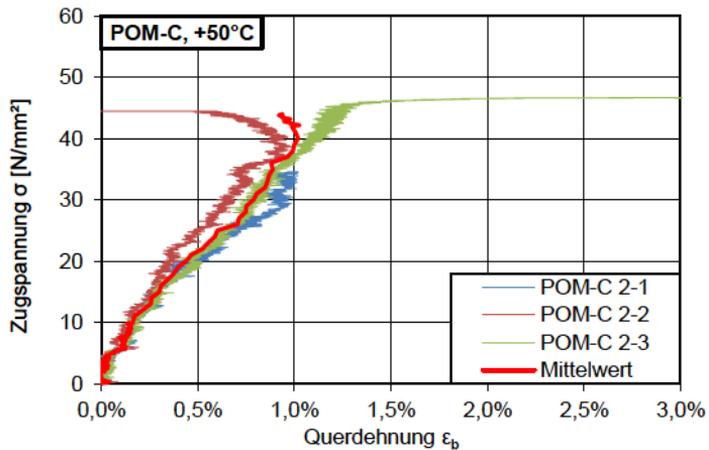
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C, +50°C

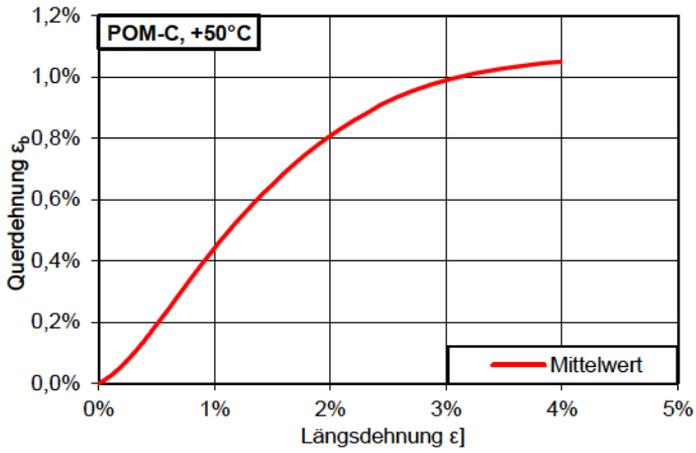


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

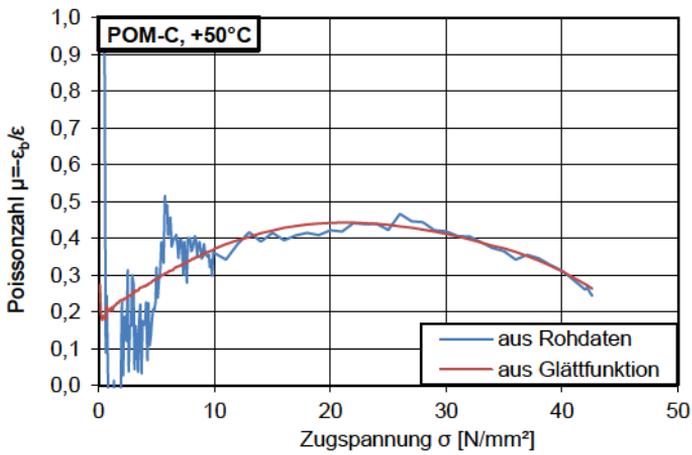


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C, +50°C





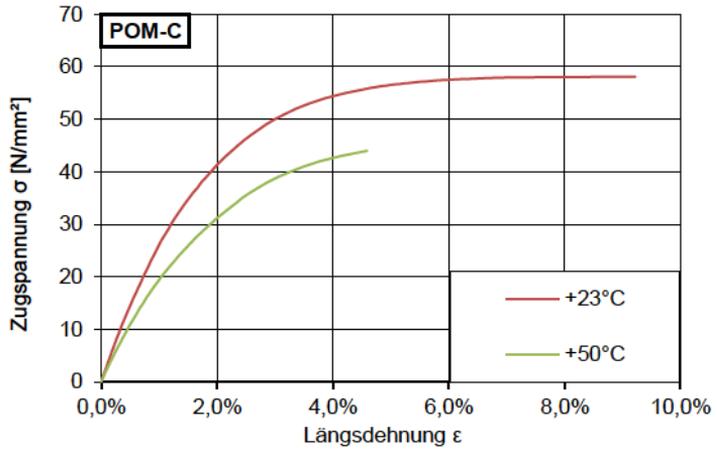
Längsdehnung-Querdehnung-Diagramm
POM-C, +50°C



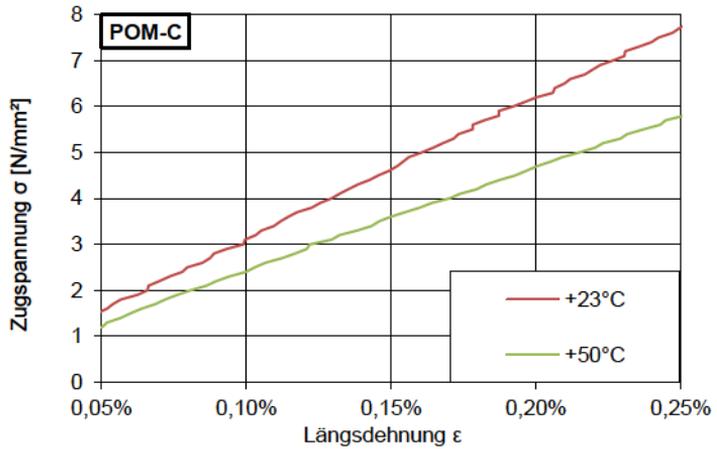
Zugspannung-Poissonszahl-Diagramm
POM-C, +50°C

POM-C, Temperaturvergleich

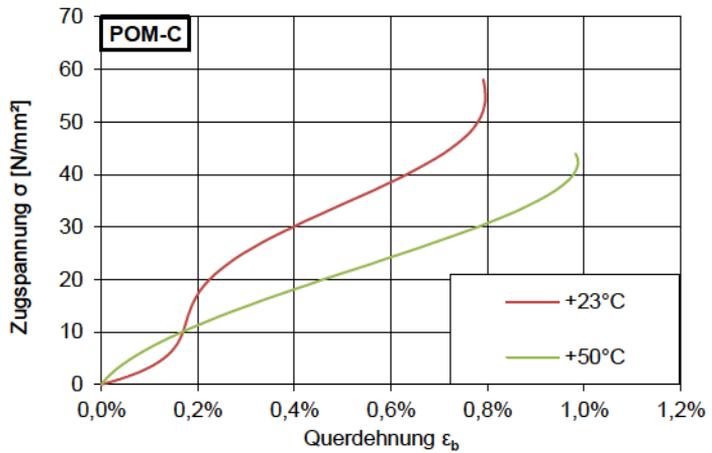
Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
POM-C



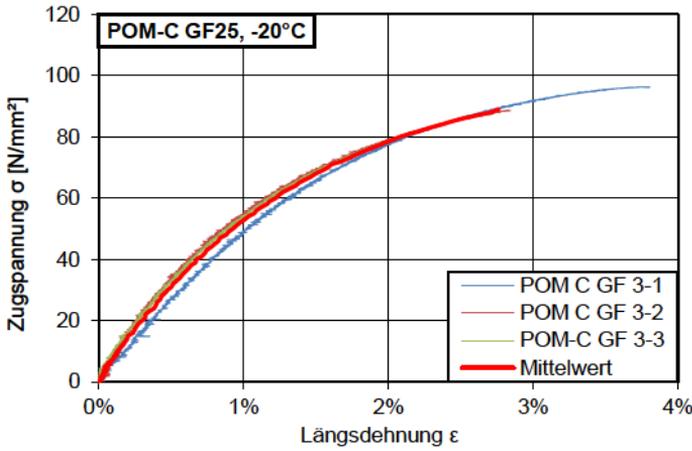
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



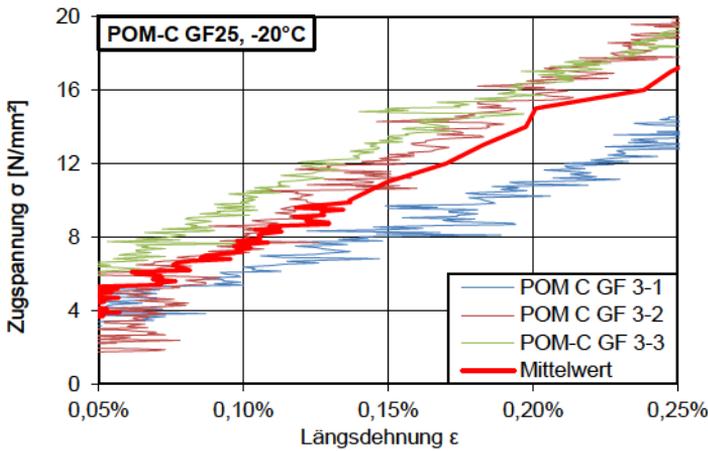
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C



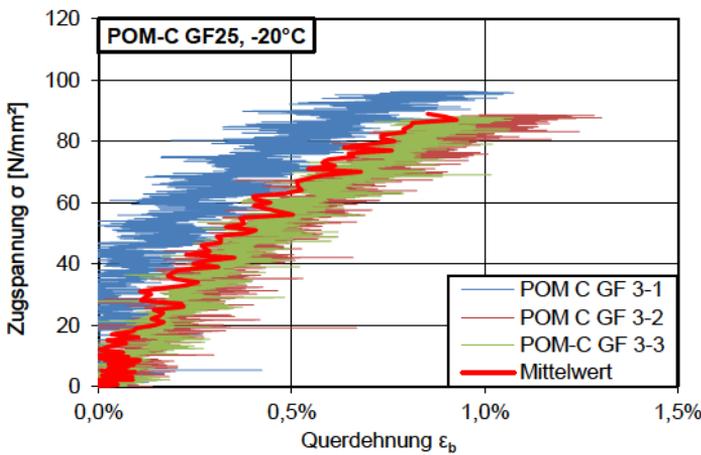
POM-C GF25, -20°C



Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
POM-C GF25, -20°C

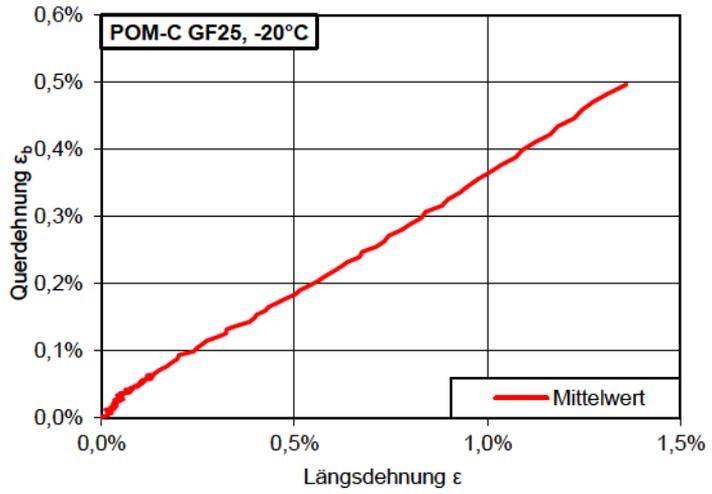


Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
POM-C GF25, -20°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

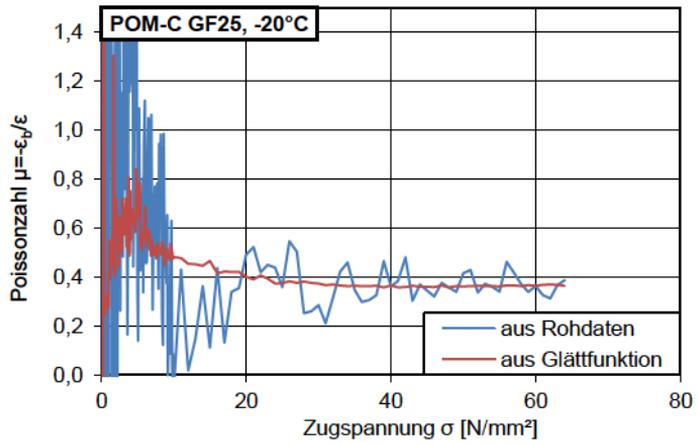


Querdehnung-
Zugspannung-Diagramm
POM-C GF25, -20°C

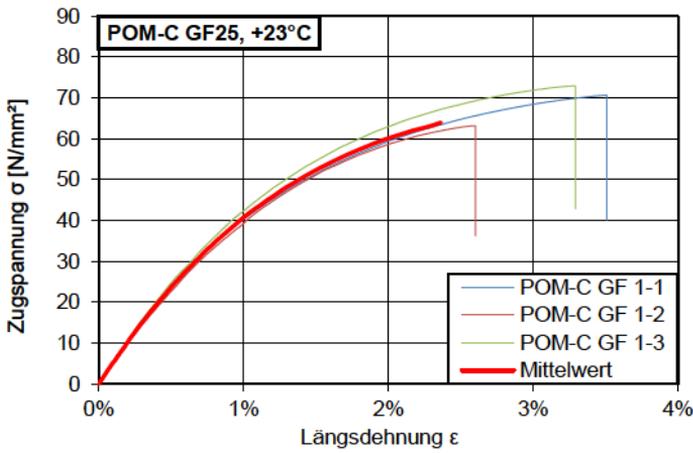
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
POM-C GF25, -20°C



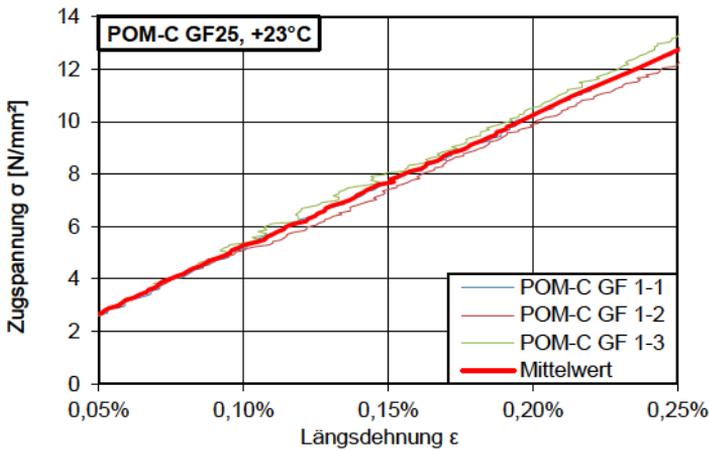
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
POM-C GF25, -20°C



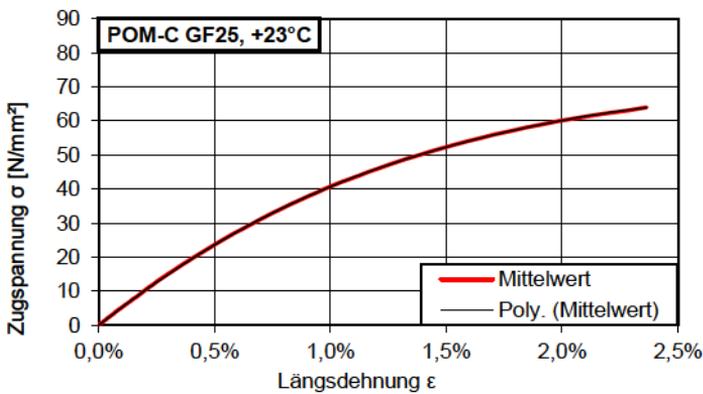
POM-C GF25, +23°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25, +23°C



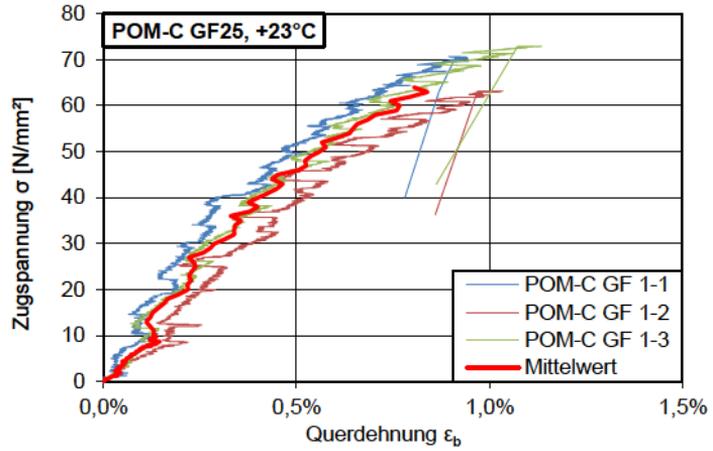
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



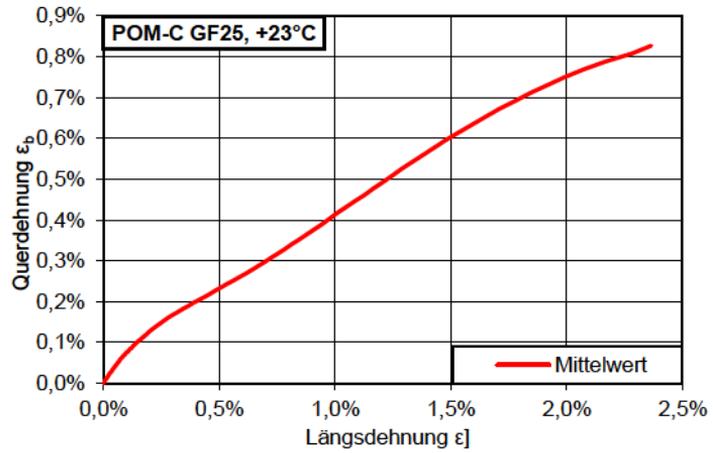
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion

$$y = -4151413568,1x^5 + 246770802,8x^4 - 3402876,8x^3 - 114681,9x^2 + 5350,1x$$

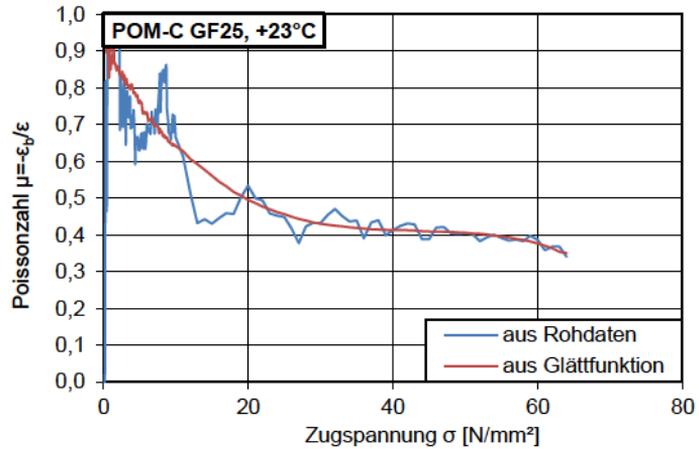
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25, +23°C



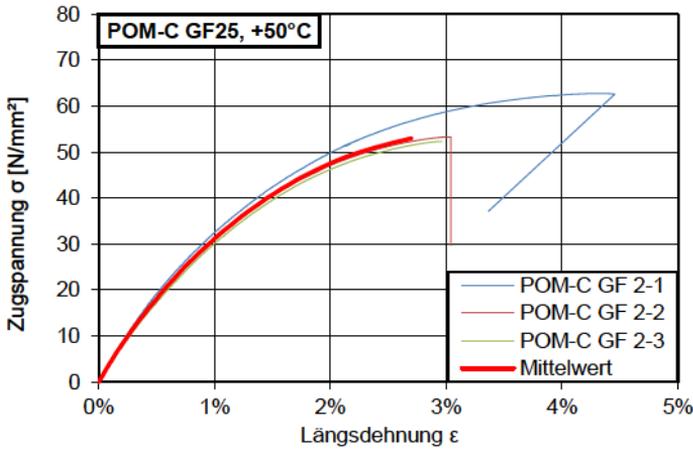
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
POM-C GF25, +23°C



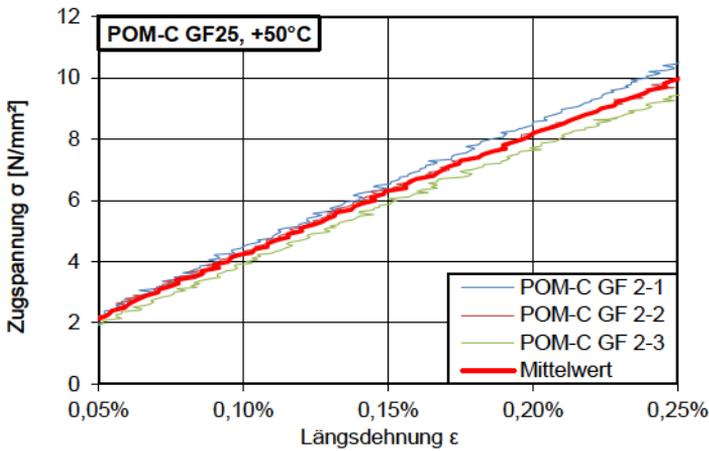
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
POM-C GF25, +23°C



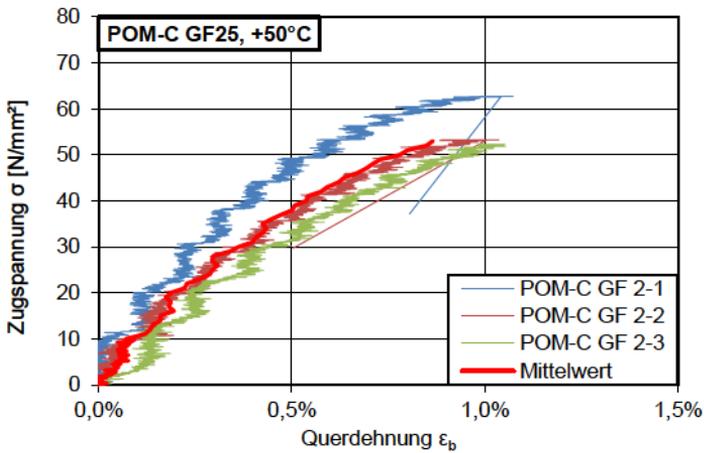
POM-C GF25, +50°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25, +50°C

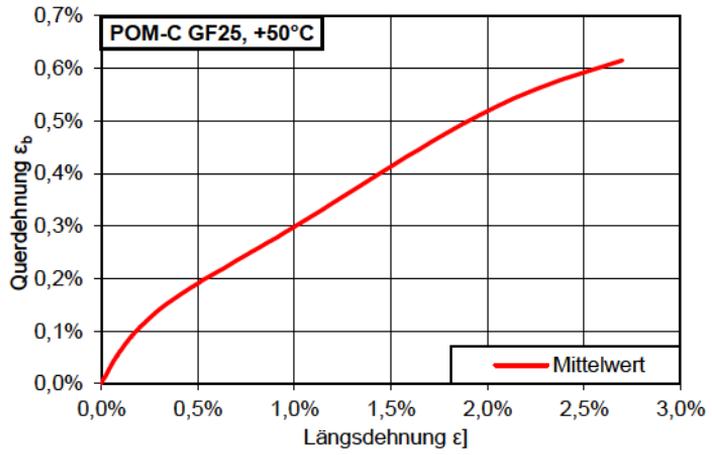


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

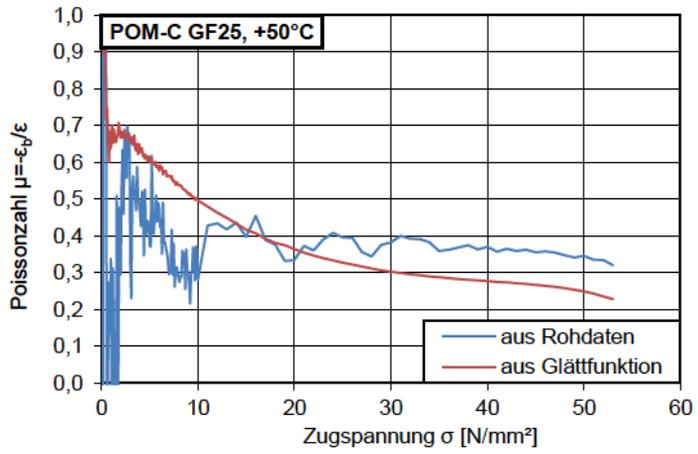


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25, +50°C

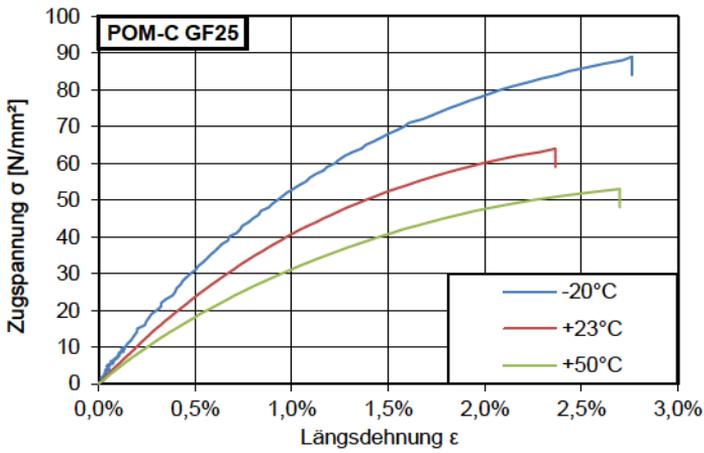
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
POM-C GF25, +50°C



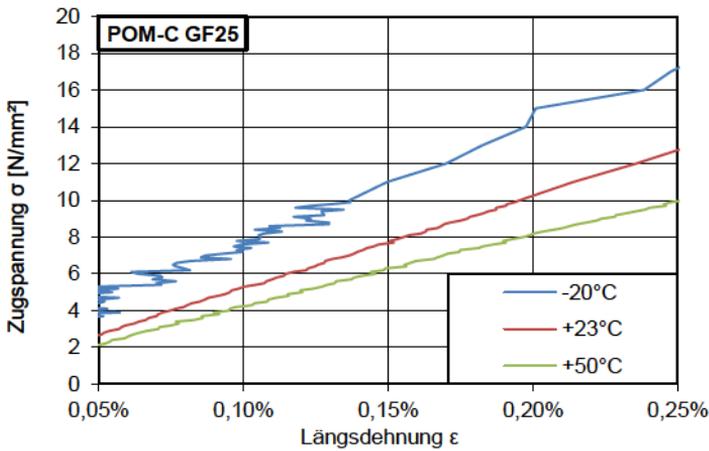
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
POM-C GF25, +50°C



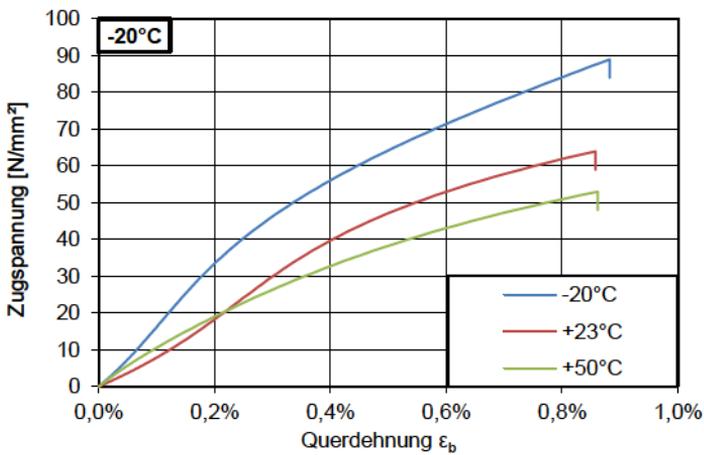
POM-C GF25, Temperaturvergleich



Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
POM-C GF25



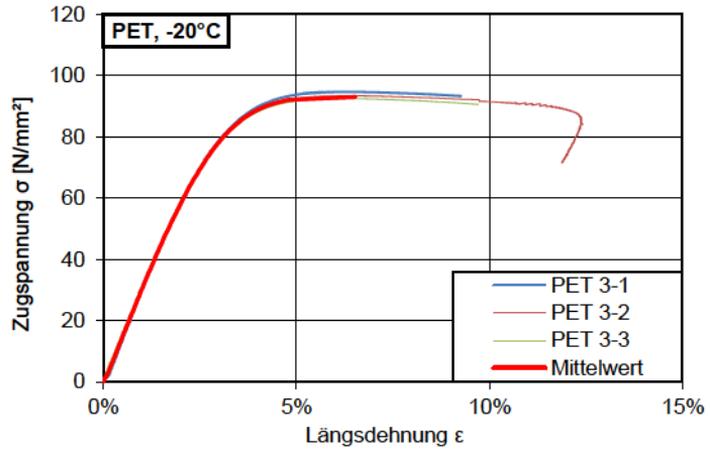
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



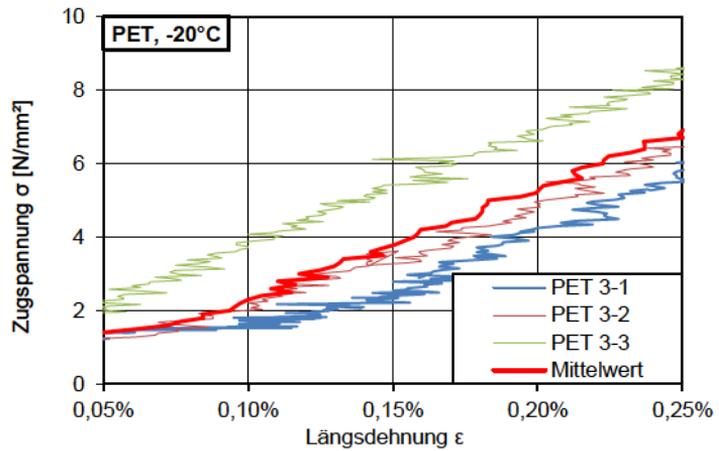
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25

PET, -20°C

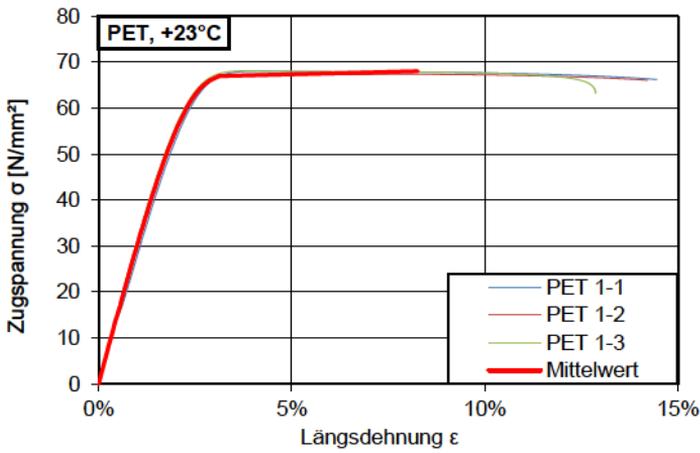
Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PET, -20°C



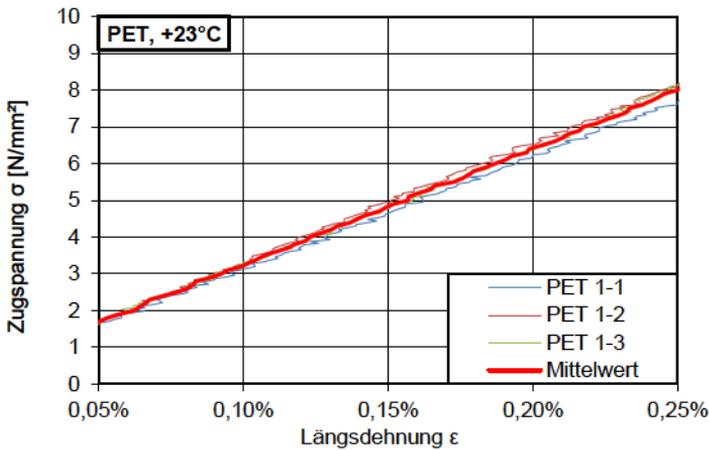
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET, -20°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



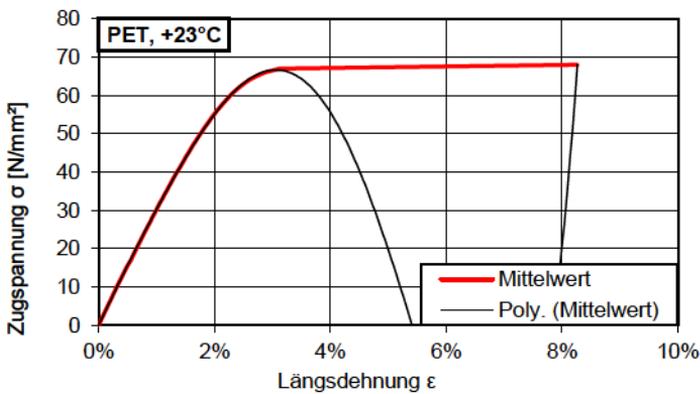
PET, +23°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET, +23°C



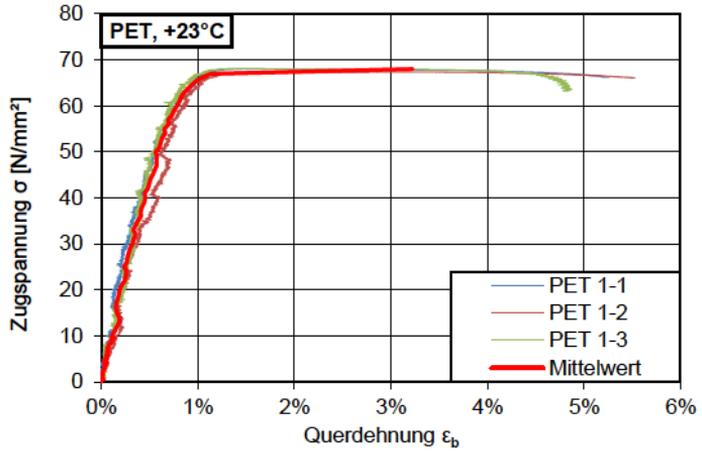
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



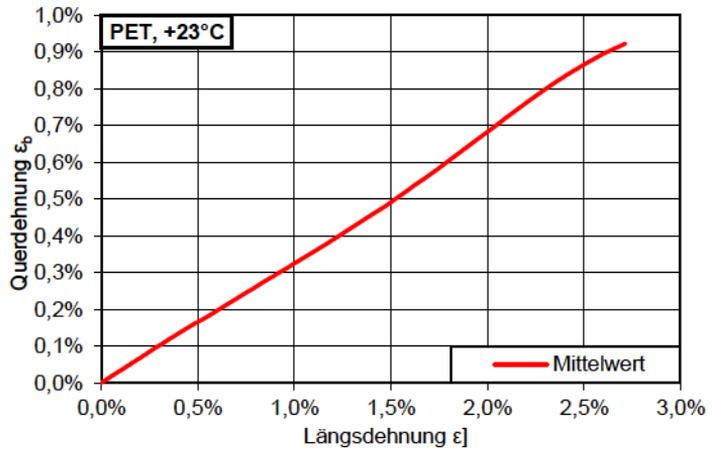
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion

$$y = 700293797,1x^5 - 76156322,0x^4 + 1522465,6x^3 - 30375,8x^2 + 3249,7x$$

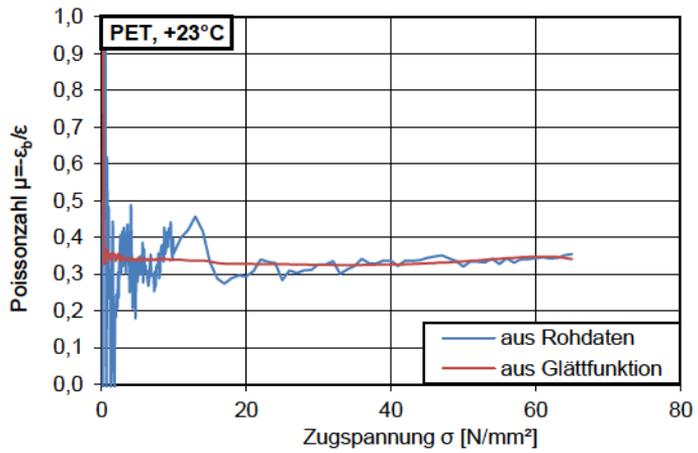
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET, +23°C



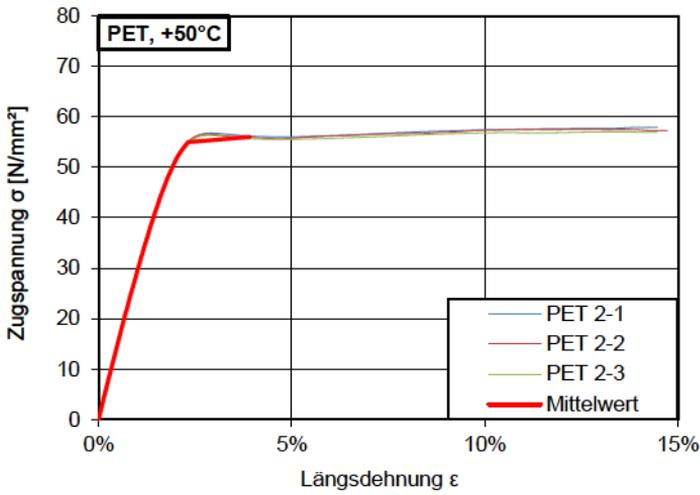
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PET, +23°C



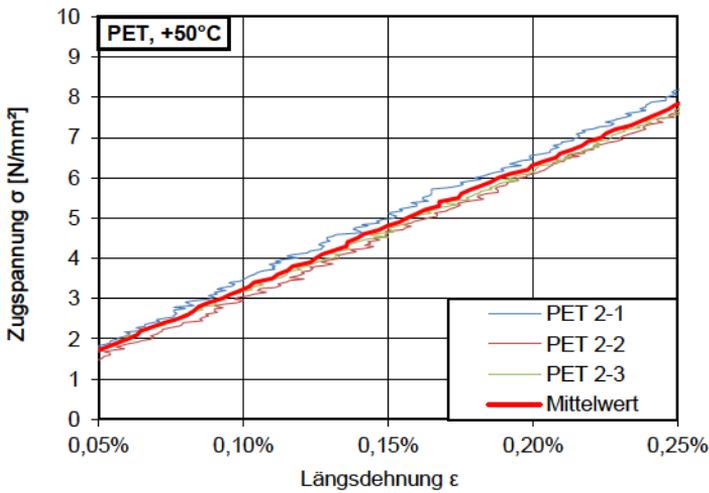
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PET, +23°C



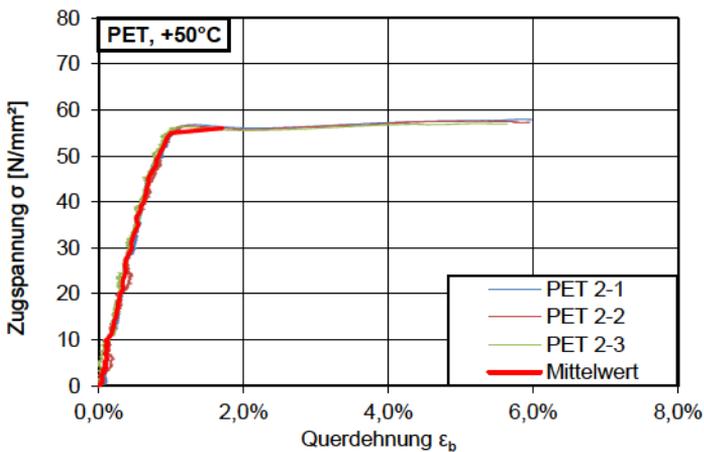
PET, +50°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET, +50°C

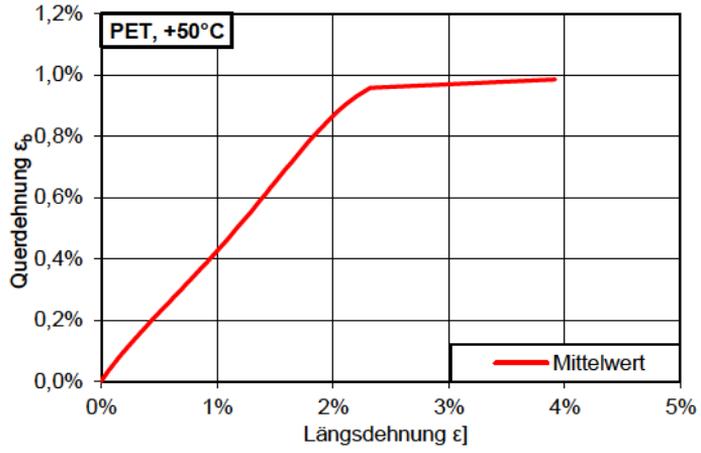


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

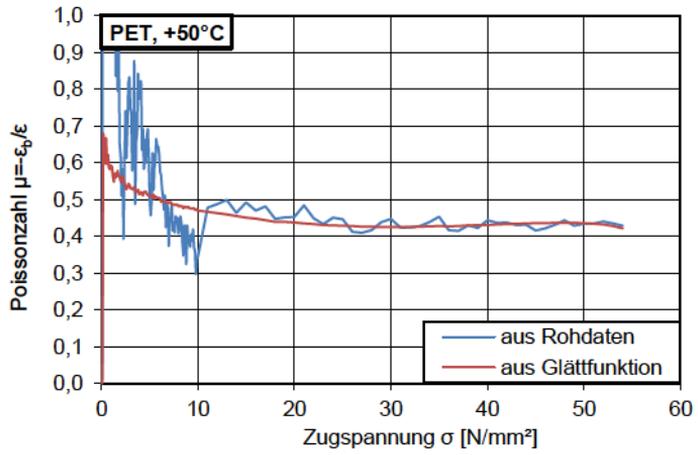


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET, +50°C

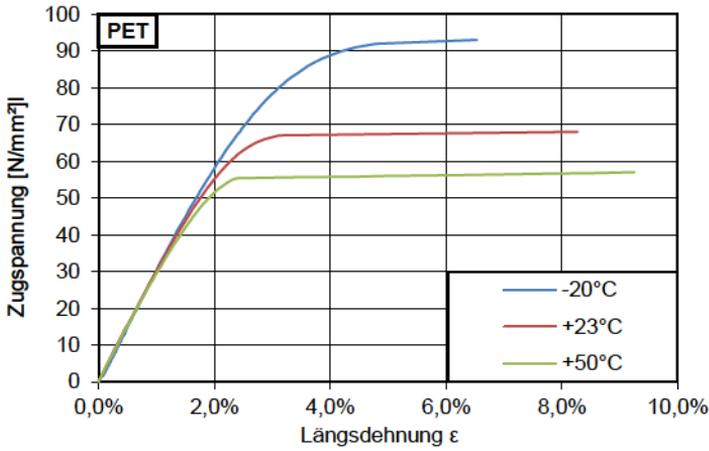
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PET, +50°C



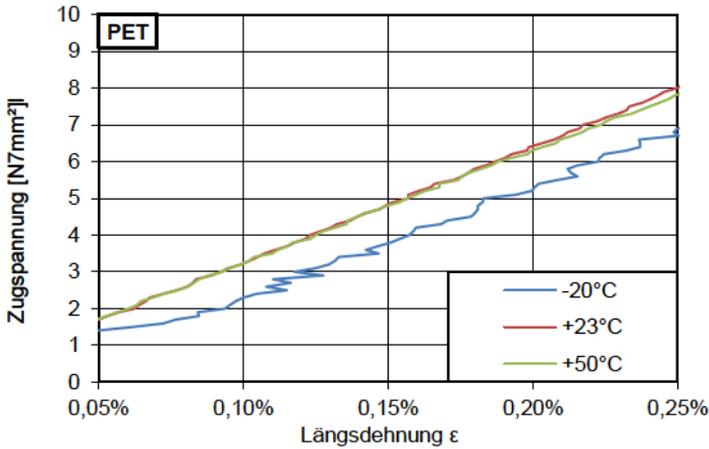
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PET, +50°C



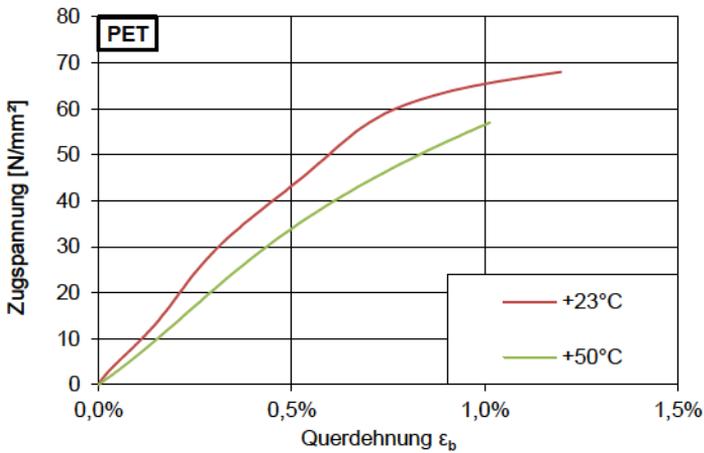
PET, Temperaturvergleich



Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PET



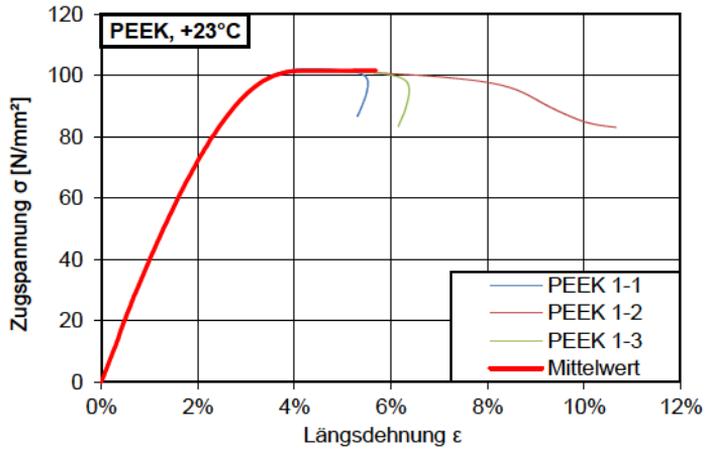
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



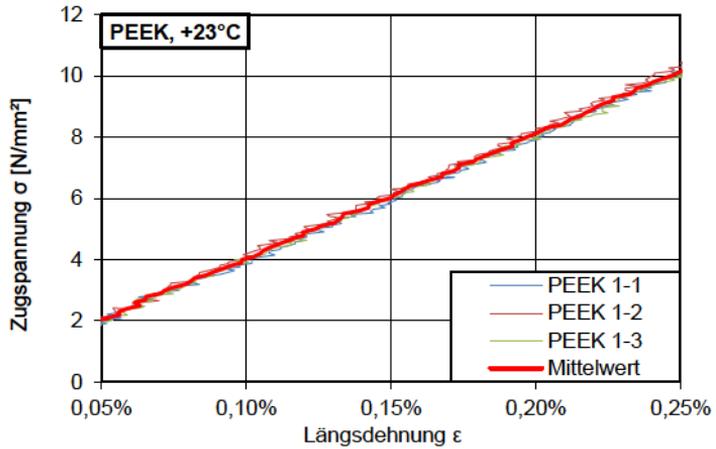
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PET

PEEK, +23°C

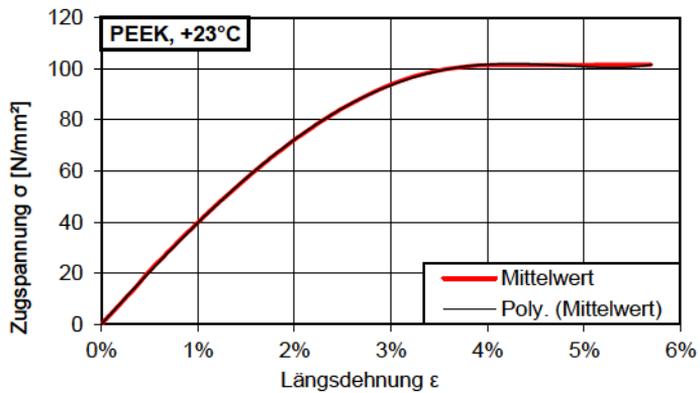
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK, +23°C



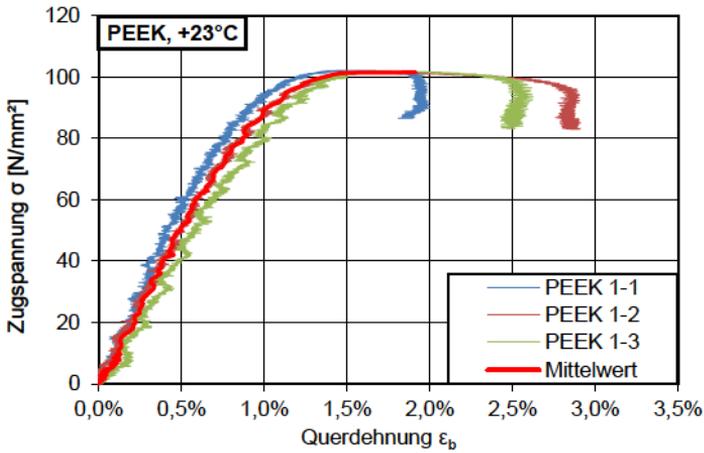
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



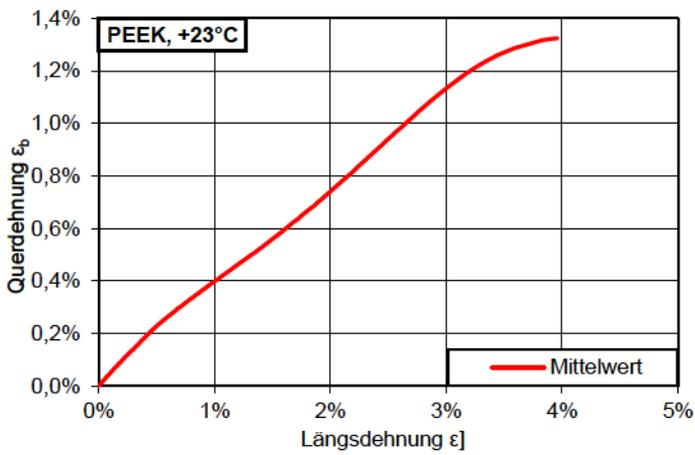
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion



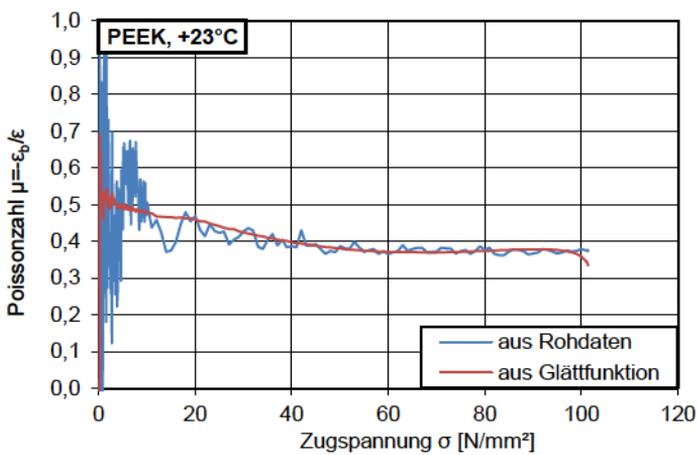
$$y = 285658413,3x^5 - 18326815,7x^4 - 322055,9x^3 - 17224,1x^2 + 4188,8x$$



Querdehnung-Zugspannung-Diagramm
PEEK, +23°C



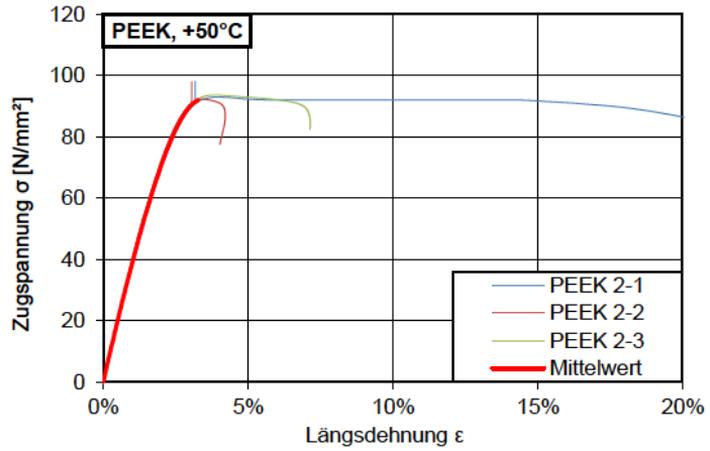
Längsdehnung-Querdehnung-Diagramm
PEEK, +23°C



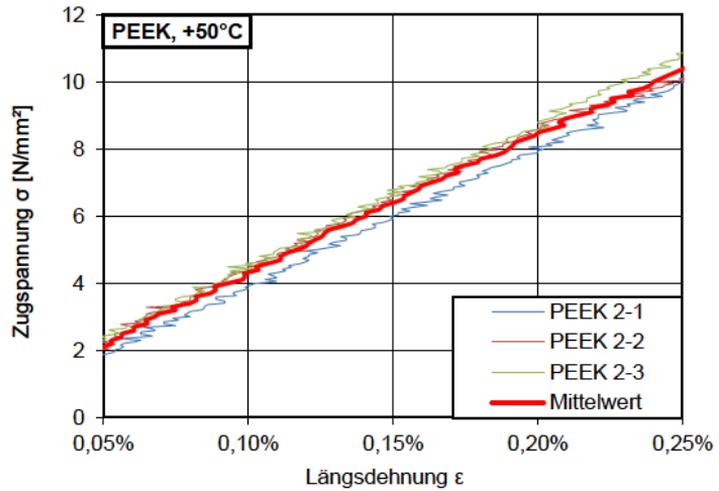
Zugspannung-Poissonzahl-Diagramm
PEEK, +23°C

PEEK, +50°C

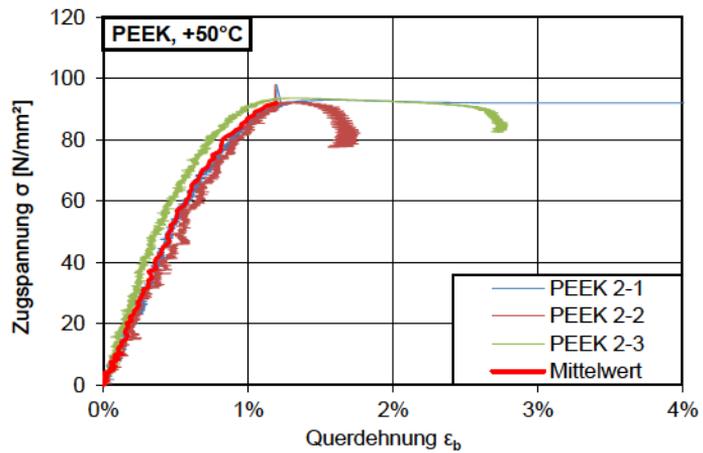
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK, +50°C

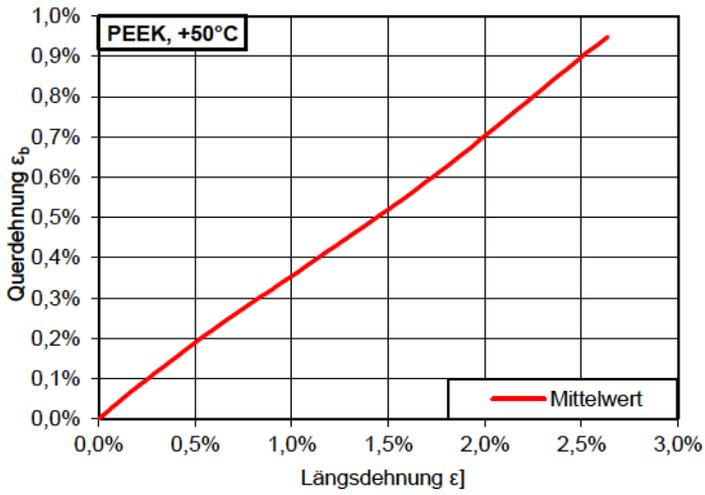


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

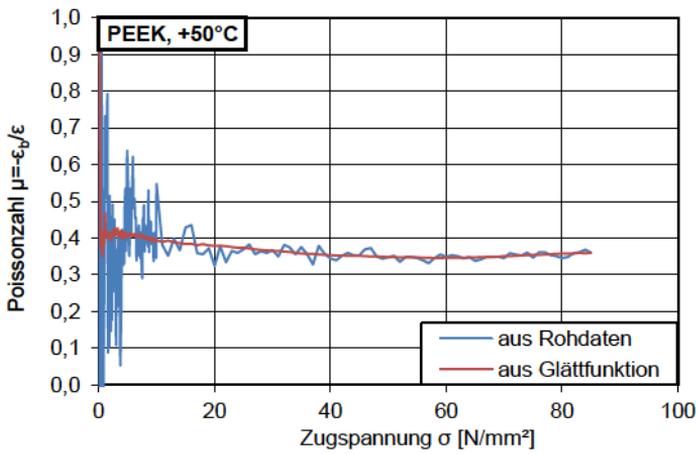


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK, +50°C





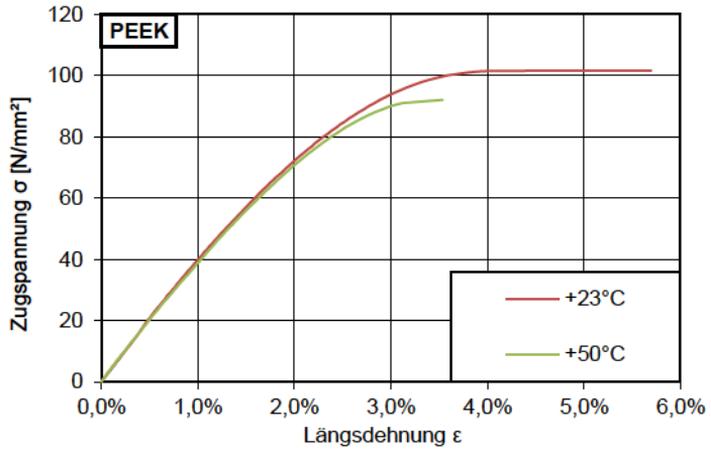
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PEEK, +50°C



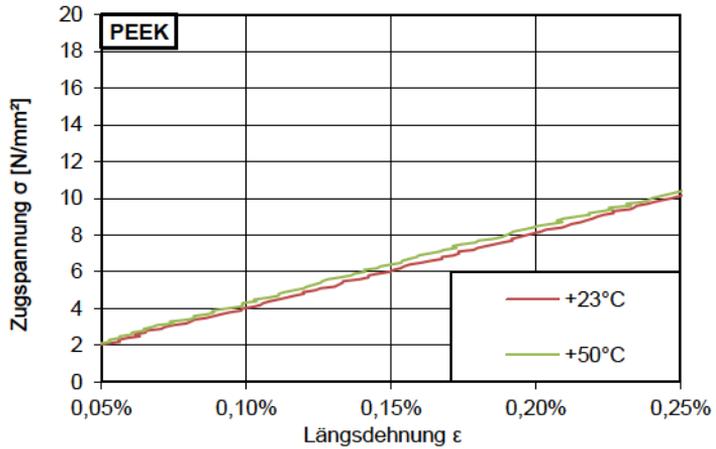
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PEEK, +50°C

PEEK, Temperaturvergleich

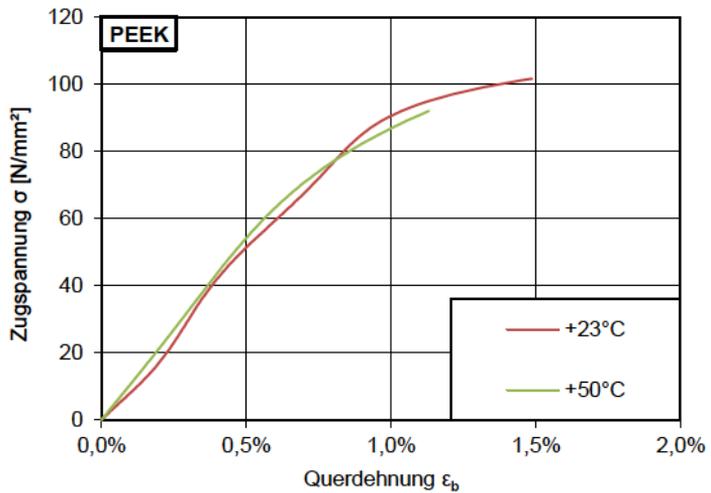
Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PEEK



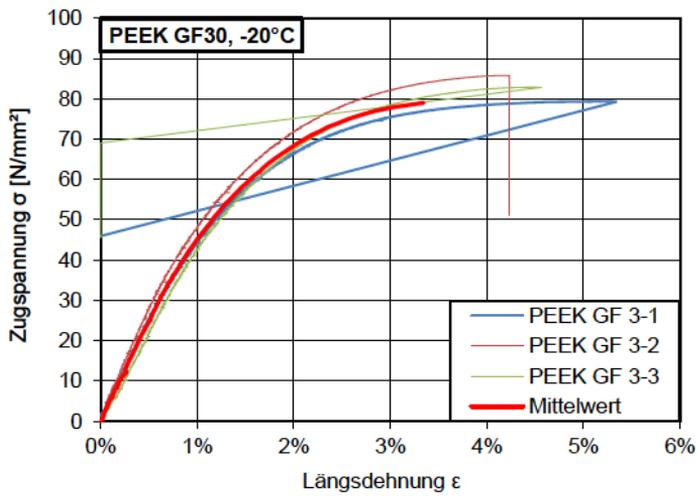
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



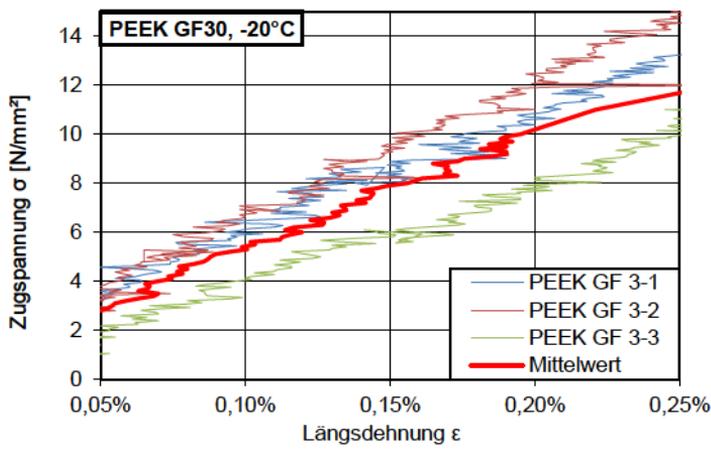
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK



PEEK GF30, -20°C



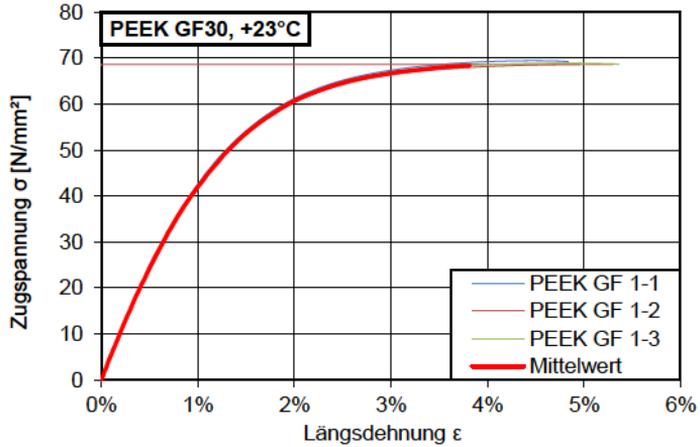
Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PEEK GF30, -20°C



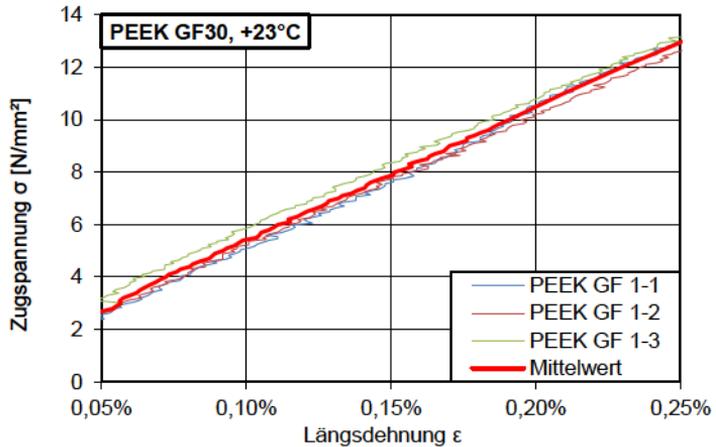
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK GF30, -20°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

PEEK GF30, +23°C

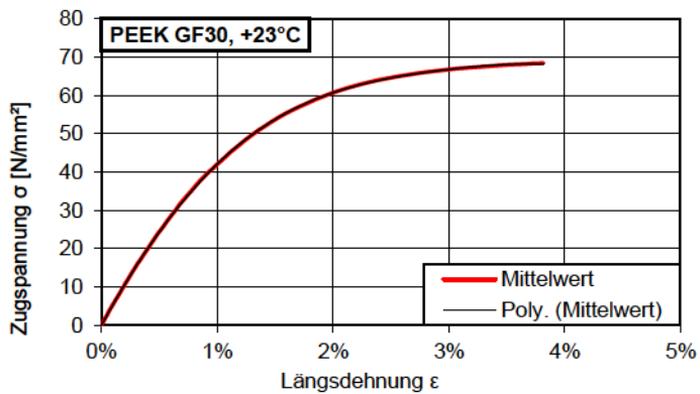
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK GF30, +23°C



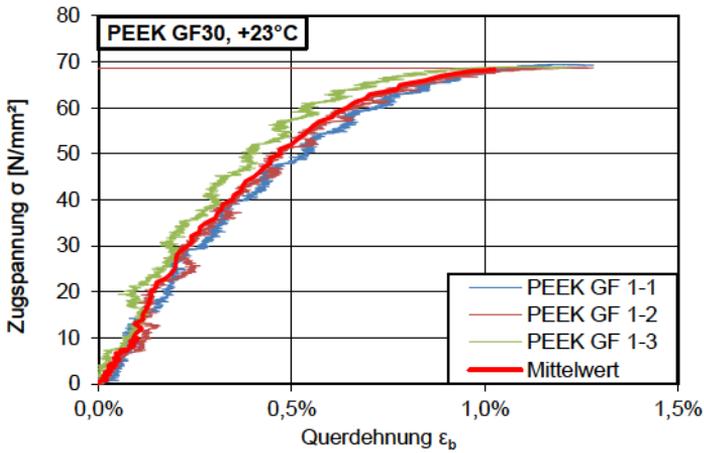
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
POM-C GF25, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



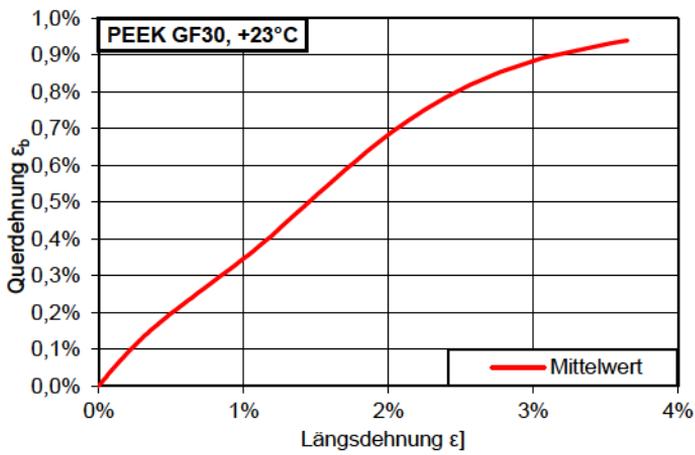
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK GF30, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion



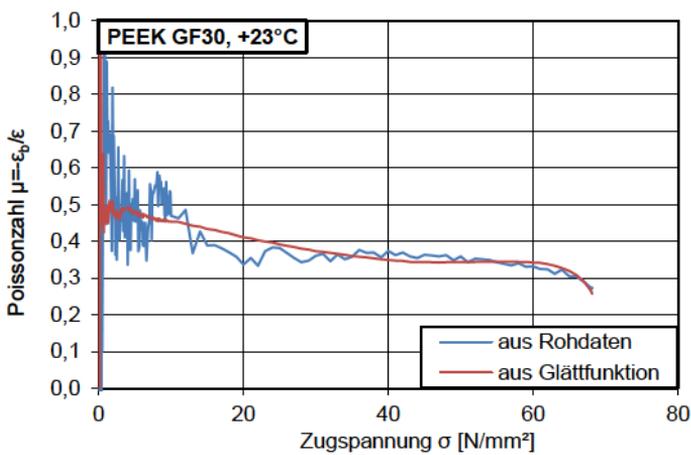
$$y = -1355020248,1x^5 + 121168599,6x^4 - 2058348,3x^3 - 119940,9x^2 + 5503,1x$$



Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK GF30, +23°C



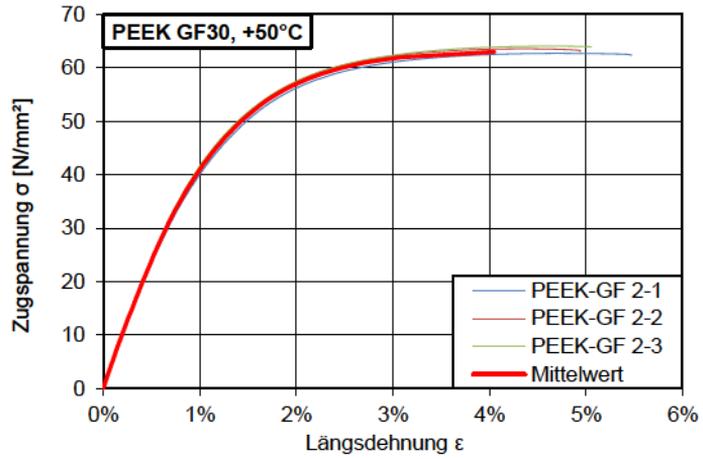
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PEEK GF30, +23°C



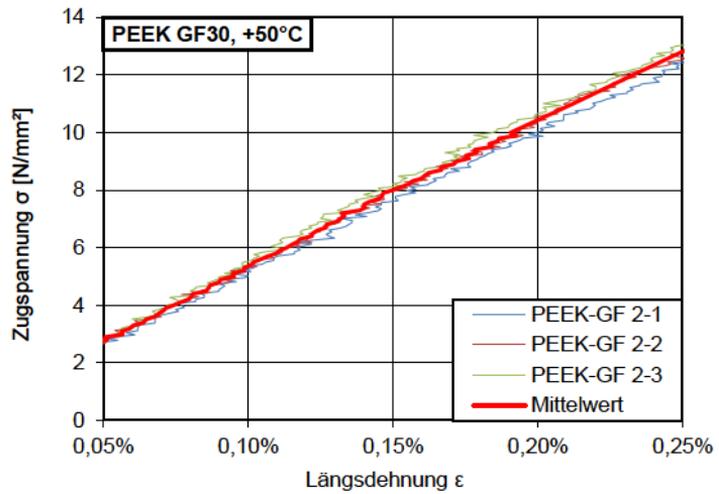
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PEEK GF30, +23°C

PEEK GF30, +50°C

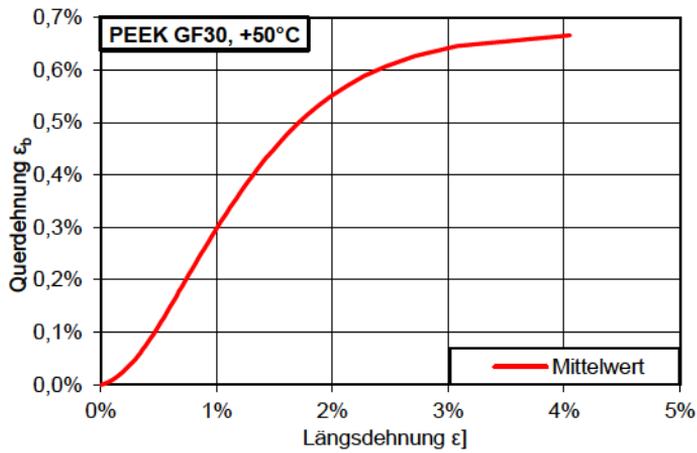
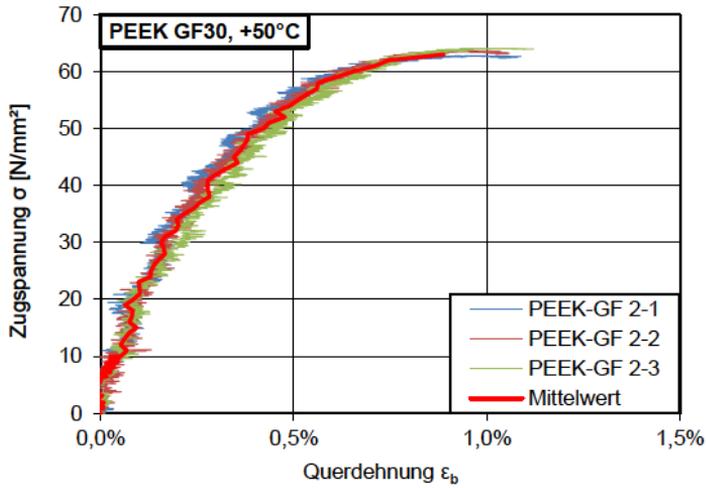
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK GF30, +50°C



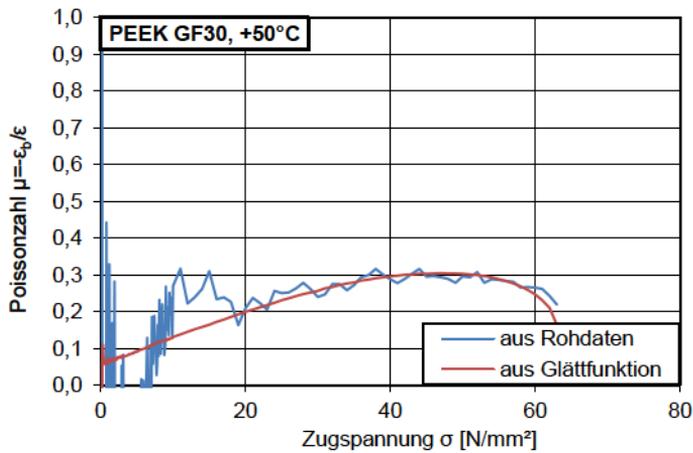
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK GF30, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK GF30, +50°C



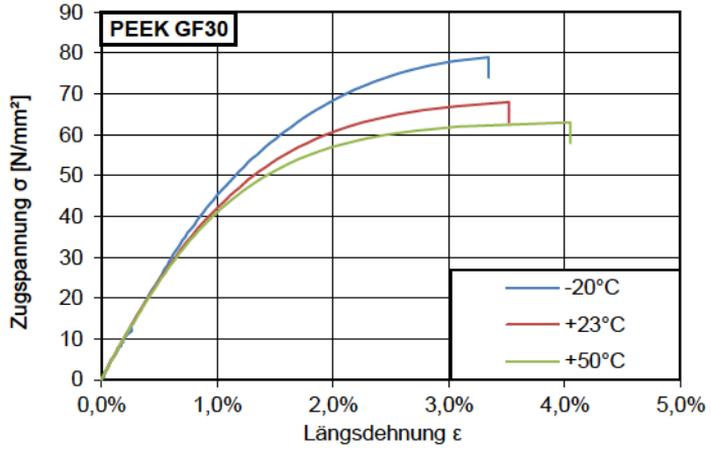
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
POM-C GF25, +50°C



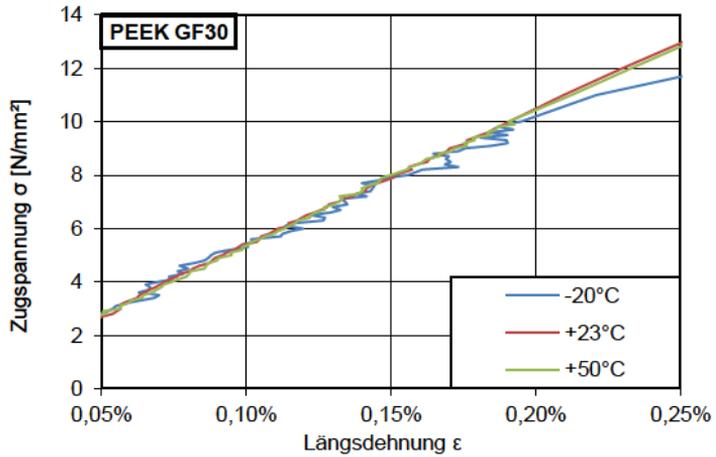
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PEEK GF30, +50°C

PEEK GF30, Temperaturvergleich

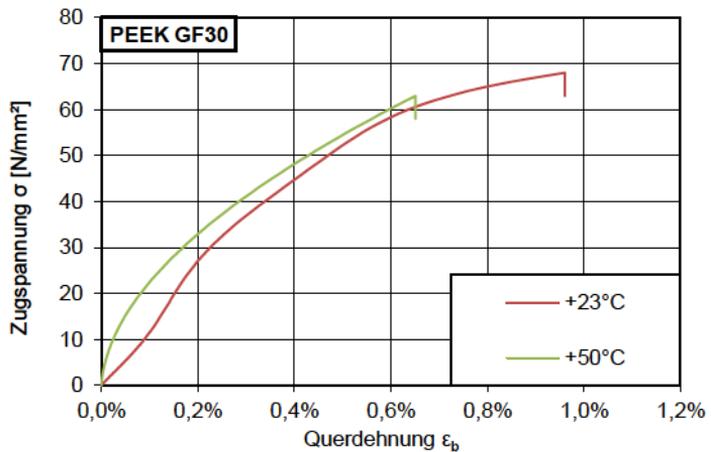
Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PEEK GF30



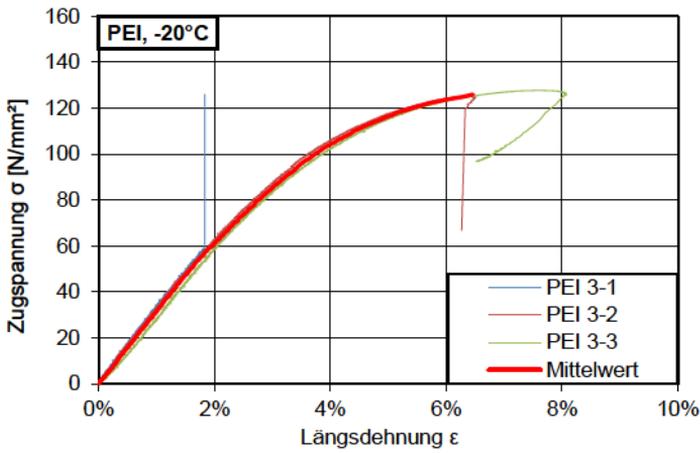
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK GF30
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



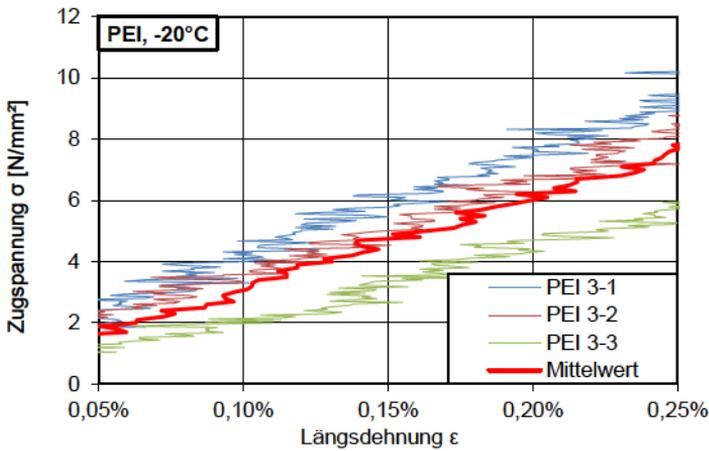
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEEK GF30



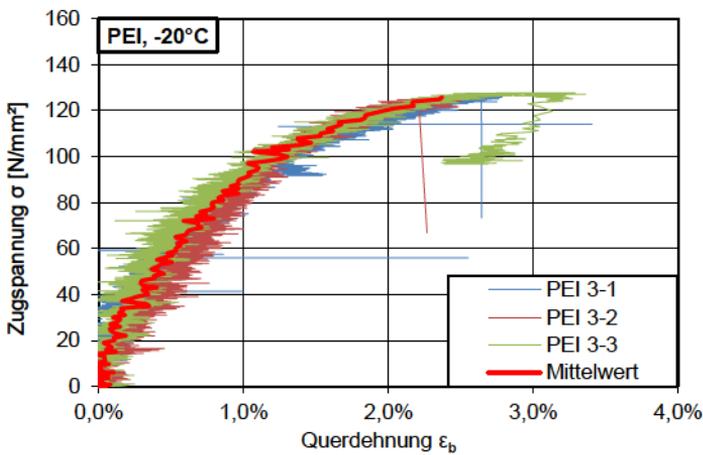
PEI, -20°C



Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PEI, -20°C

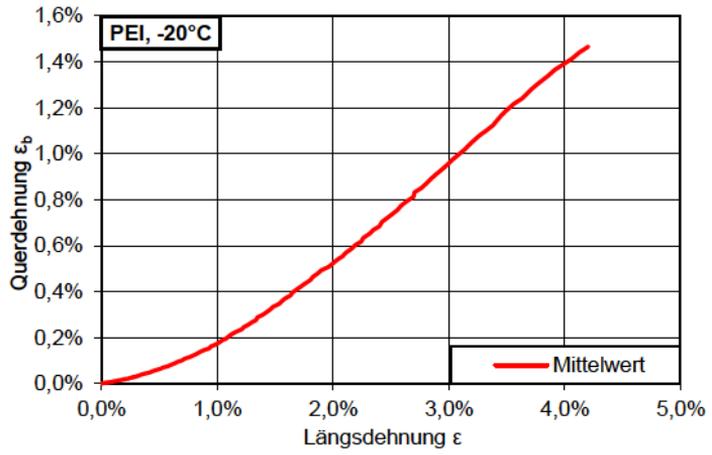


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEI, -20°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

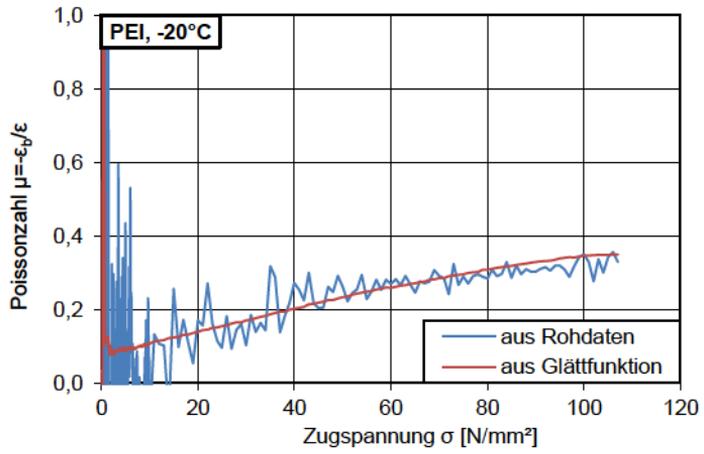


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEI, -20°C

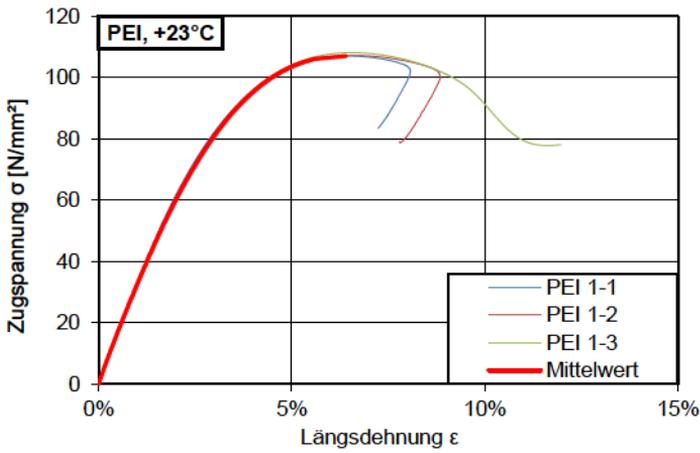
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PEI, -20°C



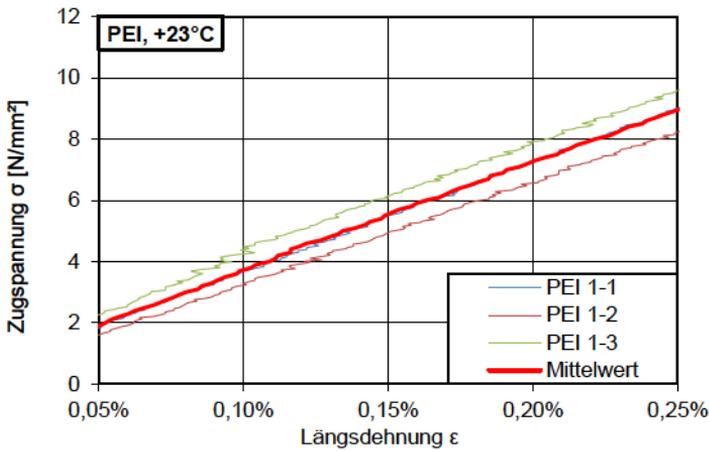
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PEI, -20°C



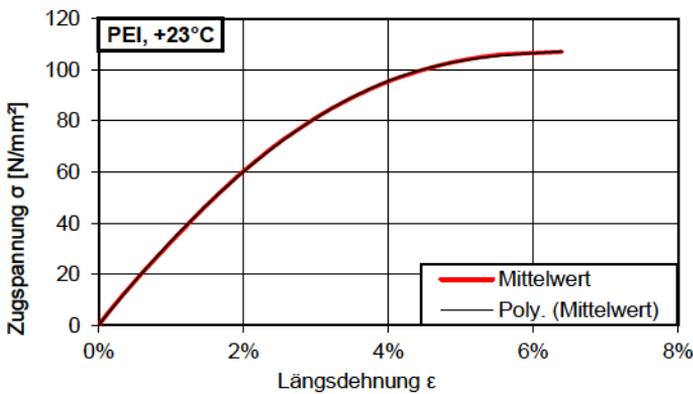
PEI, +23°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEI, +23°C



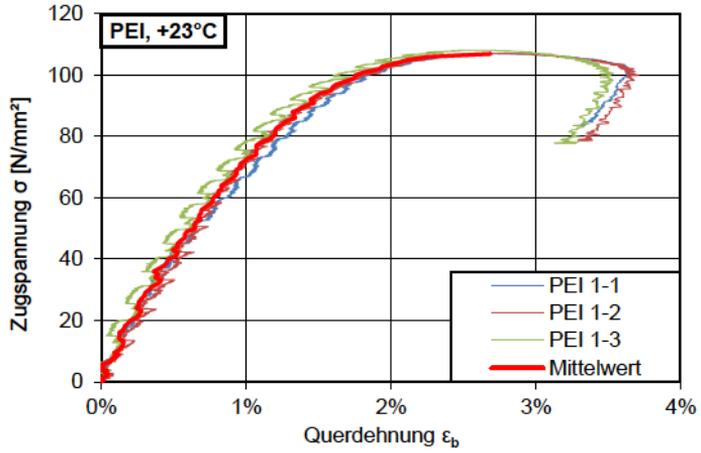
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEI, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



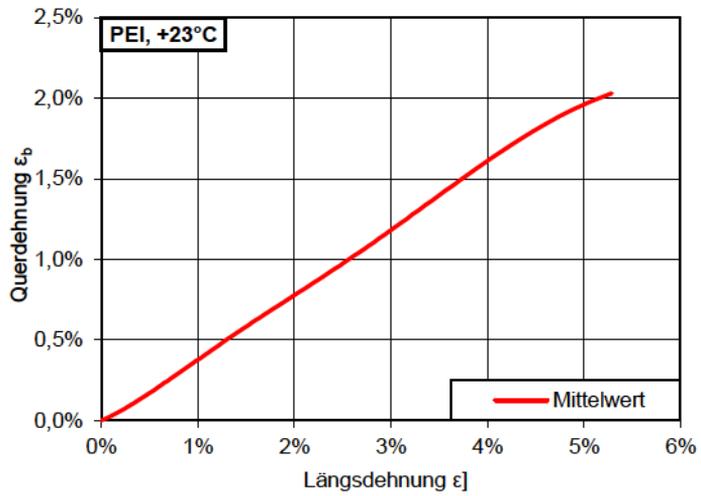
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEI, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion

$$y = 78478990,6x^5 - 9085601,2x^4 + 307518,4x^3 - 33211,1x^2 + 3606,3x$$

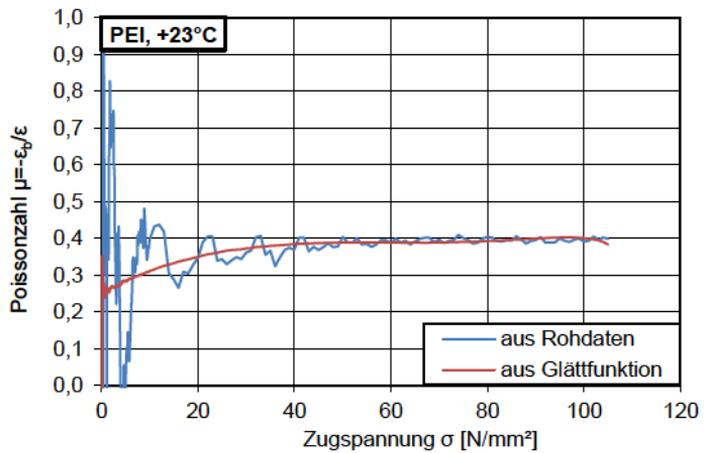
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEI, +23°C



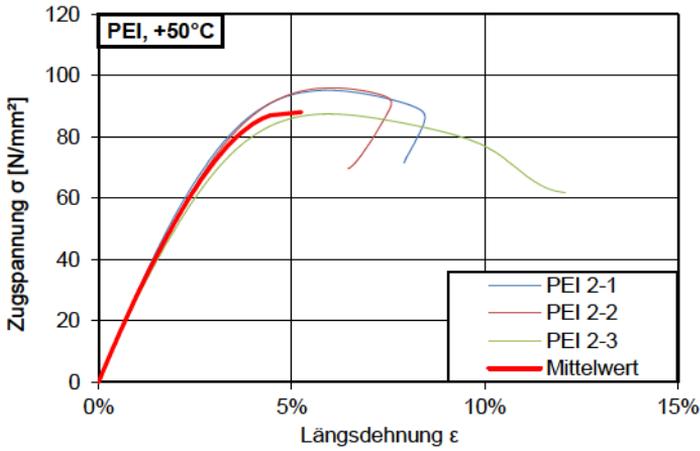
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PEI, +23°C



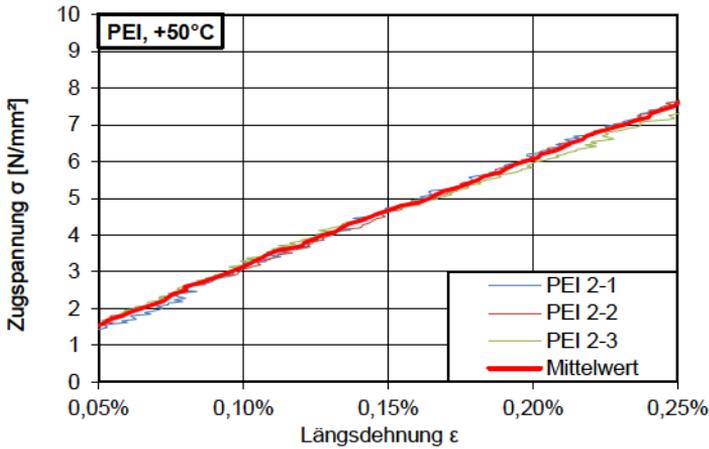
Zugspannung-Poissonszahl-
Diagramm
PEI, +23°C



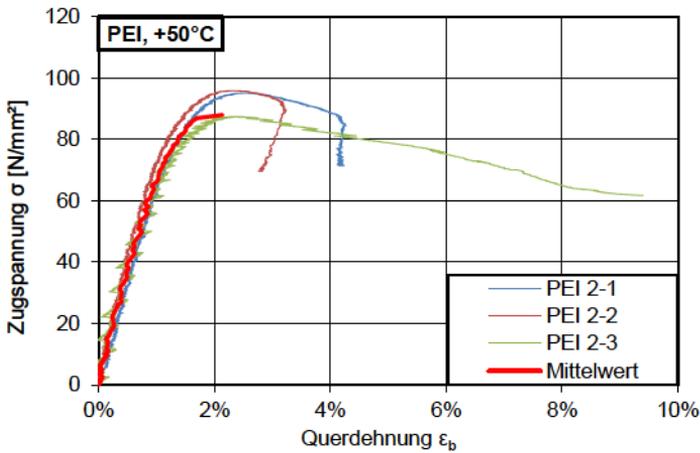
PEI, +50°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEI, +50°C

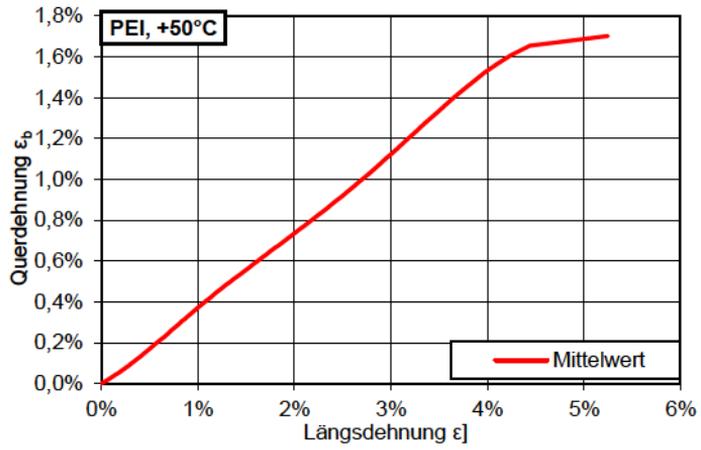


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEI, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

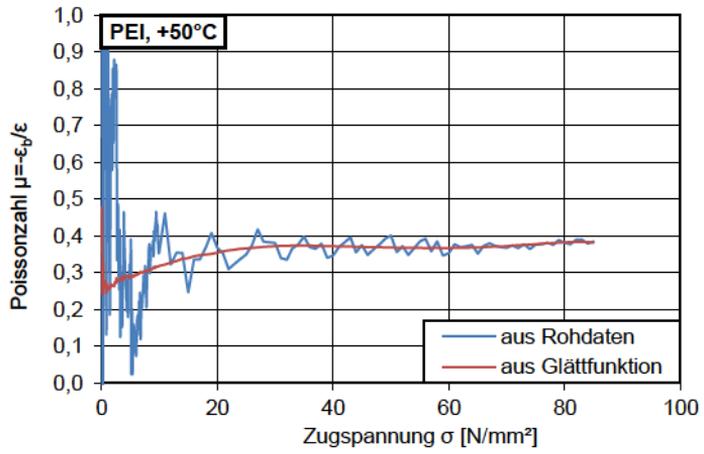


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PEI, +50°C

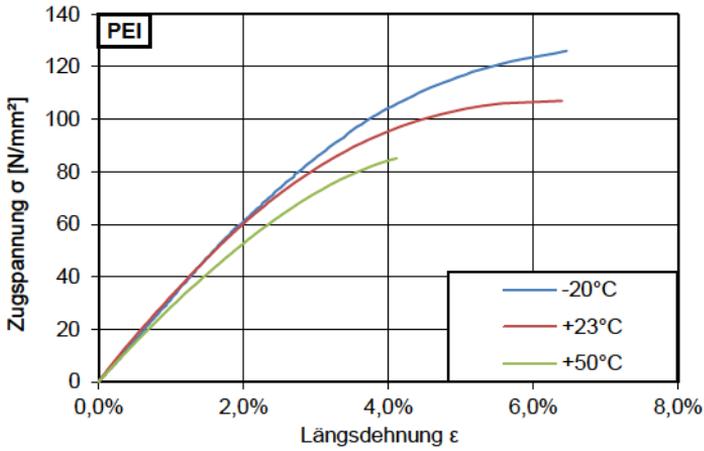
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PEI, +50°C



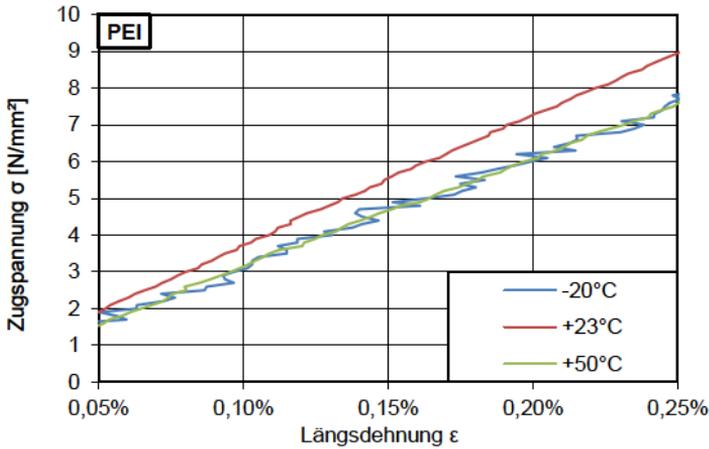
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
POM-C GF25, +50°C



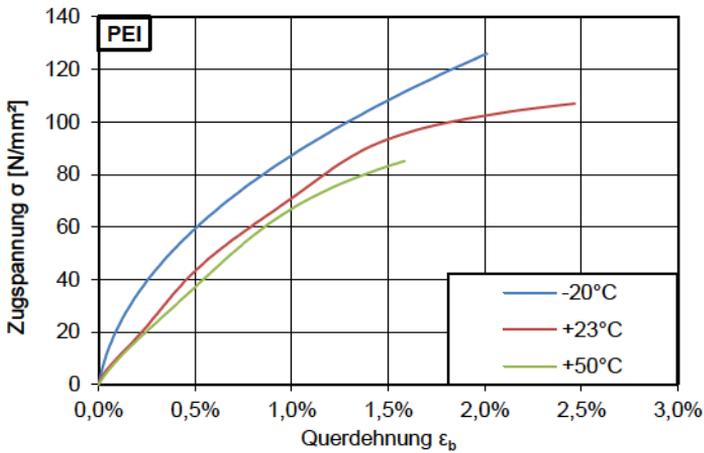
PEI, Temperaturvergleich



Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PEI



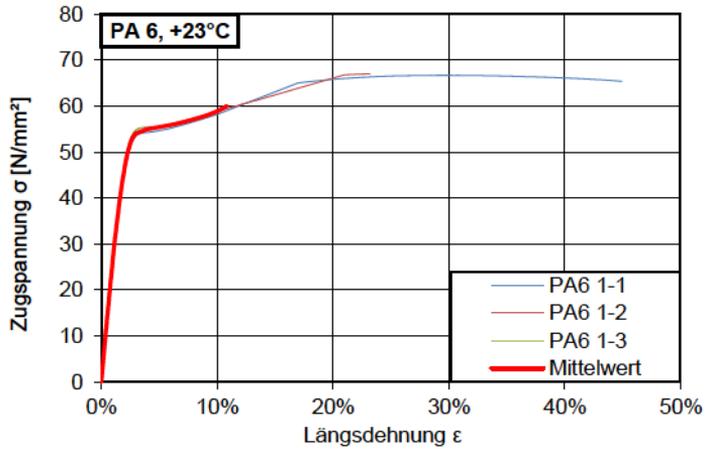
Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PEI
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



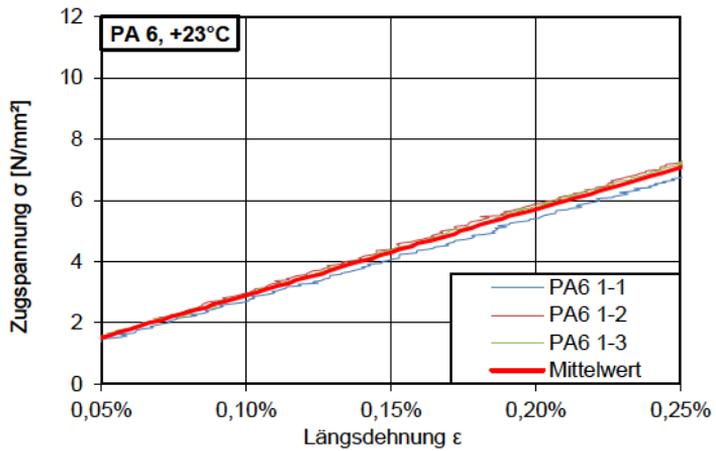
Querdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PEI

PA6, +23°C

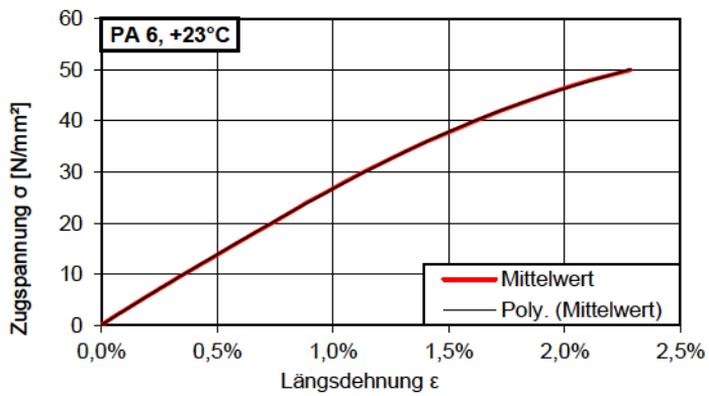
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6, +23°C



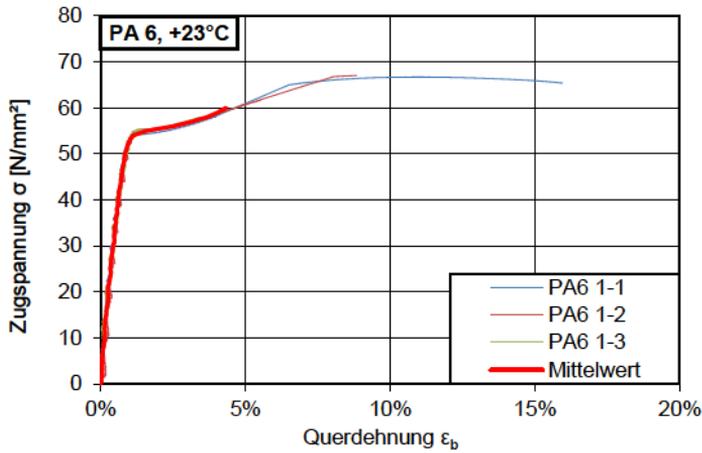
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



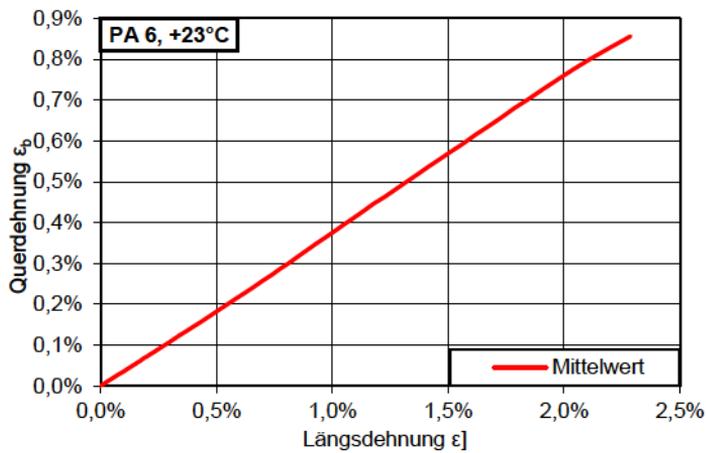
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion



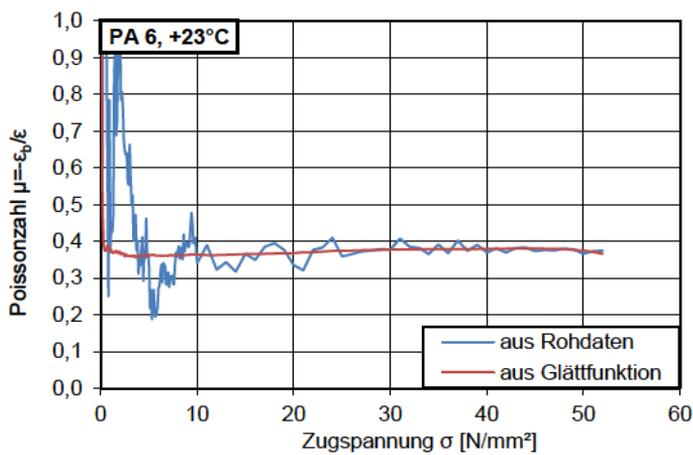
$$y = 6773161865,3x^5 - 365894703,6x^4 + 5821638,4x^3 - 55460,9x^2 + 2939,2x$$



Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6, +23°C



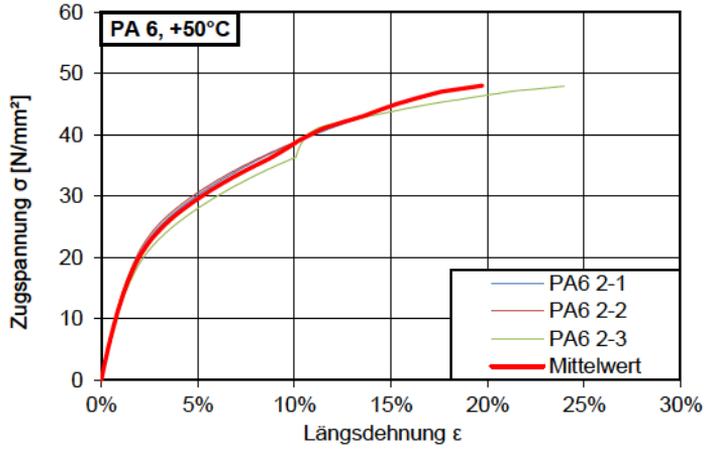
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PA6, +23°C



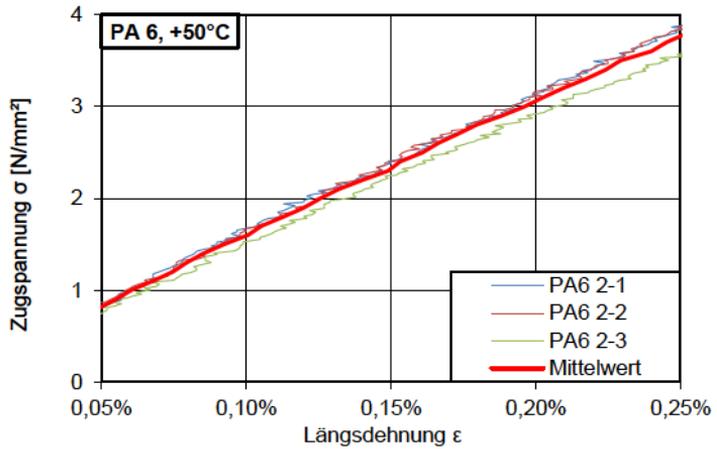
Zugspannung-Poissonszahl-
Diagramm
PA6, +23°C

PA6, +50°C

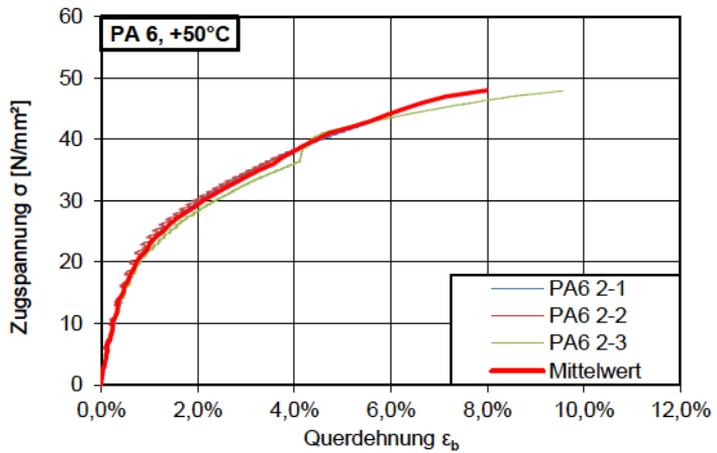
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6, +50°C

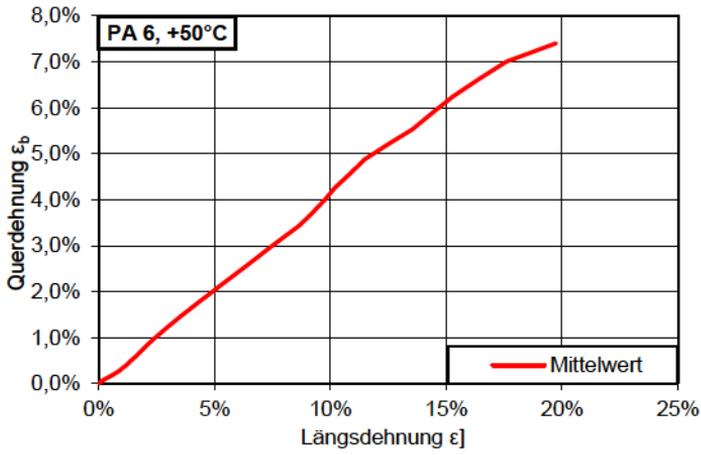


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

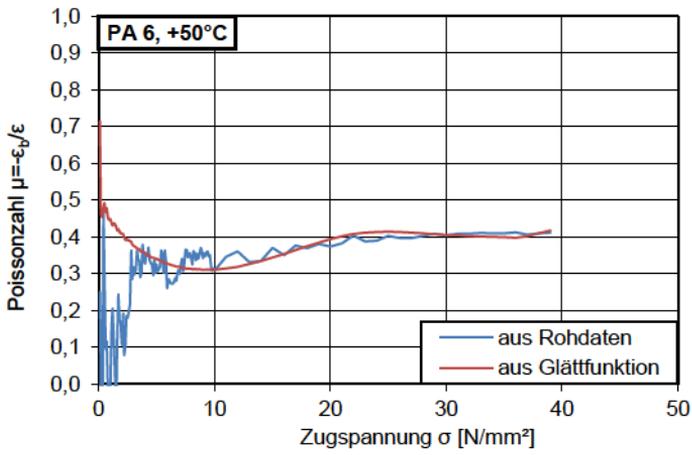


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6, +50°C





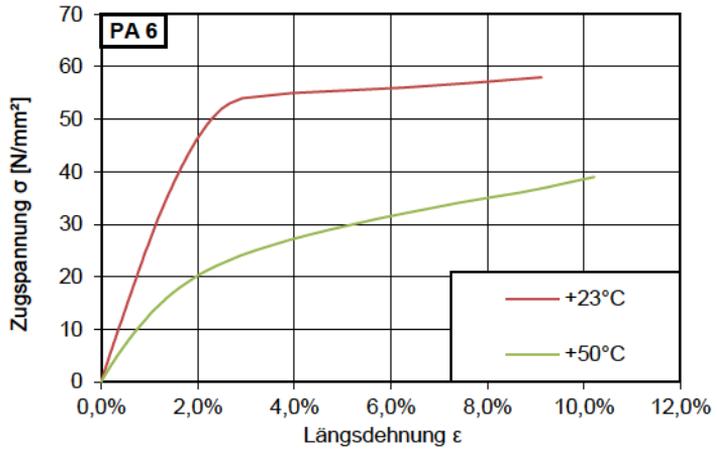
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PA6, +50°C



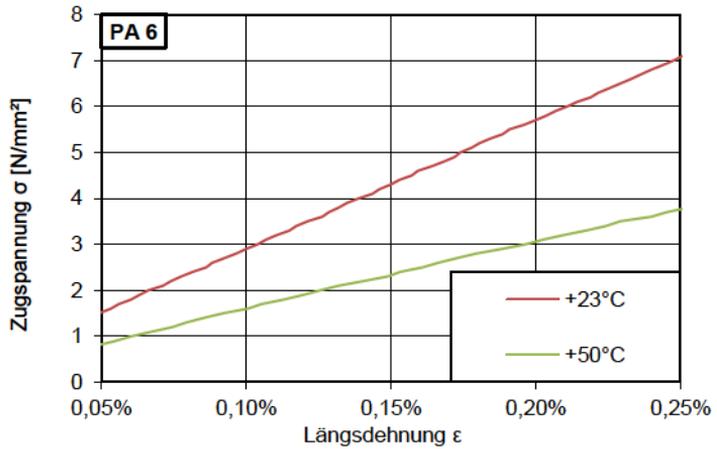
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PA6, +50°C

PA6, Temperaturvergleich

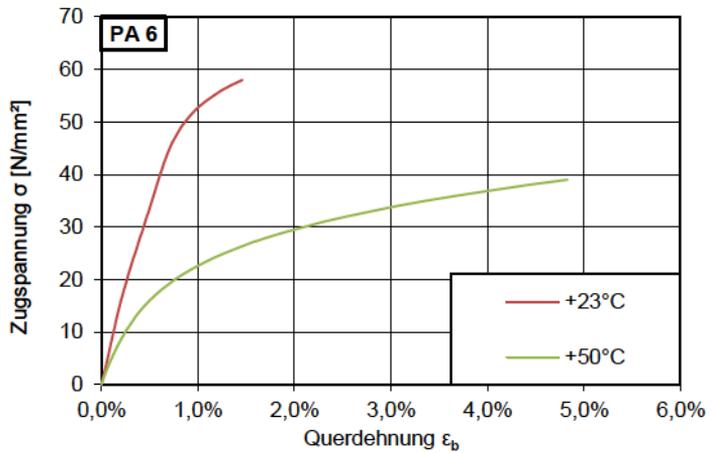
Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PA6



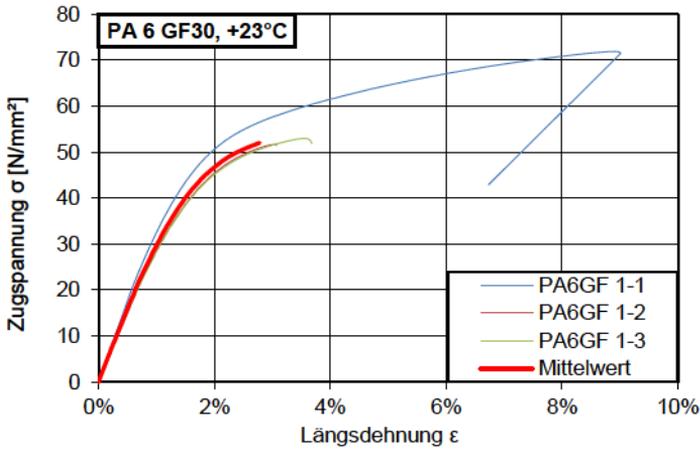
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



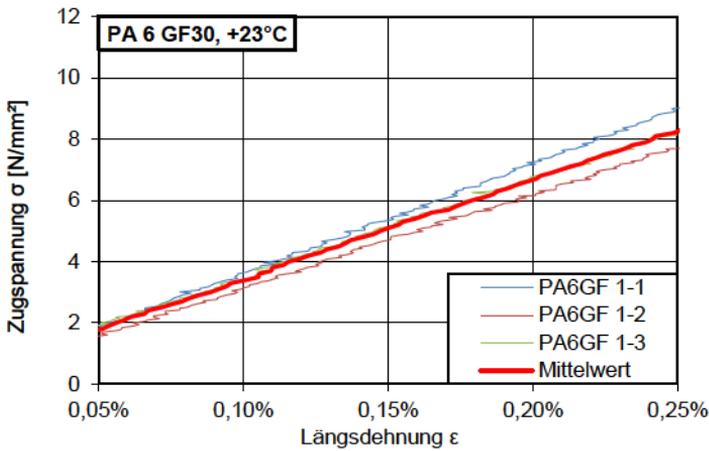
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6



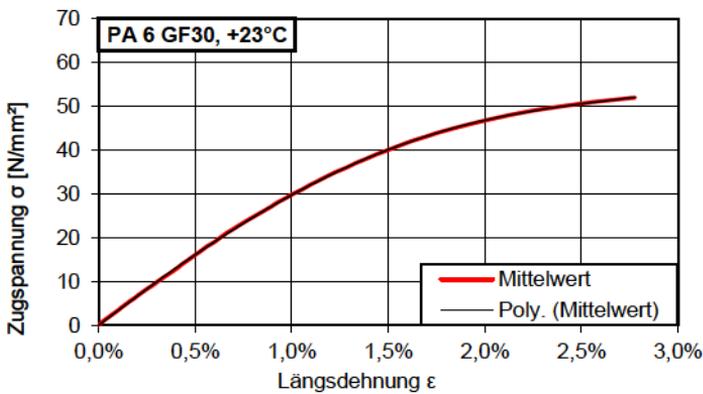
PA6 GF30, +23°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6 GF30, +23°C



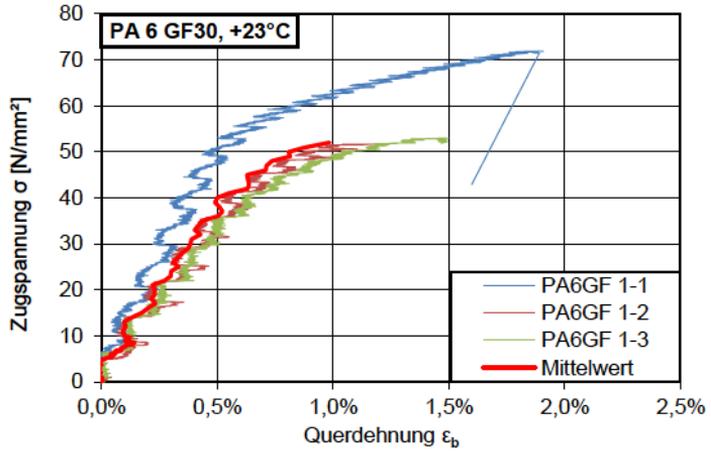
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6 GF30, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



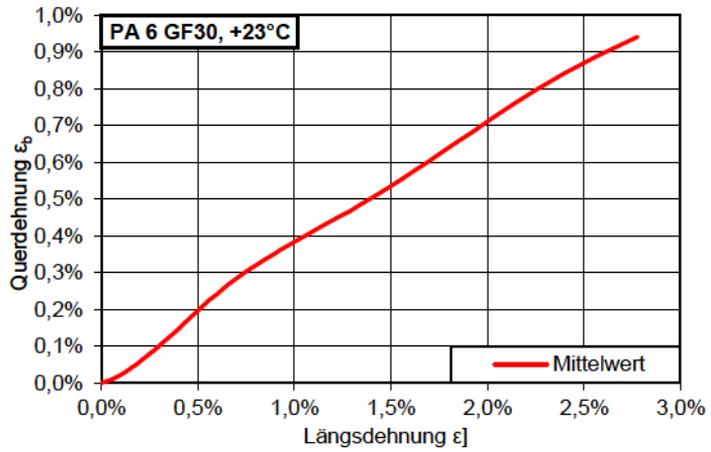
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6 GF30, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion

$$y = 915149408,1x^5 - 4655754,4x^4 - 1627809,3x^3 - 25265,8x^2 + 3387,0x$$

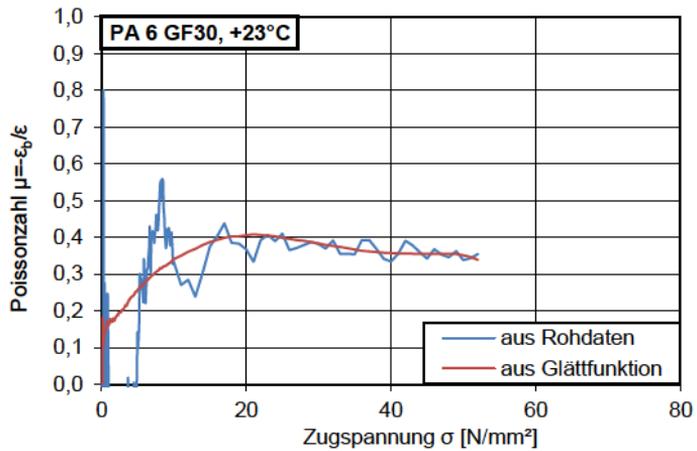
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6 GF30, +23°C



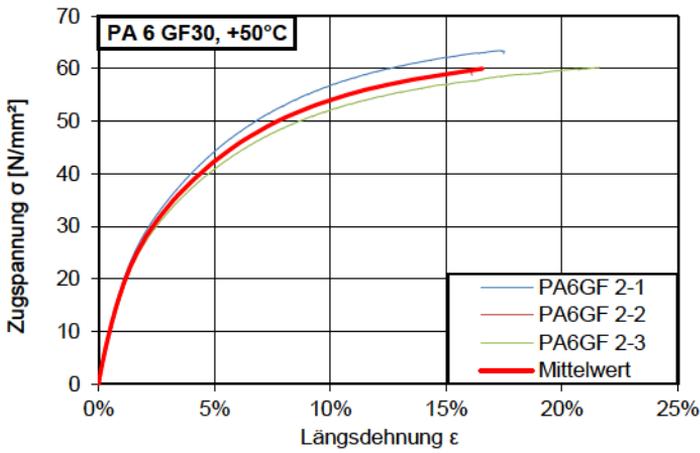
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PA6 GF30, +23°C



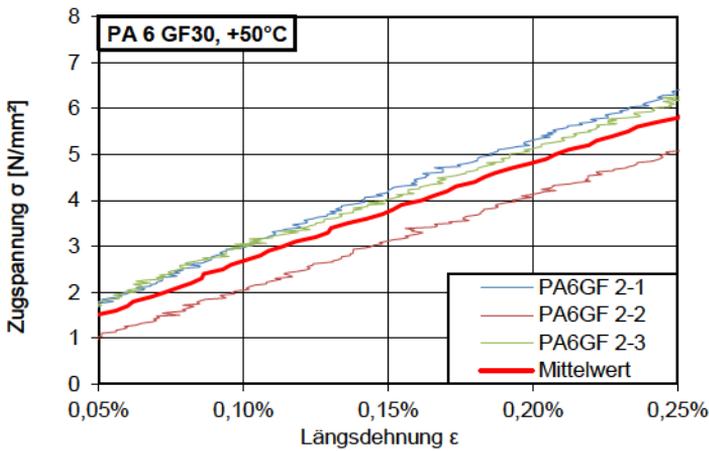
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PA6 GF30, +23°C



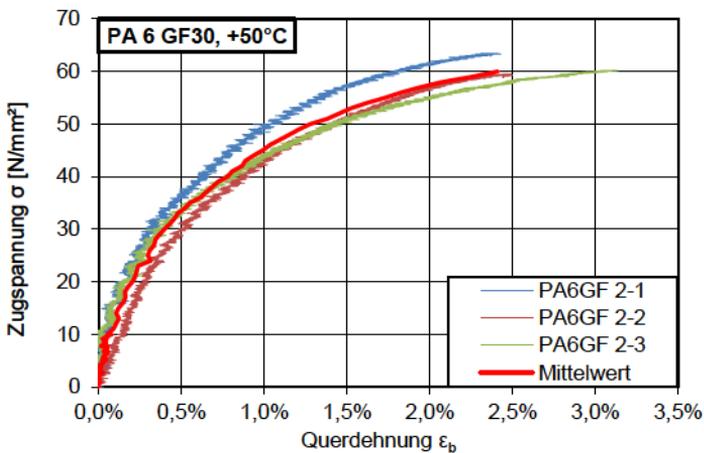
PA6 GF30, +50°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6 GF30, +50°C

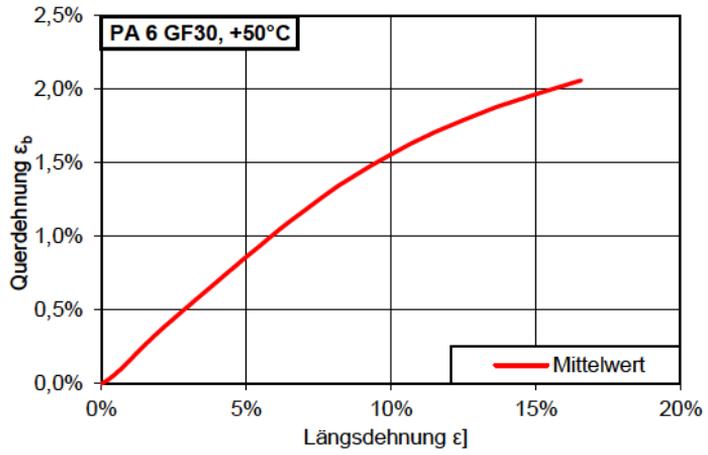


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6 GF30, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

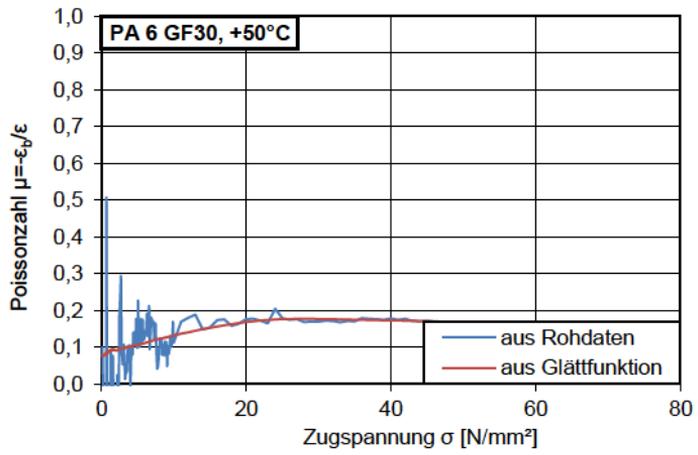


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6 GF30, +50°C

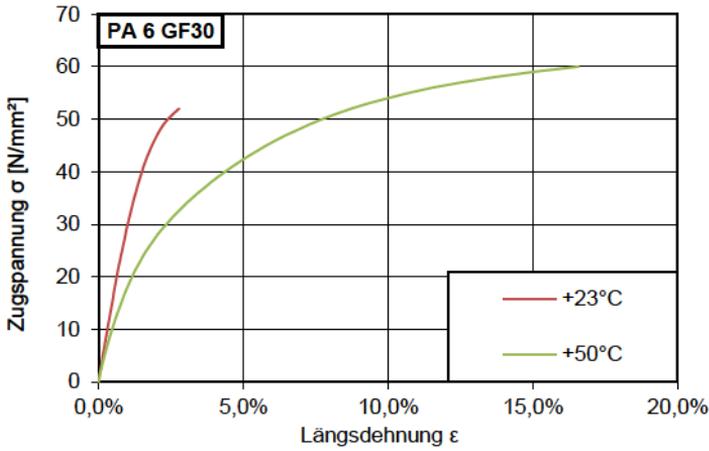
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PA6 GF30, +50°C



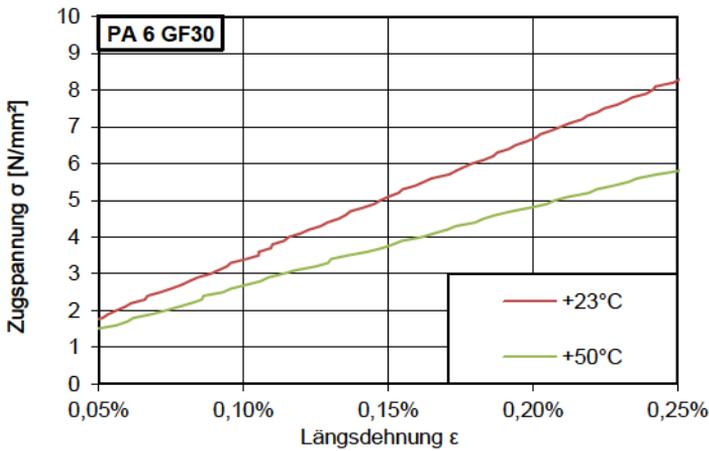
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PA6 GF30, +50°C



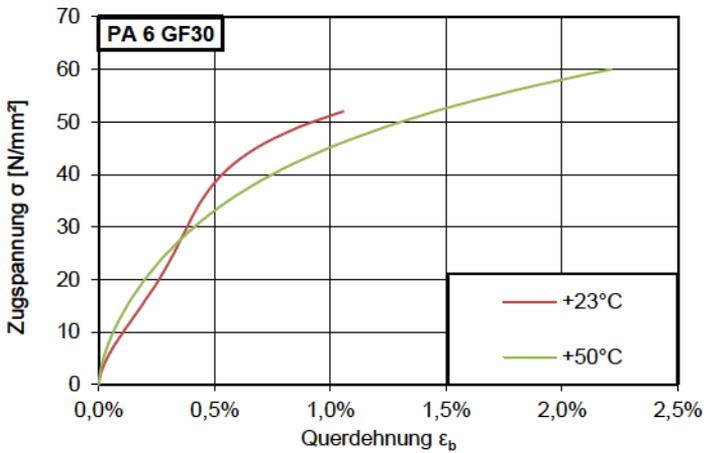
PA6 GF30, Temperaturvergleich



Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PA6 GF30



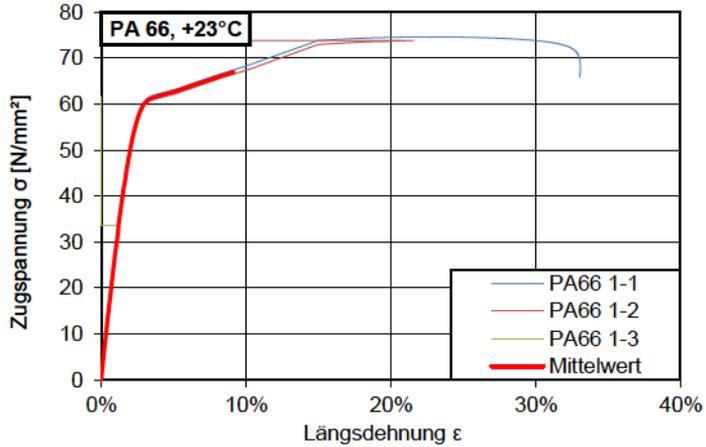
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6 GF30
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



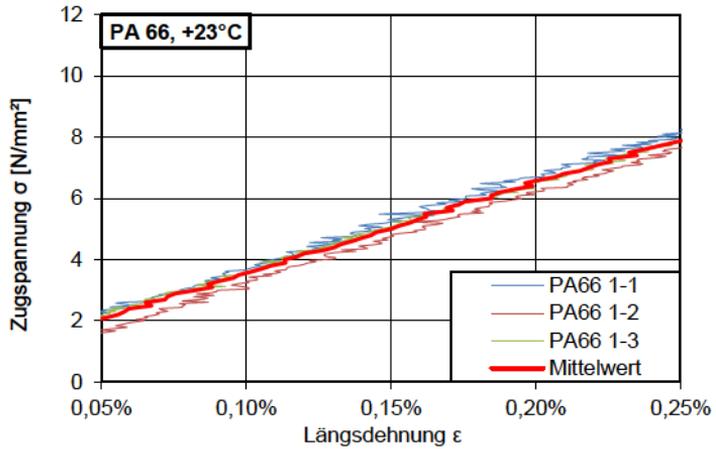
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA6 GF30

PA66, +23°C

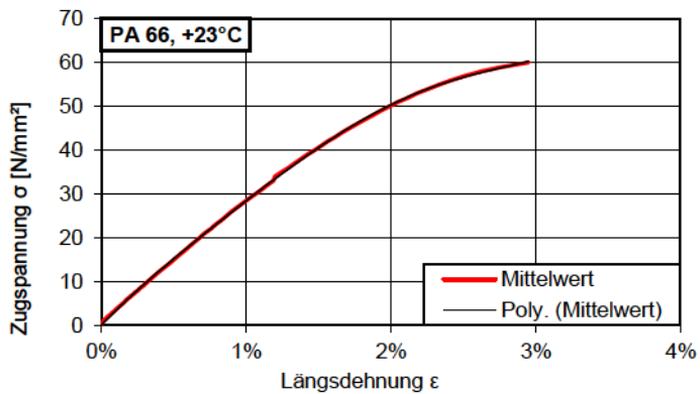
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66, +23°C



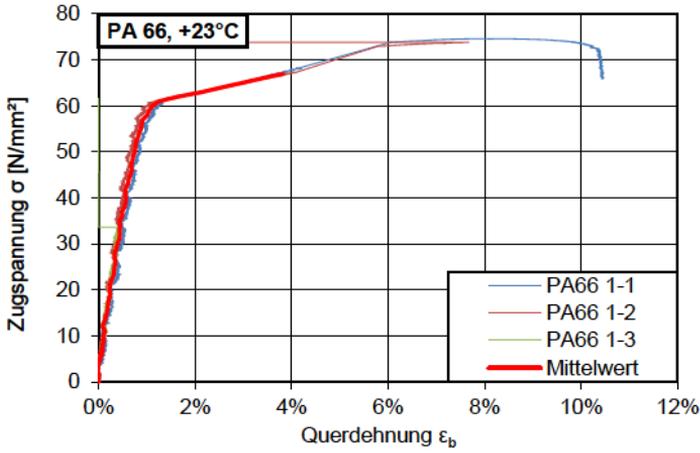
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



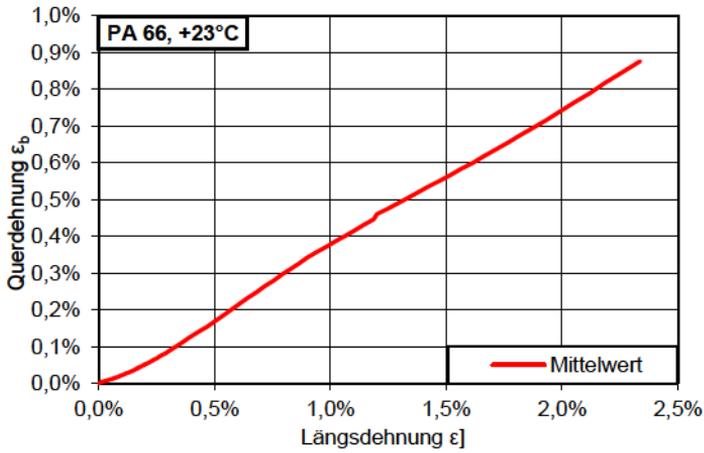
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion



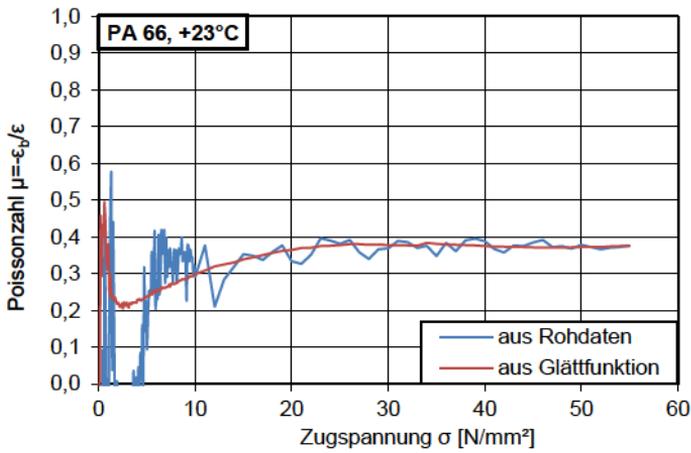
$$y = 5908247310,4x^5 - 433653785,1x^4 + 10404012,7x^3 - 129611,9x^2 + 3470,7x$$



Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66, +23°C



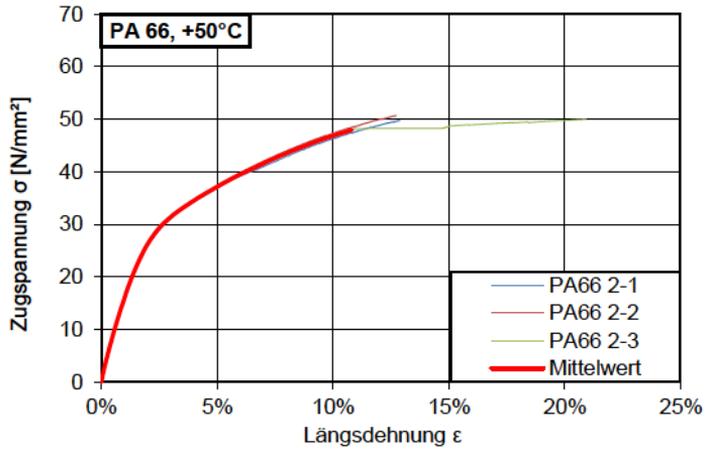
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PA66, +23°C



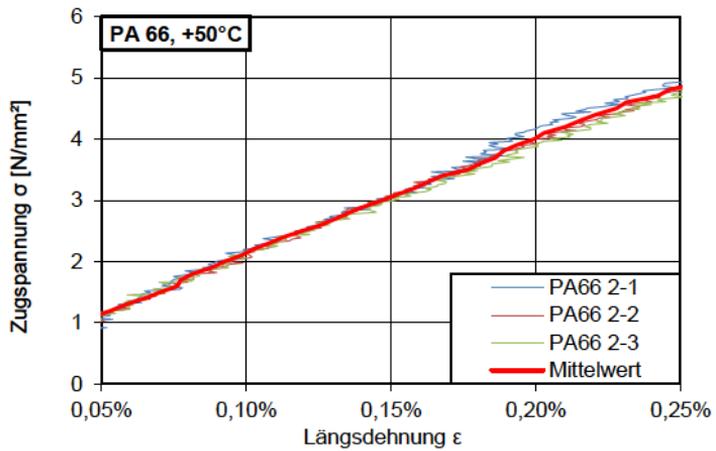
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PA66, +23°C

PA66, +50°C

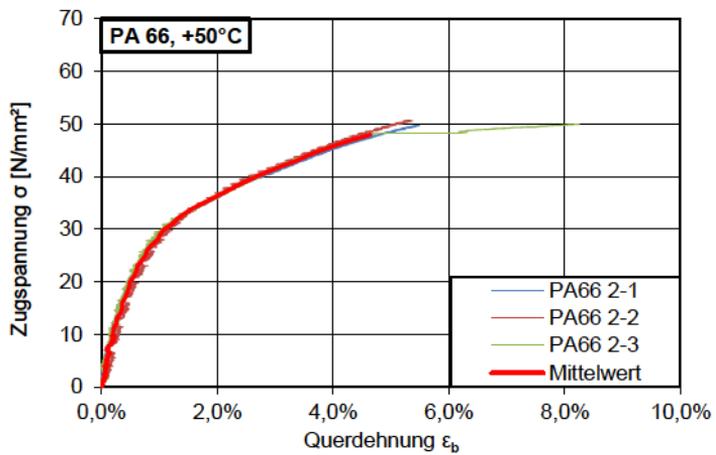
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66, +50°C

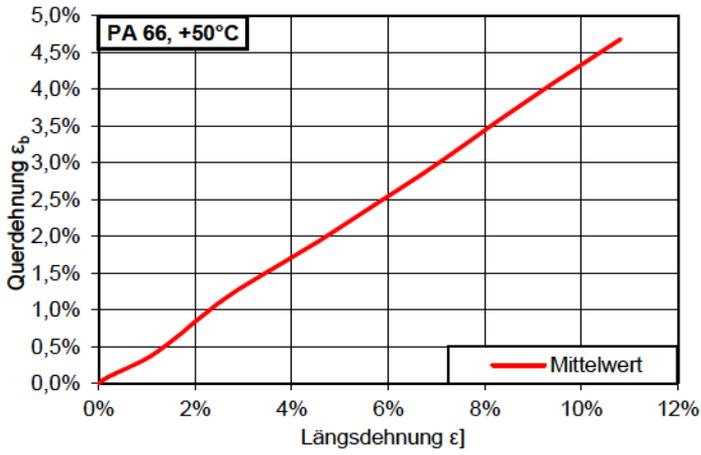


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

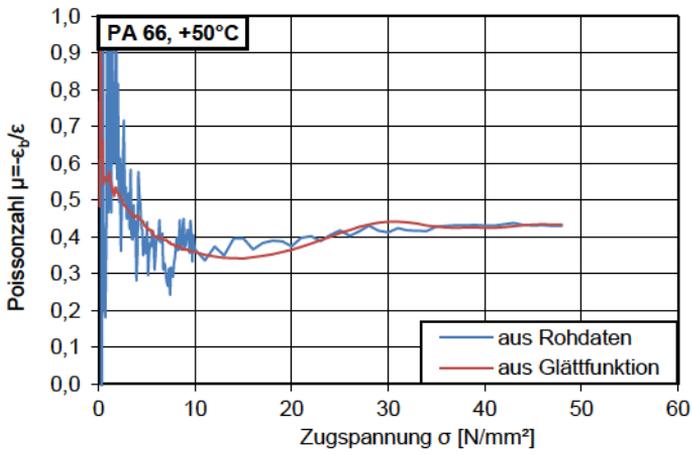


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66, +50°C





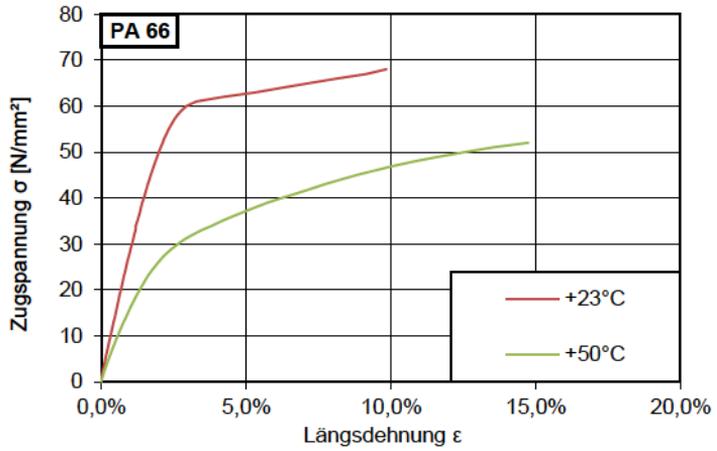
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PA66, +50°C



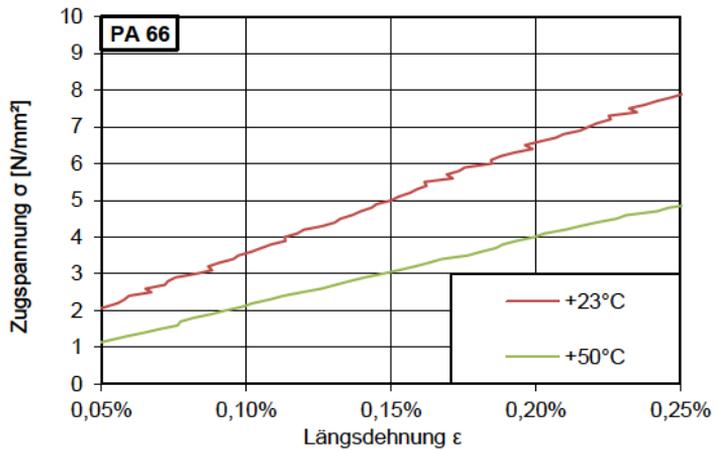
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PA66, +50°C

PA66, Temperaturvergleich

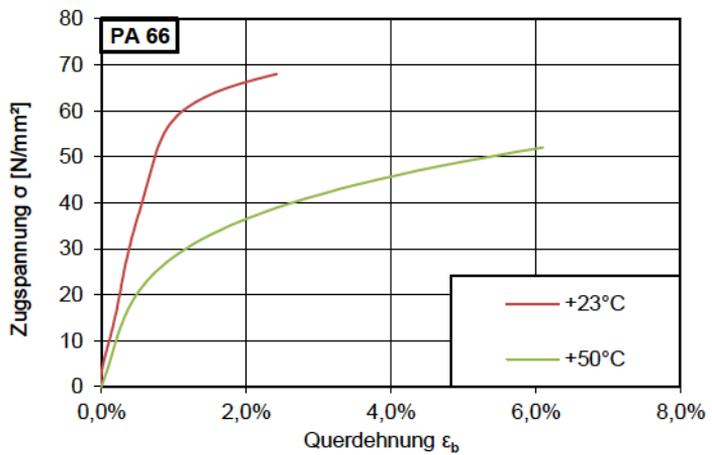
Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PA66



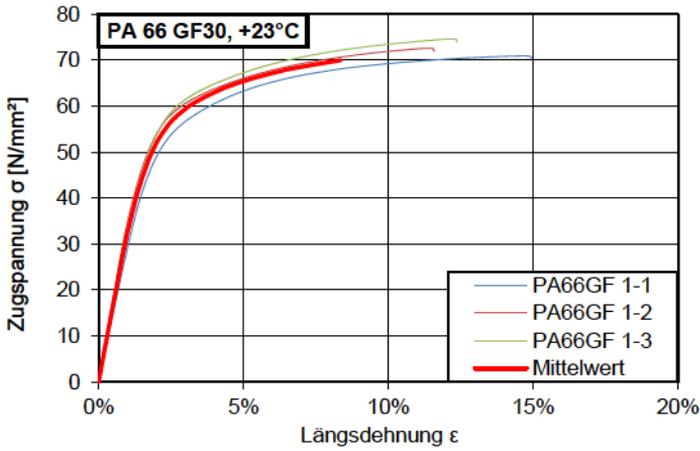
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



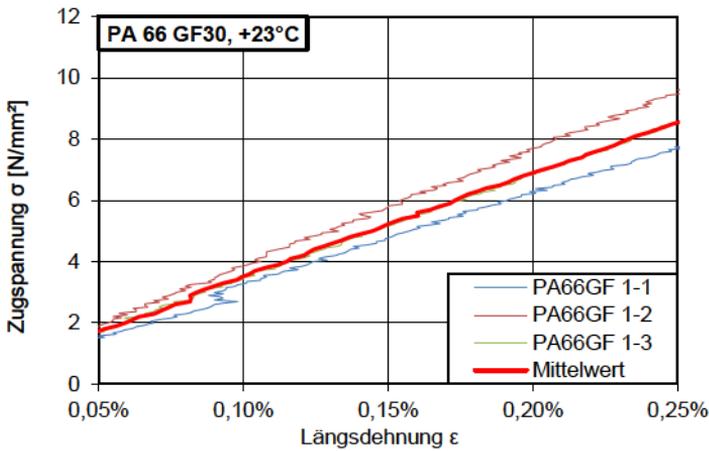
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66



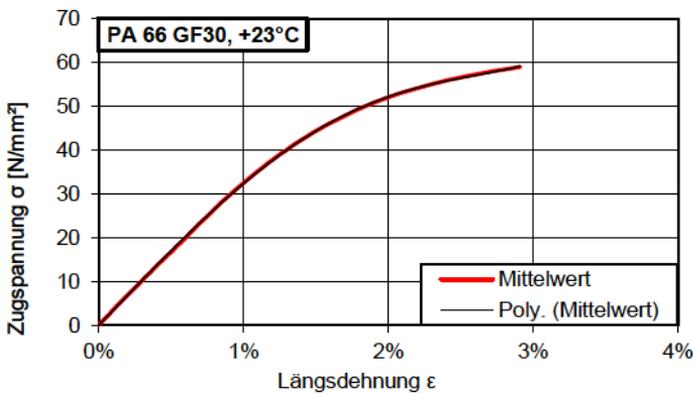
PA66 GF30, +23°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66 GF30, +23°C



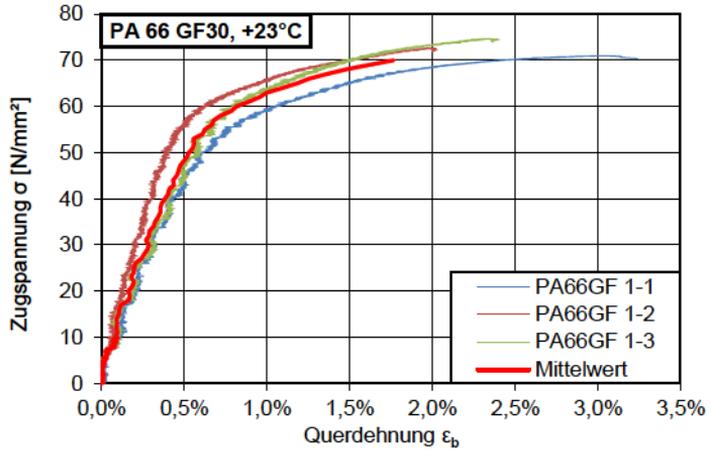
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66 GF30, +23°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



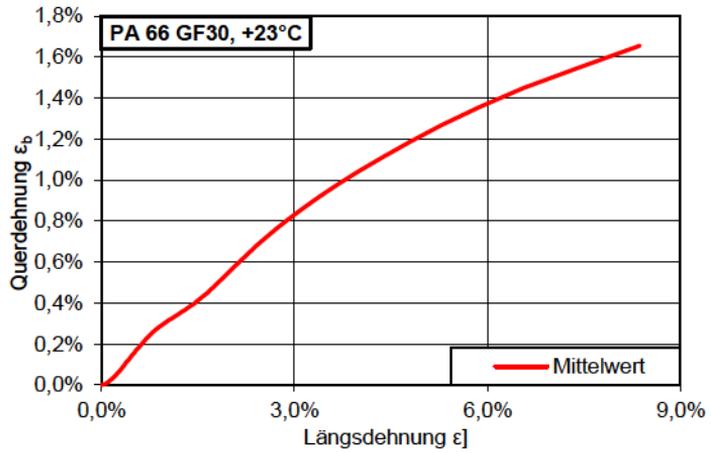
Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66 GF30, +23°C
Mittelwertkurve und polyno-
mische Ersatzfunktion

$$y = 1563036625,4x^5 - 16167915,5x^4 - 2857230,8x^3 + 10999,8x^2 + 3410,4x$$

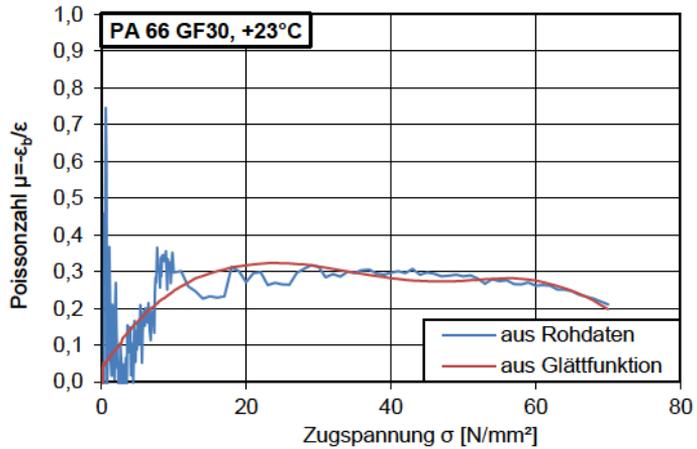
Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66 GF30, +23°C



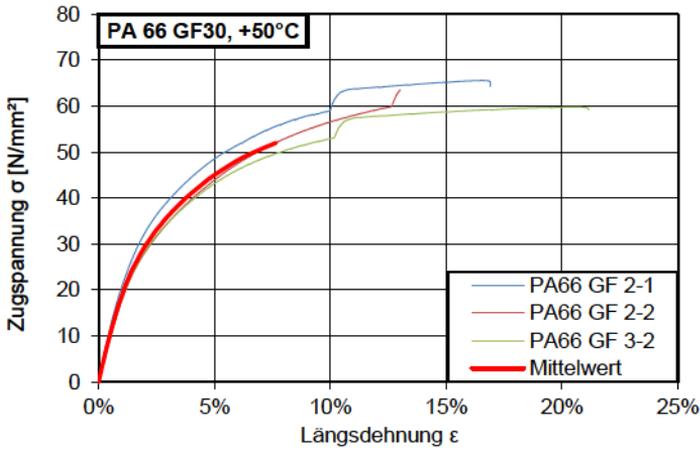
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PA66 GF30, +23°C



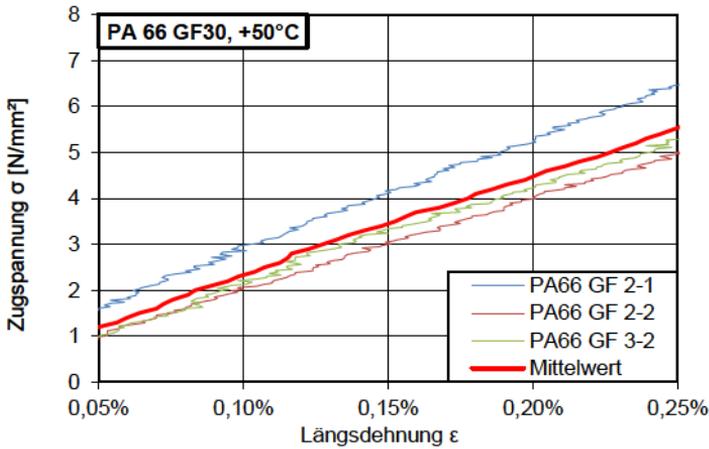
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PA66 GF30, +23°C



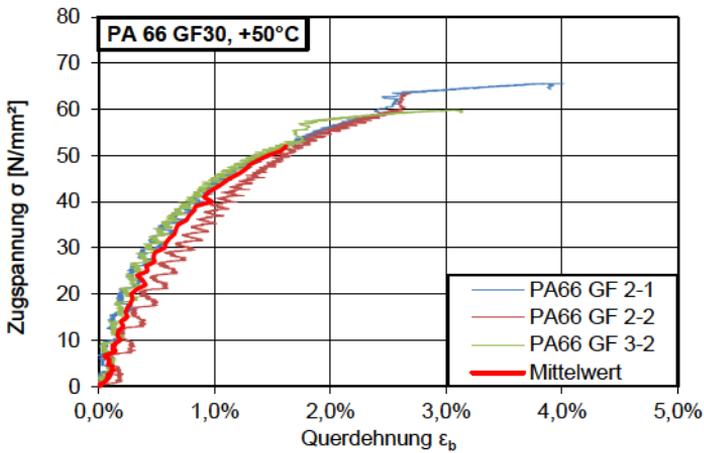
PA66 GF30, +50°C



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66 GF30, +50°C

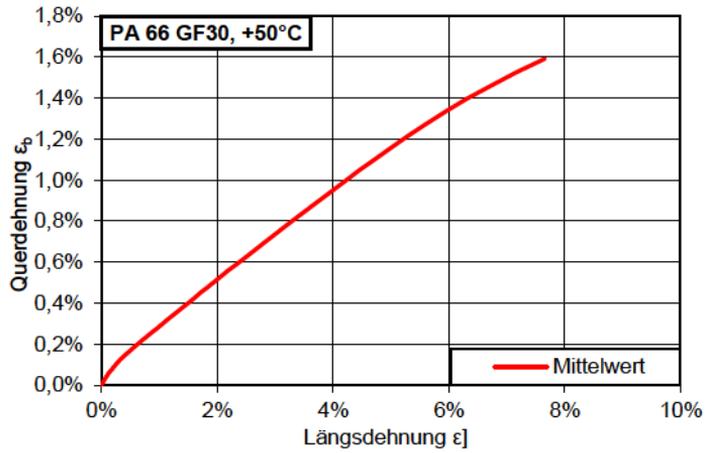


Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66 GF30, +50°C
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%

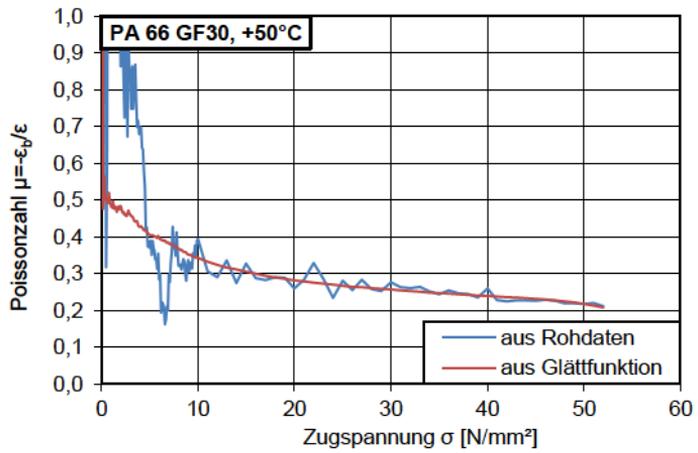


Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66 GF30, +50°C

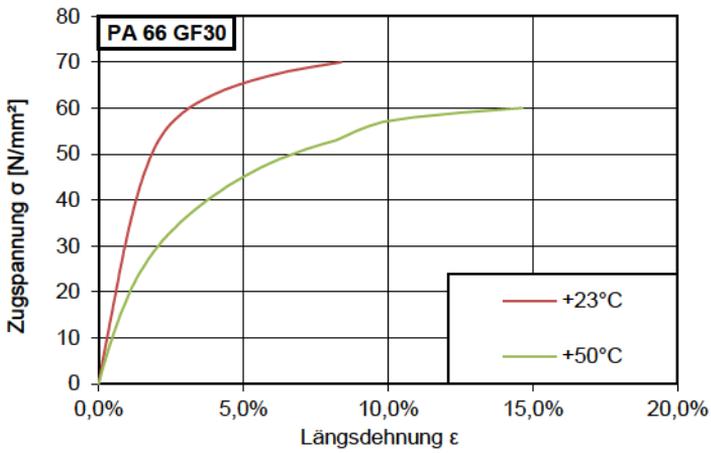
Längsdehnung-
Querdehnung- Diagramm
PA66 GF30, +50°C



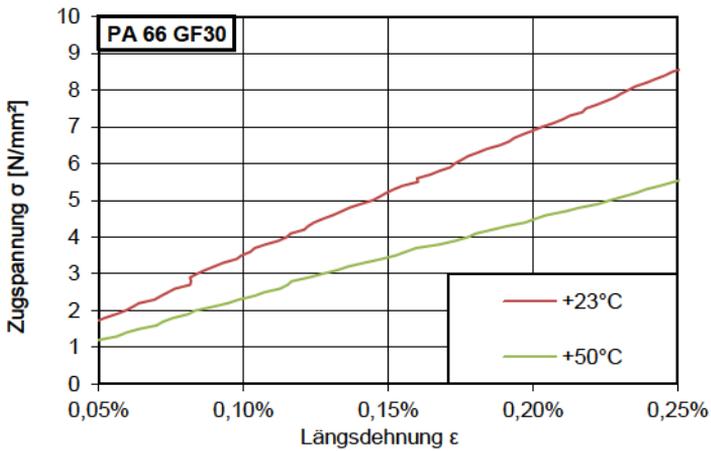
Zugspannung-Poissonzahl-
Diagramm
PA66 GF30, +50°C



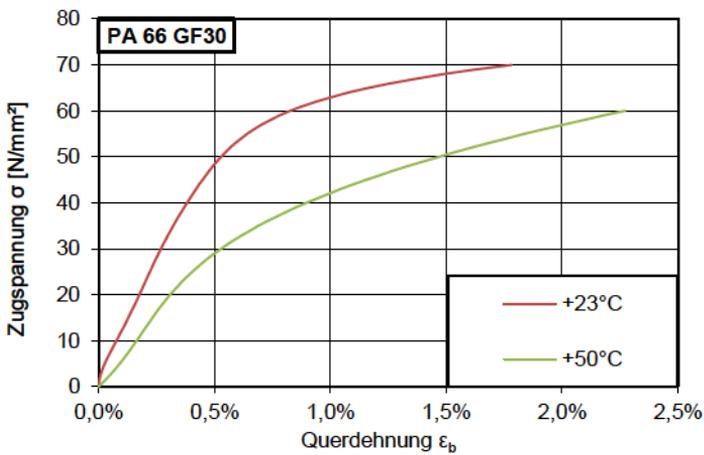
PA66 GF30, Temperaturvergleich



Längsdehnung-
Zugspannung-Diagramm
PA66 GF30



Längsdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66 GF30
Dehnungsbereich 0,05% bis
0,25%



Querdehnung-
Zugspannung- Diagramm
PA66 GF30

Anlage 2

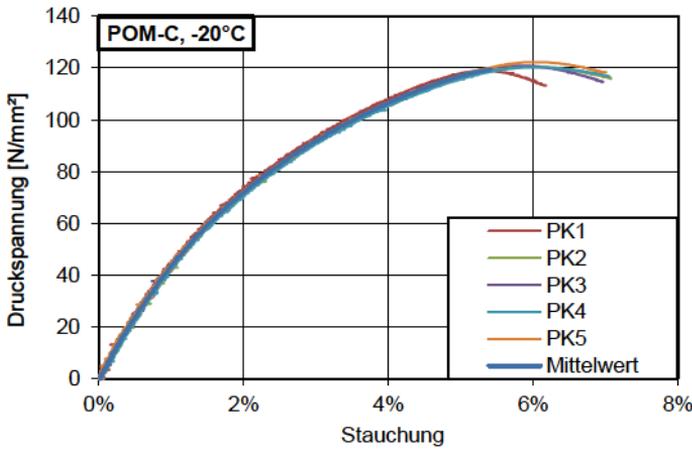
Ergebnisse der Materialuntersuchungen an Kunststoffen bei uniaxialer Druckkraftbeanspruchung

Inhalt

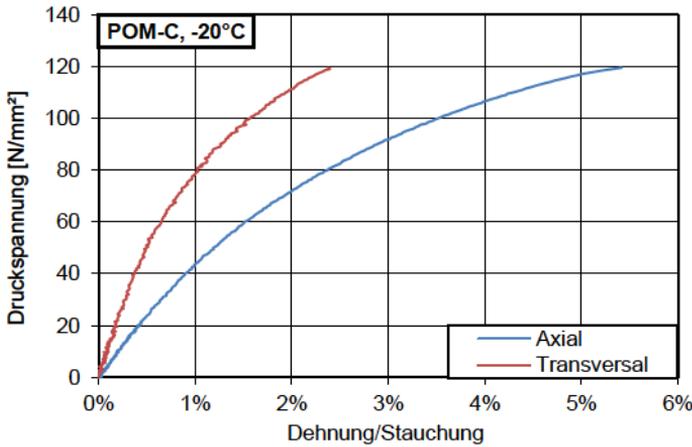
POM-C, -20°C	299
POM-C, +23°C	300
POM-C, +50°C	301
POM-C GF25 - T, -20°C	302
POM-C GF25 - T, +23°C	303
POM-C GF25 - T, +50°C	304
POM-C GF25 - II, -20°C	305
POM-C GF25 - II, +23°C	306
POM-C GF25 - II, +50°C	307
PET, -20°C	308
PET, +23°C	309
PET, +50°C	310
PEEK GF25 - T, -20°C	311
PEEK GF25 - T, +23°C	312
PEEK GF25 - T, +50°C	313
PEEK GF25 – II, -20°C	314
PEEK GF25 – II, +23°C	315
PEEK GF25 – II, +50°C	316
PEI, -20°C	317
PEI, +23°C	318
PEI, +50°C	319
PA6, -20°C	320
PA6, +23°C	321
PA6, +50°C	322
PA6 GF30 - T, -20°C	323
PA6 GF30 - T, +23°C	324
PA6 GF30 - T, +50°C	325
PA6 GF30 - II, -20°C	326
PA6 GF30 - II, +23°C	327
PA6 GF30 - II, +50°C	328
PA66, -20°C	329
PA66, +23°C	330
PA66, +50°C	331
PA66 GF30 - T, -20°C	332
PA66 GF30 - T, +23°C	333
PA66 GF30 - T, +50°C	334
PA66 GF30 - II, -20°C	335
PA66 GF30 - II, +23°C	336

PA66 GF30 - II, +50°C	337
Temperaturvergleich	338
Zyklische Belastungsversuche, +23°C	344

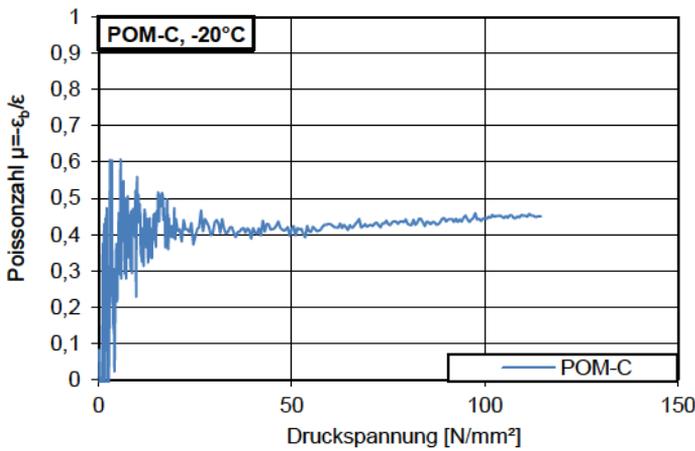
POM-C, -20°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
POM-C, -20°C



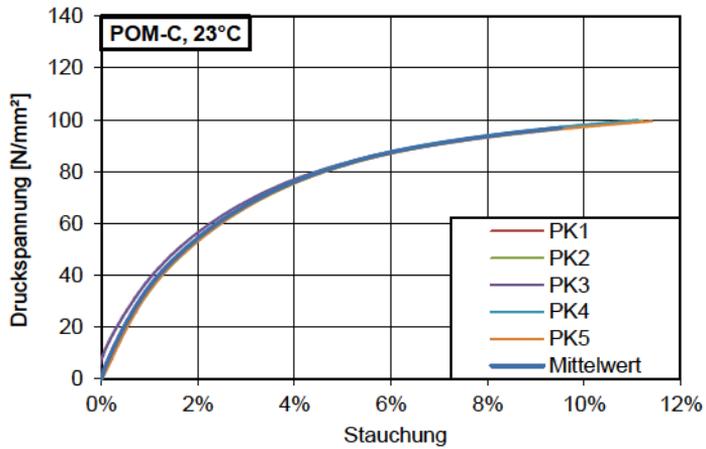
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
POM-C, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



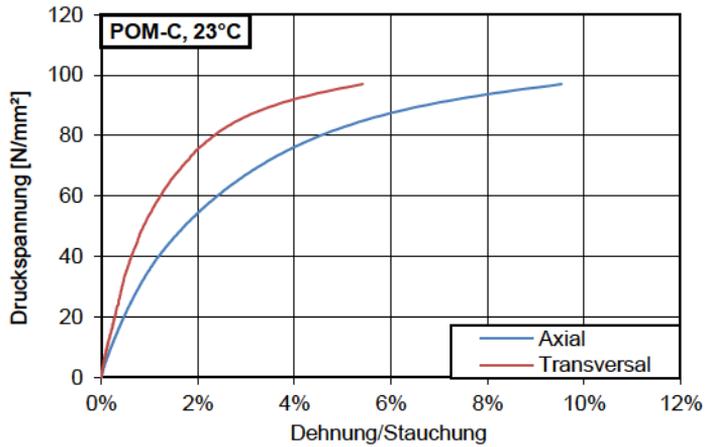
Druckspannung-Poissonszahl-Diagramm
POM-C, -20°C

POM-C, +23°C

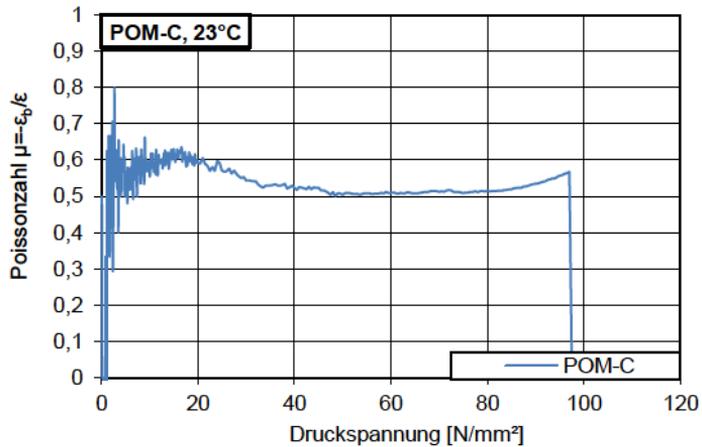
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
POM-C, +23°C



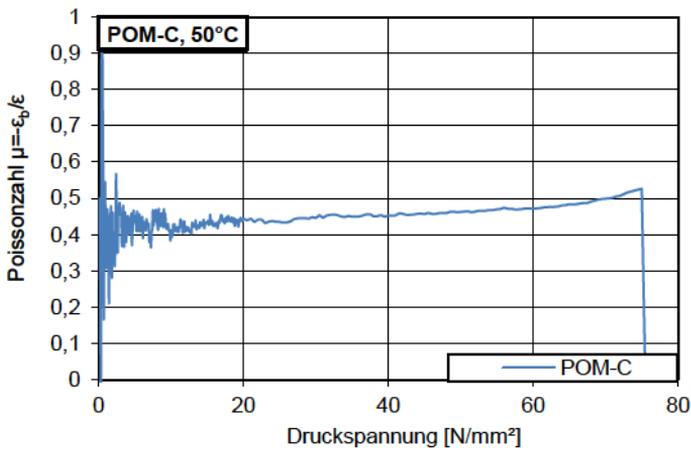
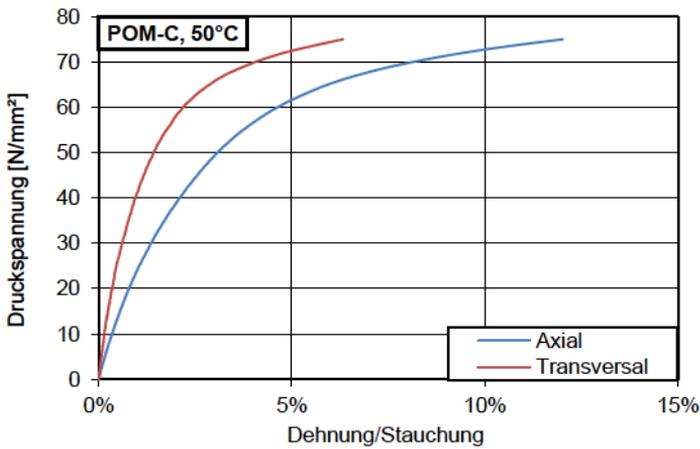
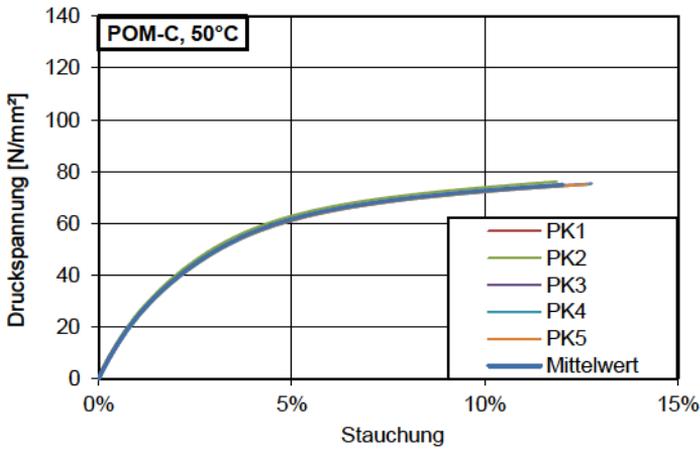
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
POM-C, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
POM-C, +23°C

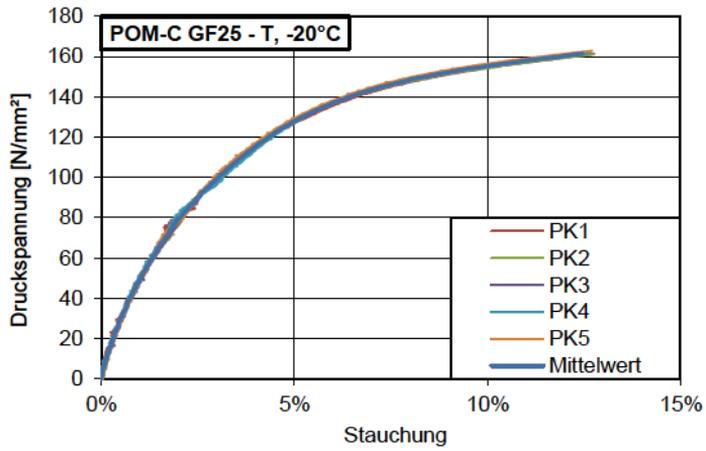


POM-C, +50°C

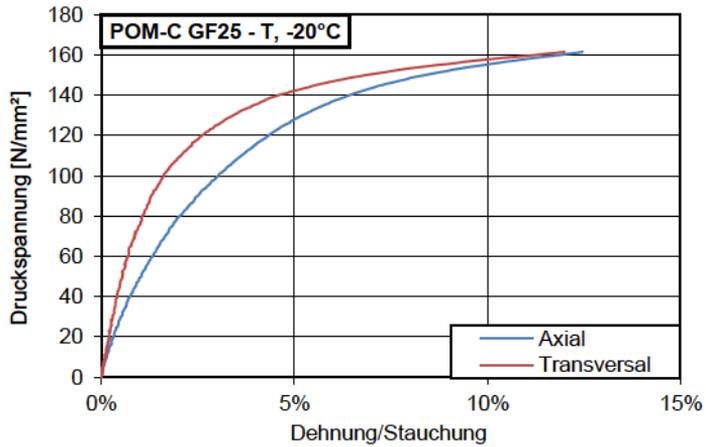


POM-C GF25 - T, -20°C

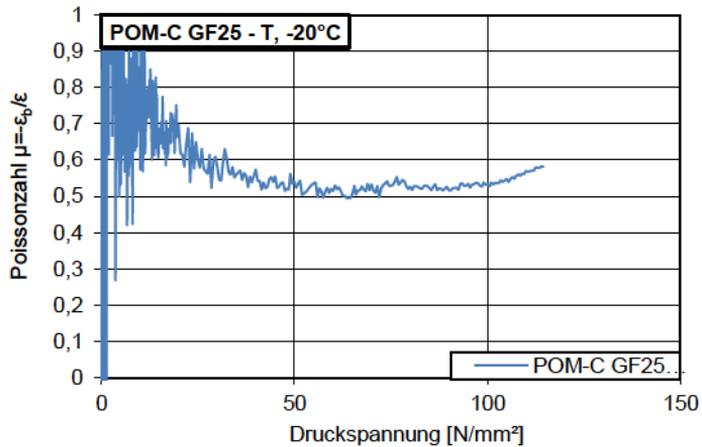
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
POM-C GF25 - T, -20°C



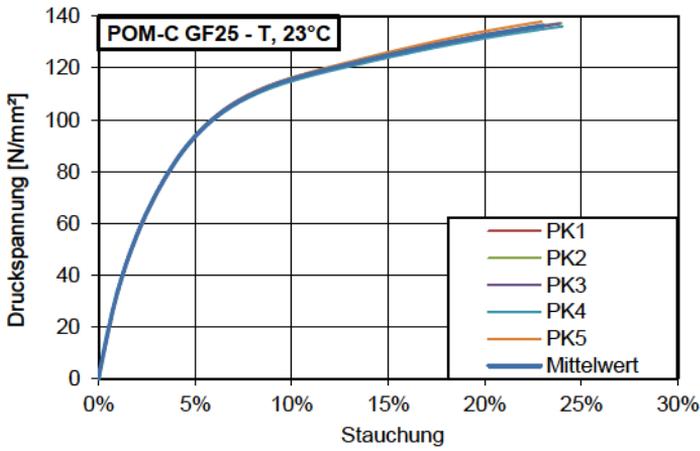
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
POM-C GF25 - T, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



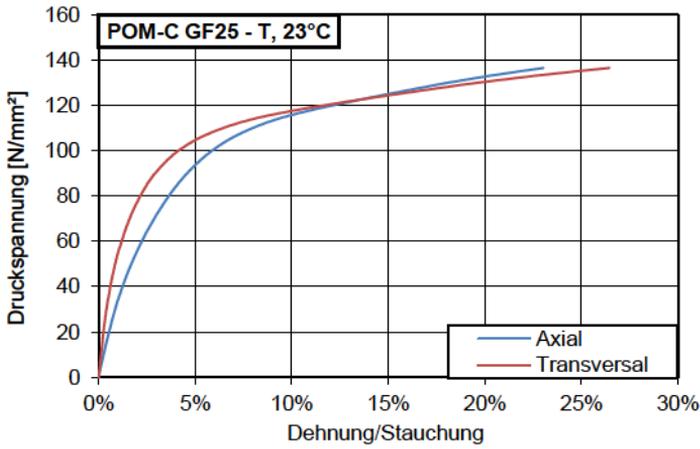
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
POM-C GF25 - T, -20°C



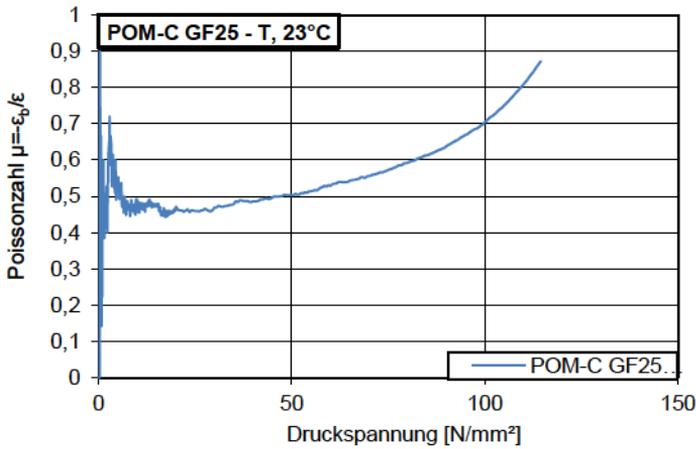
POM-C GF25 - T, +23°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
POM-C GF25 - T, +23°C



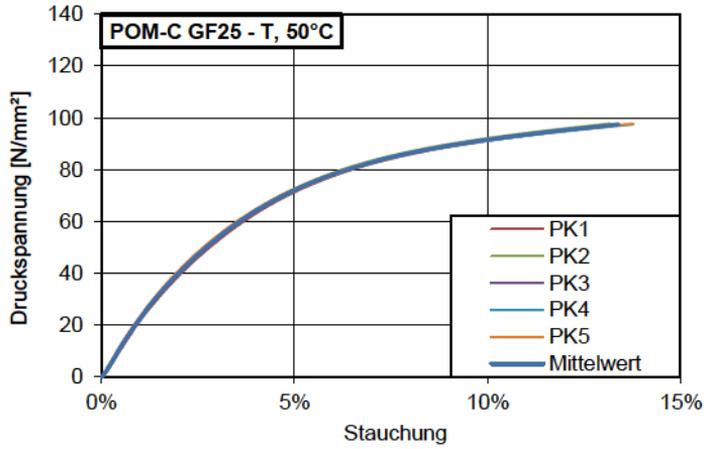
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
POM-C GF25 - T, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



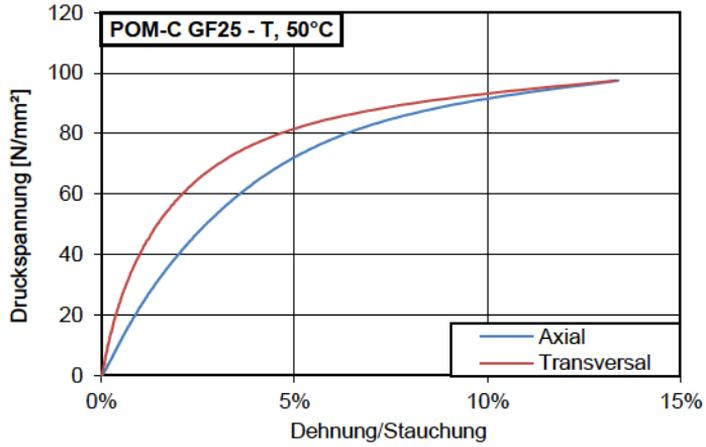
Druckspannung-Poissonszahl-Diagramm
POM-C GF25 - T, +23°C

POM-C GF25 - T, +50°C

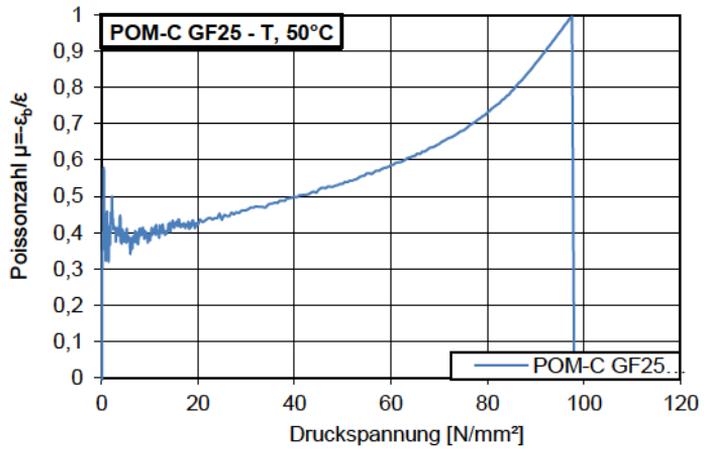
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
POM-C GF25 - T, +50°C



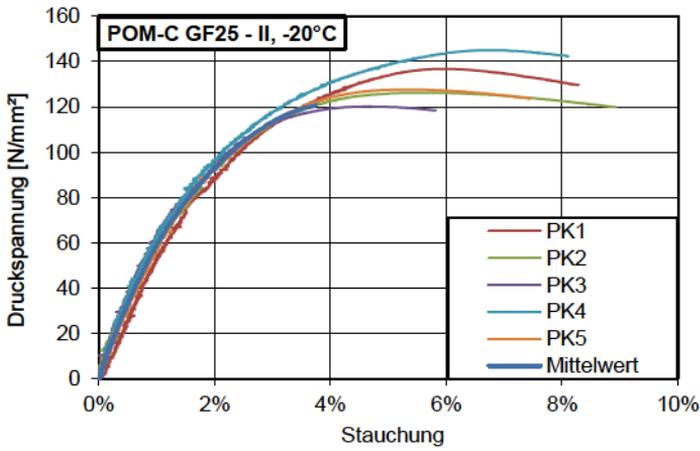
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
POM-C GF25 - T, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



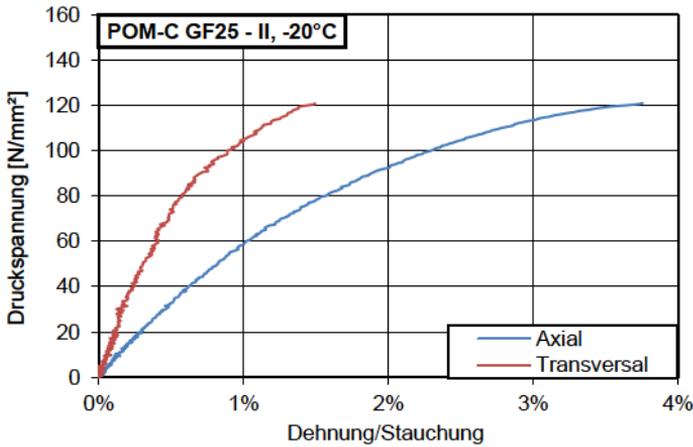
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
POM-C GF25 - T, +50°C



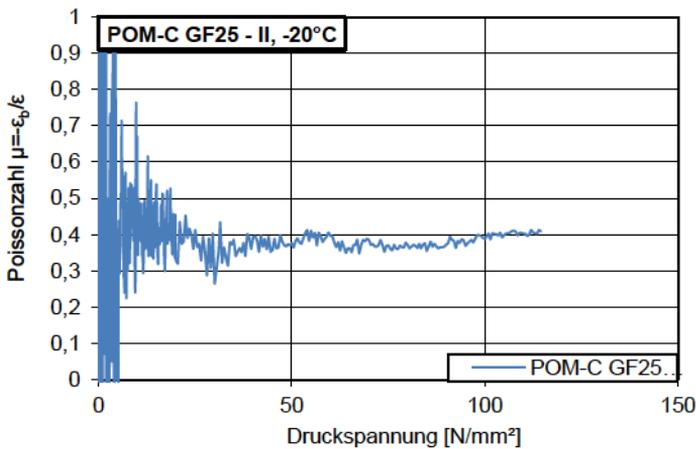
POM-C GF25 - II, -20°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
POM-C GF25 - II, -20°C



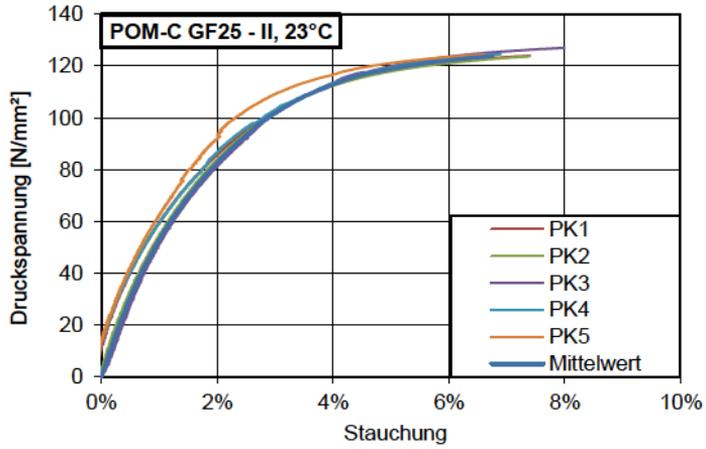
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
POM-C GF25 - II, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



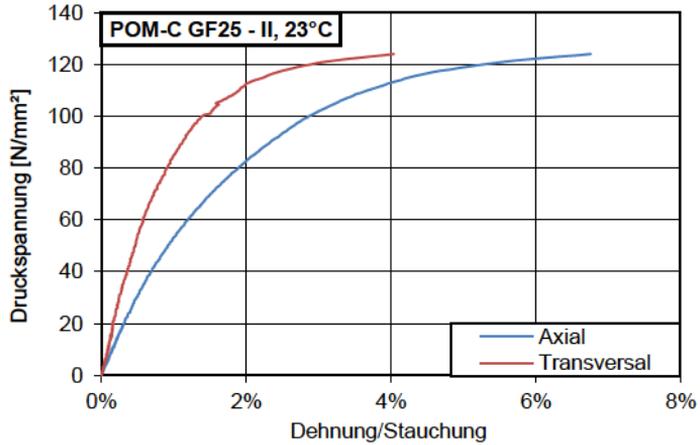
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
POM-C GF25 - II, -20°C

POM-C GF25 - II, +23°C

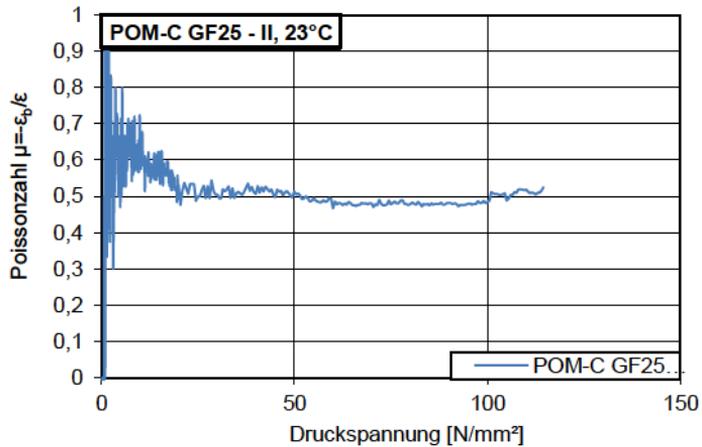
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
POM-C GF25 - II, +23°C



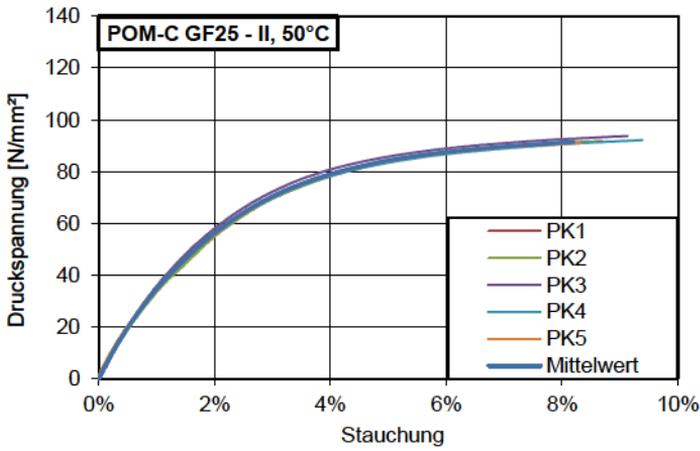
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
POM-C GF25 - II, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



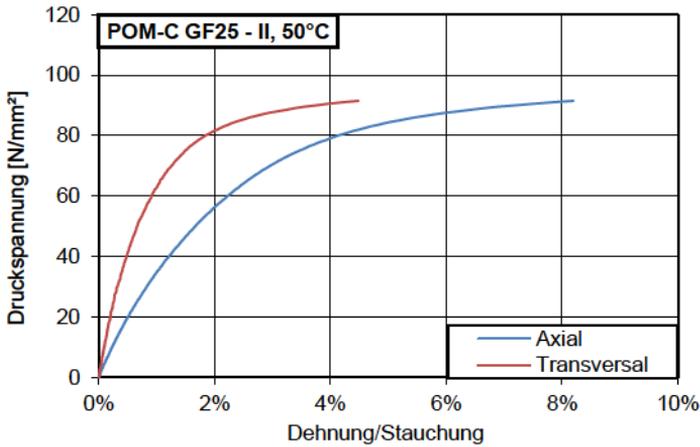
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
POM-C GF25 - II, +23°C



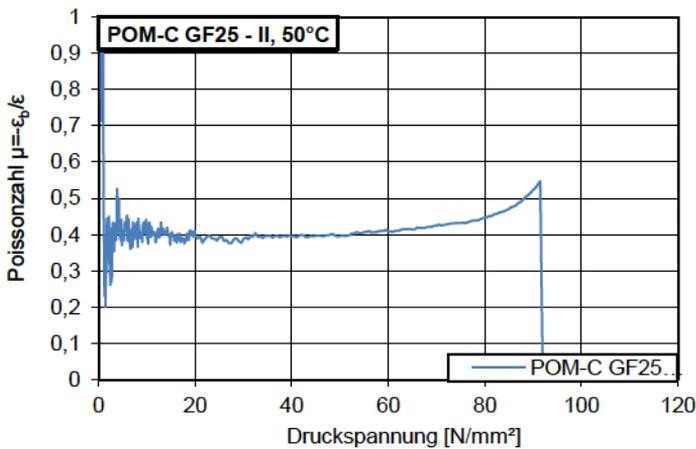
POM-C GF25 - II, +50°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
POM-C GF25 - II, +50°C



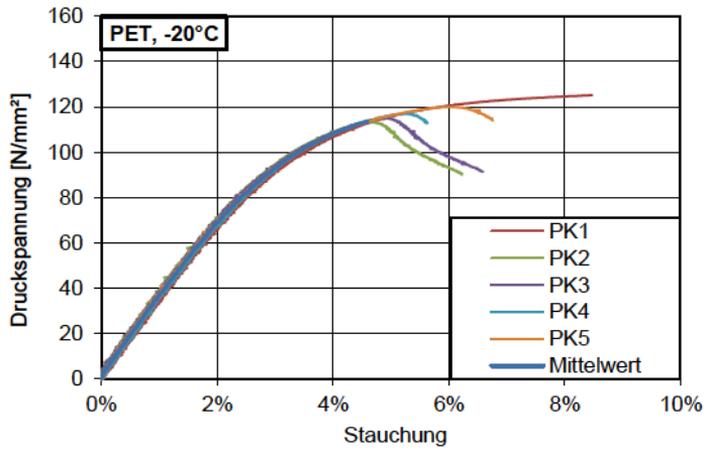
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
POM-C GF25 - II, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



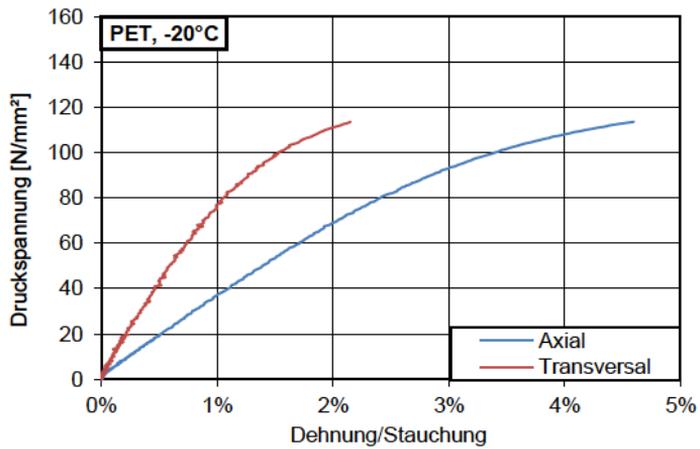
Druckspannung-Poissonszahl-Diagramm
POM-C GF25 - II, +50°C

PET, -20°C

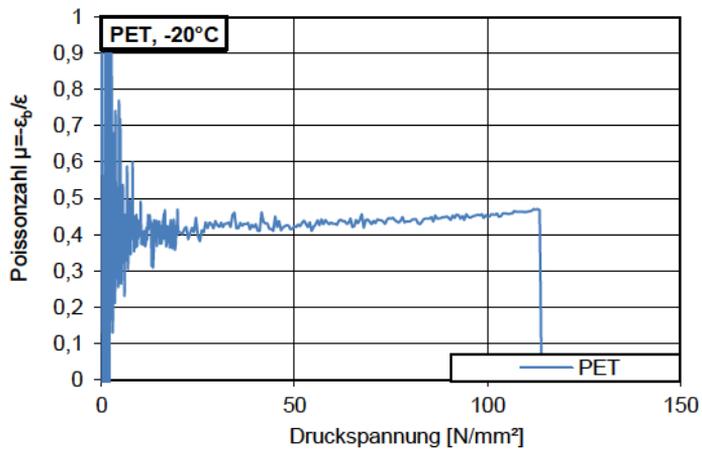
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PET, -20°C



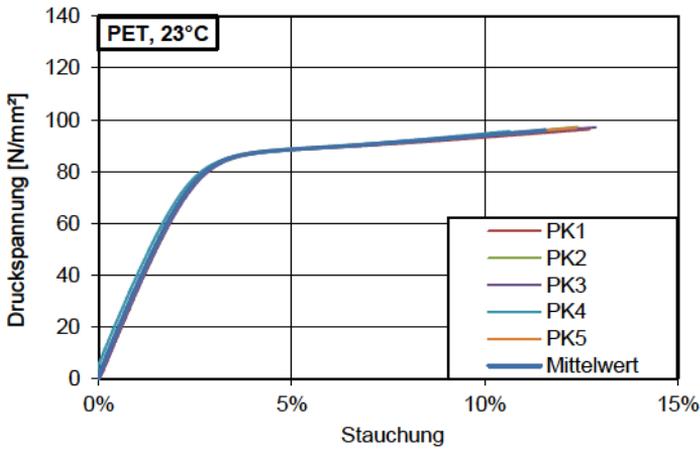
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PET, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



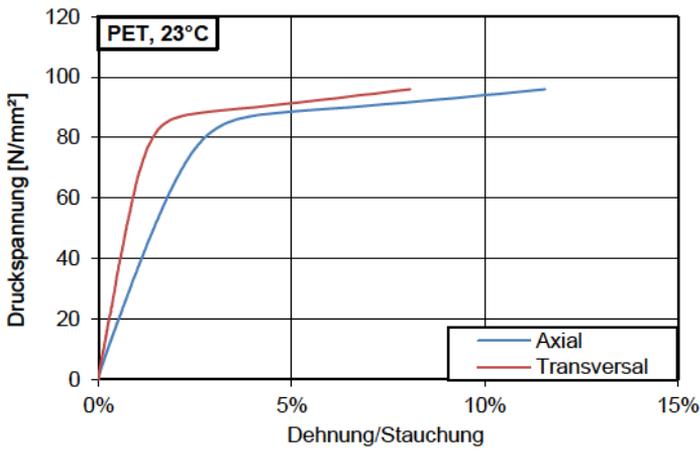
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PET, -20°C



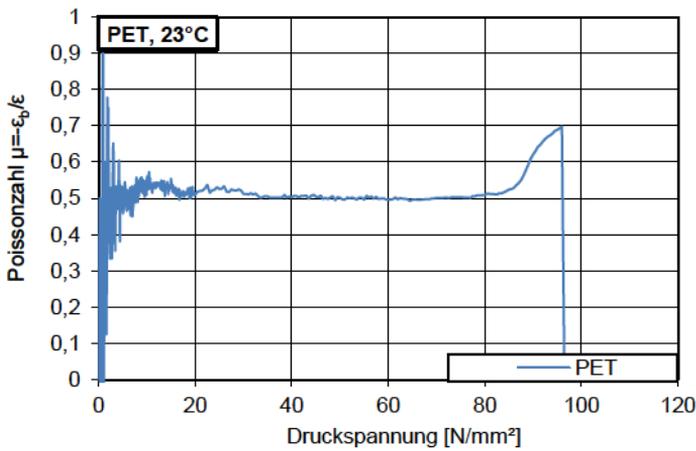
PET, +23°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PET, +23°C



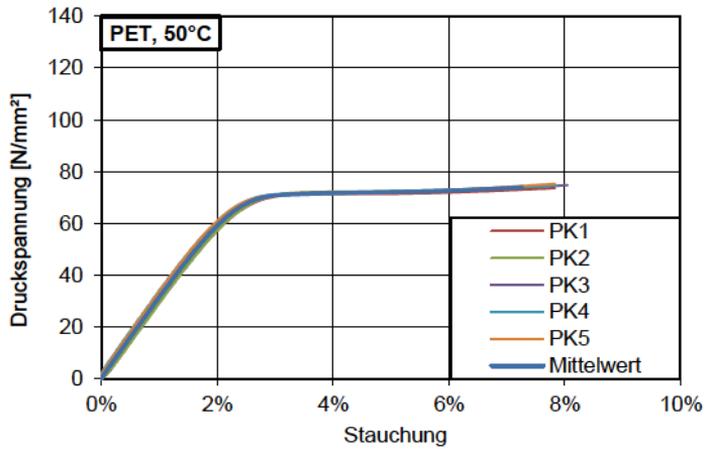
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PET, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



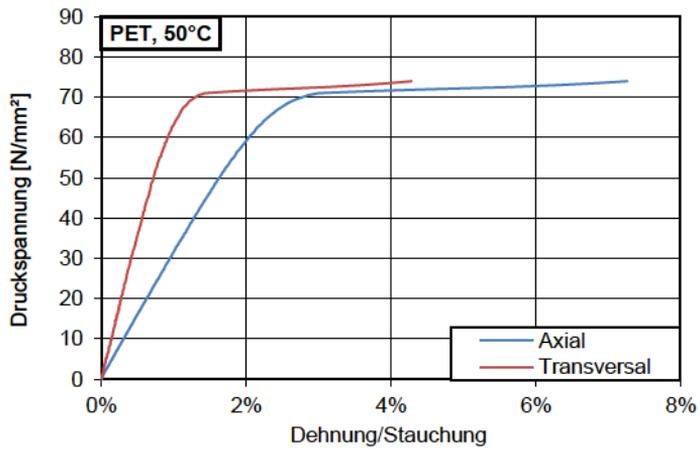
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PET, +23°C

PET, +50°C

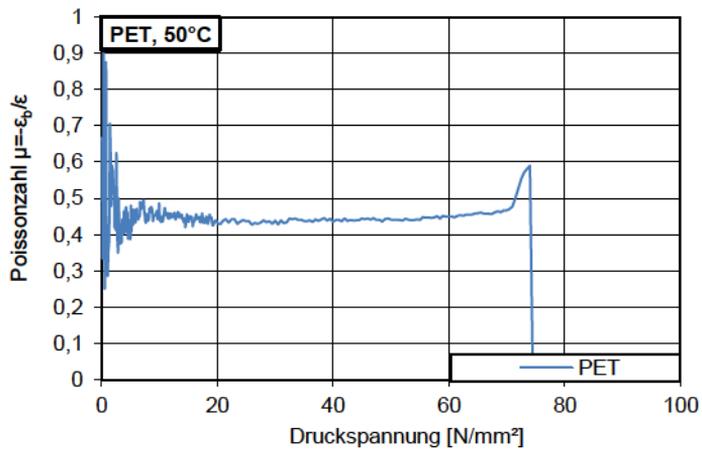
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PET, +50°C



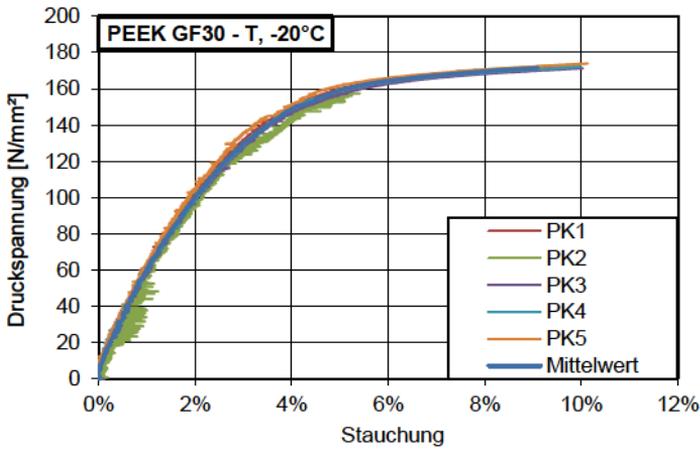
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PET, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



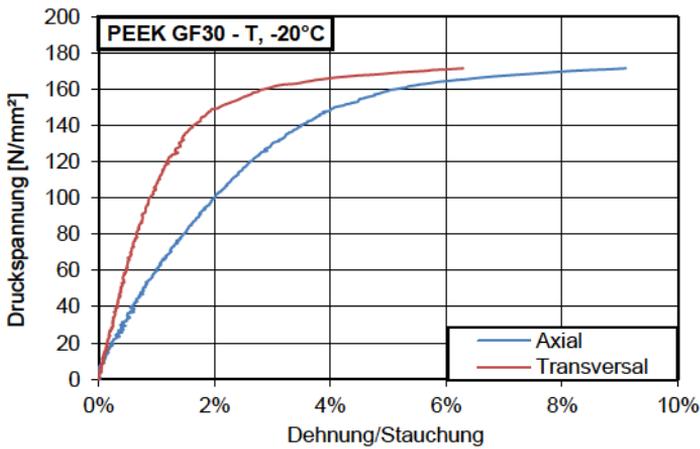
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PET, +50°C



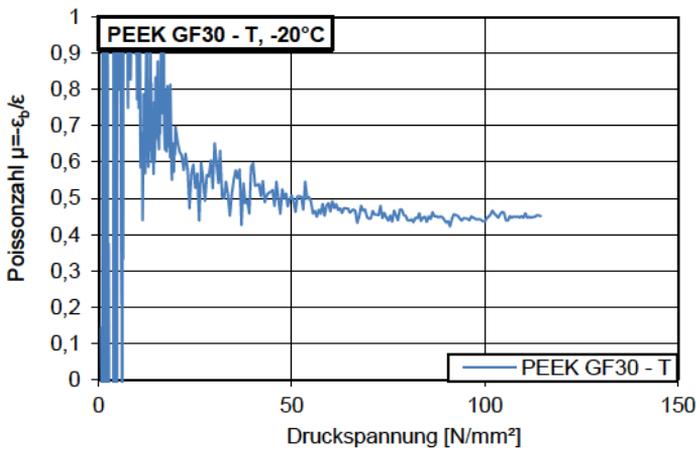
PEEK GF25 - T, -20°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEEK GF30 - T, -20°C



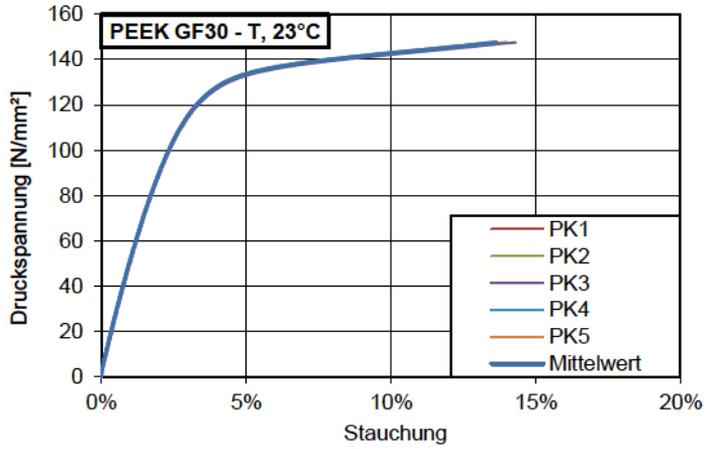
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEEK GF30 - T, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



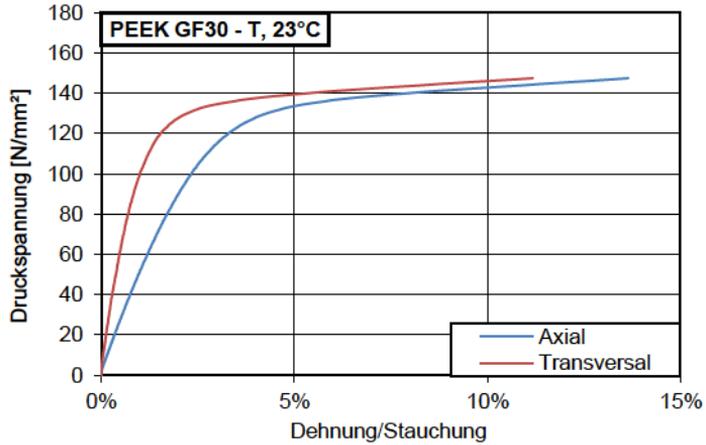
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PEEK GF30 - T, -20°C

PEEK GF25 - T, +23°C

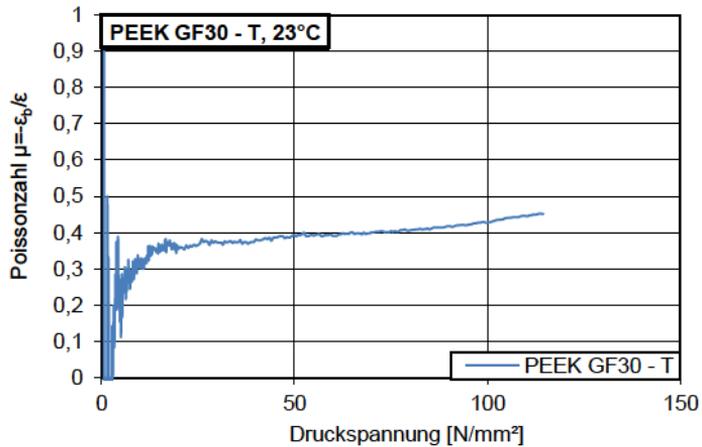
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PEEK GF30 - T, +23°C



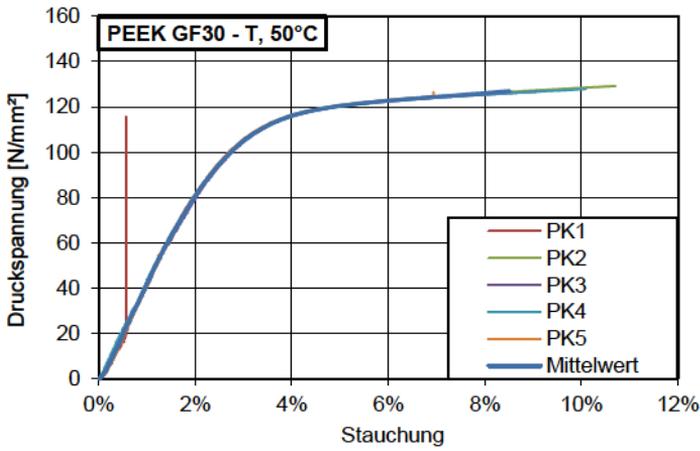
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PEEK GF30 - T, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



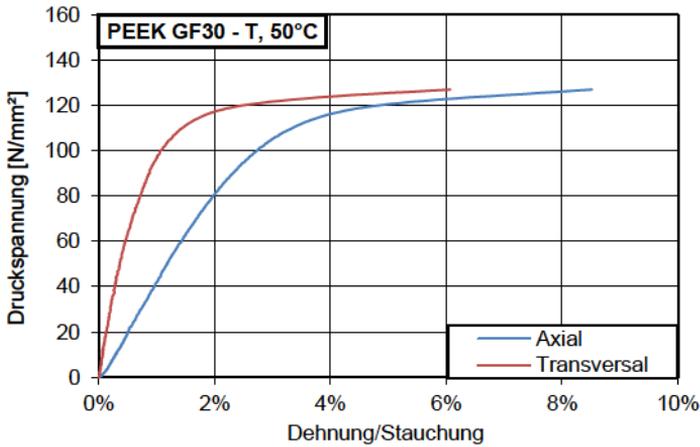
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PEEK GF30 - T, +23°C



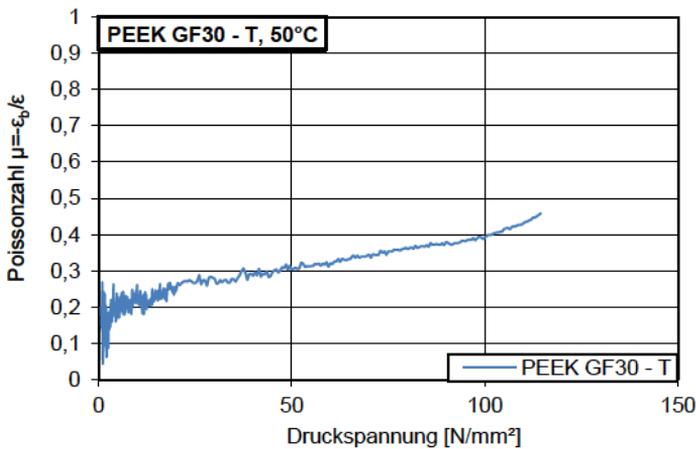
PEEK GF25 - T, +50°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEEK GF30 - T, +50°C



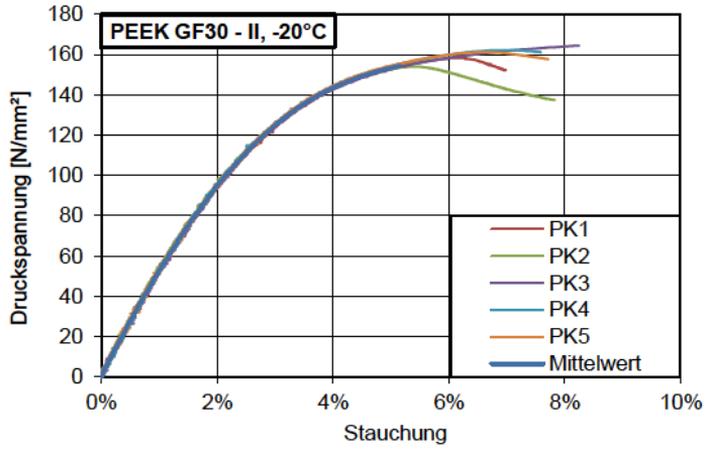
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEEK GF30 - T, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



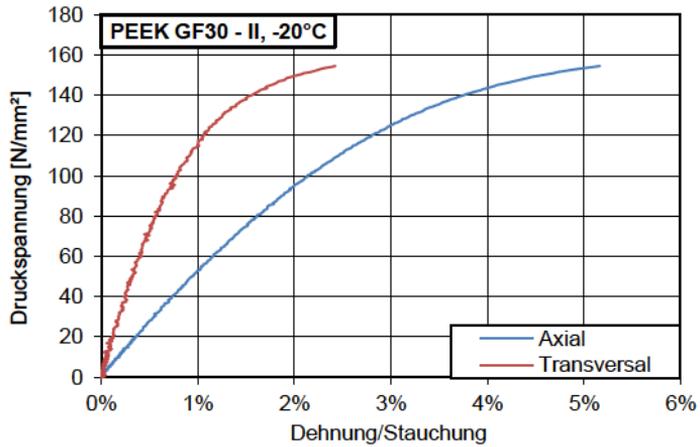
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PEEK GF30 - T, +50°C

PEEK GF25 – II, -20°C

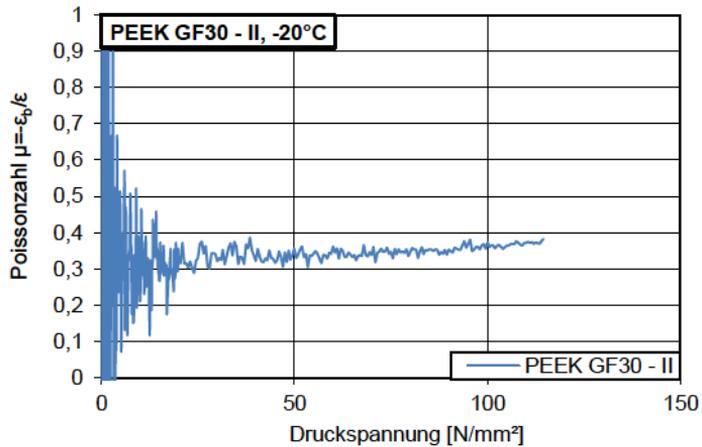
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PEEK GF30 - II, -20°C



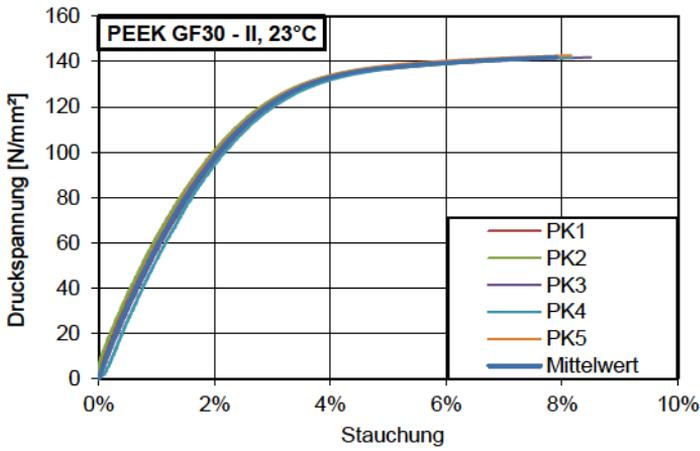
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PEEK GF30 - II, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



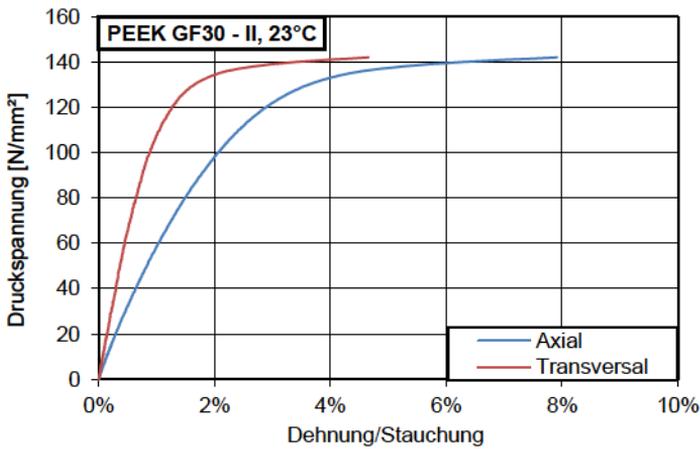
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PEEK GF30 - II, -20°C



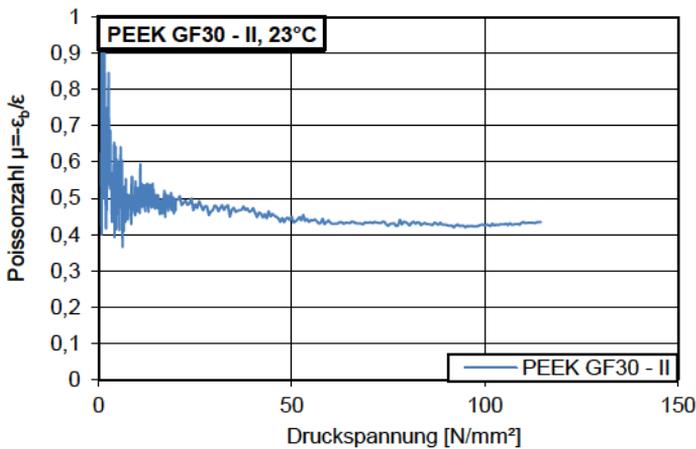
PEEK GF25 – II, +23°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEEK GF30 - II, +23°C



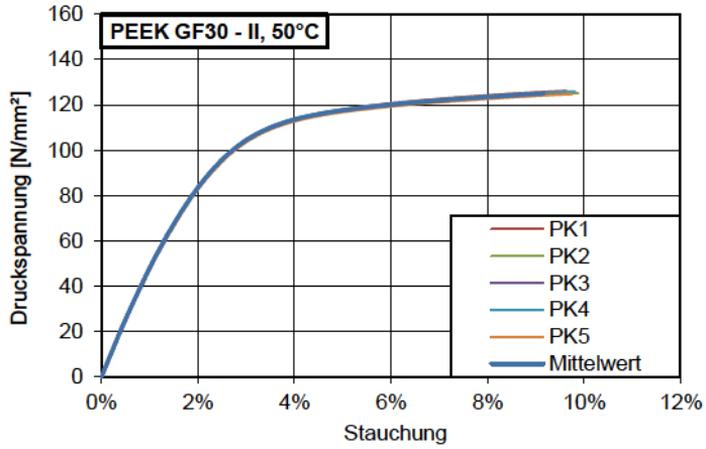
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEEK GF30 - II, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



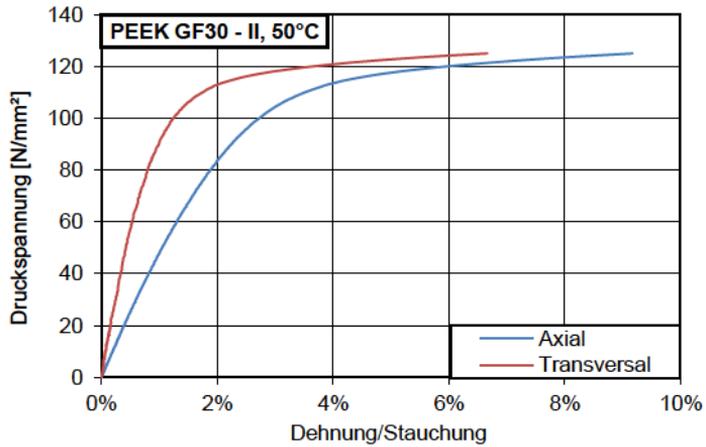
Druckspannung-Poissonszahl-Diagramm
PEEK GF30 - II, +23°C

PEEK GF25 – II, +50°C

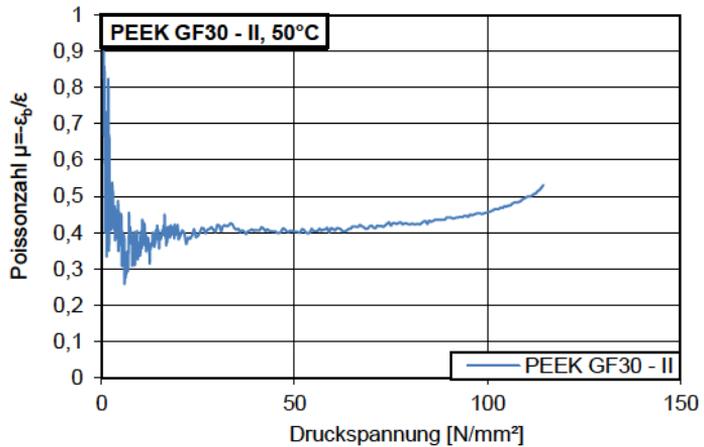
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PEEK GF30 - II, +50°C



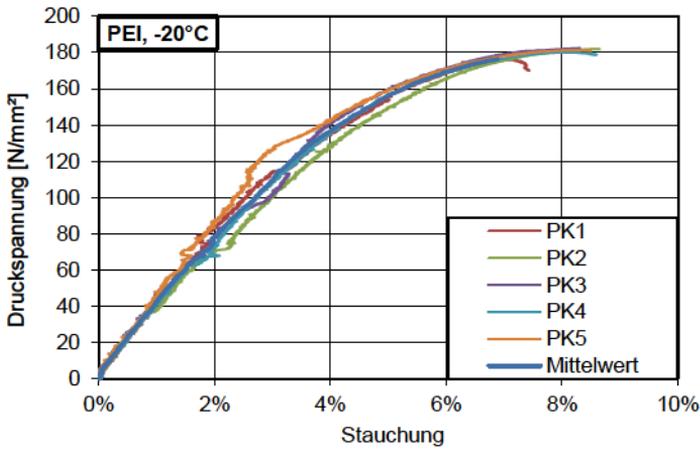
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PEEK GF30 - II, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



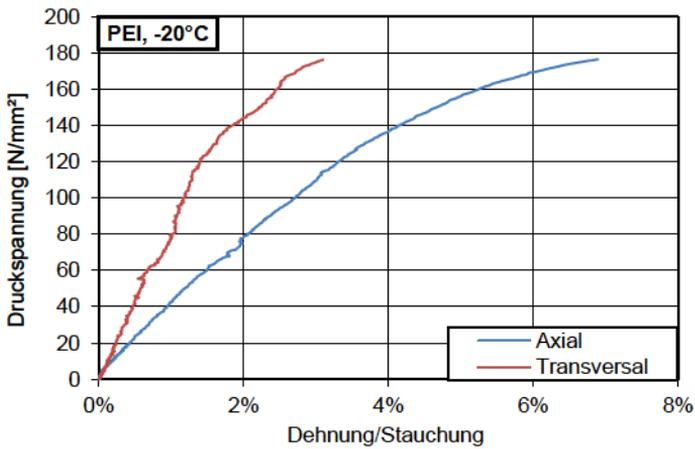
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PEEK GF30 - II, +50°C



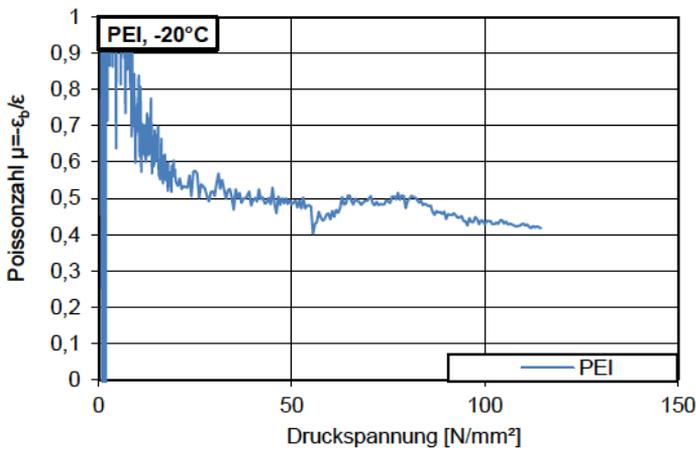
PEI, -20°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEI, -20°C



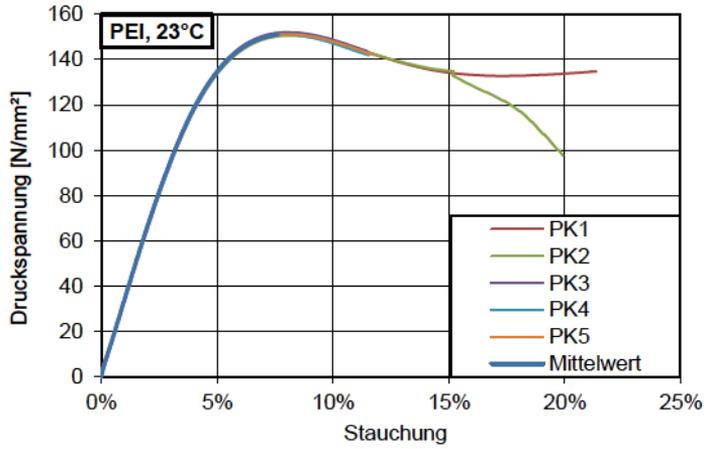
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEI, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



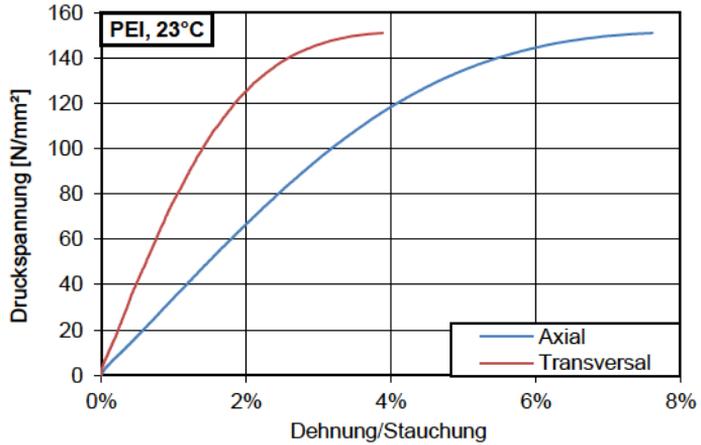
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PEI, -20°C

PEI, +23°C

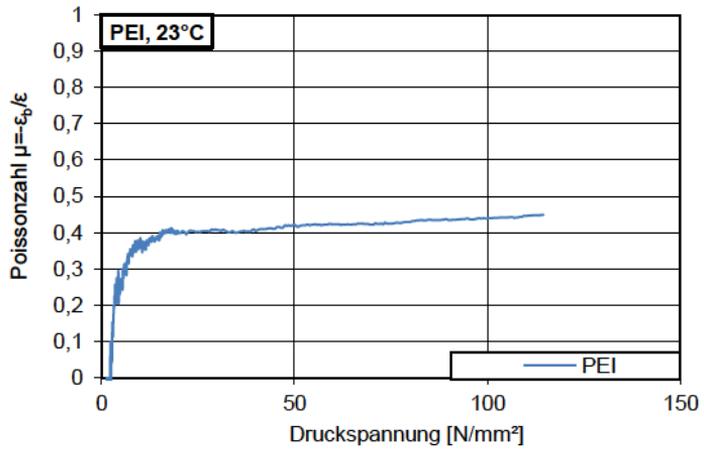
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PEI, +23°C



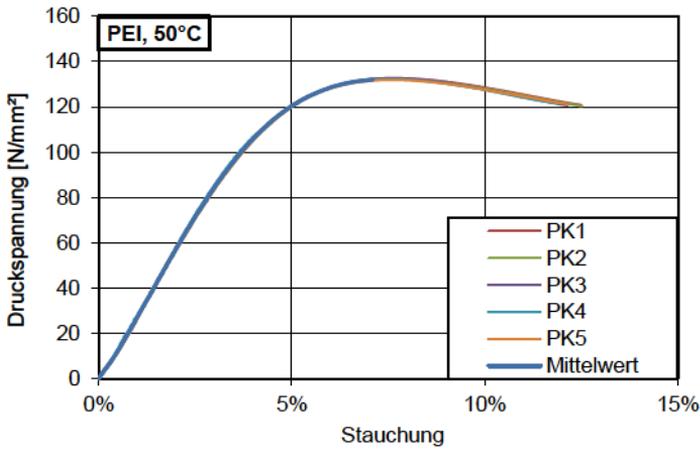
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PEI, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



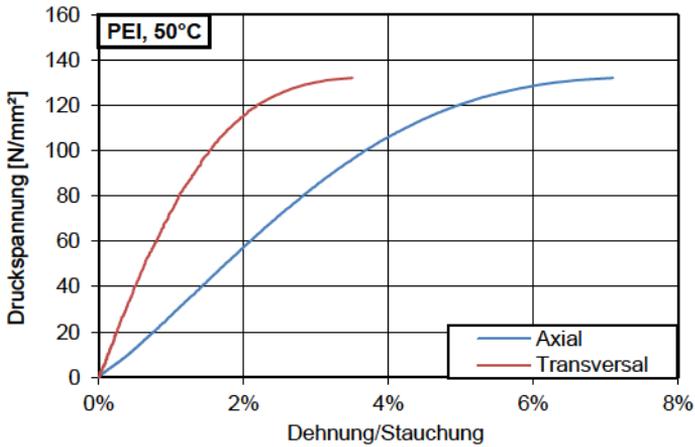
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PEI, +23°C



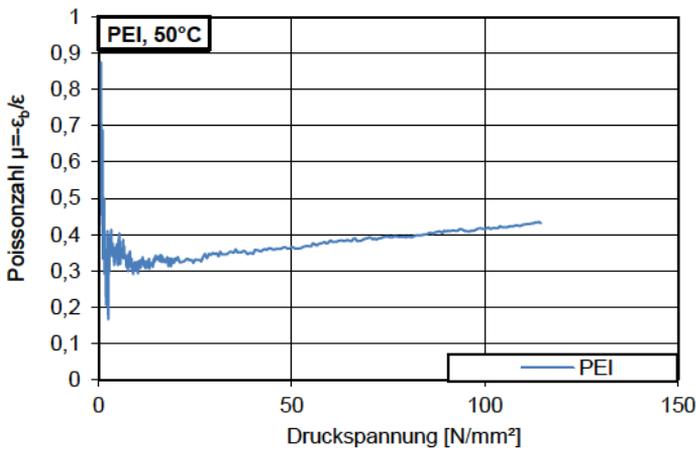
PEI, +50°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEI, +50°C



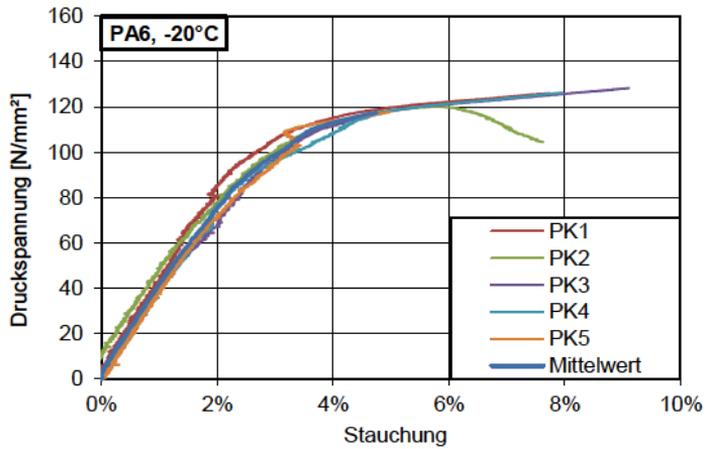
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PEI, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



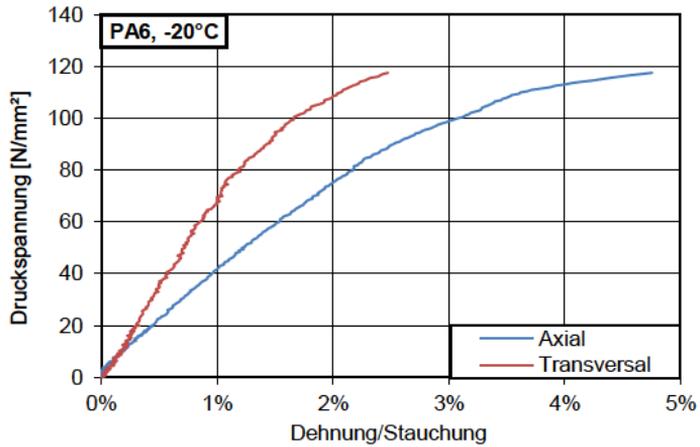
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PEI, +50°C

PA6, -20°C

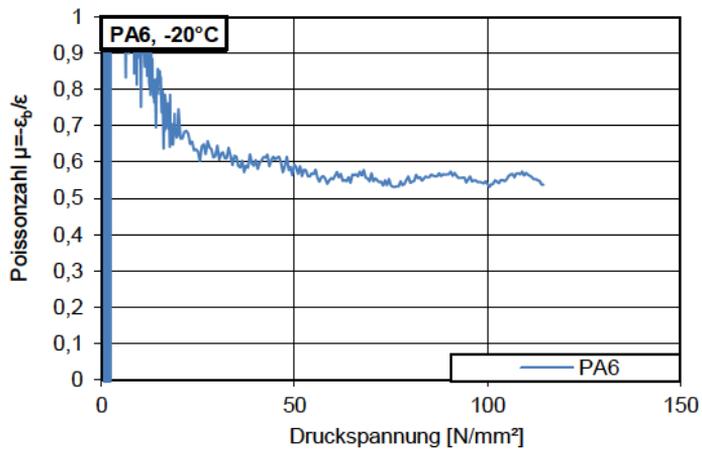
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PA6, -20°C



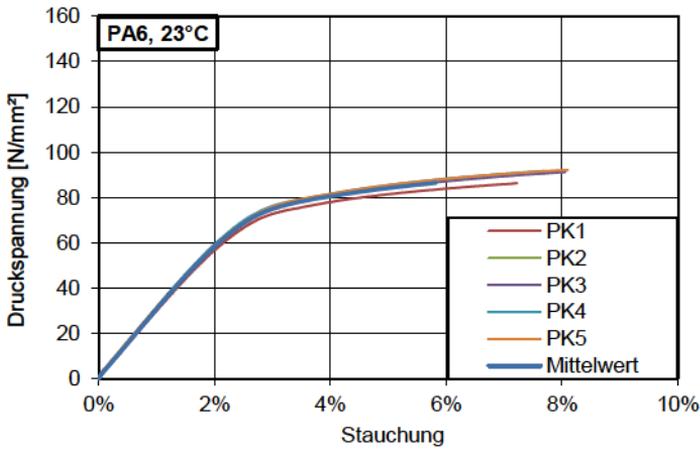
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PA6, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



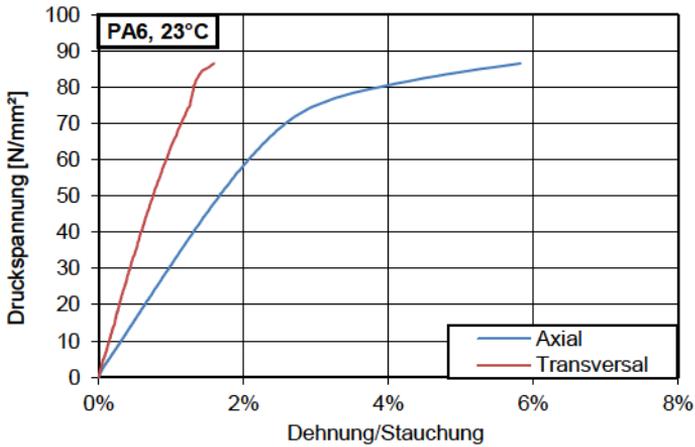
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PA6, -20°C



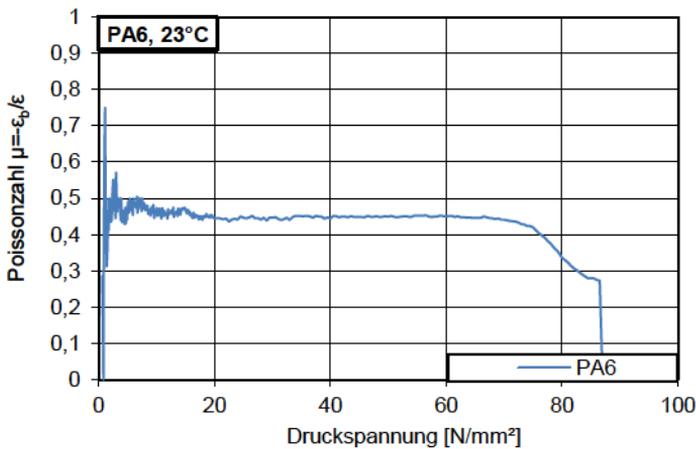
PA6, +23°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA6, +23°C



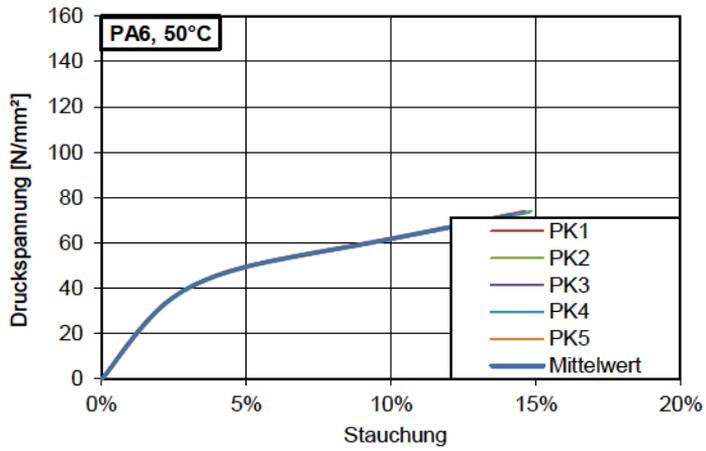
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA6, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



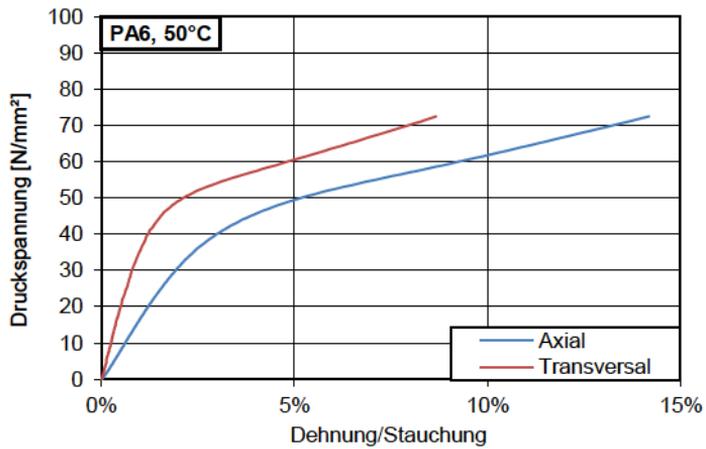
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PA6, +23°C

PA6, +50°C

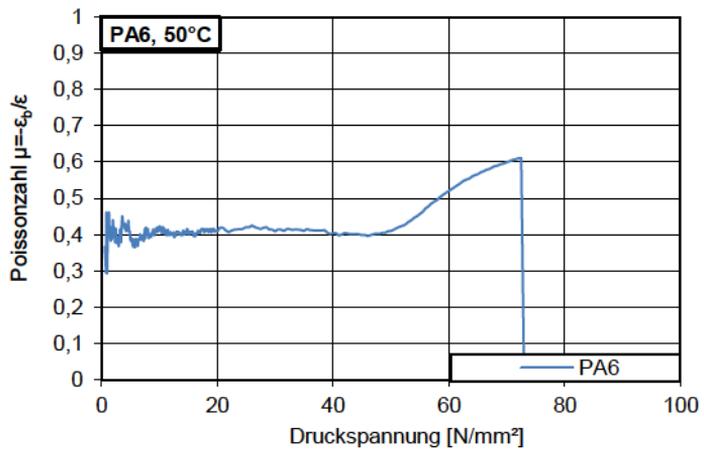
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PA6, +50°C



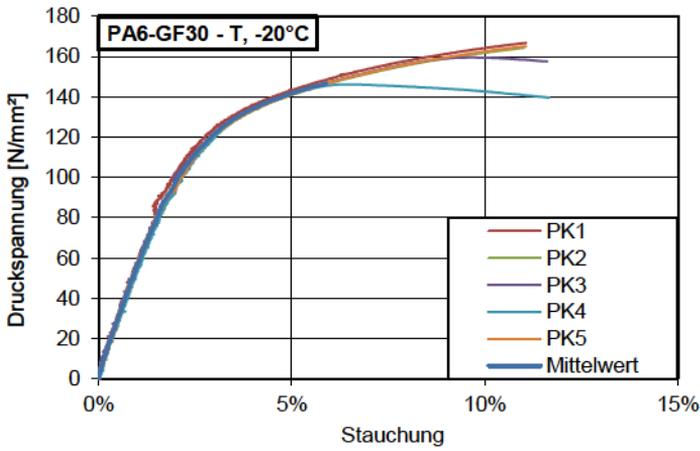
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PA6, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



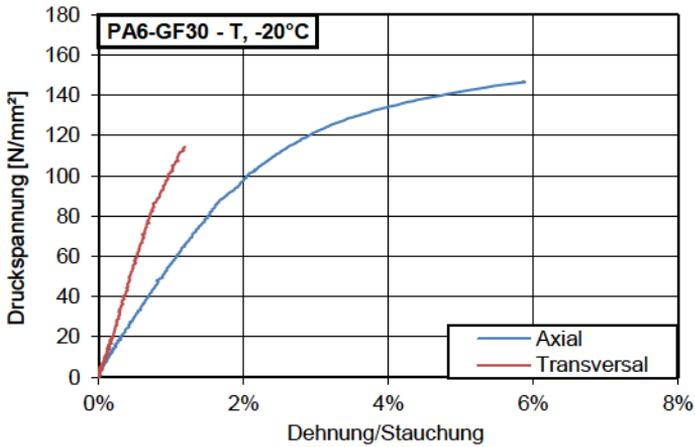
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PA6, +50°C



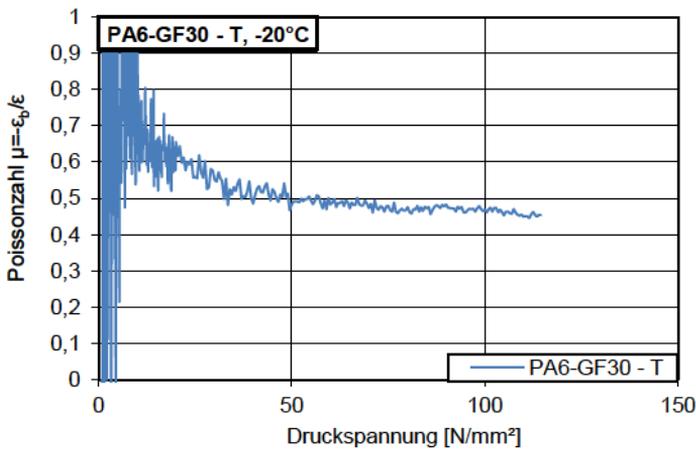
PA6 GF30 - T, -20°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA6 GF30 - T, -20°C



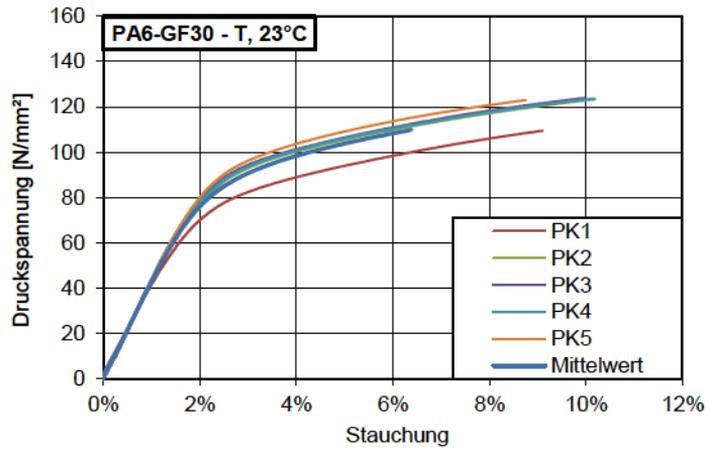
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA6 GF30 - T, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



Druckspannung-Poissonszahl-Diagramm
PA6 GF30 - T, -20°C

PA6 GF30 - T, +23°C

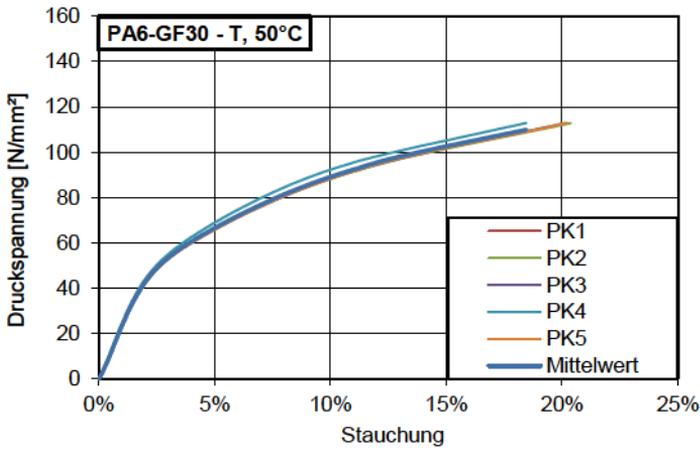
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PA6 GF30 - T, +23°C



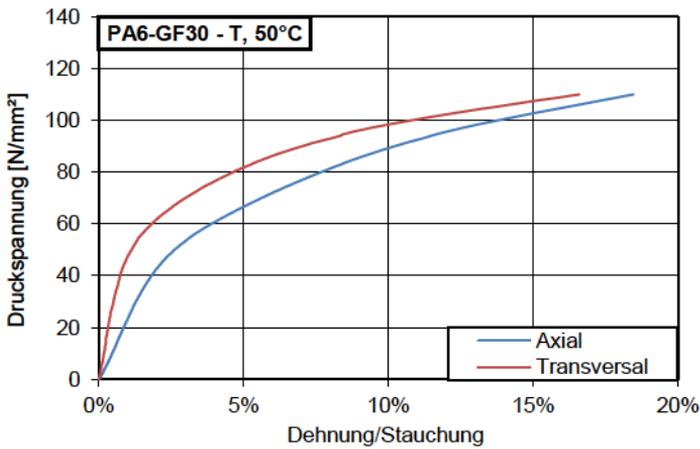
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PA6 GF30 - T, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung

Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PA6 GF30 - T, +23°C

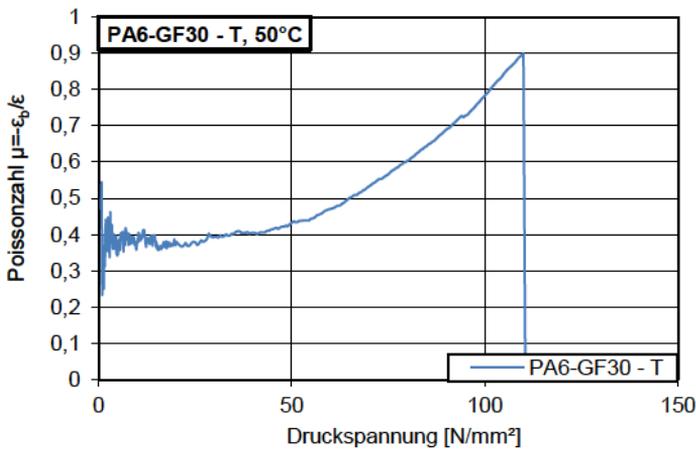
PA6 GF30 - T, +50°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA6 GF30 - T, +50°C



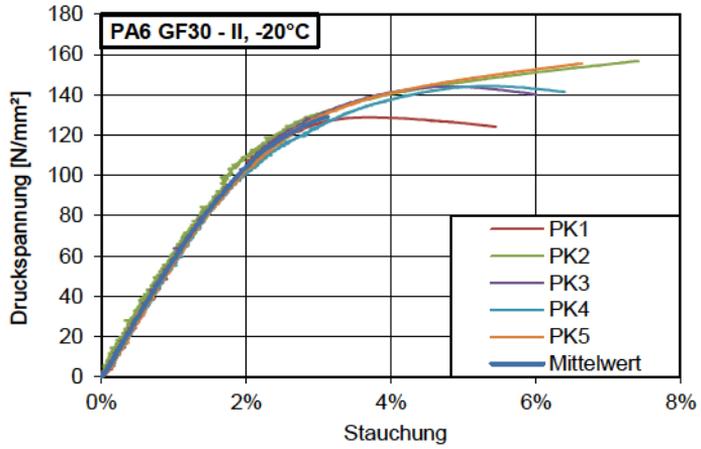
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA6 GF30 - T, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



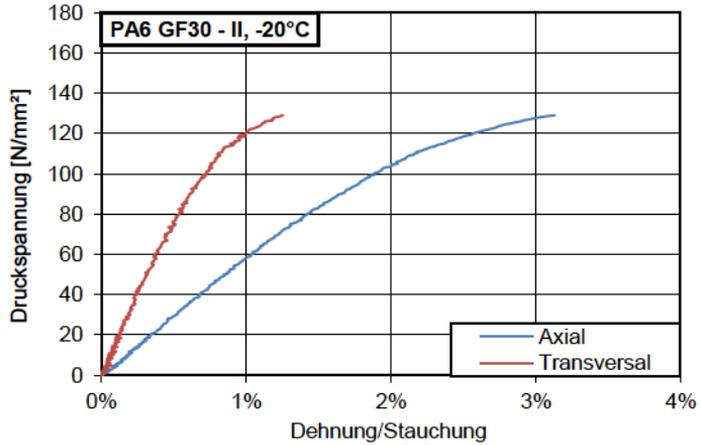
Druckspannung-Poissonszahl-Diagramm
PA6 GF30 - T, +50°C

PA6 GF30 - II, -20°C

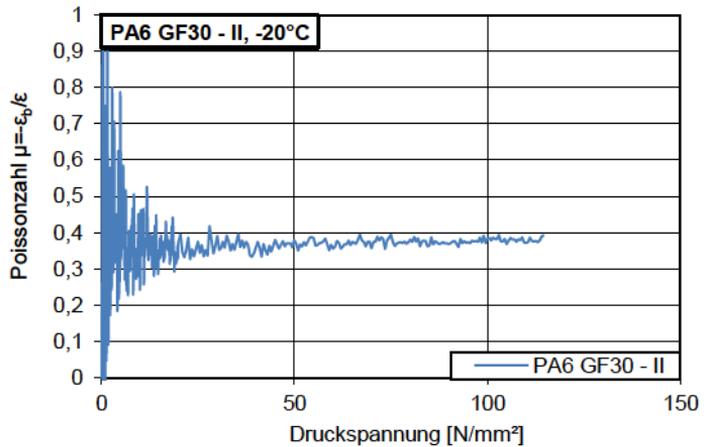
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PA6 GF30 - II, -20°C



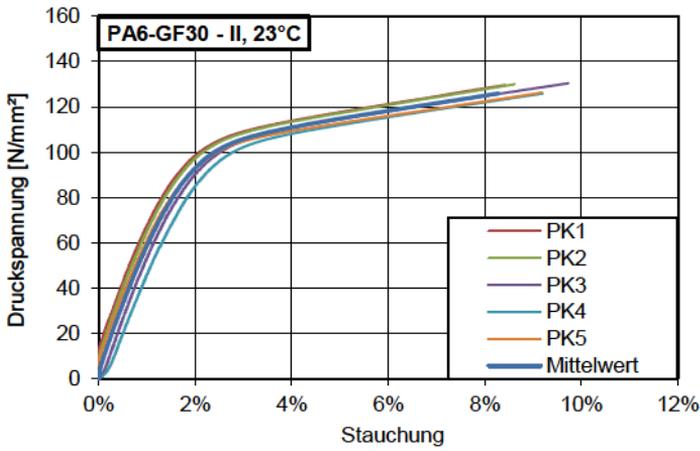
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PA6 GF30 - II, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



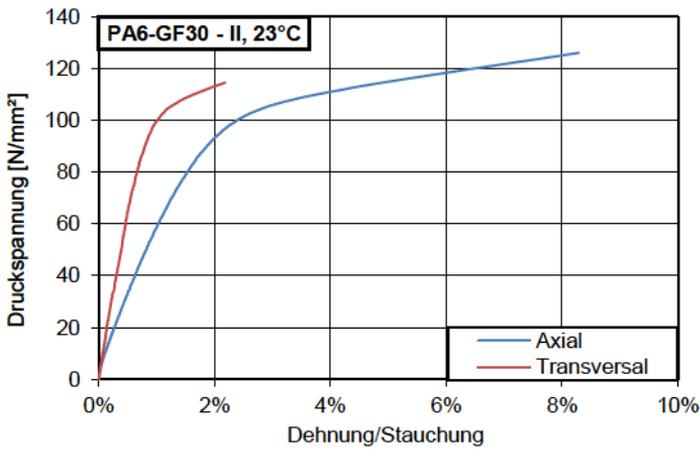
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PA6 GF30 - II, -20°C



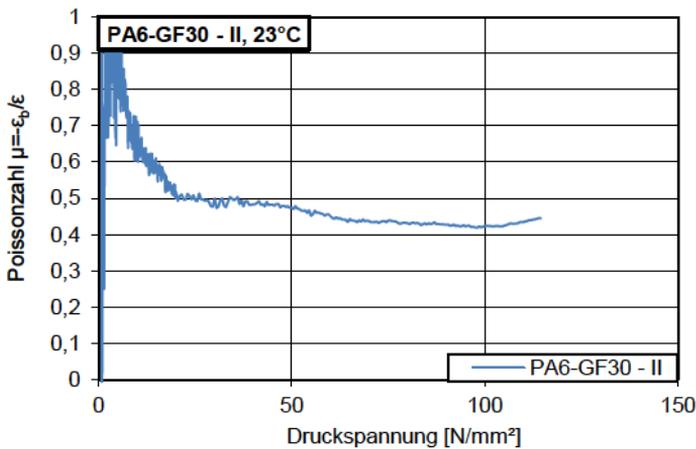
PA6 GF30 - II, +23°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA6 GF30 - II, +23°C



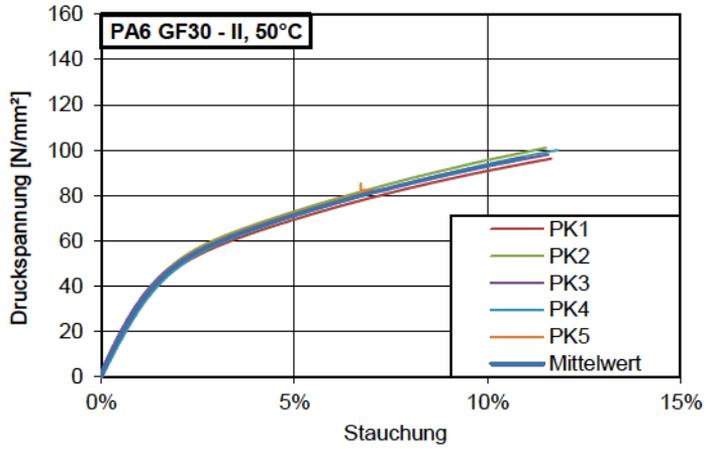
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA6 GF30 - II, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



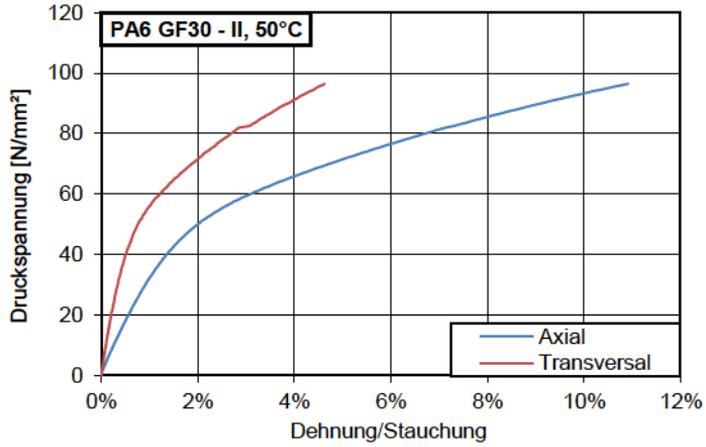
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PA6 GF30 - II, +23°C

PA6 GF30 - II, +50°C

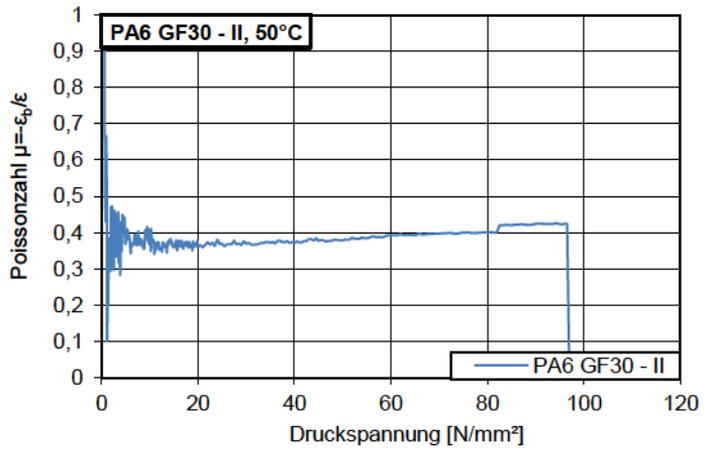
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PA6 GF30 - II, +50°C



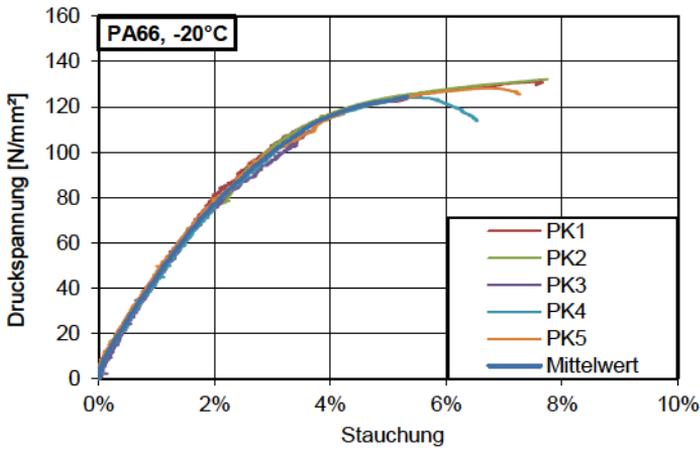
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PA6 GF30 - II, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



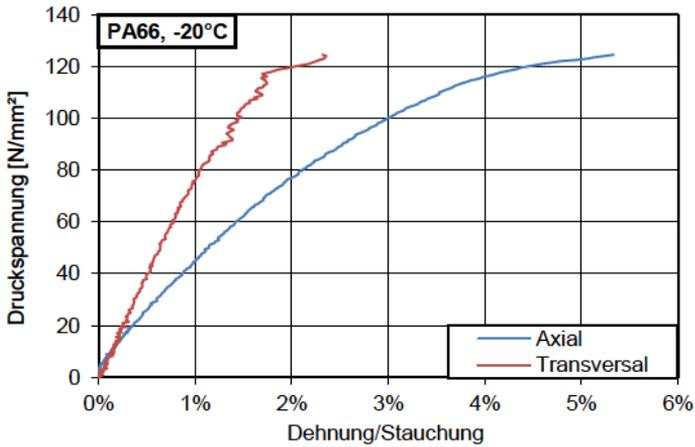
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PA6 GF30 - II, +50°C



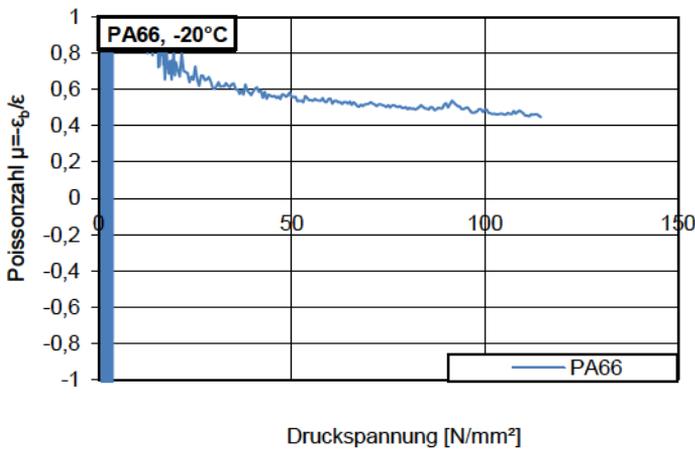
PA66, -20°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66, -20°C



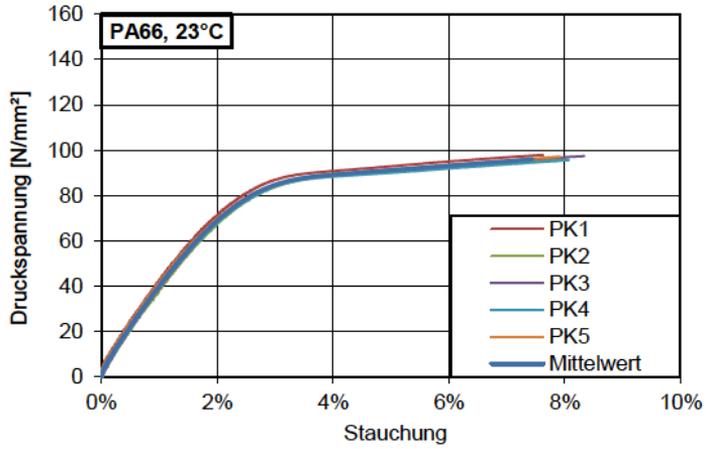
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



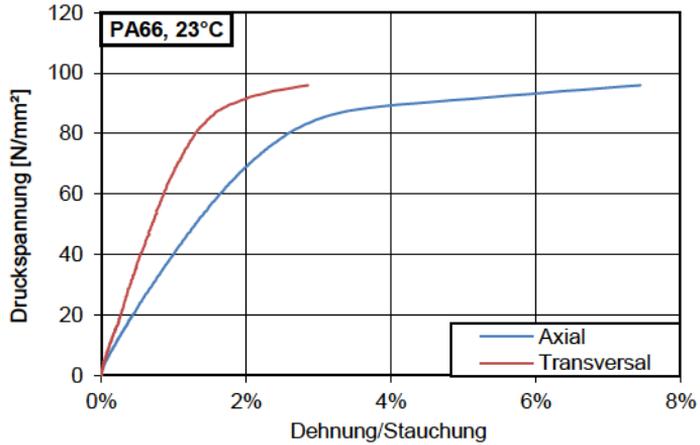
Druckspannung-Poissonszahl-Diagramm
PA66, -20°C

PA66, +23°C

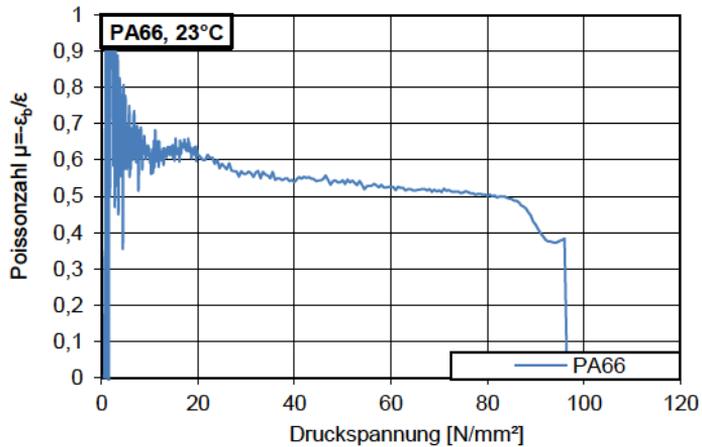
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PA66, +23°C



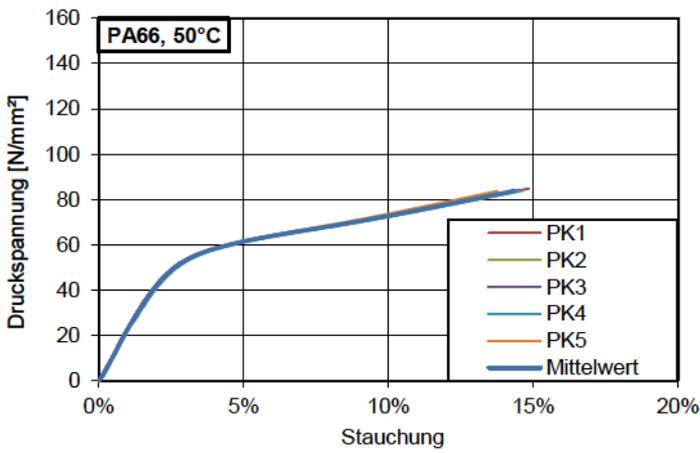
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PA66, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



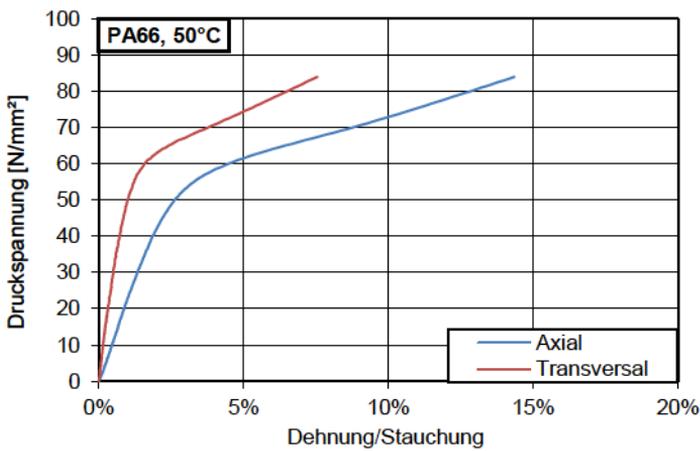
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PA66, +23°C



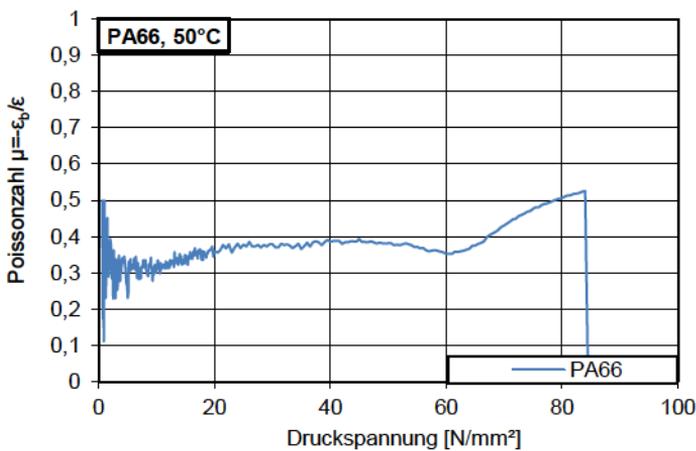
PA66, +50°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66, +50°C



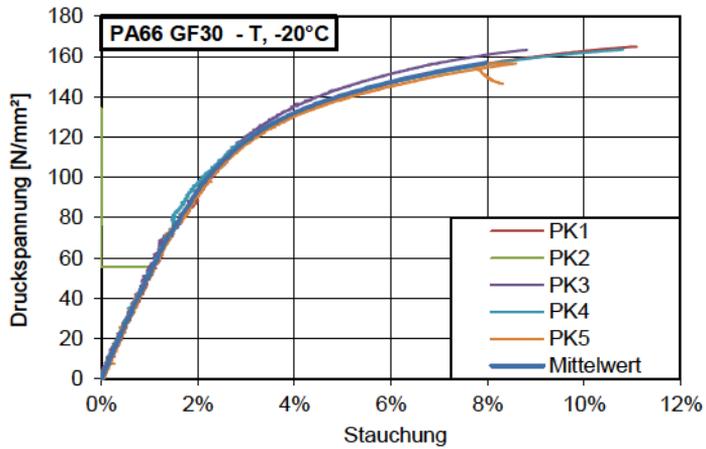
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



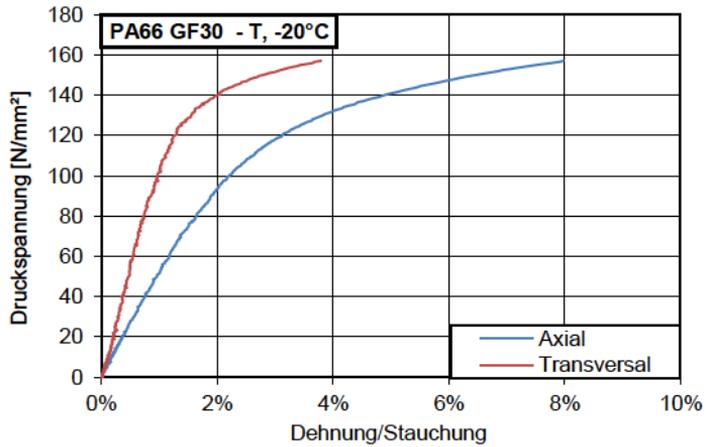
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PA66, +50°C

PA66 GF30 - T, -20°C

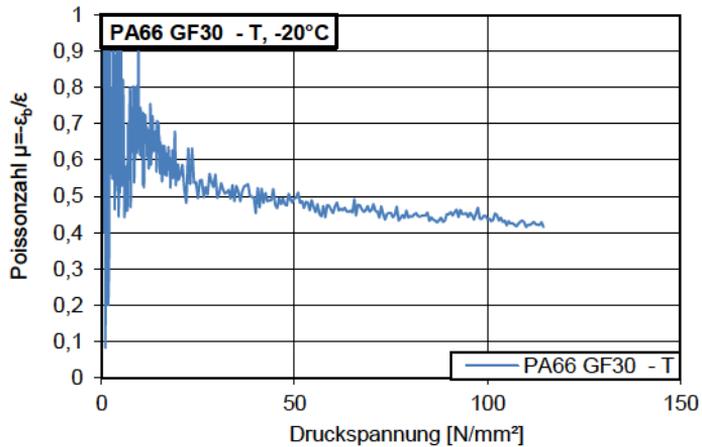
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PA66 GF30 - T, -20°C



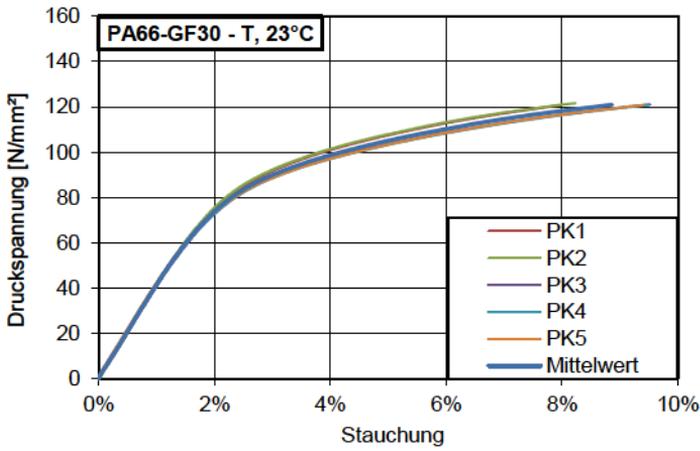
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PA66 GF30 - T, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



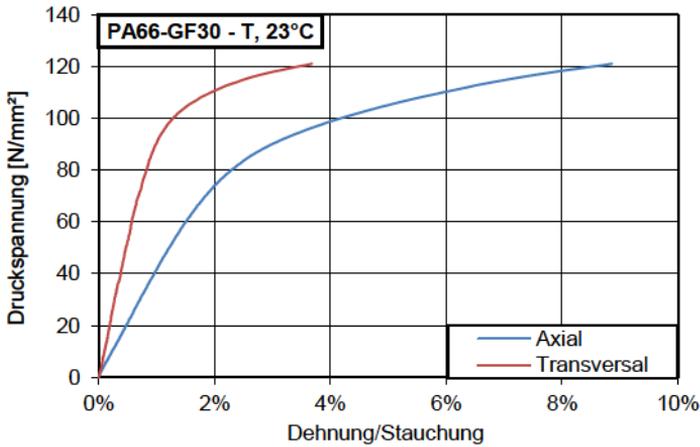
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PA66 GF30 - T, -20°C



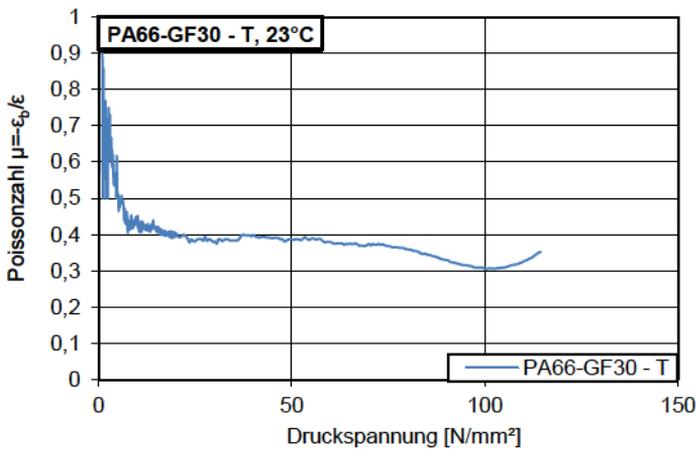
PA66 GF30 - T, +23°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66 GF30 - T, +23°C



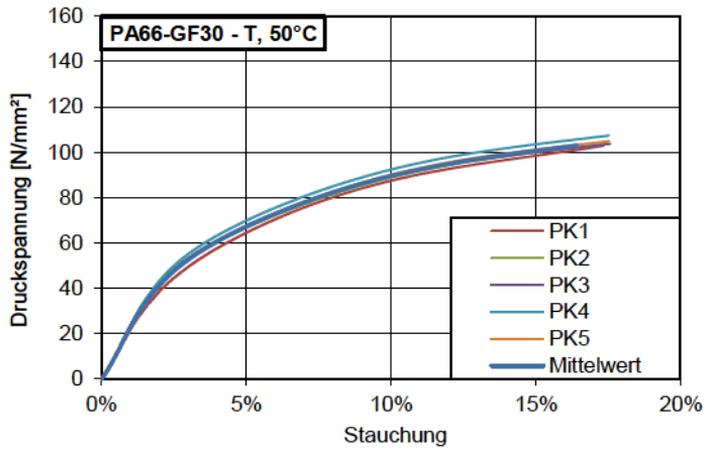
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66 GF30 - T, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



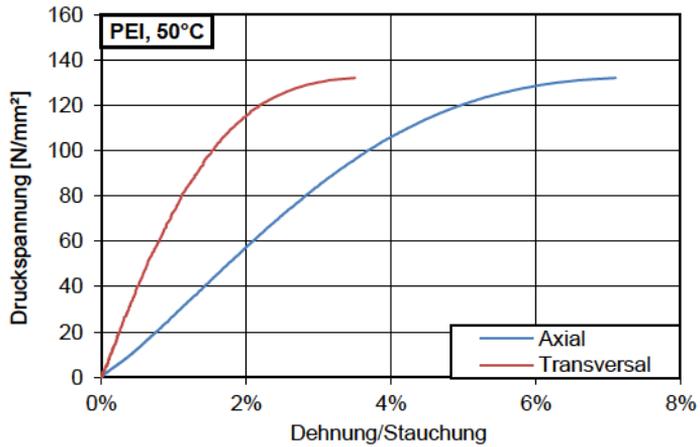
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PA66 GF30 - T, +23°C

PA66 GF30 - T, +50°C

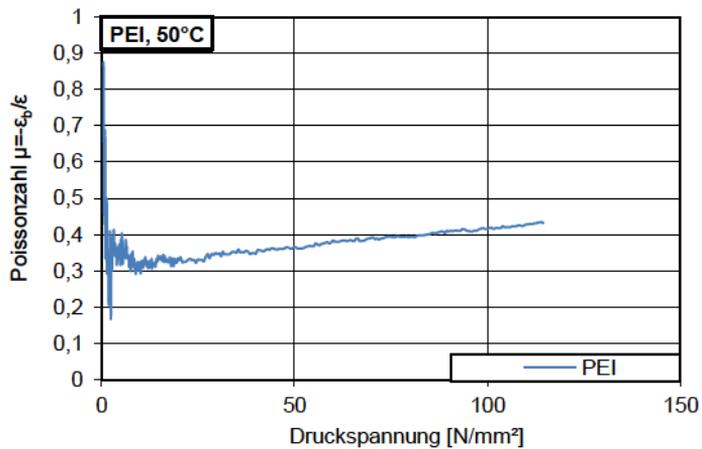
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PA66 GF30 - T, +50°C



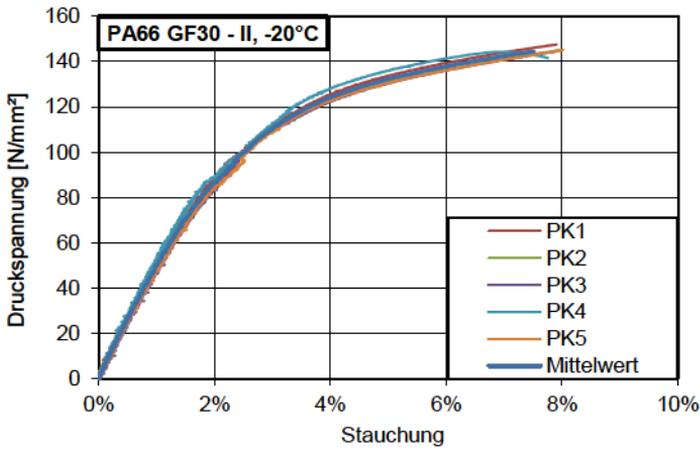
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PA66 GF30 - T, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



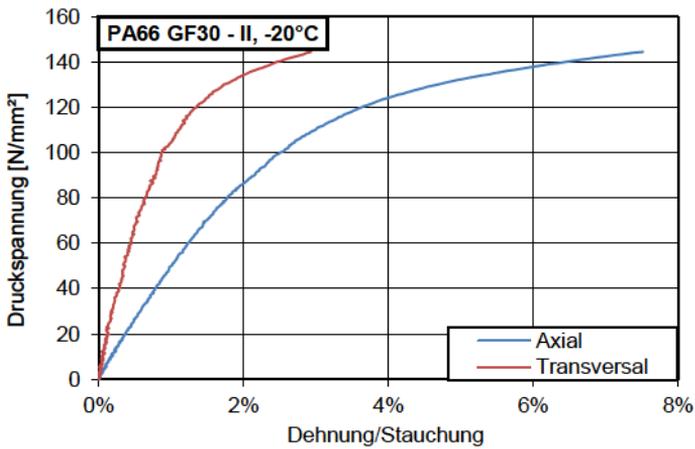
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PA66 GF30 - T, +50°C



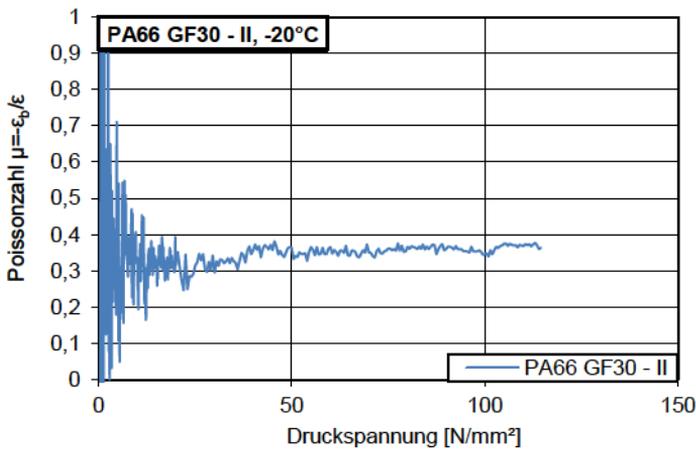
PA66 GF30 - II, -20°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66 GF30 - II, -20°C



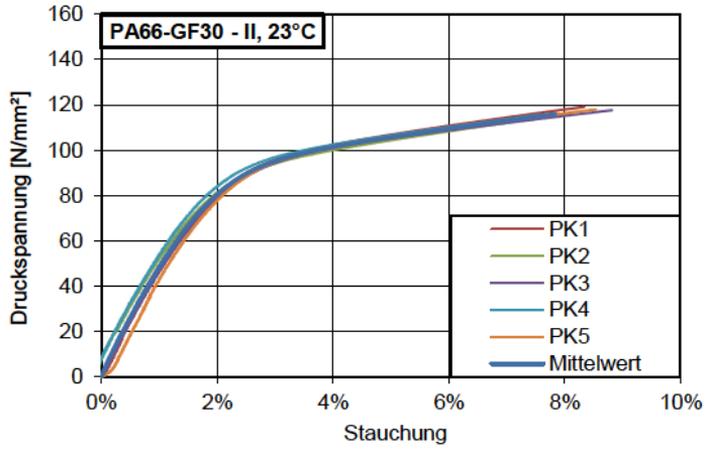
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66 GF30 - II, -20°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



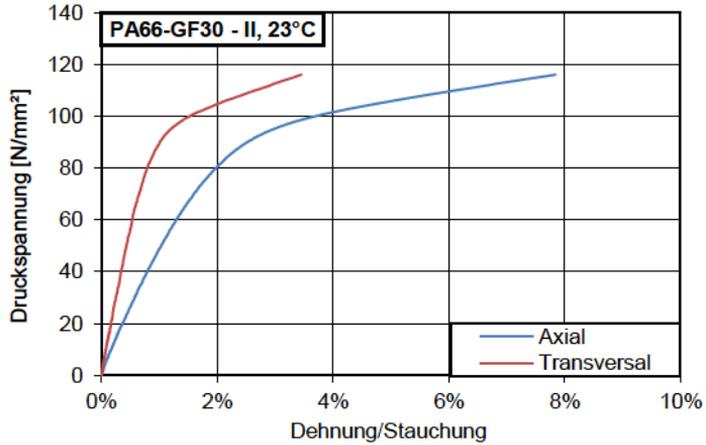
Druckspannung-Poissonszahl-Diagramm
PA66 GF30 - II, -20°C

PA66 GF30 - II, +23°C

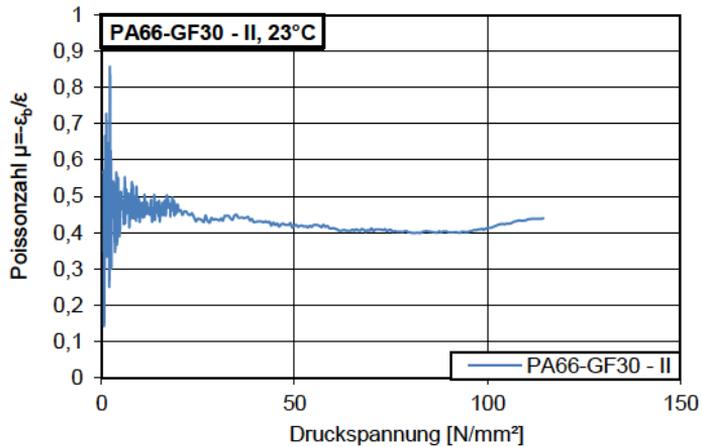
Stauchung-Druckspannung-
Diagramm
PA66 GF30 - II, +23°C



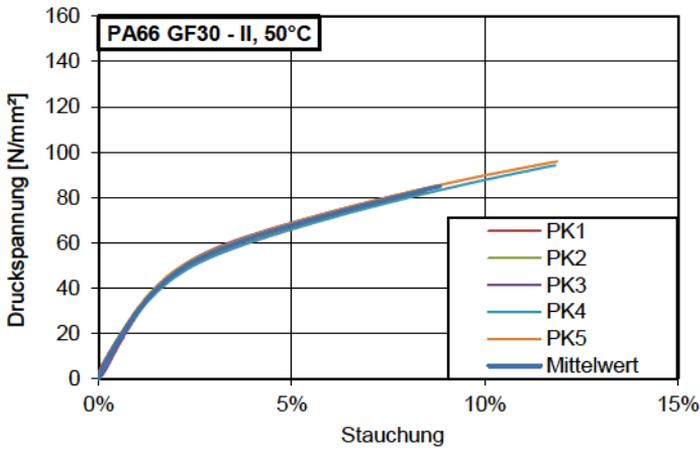
Dehnung/Stauchung-
Druckspannung- Diagramm
PA66 GF30 - II, +23°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



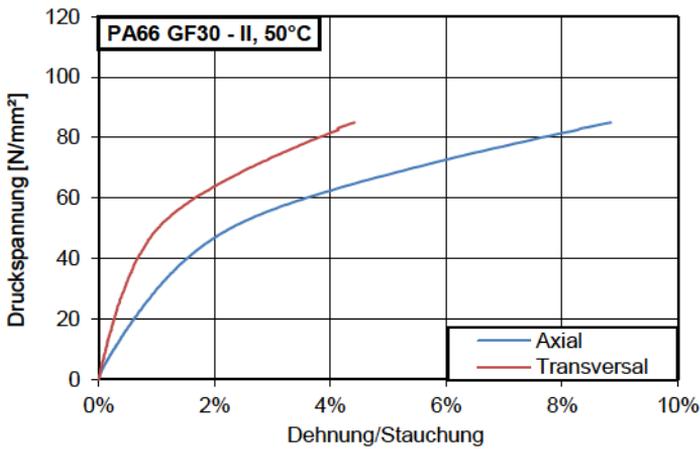
Druckspannung-
Poissonzahl- Diagramm
PA66 GF30 - II, +23°C



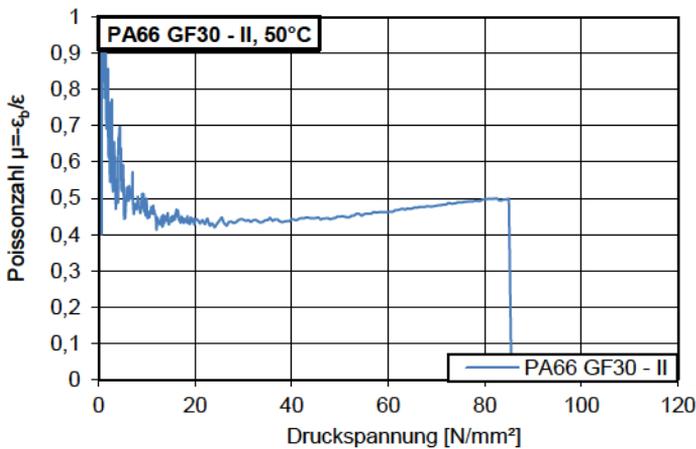
PA66 GF30 - II, +50°C



Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66 GF30 - II, +50°C



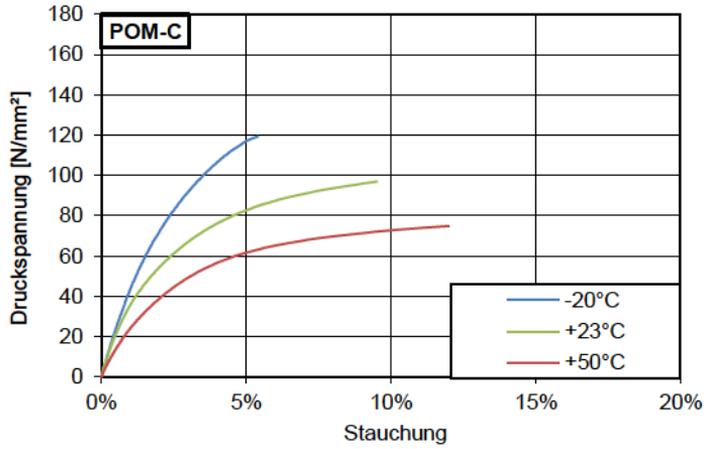
Dehnung/Stauchung-Druckspannung-Diagramm
PA66 GF30 - II, +50°C
Axial – Stauchung
Transversal – Querdehnung



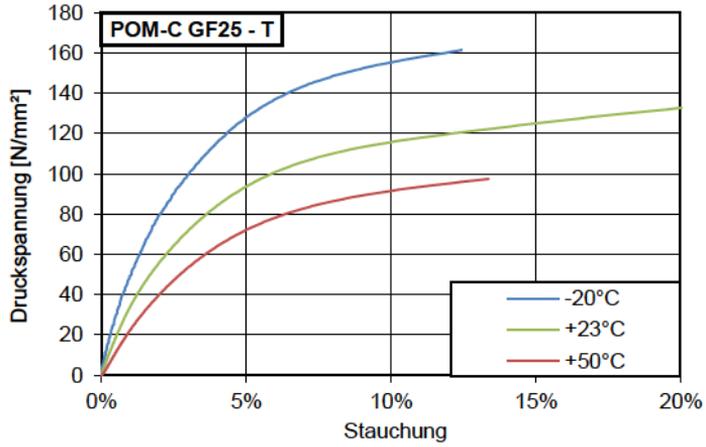
Druckspannung-Poissonzahl-Diagramm
PA66 GF30 - II, +50°C

Temperaturvergleich

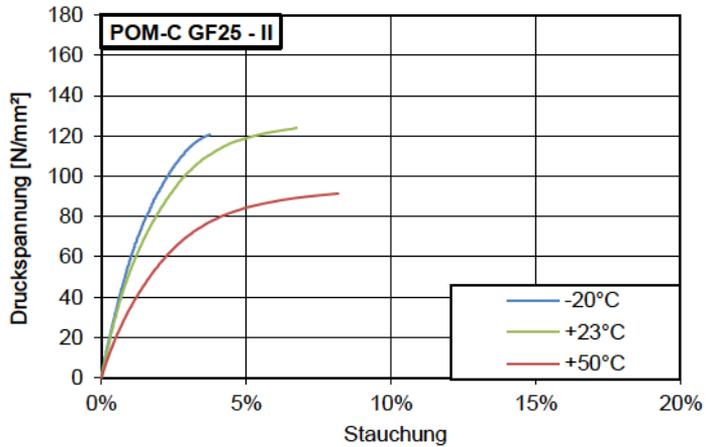
Stauchung-Druckspannung-
Diagramme
POM-C

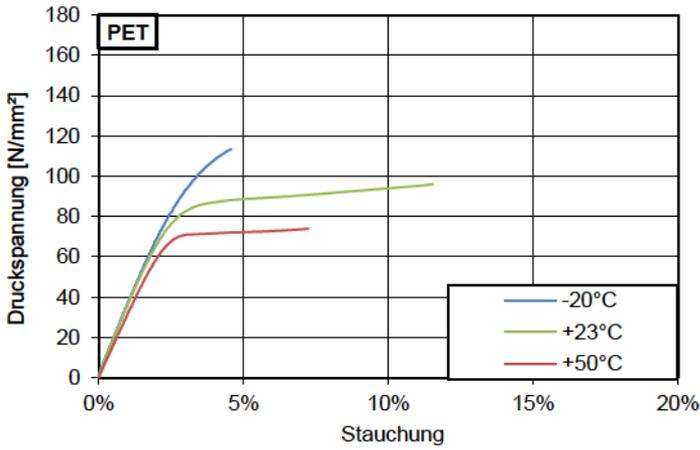


Stauchung-Druckspannung-
Diagramme
POM-C GF25 - T

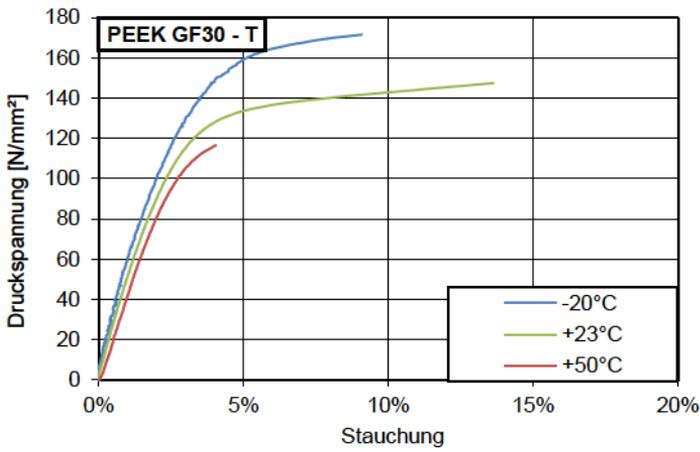


Stauchung-Druckspannung-
Diagramme
POM-C GF25 - II

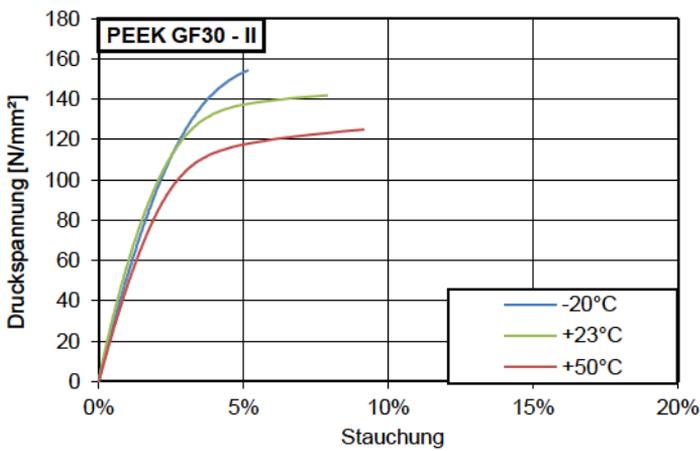




Stauchung-Druckspannung-Diagramme
PET

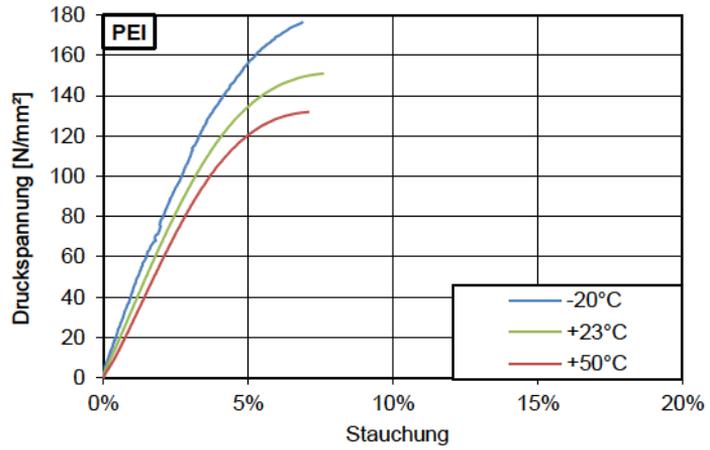


Stauchung-Druckspannung-Diagramme
PEEK GF30 - T

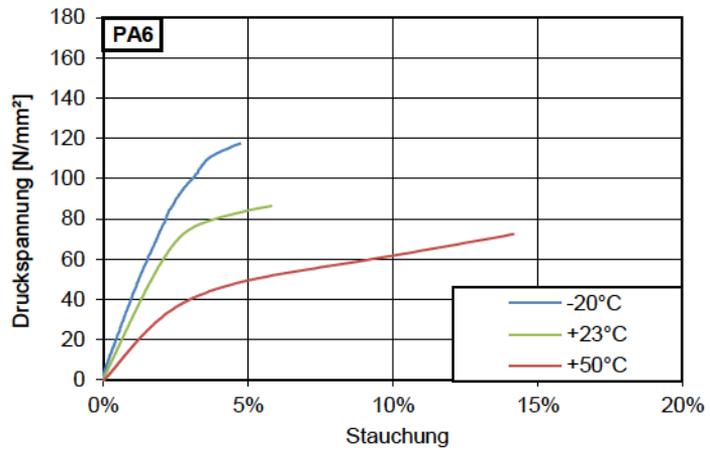


Stauchung-Druckspannung-Diagramme
PEEK GF30 - II

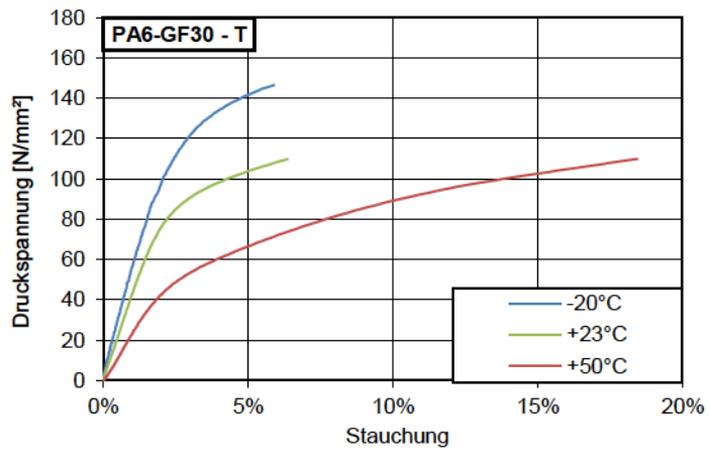
Stauchung-Druckspannung-Diagramme
PEI

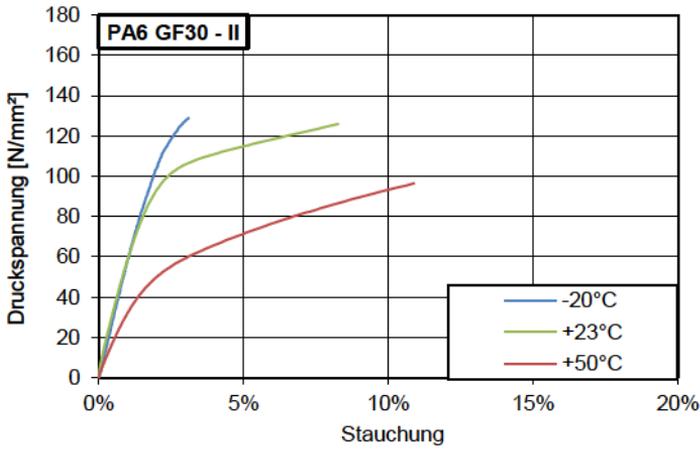


Stauchung-Druckspannung-Diagramme
PA6

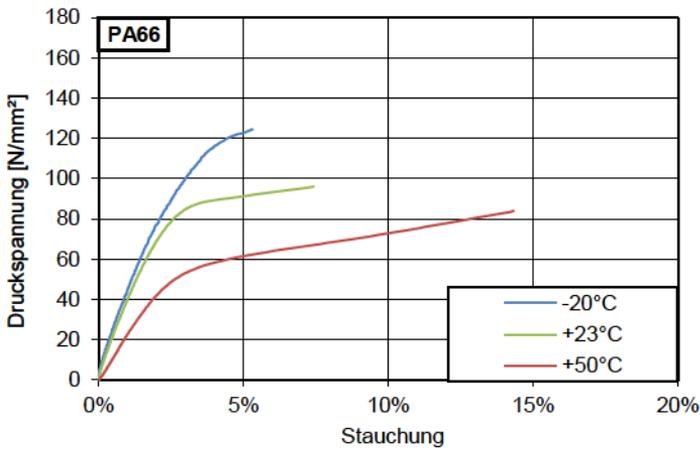


Stauchung-Druckspannung-Diagramme
PA6 GF30 - T

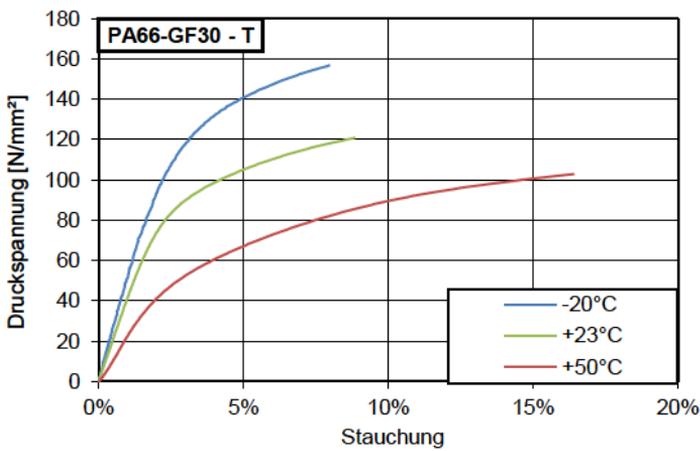




Stauchung-Druckspannung-Diagramme
PA6 GF30 - II

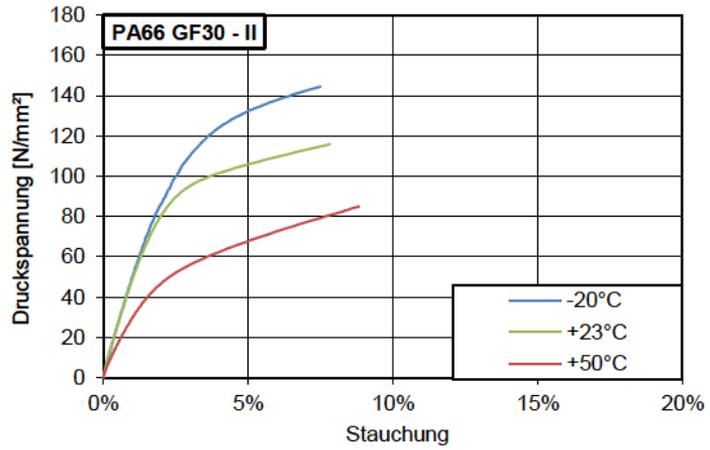


Stauchung-Druckspannung-Diagramme
PA66

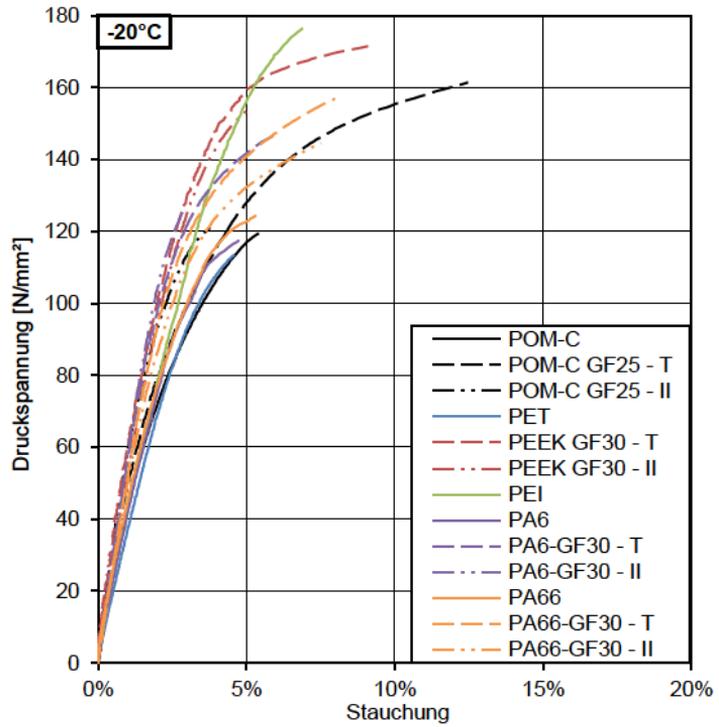


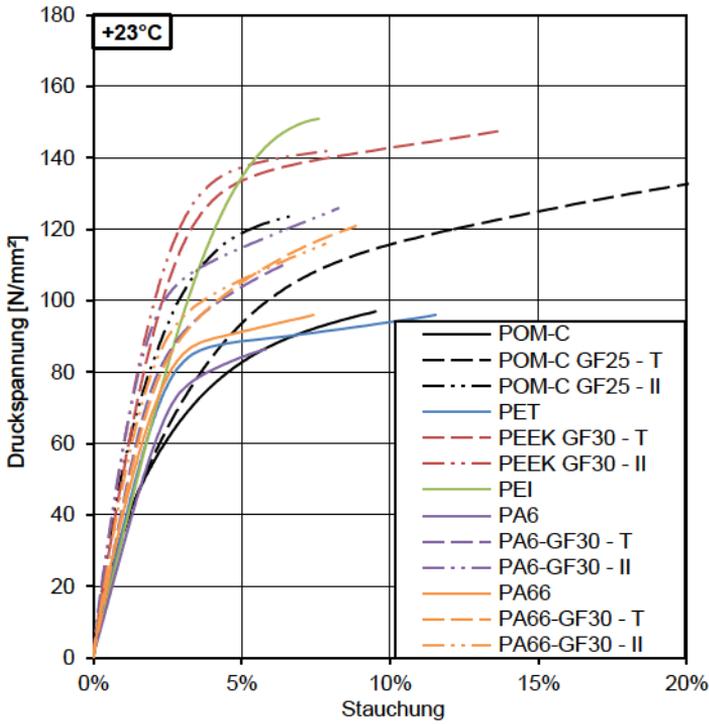
Stauchung-Druckspannung-Diagramme
PA66 GF30 - T

Stauchung-Druckspannung-
Diagramme
PA66 GF30 - II

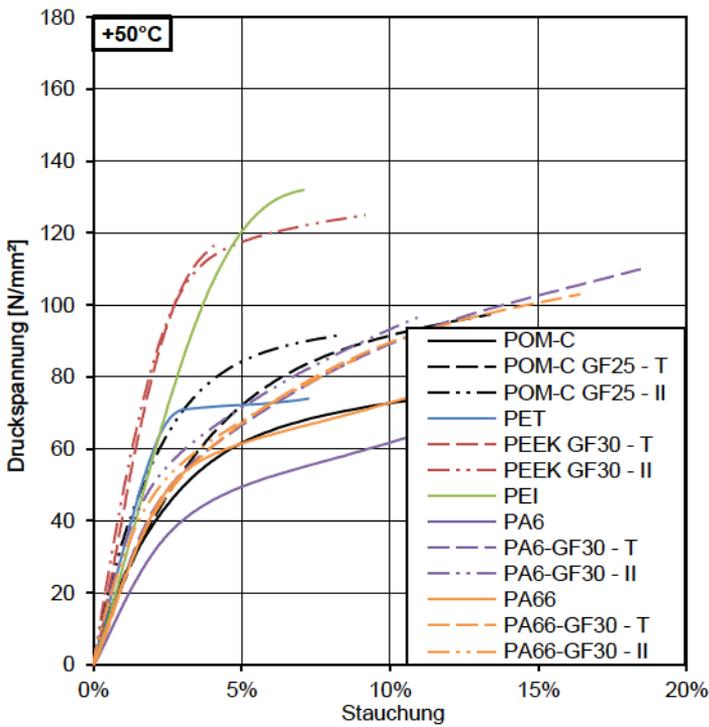


Stauchung-Druckspannung-
Diagramme
-20°C



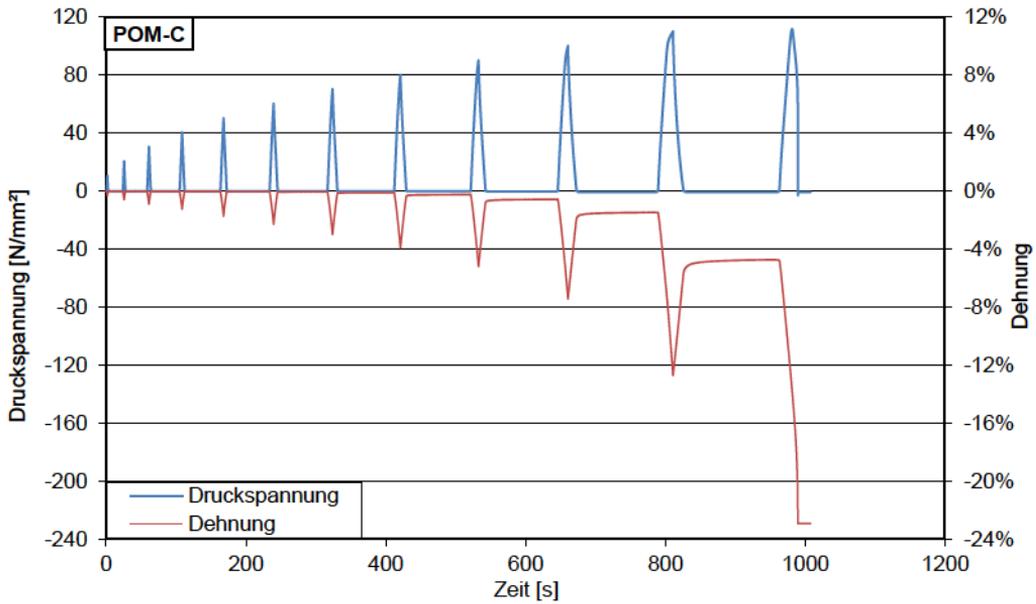


Stauchung-Druckspannung-Diagramme
+23°C



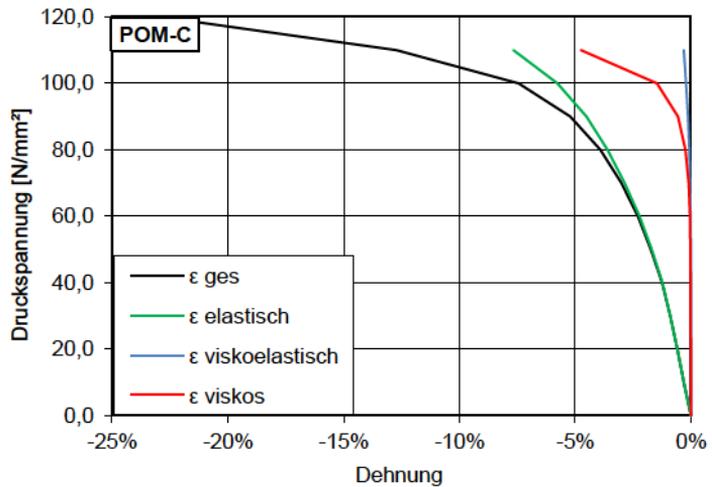
Stauchung-Druckspannung-Diagramme
+50°C

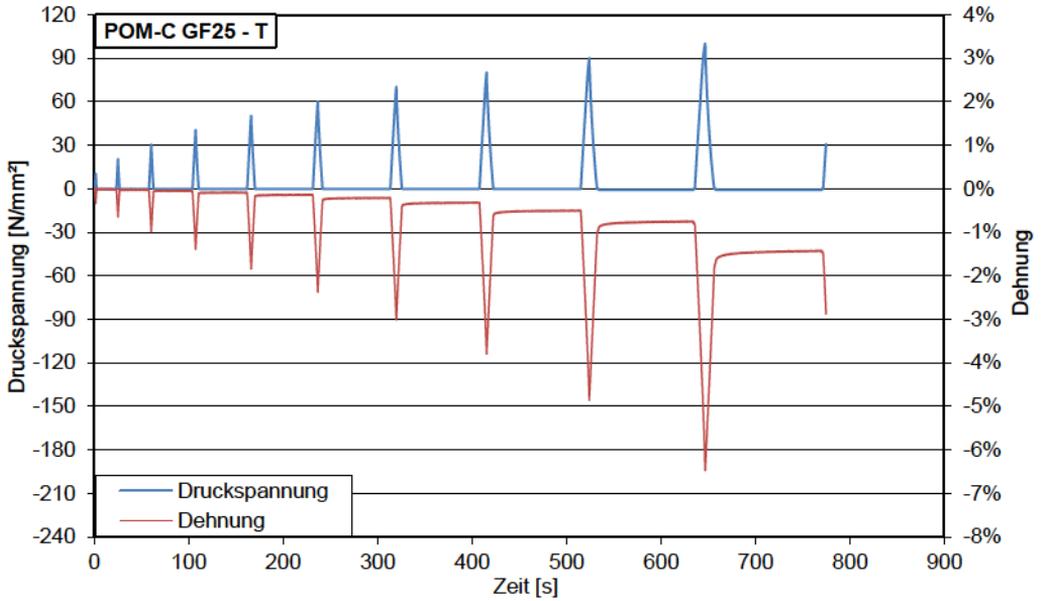
Zyklische Belastungsversuche, +23°C



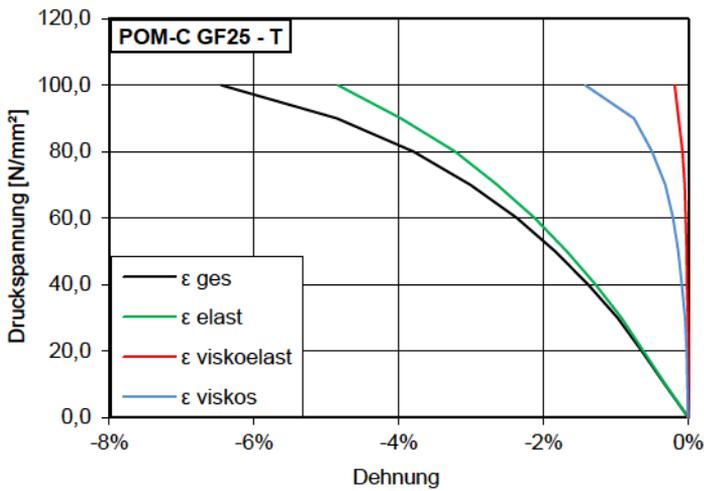
Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
POM-C

Dehnungsanteile
POM-C

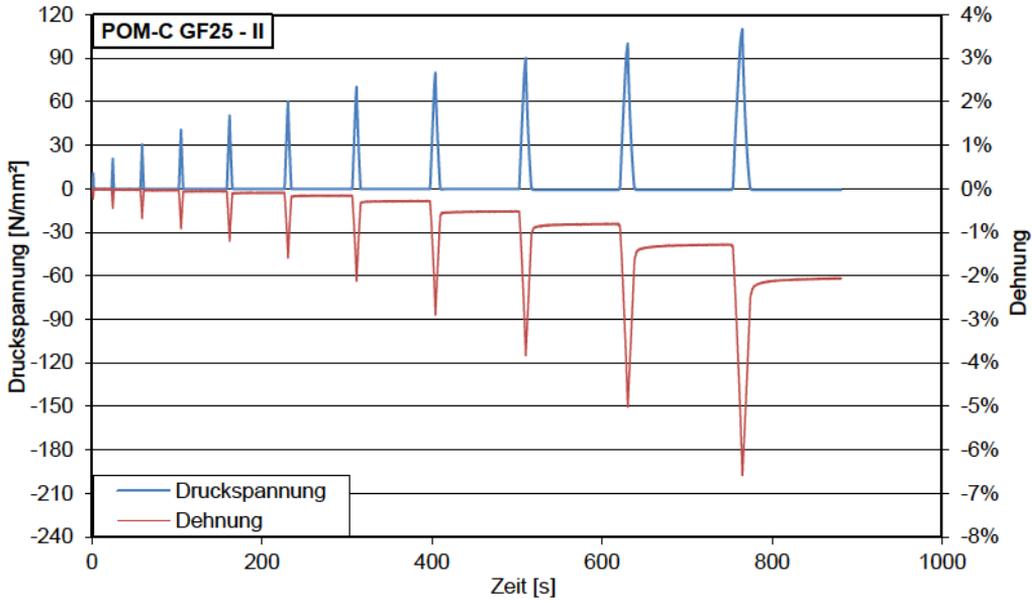




Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
 POM-C GF25 - Belastung senkrecht zur Faserrichtung

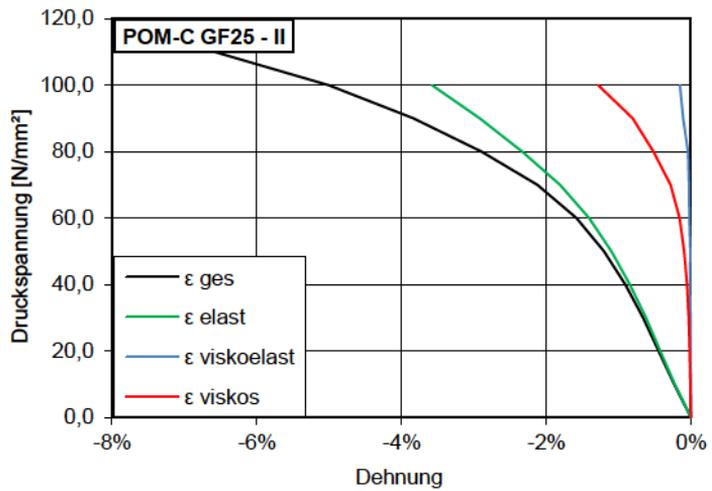


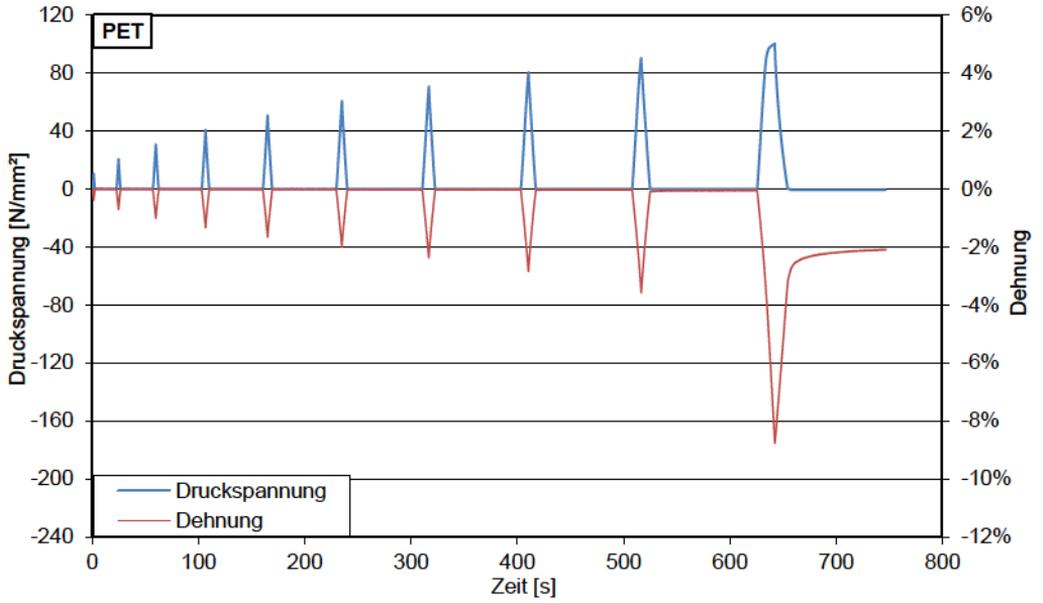
Dehnungsanteile
 POM-C GF25 - Belastung senkrecht zur Faserrichtung



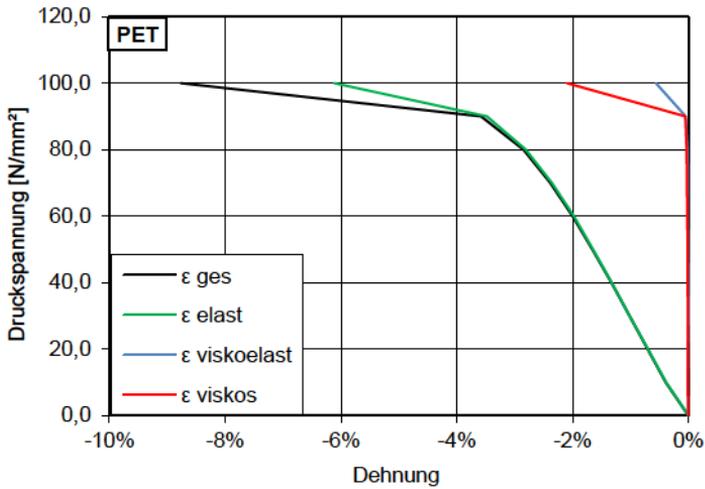
Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
 POM-C GF25 - Belastung parallel zur Faserrichtung

Dehnungsanteile
 POM-C GF25 - Belastung parallel zur Faserrichtung

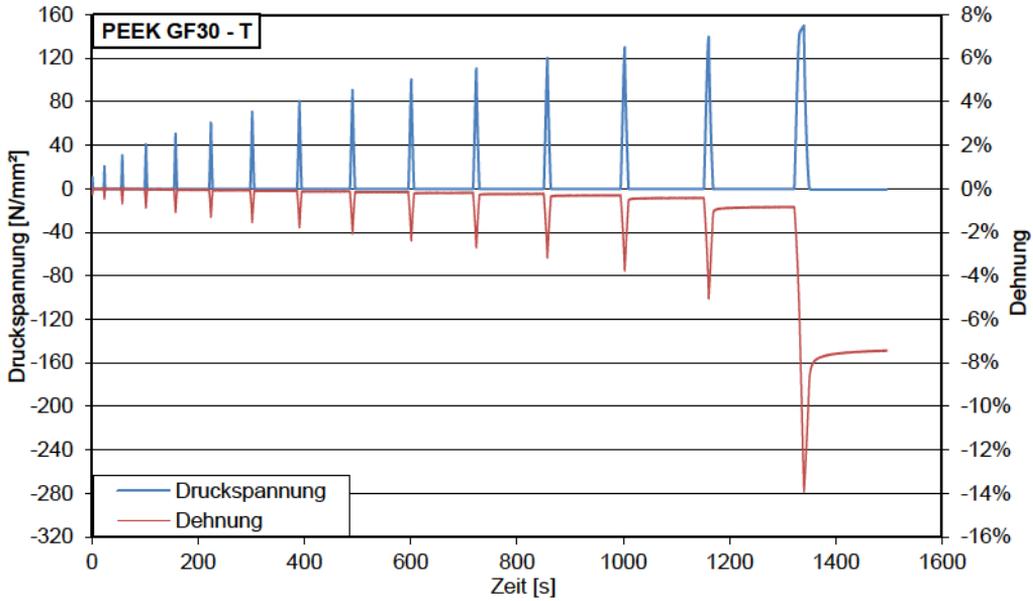




Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
PET

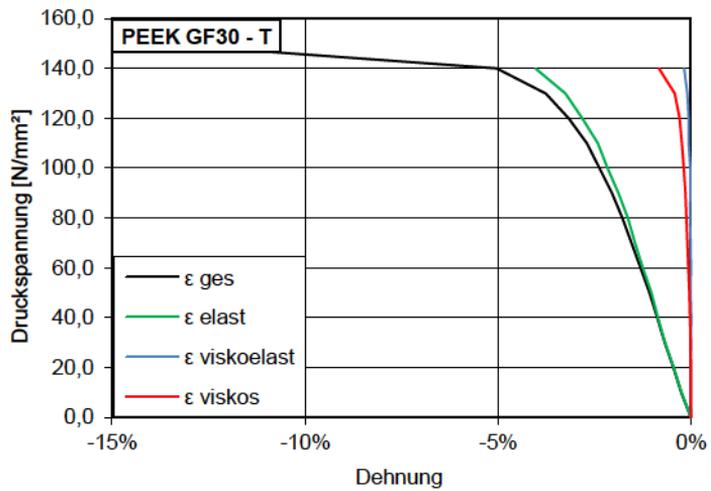


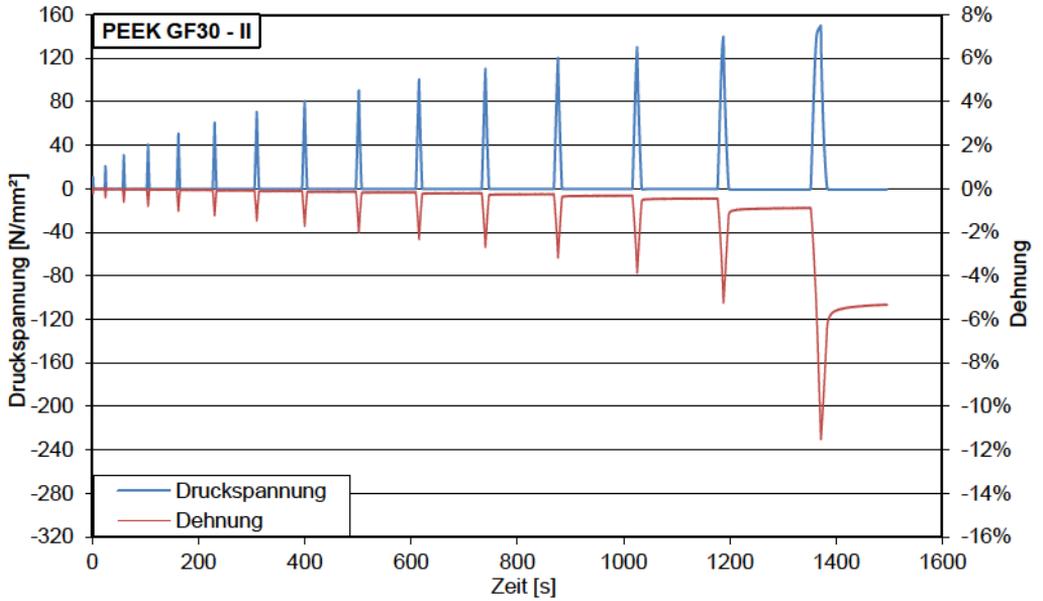
Dehnungsanteile
PET



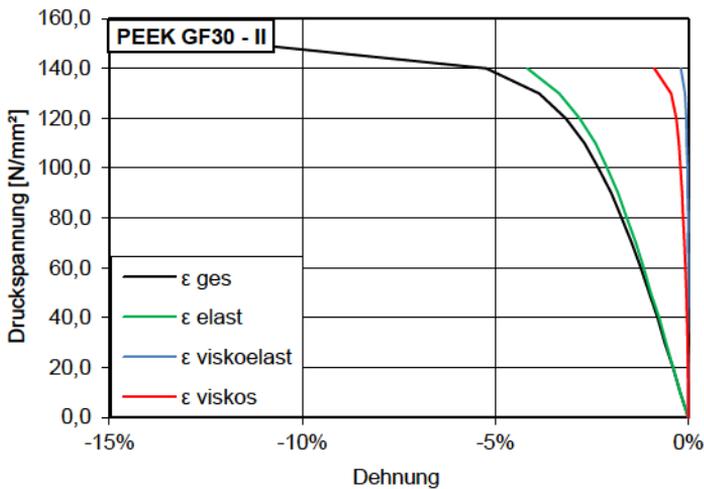
Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
 PEEK GF30 - Belastung senkrecht zur Faserrichtung

Dehnungsanteile
 PEEK GF30 - Belastung senkrecht zur Faserrichtung

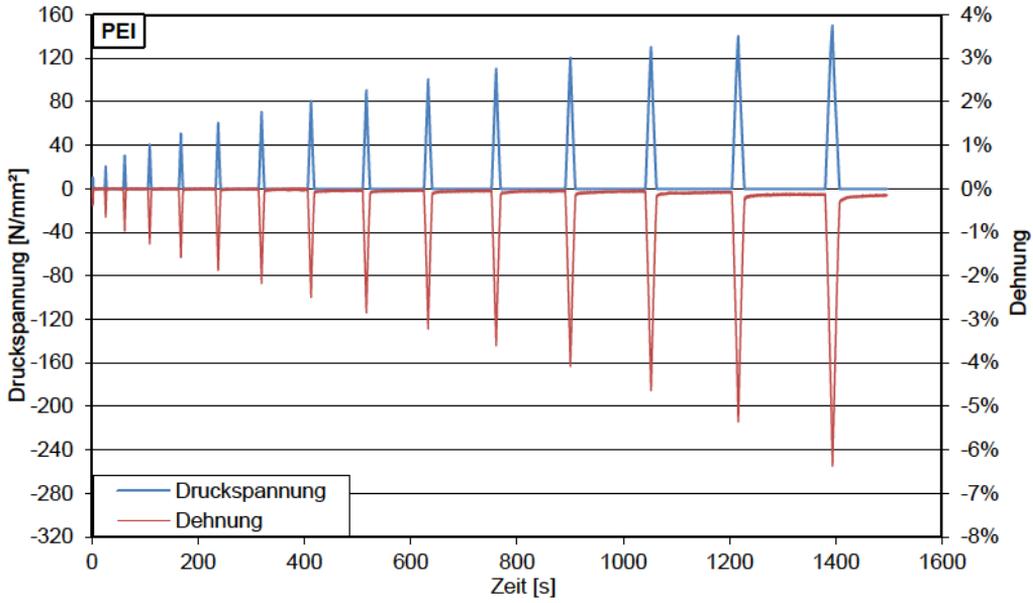




Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
PEEK GF30 - Belastung parallel zur Faserrichtung

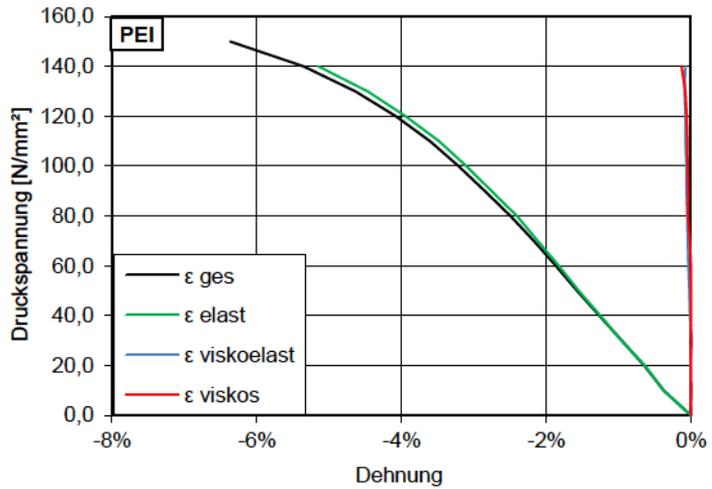


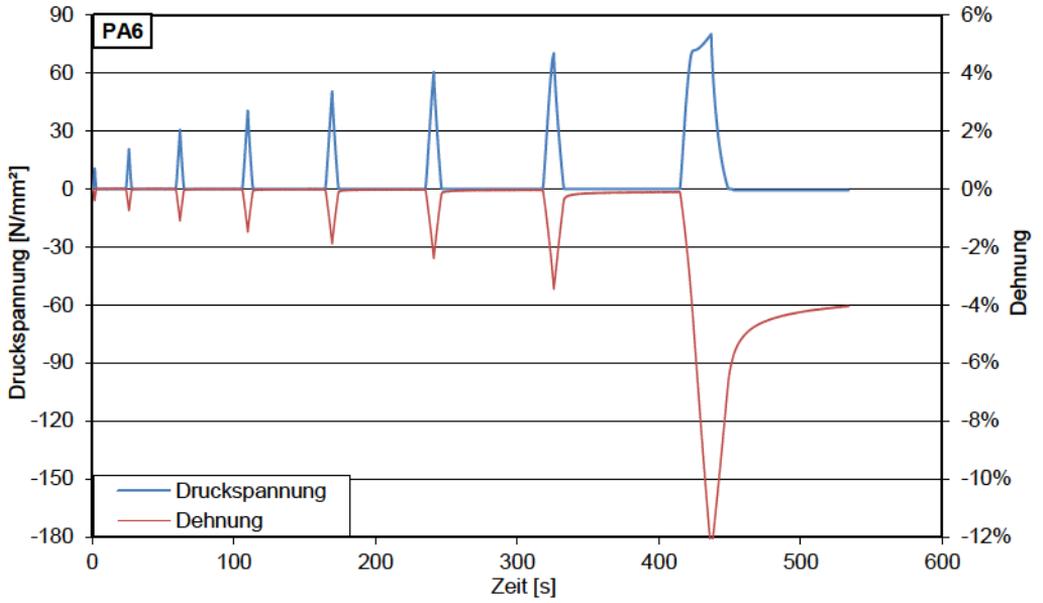
Dehnungsanteile
PEEK GF30 - Belastung parallel zur Faserrichtung



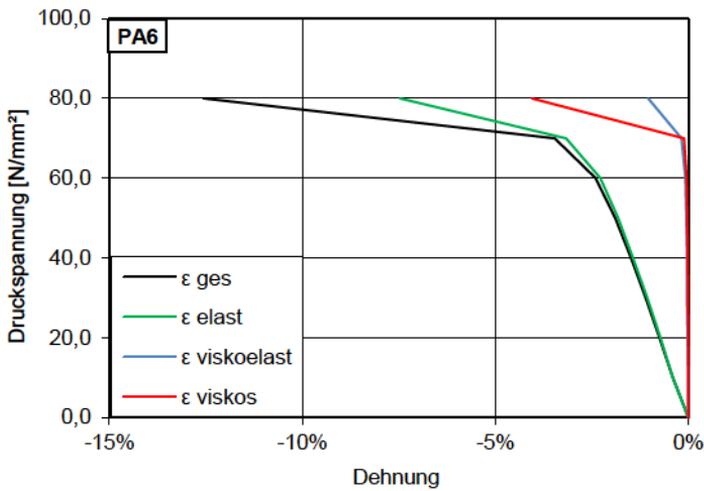
Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
PEI

Dehnungsanteile
PEI

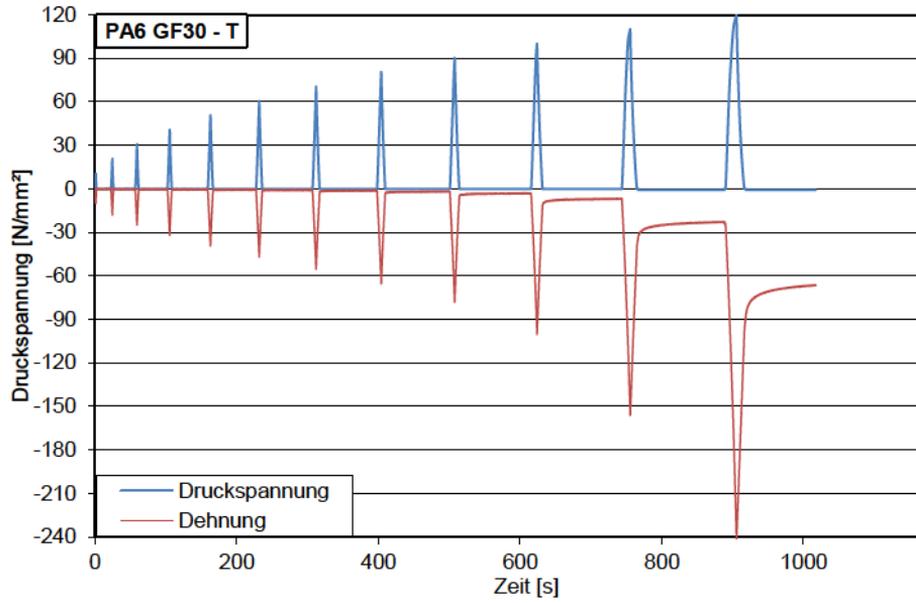




Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
PA6

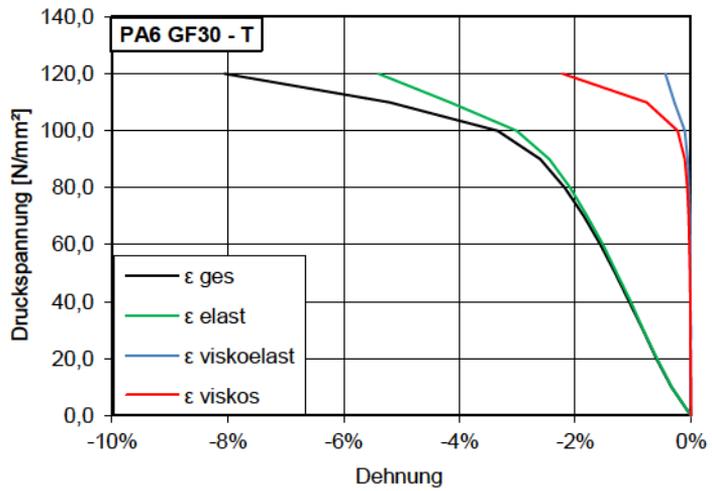


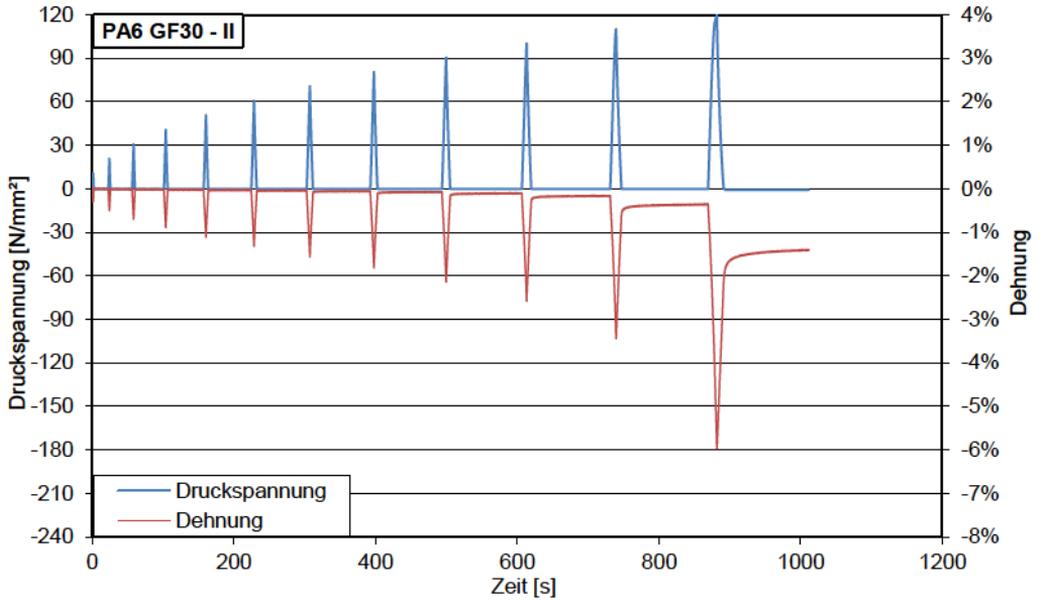
Dehnungsanteile
PA6



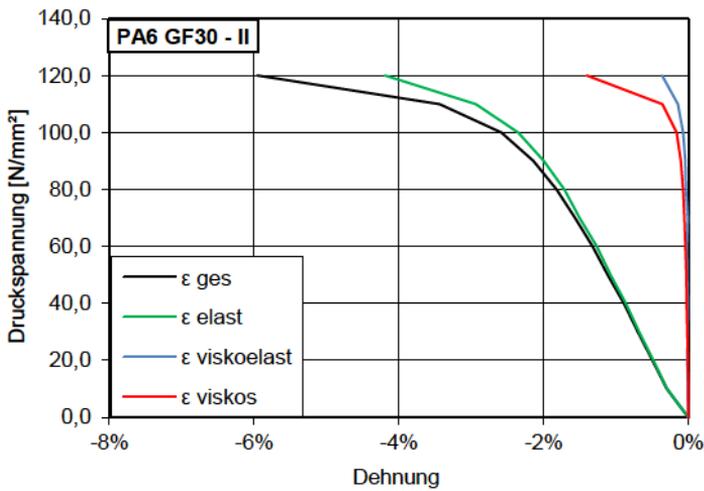
Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
PA6 GF30 - Belastung senkrecht zur Faserrichtung

Dehnungsanteile
PA6 GF30 - Belastung senkrecht zur Faserrichtung

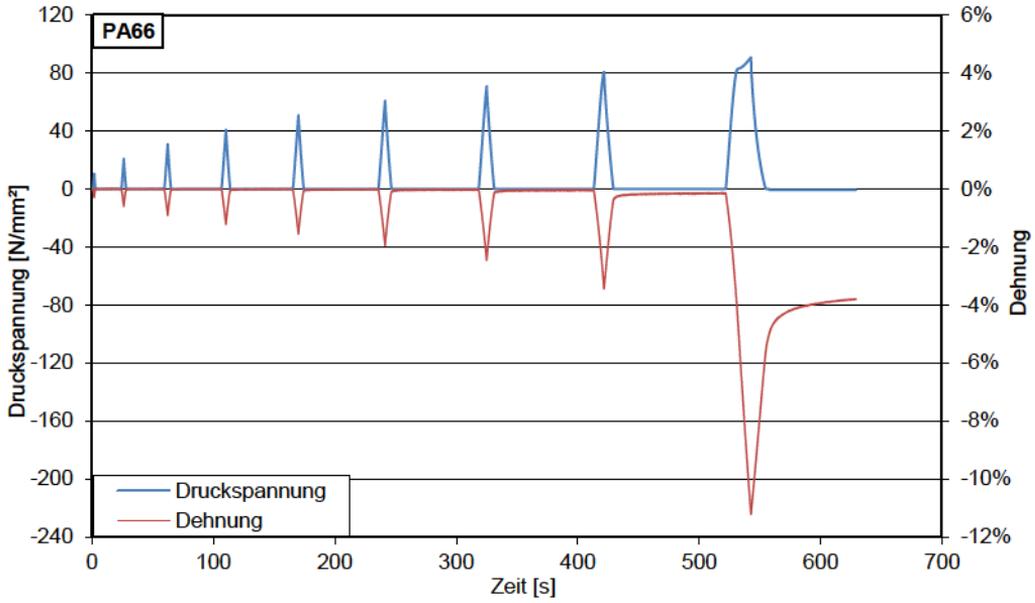




Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
PA6 GF30 - Belastung parallel zur Faserrichtung

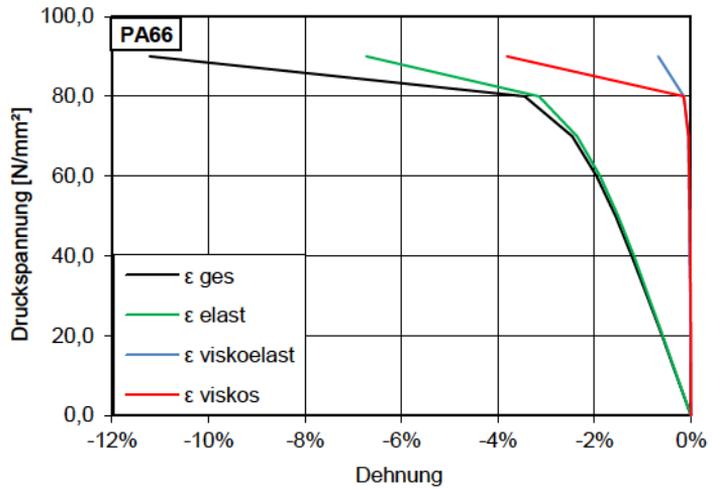


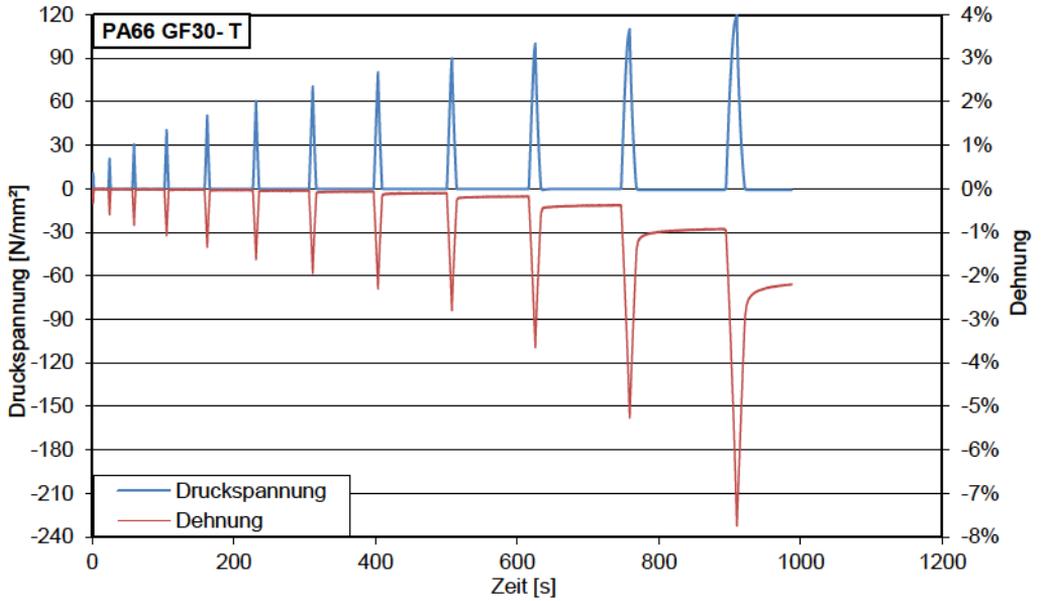
Dehnungsanteile
PA6 GF30 - Belastung parallel zur Faserrichtung



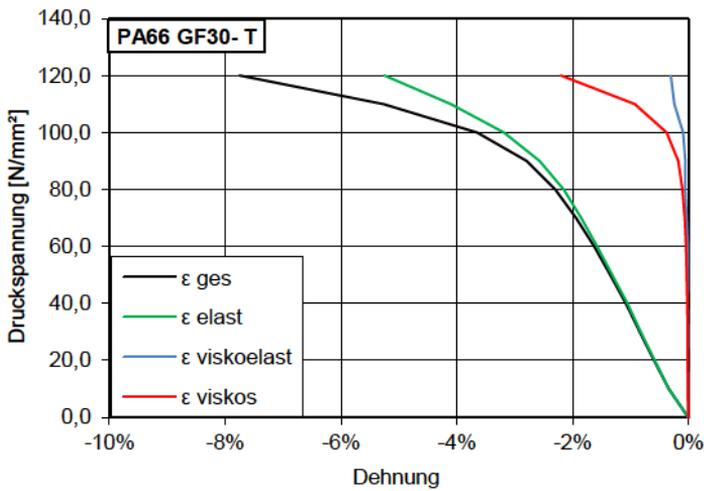
Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
PA66

Dehnungsanteile
PA66

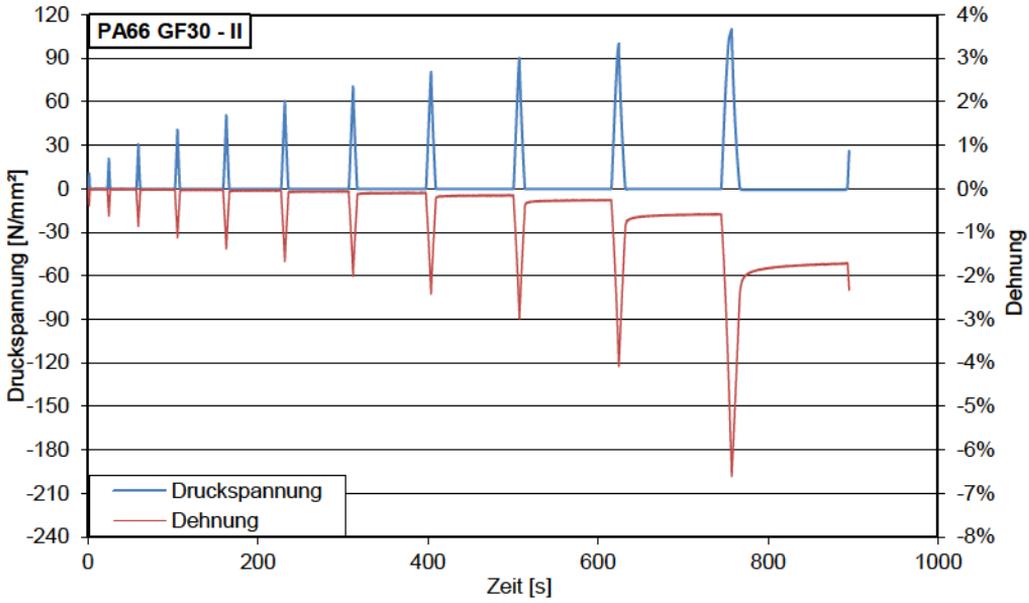




Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
PA66 GF30 - Belastung senkrecht zur Faserrichtung

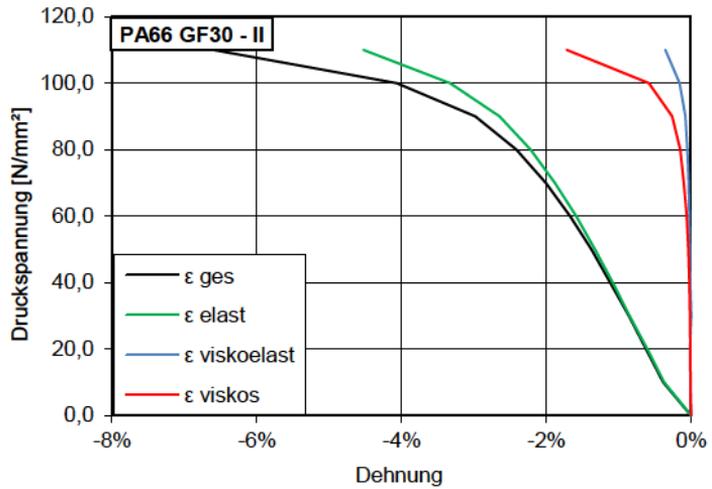


Dehnungsanteile
PA66 GF30 - Belastung senkrecht zur Faserrichtung



Belastungszyklen und zugehörige Dehnungen
 PA66 GF30 - Belastung parallel zur Faserrichtung

Dehnungsanteile
 PA66 GF30 - Belastung parallel zur Faserrichtung



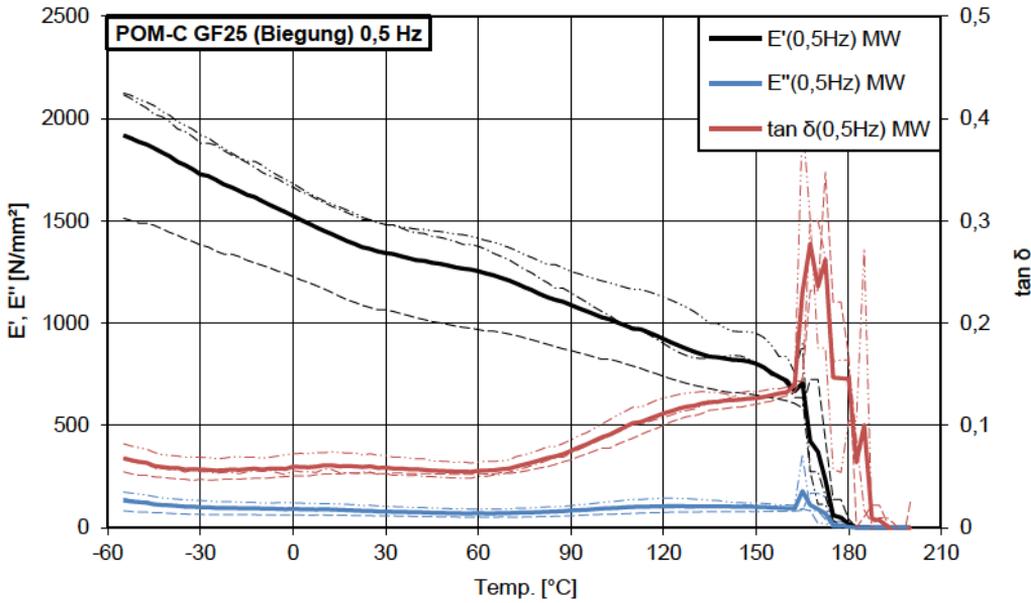
Anlage 3

Ergebnisse der Dynamisch-Mechanischen-Analysen an
Kunststoffen

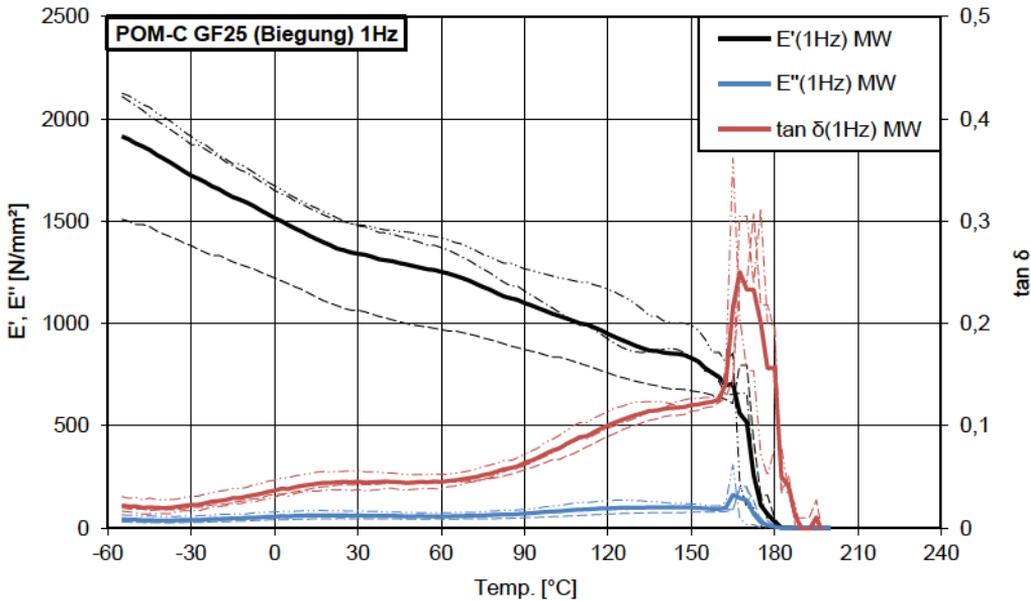
Inhalt

Biegeversuche	358
Zugversuche	370

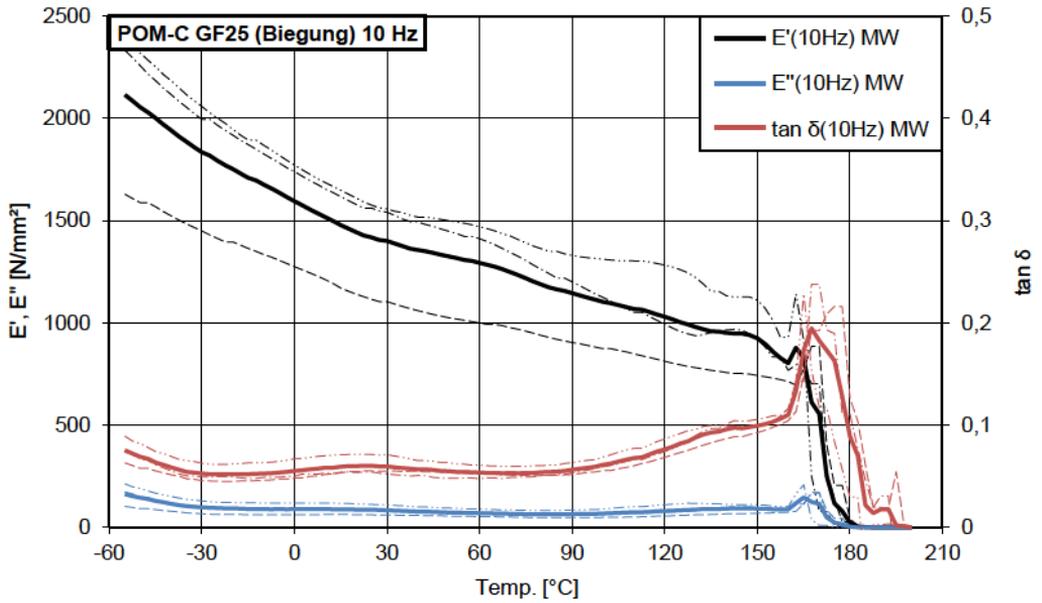
Biegeversuche



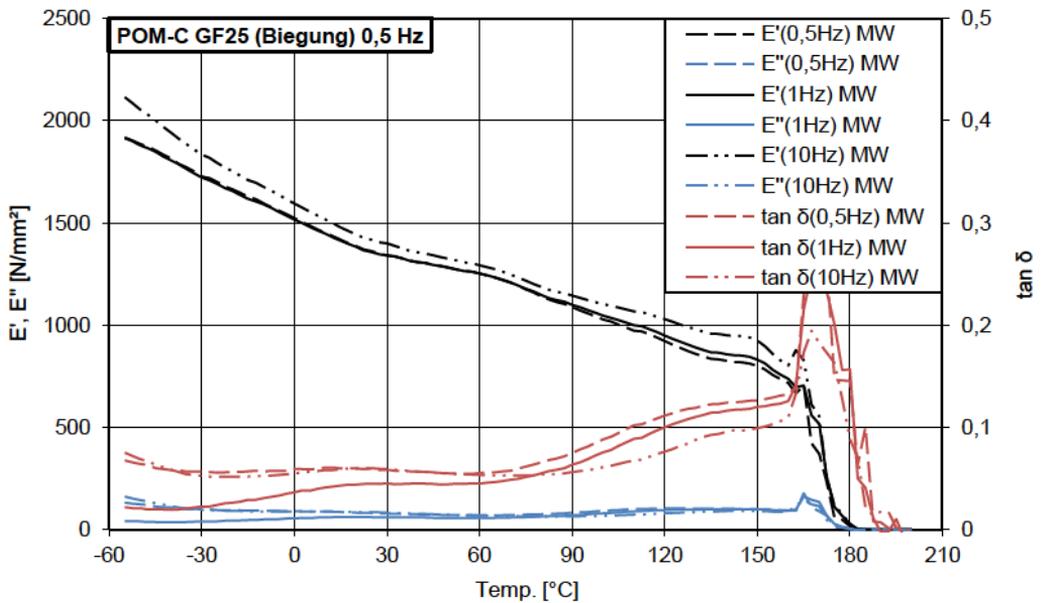
POM-C GF25 Einzelmessungen und Mittelwert
Frequenz 0,5 Hz



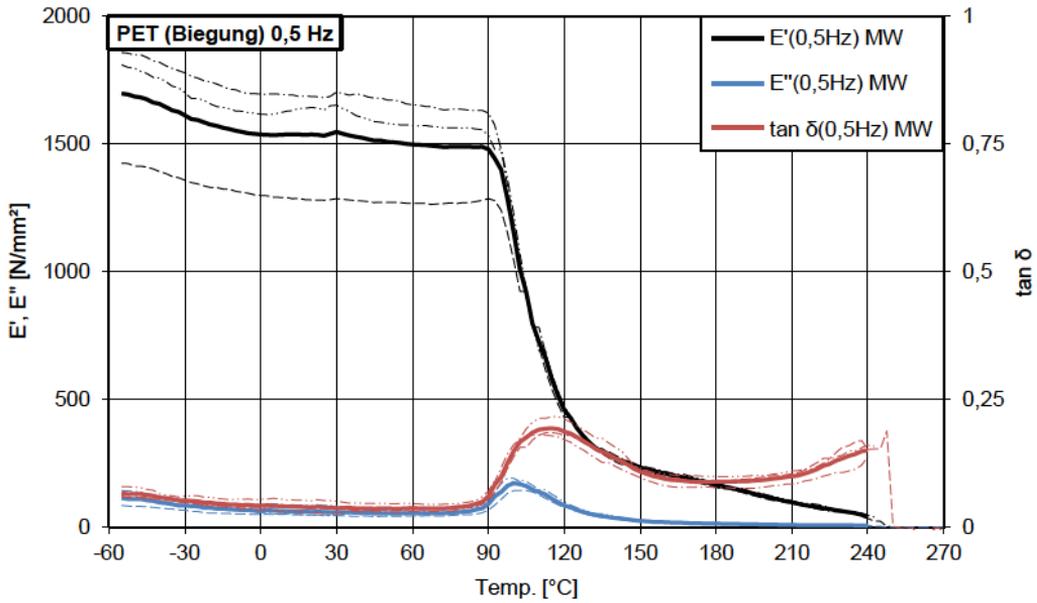
POM-C GF25 Einzelmessungen und Mittelwert
Frequenz 1 Hz



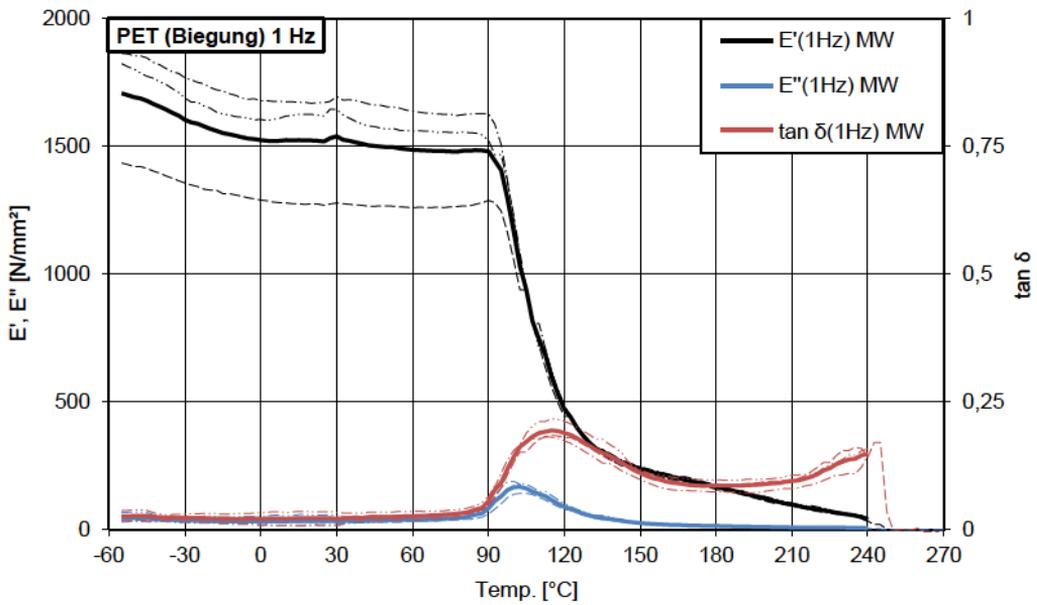
POM-C GF25 Einzelmessungen und Mittelwert
Frequenz 10 Hz



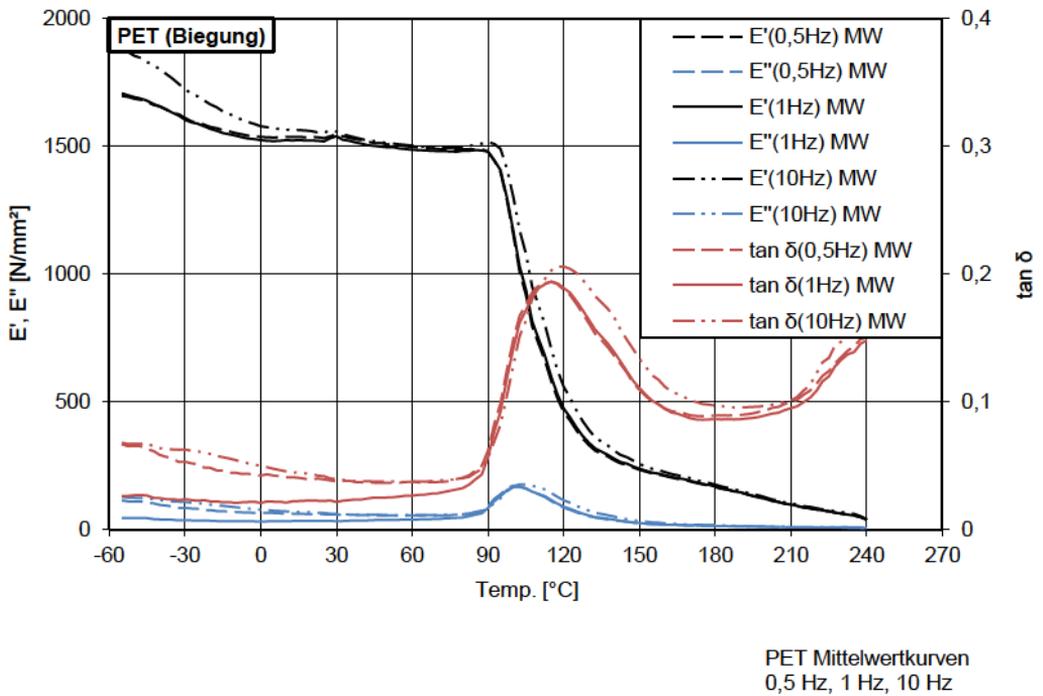
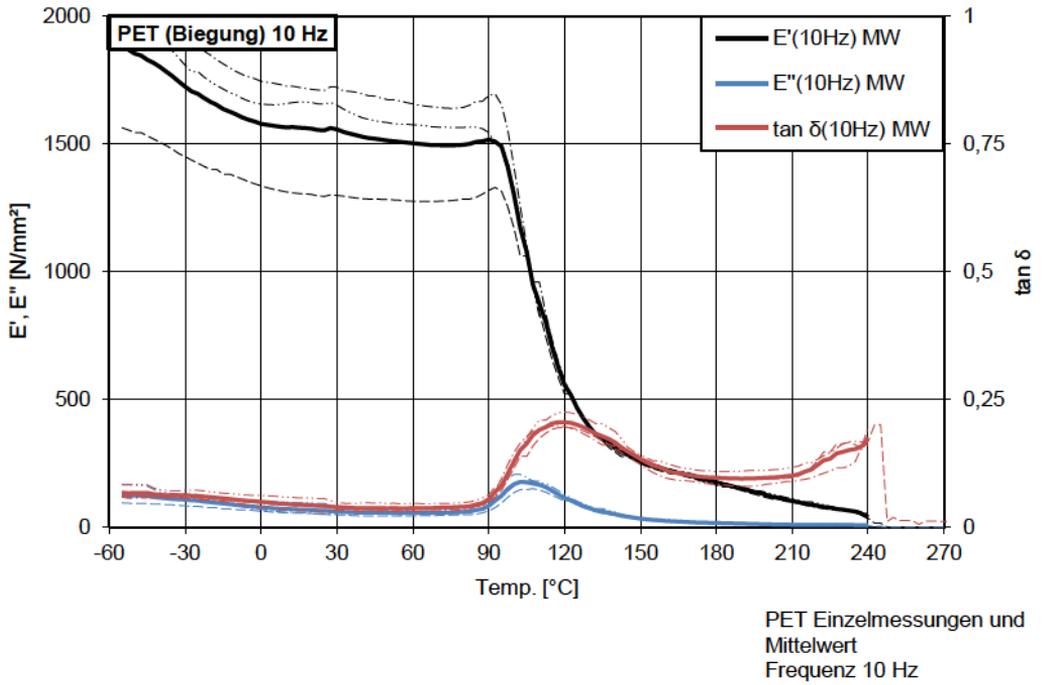
POM-C GF25 Mittelwertkurven
0,5 Hz, 1 Hz, 10 Hz

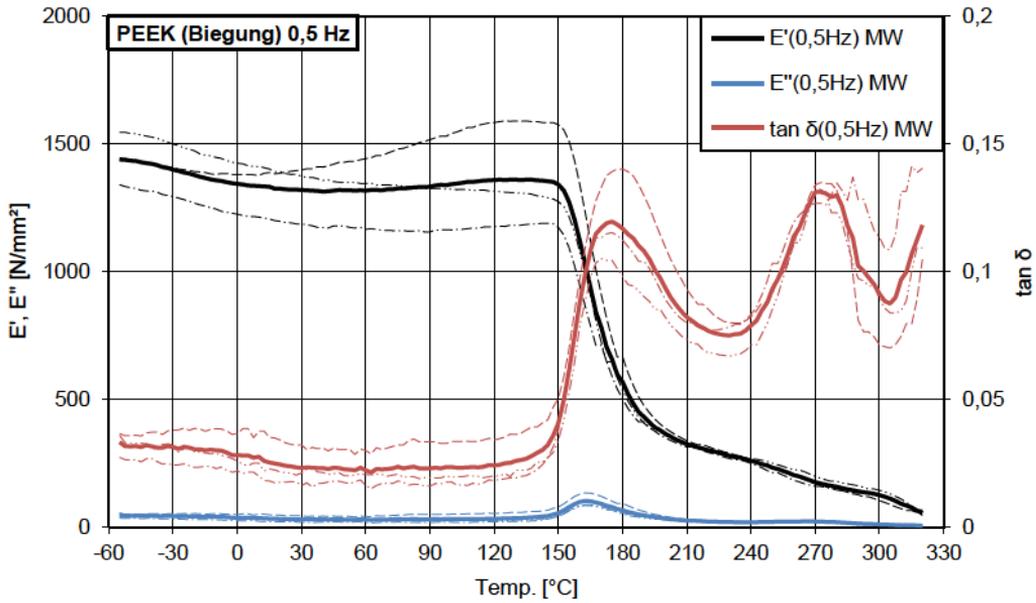


PET Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 0,5 Hz

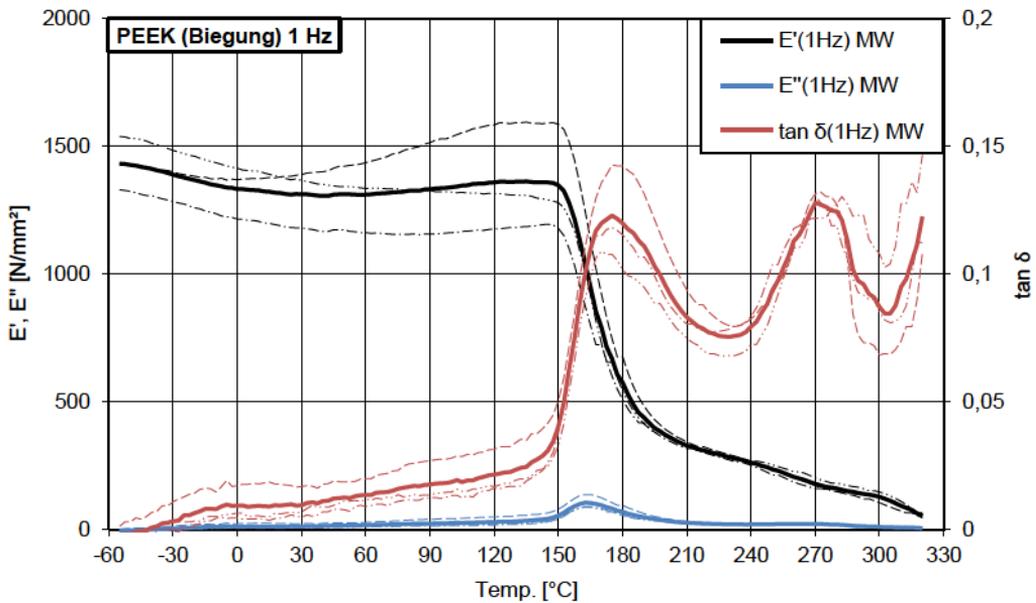


PET Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 1 Hz

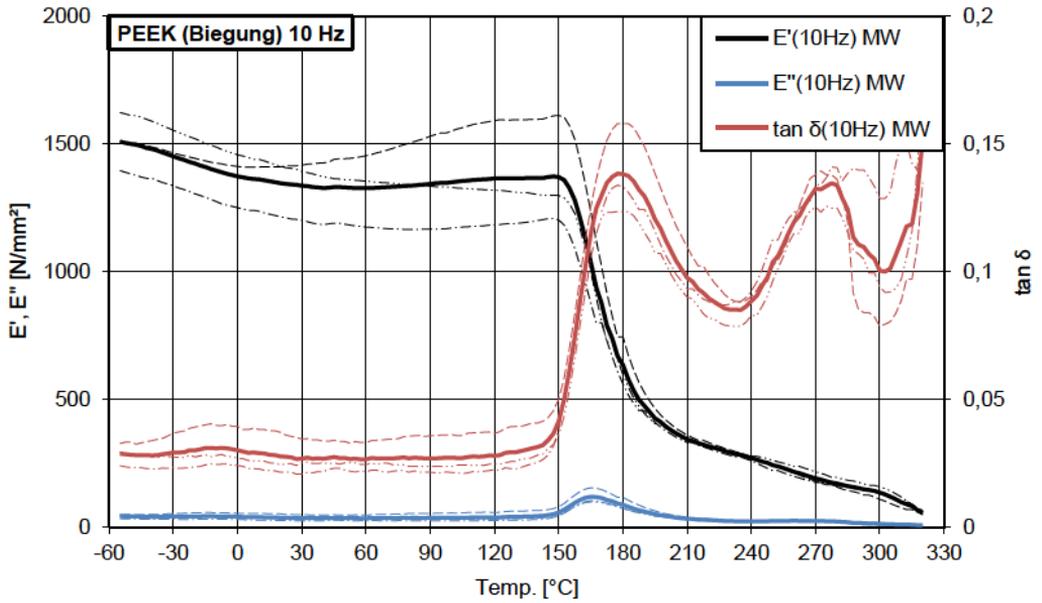




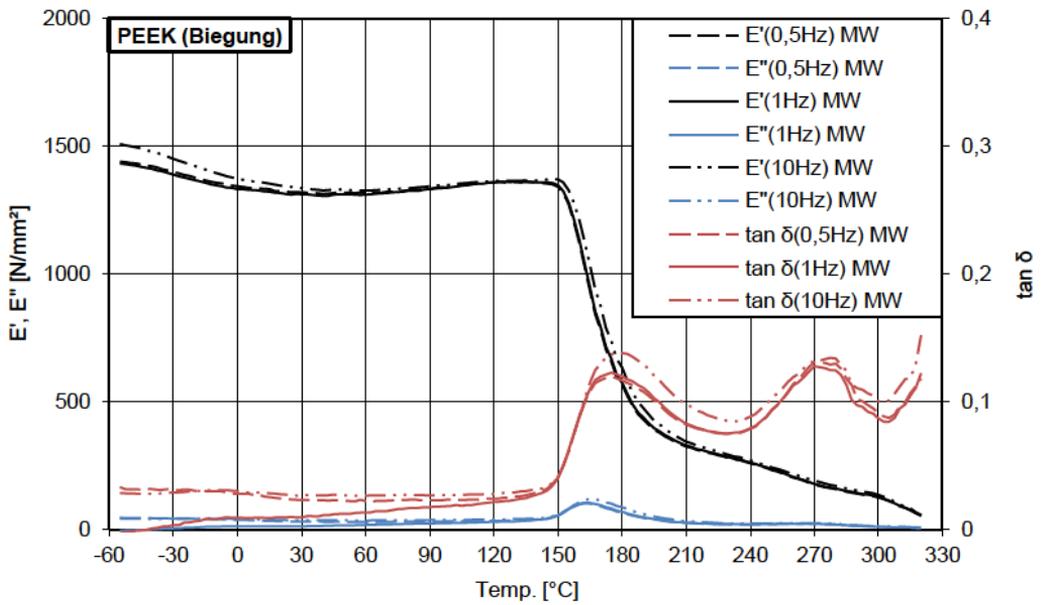
PEEK Einzelmessungen
und Mittelwert
Frequenz 0,5 Hz



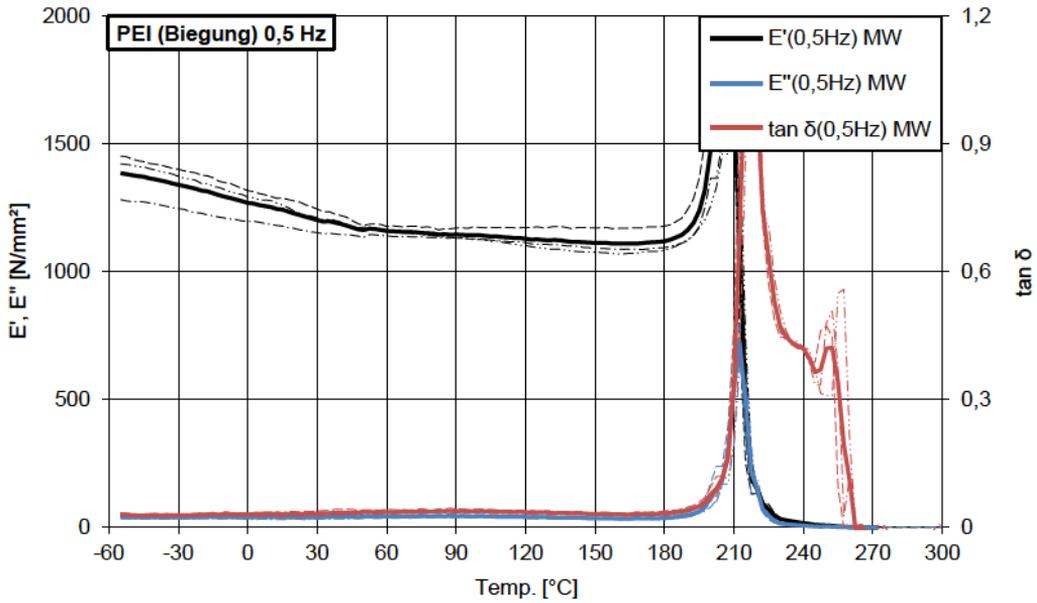
PEEK Einzelmessungen
und Mittelwert
Frequenz 1 Hz



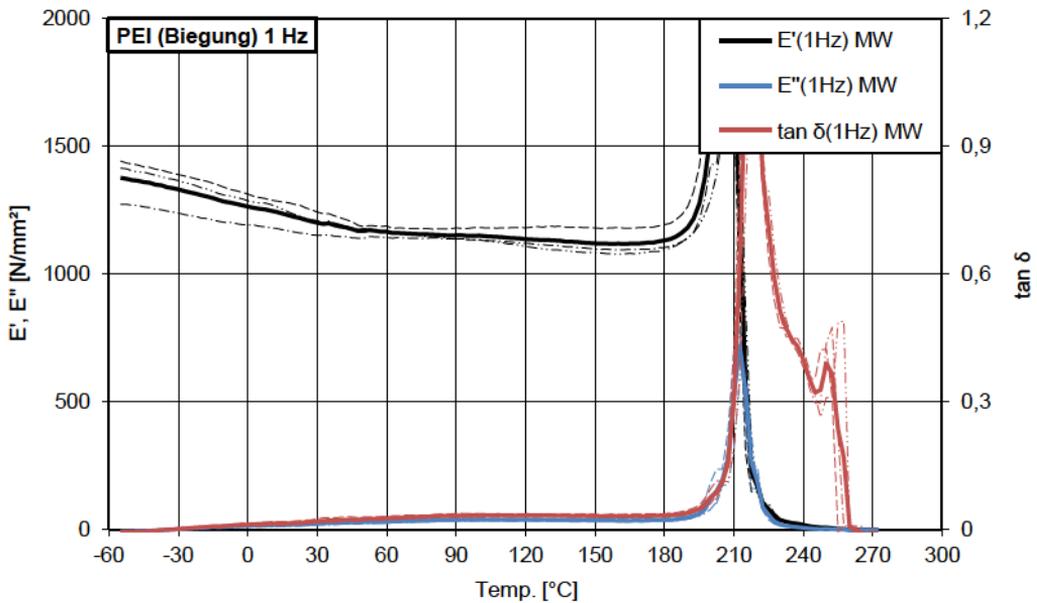
PEEK Einzelmessungen
 und Mittelwert
 Frequenz 10 Hz



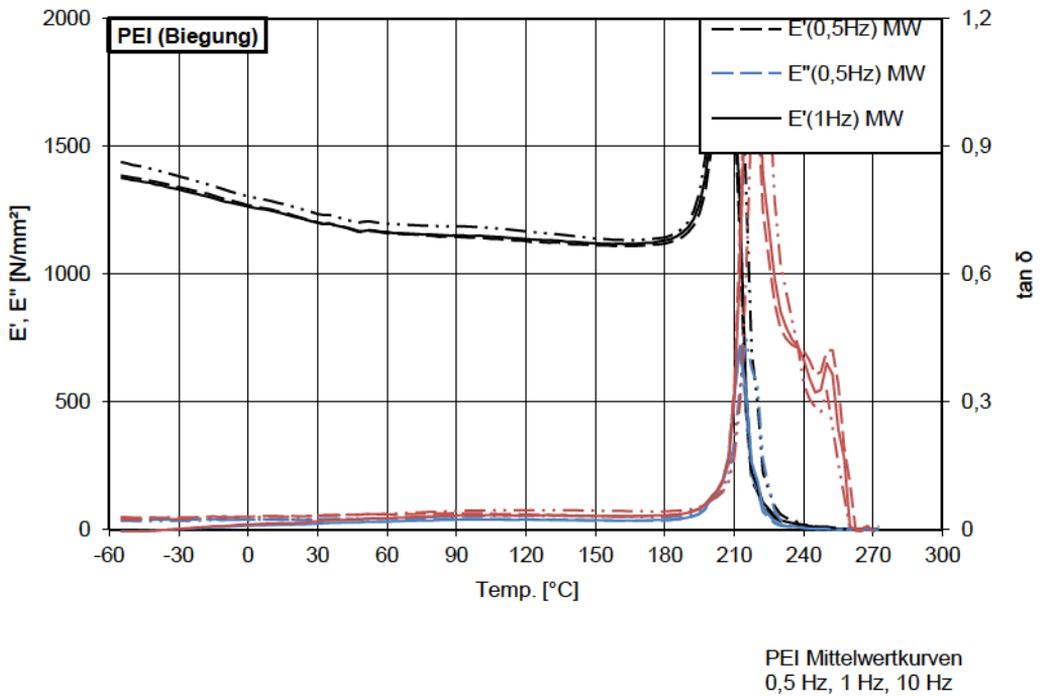
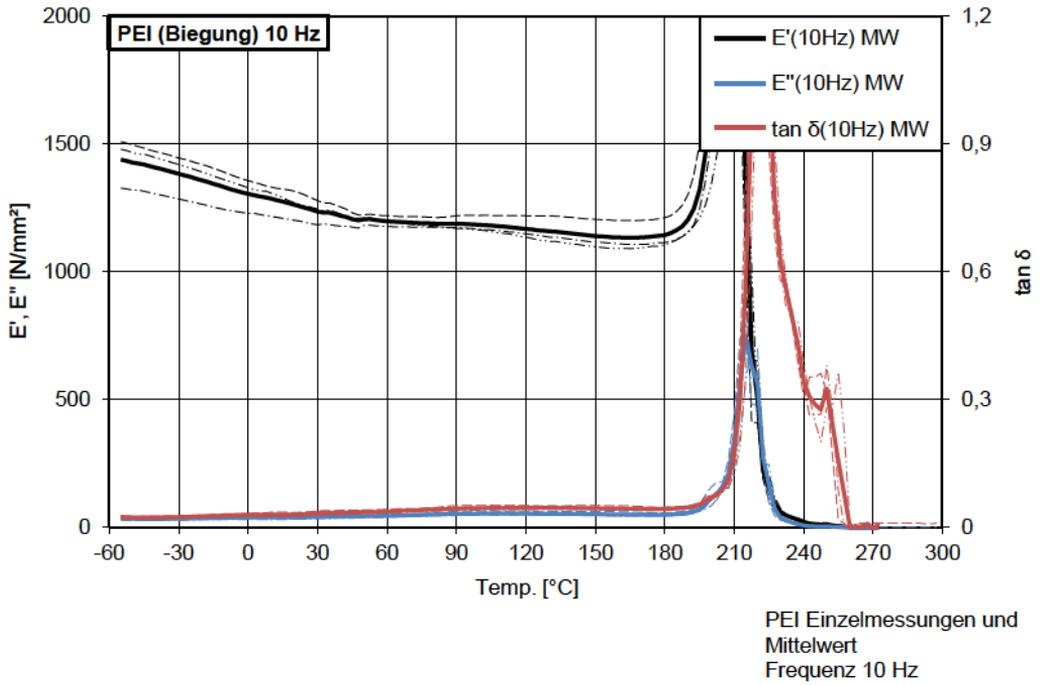
PEEK Mittelwertkurven
 0,5 Hz, 1 Hz, 10 Hz

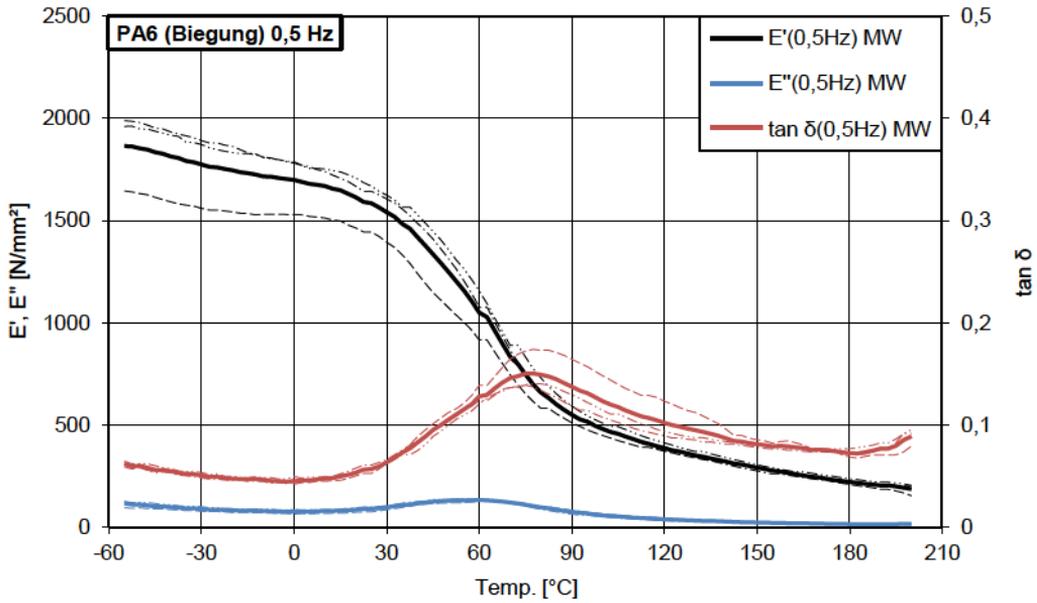


PEI Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 0,5 Hz

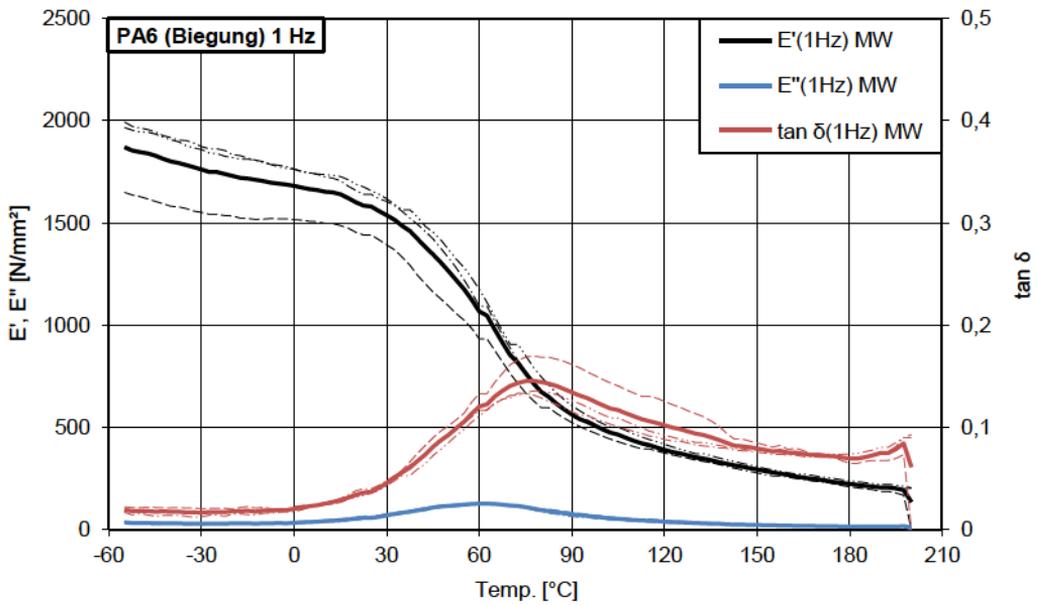


PEI Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 1 Hz

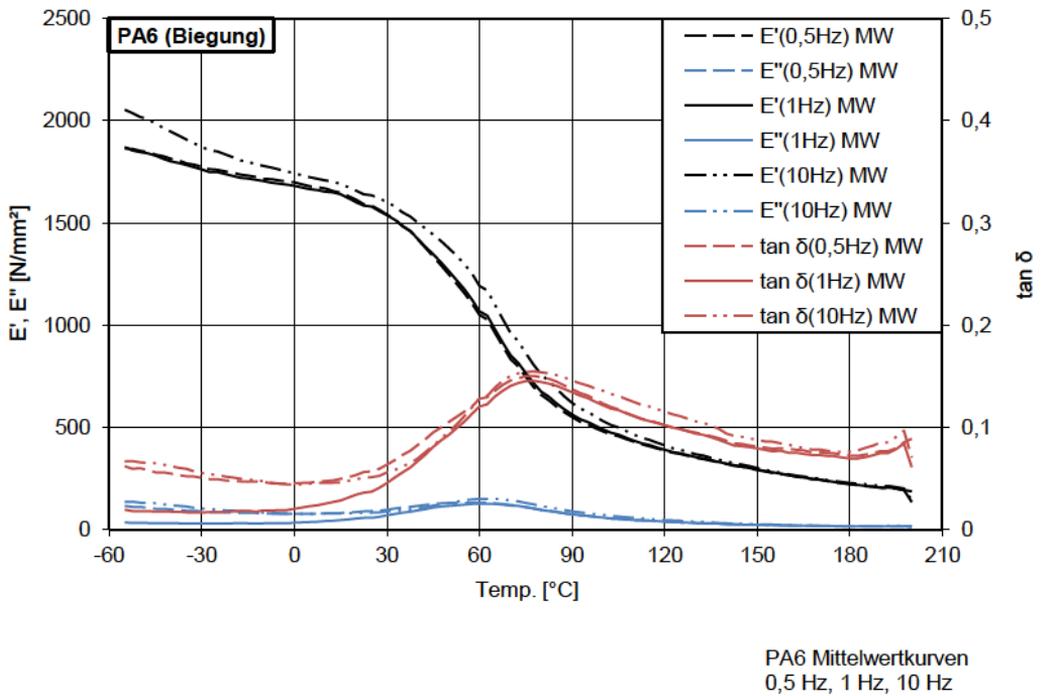
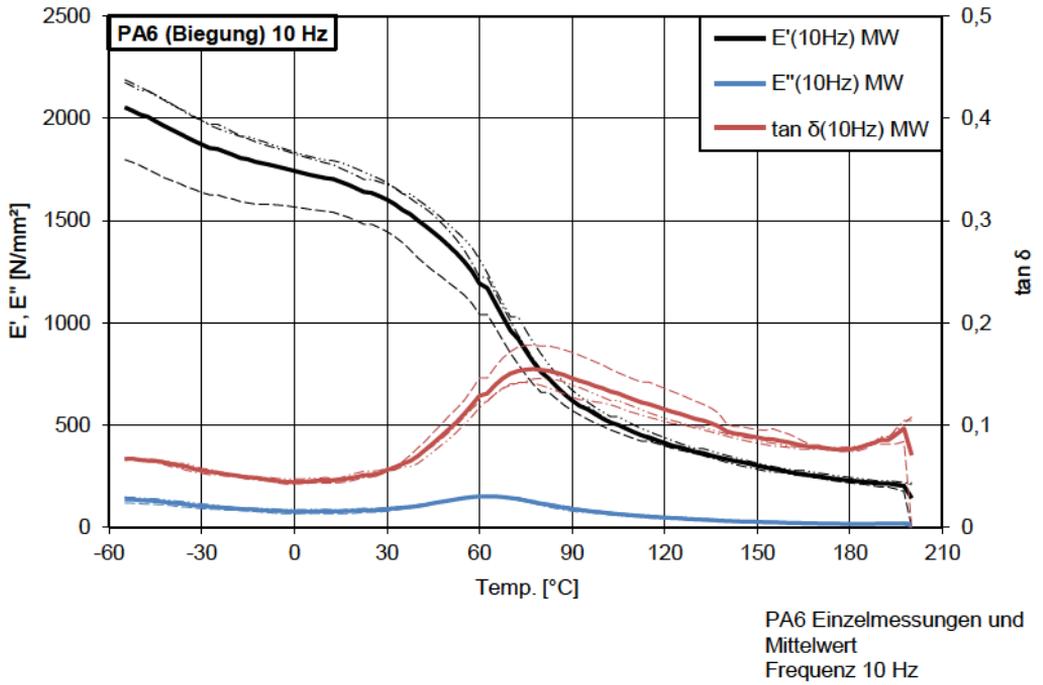


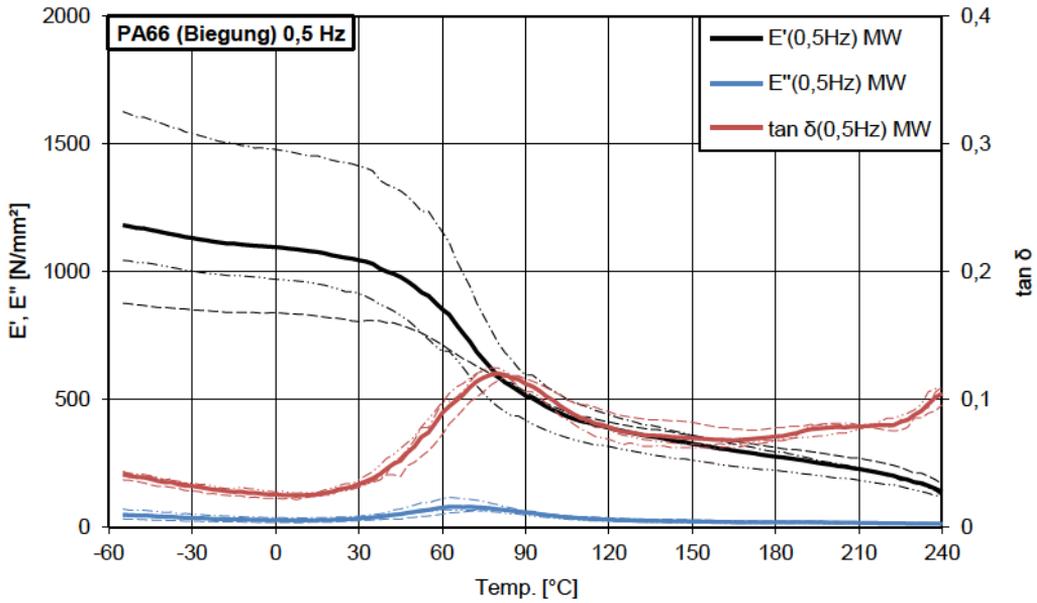


PA6 Einzelmessungen und
 Mittelwert
 Frequenz 0,5 Hz

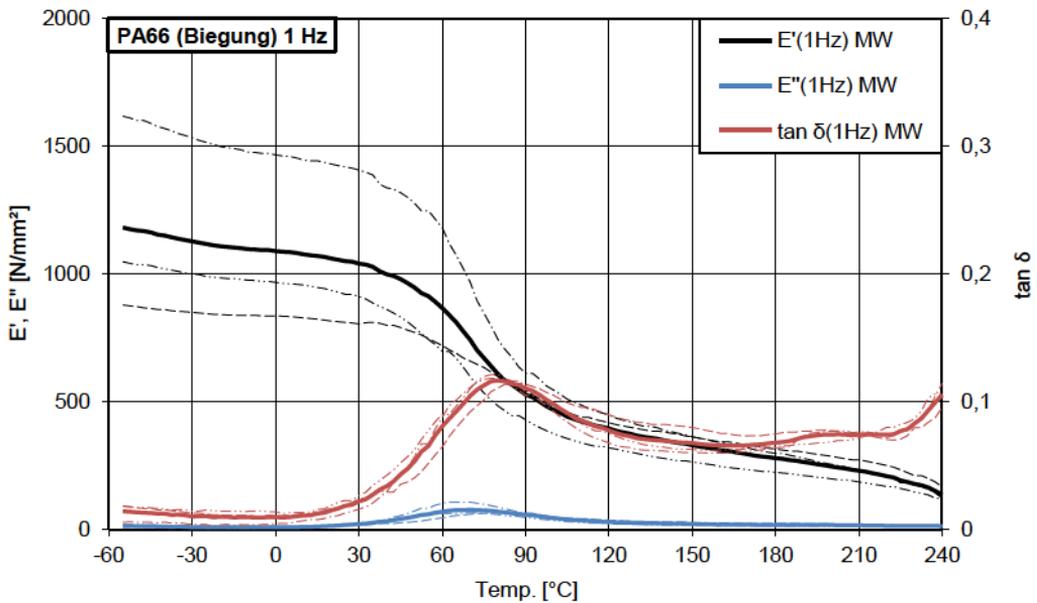


PA6 Einzelmessungen und
 Mittelwert
 Frequenz 1 Hz

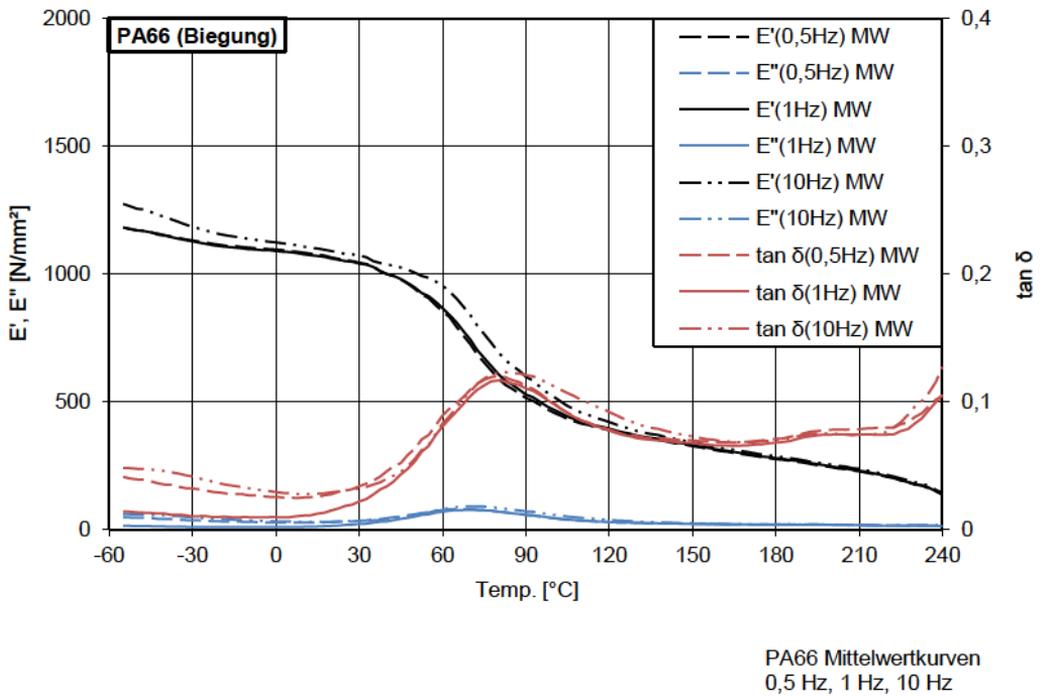
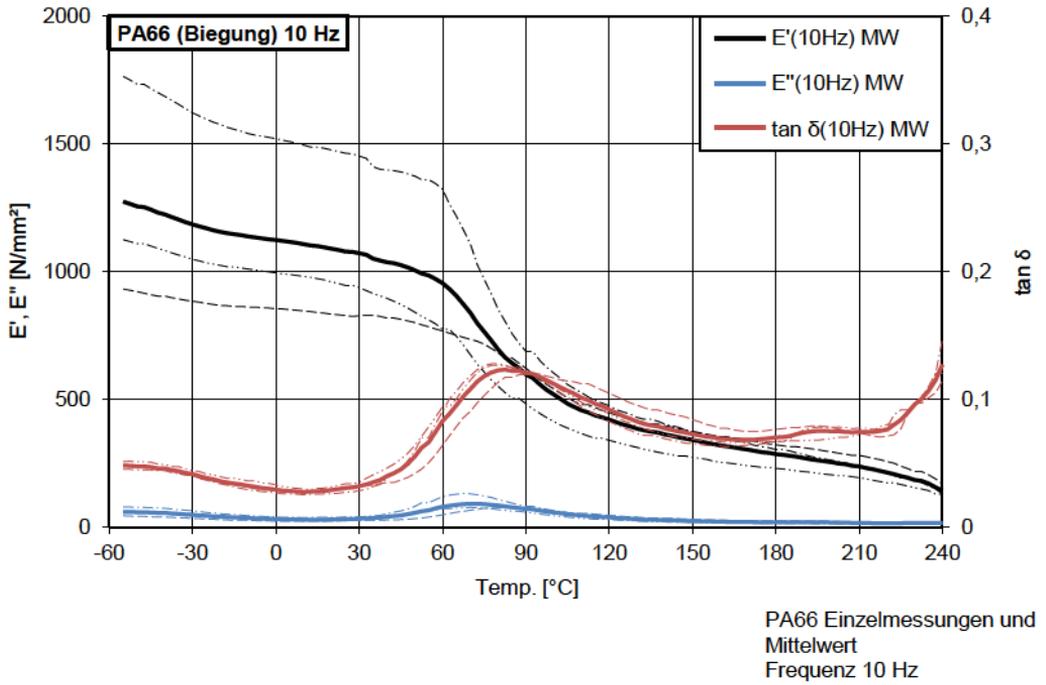




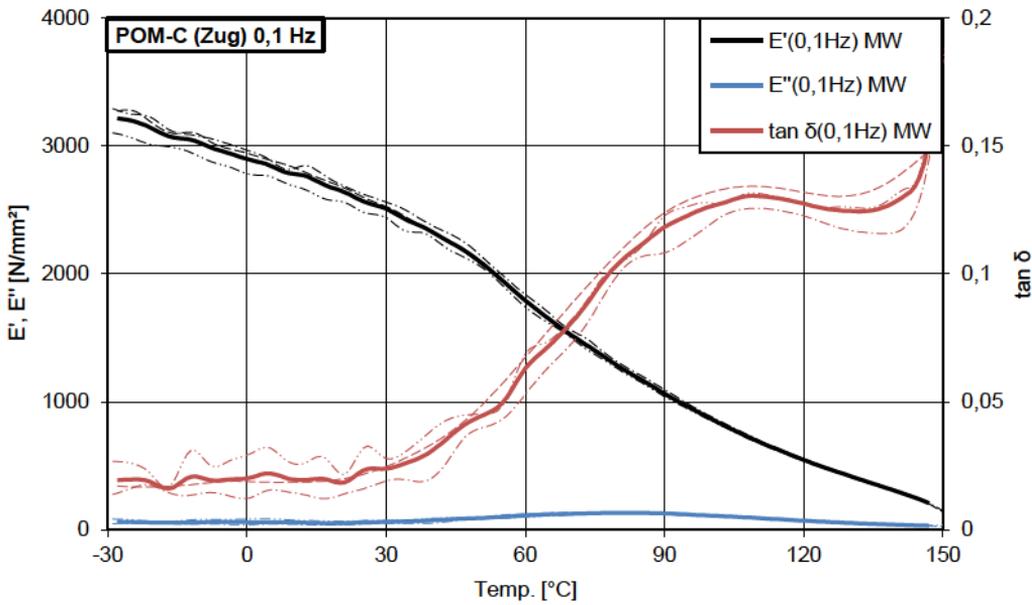
PA66 Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 0,5 Hz



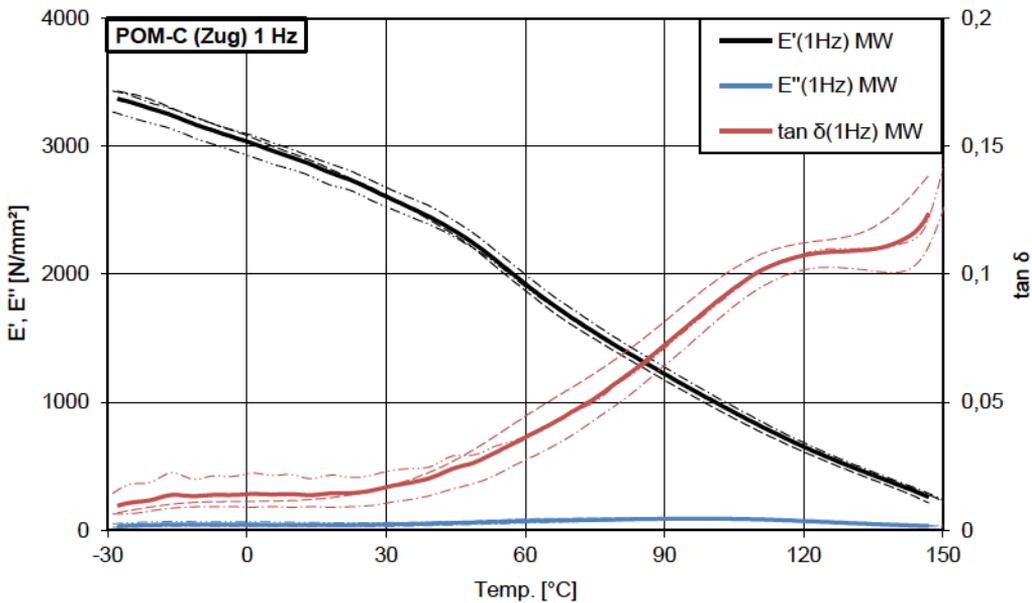
PA66 Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 1 Hz



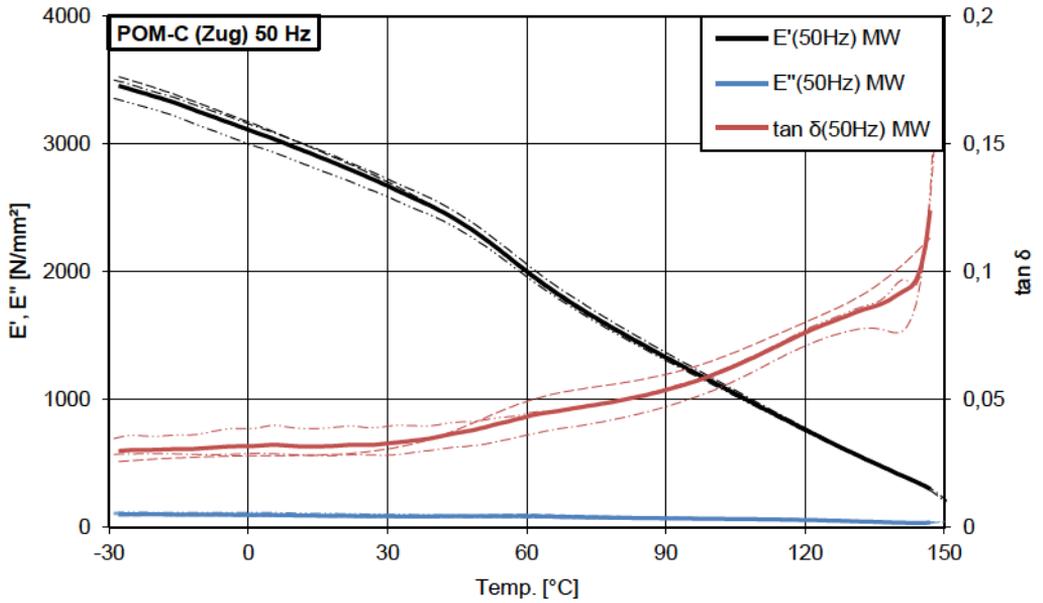
Zugversuche



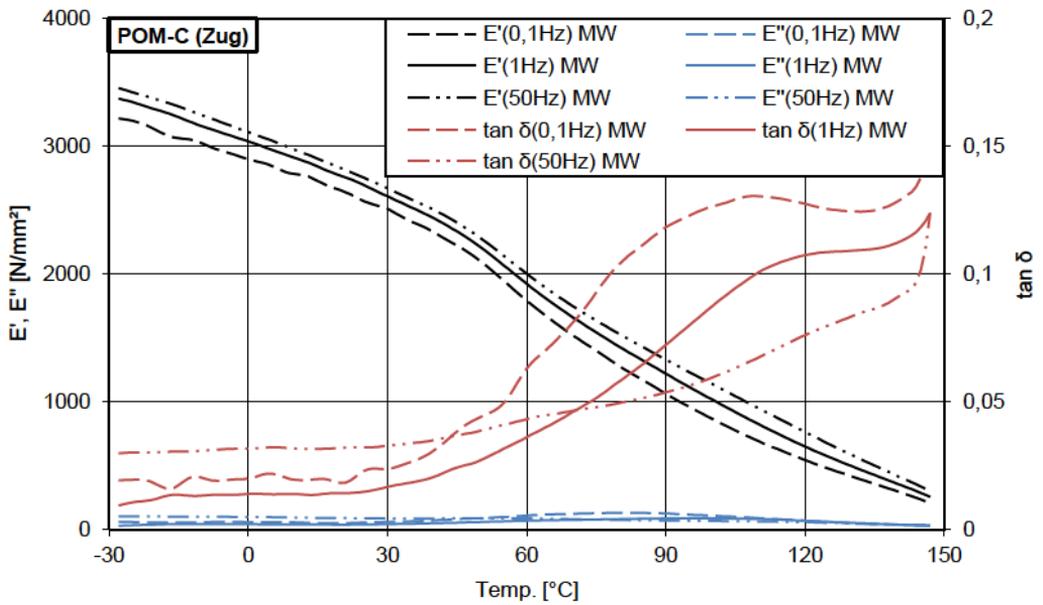
POM-C Einzelmessungen
und Mittelwert
Frequenz 0,1 Hz



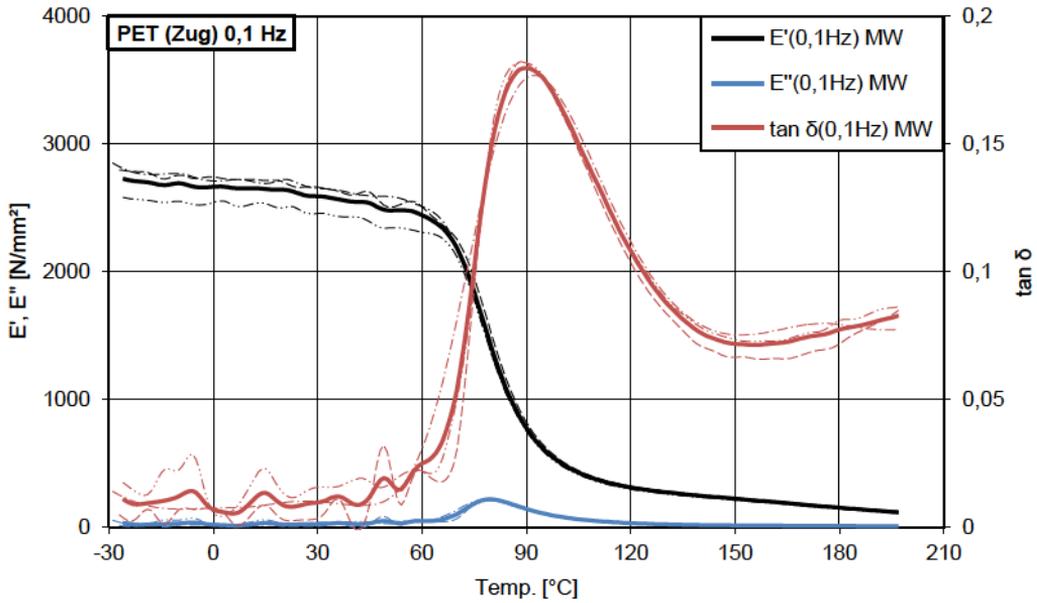
POM-C Einzelmessungen
und Mittelwert
Frequenz 1 Hz



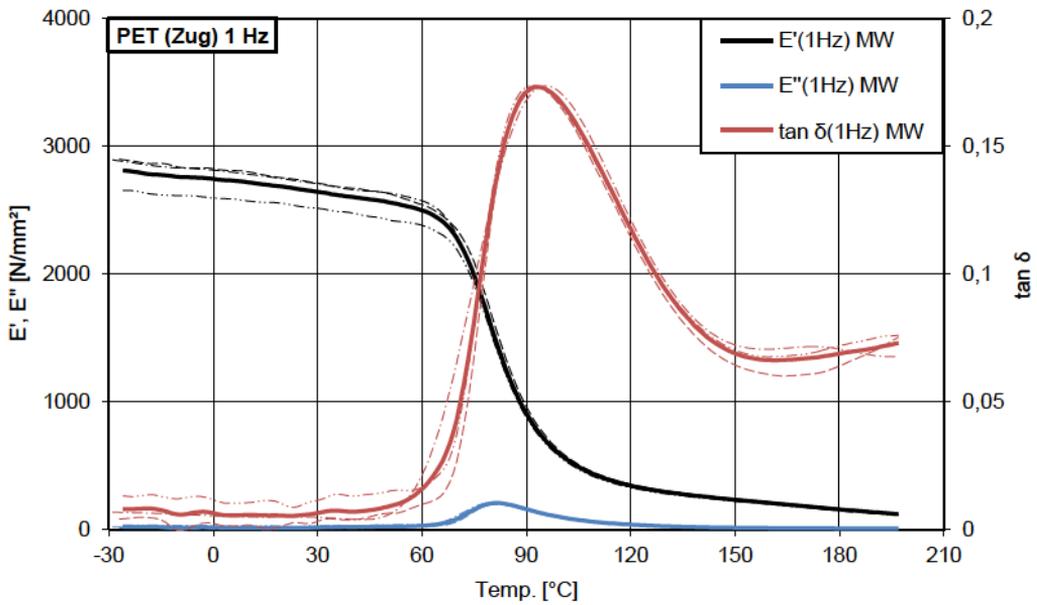
POM-C Einzelmessungen
und Mittelwert
Frequenz 50 Hz



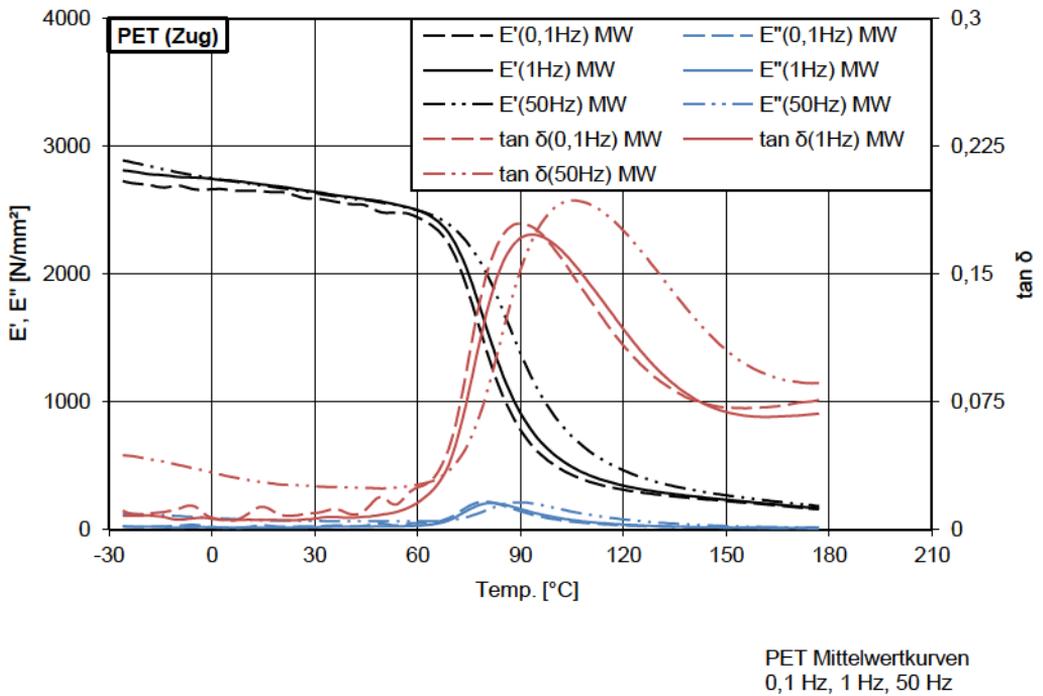
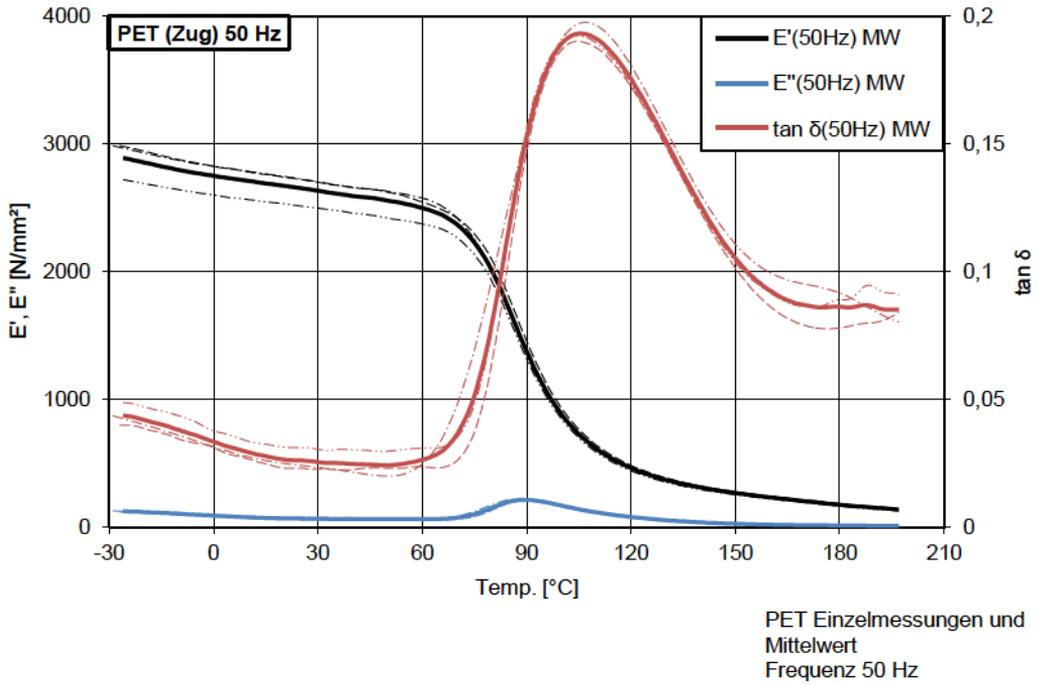
POM-C Mittelwertkurven
0,1 Hz, 1 Hz, 50 Hz

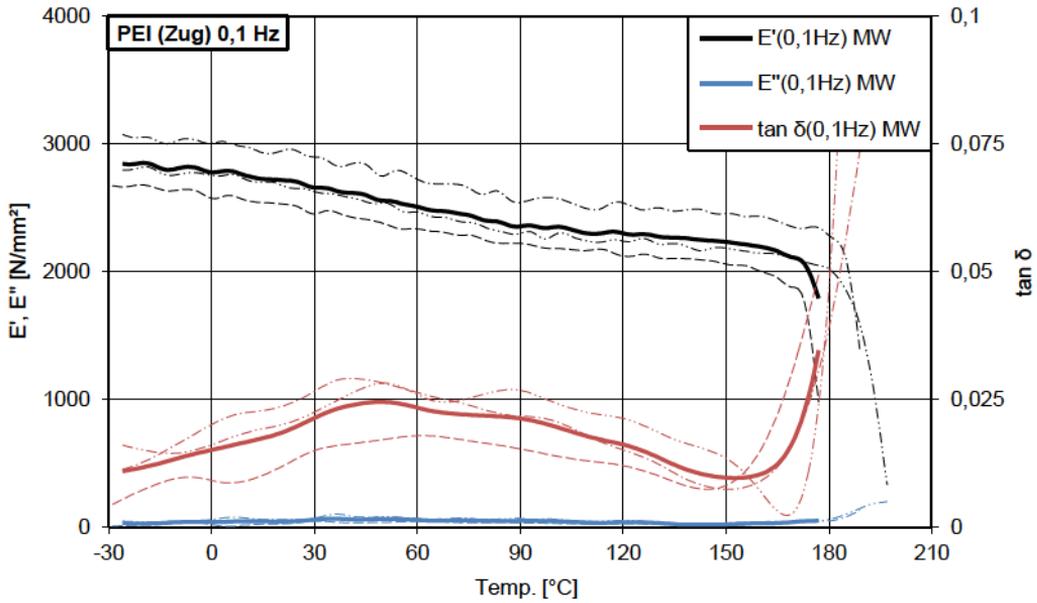


PET Einzelmessungen und
 Mittelwert
 Frequenz 0,1 Hz

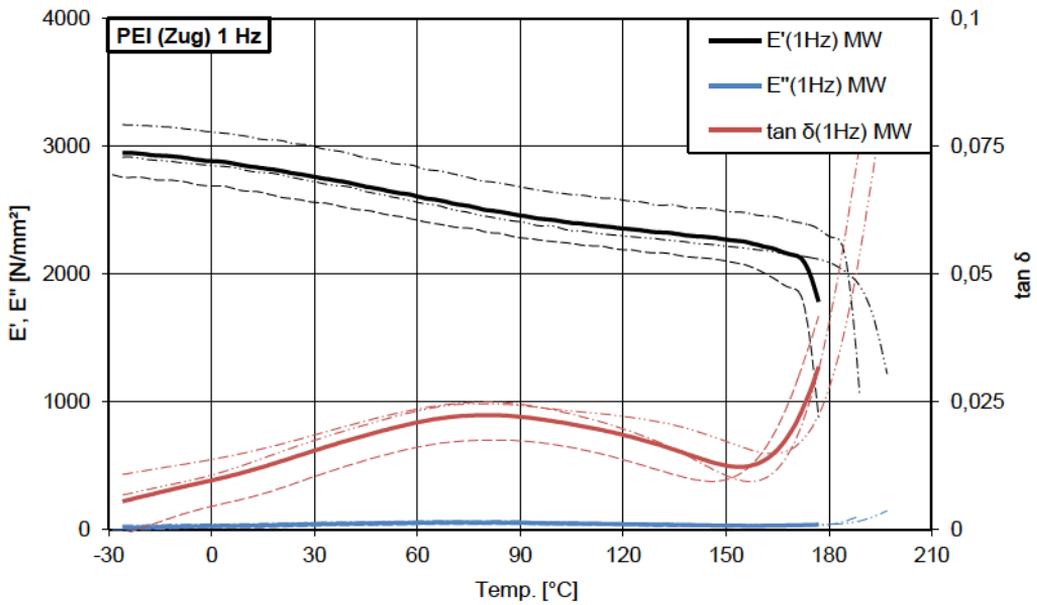


PET Einzelmessungen und
 Mittelwert
 Frequenz 1 Hz

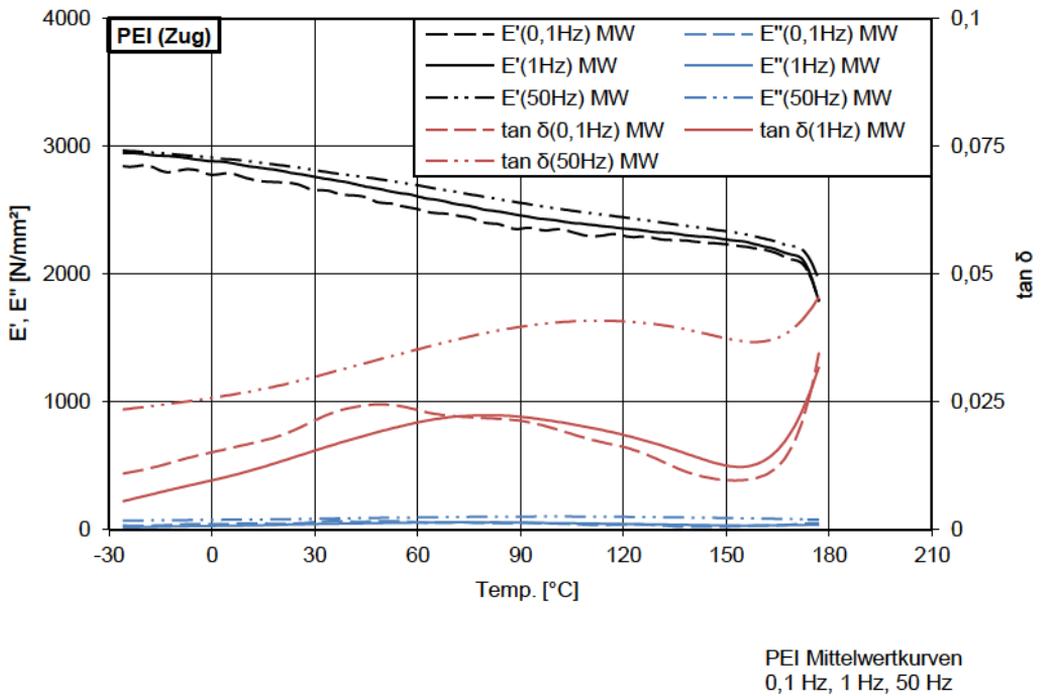
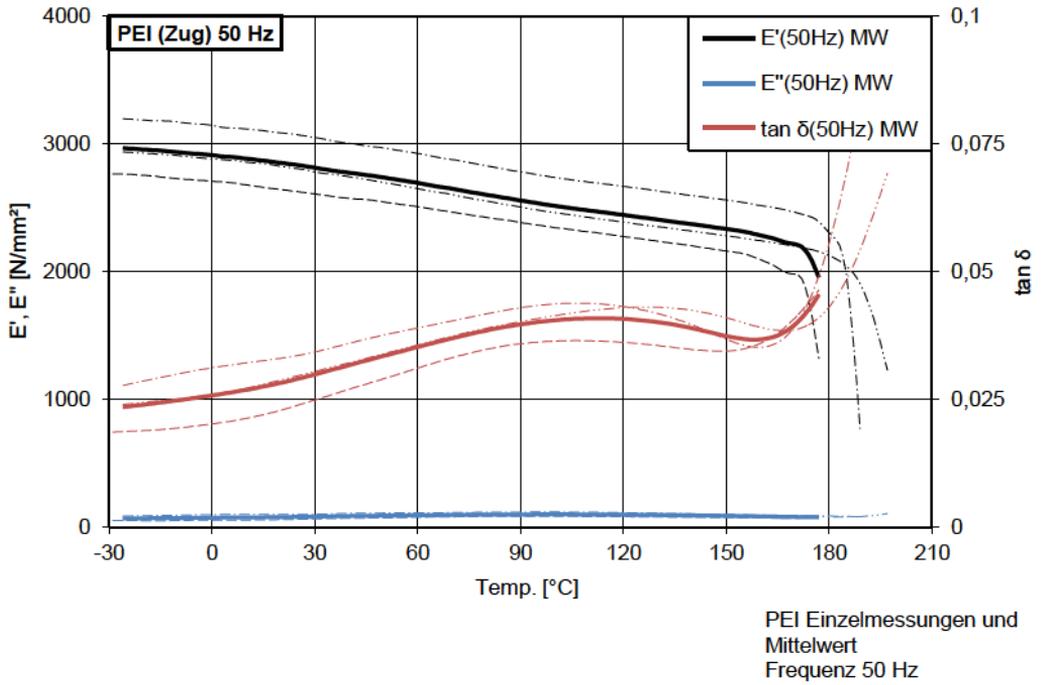


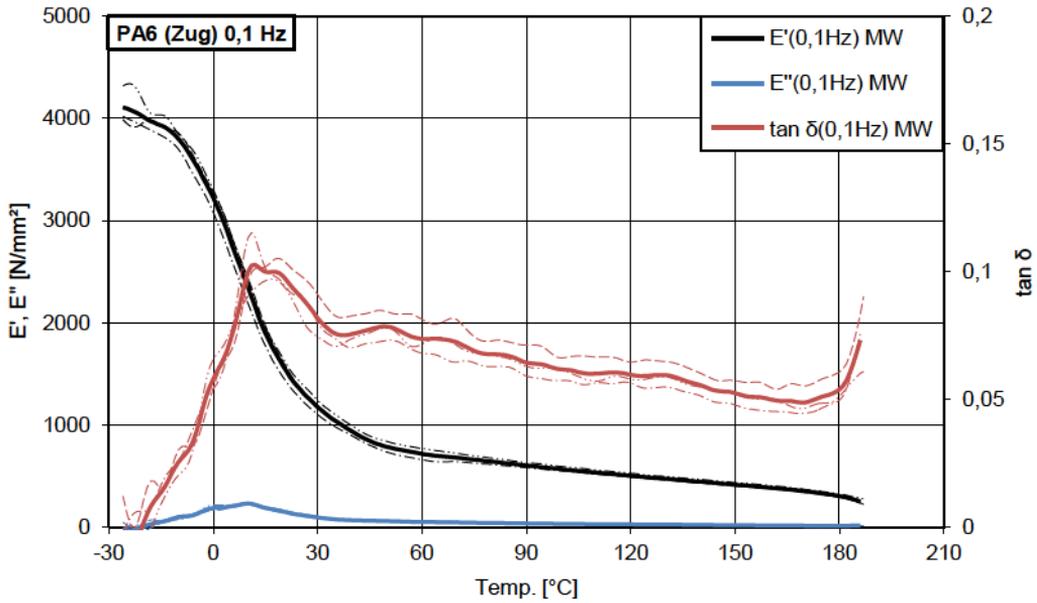


PEI Einzelmessungen und
 Mittelwert
 Frequenz 0,1 Hz

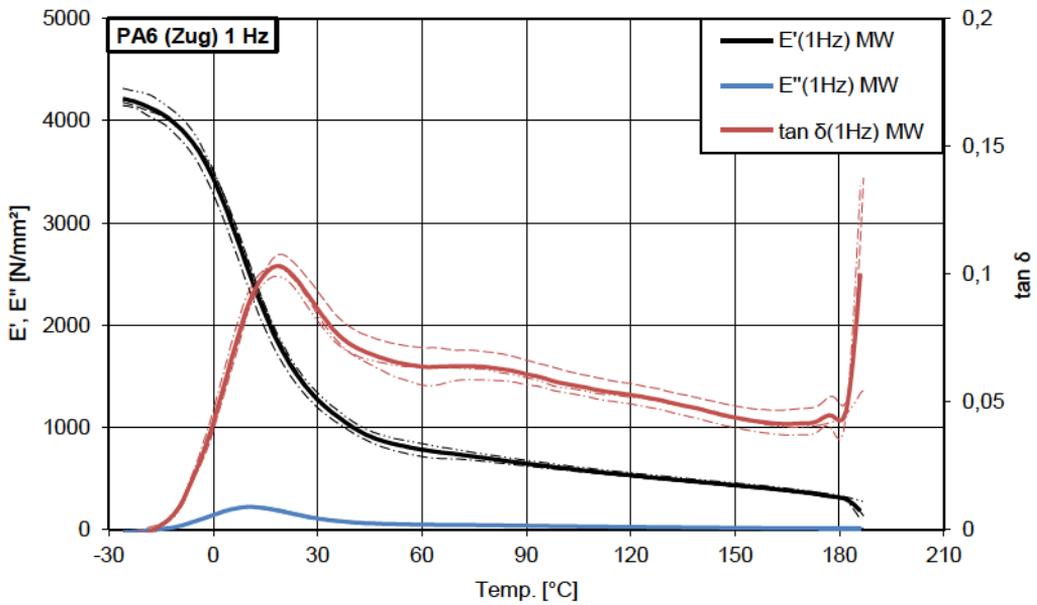


PEI Einzelmessungen und
 Mittelwert
 Frequenz 1 Hz

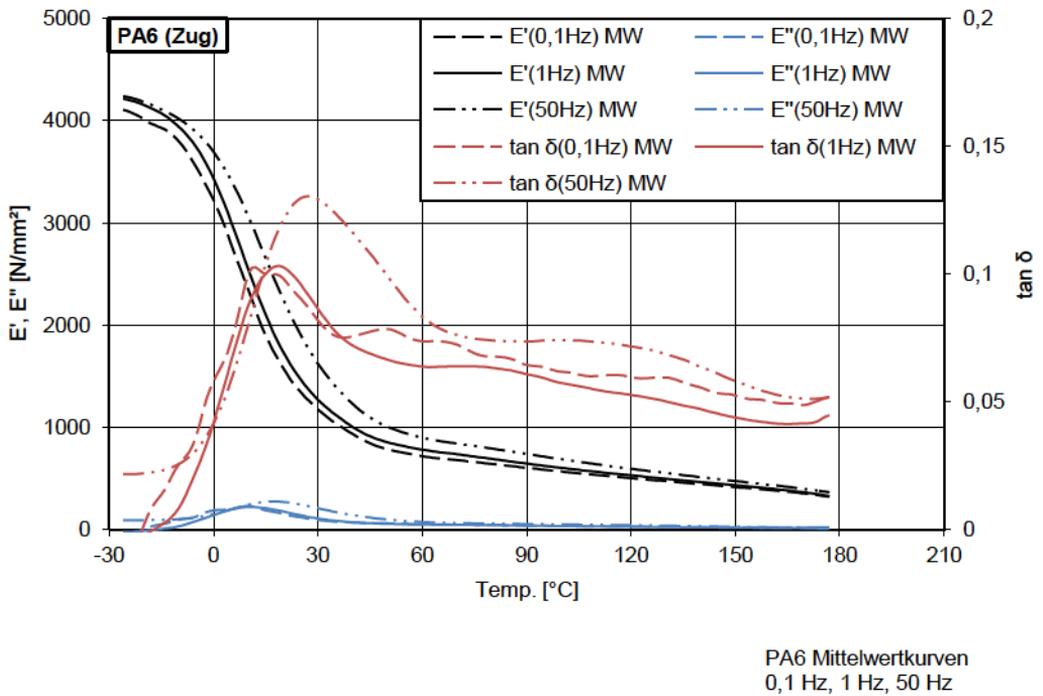
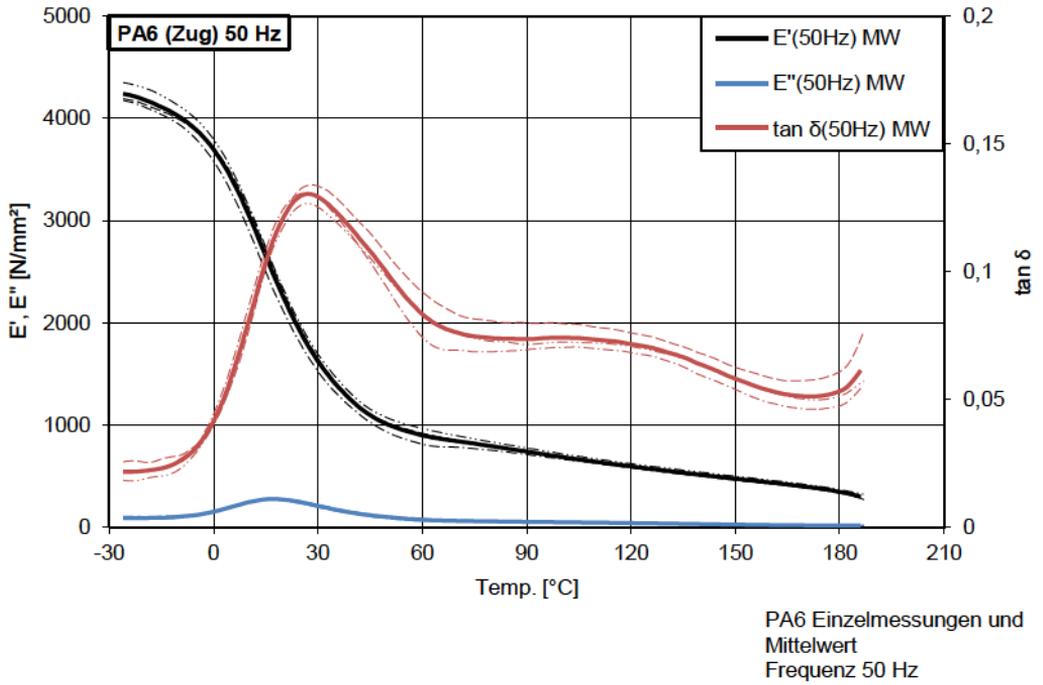


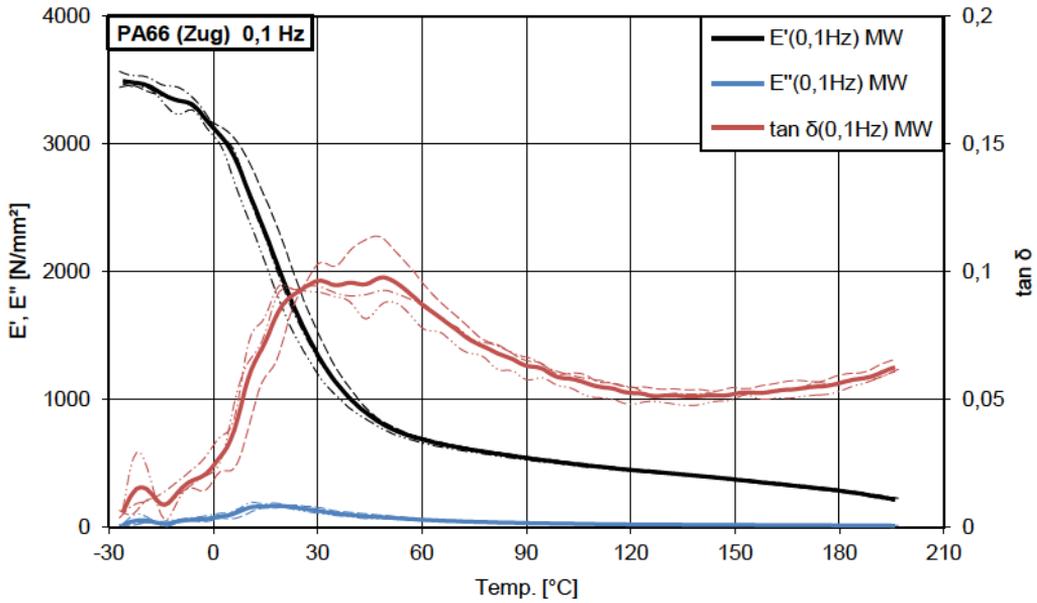


PA6 Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 0,1 Hz

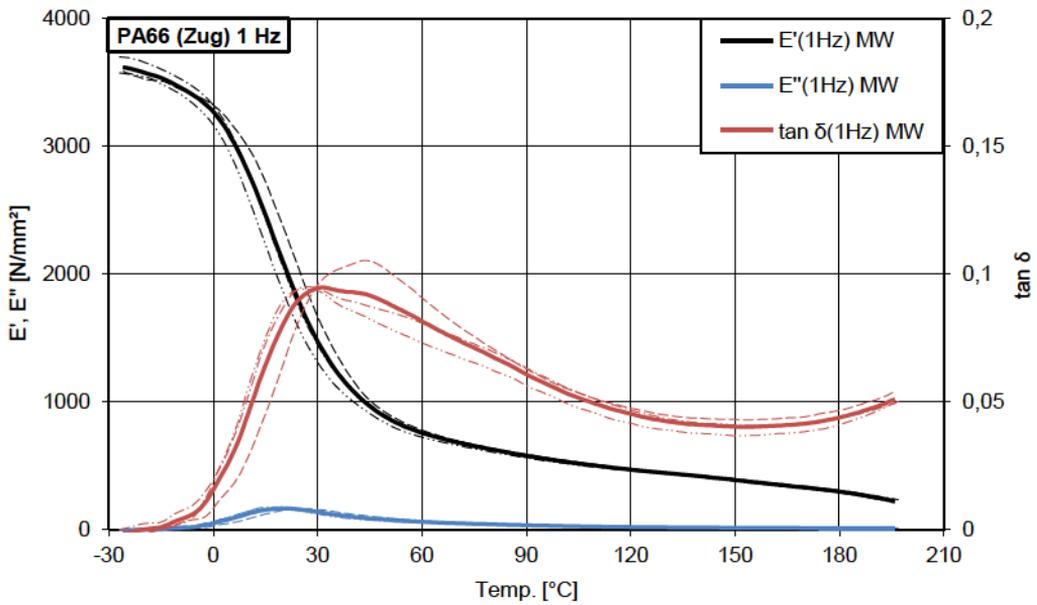


PA6 Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 1 Hz





PA66 Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 0,1 Hz



PA66 Einzelmessungen und
Mittelwert
Frequenz 1 Hz

