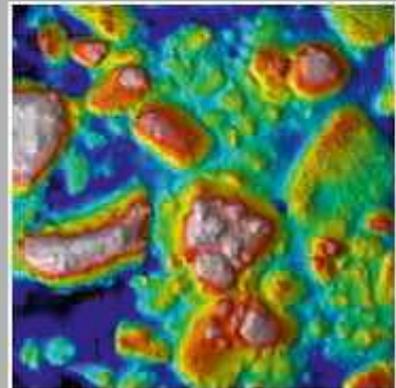
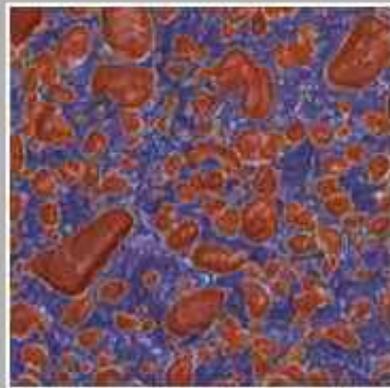
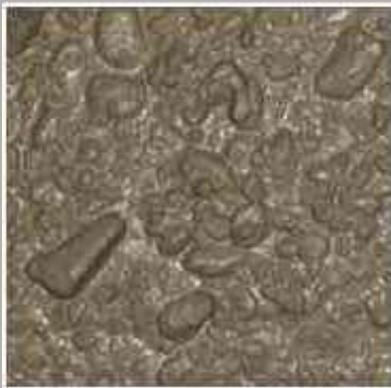


Tobias Schack

Bildbasierte Frischbetonprüfung zur digitalen Qualitätsregelung



Bildbasierte Frischbetonprüfung zur digitalen Qualitätsregelung

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur

Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Tobias Schack, M.Sc.

Hannover 2022

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Haist
Leibniz Universität Hannover

Koreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher
Ruhr-Universität Bochum

Kommissionsmitglied: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke
Leibniz Universität Hannover

Vorsitz: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Leibniz Universität Hannover

Tag der Prüfung: 20.04.2022

Impressum

Autor: Tobias Schack, M.Sc.

Titel: Bildbasierte Frischbetonprüfung zur digitalen Qualitätsregelung

Schriftenreihe: Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 24

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Haist
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Institut für Baustoffe
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9A
30167 Hannover
Tel.: 0511 762 3722
<http://www.baustoff.uni-hannover.de>

ISBN: 978-3-936634-27-3

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2019 bis 2022 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Die Themenstellung entwickelte sich aus eigenen Überlegungen und umfangreichen Vorarbeiten zur Anwendung innovativer Messmethoden zur Charakterisierung von Frischbetoneigenschaften. Dankenswerter Weise wurde ein Teil der Untersuchungen vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. gefördert.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Haist, der mir diese Arbeit durch seine Förderung und fachliche Betreuung ermöglicht hat. Die stete Bereitschaft zur Diskussion sowie die mir eingeräumten Handlungs- und Entscheidungsfreiräume haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Darüber hinaus danke ich ihm auch für seine menschliche Unterstützung.

Besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus für die wertvollen Diskussionen und Anregungen aussprechen. Das mir entgegengebrachte Vertrauen hat zu Beginn meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter sehr dazu beigetragen, dass ich viel Freude an der wissenschaftlichen Arbeit entwickelt habe.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher für die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke danke ich für das Interesse an meiner Arbeit sowie für die Mitwirkung als Kommissionsmitglied.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Baustoffe danke ich besonders für das herzliche und vertrauensvolle Arbeitsklima. Insbesondere möchte ich mich bei Dr.-Ing. Jesko Gerlach und Dr.-Ing. Max Coenen für die fachliche Unterstützung und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken.

Für die ausdauernde Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen danke ich den Laborantinnen und Laboranten. Insbesondere gilt mein Dank Michael Brachter für die stete Hilfs- und Diskussionsbereitschaft bei den experimentellen Untersuchungen.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meiner Lebensgefährtin Katharina für die Unterstützung auf vielfältige Weise und das mir entgegengebrachte Vertrauen während der Entstehung dieser Arbeit.

Tobias Schack

Kurzfassung

Massivbauwerke gehören mit einer Lebensdauer von zumeist weit über 50 Jahren zu extrem langlebigen Investitionsgütern. Insbesondere bei Betonbauwerken werden die Qualitätsmerkmale, wie z. B. die sichere Gewährleistung der Tragfähigkeit oder der Dauerhaftigkeit, in hohem Maße durch Prozesse bestimmt, die in einem im Vergleich zur Nutzungsdauer des Bauwerks extrem kurzen Zeitraum von wenigen Stunden ablaufen. Dementsprechend kommt der präzisen Prüfung und Bewertung der Eigenschaften bei der Herstellung und Verarbeitung des Frischbetons eine besondere Bedeutung zu.

Auf der Baustelle ist die Ermittlung der (Frisch-)Betoneigenschaften gegenwärtig noch immer rein empirisch geprägt. Zur Prüfung der Eigenschaften bei der Identitätsprüfung wird zumeist allein das Ausbreitmaß in Verbindung mit einer subjektiven Augenscheinprüfung eingesetzt. Eine mögliche Integration digitaler Methoden zur Qualitätsprüfung scheitert gegenwärtig an entsprechenden Sensorsystemen und Auswertemethoden. Zur Einführung solcher digitalen Methoden in der Betontechnologie muss es gelingen, die bisher rein subjektiv wahrgenommenen Eigenschaften des Frischbetons, im speziellen der Augenscheinprüfung bei der Identitätsprüfung, z. B. mit bildbasierten Methoden zu erfassen und in digitale Kennwerte zu überführen.

Zur Überwindung der Grenzen der subjektiven Augenscheinprüfung wurde im Rahmen dieser Arbeit eine bildbasierte Messmethodik entwickelt und validiert, die es gestattet maßgebende (Frisch-)Betoneigenschaften im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) digital zu erfassen und zu bewerten. Durch Anwendung photogrammetrischer Messprinzipien und digitaler Bildanalyseverfahren sowie Methoden der künstlichen Intelligenz können maßgebende (Frisch-)Betoneigenschaften aus Bilddaten prädiziert werden und somit die Identitätsprüfung des Frischbetons durch eine Vielzahl zusätzlicher Parameter erweitert werden. Darauf aufbauend können die ermittelten Daten in einen digitalen Regelkreislauf integriert werden, der eine unmittelbare Anpassung der Eigenschaften bei der weiteren Produktion ermöglicht.

Die Ergebnisse umfangreicher experimenteller Untersuchungen zeigen deutlich, dass eine ziel-sichere digitale Erfassung und Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften mit der entwickelten bildbasierten Methodik im Rahmen der Konsistenzprüfung möglich ist. Als zu bewertende Oberflächeneigenschaften des ausgebreiteten Frischbetons eignen sich sowohl 3D-Kennwerte der Oberflächengestalt sowie geometrische 2D-Eigenschaften als auch die Oberflächenreflexion. Darauf aufbauend bietet das Konzept der digitalen Qualitätsregelung die Möglichkeit, den Betonproduktionszyklus direkt mit den Qualitätsmerkmalen des Frischbetons zu verknüpfen und so *Industrie 4.0*-Standards im Betonbau zu etablieren.

Schlagwörter: bildbasierte Frischbetonprüfung, Computer Vision, photogrammetrische Messprinzipien, digitale Qualitätsregelung, Konsistenzprüfung

Abstract

With a service life of about 50 years, building structures are extremely durable capital goods. In concrete structures in particular, the quality features such as the load-bearing capacity or the durability, are determined by processes such as casting or concrete compaction that take place in an extremely short time period of a few hours. Therefore, the precise control of both the concrete quality - and here especially of the fresh concrete properties - as well as of the involved processes is of particular importance.

The quality characteristics of fresh concrete are currently still determined empirically on the construction site. As a standard method, the flow table test is used to assess the consistency. In addition, the spread out fresh concrete is assessed visually. The use of digital quality control standards is currently failing due to the lack of appropriate sensor and measurement processes for recording and digitally evaluating the fresh concrete properties as well as corresponding control loops. In order to introduce such digital processes into concrete technology, suitable sensors and methods that enable an automatic and digital derivation of the fresh concrete properties during the quality control have to be developed.

In order to overcome the limitations of the subjective visual inspection, an image-based method has been developed and validated in this thesis. This method allows a digital recording and evaluation of concrete properties as part of the quality control (flow table test). By combining digital image analysis methods (computer vision) and the use of deep neural networks, concrete properties can be predicted in real time from image data. In this way, the quality control of the fresh concrete is expanded to include a large number of additional parameters. Based on this evaluation, the data can be integrated into a digital control loop.

The results of experimental investigations clearly show that the image-based method can be used to record and evaluate concrete properties as a part of the quality control (flow table test). As information which can be extracted from the image data and which can subsequently be used to derive the fresh concrete properties from, both, 3D surface parameters and geometric 2D properties as well as the reflection are suitable. Based on this parameters, the digital control loop offers the possibility to link the concrete production directly with the quality characteristics of the fresh concrete. Thus, *Industry 4.0*-standards can be established in concrete construction industry.

Keywords: image-based method, photogrammetric computer vision, digital quality control, consistency testing

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VI
Abstract	VIII
Inhaltsverzeichnis	X
Symbole und Abkürzungen	XIV
Kapitel 1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Gliederung der Arbeit	4
Kapitel 2 Theoretische Grundlagen und Literatur	7
2.1 Elemente des Qualitätsbegriffs	7
2.2 Qualitätsprüfung im Betonbau	8
2.3 Relevante Eigenschaften bei der Frischbetonherstellung und -verarbeitung	10
2.3.1 Verarbeitbarkeit	12
2.3.2 Homogenität	15
2.3.3 Robustheit	19
2.4 Frischbetonprüfverfahren und -kriterien	22
2.4.1 Konsistenz	22
2.4.1.1 Ausbreitmaß	26
2.4.1.2 Setzmaß	27
2.4.1.3 Verdichtungsmaß	27
2.4.2 Wasserabsonderung	27
2.4.3 Sedimentation der groben Gesteinskörnung	29
2.4.4 Visuelle Beurteilung - Augenscheinprüfung	29
2.4.5 Zerstörungsfreie Messprinzipien	30
2.4.6 Zusammenfassung	32
2.5 Oberflächeneigenschaften	33
2.5.1 Optische Eigenschaften	33
2.5.2 Glanzmessung	35
2.5.3 Oberflächengestalt und -textur	37
2.5.4 Oberflächenkennwerte	39
2.6 Methoden und Verfahren zur 3D-Rekonstruktion von Oberflächen	43
2.6.1 Streifenlichtprojektion	44
2.6.2 Photogrammetrie	45
2.6.2.1 Geometrische Kameramodellierung	46

2.6.2.2	Koordinatensysteme	48
2.6.2.3	Aufnahmekonzepte und -anordnungen	49
2.6.2.4	Mehrbildauswertung mittels Bündelblockausgleichung	51
2.7	Computer Vision	52
2.7.1	Convolutional Neural Networks	54
2.7.2	Semantische Segmentierung	56
2.8	Zusammenfassung	57
Kapitel 3	Methodischer Ansatz	59
Kapitel 4	Bildbasierte Messmethodik	63
4.1	Allgemeines	63
4.2	Ausgangsstoffe und untersuchte Zusammensetzungen	64
4.3	Referenz-Messmethoden zur Charakterisierung von Oberflächeneigenschaften	64
4.4	Methodische Vorgehensweise	65
4.5	Aufnahmekonfiguration	68
4.6	Signalisierung im Objektbereich	70
4.7	Kamera- und Auswertesystem	71
4.7.1	Brennweite, Blende und Schärfentiefe	71
4.7.2	Belichtungszeit und Lichtempfindlichkeit	72
4.8	Ermittlung von Oberflächeneigenschaften	72
4.8.1	Oberflächenkennwerte	72
4.8.2	Geometrische 2D-Eigenschaften	76
4.8.3	Reflexionsbasierte Eigenschaften	78
4.9	Vergleichende Betrachtungen mit Referenz-Messmethoden	82
4.9.1	Oberflächengestalt und -textur	82
4.9.2	Reflexionseigenschaften	86
4.10	Präzisionsdaten	90
4.10.1	Abschätzung der Wiederholpräzision	90
4.10.2	Abschätzung der Präzision unter Zwischenbedingungen	91
Kapitel 5	Bildbasierte Frischbetonprüfung	95
5.1	Überblick über das experimentelle Untersuchungsprogramm	95
5.2	Ausgangsstoffe und Herstellung	96
5.3	Experimentelle Untersuchungsmethoden	97
5.4	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	98
5.4.1	Richtungsabhängigkeit der Oberflächengestalt bzw. -textur	98
5.4.2	Konsistenz	100
5.4.2.1	Flächenbasierte 2D-Eigenschaften	100
5.4.2.2	3D-Oberflächenkennwerte	102
5.4.3	Leimgehalt	106

5.4.3.1	Flächenbasierte 2D-Eigenschaften	106
5.4.3.2	3D-Oberflächenkennwerte	109
5.4.4	Wassergehaltsschwankungen	120
5.4.5	Granulometrische Eigenschaften	126
5.4.5.1	Überblick und Methodik	126
5.4.5.2	Korngrößenverteilung	128
5.4.5.3	Geometrische Verteilung der Gesteinskörnung	133
5.4.5.4	Größtkorn	139
5.4.5.5	Kornformparameter	142
5.4.6	Homogenität	145
5.4.6.1	Leimabsonderung im Randbereich	145
5.4.6.2	Wasserabsonderung	154
5.5	Zusammenfassung	163
 Kapitel 6 Anwendung der bildbasierten Frischbetonprüfung in der praktischen Betontechnologie		167
6.1	Allgemeines	167
6.2	Bildbasierte Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften	167
6.3	Praktische Anwendung	170
 Kapitel 7 Konzept zur digitalen Qualitätsregelung von Frischbeton		177
7.1	Grundbegriffe der Qualitätsregelung	177
7.1.1	Steuerung	178
7.1.2	Regelung	178
7.2	Qualitätsregelkreise	179
7.3	Regelkreislauf zur Frischbetonherstellung und -verarbeitung	181
7.4	Anwendungsbeispiel der bildbasierten Frischbetonprüfung im Regelkreislauf	185
 Kapitel 8 Zusammenfassung und Ausblick		189
8.1	Zusammenfassung	189
8.2	Ausblick	193
 Literatur		195
 Normen, Merkblätter und Patente		213
 Anhang		217

Symbole und Abkürzungen

Hinweis: Die Dimension der einzelnen Kennwerte wird soweit sinnvoll in SI-Einheiten angegeben.

Lateinische Buchstaben

a	[m]	Gegenstandweite
a'	[m]	Bildweite
a_{10}	[cm]	Ausbreitmaß 10 Minuten nach Wasserzugabe ermittelt gemäß DIN EN 12350-5
a_i	[cm]	Ausbreitmaß ermittelt gemäß DIN EN 12350-5 zum Zeitpunkt i [min]
$a_{i,IA}$	[cm]	bildbasiert ermittelter mittlerer Durchmesser des ausgebreiteten Frischbetons
$a_{i,V_{mc}}$	[cm]	Ausbreitmaß in Abhängigkeit von V_{mc}
$A_{FB,RG}$	[cm ²]	Fläche des ausgebreiteten Frischbetons ermittelt mit dem Region Growing Verfahren
$A_{FB,CH}$	[cm ²]	Fläche des ausgebreiteten Frischbetons ermittelt mit dem Convex Hull Verfahren
$A_{GK \geq 4mm}$	[cm ²]	Fläche der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons
A_{Leim}	[cm ²]	Fläche des Leimanteils der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons
A_i	[mm ²]	Fläche von Partikel i
$b_{Ref.}$	[-]	Parameter zur Abschätzung der Oberflächenreflexion des ausgebreiteten Frischbetons
c	[-]	Kamerakonstante
$C_{0...i}$	[-]	Kamerastandort
d'	[mm]	Bilddiagonale
D	[mm]	Größtkorn-Durchmesser
D_{10}, D_{50}, D_{90}	[mm]	mittlere Partikelgröße bei unterschiedlichen Sieb-Durchgangssummen (10, 50 und 90 M.-%)
D_{IA}	[mm]	bildbasiert ermittelter Größtkorn-Durchmesser
$d_{F,max}$	[mm]	maximaler Feret-Durchmesser
$d_{F,min}$	[mm]	minimaler Feret-Durchmesser
$d_{Leim,IA}$	[mm]	bildbasiert ermittelte mittlere Stärke der Leimabsonderung

f	[mm]	bildseitige Brennweite
h	[m]	Aufnahmeentfernung
LG	[l/m ³]	Leimgehalt
LG _{IA,Fx}	[l/m ³]	bildbasiert ermittelter Leimgehalt in Abhängigkeit der Konsistenzklasse (Fx)
m_b	[-]	Bildmaßstabszahl
n	[-]	Brechzahl bzw. Brechungsindex
n_{GL}	[-]	kumulierte Pixelanzahl der Grauwert-Häufigkeitsverteilung größer des Schwellenwertes θ
$n_{no\ GL}$	[-]	kumulierte Pixelanzahl der Grauwert-Häufigkeitsverteilung kleiner des Schwellenwertes θ
$n_{GL,GK}$	[-]	kumulierte Pixelanzahl der Grauwert-Häufigkeitsverteilung kleiner des Schwellenwertes θ im Bereich der segmentierten Gesteinskörnung
n_{Leim}	[-]	Pixelanzahl der Leimfläche des ausgebreiteten Frischbetons
P_i	[mm]	Umfang von Partikel i
s_i	[cm]	Setzfließmaß ermittelt gemäß DIN EN 12350-3 zum Zeitpunkt i [min]
Sal	[mm]	Autokorrelationslänge
Sdq	[-]	Quadratischer Neigungsmittelwert
Sdr	[%]	hybrider Oberflächenkennwert
Sk	[mm]	funktionsorientierter Oberflächenkennwert
Sku	[-]	Oberflächenkennwert
Str	[-]	räumlicher Oberflächenkennwert
Sz	[mm]	Amplituden-Oberflächenkennwert
h_{Leim}	[mm]	mittlere Leimabsonderung an der Oberkante eines Sedimentationsrohrs ermittelt am Festbeton
u'	[mm]	Unschärfekreis
V_{mc}	[mm ³ /mm ²]	funktionsorientierter Oberflächenkennwert

Griechische Buchstaben

α_{Leim}	[-]	relativer Anteil der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons
α_i	[°]	Winkel des auftreffenden Lichts auf eine Oberfläche
$\alpha_{0,s}$	[°]	Spiegelwinkel zu α_i
β	[-]	Verhältniswert zwischen a_i und s_i

$\dot{\gamma}$	[s]	Schergeschwindigkeit
θ	[-]	Schwellenwert
κ	[-]	normierte Oberflächentextur
λ_O	[mm]	Wellenlänge einer Textur
λ_c	[mm]	Grenzwellenlänge - Cut-off Kriterium (L-Filter)
$\lambda_{\text{Ref.}}$	[-]	Parameter zur Bewertung der Reflexion des ausgebreiteten Frischbetons
λ_s	[mm]	Grenzwellenlänge (S-Filter)
μ	[Pa·s]	plastische Viskosität
τ_0	[Pa]	Fließgrenze
ϑ_{Leim}	[%]	proz. Anteil der Leimabsonderung ggü. dem ausgebreiteten zusammenhängenden Frischbeton
ϕ_{max}	[-]	Grenzpackungsdichte

Abkürzungen

BBQ	[-]	Betonbauqualitätsklassen
CV	[-]	Computer Vision
CNN	[-]	Convolutional Neural Network
DAfStb	[-]	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DL	[-]	Deep Learning
EOQC	[-]	European Organization for Quality Control
GK	[-]	Größtkorn
IA	[-]	Image Analysis
IoT	[-]	Internet of Things
KF	[-]	Kornform
KGV	[-]	Korngrößenverteilung
KI	[-]	Künstliche Intelligenz
ML	[-]	Maschinelles Lernen
SL	[-]	supervised learning
SVB	[-]	Selbstverdichtender Beton
UHPC	[-]	Ultrahochfester Beton
ÜK	[-]	Überwachungsklasse
VSI	[-]	Visual Stability Index
V_W/V_{BM}	[-]	vol. Wasser-Bindemittel-Verhältnis
ZfP-Bau-Verfahren	[-]	Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Qualitätsmerkmale von Betonbauwerken bzw. -bauteilen, wie z. B. die sichere Gewährleistung der Tragfähigkeit oder Dauerhaftigkeit, werden in hohem Maße durch Prozesse bestimmt, die in einem im Vergleich zur Nutzungsdauer des Bauwerks extrem kurzen Zeitraum von wenigen Stunden ablaufen. Aufgrund der hohen Wertigkeit und der Langlebigkeit des Investitionsgutes 'Bauwerk' kommt der präzisen und vollumfänglichen Prüfung der Eigenschaften bei der Herstellung und Verarbeitung des Frischbetons daher eine besondere Bedeutung zu.

Die Sicherstellung der (Frisch-)Betoneigenschaften erfolgt gegenwärtig gemäß den gültigen Normen deskriptiv auf Basis umfassender Erfahrungen mit üblichen Ausgangsstoffen und Betonzusammensetzungen. Die Ermittlung der Qualitätsmerkmale des Frischbetons auf der Baustelle ist heute noch immer rein empirisch geprägt. Zur Überprüfung der (Frisch-)Betoneigenschaften bei der Identitätsprüfung wird zumeist allein das Ausbreitmaß in Verbindung mit einer subjektiven Augenscheinprüfung des Frischbetons eingesetzt. Der erfahrene Baustoffprüfende erkennt bei der Augenscheinprüfung zwar eine Vielzahl von (Oberflächen-)Merkmalen auf Basis derer weitere Betoneigenschaften abgeschätzt werden können (vgl. Abbildung 1.1), eine Überführung dieses subjektiven Erfahrungswissen in eine quantitative Bewertung gelingt mit den bisherigen Methoden jedoch nicht.

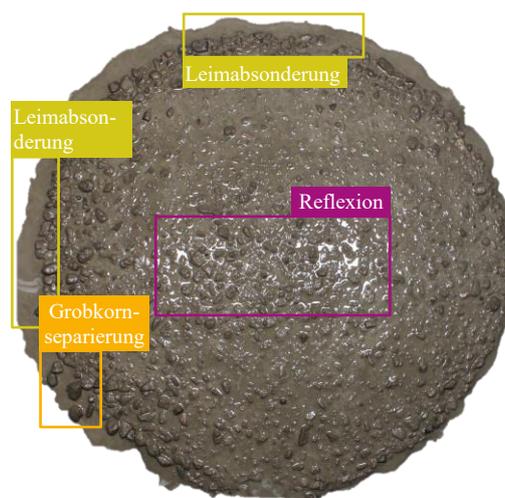


Abbildung 1.1: Ausgebreiteter Frischbeton im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) mit einzelnen (Oberflächen-)Merkmalen zur augenscheinlichen Abschätzung von (Frisch-)Betoneigenschaften

Zahlreiche Industriezweige, wie z. B. die Automobilindustrie, setzen bereits *Industrie 4.0*-Methoden als Standard zur Qualitätsprüfung in ganzheitlichen Qualitätsmanagementsystemen ein. Dabei wird die Digitalisierung¹ in die jeweiligen Produktionsprozesse integriert (Mockenhaupt 2021). Immer weiter entwickelte Algorithmen der künstlichen Intelligenz (KI) bzw. des Maschinellen Lernens (ML) beeinflussen das derzeitige Anwendungsspektrum solcher Methoden. Dem Einsatz von KI als Schlüsseltechnologie im Anwendungsbereich der *Industrie 4.0* kommt laut *Hightech Strategie 2025* der Bundesregierung in den nächsten Jahren eine besondere Bedeutung zu (BMBF 2019). In der industriellen Fertigung können z. B. Methoden der künstlichen Intelligenz in Verbindung mit Computer Vision (CV) zu einer automatisierten visuellen Inspektion (KI-VI) der Produktqualität eingesetzt werden (Wang et al. 2018). Auf diese Weise können neben der gesteigerten Produktqualität auch Fertigungs- und Produktionsprozesse nachhaltig optimiert werden. Darüber hinaus finden Computer Vision-basierte Methoden aktuell verstärkt Anwendung in der Robotik und autonomen Navigation, der Archäologie und Medizin aber auch in der Architektur (Heipke 2017). Zur Lösung vielfältiger Problemstellungen in diesen Anwendungsgebieten, insbesondere in der digitalen Bildanalyse, gelten Convolutional Neural Networks (CNN) als innovativer und erfolgreicher Ansatz.

Die enormen Wiederholungsraten bei der Produktion von Frischbeton, sowohl im Bereich des Transportbetons als auch der Produktion von Betonfertigteilen, prädestinieren die Branche für die Einführung von digitalen *Industrie 4.0*-Methoden. So bietet z. B. die Produktion von Transportbeton (≈ 55 Mio. m³ im Jahr 2020 in Deutschland (BTB 2021)) mit über mindestens sieben Mio. dazugehörigen geladenen Transportfahrzeugen ein enormes Potenzial zur Anwendung von digitalen Datenmanagement-Methoden sowie bildbasierten Methoden zur Prüfung der Eigenschaften.

Bisher fehlen jedoch entsprechende Sensorsysteme zur Erfassung und Auswertemethoden zur digitalen Bewertung der Eigenschaften von frischem Beton. Zur Einführung solcher digitalen Methoden in der Betontechnologie muss es gelingen, die bisher rein subjektiv wahrgenommenen Eigenschaften des Frischbetons, im speziellen bei der Augenscheinprüfung im Rahmen der Identitätsprüfung, mit bildbasierten Methoden bzw. Computer Vision zu erfassen und in digitale Kennwerte zu überführen. Diese Kennwerte können dann als Grundlage für eine digitale Qualitätsregelung der Produktionseigenschaften dienen.

¹ Digitalisierung: Automatisierung der Datenverarbeitung und entsprechende Verarbeitung von Big Data (Mockenhaupt 2021)

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer bildbasierten Methodik, die es gestattet, Oberflächeneigenschaften im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) in Bilddaten zu erfassen und so eine digitale Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften ermöglicht. Darauf aufbauend soll ein Konzept zur digitalen Qualitätsregelung der (Frisch-)Betoneigenschaften bzw. der Herstellung des Frischbetons entwickelt werden.

Durch Kombination photogrammetrischer Messprinzipien und digitaler Bildanalyseverfahren (u. a. Computer Vision) sowie Methoden der künstlichen Intelligenz (z. B. Anwendung von Convolutional Neural Networks (CNN)) sollen maßgebende Betoneigenschaften aus Bilddaten in Echtzeit prädiert werden. Die Identitätsprüfung des Frischbetons, die bisher fast ausschließlich das Ausbreitmaß als Maß für die Konsistenz beinhaltet, wird so durch eine Vielzahl zusätzlicher Parameter erweitert. Mittels der hier entwickelten Methodik soll es möglich werden, maßgebende Betoneigenschaften, wie z. B. die Homogenität, die Korngrößenverteilung, das Größtkorn sowie den Leimgehalt, anhand geometrischer und reflexionsbasierter Oberflächeneigenschaften digital zu beschreiben und zu bewerten. In einem weiteren Schritt soll anhand der ermittelten und bewerteten Daten ein Konzept zur digitalen Qualitätsregelung von Frischbeton entwickelt werden, so dass bei festgestellten Abweichungen eine direkte Anpassung der Eigenschaften in einem digitalen Regelkreislauf während des Produktionszyklus des Frischbetons möglich wird.

Die bildbasierte Methodik im Rahmen der Qualitätsprüfung und die daraus abgeleitete digitale Qualitätsregelung können entscheidende Schritte zur Digitalisierung des Produktionszyklus von Frischbeton darstellen. So kann es möglich werden, wie bereits in zahlreichen Industriezweigen als Standard, *Industrie 4.0*-Methoden zur Qualitätsprüfung auch im Betonbau zu integrieren. Darüber hinaus können die digital erfassten Daten direkt in das Lebenszyklusmanagement des Bauwerks eingebunden werden.

Um diese zuvor beschriebene übergeordnete Zielsetzung zu erreichen, müssen folgende vier Teilziele realisiert werden. Diese lassen sich in Anlehnung an die einzelnen Prozessschritte in *Messmethodik*, *Oberflächenanalyse*, *Eigenschaftsbewertung* sowie *Regelungskonzept* gliedern.

Zur Ermittlung von Eigenschaften unterschiedlicher Oberflächen sind eine Vielzahl von photogrammetrischen Messprinzipien sowie bildbasierten Auswertemethoden (z. B. unter Anwendung von Computer Vision) bekannt. Im Rahmen von **Teilziel 1** wird eine **bildbasierte Messmethodik** zur Erfassung von Eigenschaften der Frischbetonoberfläche im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) entwickelt, erprobt und in die Versuchsdurchführung der Ausbreitmaßprüfung integriert.

Auf makroskopischer Ebene resultiert die Oberflächengestalt bzw. -textur des Frischbetons bei der Konsistenzprüfung aus den Eigenschaften sowie den gegenseitigen Wechselwirkungen der

Grobkorn- und der Feinkorn- bzw. Leimphase. Das **Teilziel 2** besteht in einer umfassenden **Charakterisierung von betontechnologischen Einflussfaktoren** auf die Oberflächengestalt bzw. -textur sowie die Reflexionseigenschaften der Frischbetonoberfläche im Ausbreitversuch. In einem weiteren Schritt werden geeignete (Oberflächen-)Kennwerte zur Beschreibung der Oberflächengestalt bzw. -textur sowie der Reflexionseigenschaften mittels bildbasierter Methoden identifiziert.

Im Rahmen von **Teilziel 3** sollen **Bewertungsansätze bzw. Kriterien** für eine digitale Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften im Rahmen der Konsistenzprüfung entwickelt werden. Aufbauend auf den Ergebnissen des Teilziels 2 werden Kriterien in Abhängigkeit geometrischer und reflexionsbasierter Oberflächeneigenschaften zur **digitalen Bewertung von Betoneigenschaften** im Ausbreitversuch formuliert.

Weiterhin wird das **Teilziel 4** verfolgt, ein **Konzept zur digitalen Qualitätsregelung** mittels der ermittelten und bewerteten Daten zu schaffen, so dass bei festgestellten Abweichungen eine direkte Anpassung der Eigenschaften in einem digitalen Regelkreislauf während des Produktionszyklus möglich ist. Der digitale Regelkreislauf bietet die Möglichkeit, den Betonproduktionszyklus direkt mit den Qualitätsmerkmalen bzw. Eigenschaften des Frischbetons zu verknüpfen und so *Industrie 4.0*-Standards im Betonbau zu etablieren.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in acht Kapitel gegliedert. Kapitel 1 gibt eine Übersicht über die Struktur der Arbeit. Im Anschluss an das vorliegende Kapitel 1 werden in Kapitel 2 die zentralen theoretischen Grundlagen der Frischbetontechnologie erläutert sowie die etablierten Frischbetonprüfmethode, die in dieser Arbeit u. a. als Referenzmethoden dienen, vorgestellt. Weiterhin werden Messprinzipien und einzelne Methoden bzw. Verfahren zur 3D-Rekonstruktion von Oberflächen und die Grundlagen zum Themenbereich Computer Vision beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf photogrammetrischen Messprinzipien bzw. Methoden der semantischen Segmentierung unter Anwendung von Convolutional Neural Networks (CNN). Diese theoretischen Grundlagen bzw. Messprinzipien und Methoden bilden die Grundlage für die spätere Methodenentwicklung.

Kapitel 3 schließt mit der Vorstellung eines methodischen Ansatzes zur bildbasierten Eigenschaftsermittlung und digitalen -bewertung von Frischbeton an. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die einzelnen Elemente, die den Schwerpunkt des Ansatzes bilden, separat beschrieben und behandelt.

Zur digitalen Eigenschaftsbewertung im Rahmen der Konsistenzprüfung ist eine zielsichere Ermittlung von Eigenschaften der Frischbetonoberfläche notwendig. In Kapitel 4 wird zur Ermittlung von (Oberflächen-)Eigenschaften am Frischbeton eine bildbasierte Messmethodik vorgestellt und in den Ablauf der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) von Frischbeton integriert.

Zunächst werden Festlegungen zur Aufnahmekonfiguration sowie der sogenannten Signalisierung etc. getroffen, so dass in einem weiteren Schritt die Anwendbarkeit als auch Reproduzierbarkeit der Messmethodik betrachtet werden kann. Die Anwendbarkeit wird durch den Vergleich mit Referenz-Methoden bewertet.

Kapitel 5 beschreibt eine umfassende Charakterisierung von betontechnologischen Einflussfaktoren auf die Oberflächengestalt bzw. -textur sowie die Reflexionseigenschaften der Frischbetonoberfläche im Ausbreitversuch. So sollen geeignete (Oberflächen-)Kennwerte u. a. zur Beschreibung der Oberflächengestalt bzw. -textur sowie der Reflexionseigenschaften mittels der bildbasierten Methodik identifiziert werden. Darauf aufbauend werden im weiteren Verlauf von Kapitel 5 Kriterien in Abhängigkeit der identifizierten geometrischen und reflexionsbasierten (Oberflächen-)Kennwerte zur digitalen bildbasierten Frischbetonprüfung formuliert.

Die Anwendung der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik in der Betontechnologie zur bildbasierten Frischbetonprüfung wird in Kapitel 6 beschrieben. Neben Ansätzen zur Integration in den Ablauf der Identitätsprüfung in der praktischen Betontechnologie werden auch vereinzelte Anwendungen unter praktischen Randbedingungen vorgestellt.

Die Integration der zuvor formulierten Kriterien und Prüfmöglichkeiten in einen digitalen Regelkreislauf zur Produktionssteuerung von Frischbeton nach *Industrie 4.0*-Standards wird in Kapitel 7 beschrieben und diskutiert. So wird die Grundlage für einen digitalen Betonproduktionszyklus unter Berücksichtigung der Qualitätsmerkmale des Frischbetons aufgezeigt und die praktische Relevanz der Ergebnisse verdeutlicht.

Kapitel 8 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

Abbildung 1.2 gibt einen zusammenfassenden Überblick zur Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit.

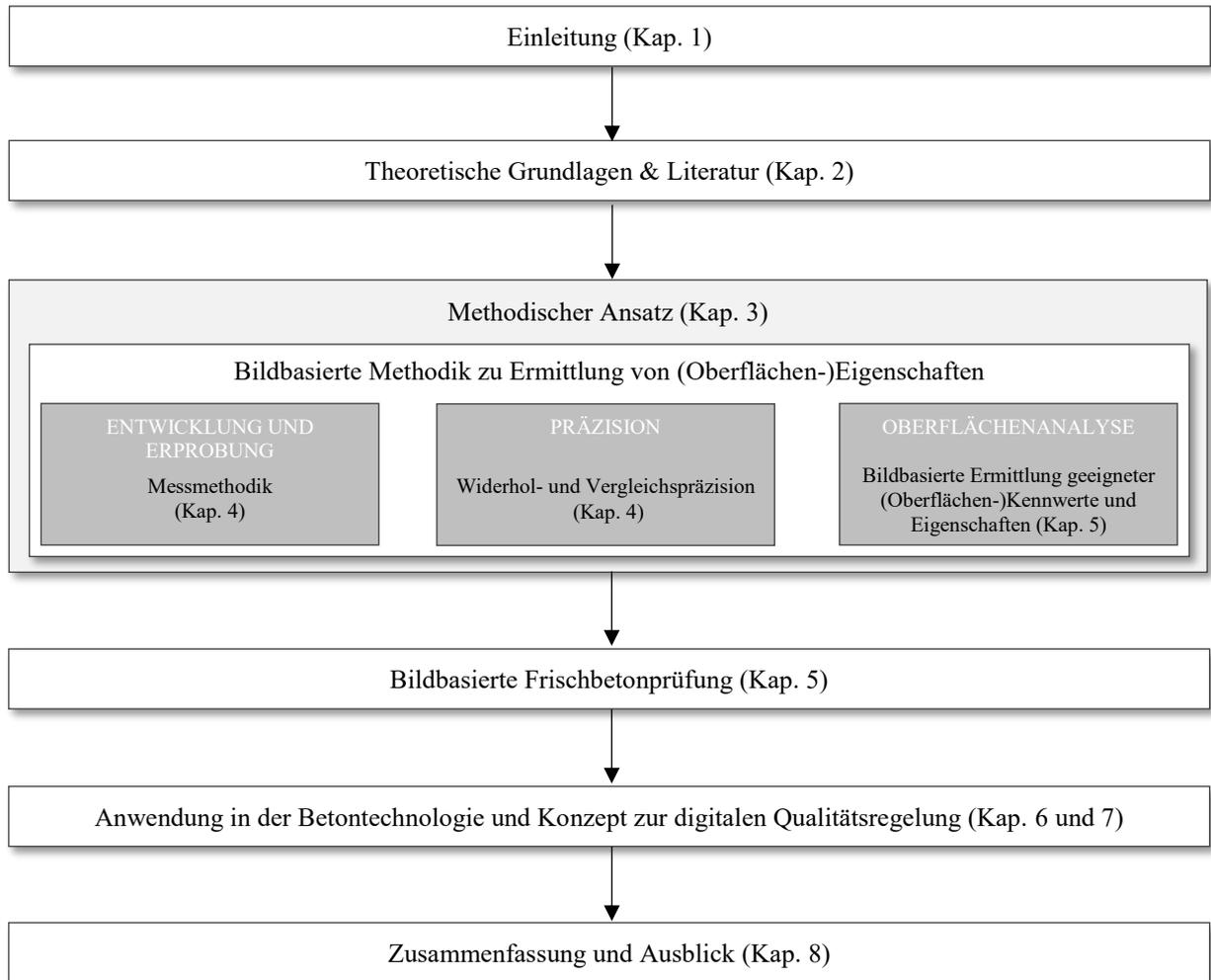


Abbildung 1.2: Gliederung der Arbeit

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen und Literatur

Das Kapitel gibt zunächst einen umfassenden Überblick zu den theoretischen Grundlagen für die Herstellung und Verarbeitung von Beton sowie die bisherigen etablierten Möglichkeiten zur Prüfung. Dabei wird vor allem auf den Einfluss der Mischungszusammensetzung und der Ausgangsstoffe auf die Betoneigenschaften eingegangen. Weiterhin werden Messprinzipien und einzelne Methoden zur Charakterisierung von Oberflächeneigenschaften beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf photogrammetrischen Messprinzipien, Computer Vision sowie der semantischen Segmentierung. Diese theoretischen Grundlagen bilden zusammen mit den Messprinzipien und Methoden die Grundlage für die spätere Methodenentwicklung.

2.1 Elemente des Qualitätsbegriffs

Zur Definition des Begriffs ‚**Qualität**‘ existieren in der Literatur verschiedene Ansätze. In allgemeiner Form definiert die *DIN EN ISO 9000* den Qualitätsbegriff als „*Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale [...] eines Objekts [...] Anforderungen [...] erfüllt.*“ Die European Organization for Quality Control (EOQC) sowie die *DIN 55350* definieren ‘Qualität’ als „*[...] die an der geforderten Beschaffenheit gemessene realisierte Beschaffenheit.*“ Die Qualität eines Bauwerks setzt sich nach ÖZCAN (2010) aus der Summe bzw. den Wechselwirkungen der Produkt- und Prozessqualität zusammen. Die Produktqualität beinhaltet wesentliche Merkmale der Eigenschaften der (Bau-)Produkte im Sinne eines Bauwerks. Demgegenüber bezieht sich die Prozessqualität auf die Abläufe zur Herstellung dieser Produkte (Özcan 2010). LINß (2018) führt die Prozessqualität als Voraussetzung für Produktqualität an.

Der Begriff ‚**Qualitätsmanagement**‘ ist gemäß *DIN EN ISO 9000* als „*aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Leiten und Lenken einer Organisation bezüglich Qualität*“ definiert. Als Teil des Qualitätsmanagements zielt die Qualitätssicherung darauf ab, Vertrauen zu schaffen, dass Qualitätsanforderungen erfüllt werden. Die Qualitätssteuerung ist dagegen gemäß *DIN EN ISO 9000* auf die Erfüllung von Qualitätsanforderungen ausgerichtet.

Der Begriff ‚**Prüfung**‘ wird gemäß *DIN EN ISO 9000* als „*Bestimmung der Konformität mit festgelegten Anforderungen*“ definiert. Die ‘Bestimmung’ ist dabei die „*Tätigkeit zur Ermittlung eines oder mehrerer Merkmale [...].*“ Das primäre Ziel einer Prüfung ist die Ermittlung

der Erfüllung der Anforderungen (*Konformität*), d. h. der Vergleich zwischen geforderter und realisierter Beschaffenheit (Linß 2018). Die **‘Qualitätsprüfung‘** kann gemäß LINß (2018) als Durchführung und Dokumentation des Vergleichs der realisierten Qualitätsmerkmalswerte einer Einheit mit den geforderten Anforderungen beschrieben werden. Ein **‘Qualitätsmerkmal‘** stellt dabei eine inhärente kennzeichnende Eigenschaft eines Objekts (z. B. Produkt) dar, das sich auf eine Anforderung bezieht (*DIN EN ISO 9000*).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Qualitätsprüfung als Begriff zur Ermittlung von (Frisch-)Betoneigenschaften (*Qualitätsmerkmale*) mit standardisierten Prüfverfahren sowie der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten bildbasierten Methodik verstanden.

Zu der Begrifflichkeit **‘Qualitätsregelung‘** sind in der Literatur bisher keine spezifischen Definitionen vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Qualitätsregelung anhand der klassischen Regelungstechnik näher erläutert werden, vgl. Kapitel 7.1. Die Qualitätsprüfung soll daraufhin mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten bildbasierten Methodik zu einer Qualitätsregelung – hier adaptiert für die Erfordernisse des Betonbaus – erweitert werden, vgl. Kapitel 7.3.

2.2 Qualitätsprüfung im Betonbau

Bei der Herstellung von Betonbauteilen bzw. -bauwerken muss das bauausführende Unternehmen die Ausführung in Übereinstimmung mit der *DIN EN 13670* bzw. der *DIN 1045-3* sicherstellen. Die Leistungserbringung ist dabei an verschiedene Parteien – u. a. Ausgangsstoffhersteller, Betonhersteller und bauausführendes Unternehmen – gebunden. Die zu erfüllenden Qualitätsanforderungen, die zur Leistungserbringung notwendig sind, müssen demnach an der Schnittstelle zwischen Hersteller und Abnehmer klar definiert und vereinbart werden. Ergänzend zu den normativen Mindestanforderungen ist zur Sicherstellung der Qualität ein hinreichender Informationsfluss zwischen Abnehmer und Hersteller von entscheidender Bedeutung. Der Informationsfluss kann zum einen Qualitätsgespräche als auch die Aufzeichnung und den Austausch von Kennwerten beinhalten. Abbildung 2.1 verdeutlicht den Informationsfluss zwischen den einzelnen Parteien.



Abbildung 2.1: Qualitätskette und Informationsfluss zwischen den einzelnen Parteien bei der Herstellung und Verarbeitung von Beton (in Anlehnung an (VDZ2008))

Zur Berücksichtigung der Komplexität des Bauvorhabens sowie unterschiedlicher Randbedingungen wird vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) aktuell eine neue Richtlinie „*BetonBauQualität*“ erarbeitet, die drei Betonbauqualitätsklassen (BBQ) unterscheidet (Meyer et al. 2018; Fingerloos et al. 2019). Im Zentrum der Richtlinie stehen verbindliche Kommunikations- und Abstimmungsmaßnahmen zwischen den am Bau beteiligten Partnern auf Basis einer verbindenden Fachsprache als auch erweiterte Dokumentations- und Prüfmaßnahmen. Die Annahmeprüfung des Frischbetons auf der Baustelle beinhaltet gemäß *DIN 1045-3* bzw. *DIN EN 13670* grundsätzlich die Prüfung des Lieferscheins vor dem Entladen des Betons als auch eine Sichtprüfung während des Entladevorgangs. Das Entladen ist demnach bei Abweichungen des Betons vom üblichen Aussehen – diese Beurteilung erfolgt rein auf Grundlage von Erfahrungswissen – zu stoppen. Darüber hinaus ist, falls in den bautechnischen Unterlagen gefordert, eine Identitätsprüfung vom bauausführenden Unternehmen bzw. Abnehmer durchzuführen.

Als Grundlage für die Bauausführung formuliert *DIN EN 13670* bzw. *DIN 1045-3* ein mehrstufiges System mit den Überwachungsklassen (ÜK) 1, 2 und 3. In Abhängigkeit der Druckfestigkeitsklasse, den Expositionsklassen sowie einzelnen besonderen Eigenschaften wird ein unterschiedlich hoher Aufwand zur Beurteilung der maßgebenden Frisch- und Festbetoneigenschaften festgelegt. Für Betone der ÜK 1 ist die Prüfung des Lieferscheins sowie die stichprobenartige Augenscheinprüfung bei der Annahme des Frischbetons auf der Baustelle ausreichend. Bei Transportbeton nach Eigenschaften der ÜK 2 und ÜK 3 sind demgegenüber maßgebende Frischbetoneigenschaften mittels Identitätsprüfung bei der Annahme auf der Baustelle zu bestimmen, vgl. Tabelle 2.1. So ist über die Prüfung des Lieferscheins und der visuellen Beurteilung der Gleichmäßigkeit hinaus, unter anderem eine Charakterisierung der Konsistenz mittels einem normativen Prüfverfahren beim ersten Einbringen einer Betonzusammensetzung notwendig (beim ersten Lieferfahrzeug). In Deutschland wird zur Charakterisierung der Konsistenz standardmäßig das Ausbreitmaß angewendet. In Zweifelsfällen sowie in definierten Zyklen sind an Stichproben weitere Frisch- und Festbetoneigenschaften zu ermitteln. Zusätzlich zur Überwachung des Bauunternehmens ist beim Einbau von Betonen gemäß ÜK 2 und 3 eine Überwachung durch eine anerkannte Prüfstelle notwendig.

Die vorherigen Ausführungen zeigen deutlich, dass das in der Baupraxis angewendete mehrstufige System stark auf die Prüfung des Lieferscheins sowie die Augenscheinprüfung des Frischbetons ausgerichtet ist. Als Prüfkriterium wird fast ausschließlich die Konsistenz herangezogen. Weitere maßgebende Frischbetoneigenschaften werden nicht geprüft, wie z. B. die Homogenität. Darüber hinaus findet zwischen Verwender und Hersteller bisher ein rein manueller Informationsfluss statt. Eine unmittelbare Reaktionsmöglichkeit des Betonherstellers auf festgestellte Abweichungen ist demnach bisher im Betonproduktionszyklus nur sehr eingeschränkt bzw. gar nicht möglich.

Tabelle 2.1: Umfang und Häufigkeit der Prüfungen der Frischbetoneigenschaften im Rahmen der Annahmeprüfung bzw. Identitätsprüfung (in Anlehnung an *DIN 1045-3*)

Gegenstand	Prüfverfahren	Anforderung	Häufigkeit für Überwachungsklasse		
			1	2	3
Lieferschein	Augenscheinprüfung	Übereinstimmung mit der Festlegung	jedes Lieferfahrzeug		
	Augenscheinprüfung	normales Aussehen wie festgelegt	Stichprobe	jedes Lieferfahrzeug	
Konsistenz	Ausbreitmaß (DIN EN 12350-5); o. ä. Prüfverfahren	wie festgelegt	in Zweifelsfällen	beim ersten Einbringen jeder Zusammensetzung; bei Herstellung von Probekörpern für die Festigkeitsprüfung; in Zweifelsfällen	
Frischbetonroh-dichte von Leichtbeton und Schwerbeton	DIN EN 12350-6	wie festgelegt	bei Herstellung von Probekörpern für die Festigkeitsprüfung; in Zweifelsfällen		
Gleichmäßigkeit des Betons	Augenscheinprüfung	homogenes Erscheinungsbild	Stichprobe	jedes Lieferfahrzeug	
	Vergleich von Eigenschaften	Stichproben müssen die gleichen Eig. aufweisen	in Zweifelsfällen		

2.3 Relevante Eigenschaften bei der Frischbetonherstellung und -verarbeitung

Langfristige Qualitätsmerkmale von Betonbauwerken, wie z. B. die sichere Gewährleistung der Tragfähigkeit oder Dauerhaftigkeit, werden maßgeblich durch Prozesse bestimmt, die in einem im Vergleich zur Nutzungsdauer des Bauwerks extrem kurzen Zeitraum – Herstellung und Verarbeitung des Frischbetons – von wenigen Stunden ablaufen. Bei der Betonverarbeitung hängt der Erfolg – wie z. B. die poren- und feststellenfreie Füllung des Bauteils – neben der Qualifikation des Personals und den Umgebungsbedingungen maßgeblich von einer Vielzahl baustofflicher und baubetrieblicher Einflussfaktoren ab.

Abbildung 2.2 gibt einen zusammenfassenden Überblick über den Zusammenhang zwischen den bau(betrieb)lichen Anforderungen und den relevanten Betoneigenschaften. Die rheologischen Eigenschaften des frischen Betons beeinflussen eine Vielzahl anderer Eigenschaften, so dass ein grundlegendes Verständnis des rheologischen Verhaltens des Frischbetons die Grundlage zur Sicherstellung der charakteristischen Anforderungen bildet. Die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons werden wesentlich von den betontechnologischen Parametern der Betonzusammensetzung und insbesondere durch die Feststoffkonzentration bzw. deren Korngrößenverteilung sowie durch die interpartikulären Wechselwirkungen der mehlkornfeinen Partikel untereinander bzw. mit Wasser bestimmt (Tattersall 1991; VDZ 2008; Wüstholz 2005).

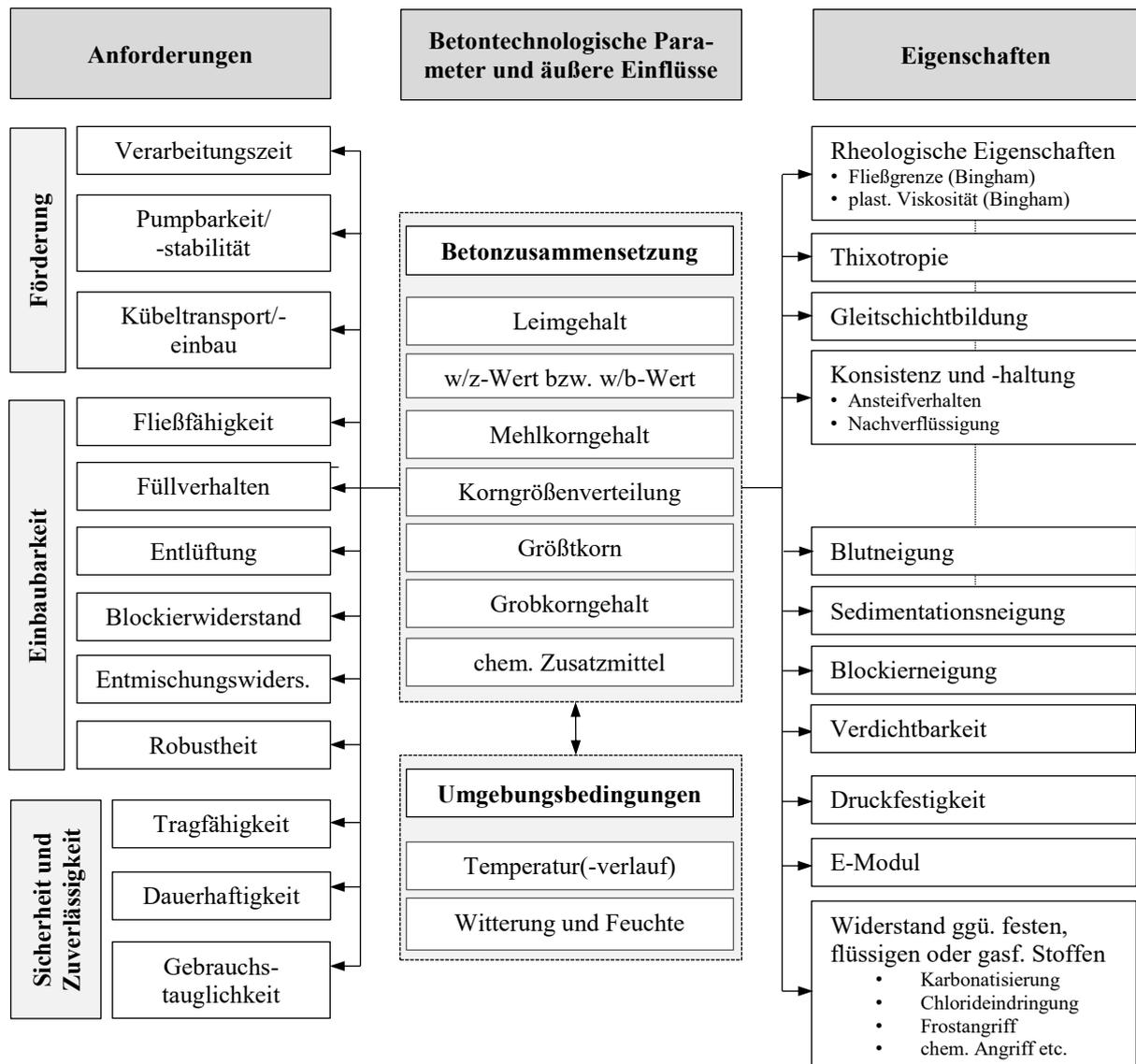


Abbildung 2.2: Zusammenhänge und Wechselwirkungen der Eigenschaften mit den betontechnologischen Parametern zur Sicherstellung charakteristischer Anforderungen an den Frischbeton

Eine zielsichere und vor allem ausreichend schnelle und präzise Beurteilung relevanter Eigenschaften, insbesondere der rheologischen Eigenschaften, ist bisher nicht mit praxis- bzw. baustellentauglichen Prüfmethoden möglich, so dass Steuerungs- oder Einflussmöglichkeiten für den Hersteller sowie Abnehmer weitestgehend fehlen (Wagner 2018). Die Sicherstellung der Frischbetoneigenschaften einschließlich der Robustheit (vgl. Kapitel 2.3.3) erfolgt gegenwärtig zumeist deskriptiv basierend auf umfassenden Erfahrungen mit den üblichen Ausgangsstoffen und Zusammensetzungen (Alfes et al. 2021). Zunehmende Veränderungen in der Betontechnologie, wie z. B. die steigende Vielfalt an Betonausgangsstoffen, der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung oder ein erhöhter Einsatz von Betonzusatzmitteln, führen jedoch dazu, dass mit einem solch deskriptiven Ansatz weder die Verarbeitbarkeit und Homogenität noch eine robuste Reaktion auf etwaige Schwankungen sichergestellt werden können.

Einen umfassenden Überblick zum aktuellen Kenntnisstand von Frischbetoneigenschaften und dessen Steuerung, z. B. durch die Betonzusammensetzung, ist in (Alfes et al. 2021) enthalten. Nachfolgend werden einzelne relevante Frischbetoneigenschaften bei der Herstellung und der Verarbeitung näher beschrieben. Dabei wird vor allem auf die Steuerung dieser Eigenschaften u. a. durch die Betonzusammensetzung als auch auf den Einfluss der Interaktion unterschiedlicher Ausgangsstoffe und Schwankungen in den Ausgangsstoffen eingegangen. Neben einzelnen betontechnologischen Eigenschaften wird auch die Robustheit näher beschrieben, da diese Eigenschaft im modernen Betonbau einen entscheidenden Einflussfaktor für die Beton- und demnach auch für die Bauteilqualität darstellt.

2.3.1 Verarbeitbarkeit

Die Verarbeitbarkeit von Frischbeton ist keine direkt messbare physikalische Größe. Sie fasst als Sammelbegriff die rheologischen Eigenschaften, wie z. B. die Fließgrenze, die Viskosität und die Thixotropie zusammen (VDZ 2008). Zeitlich berücksichtigt die Verarbeitbarkeit die Eigenschaften des Frischbetons vor dem Erstarren beim Mischen, Transport, Einbringen und Verdichten (Tattersall 1991).

Gemäß (DBV-MB 2014) ist die Verarbeitbarkeit von Frischbeton unter den zwei Aspekten der Einbaubarkeit (d. h. das Füllverhalten einer ggf. stark bewehrten Bauteilgeometrie) und Anschließbarkeit (die Verbindung die der frisch eingebaute Beton mit dem Untergrund bzw. anderen Bauteilen oder bereits eingefülltem Beton eingeht) zu betrachten. Die Einbaubarkeit wird vor allem durch die Zeitspanne charakterisiert, in der der Frischbeton die notwendige Konsistenz zur Herstellung des Bauteils aufweist. Es gilt dabei, die Art der Förderung (Pumpe, Kübel) und der Verdichtung (Rüttelflasche, Schalungsrüttler) sowie die geometrischen Randbedingungen und die Bewehrungsanordnung des Bauteils zu beachten. Die Anschließbarkeit wird durch die Zeitspanne beschrieben, in der einzelne Betonierlagen ohne die Entstehung von Gefügestörungen angeschlossen werden können. Abbildung 2.3 verdeutlicht die zeitabhängige Beschreibung der Einbaubarkeit und Anschließbarkeit als Teil der Verarbeitbarkeit. Über die gesamte Zeitspanne der Einbaubarkeit (Verarbeitungsfenster) sind z. B. eine ausreichende Konsistenz und ein ausreichendes Fließvermögen sicherzustellen.

Als Teil der Verarbeitbarkeit umfasst die Konsistenz mehrere physikalische Eigenschaften, wie z. B. die Fließfähigkeit, die Förderbarkeit oder die Verdichtbarkeit. Baupraktisch ist neben der Konsistenz selbst auch die zeitliche Veränderung der Konsistenz (Anstifverhalten) zur Einbaubarkeit des Frischbetons von entscheidender Bedeutung.

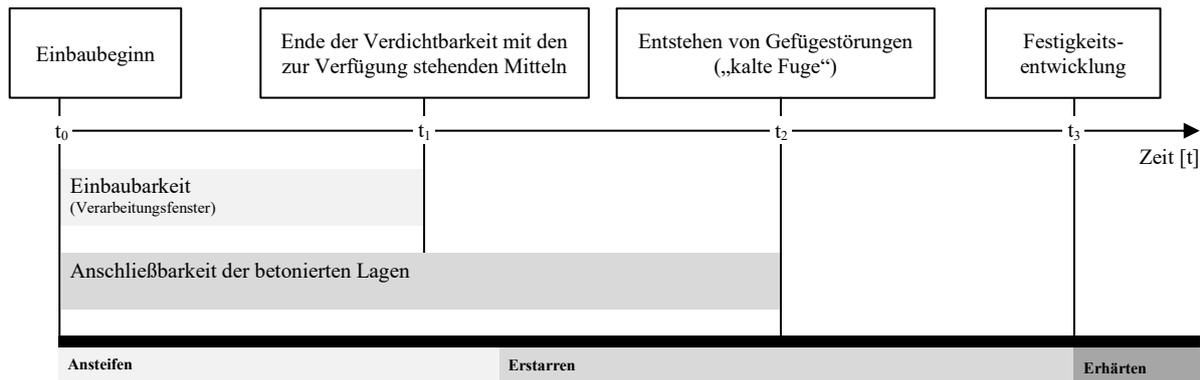


Abbildung 2.3: Zeiträume der Einbaubarkeit und Anschließbarkeit (in Anlehnung an (DBV-MB 2014))

Wesentliche stoffliche Eigenschaften zur Steuerung der Frischbetonkonsistenz sind die rheologischen Eigenschaften des Bindemittelleims, die Granulometrie und Art der Gesteinskörnung sowie das Volumenverhältnis zwischen Bindemittelleim und Gesteinskörnung (Fuller und Thompson 1907; VDZ 2008). Sowohl durch Erhöhung des Leimanteils als auch durch Verringerung des Scherwiderstands des Bindemittelleims, z. B. durch Zugabe von verflüssigendem Zusatzmittel, kann die Konsistenz eines Frischbetons wesentlich beeinflusst werden (Spanka et al. 1998).

Das komplexe Verhalten der Fließvorgänge von Frischbeton kann vereinfacht mit dem Bingham-Modell beschrieben werden (Reiner 1958; Barnes et al. 1993):

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Gl. 1}$$

In Gl. 1 bezeichnet τ die Schubspannung. Der Wert τ_0 beschreibt die sog. Fließgrenze. Unterhalb dieser Schubspannung stagniert der Beton und das Fließen kommt zum Erliegen. Die plastische Viskosität μ ist eine Maßzahl für die dynamische Viskosität bei hohen Schergeschwindigkeiten $\dot{\gamma}$, vgl. Abbildung 2.4. Die dynamische Viskosität η des Frischbetons ist stark von der Scher- bzw. Fließgeschwindigkeit abhängig. Je höher die Fließgeschwindigkeit und dementsprechend höherer Schergeschwindigkeit, desto geringer ist die dynamische Viskosität η und dünnflüssiger verhält sich der Frischbeton. Die dynamische Viskosität kann mittels folgender hyperbolischen Funktion beschrieben werden (Balázs et al. 2009):

$$\eta_{\text{Beton}}(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu \quad \text{Gl. 2}$$

Hierin bezeichnet η_{Beton} die dynamische Viskosität des Betons die sich aus dem Quotienten der auf eine Probe aufgetragenen Schubspannung τ und der daraus resultierenden Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ ergibt. Für sehr hohe Schergeschwindigkeiten – z. B. beim Pumpen oder im Mischer – strebt die dynamische Viskosität gegen einen unteren Grenzwert, die sog. plastische Viskosität μ , vgl. Abbildung 2.4.

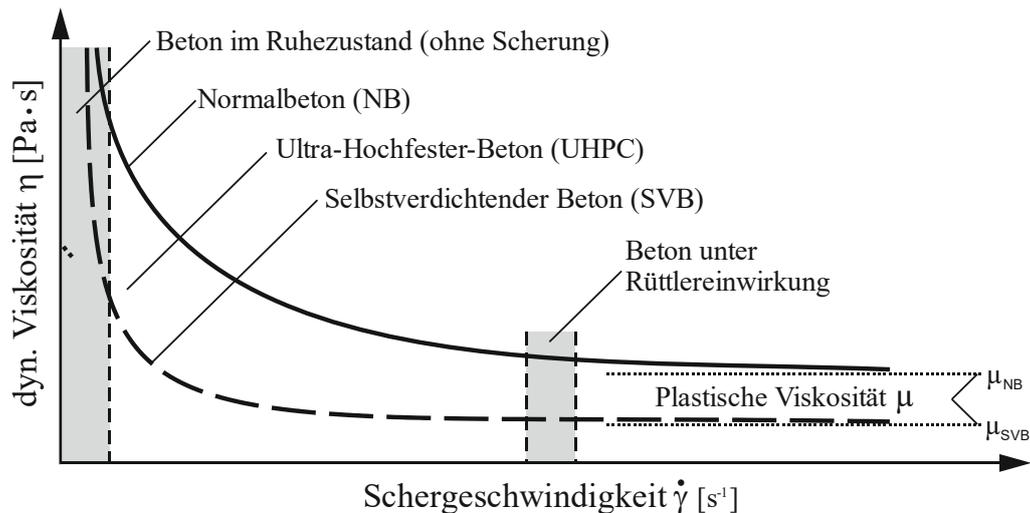


Abbildung 2.4: Dynamische Viskosität η_{Beton} verschiedener Betonzusammensetzungen bzw. -arten in Abhängigkeit der aufgetragenen Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ (Balázs et al. 2009)

Die Verarbeitbarkeit bzw. Konsistenz von Frischbeton ist neben den Leimeigenschaften vor allem von der Kornzusammensetzung (Granulometrie, Art, Form, Größtkorn) und dabei insbesondere von der gezielten Abstimmung der Korngrößen der granularen Ausgangsstoffe abhängig (Bonzel und Krell 1986; Banfill 2006; Hu und Wang 2011). Zur Einstellung einer definierten Fließfähigkeit ist eine notwendige Leimmenge zur Hohlräumfüllung der Gesteinskörnungsmatrix sowie zur Bildung einer ausreichend großen Leimschichtdicke um die Partikel der Gesteinskörnung notwendig (Krell 1985). Bereits FULLER & THOMPSON (1907) stellten zur Vorhersage des zur Einstellung einer bestimmten Fließfähigkeit des Frischbetons erforderlichen Leimgehalts in Abhängigkeit der Kornzusammensetzung entsprechende Ingenieuransätze vor. Weitere vielfältige Ansätze als auch Modelle zur Optimierung der Packungsdichte der Kornzusammensetzung sind in der Vergangenheit von SCHWANDA (1959) und FENNIS (2011) entwickelt worden. Untersuchungen von DE LARRARD (1999) als auch FENNIS (2011) an Beton sowie von ANDREASEN (1930) an diversen mineralischen Pulvern zeigen, dass die Verarbeitbarkeit einer definierten Kornzusammensetzung mit Grenzpackungsdichte ϕ_{max} bei Auflockerung auf eine reduzierte Packungsdichte ϕ_{ist} stark zunimmt. Entsprechend wurden in der Literatur Modelle vorgestellt, die auf empirischer Basis den Verlauf der Korngrößenverteilung mit möglichst hoher Grenzpackungsdichte ϕ_{max} beschreiben, ohne jedoch ϕ_{max} explizit zu quantifizieren (De Larrard 1999; Fennis 2011).

Zielsetzung vielfältiger Arbeiten in der Vergangenheit war zudem eine Vorhersage der rheologischen Eigenschaften von frischem Beton auf Basis der Mischungszusammensetzung und der verwendeten Ausgangsstoffe. HAIST (2009) stellte ein Modell zur Vorhersage der Rheologie von Zementleim auf Basis der Mineralogie und Granulometrie des verwendeten Zements vor. Auf Grundlage granulometrischer Parameter entwickelte GEISENHANSLÜCKE (2009) ein Modell zur Vorhersage des rheologischen Verhaltens von Gesteismehlsuspensionen. Diverse Modellvorstellungen und -ansätze wurden zudem bereits für entsprechende Entwurfsmethoden

zur Sicherstellung einer ausreichenden Fließfähigkeit bzw. Verarbeitbarkeit von Sonderbetonen, wie z. B. selbstverdichtende Betone (SVB), ultrahochfeste Betone (UHPC) sowie zementreduzierte Betone, entwickelt bzw. entsprechend angewendet (De Larrard 1999; Huß 2010; Lowke 2013; Haist et al. 2014; Haist et al. 2016). In den Entwurf von Normalbetonen sind derartige Überlegungen bzw. Modellansätze bisher nur vereinzelt integriert (Abebe 2017; Gläser 2017).

2.3.2 Homogenität

Um eine Homogenität des Betons und demzufolge gleichmäßige mechanische, dauerhaftigkeitsrelevante und ästhetische Eigenschaften über den gesamten Bauteilquerschnitt sicherzustellen, ist ein Widerstand gegen Entmischung, d. h. gegen die Separierung einzelner Bestandteile erforderlich. Entmischung tritt in nicht stabilen Suspensionen auf allen Skalenebenen – Beton (Makroebene), Mörtel (Mesoebene), Leim (Mikroebene) – auf. In (Alfes et al. 2021) wird auf Basis der einzelnen Skalenebenen als unerwünschte Formen der Entmischung zwischen dem verstärkten Absondern von Wasser aus der Leimphase, dem Absondern von Leim aus der Mörtelphase und dem Absondern von Mörtel aus der Betonphase (Sedimentation der groben Gesteinskörnung) unterschieden. In der Praxis kann jedoch zumeist nicht so differenziert in diese einzelnen Fälle untergliedert werden.

Darüber hinaus wird im Frischbeton grundsätzlich zwischen dynamischer Entmischung und statischer Entmischung unterschieden. Die dynamische Entmischung beschreibt Entmischungserscheinungen infolge Vibration sowie der scherinduzierten Migration der groben Gesteinskörnung während des Transports, des Pumpens oder des Befüllens und den resultierenden Fließvorgängen in der Schalung (Thrane 2007; Shen et al. 2009a; Spangenberg et al. 2012; Shen et al. 2016; van der Vurst 2017; Ley-Hernandez et al. 2019). Insbesondere beim Befüllen hochbewehrter Bauteile wird die dynamische Entmischung von der Blockierneigung des Frischbetons beeinflusst. In der Literatur sind vereinzelte Untersuchungen zur Blockierneigung von SVB dokumentiert (Petersson und Billberg 1999; Proske und Graubner 2003; Hosseinpoor et al. 2021). Die Blockierneigung wird demnach vor allem vom Verhältnis des Größtkorn-Durchmessers und der Öffnungsbreite der Hindernisse (z. B. Bewehrungsabstand) beeinflusst. Demgegenüber bezieht sich die statische Entmischung auf Entmischungserscheinungen infolge Dichteunterschieden der unterschiedlichen Bestandteile, wenn sich der noch plastische Beton nach dem Einbringen in Ruhe befindet (Bramshuber und Uebachs 2003; Assaad et al. 2004; Roussel 2007a; Naji et al. 2017).

Während die Sedimentationsstabilität für herkömmliche Normalbetone deskriptiv vorwiegend über Erfahrungswerte im Rahmen des Mischungsentwurfs sichergestellt wird, existiert für selbstverdichtende Betone eine Vielzahl von Untersuchungen und Modellvorstellungen zur Beschreibung der statischen Entmischung bzw. der Sedimentationsstabilität unter Einwirkung der Gravitation (Wüstholtz 2005; Shen et al. 2009b; Lowke 2013; Shen et al. 2014). Während für

steife Betone Entmischungserscheinungen von untergeordneter Bedeutung sind, nimmt die Relevanz der Sedimentationsstabilität bei Normalbetonen mit weicher bis fließfähiger Konsistenz signifikant zu (Begemann et al. 2018; Spörel 2019). Dies ist zum einen auf die erhöhte Fließfähigkeit des in derartigen Betonen enthaltenen Leims als auch auf den grundsätzlich erhöhten Leimgehalt derartiger Betone zurückzuführen. Eine Übertragung der Modellvorstellungen von SVB auf Rüttelbetone ist jedoch nicht zielführend. Infolge der Rüttelwirkung kommt es zu einer starken Veränderung der rheologischen Eigenschaften, insbesondere des Leims im Beton, wobei die dynamische Viskosität signifikant reduziert wird, vgl. Abbildung 2.4 (Tattersall und Baker 1988; Banfill 1996). Untersuchungen von SAFAWI et al. (2005) als auch LOHAUS und BREITENBÜCHER (2019) zeigen, dass sowohl die Frequenz als auch die Amplitude bei der Verdichtung die Sedimentation der groben Gesteinskörnung beeinflussen. So ist insbesondere auf eine an die jeweilige Konsistenz angepasste Verdichtungsleistung zu achten (Kränkel et al. 2020).

Neben der Verdichtungsenergie und der Konsistenz beeinflussen weitere betontechnologische Parameter die Sedimentationsstabilität fließfähiger Betone. So beeinflussen vor allem die Differenz zwischen der Dichte der Gesteinskörnung und des Mörtels sowie die Viskosität des Mörtels die Sedimentationsstabilität derartiger Betone (Navarrete und Lopez 2016).

Die grundlegenden Prozesse der Sedimentation können anhand des Stokes'schen Gesetz nachvollzogen werden. Es beschreibt die Sinkgeschwindigkeit v eines kugelförmigen Körpers mit dem Durchmesser r_k und der Dichte ρ_k in einer Flüssigkeit mit der Dichte ρ_w :

$$v = \frac{2 \cdot r_k^2 \cdot g (\rho_k - \rho_w)}{9 \cdot \eta} \quad \text{Gl. 3}$$

Hierin beschreibt η die dynamische Viskosität der Flüssigkeit und g die Erdbeschleunigung. Angewendet auf Frischbeton steigt gemäß Gl. 3 die Sinkgeschwindigkeit der groben Gesteinspartikel mit dem Quadrat des Korndurchmessers und wird mit zunehmender dynamischer Viskosität vermindert. Aus Abbildung 2.4 wird demzufolge die geringere Sedimentationsstabilität von SVB gegenüber Normalbeton (steife Konsistenz) infolge der geringeren dynamischen Viskosität von SVB erkennbar. Evident wird zudem der Einfluss der Rüttelwirkung, da hierdurch die dynamische Viskosität deutlich vermindert wird, vgl. Abbildung 2.4.

WALLEVIK (2003) beschreibt eine stützende Wirkung für die gröberen Partikel durch die nächstkleineren Partikel mit dem sogenannten Netzeffekt. Demnach führt eine Erhöhung des Volumenanteils einer Korngruppe d_i (mit d = Lochweite des Siebes) zu einer Sedimentationsstabilisierung der nächst größeren Korngruppe d_{i+1} . Zur maximalen Ausprägung des Netzeffektes sollte eine feine und stetige Korngrößenverteilung gewählt werden (Wallevik 2003). Die zusätzliche Verwendung von Feinstoffen (z. B. Feinsand oder Kalksteinmehl) führt hierdurch zu einer erhöhten Sedimentationsstabilität (Steinhäuser et al. 2015). Untersuchungen an

fließfähigen Betonen zeigen zudem, dass die Sedimentationsstabilität mit Verwendung von gröberer Gesteinskörnung abnimmt (Safawi et al. 2005).

Der zeitabhängige Prozess der Wasserabsonderung im Frischbeton bzw. im Bindemittelleim wird als „Bluten“ bezeichnet und beschreibt die Absonderung von Wasser aus der Leimphase. Dieser Prozess wird durch Sedimentationsprozesse in der Suspension verursacht und geht mit einer Verdichtung der Partikelstruktur einher (Yang et al. 1997). Basierend auf dem Strömungsgesetz von Hagen-Poiseuille entwickelten POWERS (1939) und STEINOUR (1945) erste Berechnungsansätze zur Bestimmung einer Blutrate von Zementleim. Mit Hilfe der Röntgentomographie stellen WHEELER (1966) sowie WHEELER & CHATTERJI (1972) einen Dichtegradienten über die Höhe einer sedimentierenden Probe aus (blutender) Zementsuspension fest. Darüber hinaus ist in Abhängigkeit der Zeit eine zunehmende Dichte im unteren Bereich von Zementsuspensionen mit hohen w/b-Verhältnissen von 0,5 bis 1,0 festzustellen, wohingegen die Dichte im oberen Teil der Suspension abnimmt (Rosquoët et al. 2003). Untersuchungen von HAN und WANG (2016) zeigen zudem eine erhöhte Porosität sowie Wasserabsorption in Abhängigkeit der Höhe sedimentierender (blutender) Zementsuspensionsproben.

Da Zementsuspensionen einen sehr hohen Feststoffgehalt aufweisen, sind am Prozess der Wasserabsonderung neben den Gravitationskräften (Sedimentationstheorie) zwangsläufig auch interpartikuläre Kräfte beteiligt. Weitere Modellansätze basieren daher auf Mechanismen der Konsolidierung unter Nutzung von Berechnungsansätzen nach Terzaghi (Tan et al. 1987; Jossierand et al. 2006; Morris und Dux 2010). Ferner werden auch physikalische und chemische Effekte infolge der zeitabhängigen Hydratation berücksichtigt. Als weitere Modellvariable beziehen KWAK et al. (2010) sowie GHOURCHAIN et al. (2016) den Porenwasserdruck zur Beschreibung des Blutens mit ein. Die Ergebnisse von TAN et al. (1987) zeigen, dass bei hohen V_W/V_B -Verhältnissen von ca. 1,6 ($\sim w/z = 0,52$) die Effekte des Blutens auf die Konsolidierung infolge des Eigengewichts zurückzuführen sind. MASSOUSSI et al. (2017) nehmen an, dass die Effekte des Blutens von Zementsuspensionen nicht als Ergebnis der Verfestigung eines weichen porösen Mediums angesehen werden können, sondern heterogener Natur sind und zur Bildung bevorzugter Absonderungskanäle innerhalb der Zementsuspension führen. Ohne bevorzugte Wasserabsonderungskanäle wäre das Bluten aus ihrer Sicht für Zementsuspensionen vernachlässigbar. Darüber hinaus unterschieden sie für den Blutungsprozess fünf verschiedene Stadien aufgrund ihrer Kinetik: die Induktionsperiode (niedrige Geschwindigkeit der Wasserabsonderung), eine Beschleunigungsperiode (Zunahme der Permeabilität der Suspension aufgrund der Bildung von Absonderungskanälen), eine konstante Wasserabsonderungsperiode, eine Konsolidierungsperiode und schließlich ein konsolidierter Zustand (die Gravitationskraft kann die konstitutiven Zementkörner nicht weiter verdichten).

Den Sedimentationsprozess der Feststoffpartikel und die resultierende Zonierung beschreiben PENG und JACOBSEN (2013) für Bindemittelsuspensionen in einem phänomenologischen

Modell. Es beschreibt den zeitabhängigen Prozess der Sedimentation der Feststoffpartikel einschließlich der Wasserabsonderung als Variation von vier Zonen. Die oberste Zone der Säule bildet dabei nach einiger Zeit eine Klarflüssigkeitsschicht in der sich keine (Phasengehalt $\phi = 0$) oder nur transluzente Partikel befinden. In Abhängigkeit der Zeit und der Feststoffkonzentration verändert sich die Einteilung bzw. Schichtung der einzelnen Zonen. Nach Beendigung des Sedimentationsvorgangs sind im Normalfall nur noch die Klarwasserschicht und eine komprimierte Sedimentschicht vorhanden (Peng und Jacobsen 2013). Abbildung 2.5 zeigt dazu schematisch den zeitlichen Verlauf der Zonierung während des Sedimentationsprozesses. Der Verlauf des Sedimentationsprozesses wird vor allem in der ersten Phase von der Konzentration bestimmt. Der Kompressionspunkt K_0 beschreibt den Übergang, wo die Zone 1 und Zone 3 zusammenkommen und die Setzung deutlich verlangsamt abläuft (Stieß 2009).

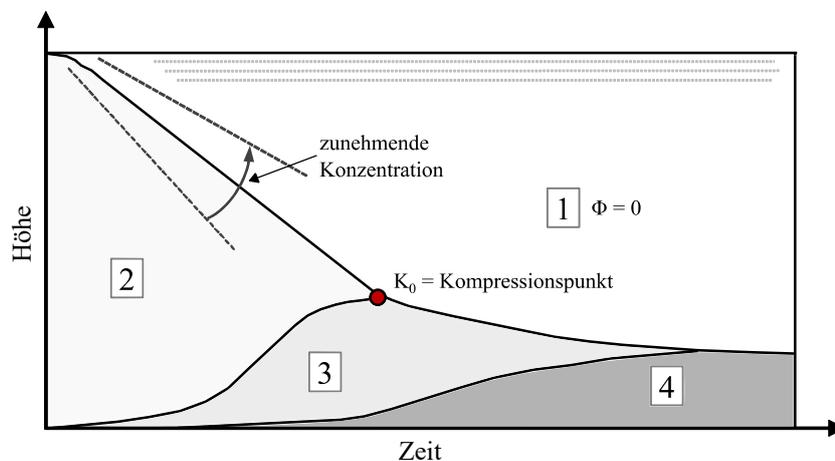


Abbildung 2.5: Schematischer zeitlicher Verlauf der Zonierung während des Sedimentationsprozesses (Zonensedimentation) – 1: Klarflüssigkeitsschicht; 2: Sedimentationszone; 3: Kompressionszone; 4: komprimiertes Sediment (in Anlehnung an (Stieß 2009))

Eine umfassende Literatursichtung von SCHIEBL (1998) zeigt, dass nahezu jede Komponente der Betonzusammensetzung die Wasserabsonderung beeinflusst. Umfangreiche Untersuchungen von LIEBER (1968) sowie von PAUß (1957) an Zementleimen lassen eine deutliche Tendenz erkennen, dass die spezifische Oberfläche (Blaine) des Zements unabhängig von der Zementart eine wesentliche Einflussgröße auf die Neigung zur Wasserabsonderung darstellt. Mit zunehmenden Blaine-Wert nimmt die Wasserabsonderung ab. Bestätigt werden diese Ergebnisse durch Untersuchungen von ALONSO und SCHÄFFEL (2014). Diese Erkenntnisse gelten jedoch nur für Frischbetone, die ohne verflüssigende Zusatzmittel hergestellt wurden. Bei Zugabe verflüssigender Zusatzmittel konnte keine direkte Abhängigkeit festgestellt werden (Alonso 2014). Wechselwirkungen zwischen Bindemitteln und Zusatzmitteln beeinflussen jedoch maßgeblich die Wasserabsonderung sowie die Entmischungsneigung von Frischbetonen (Rickert und Hermann 2013). Die Wechselwirkungen sind dabei aber sowohl von der Zementart als auch von der Zusatzmittelart abhängig (Alonso 2014, 2015). ALFES et al. (2021) geben eine umfassende Zusammenfassung zu den einzelnen Einflussfaktoren.

Neben der zuvor beschriebenen Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung wird die Wasserabsonderung des Frischbetons auch von verfahrenstechnischen Parametern (z. B. der Bauteilhöhe oder der Rüttelintensität) und den Umgebungsbedingungen beeinflusst (Schießl 1998; Wagner und Reichertz 2007; Krell 2013). So bewirkt eine verminderte Frischbetontemperatur sowohl eine erhöhte maximale Wasserabsonderung als auch eine Verlängerung des Zeitraums der Wasserabgabe (Wagner und Reichertz 2007). Zurückzuführen ist die verlängerte Wasserabgabe auf eine verzögerte Hydratation bei geringeren Frischbetontemperaturen. Darüber hinaus wirkt sich der mit zunehmender Bauteilhöhe steigende Druck auf die Dichteunterschiede der einzelnen Ausgangsstoffe (Wasser, Gesteinskörnung und Bindemittel) und dementsprechend auf die Wasserabsonderung aus (Krell 2013).

In (DBV-MB 2014) werden idealisierte charakteristische Verläufe der Wasserabsonderung für typische Betonarten beschrieben, vgl. Abbildung 2.6. Konstruktionsbeton oder Sichtbeton weist demnach eine geringe und stetige Wassermenge über einen kurzen Zeitraum von ca. drei bis acht Stunden auf. Weitere charakteristische Verläufe sind u. a. für Massen- oder Bohrpfahlbetone beschrieben, bei denen eine deutlich höhere Wassermenge über einen längeren Zeitraum festzustellen ist.

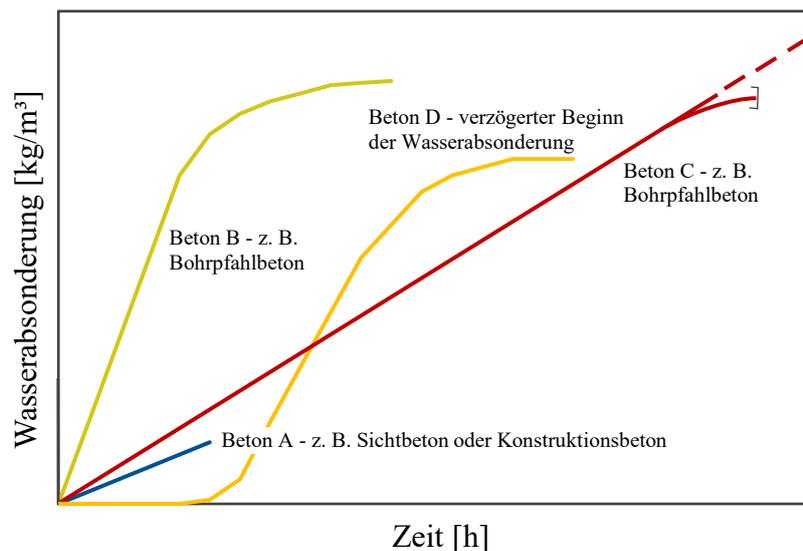


Abbildung 2.6: Qualitative Charakteristika der Wasserabsonderung unterschiedlicher Betonarten (in Anlehnung an (DBV-MB 2014))

2.3.3 Robustheit

Der Begriff der Robustheit wird in der Betontechnologie bisher noch sehr ungleich definiert (Lowke 2013; Lohaus et al. 2018; van der Vurst 2017). Einen umfassenden Überblick über verschiedene Ansätze liefern BAKER et al. (2008) oder HELLER (2012). In Bezug auf den Betonbau beschreiben GERLACH et al. (2014) die Robustheit als die Fähigkeit auf unerwartete nicht vorhersagbare Ereignisse gutmütig zu reagieren. LOHAUS et al. (2018) definieren die

Robustheit „[...] als die systemische Eigenschaft eines Betons [...], auch auf Abweichungen vom Soll, seien es übliche Schwankungen oder ungeplante Einwirkungen (z. B. Wassergehaltsschwankungen, wechselnde Umgebungsbedingungen, Verzögerungen im Bauablauf, unplanmäßig langes Rütteln, usw.), „gutmütig“ bzw. vorhersehbar zu reagieren.“ Darüber hinaus beschreiben MOFFATT et al. (2015) die Robustheit einer Betonzusammensetzung bezüglich einer bestimmten Eigenschaft als Kehrwert der maximalen Varianz.

Die Robustheit von Frischbeton wird sowohl von vielfältigen betontechnologischen als auch baubetrieblichen Einflüssen beeinflusst. So können vor allem Schwankungen in den Ausgangsstoffen (z. B. der Schwankungen im Wassergehalt oder der Korngrößenverteilung) oder der Betonzusammensetzung (z. B. Wechsel der Zementart oder auch -charge) sowie Schwankungen im Herstellungsprozess (z. B. die Mischdauer oder der Transport) zu unerwarteten Eigenschaftsveränderungen führen. Einen umfassenden Überblick zu Untersuchungen zur Robustheit der Sedimentationsstabilität von SVB als auch der rheologischen Eigenschaften ist in (Lowke 2013) enthalten. Darüber hinaus sind in der Literatur vielfältige Untersuchungen zu einzelnen Einflussfaktoren der Robustheit von Frischbeton, insbesondere für SVB, vorhanden (Höveling 2006; Kubens 2010; Lowke 2013; Lesage 2014; Schmidt 2014; van der Vurst 2017).

Zur Bewertung der Robustheit von Frischbeton wurden in der Vergangenheit vielfältige Methoden entwickelt. Die Mehrheit dieser Methoden basiert vor allem auf der Ermittlung von Veränderungen einzelner Eigenschaften, verursacht durch systematische Schwankungen einzelner betontechnologischer als auch verfahrenstechnischer Parameter (Nunes et al. 2006; Billberg und Westerholm 2008; Naji et al. 2011; Zuo et al. 2018; Erdem et al. 2019; Ghoddousi und Salehi 2016). Die Ermittlung der Messgrößen erfolgt dabei zumeist mit gängigen Prüfverfahren, wie z. B. des Ausbreitmaßes zur Bewertung der Konsistenz. Abbildung 2.7 gibt einen schematischen Überblick zur Bewertung der Robustheit von Frischbetoneigenschaften. Daraus wird ersichtlich, dass eine starke Veränderung der ermittelten Eigenschaft bei einer vergleichsweise geringen Schwankung eine geringe Robustheit ausdrückt. Dementsprechend weist Beton A in Abbildung 2.7 eine geringere Robustheit gegenüber Beton B auf.

Ein Großteil der in der Literatur dokumentierten Untersuchungen zur Robustheit bzw. der Homogenität von SVB beschäftigte sich in der Vergangenheit mit dem Einfluss stabilisierender Zusatzmittel auf die Frischbetoneigenschaften (Billberg und Khayat 2008; Naji et al. 2011; van der Vurst et al. 2015). Stabilisierende Zusatzmittel können demnach die Robustheit von SVB hinsichtlich der rheologischen Eigenschaften sowie der Homogenität positiv beeinflussen. Die Wirksamkeit ist jedoch sowohl von der Menge als auch von der Art der stabilisierenden Zusätze abhängig (Billberg und Westerholm 2008).

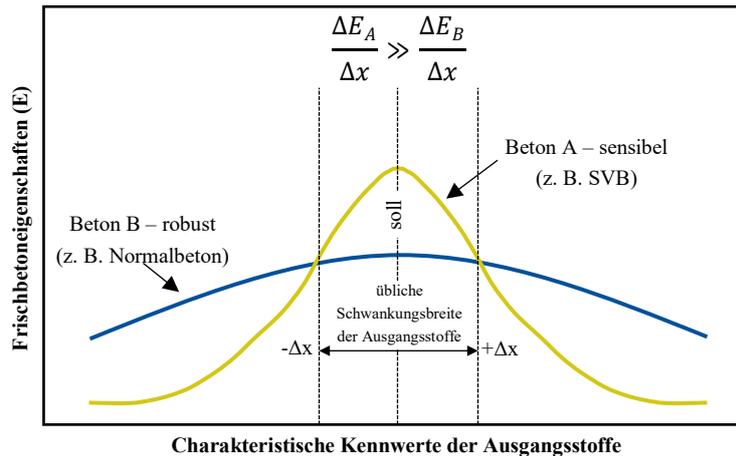


Abbildung 2.7: Eigenschaftsveränderungen durch Veränderungen charakteristischer Kennwerte der Ausgangsstoffe zur Bewertung der Robustheit von Frischbeton – Vergleich zwischen SVB und Normalbeton (in Anlehnung an (Breitenbücher 2001))

Von besonderer baupraktischer Relevanz ist darüber hinaus die Robustheit gegenüber Schwankungen im Wassergehalt. Dieser kann insbesondere durch den Feuchtegehalt der feinen und groben Gesteinskörnung stark variieren. Je nach Messverfahren (hier: basierend auf der Mikrowellentechnik) und Messhäufigkeit sind bei der Feuchtebestimmung der Gesteinskörnung absolute Abweichungen von bis zu 1,0 M.-% bis 2,0 M.-% nicht auszuschließen (Cussigh 2007). Bei einem Normalbeton mit einem Sandgehalt von etwa 600 kg/m^3 kann demnach aus der feinen Gesteinskörnung bereits eine Schwankung des Wassergehalts von bis zu 6 l/m^3 bis 12 l/m^3 resultieren. Schwankungen im Bindemittel- oder Fließmittelgehalt sind demgegenüber aufgrund der hohen Präzision der modernen Systeme zur Einwaage eher gering. Untersuchungen von BILLBERG und WESTERHOLM (2008) zeigen, dass Schwankungen im Wassergehalt deutlich größere Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften besitzen als z. B. eine Variation des Mehlkorngeltes ($d_i < 0,125 \text{ mm}$). Außerdem zeigen Untersuchungen von HÖVELING (2006), van der VURST et al. (2015) oder ABEBE (2017), dass bereits Schwankungen des Wassergehalts von etwa $\pm 10 \text{ l/m}^3$ zu erheblichen Veränderungen der Betoneigenschaften, z. B. der Fließfähigkeit, führen können. Die Stärke der Veränderung ist dabei u. a. von der Betonzusammensetzung abhängig.

Auswirkungen von Veränderungen in der Betonzusammensetzung auf relevante Eigenschaften von Normalbetonen wurden von BREITENBÜCHER & MÜLLER (2017) untersucht. Als maßgebliche Einflussfaktoren konnten dabei Veränderungen der Ausgangsstoffe, insbesondere der Wechsel der Zementart aber auch -charge, der Sandcharge sowie der Fließmitteltyp und Fließmittelgehalt identifiziert werden. Bei Betonen mit geringen Leimgehalt (ca. 265 l/m^3) wirken sich einzelne Veränderungen deutlich stärker auf Eigenschaftsveränderungen aus als bei einem erhöhten Leimgehalt von ca. 300 l/m^3 (Breitenbücher und Müller 2017).

2.4 Frischbetonprüfverfahren und -kriterien

Prüfverfahren und -kriterien zur zielsicheren Ermittlung der Frischbetoneigenschaften stellen im Rahmen von Erst-, Konformitäts- und Identitätsprüfungen einen entscheidenden Bestandteil zur Erfassung und Bewertung der (Frisch-)Betoneigenschaften dar.

Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur Ermittlung einzelner Frischbetoneigenschaften (vgl. Kapitel 2.3) mittels normativer Prüfverfahren näher beschrieben und die Eignung der Verfahren zur Bewertung der in Kapitel 2.2 beschriebenen Eigenschaften bewertet. Darüber hinaus werden alternative Prüfverfahren zur Bewertung einzelner Frischbetoneigenschaften diskutiert. Die Eigenschaft der `Verarbeitbarkeit` wird zusammenfassend unter dem Begriff `Konsistenz` beschrieben, da gängige praxistaugliche Prüfverfahren zumeist diese Eigenschaft als Ersatzkenngröße zur Charakterisierung der Verarbeitbarkeit bewerten. Die hier kurz vorgestellten Verfahren und Methoden dienen u. a. als Referenz für die in dieser Arbeit entwickelten bildbasierten Methoden. Sie werden daher gezielt mit Blick auf die zu bewertenden Oberflächeneigenschaften betrachtet.

2.4.1 Konsistenz

In der Vergangenheit wurden eine Vielzahl von Frischbetonprüfverfahren zur Konsistenzbestimmung entwickelt, die sich auf unterschiedliche Teilbereiche der Verarbeitbarkeit des Frischbetons beziehen (Bonzel und Krell 1986). WIERIG (1989) gibt einen umfassenden Überblick über diese Prüfverfahren. Mit diesen verhältnismäßig einfach durchführbaren Prüfungen können die z. B. für den Fließprozess des Betons maßgebenden Parameter wie Fließgrenze oder plastische Viskosität nicht direkt ermittelt werden. Stattdessen wird eine typische Verarbeitungssituation modellhaft nachgestellt. Zur eindeutigen rheologischen Beschreibung nicht-newtonscher Fluide sind mindestens zwei Parameter („two-point test“) erforderlich (Tattersall 1991; Ferraris 1999). TATTERSALL (1991) unterscheidet zwischen qualitativen, quantitativ empirischen und quantitativ grundlegenden Prüfverfahren. Darüber hinaus formulieren HACKLEY und FERRARIS (2001) die Kategorien Free-flow Tests, Confined Flow Tests, Vibration Tests, Rotational Rheometers zur Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften von Frischbeton.

Die rheologische Charakterisierung mittels Rheometer zählt zu den quantitativ grundlegenden Prüfverfahren. Da die Bestimmung von rheologischen Eigenschaften (im Wesentlichen der Fließgrenze und der plastischen Viskosität) relativ aufwendig und zumeist nur im Labor durchgeführt werden kann, wurde in der Vergangenheit versucht, mittels einfach durchführbarer und baustellentauglicher Prüfverfahren auf diese rheologischen Kenngrößen zu schließen. Insbesondere für sehr fließfähige bzw. selbstverdichtende Betone wurden empirische, numerische als auch analytische Zusammenhänge zwischen der Fließgrenze und den Messgrößen unterschiedlicher Setz- und Setzfließversuche hergeleitet (Murata und Kukawa 1992; Kurokawa et al. 1994; Ferraris und de Larrard 1998; Hooton et al. 1998; Schowalter 1998; Chidiac et al.

2000; Chidiac et al. 2006; Laskar 2009; Nehdi und Al-Martini 2009; Zerbino et al. 2009; Müller 2012; Wallevik 2006). Neben Setz- und Setzfließmaßversuchen wurden vielfach auch weitere quantitative empirische Prüfmethode herangezogen, wie z. B. der L-Box-Versuch (Nguyen et al. 2006), der LCPC-Box-Versuch (Roussel 2007a, 2007b), der Auslaufkegelversuch (Kordts und Breit 2007) oder der V-Trichter-Versuch (Zerbino et al. 2009). Darüber hinaus wurden vielfältige numerische Simulationen der Setz- und Setzfließversuche vorgestellt (Hu und Larrard 1996; Chidiac und Habibbeigi 2005; Roussel 2007a, 2006; Shyshko 2013). Tabelle 2.2 gibt einen zusammenfassenden Überblick dieser Arbeiten. Erwartungsgemäß ist die Fließgrenze vor allem aus längenbasierten Messgrößen von Setz- und Setzfließversuchen sowie Füllversuchen ableitbar. Dagegen zeigt die plastische Viskosität eher einen Zusammenhang zwischen zeitbasierten Messgrößen von Setzfließversuchen und Auslaufversuchen, wobei die Fließzeit mit der plastischen Viskosität ansteigt. Vereinzelt wird außerdem ein kombinierter Einfluss der Fließgrenze und der plastischen Viskosität mit einzelnen empirischen Messgrößen festgestellt (Laskar 2009). Abbildung 2.8 zeigt ausgewählte empirische Ansätze zur Abhängigkeit zwischen der Fließgrenze und dem Setzfließmaß.

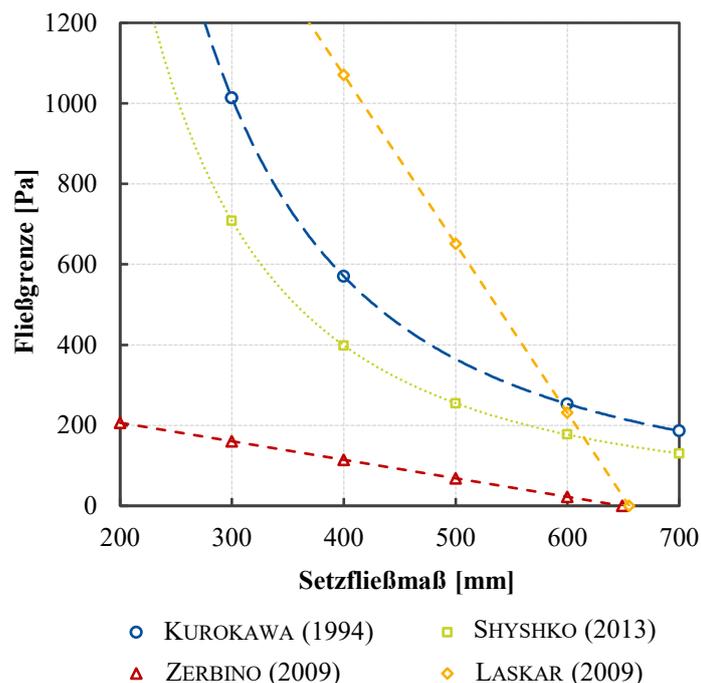


Abbildung 2.8: Empirische Ansätze aus der Literatur zur Berechnung der Fließgrenze von Frischbeton in Abhängigkeit des Setzfließmaßes

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die Mehrzahl der in der Literatur vorliegenden Modelle bei identischen Setzfließmaß sehr unterschiedliche Werte für die Fließgrenze liefern. Auffallend ist weiterhin, dass manche Autoren einen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Kenngrößen identifiziert haben, wohingegen andere Autoren von einem nicht-linearen Zusammenhang ausgehen. Eine mögliche Ursache für diese Diskrepanz könnte in der von

FERRARIS et al. (2001) gezeigten Beobachtung begründet liegen, dass mit verschiedenen Betonrheometern unterschiedliche Fließgrenzen für die gleiche Betonprobe gemessen werden. Demnach sind die jeweiligen abgeleiteten empirischen Gleichungen u. a. von der Art des Betonrheometers abhängig, welches zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften verwendet wurde.

Darüber hinaus zeigen Untersuchungen von ROUSSEL (2007b), dass selbstverdichtende Betone mit unterschiedlichen Größtkorn-Durchmesser bei einem vergleichbaren Setzfließmaß (700 ± 50 mm) um bis zu einem Faktor von 5 voneinander abweichende Fließgrenzen (ermittelt mit dem Beton-Rheometer *BTRHEOM*) aufweisen. Als Ursache hierfür wird der Einfluss des Größtkorns herangezogen, da der Fließvorgang beim Setzfließmaßversuch endet, sobald die Höhe der fließenden Probe das Niveau des Größtkorns erreicht hat (Roussel 2007b).

Tabelle 2.2: Überblick zu durchgeführten praktischen als auch theoretischen bzw. simulationsbasierten Untersuchungen zur Herleitung rheologischer Eigenschaften mittels verschiedener empirischer Prüfmethoden

Prüfmethode	Anwendungsbereich	Messgröße	Korrelierte Eigenschaft		Autor
			Fließgrenze (τ_0)	plastische Viskosität (μ)	
Setzversuch	LVB ($s = 12,5 - 260 \text{ mm}$)	Setzmaß (SI)	$\tau_0 = 71,5 - 474 \log(100SF)$		MURATA (1992)
Setzfließversuch	SVB	Setzfließmaß (SF)	$\tau_0 = 3,30\rho(H - SI)$		KUROKAWA (1994)
analytisch (Sim.)	k.A.	Setzmaß (SI)	$\tau_0 = (30 - 100SD) \frac{\rho}{27}$		HU (1996)
Mini-Setzfließmaß	ZL	Setzfließmaß (SF)	$\tau_0 = 7,4 + 243,3 e^{-SF/43,6}$		KHAYAT (1998)
Setzversuch	NB, SVB	Setzmaß (SI)	$\tau_0 = \frac{\rho}{347} (300 - SI) + 212$		FERRARIS (1998)
Setzfließversuch	NB ($w/z \geq 0,65$)	Setzfließmaß (SF)	$\tau_0 = 39,7 \cdot 10^{-3} \cdot \rho / SF^2$		CHIDIAC (2000)
Setzversuch		Fließzeit & Setzmaß (t_{sump}, SI)	$\tau_0 = a\rho g(H - SI) / \sqrt{3}$	$\mu = (\beta_2 \tau_0 / \beta_1 SI) \cdot t_{sump}$	
Setzfließversuch	M	Setzfließmaß (SF)	$\tau_0 = -32,032 \cdot \ln(SF) + 184,56$		KORDITS (2005)
V-Trichter		Auslaufzeit (t_v)	$\mu = 2,1979 \cdot \ln(t_v) - 3,0156$		
analytisch (Sim.)		Setzmaß (SI)	$\tau_0 = (25,5 - SI) \cdot \frac{\rho}{17,6}$		ROUSSEL (2006)
Setzfließversuch	ZL	Setzfließmaß (SF)	$\tau_0 = 22,5 \rho g^2 / 128 \pi^2 \cdot (SF/2)^2$		ROUSSEL (2005)
analytisch	NB	Setzmaß (SI)	$\tau_0 = 0,3635 \rho g(H - SI)$		CHIDIAC (2005)
L-Box-Versuch	SVB	Höhenunterschied	x (keine analytische Angabe)		NGUYEN (2006)
LCPC-Box	SVB	Fließlänge	x (keine analytische Angabe)		ROUSSEL (2007b)
Setzfließversuch (4C Auto Slump Flow)	SVB & M	Setzfließmaß	x (keine analytische Angabe)		THRANE (2007)
Setzversuch		Fließzeit bzw. -kurve	x (keine analytische Angabe)		
Setzfließversuch	SVB	Setzmaß (SI)	$\tau_0 = (0,21 - SI) \frac{\rho g}{2,87}$	quad. Funktion	
Setzfließversuch	SVB	Setzfließmaß (SF)	$\tau_0 = (655 - SF) / 0,238$	quad. Funktion	LASKAR (2009)
Setzversuch	SVB	Fließzeit	x (keine analytische Angabe)	quad. Funktion	
Setzfließversuch	SVB	Setzfließmaß (SF)	$\tau_0 = 0,46(649 - SF)$		NEIDI (2009)
V-Trichter		Fließzeit (t_{500})	$\mu = (\ln(t_{500}/0,68)) / 0,019$		ZERBING (2009)
analytisch	SVB, (NB)	Fließzeit (t_v)	$\mu = (\ln(t_v/3,04)) / 0,013$		
analytisch	SVB, (NB)	Setzfließmaß (SF)	$\tau_0 = 0,875 \rho g / (0,55 SF)$		SHYSIKO (2013)

SVB = selbstverdichtender Beton; NB = Normalbeton; LVB = sehr fließfähiger Beton; M = Mörtel
 τ_0 = Fließgrenze μ = plast. Viskosität SI = Setzmaß SF = Setzfließmaß ρ = Rohdichte g = Gravitationskraft t_{sump} = Fließzeit H = Höhe der Konusform $h_0 = H - SI$ t_{500} = Fließzeit bis $SF = 500 \text{ mm}$ t_v = Ausfließzeit V-Trichter α, β = Konstanten Ω = Probenvolumen

DIN EN 206 formuliert zur Einteilung der Frischbetonkonsistenz unterschiedliche Konsistenzklassen mit den dazugehörigen baustellentauglichen Prüfverfahren. In Deutschland wird vorzugweise das Ausbreitmaß gemäß *DIN EN 12350-5* sowie bei steifen Betonen das Verdichtungsmaß gemäß *DIN EN 12350-4* zur Charakterisierung der Frischbetonkonsistenz angewendet. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen den einzelnen Prüfverfahren ist nur eingeschränkt möglich. Ein uneingeschränkter Vergleich unterschiedlicher Betonzusammensetzungen kann demnach beim Einsatz unterschiedlicher Prüfverfahren nicht vorgenommen werden (Bonzel und Krell 1986).

2.4.1.1 Ausbreitmaß

Beim sogenannten Ausbreitmaß handelt es sich um einen Fließversuch, bei dem sich der Frischbeton auf einer ebenen Ausbreitplatte unter Zufuhr von Energie durch gezielt eingebrachte Stöße ausbreitet. Das Ausbreitmaß wird anhand des Durchmessers des ausgebreiteten Frischbetons in sechs Konsistenzklassen (F1 bis F6) eingeteilt. Mit diesem Prüfverfahren lassen sich steife (F1) bis hin zu sehr fließfähige Frischbetone (F6) charakterisieren. Jedoch ist das Prüfverfahren für Frischbetone der Konsistenzklassen F1 sowie F6 aufgrund einer unzureichenden Empfindlichkeit nicht empfehlenswert. Die Konsistenz wird im Ausbreitversuch durch die definierte Verformung des zuvor in eine Kegelstumpfform eingefüllten Frischbetons bestimmt. Eine auf dem Ausbreittisch befindliche Konusform wird mit zwei etwa gleichhohen Betonschichten gefüllt, wobei jede Schicht mit leichten Stößen mit einem Stößel auszugleichen ist. Der Frischbeton ist an der Oberkante der Form bündig abzustreifen und die Form im Anschluss vertikal abzuheben. Anschließend ist die Tischplatte bis zum Anschlag anzuheben und wieder frei fallen zu lassen. Dieser Vorgang wird insgesamt 15-mal wiederholt. Die Konsistenz des Frischbetons wird durch Messung des auf der Tischplatte ausgebreiteten Betons bestimmt. Das Ausbreitmaß ist der mittlere Durchmesser des ausgebreiteten Betons. Der ausgebreitete Beton auf der Ausbreitplatte ist zudem gemäß *DIN EN 12350-5:2019-09* augenscheinlich auf Entmischungserscheinungen (z. B. Leimaustritt am Rand oder Separierung von grober Gesteinskörnung) zu überprüfen.

In der Literatur sind darüber hinaus vielfältige bildbasierte sowie sensorgestützte Ansätze zur Dokumentation des zeitabhängigen Ausbreitverhaltens fließfähiger Betone sowie Mörtel im Rahmen der Prüfung des Setzfließmaßes beschrieben (Gram und Piiparinen 2005; Thrane et al. 2010; Shyshko 2013; Heese 2014; Kim und Park 2018; Fierenkothen 2019). Eine automatisierte Methode zur Ermittlung des Setzfließmaßes und eines Verteilungsverhältnisses der groben Gesteinskörnung in Bildaufnahmen des ausgebreiteten Frischbetons ist zudem von DEAWOO ENGINEERING & CONSTRUCTION CO. LTD. patentiert (DAEWOO 2007).

2.4.1.2 Setzmaß

Der Setzversuch gemäß *DIN EN 12350-2* ist für steife bis sehr weiche Betone, die ein Setzmaß zwischen 10 mm bis 210 mm aufweisen, geeignet. Der Frischbeton wird in eine konische Form in drei gleichmäßigen Schichten gefüllt und jede Schicht mit 25 Stößen mit einem Stößel verdichtet. Nach der Befüllung ist die Form langsam lotrecht nach oben abziehen. Das vertikale Absacken des Frischbetons nach dem Entfernen der Form wird gemessen und als sogenanntes Setzmaß bezeichnet, vgl. Abbildung 2.9. Die Prüfung ist nur gültig, wenn beim Absacken der Beton weitestgehend intakt und symmetrisch bleibt, vgl. Abbildung 2.9. Dies wird dann als ‘wahres Setzmaß’ bezeichnet.

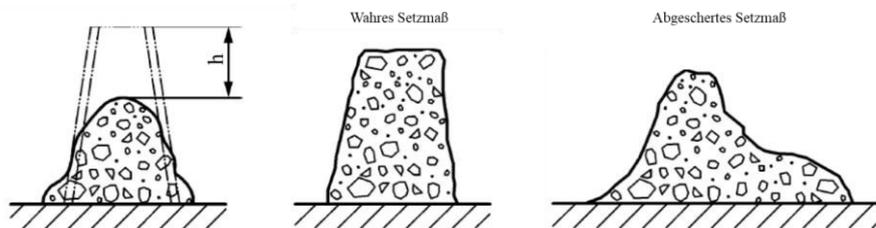


Abbildung 2.9: Ermittlung des Setzmaßes (links) und wahres (mitte) bzw. abgeschertes Setzmaß (rechts) gemäß *DIN EN 12350-2*

2.4.1.3 Verdichtungsmaß

Die Bestimmung des Verdichtungsmaßes gemäß der Norm *DIN EN 12350-4* ist besonders bei der Ermittlung der Verarbeitbarkeit von steifen bzw. sehr steifen Betonen geeignet. Der Frischbeton wird ohne jegliche Verdichtung und Erschütterung mit einer Kelle in einen definierten Behälter mit einer Höhe von $h = 400 \text{ mm}$ gegeben und an der Oberkante des Behälters bündig abgestrichen. Auf einem Vibrationstisch wird der Frischbeton anschließend vollständig verdichtet. Zur Bestimmung des Verdichtungsmaßes wird der Abstand s zwischen der Oberfläche des verdichteten Frischbetons und der Oberkante des Behälters ermittelt. Das Verdichtungsmaß c wird gemäß der folgenden Gl. 4 berechnet:

$$c = \frac{h}{h - s} \quad \text{Gl. 4}$$

2.4.2 Wasserabsonderung

Die zur Bewertung der Wasserabsonderung existierenden Prüfverfahren lassen sich in druckbasierte Verfahren und Absetzverfahren unterteilen. CLEVEN (2016) gibt eine zusammenfassende Beschreibung der einzelnen Prüfverfahren. Bei den Druckverfahren wird die Frischbetonprobe künstlich mit einem Unter- oder Überdruck zur Ermittlung des Entwässerungsverhaltens belastet. Gängige Druckverfahren zur Ermittlung des Entwässerungsverhaltens sind der „Pressure-Bleed-Test“ von BROWNE und BAMFORTH (1977) oder die Betonfilterpresse

gemäß (ÖVBB-MB 2009). Absetzverfahren beruhen hingegen auf dem Sedimentationsprinzip, wobei eine Betonprobe in ein Gefäß gegeben wird und das abgesonderte Wasser an der Oberfläche zeitabhängig volumetrisch ermittelt wird. In der Literatur wird neben normativen Prüfverfahren gemäß *DIN EN 480-4* oder *ASTM C232/C232M-14* eine Vielzahl unterschiedlicher Absetzverfahren beschrieben (Powers 1968; Schießl 1998; Josserand und Larrard 2004).

Ein vereinfachtes Prüfverfahren zur Bewertung der Wasserabsonderung von Frischbeton ist in (DBV-MB 2014) beschrieben. Eine Frischbetonprobe von zehn Liter wird zweilagig in ein geeignetes Gefäß gefüllt und jede Lage vollständig verdichtet. Die Verdichtungsintensität ist dabei der Betonzusammensetzung bzw. Konsistenz anzupassen. Hierdurch resultiert bei dem Verfahren eine gewisse Unschärfe. In einem definierten Zeitintervall wird die an der Oberfläche abgesonderte Wassermenge ermittelt. Das Prüfverfahren eignet sich grundsätzlich für in-situ Untersuchungen auf der Baustelle und beruht auf dem Sedimentationsprinzip (Wagner und Reichertz 2007). Es ist zu beachten, dass auch mit diesem Prüfverfahren eine Bewertung der Wasserabsonderung erst nach längerer Zeitdauer – in der Regel von 2-5 Stunden – erfolgen kann, sodass es als Annahmekriterium für Transportbeton nicht geeignet ist. Auf der Baustelle erfolgt zumeist nur eine augenscheinliche visuelle Beurteilung des Frischbetons hinsichtlich einer möglichen Wasserabsonderung, z. B. während der Konsistenzprüfung (vgl. Kapitel 2.4.1.1). Eine zuverlässige und objektive Bewertung ist somit jedoch nicht möglich und vor allem stark vom Erfahrungswissen des Prüfers abhängig. Untersuchungen von BREITENBÜCHER und MÜLLER (2017) zeigen, dass Betonzusammensetzungen, die bei der Konsistenzprüfung als stabil eingestuft werden, im Eimerverfahren eine deutliche Wasserabsonderung aufweisen können.

Erfahrungswerte für eine zulässige abgesonderte Gesamtwassermenge für typische Anwendungsfälle können (DBV-MB 2014) entnommen werden, vgl. Tabelle 2.3. Diese Werte wurden in der Vergangenheit vielfach diskutiert (Heese und Breit 2012; Kiltz und Siebert 2013; Krell 2013). So gibt z. B. KRELL (2013) als Erfahrungswerte für typische Wassermengen etwas höhere Werte als die in Tabelle 2.3 dargestellten Mengen an.

Tabelle 2.3: Erfahrungswerte für zulässige abgesonderte Wassermengen von Frischbeton (ermittelt im Eimerverfahren) zum Zeitpunkt „Ende der Verarbeitbarkeitszeit“ (gemäß (DBV-MB 2014))

Anwendungsfall und typische Charakteristik der Wasserabsonderung	max. Wasserabsonderung	
	$M_{Bw,max}$ [kg/m ³]	$V_{Bw,max}^{1)}$ [Vol.-%]
Sichtbeton (Charakteristik A) ²⁾	< 1	< 0,1
Beton für befahrbare Bauteile (Charakteristik A) ²⁾	< 2	< 0,2
Konstruktionsbeton (Charakteristik A) ²⁾	< 3	< 0,3
Massen-, Bohrpfahlbeton (Charakteristik B und C) ²⁾	< 10	< 1,0

¹⁾ Annahme: $\rho_{Bw} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ($BW = \text{abgesondertes Wasser (Blutwasser)}$)

²⁾ vgl. Abbildung 2.6 in Kapitel 2.3.2

2.4.3 Sedimentation der groben Gesteinskörnung

Für selbstverdichtende Betone existieren zur Bestimmung zur Sedimentation der groben Gesteinskörnung verschiedene Prüfverfahren auf nationaler sowie internationaler Ebene. Ein umfassender Überblick der unterschiedlichen Verfahren ist z. B. in (Müller 2012) sowie (Zhang et al. 2021) wiedergegeben. Geeignete Prüfverfahren zur Beurteilung der Sedimentation der groben Gesteinskörnung fließfähiger Normalbetone der Konsistenzklasse F4 bis F6 unter Rüttelwirkung sind aktuell Gegenstand verschiedener Forschungsaktivitäten (Begemann et al. 2018; Spörel 2018, Spörel 2019; Haist und Breitenbücher 2021). Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der Sedimentationsstabilität besteht in der Quantifizierung der Verteilung des Grobkorns am Festbeton über die Höhe der rüttelverdichteten Probe (BAW-MB 2019). Dabei können sowohl Leimabsonderungen im oberen Randzonenbereich als auch die Sedimentationstiefe der obersten groben Gesteinskörner bestimmt werden. Des Weiteren kann die Bestimmung der Grobkornverteilung entweder durch visuelle Bewertung oder mittels digitaler Bildanalyse erfolgen (Breul et al. 2008; Ozen und Guler 2020; Coenen et al. 2021).

Zur Beurteilung der Sedimentationsstabilität der groben Gesteinskörnung von SVB wird standardmäßig der Auswaschversuch gemäß (DAfStb-Ri 2012) angewendet. Basierend auf diesem Prüfverfahren für SVB konnte in umfangreichen Untersuchungen gezeigt werden, dass der Auswaschversuch grundsätzlich auch für eine Abschätzung der Sedimentation der groben Gesteinskörnung unter Rüttelwirkung geeignet ist (Begemann et al. 2018; Spörel 2018).

2.4.4 Visuelle Beurteilung - Augenscheinprüfung

Eine qualitative Bewertung der Entmischungsneigung stellt der visuelle Stabilitätsindex ('Visual Stability Index' - VSI) gemäß *ASTM C 1611/C 1611M:2018* dar. Nach Durchführung des Setzfließversuchs (z. B. gemäß *DIN EN 12350-8*) wird der Rand und die Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons hinsichtlich der Verteilung der groben Gesteinskörnung und des Leim- bzw. Mörtelanteils sowie der Wasserabsonderung visuell bewertet. Anhand festgelegter Kriterien erfolgt die Zuordnung zu einer bestimmten Klasse, vgl. Tabelle 2.4. Die Objektivität und Genauigkeit des VSI ist jedoch begrenzt und stellt kein zielsicheres Kriterium zur Bewertung dynamischer als auch statischer Entmischungserscheinungen dar (Panesar und Shindman 2012; Shen et al. 2016; Shen et al. 2014).

Tabelle 2.4: Kriterien zur Bewertung des VSI in Anlehnung an *ASTM C 1611/C 1611M:2018*

Stabilitätsindex (VSI)	Kriterium
0 (sehr stabil)	Kein Anzeichen von Entmischung oder Wasserabsonderung (Bluten)
1 (stabil)	Keine Anzeichen von Entmischung; leichtes Bluten als Glanz auf der Oberfläche
2 (instabil)	Mörtelrand ≤ 10 mm und/oder Agglomeration grober Gesteinskörnung in der Mitte des ausgebreiteten Frischbetons
3 (sehr instabil)	Eindeutige Entmischung \rightarrow Leim- bzw. Mörtelrand > 10 mm und/oder starke Agglomeration grober Gesteinskörnung in der Mitte des ausgebreiteten Frischbetons

Gemäß *DIN EN 12350-5* ist die im Ausbreitversuch ausgebreitete Frischbetonprobe auf Entmischung zu überprüfen. Es ist vor allem auf eine mögliche Trennung zwischen grober Gesteinskörnung und Zementleim im Randbereich des ausgebreiteten Betons zu achten. Wie beim VSI, stellt auch die visuelle Bewertung des ausgebreiteten Betons eine subjektive Bewertung und somit ebenfalls kein zielsicheres Kriterium für die Entmischungsneigung dar. Untersuchungen von REINERS et al. (2015) zeigen, dass vor allem Betonzusammensetzungen mit geringem Wasser- und Leimgehalt in Kombination mit einer hohen Fließmitteldosierung zu starken Entmischungserscheinungen beim Ausbreitversuch führen. Jedoch wiesen solche Betonzusammensetzungen mit weiteren Prüfverfahren keine messbaren Eigenschaften auf, die eine erhöhte Entmischungsneigung suggerieren. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bildung eines Wasser- bzw. Leimrandes auf dem Ausbreittisch mit zunehmenden Mehlkorngelalt bei einem unveränderten Sandanteil abnimmt (Reiners et al. 2015; Alonso et al. 2015).

Abbildung 2.10 verdeutlicht mögliche Erscheinungsformen zur visuellen Bewertung der Entmischungsneigung einzelner (Oberflächen-)Eigenschaften des ausgebreiteten Betons bei der Konsistenzprüfung.

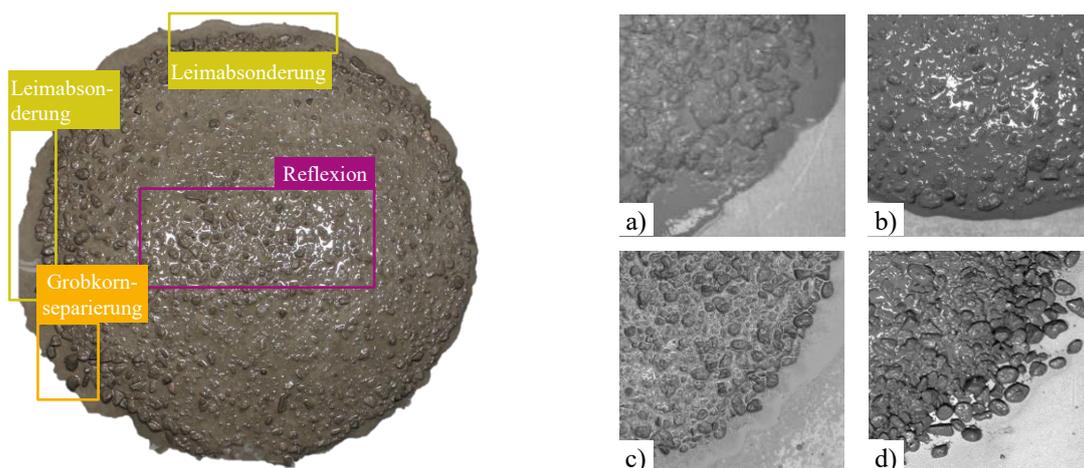


Abbildung 2.10: Visuelle Darstellung einzelner (Oberflächen-)Eigenschaften des ausgebreiteten Betons bei der Konsistenzprüfung (links) und detaillierte Darstellung einzelner Phänomene (rechts): a) ausgeprägte Leimabsonderung im Randbereich ($d \gg 10$ mm); b) Leichte Leimabsonderung im Randbereich ($d < 10$ mm) und starke lokale Oberflächenreflexion; c) ausgeprägte Leimabsonderung ($d \gg 10$ mm) mit starken Entmischungserscheinungen infolge Fließmittel-Überdosierung; d) Grobkornseparierung im Randbereich

2.4.5 Zerstörungsfreie Messprinzipien

Neben klassischen zumeist empirischen Prüfverfahren zur Bewertung von Frischbetoneigenschaften wurden in der Vergangenheit vielfach Messverfahren zur indirekten Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften basierend auf unterschiedlichsten Messprinzipien erprobt und eingesetzt. Im Bereich der Schadensanalyse am Festbeton werden bereits standardmäßig zerstörungsfreie Prüfmethoden angewendet, z. B. bei der Ortung von Bewehrungsstäben. WIGGENHAUSER und TAFFE (2004) sowie (DBV-MB 2014a) geben einen umfassenden

Überblick zu den Messprinzipien der unterschiedlichen Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (ZfP-Bau-Verfahren). Jedes Messprinzip kann demnach mit einer bestimmten Messmethode angewandt werden, vgl. Abbildung 2.11. So kann das Messprinzip Ultraschall z. B. in Reflexion oder Transmission angewandt werden.

Die Ausführungen und Beschreibungen in diesem Kapitel beschränken sich auf Messprinzipien bzw. -methoden zur Beurteilung unterschiedlicher (Frisch-)Betoneigenschaften, obgleich vergleichbare Sensorik z. B. zur Ermittlung der Feuchte von Partikeln bzw. Gesteinskörnung in der Praxis Anwendung findet (Kupfer 1997, Kupfer 2001; Ludwig 2015). Auf eine Darstellung der Anwendung der Messprinzipien bzw. -methoden auf weitere granulare oder mineralische Stoffe wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

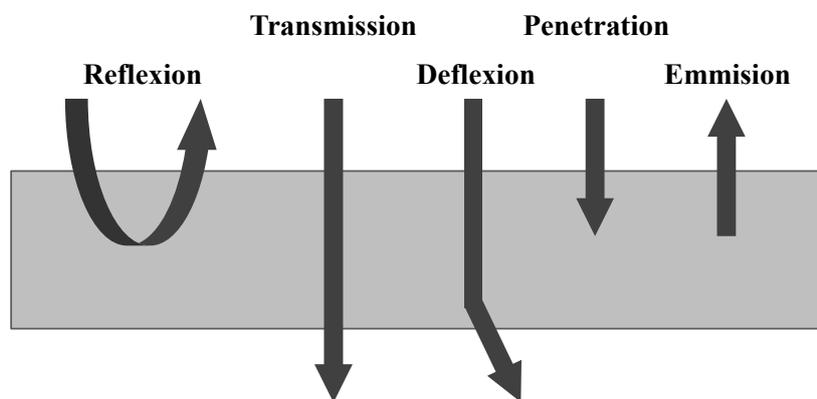


Abbildung 2.11: Angewandte Messmethoden in der ZfP-Bau (in Anlehnung an (DBV-MB 2014a))

Untersuchungen von SIEBERT et al. (2020) zeigen, dass die Mikrowellentechnik unter Verwendung eines mobilen Handmessgerätes eine schnelle und effiziente Möglichkeit zur Ermittlung des Wassergehaltes im Frischbeton bietet. In Abhängigkeit der materialspezifischen Dielektrizitätszahl werden die erzeugten Mikrowellen teilweise an den Materialschichtgrenzen umgelenkt bzw. reflektiert. Resultierend daraus können die dielektrischen Verluste ermittelt und den Wassermolekülen zugeordnet werden (Schaeper und Kreye 2011). Ergebnisse von Laboruntersuchungen legen nahe, dass die ermittelten Messergebnisse einer bestimmten Betonzusammensetzung nicht direkt auf weitere Betonzusammensetzungen übertragbar sind, die z. B. in der Zementart oder der Kornzusammensetzung abweichen (Siebert et al. 2020). Vergleichbare Ergebnisse zeigen Labor- sowie Praxiserfahrungen von KRELL (2015) mit einem Messgerät basierend auf der TDR-Methode (Time-Domain-Reflectometry).

Ein Messverfahren zur zerstörungsfreien Wassergehaltsbestimmung mittels dielektrischer Parameterermittlung wurde von MOUHASSEB (2007) entwickelt. Störende Einflüsse auf die Messgenauigkeit, wie z. B. der Salzgehalt des Betons, das physikalische gebundene Wasser oder die Temperatur können bei diesem Messverfahren vernachlässigt werden (Mouhasseb 2007). Die Anwendung ist jedoch auf Festbeton beschränkt.

Ultraschallverfahren bieten in der Qualitätsprüfung eine quasi kontinuierliche Messung bestimmter Frischbetoneigenschaften. Zur Bestimmung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens wird vor allem Ultraschall in Transmission als auch Reflexion (Impact-Echo) als Messmethode angewendet (Große 2019; Vogel et al. 2018; Maack et al. 2021). Bei der Transmission wird ein Ultraschallsignal nach einmaligem Durchlaufen des zu untersuchenden Materials aufgezeichnet und analysiert. Die Wellenform und -geschwindigkeit, die Amplitude sowie die Frequenz der Welle lassen Rückschlüsse auf das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten zu (Reinhardt et al. 2000; Reinhardt und Grosse 2004). Möglichkeiten und Grenzen der Ultraschalltechnik im Betonbau zeigen u. a. VOGEL et al. (2018) auf. MAACK et al. (2021) geben darüber hinaus einen Überblick zu bautechnischen Messgrößen hinsichtlich der Ultraschall-Messtechnik.

TATARIN et al. (2006) ermitteln die Sedimentationsstabilität an Frisch- und Festbeton infolge höhenabhängiger Messungen der Schallgeschwindigkeit. Ferner beurteilen sowohl KHAYAT et al. (2007) als auch MESBAH et al. (2011) die Sedimentation der groben Gesteinskörnung von SVB mittels der elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Höhe in einem Probekörper.

2.4.6 Zusammenfassung

Die in der vorliegenden Literatursichtung beschriebenen und für den Betonbau maßgebenden Frischbetoneigenschaften lassen eine enorme Spannweite an Eigenschaften sowie vielfältige Wechselwirkungen erkennen. Die Steuerung durch die Betonzusammensetzung ist u. a. maßgeblich von vielfältigen Interaktionen der unterschiedlichen Ausgangsstoffe sowie von Schwankungen in den Ausgangsstoffen abhängig. Insbesondere die Robustheit wird durch etwaige Schwankungen in den Ausgangsstoffen beeinflusst. Hinzu kommen Einflüsse aus der Umwelt.

Die Mehrzahl der Frischbetoneigenschaften wird maßgeblich von den rheologischen Eigenschaften des Betons bzw. Mörtels und Leims beeinflusst (vgl. Kapitel 2.3). Dementsprechend ist ein grundlegendes Verständnis des rheologischen Verhaltens des Frischbetons die Grundlage zur Sicherstellung der charakteristischen Anforderungen. Eine zielsichere Beurteilung relevanter Eigenschaften, insbesondere der rheologischen Eigenschaften, ist bisher jedoch nicht mit praxis- bzw. baustellentauglichen Prüfmethode oder Abnahmekriterien möglich, so dass Steuerungs- oder Einflussmöglichkeiten für den Hersteller sowie den Abnehmer weitestgehend fehlen. Darüber hinaus ist kein Prüfverfahren in der Lage eine integrale Bewertung maßgeblicher Eigenschaften, insbesondere der stofflichen Parameter, in Echtzeit vorzunehmen (vgl. Kapitel 2.4).

Die Ermittlung der Qualitätsmerkmale auf der Baustelle ist heute noch immer rein empirisch geprägt. Zur Überprüfung der (Frisch-)Betoneigenschaften bei der Identitätsprüfung wird zumeist allein das Ausbreitmaß zur Beurteilung der Konsistenz in Verbindung mit einer subjektiven Augenscheinprüfung des Frischbetons eingesetzt (vgl. Kapitel 2.1). Der erfahrene

Baustoffprüfende erkennt bei der Augenscheinprüfung zwar eine Vielzahl von (Oberflächen-) Merkmalen zur Abschätzung weiterer Eigenschaften (vgl. Kapitel 2.4.4), eine Überführung dieses subjektiven Erfahrungswissen in eine quantitative Bewertung gelingt mit den bisherigen Methoden jedoch nicht. Bisher fehlen entsprechende Sensor- und Messmethoden zur Erfassung und digitalen Bewertung der Eigenschaften von frischen Beton. Zur Einführung solcher digitalen Methoden in der Betontechnologie muss es gelingen, die bisher rein subjektiv wahrgenommenen (Oberflächen-)Eigenschaften des Frischbetons mit bildbasierten Methoden bzw. Computer Vision zu erfassen und in digitale Kennwerte zu überführen.

Bei Betrachtung der Ausbreitmaßprüfung, die den Standard auf der Baustelle darstellt, bieten insbesondere optische Eigenschaften (Reflexion) oder die Gestalt und Textur (Rauheit) der Frischbetonoberfläche (vgl. Abbildung 2.10, Kapitel 2.4.4) ein enormes Potenzial zur digitalen Bewertung von Eigenschaften unter Anwendung entsprechender Messmethoden und Sensoren.

2.5 Oberflächeneigenschaften

Im allgemeinen Sinne beschreibt die Oberfläche die äußere Begrenzung eines Fest-Körpers bzw. die Begrenzung zwischen zwei Medien (Weingraber und Abou-Aly 1989). Eine Fest-Körper-Oberfläche weist sowohl eine geometrische Beschaffenheit (Oberflächengestalt bzw. -textur) als auch unterschiedliche physikalisch-chemische Eigenschaften auf. Darüber hinaus stellen optische bzw. strahlungsphysikalische Eigenschaften wesentliche Merkmale der Oberfläche dar. Die Strahlungsoptik beschäftigt sich mit der Erfassung von elektromagnetischer Energie, so dass z. B. das Spektrum einer Lichtquelle bestimmt werden kann (Kickingeder 2006).

2.5.1 Optische Eigenschaften

Optische bzw. strahlungsphysikalische Oberflächeneigenschaften können durch Reflexions- und Brechungsgesetze beschrieben werden. Licht wird an der Grenzfläche zweier Medien mindestens anteilig reflektiert. Die Farbe einer nicht selbst leuchtenden Oberfläche ist von den reflektierten spektralen Anteilen des aus der Umgebung auf sie einfallenden Lichts abhängig (Bergmann und Schaefer 1993). Das Licht kann von der Oberfläche sowohl glänzend als auch matt zurückgestrahlt werden, wobei Glanz bei spiegelnd gerichteter Reflexion auftritt.

Quantitativ kann die Reflexion über den Reflexionsgrad ρ und qualitativ über die Richtung der reflektierten Strahlung beschrieben werden. Der Reflexionsgrad ist als Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtstärke I definiert und wird bei konstantem Licht-Einfallswinkel auf eine an Luft grenzende Oberfläche von der Brechzahl bzw. dem Brechungsindex n und dem Absorptionskoeffizienten a der Materie bestimmt. Reflexionseigenschaften (spiegelnd oder diffus), Transmissions- und Absorptionseigenschaften werden in Abhängigkeit der Richtung des reflektierten Lichts beschrieben und sowohl durch die Materie als auch durch die Rauheit

der Oberfläche beeinflusst. Entsprechend dem Rayleigh Kriterium gilt eine Oberfläche als optisch glatt, wenn für die mikroskopische Höhendifferenz h_{smooth} der Oberfläche in Abhängigkeit des Einfallswinkels θ_i und der Wellenlänge λ folgende Ungleichung erfüllt ist (Marzahn 2013):

$$h_{smooth} \leq \frac{\lambda}{8 \cdot \cos\theta_i} \quad \text{Gl. 5}$$

Glatte Oberflächen weisen entsprechend der Fresnelschen Formeln einen Glanz auf, der die Farbe des spiegelnd gerichtet reflektierten Lichts zeigt (Bergmann und Schaefer 1993). Glanz ist keine physikalische Eigenschaft, sondern eine subjektive Empfindung. Physikalisch messbar sind nur die Reflexionseigenschaften einer Oberfläche. Dabei wird die Fähigkeit der Oberfläche zur gerichteten Reflexion von Licht bewertet (Alberts et al. 1938). Die Wahrnehmung des Glanzes wird sowohl von der Oberflächenrauheit und dem Brechungsindex n des Materials als auch von der Beleuchtung und dem Beobachter beeinflusst. Je höher der Brechungsindex, desto stärker ist die Lichtbrechung an einer Oberfläche und demnach auch die resultierenden Glanzeffekte. Darüber hinaus ist die Bewertung von Glanzeffekten von physiologischen Maßstäben geprägt. Bereits 1937 skizzierte HUNTER (1937) sechs Arten von Glanz. Ausführliche Beschreibungen der einzelnen Glanzarten sind z. B. in (Chadwick und Kentridge 2015) enthalten.

Die spiegelnde Reflexion wird als gerichtete oder spekulare Reflexion bezeichnet. Ein unter dem Winkel α_i auftreffender Lichtstrahl wird an einer ideal spiegelnden Oberfläche verlustfrei in Richtung des Spiegelwinkels $\alpha_{0,s}$ reflektiert, wobei gilt $\alpha_i = -\alpha_{0,s}$ (vgl. Abbildung 2.12).

Die diffuse Reflexion wird als ungerichtete oder lambertsche Reflexion bezeichnet, vgl. Abbildung 2.12, rechts. Das Licht wird dabei gleichmäßig in alle Richtungen verteilt. Ein Lambert-Strahler ist dadurch gekennzeichnet, dass seine Lichtstärke unter jedem Betrachtungswinkel α_i konstant ist und dadurch aus jeder Blickrichtung gleich hell erscheint (Kickingeder 2006). Der Anteil diffuser Reflexion im Vergleich zur gerichteten Reflexion, ist umso größer bei gleicher Gesamtmenge des reflektierten Licht, je größer die Rauheit der Oberfläche im Vergleich zur Wellenlänge des sichtbaren Lichts ist.

Sowohl die spiegelnd gerichtete als auch die rein diffuse Reflexion stellen Idealisierungen dar, die in der Praxis nicht in der reinen Form auftreten. Zur Beschreibung des Reflexionsverhaltens von Materialoberflächen wird eine Funktion benötigt, die für alle möglichen Einfallrichtungen das reflektierte Licht aller Ausfallrichtungen erfasst. Eine solche Beschreibung des Reflexionsverhaltens einer Oberfläche ist mit einer bidirektionalen Reflexionsverteilungsfunktion (*Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF*) möglich (Kickingeder 2006).

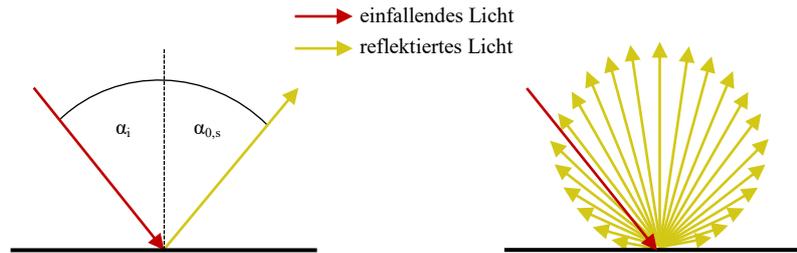


Abbildung 2.12: Spiegelnd gerichtete Reflexion (links) und Lichtstärkeverteilung bei diffuser Reflexion (rechts)

Vereinfacht wird statt der Cosinus-Verteilung für die diffuse Reflexion vielfach eine Normalverteilung zur Beschreibung einer gemischten Reflexion bzw. der Berechnung der reflektierten Lichtstärke angenommen (Köhler 2011):

$$I_0(\alpha_0) = I_0(\alpha_{0,s}) \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\alpha_0 - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad \text{Gl. 6}$$

Hierbei stellt $I_0(\alpha_0)$ die reflektierte Lichtstärke in Beobachtungsrichtung α_0 und $I_0(\alpha_{0,s})$ die maximal reflektierte Lichtstärke in Richtung des Spiegelwinkels $\alpha_{0,s}$ dar. μ ist der theoretische Erwartungswert und σ die theoretische Standardabweichung ($\sigma \in]0,1[$), vgl. Abbildung 2.13. Modellvorstellungen von BENNETT (1961) zur Beschreibung des Einflusses der Oberflächenrauheit auf das Reflexionsvermögen berücksichtigen außerdem normalverteilte Abweichungen der Oberflächengestalt (Köhler 2011).

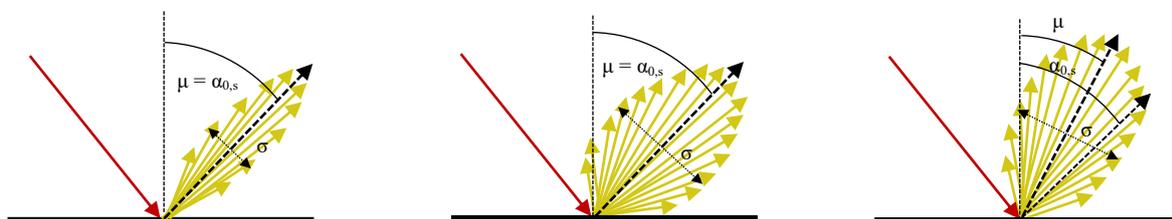


Abbildung 2.13: Lichtstärkeverteilung bei gemischter Reflexion mit $\sigma = 0,2$ und $\mu = \alpha_{0,s}$ (links), $\sigma = 0,5$ und $\mu = \alpha_{0,s}$ (mitte) sowie $\sigma = 0,5$ und $\mu = \alpha_{0,s} + 18^\circ$ (rechts) (in Anlehnung an (Köhler 2011))

Detaillierte Ausführungen zu den unterschiedlichen Reflexionsarten und Grundlagen der Reflektometrie sind u. a. in (Baer 2006; Gall 2007; Köhler 2011) enthalten. Eine umfassende Beschreibung strahlungsphysikalischer Größen zur Beschreibung der makroskopischen Auswirkungen von Licht ist zudem in (Kickingeder 2006) vorzufinden.

2.5.2 Glanzmessung

Der Glanz einer Oberfläche ist neben der Oberflächenrauheit vom Brechungsindex n des Materials abhängig (Peiponen und Juuti 2006). Die resultierenden Glanzeffekte steigen mit zunehmenden Brechungsindex n des Materials an. Abbildung 2.14 verdeutlicht die Eigenschaften einer Oberfläche, die den resultierenden Glanz maßgeblich beeinflussen.

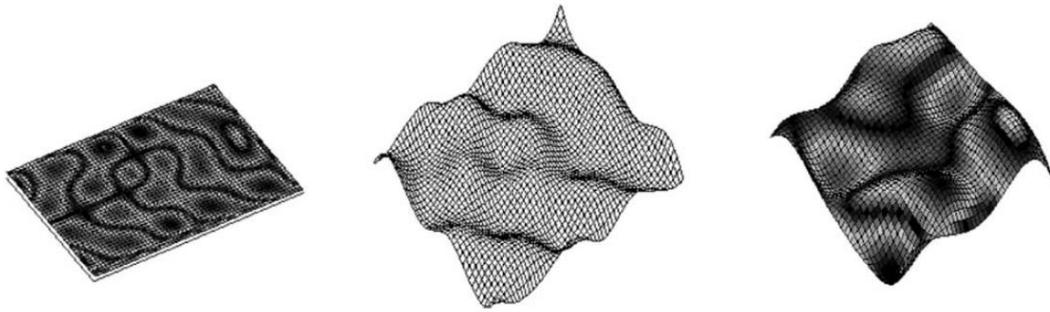


Abbildung 2.14: Eigenschaften einer Oberfläche, die den resultierenden Glanz maßgeblich beeinflussen: Glatte Oberfläche mit partiell unterschiedlichem Brechungsindex (links); Oberflächen-Rauheit (mitte); beide Eigenschaften kombiniert (rechts); (in Anlehnung an (Peiponen und Juuti 2006))

Zur Glanzmessung von technischen Oberflächen wird standardmäßig ein Reflektometer verwendet. Das Prinzip beruht auf der Erfassung der gerichteten Lichtreflexion, vgl. Abbildung 2.15. Die Intensität des reflektierten Lichts wird unter einem bestimmten Winkel mit einem Sensor erfasst. Reflektometermessungen stellen eine Relativmessung dar. Als Standard wird eine schwarze, polierte Glasfläche mit einem definierten Brechungsindex verwendet. Zur Kalibrierung wird der Messwert gleich 100 Skalenteile gesetzt.

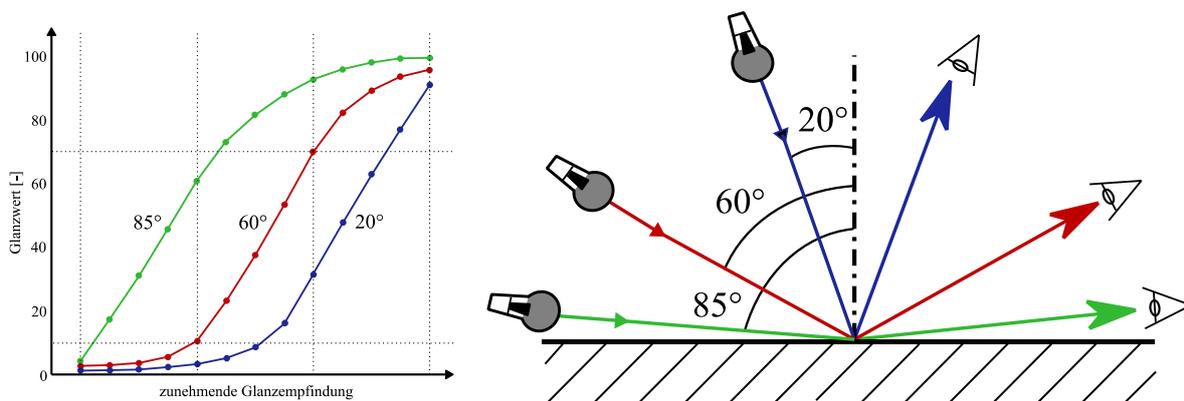


Abbildung 2.15: Zusammenhang zwischen Glanzempfindung und Glanzwert (links) und Messprinzip zur Erfassung der gerichteten Lichtreflexion (in Anlehnung an *DIN EN ISO 2813*)

Insbesondere der Einfallswinkel des Lichts beeinflusst die ermittelte Intensität des ausfallenden Lichts und dementsprechend die Glanzmessung mit einem Reflektometer. Zur entsprechenden Differenzierbarkeit von hochglänzenden bis hin zu stumpfmatten Oberflächen definiert die *DIN EN ISO 2813* drei Einfallswinkel und die dazugehörigen Messbereiche:

- 20° für hochglänzende Oberflächen
- 60° für mittelglänzende Oberflächen
- 85° für matte Oberflächen

2.5.3 Oberflächengestalt und -textur

Die eindeutige geometrische Beschreibung von Oberflächen erfordert die Definition von Parametern und Erscheinungsformen von Oberflächengestalten bzw. -strukturen. *DIN 4760* definiert als „wirkliche Oberfläche“ die Oberfläche, die einen Gegenstand von dem umgebenden Medium trennt. Als „Ist-Oberfläche“ wird das messtechnisch erfasste und angenäherte Abbild der wirklichen Oberfläche beschrieben. Die Ist-Oberfläche ist von der eingesetzten Messmethode und den Messbedingungen abhängig. Bei technischen Oberflächen sind Gestaltsabweichungen unvermeidlich. Entsprechend dem Verhältnis aus Wellenabstand und Wellentiefe werden die Anteile der Ist-Oberfläche als Form, Welligkeit und Rauheit in Gestaltsabweichungen erster bis sechster Ordnung unterschieden, vgl. Tabelle 2.5.

Tabelle 2.5: Ordnungssystem für Gestaltsabweichungen gemäß *DIN 4760*

	Gestaltsabweichung	Art der Abweichung	
	1. Ordnung	Form	
	2. Ordnung		Geradheits-, Ebenheits-, Rundheitsabweichungen
	3. Ordnung	Welligkeit	Wellen
	4. Ordnung	Rauheit	Rillen
	5. Ordnung ¹⁾		Riefen, Schuppen, Kuppen
	6. Ordnung ¹⁾		Gefügestruktur
		Gitteraufbau	

¹⁾ nicht in einfacher Weise visuell darstellbar

Die Ist-Oberfläche stellt eine Überlagerung der Gestaltsabweichung erster bis vierter Ordnung bzw. der Form, Welligkeit und Rauheit dar. Die Welligkeit weicht in Form von periodisch auftretenden Wellen (Verhältnis von Wellenabstand zur Wellentiefe von 1000:1 bis 100:1) von der Ist-Oberfläche ab. Gestaltabweichungen dritter bis fünfter Ordnung beschreiben die Rauheit mit Verhältnissen von Wellenabstand zu Wellentiefe von 100:1 bis 5:1. Darüber hinaus werden Gestaltabweichungen fünfter und sechster Ordnung vorrangig im Bereich der Materialwissenschaften näher betrachtet und sind für Anwendungen im Bauwesen nicht relevant.

Die exakte Definition der Rauheit einer Oberfläche hängt stark vom jeweiligen Anwendungsbereich ab. So spricht man beispielsweise im Maschinenbau bei Strukturen im Mikrometer-Bereich bereits von Rauheit während im Bauwesen Größenordnungen von einigen Millimetern bis Zentimetern erreicht werden können. Zur Beschreibung der Textur von Fahrbahnbelägen im Straßenbau wird das Oberflächenprofil mittels Fast-Fourier-Transformation analysiert, so dass jedem Wellenlänge eine Amplitude zugeordnet werden kann (Steinauer und Ueckermann 1999). In Abhängigkeit der Wellenlänge und der Amplitude können so einzelne Texturbereiche festgelegt werden, z. B. in Abhängigkeit der Griffigkeit- und Lärmeigenschaften (FGSV 2004).

Innerhalb der standardisierten Einteilung gemäß (FGSV 2004) wird unterschieden in Mikrotextur ($0,001\text{ mm} < \lambda_o < 0,5\text{ mm}$), Makrotextur ($0,5\text{ mm} \leq \lambda_o < 50\text{ mm}$) und Megatextur ($50\text{ mm} \leq \lambda_o < 500\text{ mm}$). Die Mikrotextur beschreibt dabei vor allem die Eigenrauheit der Gesteinskörnung und des Zementsteins. Mit dem Bereich der Makrotextur wird die in den Oberflächenmörtel der Fahrbahnoberfläche eingebrachte Texturgeometrie erfasst (Wenzl 2008). Ferner wird von REINECKE (2002) ein Ordnungssystem für Gestaltsabweichungen in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit vorgestellt. Die Gestaltabweichung wird dabei in vier Stufen - Globale Rauheit ($\lambda_o > 10\text{ cm}$ und $R_t < 3,5\text{ mm}$), Makrorauheit ($0,5\text{ mm} < R_t \leq 3,5\text{ mm}$), Mikrorauheit ($10\text{ }\mu\text{m} < R_t < 500\text{ }\mu\text{m}$) und Gefügestruktur ($R_t \leq 10\text{ }\mu\text{m}$) - differenziert.

Zur Beschreibung der Textur bzw. Beschaffenheit technischer Oberflächen definiert *DIN EN ISO 4287* entsprechende Kenngrößen in Abhängigkeit des Rauheits-, Welligkeits- und Primärprofils. Darüber hinaus legt *DIN EN ISO 25178-2* Parameter zur Ermittlung der Oberflächenbeschaffenheit mittels flächenhafter Verfahren fest.

Die Differenzierung der Ist-Oberfläche und überlagerter Gestaltsabweichungen erfolgt durch entsprechende Filteroperationen. Standardmäßig werden Datenfrequenzen bzw. Wellenlängen in zwei Gruppen unterteilt, wobei die eine Gruppe aus langen Wellenlängen oder tiefen Frequenzen (Welligkeit) und die andere Gruppe aus kurzen Wellenlängen oder hohen Frequenzen (Rauheit) besteht (Hartmann 2015). Kurzwellige Störgrößen, wie z. B. Messrauschen, werden mit einem S-Filter (S = small) beseitigt. Darüber hinaus wird die Nennform bei flächenhaft gemessenen Oberflächen zunächst durch Anwenden des F-Operators (F = form) entfernt. Resultierend daraus entsteht die sogenannte S-F-Oberfläche mit langwelligen Anteilen (Welligkeit) sowie kurzwelligen Anteilen (Rauheit). Mit dem L-Filter (L = large) kann die S-F-Oberfläche mathematisch in Welligkeit und Rauheit getrennt werden. Die einzelnen Filteranwendungen sind zusammenfassend in Abbildung 2.16 abgebildet.

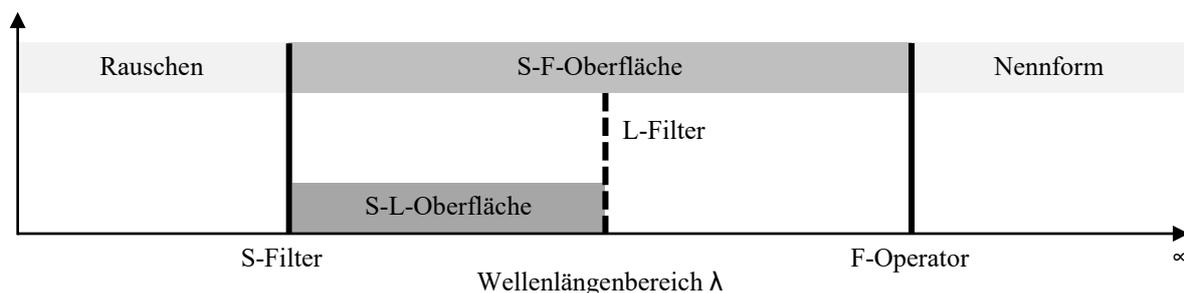


Abbildung 2.16: Filter zur Trennung von Form, Welligkeit und Rauheit (in Anlehnung an (Hartmann 2015))

Die beschriebenen Filterarten zur 3D-Filterung basieren auf der 2D-Filterung gemäß *DIN EN ISO 4287*, bei der das Grenzkriterium λ_s analog zum S-Filter und das Grenzkriterium λ_c (Cut-off Kriterium) analog zum L-Filter angewendet wird. Die Trennqualität ist sowohl vom festgelegten Cut-off Kriterium als auch vom gewählten Filtertyp (z. B. Gauß-Filter gemäß *DIN EN ISO 16610-21* oder morphologische Filter gemäß *DIN EN ISO 16610-40*) abhängig. Das

Cut-off Kriterium wird gemäß *DIN EN ISO 4288* in Abhängigkeit der topologischen Eigenschaften der zu filternden Oberfläche festgelegt. Aus dem aufgenommenen Messsignal der Ist-Oberfläche einer 2D-Schnittlinie resultiert das sogenannte Primärprofil. Durch Anwendung von Filtern mit entsprechenden Grenzwellenlängen ($\lambda_s < x < \lambda_c$ und $x > \lambda_c$) erfolgt die Ermittlung des Welligkeitsprofils und Rauheitsprofils, vgl. Abbildung 2.17.

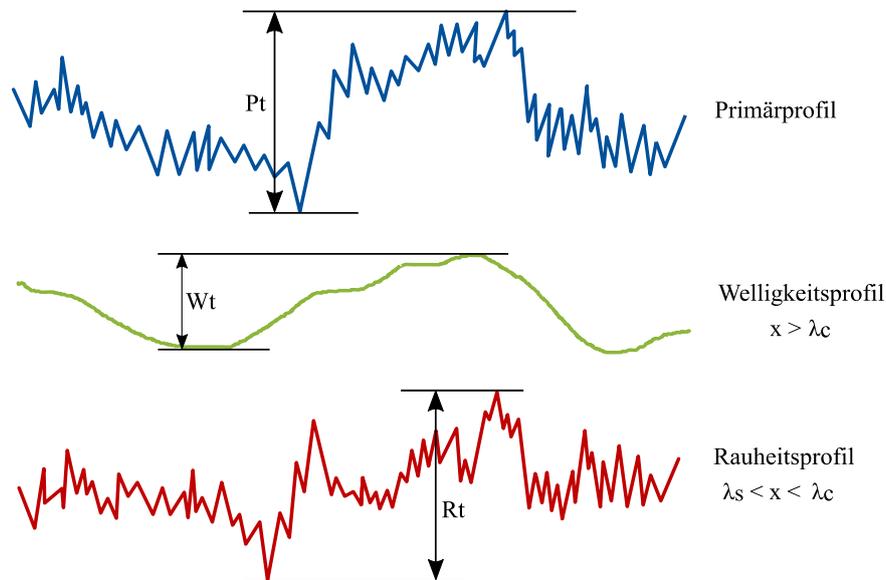


Abbildung 2.17: Primär-, Welligkeits- und Rauheitsprofil

2.5.4 Oberflächenkennwerte

Mit Hilfe statistischer Methoden können basierend auf der gefilterten Oberfläche bzw. dem gefilterten Profil verschiedene Oberflächenkennwerte berechnet werden. Gemäß *DIN EN ISO 4287* können 2D-Kennwerte von Oberflächenprofilen und gemäß *DIN EN ISO 25178* können 3D-Kennwerte von Oberflächen berechnet werden. Infolge zunehmender Anforderungen an das Funktionsverhalten hochbeanspruchter Oberflächen (z. B. tribologisch beanspruchte Oberflächen) sind 2D-Kennwerte zur Festlegung funktionsorientierter Oberflächenangaben in der Fertigung oft nicht ausreichend (Beck 2009).

Abbildung 2.18 gibt einen Überblick ausgewählter Oberflächenkennwerte eingeteilt in entsprechende Kategorien. Weitere Möglichkeiten zur Einteilung sind u. a. in (Jiang und Whitehouse 2012; Beck 2009; Peyerl 2012; Hartmann 2015) wiedergegeben. Darüber hinaus ist in (Leach 2013) ein umfassender Überblick zur Berechnung der einzelnen Oberflächenkennwerte enthalten. Die nachstehenden Ausführungen sind weitestgehend den entsprechenden Normen und Richtlinien sowie den vorgenannten Literaturquellen entnommen.

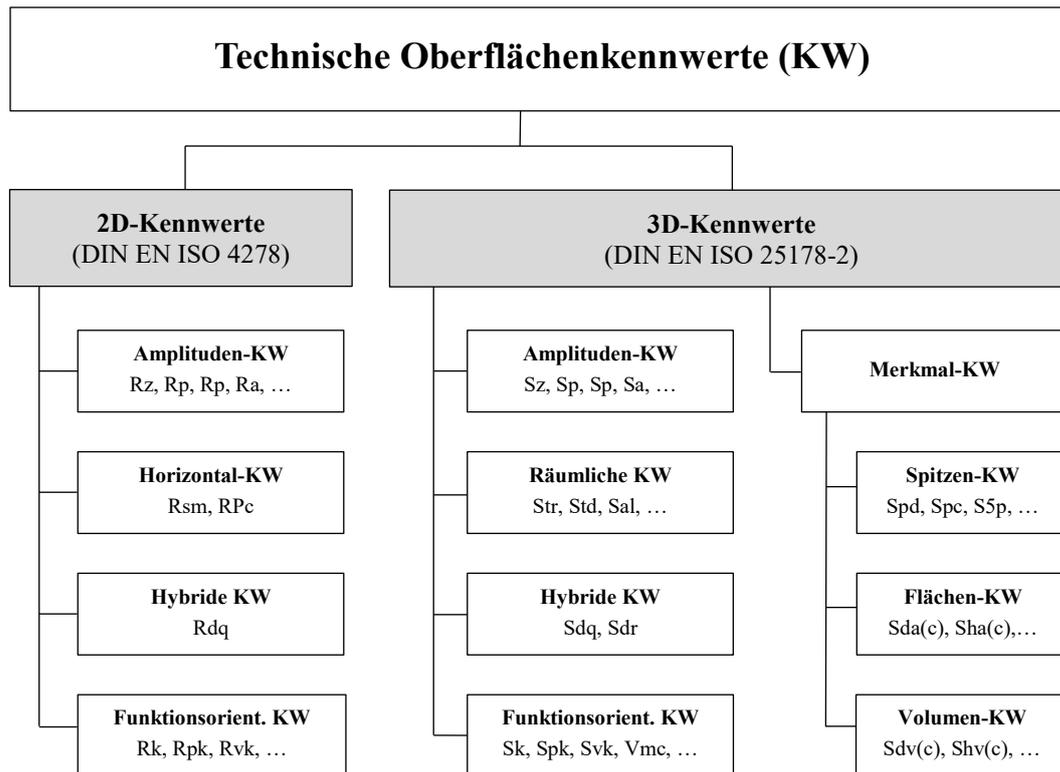
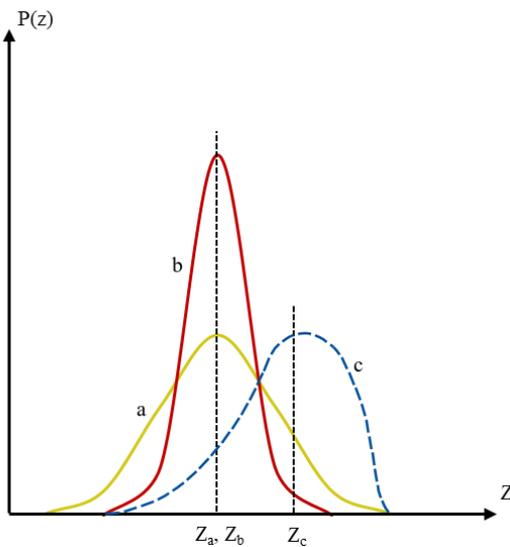


Abbildung 2.18: Überblick ausgewählter Oberflächenkennwerte gemäß *DIN EN ISO 4287* und *DIN EN ISO 25178-2*

Bei Amplitudenkennwerten beschränkt sich die Auswertung sowohl für 2D-Kennwerte als auch 3D-Kennwerte auf Höhenabweichungen. Standardmäßig werden dafür statistische Kennwerte verwendet, wie z. B. der arithmetische Mittelwert der Profilordinatenabschnitte (Ra bzw. Sa), die Standardabweichung (Rq bzw. Sq) oder die gemittelte Höhe der Profilabschnitte (Rz bzw. Sz). Rz ist nicht direkt in die dritte Dimension übertragbar, da der Profilabschnitt in mehrere Einzelmessstrecken aufgeteilt wird, um durch die Mittelung der Kennwerte der Einzelstrecken die statistische Sicherheit für den Kennwert des gesamten Profilabschnitts zu vergrößern. Bei einer dreidimensionalen Bestimmung von Sz besteht das Problem einer sinnvollen Auswahl von Einzelmessflächen. Daher ist in *DIN EN ISO 25178* festgelegt, Sz zunächst als Spitzenwert des gesamten Definitionsbereichs zu betrachten, d. h. es wird die Summe der höchsten Spitze und des tiefsten Tals gebildet.

Als weitere Formparameter bzw. statistische Kennwerte können die Schiefe (Rsk (vgl. Gl. 7)) und die Kurtosis (Rku (vgl. Gl. 8)) ermittelt werden. Die Schiefe stellt ein Maß der Asymmetrie der Amplituden-Verteilungsfunktion dar und beschreibt die Schwankung der Oberfläche bzw. des Profils über der Mittellinie. Oberflächen mit einer geringen Anzahl hoher Spitzen besitzen eine positive Schiefe. Demgegenüber weisen Oberflächen mit wenigen tiefen Tälern und glatten Plateaus eine negative Schiefe auf.

Die Kurtosis beschreibt die Steilheit bzw. Schärfe einer Oberfläche. Normalverteilte Amplituden-Verteilungsfunktionen (herausragende und eingedellte Teile existieren nebeneinander) weisen einen Wert von $Rku = 3$ auf. Amplitudenverteilungen mit $Rku < 3$ sind oberhalb der mittleren Ebene geneigt und Amplitudenverteilungen mit $Rku > 3$ sind spitzig, vgl. Abbildung 2.19. Bezogen auf die skalenbegrenzte Oberfläche können die Schiefe Rsk bzw. die Kurtosis Sk_u gemäß Gl. 9 bzw. Gl. 10 berechnet werden. Gegenüber den 2D-Kennwerten Rsk (Gl. 7) bzw. Rku (Gl. 8) wird dabei u. a. die längenbezogene Dimension l in die flächenbezogene Dimension A ausgetauscht.



$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left(\frac{1}{l} \int_{x=0}^l |Z^3 x| dx \right) \quad \text{Gl. 7}$$

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left(\frac{1}{l} \int_{x=0}^l |Z^4 x| dx \right) \quad \text{Gl. 8}$$

Abbildung 2.19: Formen der Amplituden-Verteilungsfunktionen – a) Normalverteilung mit $Rku = 3$; b) symmetrische Verteilung mit ausgeprägter Steilheit mit $Rku > 3$; c) Verteilung mit negativer Schiefe Rsk (in Anlehnung an (Weingraber und Abou-Aly 1989))

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left(\frac{1}{A} \iint_A |Z^3(x, y)| dx dy \right) \quad \text{Gl. 9}$$

$$Sk_u = \frac{1}{Sq^4} \left(\frac{1}{A} \iint_A |Z^4(x, y)| dx dy \right) \quad \text{Gl. 10}$$

Hybride Kennwerte berücksichtigen sowohl die Höheninformationen als auch die Richtung in der Ebene. Der Kennwert Sdq stellt die durchschnittliche quadratische Neigung der Messpunkte dar und wird z. B. im Maschinenbau für die Bewertung von Lichtreflexionseigenschaften von Oberflächen verwendet (Hartmann 2015). Das Verhältnis der wahren Oberfläche zur Messfläche wird mit dem Kennwert Sdr ausgedrückt und ist ein Maß für die Rauheit der Ober-

fläche. Dabei handelt es sich um den Prozentsatz der zusätzlichen Fläche des Definitionsbereichs, der auf die Textur zurückzuführen ist, im Vergleich zum absolut ebenen Definitionsbereich.

Der Materialanteil einer Oberfläche oder eines Profils kann als Summenhäufigkeit der Ordinatenwerte $z(x)$, der sogenannten Abbott-Firestone-Kurve oder auch Materialanteilkurve, dargestellt werden, vgl. z. B. *DIN EN ISO 25178-2*. Mathematisch gesehen stellt die Materialanteilkurve das Integral der Amplituden-Verteilungsfunktion dar. Der flache zentrale Teilabschnitt der Kurve zeigt den Kernbereich, umgeben von steilen Anteilen, die den Kuppen- und Riefenanteil der Kurve beschreiben. Als weitere Kennwerte lassen sich basierend auf der Materialanteilkurve die Kernrauheit Rk , die reduzierte Spitzenhöhe Rpk sowie die reduzierte Riefentiefe Rvk ableiten. Im dreidimensionalen Raum wird zusätzlich zwischen flächenhaften Kennwerten (S-Kennwerte) und volumenbasierten Kennwerten (V-Kennwerte) unterschieden. Abbildung 2.20 verdeutlicht die Bildung des S-Kennwertes Sk (Kernhöhe) basierend auf der Materialanteilkurve.

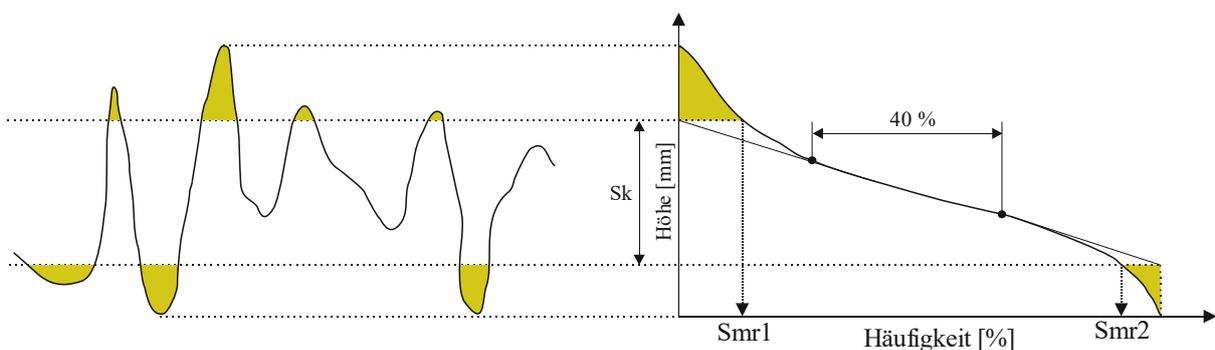


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung eines fiktiven Oberflächenprofils mit dazugehöriger Materialanteilkurve und daraus ableitbarer Kennwerte (in Anlehnung an *DIN EN ISO 25178-2*)

Die volumenbasierten Kennwerte können ebenfalls aus dem flächenhaften Materialanteil, aufgetragen als Materialkurve, berechnet werden, vgl. Abbildung 2.21. So stellt z. B. Vmc das Kernmaterialvolumen einer skalenbegrenzten Oberfläche dar. Als Grenzwerte werden gemäß *DIN EN ISO 25178-3* für Vmc die Werte $p = 10\%$ und $q = 80\%$ festgelegt. Die Kennwerte Vmp bzw. Vvv charakterisieren das Spitzenmaterialvolumen bzw. das leere Volumen der Täler der Oberfläche (vgl. Abbildung 2.21). Volumenbasierte Kennwerte eignen sich zur Charakterisierung von Oberflächenstrukturen mit wenigen steilen Spitzen oder mit flachen Spitzen und wenigen Tälern recht gut (Peyerl 2012).

Eine weitere Kategorie stellen merkmalsbasierte Kennwerte dar. Diese werden durch die Segmentierung der Oberfläche in Abhängigkeit von Hügel- und Talregionen bestimmt. Die Segmentierung erfolgt dabei u. a. mit dem Wasserscheiden-Algorithmus, verknüpft mit der sogenannten Wolf-Beschneidung (Wolf 1991). Die Vorgehensweise beim Wasserscheiden-Algorithmus ist zusammenfassend in Anhang A.1 beschrieben.

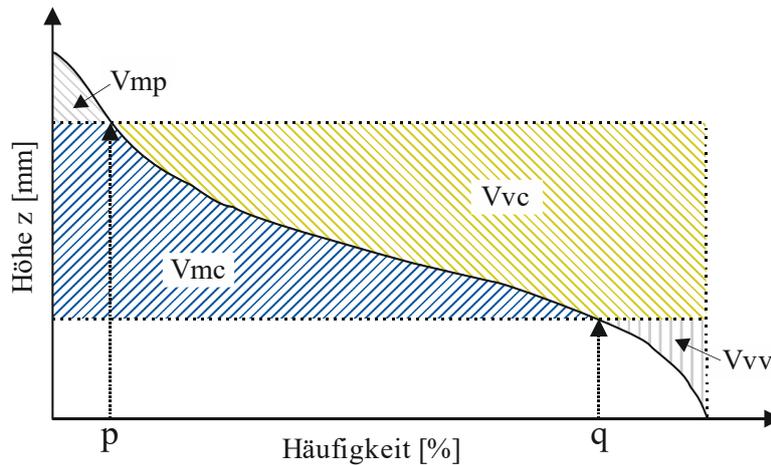


Abbildung 2.21: Volumenbasierte Kennwerte - Parameter für das leere Volumen und das mit Material gefüllte Volumen (in Anlehnung an *DIN EN ISO 25178-2*)

2.6 Methoden und Verfahren zur 3D-Rekonstruktion von Oberflächen

Zur 3D-Rekonstruktion von Oberflächen stehen vielfältige Messmethoden zur Verfügung, die sich sowohl in der Genauigkeit als auch im Messaufwand stark unterscheiden. Demzufolge ist es wichtig, bei der Wahl der Messmethode die zu messende Information bzw. Eigenschaft zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Messmethoden bzw. -verfahren zur Ermittlung der Oberflächengestalt (Rauheit) und der Reflexion (Glanz) technischer Oberflächen betrachtet.

Grundsätzlich lassen sich Messmethoden bzw. -verfahren zur Ermittlung der Oberflächengestalt bzw. Rauheit von Oberflächen in „vergleichende“, „berührende“ und „berührungsfreie“ Verfahren gliedern (Reinecke 2002). Eine umfassende Beschreibung vielfältiger Verfahren zur Ermittlung der Rauheit ist u. a. in (Santos und Júlio 2013) enthalten. Im Bereich des Bauwesens werden bisher vielfach berührende Messverfahren eingesetzt, z. B. zur Bewertung der Rauheit bei der Instandsetzungsplanung (Reinecke 2002; Schulz 2016; Zilch und Lenz 2016; Kühne et al. 2017; Schulz 2017). Eine Rekonstruktion der Oberfläche als 3D-Modell ist mit diesen Verfahren jedoch nicht möglich. Als Vergleichsgröße zur Bewertung der dreidimensionalen Oberflächeneigenschaften können ausschließlich abgeleitete Oberflächenkennwerte herangezogen werden.

Als berührungsfreie Methoden haben sich in den letzten Jahrzehnten verstärkt photogrammetrische Messprinzipien sowohl zur geotopographischen Landaufnahme (Jäger et al. 2020) als auch in verschiedensten Industriebereichen, wie z. B. der Automobilindustrie (Wiggenhagen 2008), etabliert. Im Bauwesen werden photogrammetrische Anwendungen bisher primär zur Dokumentation der zeitabhängigen Verformungs- und Schadensentwicklung, sowohl zur kurz-

bzw. langzeitigen Bauwerksüberwachung als auch im bautechnischen Versuchswesen, eingesetzt (Seyler und Schwarz 2006; Hampel 2008; Maas 2012; Jesse und Kutzner 2013). Zudem finden photogrammetrische Messverfahren vereinzelt Anwendung im konventionellen Tunnelbau u. a. zur digitalen Ortsdokumentation und -kartierung (Gaich und Pötsch 2015, Gaich und Pötsch 2016). Von TUTTAS (2017) wird darüber hinaus ein Verfahren zur photogrammetrischen Baufortschrittskontrolle in Verbindung mit dem Building Information Modeling (BIM) vorgestellt. Im Rahmen der Untersuchungen von PEYERL (2012) zum Einfluss der Oberflächengestalt auf die Verbundeigenschaften von Betonbauteilen wurde zur Ermittlung der Rauheit ein optisches Messverfahren basierend auf Stereoskopie eingesetzt. Grundlage der Methode zur 3D-Rekonstruktion der Objektoberflächen sind zwei um ca. 5° bis 15° gekippte Bildaufnahmen. Im Bereich der Qualitätsprüfung von Frischbeton verwenden NGUYEN et al. (2021) ein auf Stereoskopie basierendes Verfahren zur Ermittlung des Setzmaßes unter praktischen Randbedingungen. In Kombination mit Deep-Learning-Algorithmen wird automatisiert sowohl das Setzmaß als auch die Korrektheit (wahres oder abgesichertes Setzmaß, vgl. Kapitel 2.4.1.2) bestimmt. KIM und PARK (2018) verwenden darüber hinaus einen Kinect Sensor (Sensor zur Aufzeichnung von Bewegungen entwickelt von *Microsoft* und der Fa. *PrimeSense*) zur Visualisierung als auch zeitabhängigen Bestimmung des Setzfließmaßes.

Darüber hinaus existieren Ansätze (z. B. unter Verwendung von Laserscannern) basierend auf dem Prinzip der Lasertriangulation zur Ermittlung der Rauheit von Festbetonoberflächen (Wenzl 2008; Grzelka et al. 2011; Peyeryl 2012; Kühne et al. 2017; Zilch und Lenz 2016; Vogler et al. 2015).

Nachfolgend werden einzelne berührungsfreie Messmethoden näher beschrieben. Der Fokus liegt dabei primär auf photogrammetrischen Verfahren, die potenziell zur Bewertung von Oberflächeneigenschaften am Frischbeton unter baupraktischen Bedingungen eingesetzt werden können. Neben photogrammetrischen Grundlagen wird auch auf die Zusammenhänge mit Computer Vision eingegangen.

2.6.1 Streifenlichtprojektion

Die Streifenlichtprojektion stellt eine berührungsfreie Messmethode zur Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit in sehr hoher Genauigkeit dar. Ein Projektor projiziert ein Streifenmuster auf ein Objekt, welches in Abhängigkeit der Oberflächengestalt deformiert wird. Das deformierte Streifenmuster wird als Grundlage zur Bestimmung der Oberflächengestalt von einer oder mehreren Kameras erfasst. Bei bekannter Basislänge (Abstand) zwischen Projektor und Kamera kann so unter Kenntnis der inneren und äußeren Orientierung die Oberflächen-gestalt rekonstruiert werden. Die Anordnung der Systemkomponenten (Triangulationswinkel, Basislänge, Kameraanzahl etc.) bestimmt die Messfeldgröße und die Genauigkeit des Systems (Luhmann 2018).

2.6.2 Photogrammetrie

Der Begriff Photogrammetrie bezeichnet allgemein Methoden, mit denen aus einer oder mehreren Bildaufnahmen eines beliebigen Objektes indirekt Eigenschaften sowie deren inhaltliche Beschreibung durch Interpretation des Bildes gewonnen werden können (Luhmann 2018). Zu möglichen aus den Bilddaten abzuleitenden Eigenschaften gehören u. a. die Geometrie (Größe und Form, 3D-Koordinaten und bei bewegten Objekten die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit), die Helligkeitsverteilung sowie semantische Informationen (Klasse oder Attribute) der einzelnen Objekte (Heipke 2017). Zentrale Charakteristika der Photogrammetrie sowie Fernerkundung sind gemäß (Heipke 2017):

- die berührungslose Aufnahme,
- die kurze Aufnahmedauer, verbunden mit einer hohen Aufnahmefrequenz (soweit erforderlich), und
- damit die Möglichkeit zur Erfassung dynamischer Prozesse,
- die umfassende flächenhafte und bildliche Dokumentation der aufgenommenen Szene,
- die Auswertung in zwei, drei oder vier Dimensionen, und
- die Möglichkeit, beliebig große Objekte zu erfassen.

Die exakte Rekonstruktion eines Objekts aus Bilddaten erfordert Kenntnisse des gesamten physikalischen bzw. optischen Entstehungsprozesses einer Bildaufnahme. Dazu gehören z. B. Lichtquellen, Eigenschaften der Objektoberfläche, Kamera- und Sensortechnik sowie Bildsignal- und Weiterverarbeitung. Zur exakten Identifizierung abgebildeter Objektpunkte sind entsprechende Methoden notwendig, die es gestatten, Messwerte in Form radiometrischer Informationen (Farb- und Grauwert, Intensität) sowie geometrischer Informationen (Koordinaten) mit geeigneter geometrischer und optischer Qualität zu ermitteln. Anschließend lässt sich das Objekt rekonstruieren und modellieren, indem mit Hilfe mathematischer Modelle eine Transformation zwischen Bild- und Objektraum vorgenommen wird. Die Prozessschritte sind schematisch in Abbildung 2.22 zusammenfassend dargestellt (Luhmann 2018).

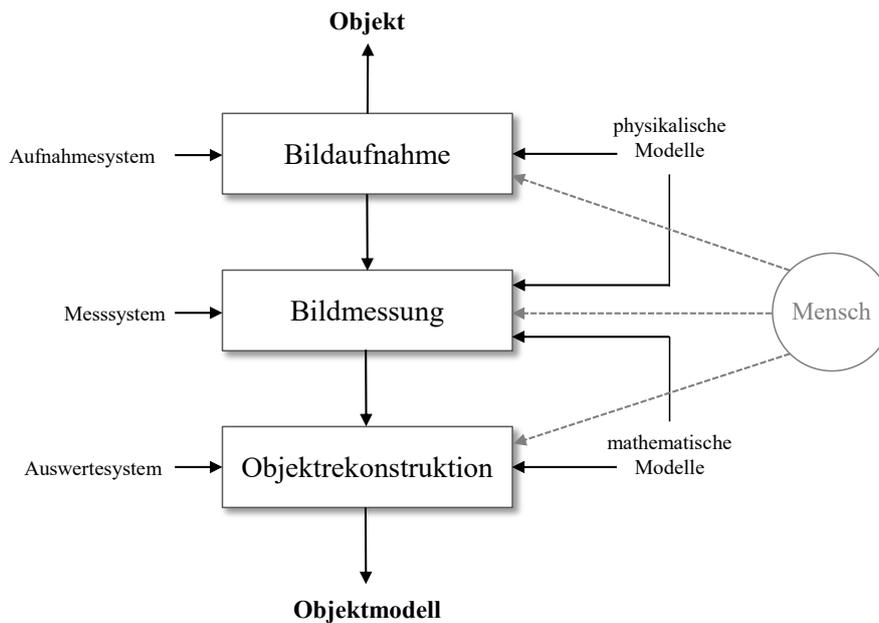


Abbildung 2.22: Photogrammetrische Prozessschritte – vom Objekt zum Modell (Luhmann 2018)

2.6.2.1 Geometrische Kameramodellierung

In der Photogrammetrie werden Form und Lage des Objekts über die Rekonstruktion von Strahlenbündeln ermittelt. Jeder Bildpunkt P' bildet mit dem Projektionszentrum O' einen geradlinigen Strahl zum Objektpunkt P . Der Abstand zwischen Bildebene und Projektionszentrum wird dabei als Kamerakonstante c definiert. Eine Beschreibung einzelner Bildpunkte mit dem dazugehörigen Bildstrahl im Objektraum ist erst mit Kenntnis der realen Abbildungsgeometrie in der Kamera (innere Orientierung) und der Lage des Aufnahmesystems im Raum (äußere Orientierung) möglich. Die innere Orientierung beschreibt die geometrischen Eigenschaften des Bildsensors. Die äußere Orientierung definiert dagegen die Lage des Bildsensors im Objektraum zum Zeitpunkt der Bildaufnahme (Albertz und Wiggenhagen 2009). Die zuvor beschriebenen Zusammenhänge lassen sich, als Teil der geometrischen Optik, vereinfacht mit dem Modell der Lochkamera darstellen, vgl. Abbildung 2.23.

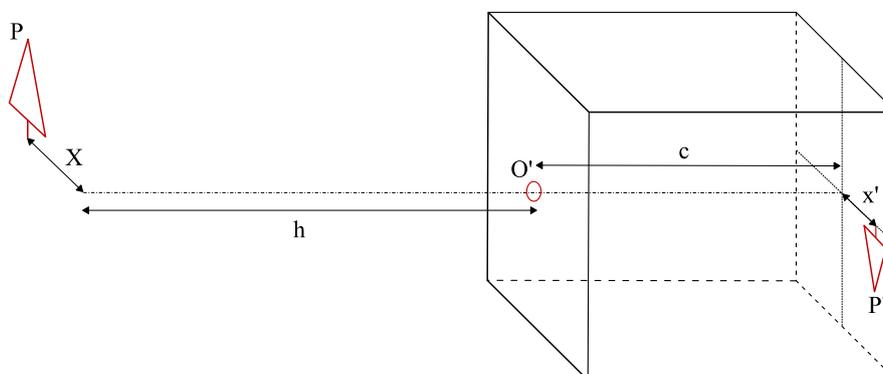


Abbildung 2.23: Modell der Lochbildkamera (Luhmann 2018)

Das Modell der Lochbildkamera stellt ein stark vereinfachtes System dar. In einem real-optischen System wird eine scharfe Bildaufnahme durch einen Aufnahmebereich, den sogenannten Schärfbereich, beschränkt. Mit dem vereinfachten Modell der Lochbildkamera lassen sich jedoch wesentliche Kennwerte definieren. Das Verhältnis der Aufnahmeentfernung h zur Kamerakonstanten c wird als Bildmaßstabszahl m_b (Abbildungsmaßstab) definiert und beschreibt die Detailerkennbarkeit sowie die erreichbare Genauigkeit (vgl. Gl. 11).

$$m_b = \frac{h}{c} = \frac{X}{x'} \quad \text{Gl. 11}$$

Mittels Modifikation der Fokalebene durch zwei Hauptebenen H_1 und H_2 lassen sich komplexe optische Systeme über zentral-perspektivische Projektionen modellieren. Deren Schnittpunkte mit der optischen Achse bilden die beiden Hauptpunkte O und O' , vgl. Abbildung 2.24.

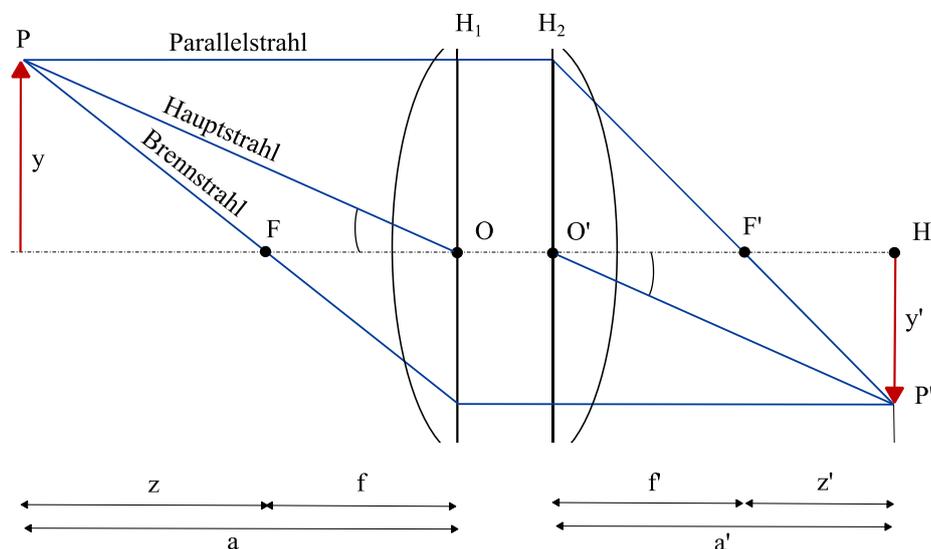


Abbildung 2.24: Konstruktion der optischen Abbildung (Luhmann 2018)

Durch Anwendung des Strahlensatzes lässt sich aus Abbildung 2.24 die Linsengleichung ableiten (Lüders und Pohl 2018):

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad \text{Gl. 12}$$

Hierin beschreibt a die Gegenstandsweite (Aufnahmeabstand) und a' die Bildweite (Kamerakonstante) sowie f' die bildseitige Brennweite. Auf weitere detaillierte Ausführungen sowie geometrische Zusammenhänge zur Konstruktion der optischen Abbildung, wie in Abbildung 2.24 dargestellt, wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und auf die Grundlagenliteratur verwiesen, z. B. (Heipke 2017; Luhmann 2018).

Eine Abschätzung, ob ein Objektbereich als scharf betrachtet werden kann, liefert Gl. 13 zur überschlägigen Berechnung des Unschärfekreises:

$$u' = f' + \Delta a \approx \frac{1}{2000} d' \quad \text{Gl. 13}$$

Dabei werden die Annahmen einer visuellen Auflösungsgrenze des menschlichen Auges von $\Delta a = 0,03^\circ$ und das die Brennweite f' der Bilddiagonalen d' entspricht getroffen. Resultierend daraus ergibt sich für den in Abbildung 2.24 dargestellten Punkt P' der Schärfentiefebereich t wie folgt:

$$t = a_h - a_v \quad \text{Gl. 14}$$

$$\text{mit } a_v = \frac{a}{1+K} \quad ; \quad a_h = \frac{a}{1-K} \quad ; \quad K = \frac{k(a-f)u'}{f^2} \quad \text{Gl. 15}$$

Hierin beschreibt a_v den Abstand zum Schärfepunkt der dem Objektiv am Nächsten liegt. Den Abstand des am weitesten entfernten Schärfepunktes beschreibt a_h . Der Parameter k definiert die Blendenzahl und a die Gegenstandsweite. Alle Punkte, die in ihrer Entfernung innerhalb von t liegen, können als scharf angesehen werden.

2.6.2.2 Koordinatensysteme

Eine konsistente Darstellung unter Berücksichtigung der inneren und äußeren Orientierung sowie die Formulierung mathematischer Zusammenhänge zwischen Objekt- und Bildraum erfordert unterschiedliche Koordinatensysteme. Dazu sind die nachfolgenden gebräuchlichen Koordinatensysteme wie folgt definiert, vgl. Abbildung 2.25:

- **Bildkoordinatensystem $(x', y', (z'))$**
Ebenes kartesisches Koordinatensystem (x', y') unter Voraussetzung eines eindeutigen Bezugs zwischen Bildsensor und digitalem Bild (Ursprung = Projektionszentrum O'). Die z' -Achse steht normal auf der Bild- bzw. Sensorebene und entspricht näherungsweise der Aufnahme- richtung.
- **Objektkoordinatensystem (X, Y, Z)**
Übergeordnetes, räumliches kartesisches Koordinatensystem infolge festgelegter Bezugspunkte des Objekts.
- **Modellkoordinatensystem (x, y, z)**
Räumliches kartesisches Koordinatensystem zur Festlegung der relativen Lage zweier oder mehrerer Bilder (Ursprung = Projektionszentrum eines Bildes). In der Nahbereichsphotogrammetrie werden zumeist lokale auf das Objekt bezogene Koordinatensysteme eingeführt.

Im Bildkoordinatensystem definieren die Elemente der inneren Orientierung (Bildhauptpunkt $H'(x', y')$, Kamerakonstante c , Verzeichnungsparameter $\Delta x'$) die Lage des Projektionszentrums. Darüber hinaus wird die Lage und Ausrichtung des Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem durch das Projektionszentrum $\tilde{C} = [X_0, Y_0, Z_0]^T$ sowie die Rotationsparameter $R = (R_\rho, R_\omega, R_\kappa)$ beschrieben. Zusammenfassend wird die Lage und Ausrichtung als äußere Orientierung ausgedrückt.

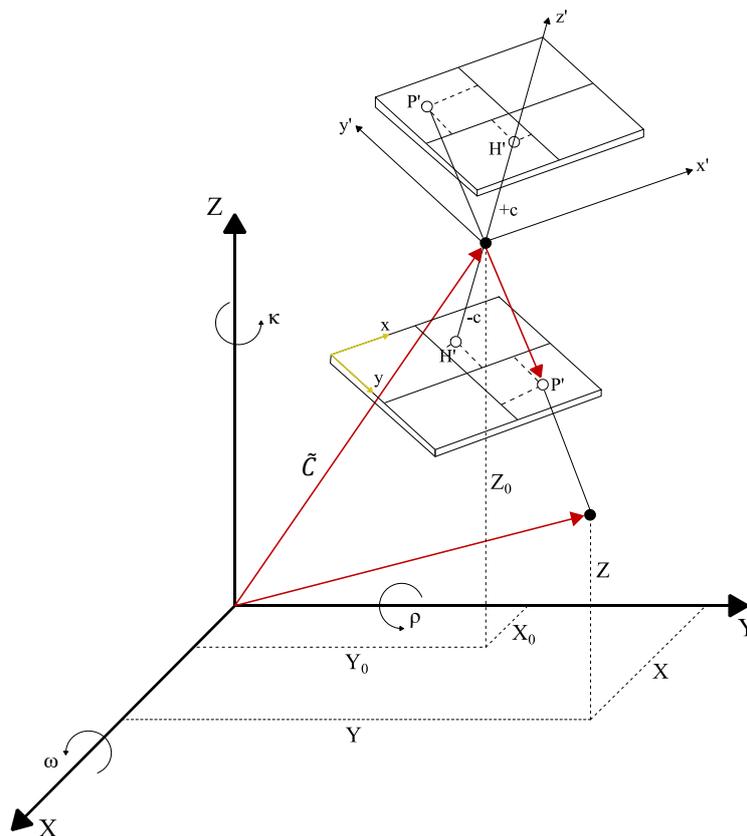


Abbildung 2.25: Koordinatensysteme im Objektraum (in Anlehnung an (Luhmann 2018))

2.6.2.3 Aufnahmekonzepte und -anordnungen

Photogrammetrische Aufnahmekonzepte können in Offline- und Online-Systeme unterschieden werden. Bei Offline-Systemen wird das Messergebnis erst im Nachgang zur Aufnahme bereitgestellt. Dagegen erfolgt bei Online-Systemen eine unmittelbare Auswertung der Bilder bis hin zur 3D-Information. In der Nahbereichsphotogrammetrie lässt sich darüber hinaus in Offline- und Online-Systeme mit vorkalibrierter oder unkalibrierter Kamera unterscheiden (Luhmann 2018).

Offline-Systeme mit vorkalibrierter Kamera lassen aufgrund der Aufnahmesituation oder der Auswertesoftware eine simultane Kalibrierung bei der 3D-Rekonstruktion einer oder mehrerer Kameras nicht zu. In der Praxis ist das z. B. bei der Aufnahme von Verkehrsunfällen oder in der Architekturphotogrammetrie vielfach der Fall (Henze 2015).

Für industrielle Anwendungen werden zumeist Offline-Systeme mit unkalibrierter Kamera eingesetzt, so dass aus den geforderten Anforderungen an die Genauigkeit eine simultane (Nach-)Kalibrierung resultiert. Der photogrammetrische Prozess gliedert sich demzufolge bei dieser Aufnahmesituation in die folgenden Schritte:

- Objektaufnahme mit unkalibrierter Kamera
- Bildmessung
- Kalibrierung, Orientierung und 3D-Rekonstruktion

Die Prozesse des letzten Schrittes (Kalibrierung, Orientierung, 3D-Rekonstruktion) können infolge Bündelblockausgleichung simultan mit einer Selbstkalibrierung erfolgen. Da die Kamerakalibrierung und 3D-Rekonstruktion simultan erfolgen, führt die Berechnung mit gemessenen Bildkoordinaten von Objektkoordinaten zu einem optimalen geometrischen Modell der Aufnahmesituation.

Zur Objektaufnahme bzw. -erfassung unterscheidet *DIN 18716-1* die Anordnung von Kamerastandpunkten sowie Aufnahmerichtungen in Einzelaufnahme, Stereoaufnahme und Mehrbildaufnahme, vgl. Abbildung 2.26.

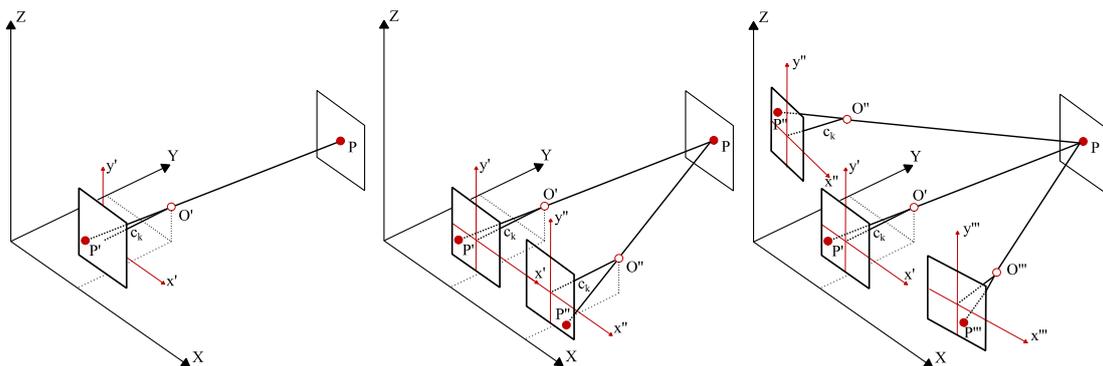


Abbildung 2.26: Aufnahmeanordnung bei der Einzelaufnahme (links), bei der Stereoaufnahme (mitte) und der Mehrbildaufnahme (rechts) – P = Objektpunkt; P', P'', P''' = Bildpunkte, O', O'', O''' = Projektionszentren; c = Kamerakonstante (in Anlehnung an (Wiedemann 2004))

Die Mehrbildaufnahme stellt den Standardfall in der Nahbereichsphotogrammetrie dar und ist überall dort erforderlich, wo die Oberflächengestalt (z. B. bei starken Verdeckungen) oder die zu erreichende Genauigkeit eine erhöhte Anzahl von Bildaufnahmen erfordert. Die Bildaufnahmen können streifen-, blockweise, als Rundum-Verband aber auch völlig beliebig angeordnet sein. In der Regel bestimmt die zu erreichende Genauigkeit und der auszuwertende Objektbereich die Aufnahmeanordnung bei der Mehrbildaufnahme. Ein voller Rundum-Verband (vgl. Abbildung 2.27) stellt eine nahezu ideale Konfiguration dar, da hier in jedem Punkt günstige Strahlenschnittbedingungen, homogene Genauigkeitsverhältnisse in allen Koordinatenrichtungen und in Abhängigkeit der Anzahl der Bilder eine hohe Redundanz vorliegen (Rautenberg

und Wiggenhagen 2002). Die Auswertung erfolgt durch interaktive oder automatisierte Bestimmung homologer Punkte in mehreren Bildaufnahmen durch Verfahren der Bündelblockausgleichung unter der Voraussetzung, dass die Punkte in allen Bildaufnahmen eindeutig identifiziert werden können.

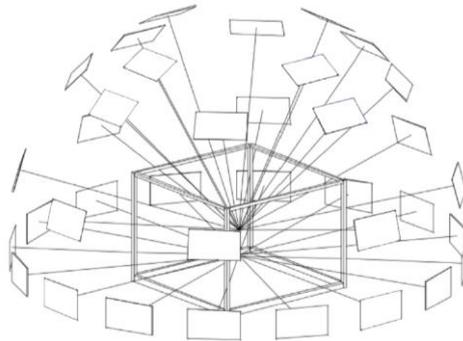


Abbildung 2.27: Rundum-Verband (Rautenberg und Wiggenhagen 2002)

Eine dreidimensionale Rekonstruktion eines Objektes durch eine Einzelaufnahme ist nur mit zusätzlichen geometrischen Informationen möglich. Aus einer Bildaufnahme können jedoch z. B. Informationen über die gegenseitige Lage und Orientierung zwischen Objekten im Raum bestimmt werden (Abstand von Kamera zu Objekt). Ferner eignet sich die Einzelaufnahme zur Beschreibung der Gestaltung in der Bezugsfläche, z. B. für Mosaik in der Architekturphotogrammetrie (Wiedemann 2004).

2.6.2.4 Mehrbildauswertung mittels Bündelblockausgleichung

Die Bündelblockausgleichung (auch Bündeltriangulation oder Mehrfeldtriangulation genannt) stellt die allgemeinste Form zur simultanen rechnerischen Ausgleichung photogrammetrisch gemessener Bildpunkte dar. Mit dem mathematischen Modell der Bündelblockausgleichung sind beliebig viele im Raum angeordnete Bildaufnahmen (Strahlenbündel) zueinander verknüpfbar. Die Verknüpfung zum Gesamtmodell erfolgt durch Zuordnung identischer Bildpunkte verschiedener Bildaufnahmen unter Berücksichtigung der Forderung, dass sich die korrespondierenden Bildstrahlen in ihrem Objektpunkt optimal schneiden, vgl. Abbildung 2.28. Werden bei der Bündelblockausgleichung weitere Parameter (innere Orientierung) mitbestimmt, spricht man von Simultankalibrierung. Mathematisch basiert die Bündelblockausgleichung auf den funktionalen Zusammenhängen der Kolinearitätsgleichungen, vgl. Gl. 16 (Luhmann 2018).

$$x' = x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x'$$

$$y' = y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y'$$

Gl. 16

Hierin beschreiben X, Y, Z und x', y', z' mit den entsprechenden Indizes die Zusammenhänge der unterschiedlichen Koordinatensysteme (vgl. Abbildung 2.25) und r_{xx} bis r_{zz} den Wertebereich der Drehmatrix R . So lassen sich neben den Koordinaten von Messpunkten im Objekt-raum (X_i, Y_i, Z_i) als weitere Parameter sowohl die der inneren Orientierung der beteiligten Kamerastandorte ($X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \rho_j, \omega_j, \kappa_j$) auch die Parameter der äußeren Orientierung aller beteiligten Aufnahmen ($x_{Hk}, y_{Hk}, c_k, \Delta x_k, \Delta y_k$) ermitteln (Henze 2015).

Ausführliche Herleitungen sowie Beschreibungen der Bündelausgleichung sind u. a. in (Maas 1997; Förstner und Wrobel 2016; Luhmann 2018) wiedergegeben.

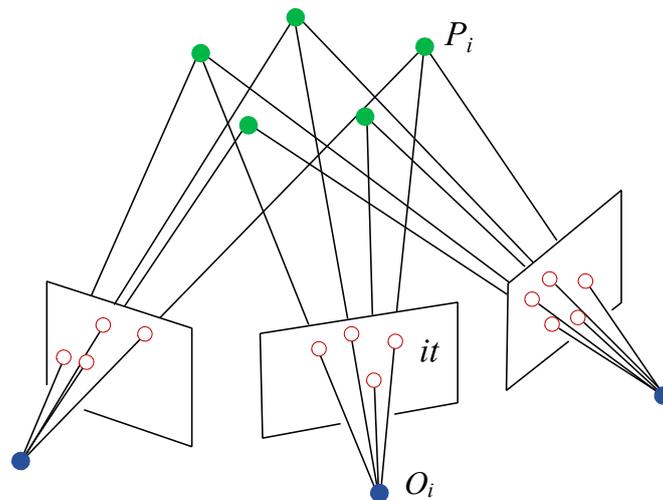


Abbildung 2.28: Strahlenbündel mehrerer Kameras (blau) mit korrespondierenden Verknüpfungspunkten (grün) (in Anlehnung an (Förstner und Wrobel 2016))

2.7 Computer Vision

Computer Vision (CV) wird im deutschen Sprachgebrauch als Teilgebiet der Informatik in der Regel mit ‘Maschinellen Sehen’ übersetzt (Gutzeit 2015). In der vorliegenden Arbeit wird jedoch der englische Begriff verwendet, da er auch in der deutschen Fachwelt etabliert ist. Als Nachbardisziplin der Photogrammetrie spielt Computer Vision eine entscheidende Rolle bei der automatischen Bildauswertung. SZELISKI (2011) beschreibt Computer Vision mit:

„In computer vision, we are trying to do the inverse, i.e., to describe the world that we see in one or more images and to reconstruct its properties, such as shape, illumination, and color distributions [...].“

HEIPKE (2017) übersetzt die Definition zu Computer Vision von *Azriel Rosenfeld* mit einer *„automatischen Ableitung einer expliziten und semantischen Beschreibung von Objekten der realen Welt aus Bildern“*. Demzufolge wird mit Computer Vision ein Modell der Umwelt zur Interpretation von Eigenschaften aus Bilddaten erzeugt. Anwendung findet Computer Vision

gegenwärtig vor allem z. B. in der Robotik und autonomen Navigation, der Archäologie und Medizin aber auch in der Architektur (Heipke 2017).

Computer Vision schließt die Bildverarbeitung als Teilgebiet ein und erweitert diese um die Interpretation und die Nutzung von Vorwissen durch Methoden des Maschinellen Lernens (ML), vgl. Abbildung 2.29. Die Interpretation der Daten ermöglicht Aussagen über den Bildinhalt und demzufolge über die aufgenommenen Objekte bzw. Umwelt.

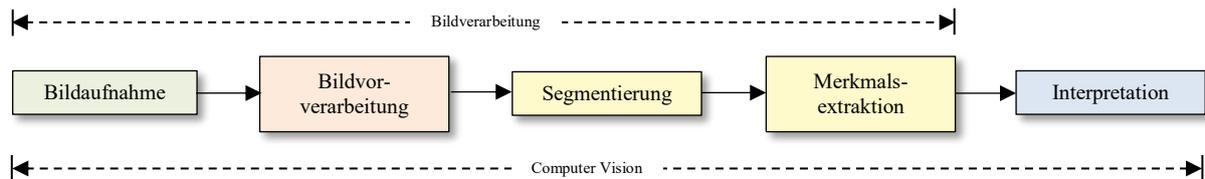


Abbildung 2.29: Schematischer Ablauf zur Analyse von Merkmalen in Bildaufnahmen bzw. -daten (in Anlehnung an (Gutzeit 2015))

Methoden des Maschinellen Lernens basieren auf dem Training eines künstlichen Systems, welches im Nachgang entsprechende Merkmale erkennt, auswertet und somit neue unbekannte Daten beurteilen kann (Alpaydin 2014; LeCun et al. 2015; Kubat 2017; Goulet 2020). Zur Lösung vielfältiger Problemstellungen der zuvor genannten Anwendungsgebiete gelten in der Computer Vision aktuell insbesondere Convolutional Neural Networks (CNN) als innovativer und erfolgreicher Ansatz. CNN stellen eine Sonderform von Neural Networks (NN) dar, dessen mathematische Struktur sich gut für die Verarbeitung von Bilddaten eignet.

Neural Networks beschreiben mathematisches Modelle, welche durch bestimmte Netzwerkarchitekturen definiert sind und zur Abbildung bestimmter Zielgrößen aus entsprechenden Eingabedaten, z. B. Bilddaten, genutzt werden können (Heipke und Rottensteiner 2020). Zugehörig zur Gruppe des überwachten Lernens (supervised learning (SL)) werden Neural Networks nicht programmiert, sondern die Parameter des Modells anhand von Trainingsdaten angelehrt. Das bedeutet, dass Trainingsdaten, mit den dazugehörigen Zielgrößen vorab vorhanden sein müssen. Mathematisch stellt das Training ein Minimierungs- bzw. Optimierungsproblem dar, wobei die Gewichtungsfaktoren so lange entsprechend angepasst werden, bis die Abweichungen zwischen den vom Netz prädizierten Größen und den Trainingsdaten ein Minimum erreicht. Neural Networks und hier insbesondere sogenannte Feed-Forward-Networks (FNN) bestehen grundsätzlich aus einem Input- und einem Output-Layer mit dazwischenliegenden versteckten Layern (Hidden Layer), vgl. Abbildung 2.30. In jeder Schicht wird für jedes Neuron eine gewichtete Summe der Eingangssignale errechnet und mittels Aktivierungsfunktion weitergereicht (forward propagation).

Für detaillierte Ausführungen zu den Grundlagen von Neural Networks sei auf die Grundlagenliteratur verwiesen, z. B. (LeCun et al. 2015; Goodfellow et al. 2016).

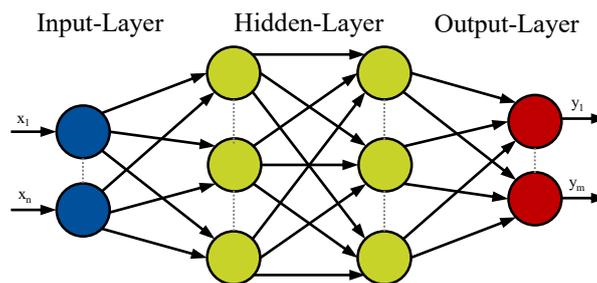


Abbildung 2.30: Schematische Netzwerkarchitektur eines Feed-Forward-Netzwerk (in Anlehnung an (Kraus und Drass 2020))

Der Schwerpunkt der verwendeten Methoden im Rahmen dieser Arbeit liegt in der Anwendung von Convolutional Neural Networks zur semantischen Segmentierung von Bilddaten. Dementsprechend wird nachfolgend näher auf diese beiden Methoden eingegangen.

2.7.1 Convolutional Neural Networks

Convolutional Neural Networks werden gegenwärtig vor allem im Bereich der digitalen Bildverarbeitung zur Objekterkennung eingesetzt z. B. zur semantischen Segmentierung (Shelhamer et al. 2017), zur Objektlokalisierung (Ren et al. 2015; Coenen M. 2020) oder zur Bildklassifizierung (Simonyan und Zisserman 2015). In der Literatur werden darüber hinaus entsprechende Anwendungsgebiete von CNN in der Baustellenüberwachung (Luo et al. 2018) als auch in der Bauwerksüberwachung vorgestellt, z. B. zur Detektion von Korrosionserscheinungen (Atha und Jahanshahi 2018) oder Rissen (Cha et al. 2017; Chen und Jahanshahi 2018; Chen et al. 2019; Le et al. 2021). WANG et al. (2021) stellen eine auf CNN und Internet of Things (IoT) basierende Methode zum Echtzeit-Monitoring des Verdichtungsvorganges bzw. der -qualität von Frischbeton vor. Dabei findet eine Klassifikation anhand der systematischen Auswertung der Frischbetonoberfläche mittels CNN in drei Klassen statt. Die Methode wurde mit einem Datensatz von ca. 15.000 Bildaufnahmen validiert (Wang et al. 2021).

CNN stellen eine besondere Form neuronaler Netze zur Verarbeitung von Daten in Form von mehreren Arrays, z. B. von Bilddaten, dar. Eingabebilder werden dabei anhand der Pixel als Matrix ($X_n = [h \ w \ d]$) erfasst, wobei h und w die zweidimensionalen Bildkoordinaten und d die einzelnen Bildkanäle und dementsprechend die Ausprägung bzw. Intensität eines Bildpunktes darstellt. Für vielzählige Problemstellungen liegen die Datenmodalitäten in Form von mehreren Arrays vor, wie z. B. in RGB-Bildern bestehend aus 2D-Arrays mit Intensitätswerten für jeden Farbkanal (Rot-Grün-Blau Farbsystem) eines jeden Pixels. Für jeden Farbkanal wird dabei eine eigene Matrix erstellt, so dass die räumliche Struktur des Eingabebildes im CNN erhalten bleibt (LeCun et al. 2015). In einer Bildaufnahme im 8-Bit-Format repräsentieren die Pixelwerte dagegen beispielsweise die Intensität I der unterschiedlichen Grauwerte i (1D-

Array) wobei gilt $I = 2^8 = 256$ mit $i \in \{0; 255\}$. Dabei ist zu beachten, dass CNN die Pixelwerte bzw. die Intensitäten mit Hilfe von Aktivierungsfunktionen, wie z. B. einer Sigmoid-Funktion, normiert erfassen.

Die Netzwerkarchitektur von CNN weist eine Reihe von Faltungsschichten und Pooling-Schichten auf. Im Allgemeinen werden in einer CNN-Architektur drei Schritte ausgeführt: die Faltung unter Anwendung digitaler Filter, das sogenannte Pooling und ein Aktivierungsschritt (Heipke und Rottensteiner 2020). Hierarchisch strukturiert werden mehrere Faltungsschichten mit nicht-linearen Aktivierungsfunktionen und Pooling-Schichten hintereinandergeschaltet, wobei jede Schicht die Ausgangsdaten der vorherigen Schicht weiterverarbeitet. Sogenannte Abtastfunktionen (engl. Filter Kernel) unterteilen die Matrizen der einzelnen Schichten in kleine Bereiche und tasten diese zur Extraktion von Merkmalen (Features) ab. Der Output dieser Abtastfunktionen wird mit einer nicht-linearen Aktivierungsfunktion ermöglicht, wobei eine sogenannte Feature-Map erzeugt wird. Eine häufig verwendete nicht-lineare Aktivierungsfunktion stellt z. B. die Sigmoid-Funktion dar, vgl. Gl. 17.

$$\text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad \text{Gl. 17}$$

Die Tiefe der Feature-Map korrespondiert mit der Anzahl der angewendeten Abtastfunktionen bzw. Filter Kernel. Pooling-Schichten stellen zur Reduktion des Rechenaufwands und der Größe der Feature-Map in der Architektur eines CNN zusammenfassende Schichten dar. Abbildung 2.31 gibt einen schematischen Überblick zur Vorgehensweise eines CNN mit Faltungsschicht und einer darauf folgenden Max Pooling Schicht. In diesem Beispiel wird ein 2×2 Max Pooling Filter verwendet, der eine häufig verwendete Technik zur Generierung der räumlich heruntergerechneten Feature-Map darstellt (Coenen 2020).

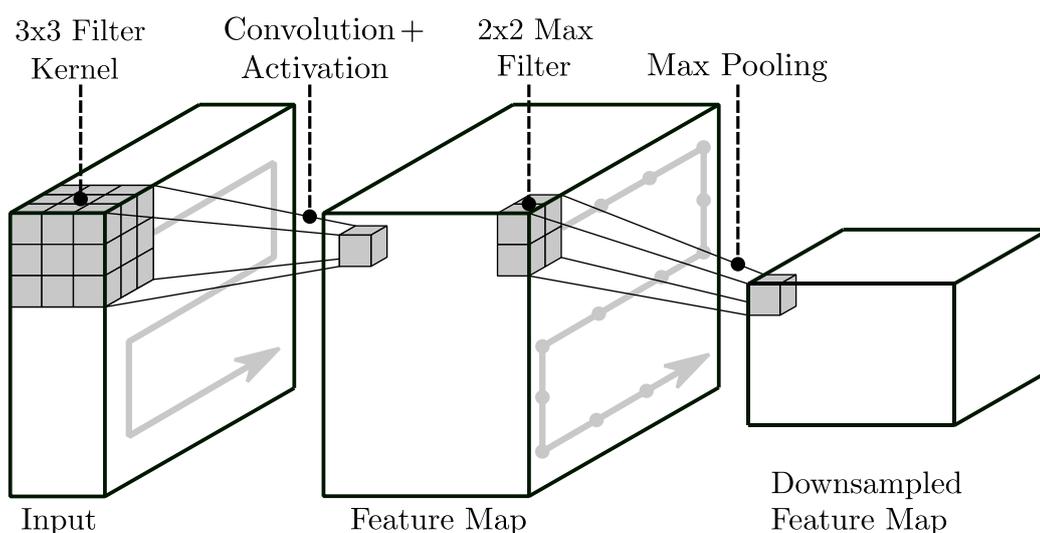


Abbildung 2.31: Schematische Darstellung einer Faltungsschicht mit Aktivierungsfunktion und Feature-Map gefolgt von einem Max Pooling Layer (Coenen 2020)

Der Lernprozess der Zielgrößen wird in einem CNN mit annotierten bzw. gelabelten Trainingsdaten durchgeführt. Wesentliches Element, welches neben der Quantität sowie Qualität der Trainingsdaten die Präzision der Zielgrößen bestimmt, ist die Formulierung einer sogenannten Verlustfunktion (loss function). Die Zielgrößen werden über die Minimierung der Verlustfunktion bestimmt (Kraus und Drass 2020). Die Definition der Verlustfunktion ist problemabhängig und sollte dementsprechend auf die jeweilige Art der Zielgrößen (z. B. Objektlokalisierung oder Klassifikation der einzelnen Bildpunkte) angepasst werden.

2.7.2 Semantische Segmentierung

Die semantische Segmentierung stellt neben der Bildklassifikation und Objektlokalisierung einen Teilbereich der Objekterkennung in Bild- bzw. Sensordaten dar (Süße und Rodner 2014). Bei der semantischen Segmentierung wird eine dichte Klassifikation der einzelnen Bildpunkte auf Pixelebene vorgenommen (Shotton und Kohli 2014). Jedem Pixel wird dabei eine entsprechende Klasse zugewiesen (z. B. Klasse ‘Auto‘ oder ‘Fahrzeug‘), so dass z. B. pixelgenau erkannt werden kann, wo sich ein Auto in dem Bild befindet. Dementsprechend stellt die semantische Segmentierung eine Erweiterung der Klassifikation dar. Für industrielle Fragestellungen reichen vielfach binäre Ergebnisse aus. Folglich wird jedem Pixel ein Wert einer Klasse – ‘Vordergrund‘ oder ‘Hintergrund‘ – zugewiesen.

Ziel der semantischen Segmentierung ist es im Falle von Bilddaten jedem Pixel (x_i) eine Klasse (k_i) zur Erstellung einer dichten Klassifikationskarte zuzuweisen. Unter Anwendung tiefer neuronaler Netze zur semantischen Segmentierung ist zum Training eine ausreichende Anzahl annotierter Trainingsdaten notwendig. Detaillierte Angaben zu klassischen Verfahren der semantischen Segmentierung sind u. a. in (Süße und Rodner 2014; Shotton und Kohli 2014) gegeben.

2.8 Zusammenfassung

Wie bereits in Kapitel 1.2 beschrieben, ist das Ziel der vorliegenden Arbeit u. a. die Entwicklung einer bildbasierten Messmethodik, die es gestattet maßgebende (Frisch-) Betoneigenschaften (vgl. Kapitel 2.3) im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) zu erfassen. Dabei gilt es, dass ausgeprägte Erfahrungswissen von erfahrenen Baustoffprüfenden in digitale Methoden zu übersetzen und so eine umfassende Bewertung der Qualitätsmerkmale des Frischbetons vornehmen zu können. Zur Umsetzung dieser Transformation bzw. Erweiterung der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) ist ein grundlegendes Verständnis zu unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften und insbesondere zu Messprinzipien und Messmethoden zur digitalen Erfassung und Bewertung dieser Eigenschaften notwendig.

Im vorherigen Kapitel wurden dementsprechend die theoretischen Grundlagen einzelner Oberflächeneigenschaften, sowohl optische Eigenschaften als auch die Oberflächengestalt bzw. -textur, näher beschrieben. Darauf aufbauend wurden Messprinzipien zur 3D-Rekonstruktion von Oberflächen aufgezeigt. In einem weiteren Schritt erfolgte die Beschreibung von Computer Vision mit dem Fokus auf die semantische Segmentierung in digitalen Daten unter Anwendung von Convolutional Neural Networks.

Eine Anwendung solcher Messprinzipien bzw. Methoden (insbesondere photogrammetrische Messprinzipien und Computer Vision) am Frischbeton zur Prüfung von Eigenschaften wird in der Literatur bis auf vereinzelte Ansätze bisher nicht beschrieben. Zur Digitalisierung des Betonbaus und dabei insbesondere der Identitätsprüfung zur Bestimmung der (Frisch-)Beton-eigenschaften, stellen solche zuvor beschriebenen Methoden jedoch eine Grundvoraussetzung dar. Dabei gilt es, solche Methoden oder Sensorsysteme in den Ablauf der Qualitätsprüfung auf der Baustelle zu integrieren und somit eine digitale Beurteilung der Qualitätsmerkmale des Frischbetons zu ermöglichen.

Kapitel 3

Methodischer Ansatz

In diesem Kapitel wird der grundlegende methodische Ansatz für eine bildbasierte Frischbetonprüfung erläutert. Zunächst werden die entsprechenden (Oberflächen-) Eigenschaften und der Anwendungsbereich mit den jeweiligen Anforderungen definiert. In einem weiteren Schritt werden die einzelnen Elemente des methodischen Ansatzes beschrieben, die als einzelne Schwerpunkte im Verlauf der weiteren Arbeit behandelt werden.

Als Erweiterung zur bisherigen subjektiv geprägten Frischbetonprüfung auf der Baustelle wird im Rahmen dieser Arbeit eine bildbasierte Messmethodik zur Ermittlung von (Frisch-) Betoneigenschaften entwickelt und erprobt. Basierend auf unterschiedlichen Eigenschaften der Frischbetonoberfläche – vor allem Rauheit und Reflexion – wird so eine umfassende bildbasierte Frischbetonprüfung im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) erarbeitet. Hierbei soll möglichst das gesamte Spektrum von Normalbetonen (F2 bis F5) bis hin zu sehr fließfähigen Betonen (F6) berücksichtigt werden.

Abbildung 3.1 zeigt unterschiedliche Oberflächenausschnitte des Frischbetons im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß). Deutlich ersichtlich sind Veränderungen der Oberflächengestalt bzw. -textur in Abhängigkeit der Konsistenz. So nimmt die erkennbare Beschaffenheit, z. B. in Form der Differenzierbarkeit einzelner grober Gesteinskörner mit zunehmender Konsistenz zu. Dabei ist vor allem ein deutlich erhöhter Abstand zwischen den einzelnen groben Gesteinskörnern erkennbar. Bei einer plastischen Konsistenz ist ersichtlich, dass sich der Frischbeton infolge der 15 Schläge bei der Versuchsdurchführung der Konsistenzprüfung noch nicht ausreichend ausgebreitet hat, so dass sich die einzelnen Gesteinskörner noch nicht separiert haben. Auffällig sind zudem veränderte Reflexionseigenschaften mit zunehmender Konsistenz. Es ist anzunehmen, dass weitere Veränderungen der Betonzusammensetzung bzw. -eigenschaften, wie z. B. die Korngrößenverteilung oder der Leimgehalt, ebenso zu (visuell) erkennbaren Veränderungen der Oberflächengestalt als auch -eigenschaften führen.

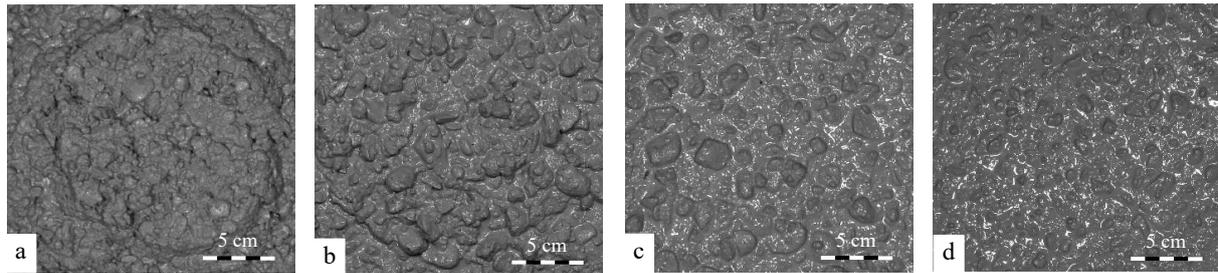


Abbildung 3.1: Oberflächen des ausgebreiteten Frischbetons unterschiedlicher Konsistenzklassen im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß)– a: F2 (plastisch); b: F3 (weich); c: F4 (sehr weich); d: F5 (fließfähig)

Der im Rahmen dieser Arbeit verfolgte methodische Ansatz zur bildbasierten Frischbetonprüfung basiert auf der Ermittlung optisch erkennbarer Veränderungen der Oberflächengestalt als auch -eigenschaften. Dabei werden standardisierte photogrammetrische Messprinzipien in Verbindung mit bildbasierten bzw. Computer Vision-basierten Auswertemethoden eingesetzt. Die Objektaufnahme erfolgt mittels Einzel- sowie Mehrbildaufnahme. Demzufolge ist unter Anwendung der Bündelblockausgleichung mit Simultankalibrierung aus den erfassten Bildaufnahmen eine Rekonstruktion der Frischbetonoberfläche in Form eines 3D-Oberflächenmodells möglich, vgl. Kapitel 2.6.2.4. In einem weiteren Schritt können Eigenschaften bzw. Kennwerte der Frischbetonoberfläche mit Hilfe verschiedener bildbasierter Methoden sowohl am 3D-Oberflächenmodell als auch an Einzelaufnahmen bestimmt werden (Oberflächenanalyse). Die so ermittelten Kennwerte werden daraufhin systematisch einzelnen (Frisch-)Betoneigenschaften – ermittelt mit klassischen betontechnologischen Verfahren – gegenübergestellt und somit eine Bewertung dieser in Form digitaler Kennwerte und Kriterien realisiert. In einem letzten Schritt wird aufgezeigt, wie eine Integration festgestellter Qualitätsabweichungen des Frischbetons in einen Regelkreislauf mittels der digital ausgewerteten Daten erfolgen kann. Abbildung 3.2 stellt schematisch den methodischen Ansatz mit den einzelnen Elementen in unterschiedlichen Ebenen – Aufnahmeebene, Baustoffebene und Qualitätsebene – dar.

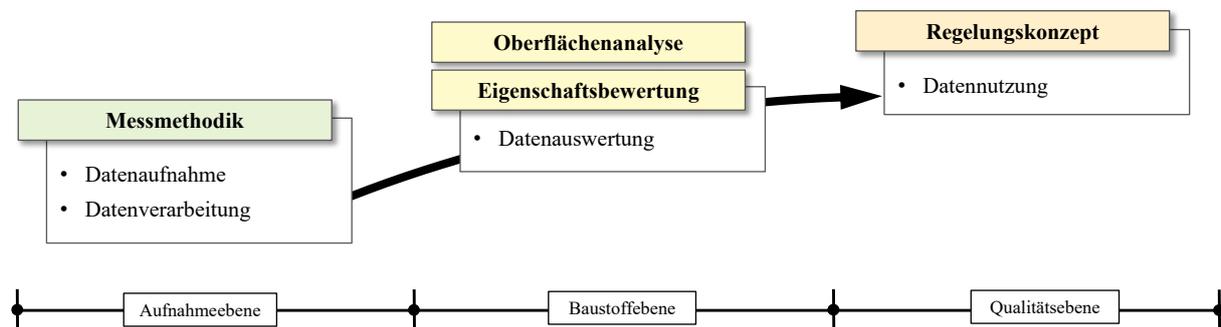


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des methodischen Ansatzes zur Charakterisierung von Frischbeton-Oberflächeneigenschaften

Nachfolgend werden die grundlegenden Anforderungen an die Messmethodik festgelegt. Dies erfolgt sowohl unter Berücksichtigung messtechnischer Anforderungen zur Präzision und

Genauigkeit als auch praxisrelevanter Randbedingungen (z. B. Baustellensituationen oder Umweltbedingungen). Dabei gilt es zu beachten, dass eine theoretisch optimale Aufnahmeconfiguration mit entsprechend hoher Präzision und Genauigkeit unter praktischen Randbedingungen zumeist nur schwer bzw. aufwendig umsetzbar ist. Demnach besteht ein wesentliches Ziel in einer strukturierten Reduktion der Bild- bzw. Datenaufnahme (Projektionszentren).

Die einzelnen Elemente des methodischen Ansatzes – *Messmethodik, Oberflächenanalyse, Eigenschaftsbewertung und Regelungskonzept* – stellen thematische Schwerpunkte dar und werden in den nachfolgenden Kapiteln separat behandelt.

Kapitel 4

Bildbasierte Messmethodik

Mit einer bildbasierten Methodik zur Eigenschaftsermittlung am Frischbeton wird im Rahmen dieses Kapitels ein entscheidender Schritt hinsichtlich einer digitalen Bewertung relevanter Qualitätsmerkmale von Frischbeton gelegt. Beginnend mit der Erläuterung der methodischen Vorgehensweise werden entscheidende Elemente der Aufnahmekonfiguration beschrieben. Eine Einschätzung der Anwendbarkeit der Messmethodik erfolgt durch den Vergleich mit Referenz-Messmethoden. In einem weiteren Schritt wird die Präzision zur Ermittlung einzelner Eigenschaften bzw. Kennwerte abgeschätzt.

4.1 Allgemeines

Eine zentrale Anforderung an die zu entwickelnde Messmethodik ist eine hinreichende Präzision und Genauigkeit zur zielsicheren Eigenschaftsermittlung bei gleichzeitiger Anwendbarkeit unter praktischen (Baustellen-)Randbedingungen. Dabei gilt es, das verwendete Kamerasystem auf die Aufnahmekonfiguration anzupassen, so dass in Verbindung mit dem Auswertesystem eine hinreichend genaue digitale Ermittlung und Bewertung der Eigenschaften durchgeführt werden kann. Aufgrund des sehr breit gewählten Konsistenzbereichs (F2 bis F6) und den daraus resultierenden unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften, sowohl der Textur als auch der Reflexion, sind bei der systematischen Reduktion von Projektionszentren mögliche Fehlkorrelationen bei der Merkmalszuordnung besonders zu beachten. Bei sich wiederholenden Mustern oder nur schwach texturierten Bereichen der Oberfläche kann es zu Mehrdeutigkeiten kommen (Maas 1992, Maas 1997; Luhmann 2018). Insbesondere die relativ homogene Oberflächengestalt im erhöhten Konsistenzbereich fließfähiger Frischbetone (vgl. Abbildung 3.1, rechts) kann zu solchen Mehrdeutigkeiten führen. Neben merkmalsbasierten Zuordnungen führt vor allem die Hinzunahme weiterer Projektionszentren zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit von möglichen Mehrdeutigkeiten (Maas 1997). Zur vereinfachten Anwendung der Messmethodik unter baupraktischen Randbedingungen wird im Rahmen dieser Arbeit einzig eine symmetrische kollineare Anordnung möglicher Kamerastandorte mittig des Ausbreittisches in

einer Achse betrachtet. Nachfolgend wird das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Messprinzip näher beschrieben. Eine Einschätzung der Anwendbarkeit der bildbasierten Messmethodik erfolgt durch den Vergleich mit Referenz-Messmethoden. Darüber hinaus wird näher auf die Präzision zur Ermittlung einzelner Oberflächenkennwerte eingegangen.

4.2 Ausgangsstoffe und untersuchte Zusammensetzungen

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms zur Entwicklung und Erprobung der bildbasierten Messmethodik wurden Betonzusammensetzungen des gesamten Konsistenzbereiches von F2 bis F6 untersucht. Als Kernparameter zur Einstellung der Konsistenz wurden sowohl der Leimgehalt als auch der w/z-Wert variiert. Auf den Einsatz verflüssigender Zusatzmittel als auch von Zusatzstoffen wurde in diesem Untersuchungsabschnitt zunächst verzichtet (vgl. weiterführende Untersuchungen in Kapitel 5). Die Sieblinie blieb bei allen untersuchten Betonzusammensetzungen konstant. Als Größtkorn wurden Körnungen mit 8 mm, 16 mm bzw. 32 mm verwendet. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die variierten als auch konstanten Parameter der untersuchten Betonzusammensetzungen. Die charakteristischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe sind in Anhang B.1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4.1: Variierte und konstante Parameter der untersuchten Betonzusammensetzungen

Bezeichnung	Einheit	Wertebereich
Zementart	-	CEM II/A-S 42,5 R; CEM II/A-LL 42,5 R
w/z-Wert	-	0,50; 0,55; 0,60
Leimgehalt	l/m ³	(279); 304; 329; 354; 404
Mehlkorngehalt	kg/m ³	322 bis 498
Größtkorn	mm	8; 16; 32
Sieblinie	-	A/B (Flusskies, vgl. Abb. B1.3)

4.3 Referenz-Messmethoden zur Charakterisierung von Oberflächeneigenschaften

Zur Charakterisierung von Oberflächeneigenschaften des Frischbetons, u. a. der optischen Eigenschaften und der Oberflächengestalt und -textur, wurden verschiedene Referenz-Messmethoden eingesetzt. Diese dienen als Zwischenschritt dazu, typische Oberflächeneigenschaften mit hoher Präzision zu erfassen um dann später z. B. für bildbasierte Methoden als Kriterium zur Bewertung der optischen Messgenauigkeit herangezogen werden zu können. Dabei wurde soweit möglich auf Messmethoden zurückgegriffen mit denen für die jeweilige Messaufgabe in vielen Industriezweigen bereits umfangreiche Erfahrungen vorliegen. Für all diese Methoden gilt, dass nur vereinzelt geringfügige Erfahrungen bis hin zu keinen Erfahrungen zur Anwendung an Frischbeton in der internationalen Literatur dokumentiert sind. In einem ersten Schritt galt es daher, diese Messmethoden auf die Randbedingungen von Frischbeton zur zielsicheren Ermittlung der Eigenschaften zu adaptieren.

Die Oberflächengestalt und -textur wurde mithilfe eines berührungsfreien Profilmessgeräts (3D-Profilmeter *VR3200* der Fa. *KEYENCE*), welches nach dem Prinzip der Streifenlichtprojektion arbeitet (vgl. Kapitel 2.6.1), am Festbeton bestimmt. Da mit dem Profilmessgerät ausschließlich Messungen am Festbeton durchführbar sind, galt es, eine Methode zur Entnahme von Proben aus dem in der Konsistenzprüfung ausgebreiteten Beton zu entwickeln, ohne dabei die Oberflächengestalt zu beeinflussen. Mit Hilfe eines Stahlrings ($\varnothing = 18$ cm) und eines dünnen Stahlblechs ($d = 1$ mm) wurde in der Mitte des ausgebreiteten Frischbetons auf dem Ausbreittisch eine Probe ‘ausgestochen’, erschütterungsfrei entnommen und erhärten gelassen, so dass im Nachgang die Ermittlung der Oberflächengestalt und -textur mit Hilfe des 3D-Profilmeters an der Festbetonoberfläche möglich war. Basierend auf der so ermittelten Oberflächengestalt und -textur können eine Vielzahl von 2D- und 3D-Oberflächenkennwerten berechnet werden, vgl. Kapitel 2.5.4.

Die optischen Eigenschaften, insbesondere die Reflexion bzw. der Glanz, wurden mit Hilfe eines berührungsfreien Spektralphotometers (*MetaVue VS3200* der Fa. *X-RITE*) bestimmt. Die Untersuchungen mit dem Spektralphotometer wurden ausschließlich an Mörtel-Proben durchgeführt. Dazu wurde an zylindrischen Mörtelproben mit einer Höhe von 15 cm und einem Durchmesser von 5,0 cm in einem bestimmten Zeitintervall die Entwicklung des Glanzes der Oberfläche mit einem Einfallswinkel des Lichts von 60° bestimmt. Darüber hinaus wurde an den Mörtelproben die Setzung des Mörtels nach 24 Stunden ermittelt, so dass auf die abgesonderte Wasserabsonderung der Mörtel geschlossen werden konnte.

4.4 Methodische Vorgehensweise

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und angewendete bildbasierte Messmethodik zur digitalen Eigenschaftsermittlung basiert auf photogrammetrischen Messprinzipien in Verbindung mit digitalen Bildanalyseverfahren bzw. Computer Vision-basierten Methoden u. a. zur Segmentierung der Bilddaten. Grundsätzlich kann die Vorgehensweise der Methodik in Bild- bzw. Datenaufnahme, Datenverarbeitung und Datenauswertung gegliedert werden. Aus den aufgenommenen Bilddaten können mittels photogrammetrischer Methoden in Verbindung mit bildbasierten Methoden unterschiedliche Eigenschaften ermittelt werden:

- 2D- und 3D-Oberflächenkennwerte
- Geometrische 2D-Eigenschaften
- Reflexionsbasierte Eigenschaften

Die durchgeführten Untersuchungen wurden, bis auf wenige Ausnahmen zur Bewertung der praktischen Anwendbarkeit, unter konstanten Beleuchtungs-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverhältnissen durchgeführt.

Methodik zur Ermittlung von 2D- und 3D-Oberflächenkennwerten

Zur Ermittlung von 2D- als auch 3D-Oberflächenkennwerten ist die Rekonstruktion der Oberfläche als digitales 3D-Modell notwendig. Entsprechend ist bei Anwendung dieser Methodik eine Mehrbildaufnahme erforderlich. Die verwendete Anzahl von Projektionszentren wird in Kapitel 4.8.1 beschrieben. Zur systematischen Mehrbildaufnahme wird im Rahmen dieser Arbeit eine Spiegelreflexkamera (vgl. Kapitel 4.7) mit einem entwickelten Messaufbau (vgl. Kapitel 4.5) verwendet. Als Referenzen in Form von Längen- als auch Höhenmaßstäben zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit werden künstliche Zielmarker zur Signalisierung im Objektbereich eingesetzt. Im Anschluss an die Mehrbildaufnahme erfolgt zur Rekonstruktion des 3D-Oberflächenmodells die softwaregestützte Berechnung extrahierbarer Verknüpfungspunkte, die Bündelblockausgleichung und die Berechnung der dichten Punktwolke (Datenverarbeitung). Die Vorgehensweise der einzelnen Verarbeitungsschritte kann mit dem sogenannten *Structure-of-Motion*-Verfahren beschrieben werden (das Verfahren wird in Kapitel 4.8.1 näher beschrieben). Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Software arbeitet auf Basis dieses Verfahrens bei der 3D-Bildauswertung. Das erstellte 3D-Modell der Oberfläche erlaubt in einem weiteren Schritt die Berechnung von unterschiedlichen 2D- und 3D-Oberflächenkennwerten gemäß *DIN EN ISO 4287* sowie *DIN EN ISO 25178*. Abbildung 4.1 gibt einen schematischen Überblick der zuvor beschriebenen Vorgehensweise.

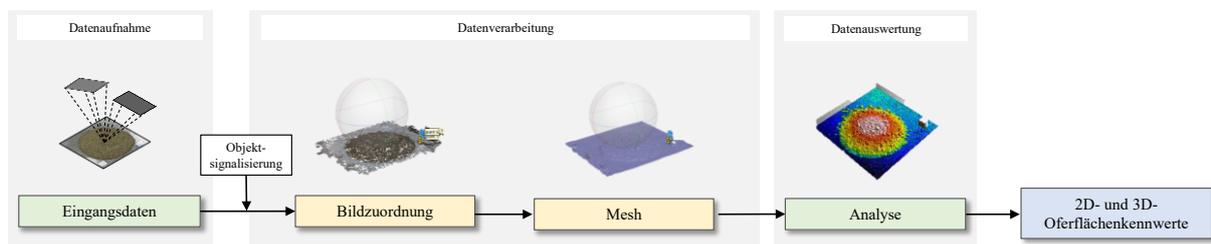


Abbildung 4.1: Schematische Vorgehensweise zur Ermittlung von 2D- und 3D-Oberflächenkennwerten

Objektbereiche in denen keine extrahierbaren Verknüpfungspunkte vorliegen, z. B. infolge von Verdeckungen, Reflexionen oder fehlender Oberflächenstruktur, können nicht vollkommen korrekt rekonstruiert werden. Die Menge extrahierbarer Verknüpfungspunkte der Oberfläche wird neben den zuvor genannten Einflüssen durch weitere Parameter beeinflusst (Luhmann 2018), wie z. B.:

- Kamerasystem bzw. -einstellungen
- Basisabstand (Abstand zw. zwei Projektionszentren) der verwendeten Kamerastandorte
- Aufnahmegeometrie

Die einzelnen Parameter werden in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben und die geeignete Auswahl begründet. Außerdem werden zu einzelnen Parametern in Kapitel 4.10 Betrachtungen zur Präzision und Genauigkeit beschrieben.

Methodik zur Ermittlung geometrischer 2D-Eigenschaften

Die Ermittlung geometrischer 2D-Eigenschaften erfolgt im Rahmen dieser Arbeit an Einzelaufnahmen der Frischbetonoberfläche. Die Objekterkennung erfolgt dabei mittels semantischer Segmentierung unter Anwendung von Convolutional Neural Networks, vgl. Kapitel 2.7.1. Die semantische Segmentierung erlaubt eine systematische pixeltreue Bestimmung einzelner Objektbereiche der Frischbetonoberfläche in der jeweiligen Einzelaufnahme. Der ausgebreitete Frischbeton wird dabei in zwei Klassen – ‘Gesteinskörnung’ und ‘Hintergrund’ – gegliedert. Bei dieser Vorgehensweise werden keine verschiedenen Instanzen in derselben Klasse unterschieden (alle Pixel der Klasse Gesteinskörnung werden gleichbehandelt). Zur Optimierung wurde aus diesem Grund die semantische Instanz-Segmentierung angewendet. Bei dieser Vorgehensweise wird für jeden Pixel nicht nur die jeweilige Klasse prädiert, sondern auch zwischen den Instanzen einer Klasse unterschieden. So ist es möglich verschiedene Instanzen identischer Klasse zu unterscheiden (Hafiz und Bhat 2020; Di Tian et al. 2022). Insbesondere zur zielsicheren Segmentierung sich überlappenden bzw. teilweise verdeckter Gesteinskörner ist diese Vorgehensweise vorteilhaft. Die einzelnen Prozessschritte zu den in dieser Arbeit angewendeten Algorithmen zur semantischen Segmentierung sind detailliert in (Coenen et al. 2021) beschrieben.

Eine Korrektur der segmentierten Bereiche erfolgt in einem weiteren Schritt mit dem Watershed Algorithmus. So ist möglich, z. B. fälschlicherweise zusammenhängend segmentierte Bereiche bzw. Gesteinskörner zu separieren. Mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung ist an den korrigierten Daten die Berechnung geometrischer 2D-Eigenschaften der einzelnen detektierten Gesteinskörner möglich, wie z. B. die Fläche (A_i) oder der minimale und maximale Durchmesser ($d_{F,max}$; $d_{F,min}$). Die Vorgehensweisen der einzelnen Segmentierungsverfahren sind in Anhang A.1 zusammengefasst. Abbildung 4.2 gibt einen Überblick zur Vorgehensweise bei der Extraktion geometrischer 2D-Eigenschaften.

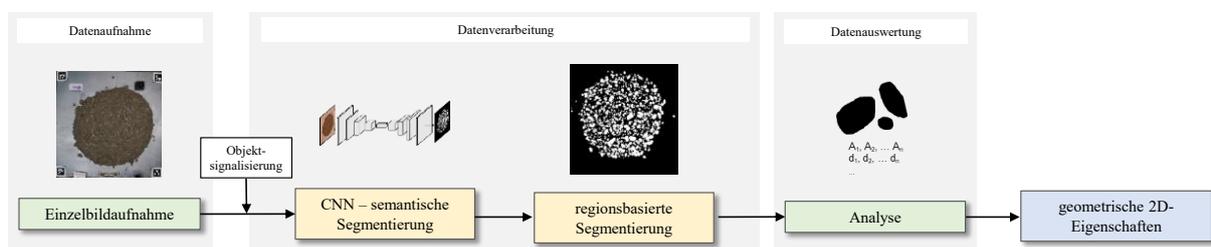


Abbildung 4.2: Schematische Vorgehensweise zur Ermittlung geometrischer 2D-Eigenschaften

Methodik zur Ermittlung reflexionsbasierter Eigenschaften

Eine zentrale Anforderung zur Ermittlung reflexionsbasierter Eigenschaften ist eine konstante Beleuchtungssituation zur Vergleichbarkeit der Messergebnisse. In Anlehnung an die Glanzmessung von Oberflächen (vgl. Kapitel 2.5.2) wird die Frischbetonoberfläche unter einem definierten Winkel mit einem konstanten Lichtstrom angestrahlt. Der Kamerastandort

entspricht dem negativen betragsmäßig identischen Winkel der Beleuchtung bei der Bildaufnahme. Je nach Reflexionseigenschaften der Frischbetonoberfläche weisen die einzelnen Pixel der Bildaufnahme bei konstanten Beleuchtungseigenschaften eine unterschiedliche Intensität (Intensitätswert bzw. Grauwert) auf. Mit Hilfe digitaler Bildanalyse können so durch Auswertung der Häufigkeitsverteilung mittels punktorientiertem Segmentierungsverfahren (Schwellenwertverfahren) und semantischer Segmentierung unter Nutzung von CNN Bereiche der Frischbetonoberfläche in Abhängigkeit der Reflexion ermittelt werden. Eine flächenbasierte pixeltreue Auswertung der einzelnen Segmentbereiche ($n_{no\ GL} < \text{Schwellenwert} < n_{GL}$) gliedert die Frischbetonoberfläche dementsprechend in Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften. Abbildung 4.3 gibt einen Überblick zur Vorgehensweise bei der Extraktion reflexionsbasierter Eigenschaften.

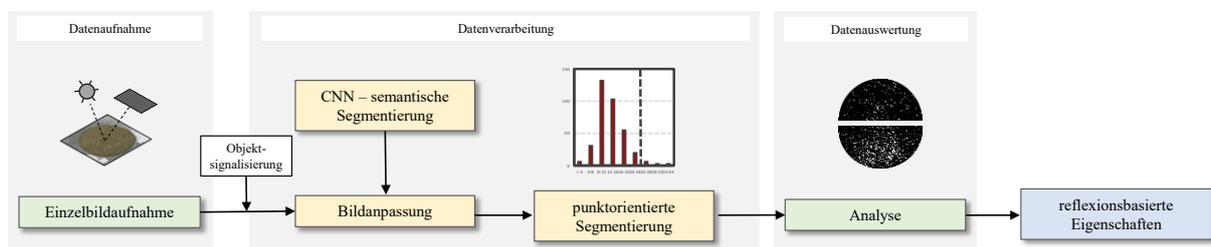


Abbildung 4.3: Schematische Vorgehensweise zur Ermittlung reflexionsbasierter Eigenschaften

4.5 Aufnahmekonfiguration

Der Objektraum bzw. Objektbereich resultiert aus den Abmessungen der zu verwendenden Geräte gemäß *DIN EN 12350-5*. Die Dimensionen des Objektbereiches sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Die relativ geringe maximale Ausdehnung in Z-Richtung resultiert aus dem verwendeten Probenvolumen im Ausbreitversuch (ca. 5 Liter).

Tabelle 4.2: Maximale Objektausdehnung des Objektraums und zugehörige Wertebereiche

Richtung	max. Ausdehnung	gültiger Wertebereich
X	0,70 (+ 0,10) ¹⁾ [m]	[-0,40; 0,40]
Y	0,70 (+ 0,10) ¹⁾ [m]	[-0,40; 0,40]
Z	0,10 [m]	[0,00; 0,10]

¹⁾ Sicherheitszuschlag; Ausbreittisch gemäß DIN EN 12350-5 = 700 x 700 mm

Hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit und den daraus resultierenden möglichen Kamerastandorten müssen unter Berücksichtigung einer praxistauglichen Anwendbarkeit und Bedienbarkeit Kompromisse eingegangen werden. Diese richten sich vorwiegend nach praktischen Vorgaben, wie z. B. einer maximal geeigneten Arbeitshöhe von 1,30 m. Da kein übergeordnetes System mit entsprechenden Referenzdaten vorliegt, werden diese Daten unter Verwendung einer möglichst optimalen Aufnahmekonfiguration ermittelt. Dabei sollen sowohl homogene

Genauigkeitsverhältnisse in jeder Raumrichtung als auch eine hohe Genauigkeit für jeden aufgenommenen Objektpunkt erzielt werden. Zur Erfüllung dieser beiden Forderungen eignet sich die Konfiguration eines sogenannten Rundum-Verbandes, vgl. Abbildung 2.27 (Rautenberg und Wiggenhagen 2002). Aufgrund der Notwendigkeit einer Anwendung unter baupraktischen Randbedingungen wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch einzig eine symmetrische kollineare Anordnung möglicher Kamerastandorte mittig des Ausbreittisches in einer Achse betrachtet. Abbildung 4.4 zeigt schematisch die gewählten Kamerastandorte im Objektraum in der Draufsicht als auch Seitenansicht. Der erste Index der Kamerastandorte $C_{0\dots i}$ beschreibt dabei die horizontale Lage der Kamera im Verband. Innerhalb jeder horizontalen Ebene beschreibt der zweite Index $C_{0\dots i,0\dots j}$ die Position der Kamera. Da eine Verdrehung der Kamerastandorte um die Längs- als auch Vertikalachse aufgrund einer praxistauglichen Anwendbarkeit ausgeschlossen wird, ist sowohl $\omega = 0$ als auch $\kappa = 0$ (vgl. Kapitel 2.6.2.2, Abbildung 2.25). Die Kamerastandorte variieren demnach einzig in Abhängigkeit von ρ in einer Achse. Der Abstand h zwischen Projektionszentrum und Koordinatenursprung im Objektraum ist für alle Kamerastandorte konstant, da sich die Kippachse auf Höhe der Ausbreitplatte befindet.

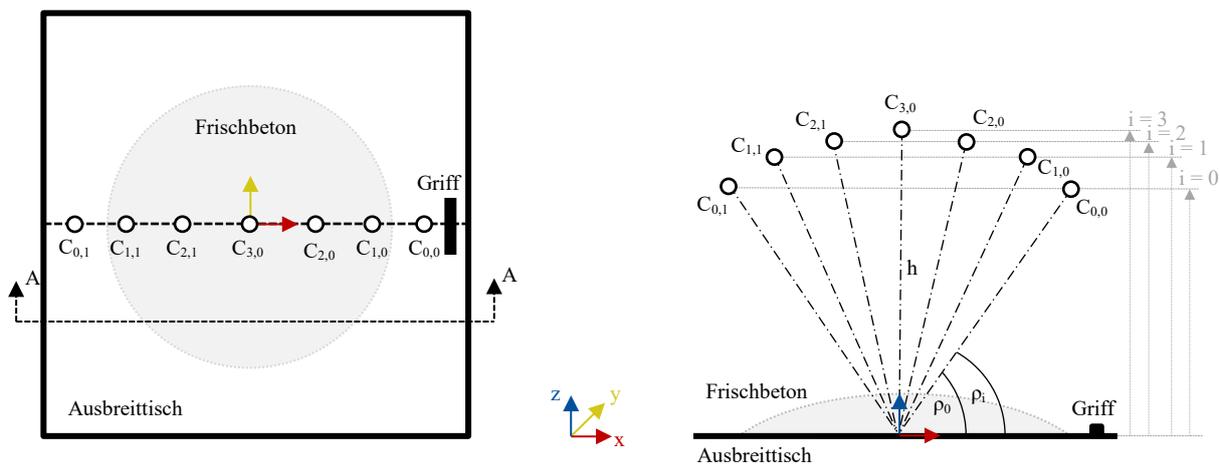


Abbildung 4.4: Kamerastandorte im Objektraum (links: Draufsicht; rechts: Seitenansicht A-A)

Abbildung 4.5 zeigt den in der vorliegenden Arbeit entwickelten Messaufbau, der es erlaubt, mit einer Spiegelreflexkamera mehrere um wenige Grad gekippte Bildaufnahmen im Rahmen des Ausbreitversuches zu erstellen. Zwei LED-Strahler in Höhe der Kamera sorgen für eine gleichmäßige Beleuchtung. Insgesamt werden sieben Kamerastandorte angefahren. Die resultierende notwendige und gewählte Anzahl von Kamerastandorten wird in Kapitel 4.8.1 näher beschrieben.

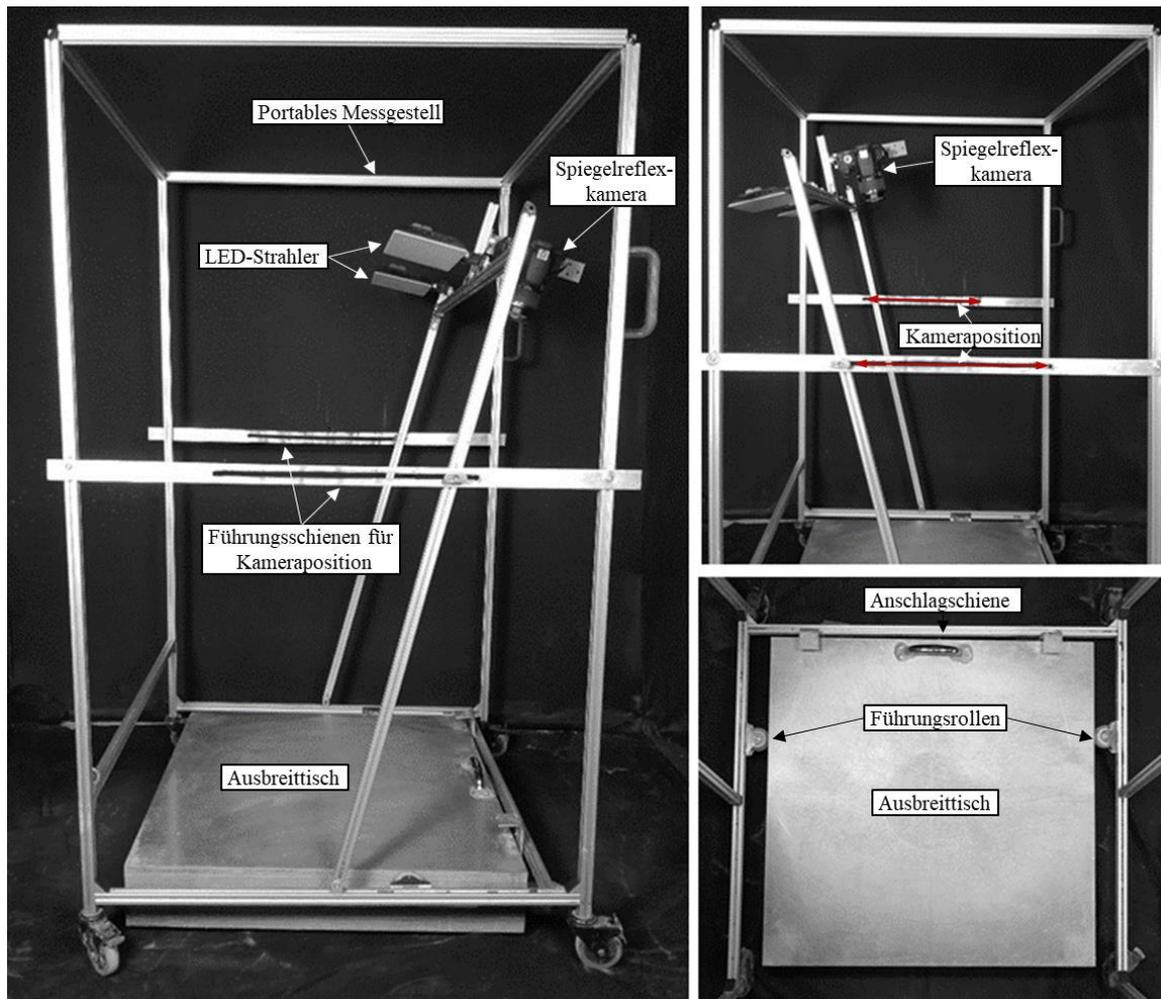


Abbildung 4.5: Konstruierter Messaufbau zur systematischen Bildaufnahme im Rahmen der Konsistenzprüfung

4.6 Signalisierung im Objektbereich

Zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit werden sog. Zielmarker zur Signalisierung im Objektbereich als Referenzen in Form von Längen- als auch Höhenmaßstäben verwendet. Aufgrund des radial-symmetrischen Messaufbaus und der damit verbundenen Stabilität bei auftretenden Blickwinkelveränderungen werden kreisförmige Zielmarker eingesetzt. Zur ziel-sicheren Detektion sollte der Durchmesser der Zielmarker 4-5 Pixel im Bildraum nicht unterschreiten (Luhmann 2018).

Die verwendeten Längen- sowie Höhenmaßstäbe wurden aus pulverbeschichtetem Edelstahl mit codierten Zielmarkern realisiert, vgl. Abbildung 4.6. Mit der Software *Agisoft Metashape Professional* ist eine automatisierte Detektion der codierten Marker möglich. Die Definition des 2D-Koordinatensystems in der x-y-Ebene (vgl. Abbildung 4.4) erfolgt durch den euklidischen Abstand der einzelnen Messstrecken ($\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$) zwischen den Punkten P_1, P_2, P_3 und P_4 . Der Punkt $P_5 = (0|0|\Delta l_z)$ dient zur Definition des Höhenmaßstabs. Weitere codierte Zielmarker in den jeweiligen Ecken des Ausbreittisches werden zur Maskierung des Objektbereiches verwendet.

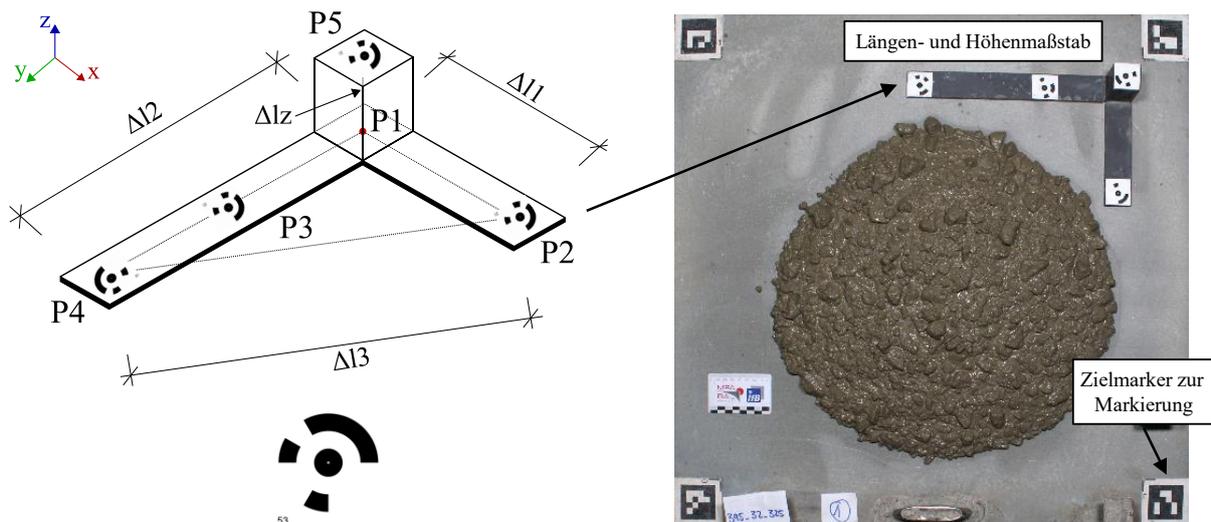


Abbildung 4.6: Längen- und Höhenmaßstab mit Koordinatensystem und codierter Zielmarker (links) und angebrachte Maßstäbe und Zielmarker auf dem Ausbreittisch (rechts)

4.7 Kamera- und Auswertesystem

Zur Datenaufnahme der Bilddaten wurde in der vorliegenden Arbeit eine Spiegelreflexkamera (*Canon EOS 2000D*) mit einem APS-C-CMOS Sensor (24,7 Megapixel) und einer maximalen Bildauflösung von 6000 x 4000 Pixel verwendet. Die Sensorgröße betrug 22,3 mm x 14,9 mm.

Die Berechnung von Verknüpfungspunkten und der Bündelblockausgleichung sowie die Erstellung der dichten Punktwolke und des digitalen 3D-Modells erfolgte mit der Software *Agisoft Metashape Professional (Version 1.7.1)*. Oberflächenkennwerte wurden im Nachgang mittels des berechneten 3D-Oberflächenmodells mit der Software *MountainsMap Expert (Version 8.1.9369)* extrahiert. Weitere Berechnungsschritte wurden mit der Software *MathWorks MATLAB* durchgeführt.

4.7.1 Brennweite, Blende und Schärfentiefe

Unter Berücksichtigung der maximalen Ausdehnung des Objektbereichs (Ausbreittisch + 10 cm) von 800 x 800 mm² (vgl. Kapitel 4.5) sowie des verwendeten Sensors der Kamera ist in Abbildung 4.7 die Abhängigkeit der Gegenstandsweite und der Brennweite dargestellt. Unter Annahme einer maximal geeigneten Arbeitshöhe von ca. 1,30 m ist die Anwendung einer Brennweite von maximal ca. 24 mm möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Brennweite von 18 mm gewählt.

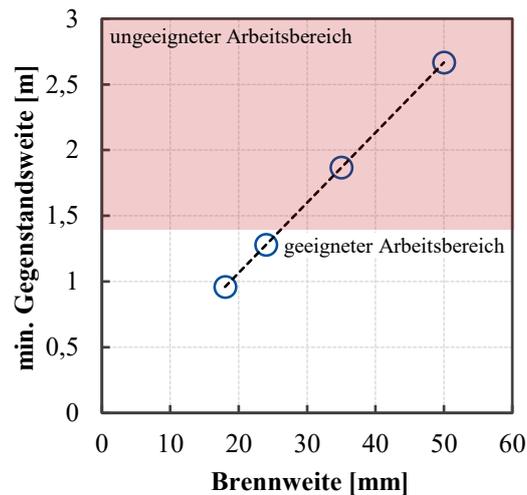


Abbildung 4.7: Minimale Gegenstandsweite zur vollständigen Aufnahme des Objektbereiches (800 x 800 mm²) in Abhängigkeit der Brennweite

4.7.2 Belichtungszeit und Lichtempfindlichkeit

Die Belichtungszeit wurde iterativ gewählt, so dass eine ausreichende Helligkeit bei gleichzeitig hohem Kontrast gewährleistet war. Als Belichtungszeit wurde 1/20 Sekunde unter Berücksichtigung der weiteren inneren und äußeren Einflussfaktoren festgelegt.

Die Lichtempfindlichkeit wird über den ISO-Wert gesteuert, wobei die Helligkeit mit steigendem ISO-Wert zunimmt. Zu hohe ISO-Werte können jedoch zu Rausch-Effekten im Bild führen, so dass eine robuste Ermittlung der Oberflächeneigenschaften erschwert wird. Der ISO-Wert wurde demnach unter Berücksichtigung der künstlichen Belichtung sowie der Belichtungszeit auf ISO = 400 festgelegt.

4.8 Ermittlung von Oberflächeneigenschaften

Im nachfolgenden Kapitel wird die Vorgehensweise der Messmethodik zur Ermittlung von 2D- und 3D-Oberflächenkennwerten, geometrischen 2D- sowie reflexionsbasierten Eigenschaften der Frischbetonoberfläche näher beschrieben. Darüber hinaus wird auf Aspekte der Präzision und Genauigkeit bei der Ermittlung der Eigenschaften eingegangen.

4.8.1 Oberflächenkennwerte

Zur Berechnung von 2D- und 3D-Oberflächenkennwerten ist die Rekonstruktion der Oberfläche als digitales 3D-Modell erforderlich. Die Rekonstruktion erfolgt mit der Software *Agisoft Metashape Professional* basierend auf dem *Structure-from-Motion*-Verfahren. Abbildung 4.8 gibt einen schematischen Überblick der Vorgehensweise bei diesem Verfahren. Für eine detaillierte Beschreibung einzelner Elemente sei auf die weiterführende Literatur verwiesen, z. B. (Luhmann 2018; Carrivick et al. 2016).

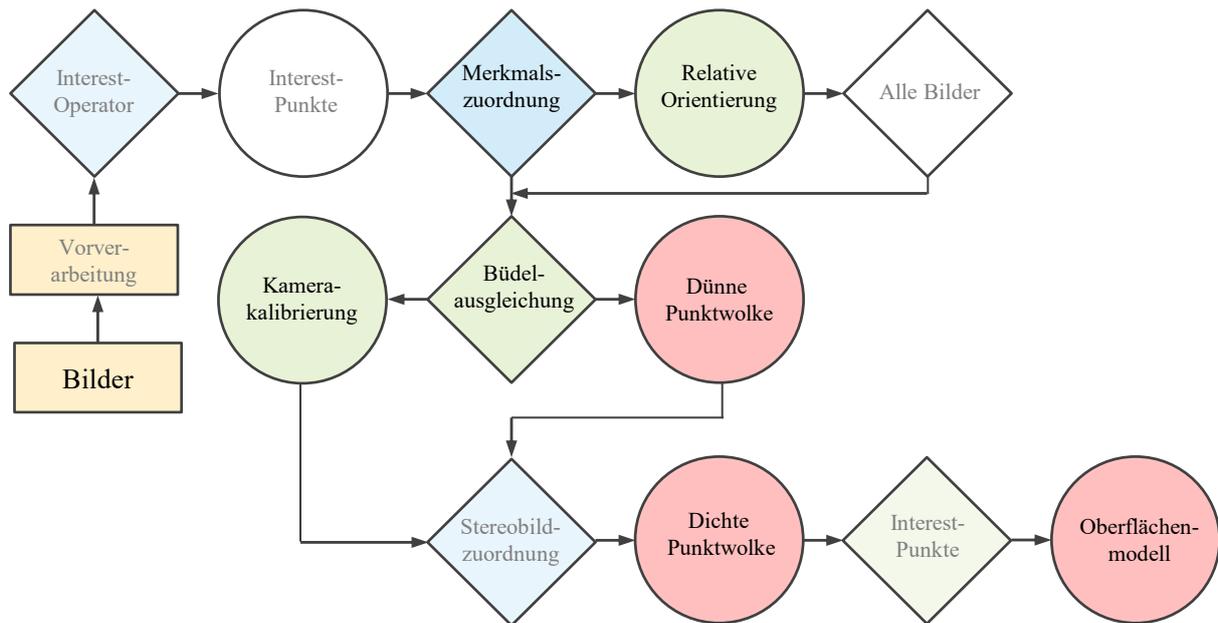


Abbildung 4.8: Vorgehensweise beim *Structure-from-Motion*-Verfahren (in Anlehnung an (Luhmann 2018))

Die Rekonstruktion des 3D-Oberflächenmodells erfolgt vereinfacht über die Schritte der Merkmalszuordnung und der relativen Orientierung eines einzelnen Bildpaares. Die Orientierung aller Bilder erfolgt in einem weiteren Schritt mittels Bündelblockausgleichung ggf. mit simultaner Kamerakalibrierung. Die ermittelten Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte bilden die dünne Punktwolke. Infolge der Hinzunahme weiterer Bildpaare erfolgt die Berechnung der dichten Punktwolke. In einem weiteren Schritt wird durch Fusionierung der einzelnen Punktwolken ein ganzheitliches 3D-Oberflächenmodell berechnet.

Abbildung 4.9 zeigt beispielhaft sowohl die mit der Software *Agisoft Metashape Professional* berechnete dünne als auch die dichte Punktwolke eines ausgebreiteten Frischbetons auf dem Ausbreittisch. Bei der dünnen Punktwolke sind noch deutliche Lücken zwischen den einzelnen Verknüpfungspunkten ersichtlich. Objektbereiche, in denen keine Verknüpfungspunkte vorliegen, entstehen u. a. infolge von Verdeckungen, Spiegelungen oder fehlender Oberflächentextur. Die Oberflächengestalt und -textur der Frischbetonoberfläche ist dagegen bei der dicht besetzten Punktwolke nahezu fehlerfrei visuell erkennbar.

Nachfolgend wurden bei den Untersuchungen, falls nicht anders erwähnt, die Kameraeinstellungen (vgl. Kapitel 4.5 bis 4.7.2), der Maßstab als auch die Auswertemethoden konstant beibehalten. Der Einfluss der Anzahl von Projektionszentren als auch des Basisabstandes wird nachfolgend näher betrachtet.

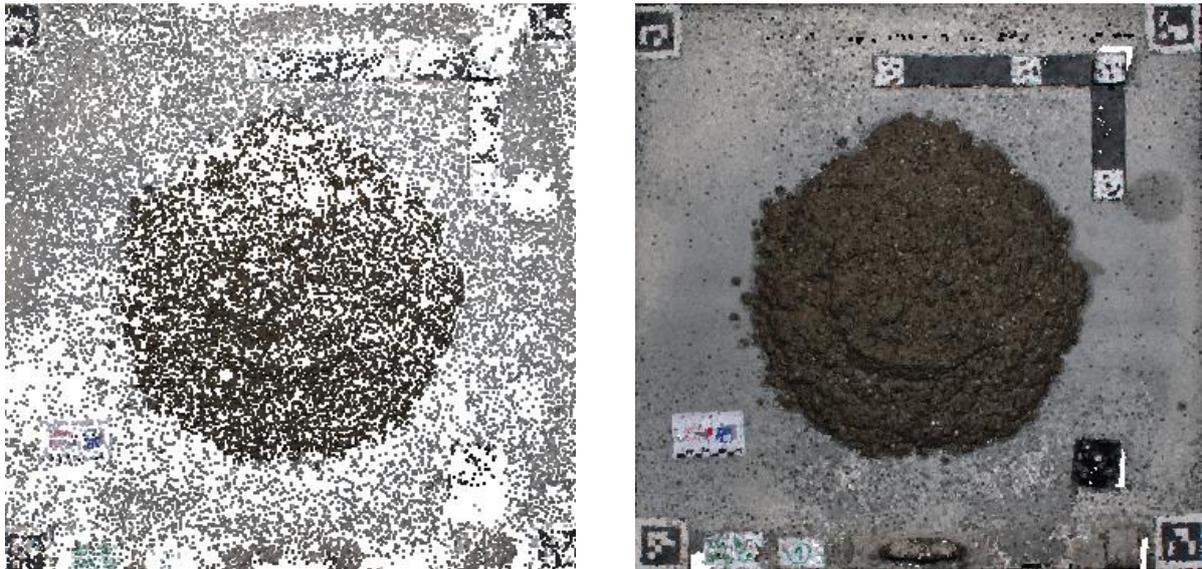


Abbildung 4.9: Dünne Punktwolke (links) und dichte Punktwolke (rechts) eines ausgebreiteten Frischbetons auf dem Ausbreittisch (4 Projektionszentren)

Abbildung 4.10 zeigt die Menge extrahierbarer Verknüpfungspunkte in Abhängigkeit der Anzahl der Projektionszentren. Bei allen Betonzusammensetzungen, unabhängig des Größtkorns und des Ausbreitmaßes, ist eine nahezu lineare Zunahme der Menge extrahierbarer Verknüpfungspunkte in Abhängigkeit der Projektionszentren ersichtlich. Zurückzuführen ist dies auf die zunehmende Überdeckung der einzelnen Bildbereiche bei ansteigender Anzahl von Projektionszentren.

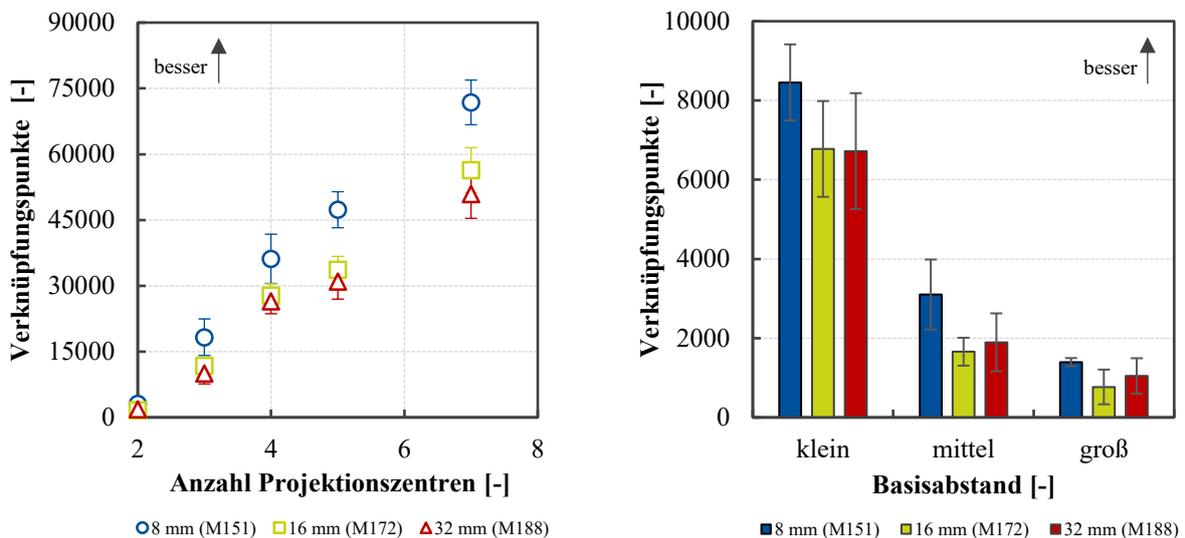


Abbildung 4.10: Verknüpfungspunkte in Abhängigkeit der Anzahl der Projektionszentren (links) und Menge der Verknüpfungspunkte in Abhängigkeit des Basisabstands unter Anwendung von zwei Projektionszentren (rechts) für Betonzusammensetzungen (siehe Angabe in Klammern) mit unterschiedlichem Größtkorn

Des Weiteren ist in Abbildung 4.10 die Menge extrahierbarer Verknüpfungspunkte in Abhängigkeit des Basisabstands unter Anwendung von zwei Projektionszentren dargestellt. Die deutliche Reduktion der extrahierbaren Verknüpfungspunkte mit zunehmendem Basisabstand ist mit einem immer stärker abweichenden Bildbereich erklärbar. Eine Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung bzw. den Betoneigenschaften (z. B. Ausbreitmaß, w/z-Wert oder Größtkorn) ist dabei nicht erkennbar. Zur Abschätzung der inneren Genauigkeit werden in Abbildung 4.11 die RMS-Werte gemäß Gl. 18 der ausgeglichenen Objektkoordinaten in x , y und z -Richtung in Abhängigkeit der Anzahl von Projektionszentren betrachtet. Der RMS_i -Wert gibt die mittlere Standardabweichung in Abhängigkeit der jeweiligen Richtung ($\hat{s}_{X_i}, \hat{s}_{Y_i}, \hat{s}_{Z_i}$) von n ausgeglichenen Objektkoordinaten an (Luhmann 2018). Darüber hinaus ist die mittlere Standardabweichung \hat{s}_{XYZ} aller Richtungen gemäß Gl. 19 in Abbildung 4.11, rechts dargestellt.

$$RMS_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{s}_{X_i}^2} \quad RMS_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{s}_{Y_i}^2} \quad RMS_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{s}_{Z_i}^2} \quad \text{Gl. 18}$$

$$\hat{s}_{XYZ} = \sqrt{\hat{s}_X^2 + \hat{s}_Y^2 + \hat{s}_Z^2} \quad \text{Gl. 19}$$

Es ist deutlich ersichtlich, dass der RMS-Wert unabhängig von der Raumrichtung ab einer Anzahl von drei Projektionszentren auf ein nahezu konstant niedriges Niveau abfällt, vgl. Abbildung 4.11.

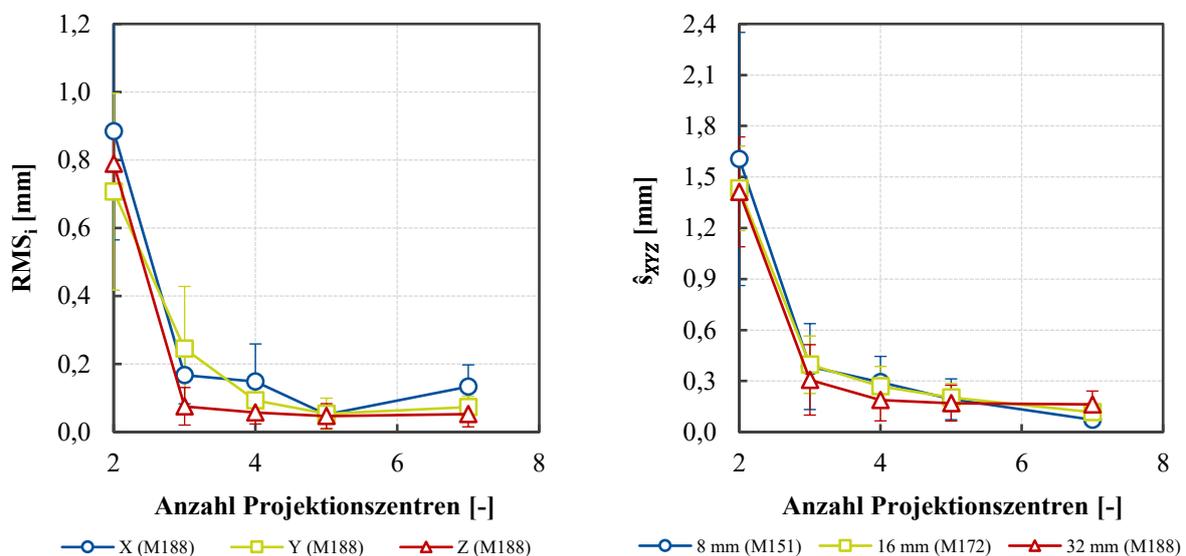


Abbildung 4.11: RMS_i -Werte der einzelnen Raumrichtungen (X, Y, Z) für eine Betonzusammensetzung (links) und resultierende \hat{s}_{XYZ} -Werte für unterschiedliche Betonzusammensetzungen (rechts) für Betonzusammensetzungen (siehe Angabe in Klammern) mit unterschiedlichem Größtkorn

Der RMS-Wert und demnach die mittlere Standardabweichung liegt ab drei Projektionszentren deutlich unter 0,3 mm. Bei Betrachtung der mittleren Standardabweichung \hat{s}_{XYZ} aller Raumrichtungen kann eine vergleichbare Veränderung in Abhängigkeit der gewählten Anzahl der Projektionszentren beobachtet werden. Mit zunehmender Anzahl der Projektionszentren ist dabei eine geringfügige Abnahme von \hat{s}_{XYZ} erkennbar. Die mittlere Standardabweichung \hat{s}_{XYZ} ist im Mittel mit 0,25 mm bei vier Projektionszentren jedoch bereits auf einem sehr geringen Niveau bei der gewählten Aufnahmekonfiguration.

In Abhängigkeit der in Abbildung 4.11 dargestellten mittleren Standardabweichung \hat{s}_{XYZ} und unter Berücksichtigung der reflexionsbasierten Eigenschaftsermittlung (vgl. Kapitel 4.9.2) werden für die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Aufnahmekonfiguration vier Projektionszentren bzw. die vier Kamerastandorte $C_{0,0}$, $C_{0,1}$, $C_{1,0}$, $C_{1,1}$ (vgl. Abbildung 4.4) gewählt. Anhand der aus diesen Mehrbildaufnahmen berechneten 3D-Oberflächenmodelle (Mesh) können sowohl 2D- als auch 3D-Oberflächenkennwerte zur Datenauswertung ermittelt werden. Zur Sicherstellung identischer Auswerte-Bereiche über alle Konsistenzbereiche werden die Oberflächenkennwerte ausschließlich in einer mittigen Fläche des ausgebreiteten Frischbetons mit einem Durchmesser von 350 mm ermittelt. Abbildung 4.12 gibt einen Überblick zur angewendeten Auswerte-Fläche.

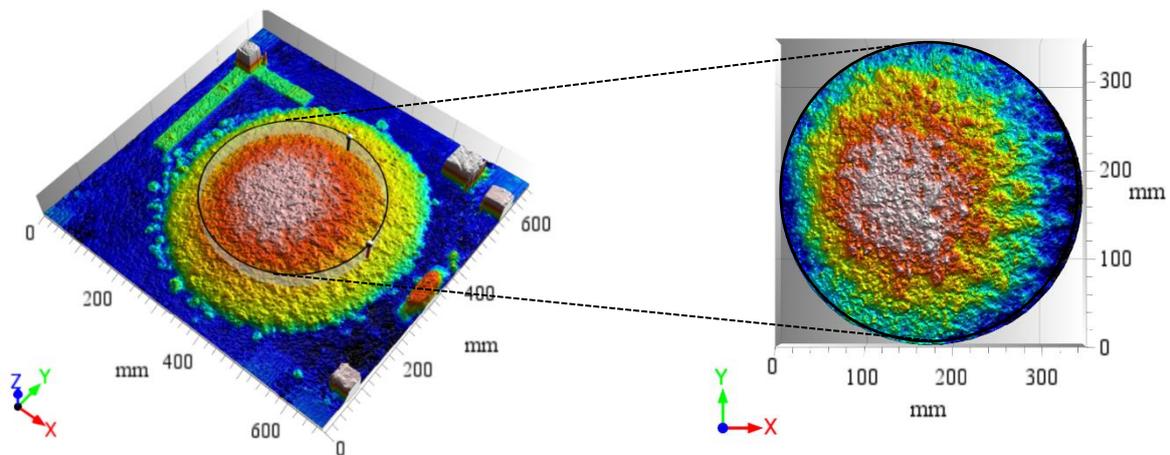


Abbildung 4.12: Eingesetzter Bereich zur Auswertung der 3D-Oberflächenkennwerte - Segmentierung eines Bereichs aus der Mitte des ausgebreiteten Frischbetons mit einem Durchmesser von 350 mm

4.8.2 Geometrische 2D-Eigenschaften

Die Ermittlung geometrischer 2D-Eigenschaften erfolgt im Rahmen dieser Arbeit an einer Einzelaufnahme des ausgebreiteten Frischbetons. Das Einzelbild wird annähernd senkrecht zum Ausbreittisch aufgenommen (Projektionszentrum $C_{3,0}$ (vgl. Abbildung 4.4)). Aufgrund des zentralperspektivischen Abbildungsmodells einer optischen Kamera, wird eine 3D-Szene nicht maßstabs- und winkeltreu auf die 2D-Ebene des Bildsensors und damit des Bildes abgebildet. Die Vergleichbarkeit daraus segmentierter Eigenschaften ist dementsprechend nicht automatisch gegeben. Mit Hilfe einer Homographie kann die projektive Transformation zwischen zwei

Ebenen (hier: Ebene des Ausbreittisches und Bildebene) in Form einer 3x3-Transformationsmatrix beschrieben werden. Dabei wird im zweidimensionalen Raum die 3x3-Transformationsmatrix \mathbf{H} mit acht Freiheitsgraden aus mindestens vier Bildpunkten $x_i \leftrightarrow x'_i$ (x_i = Bildpunkt in Ebene 1 und x'_i = Bildpunkt in transformierter Ebene 2) bestimmt, so dass gilt: $x'_i = \mathbf{H}x_i$ (Rodehorst 2004; Süße und Rodner 2014; Förstner und Wrobel 2016).

Im Rahmen dieser Arbeit werden als Korrespondenzpunkte die Eckpunkte des Ausbreittisches in der x-y Ebene genutzt. Weiterhin wird angenommen, dass der ausgebreitete Frischbeton in der Ebene des Ausbreittisches liegt, so dass gilt $z = 0$. Die räumliche Ausdehnung des Frischbetons in z-Richtung wird hierbei, aufgrund der deutlich geringeren Ausprägung gegenüber der x- und y-Richtung, vernachlässigt. Abbildung 4.13 zeigt ein Beispiel für die Anwendung der Homographie bei einer Einzelaufnahme des ausgebreiteten Frischbetons. Links ist dazu die Originalaufnahme eines ausgebreiteten Frischbetons auf dem Ausbreittisch (Projektionszentrum $C_{3,0}$) dargestellt. Zum Vergleich ist rechts daneben das mittels der errechneten Homographie transformierte Bild dargestellt. Anhand dieses Bildes ist eine Vergleichbarkeit segmentierter Bereiche mittels geometrischer 2D-Eigenschaften gegeben.

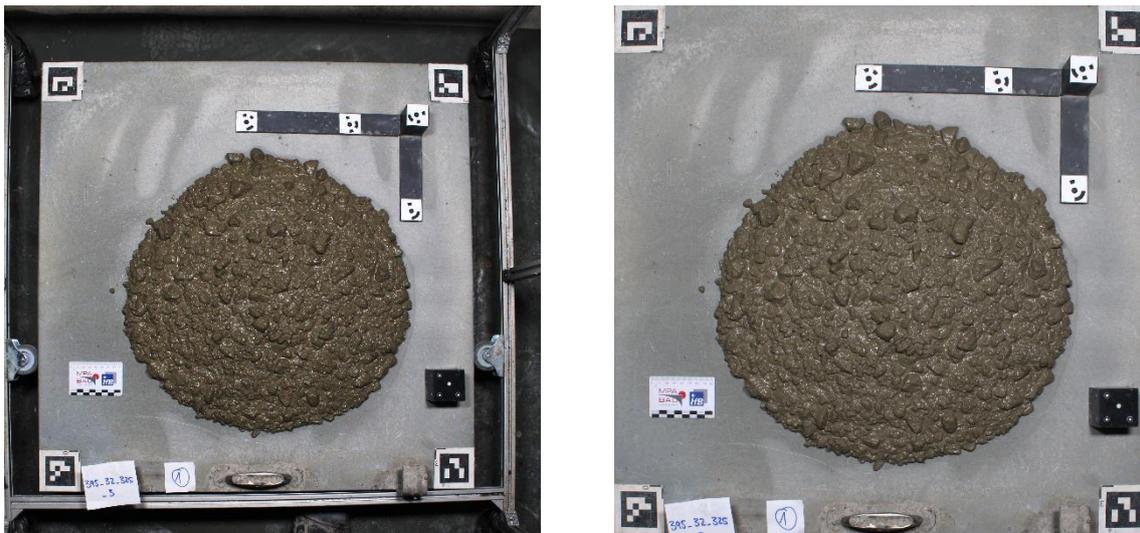


Abbildung 4.13: Ausgebreiteter Frischbeton auf dem Ausbreittisch - links: Originalaufnahme (Projektionszentrum $C_{0,0}$) und rechts: mittels Homographie in die Ebene des Ausbreittisches transformierte Abbildung

In einem weiteren Schritt erfolgt an der perspektivisch korrigierten Einzelaufnahme eine semantische Instanz-Segmentierung unter Anwendung eines Convolutional Neural Networks (vgl. Kapitel 2.7.1). Der ausgebreitete Frischbeton wird dabei in zwei Klassen – ‘Gesteinskörnung’ und ‘Hintergrund’ – kategorisiert. Die semantische Segmentierung erlaubt eine systematische pixeltreue Bestimmung einzelner Objektbereiche der Frischbetonoberfläche in der jeweiligen Einzelaufnahme. Infolge der Anwendung der semantischen Instanz-Segmentierung können zudem unterschiedliche Instanzen identischer Klasse unterschieden werden, z. B. sich

überlappende oder teilweise verdeckte Gesteinskörner. Eine zusammenfassende Beschreibung der einzelnen Methoden wurde bereits in Kapitel 4.4 gegeben.

Abbildung 4.14 gibt einen Überblick zur semantischen Segmentierung der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons. Eine zielsichere Segmentierung der groben Gesteinskörnung ist möglich. Infolge der Superposition (Abbildung 4.14, rechts) der segmentierten Gesteinskörner und dem ausgebreiteten Frischbeton ist eine nahezu vollständige Detektion der groben Gesteinskörner (≥ 4 mm) ersichtlich.

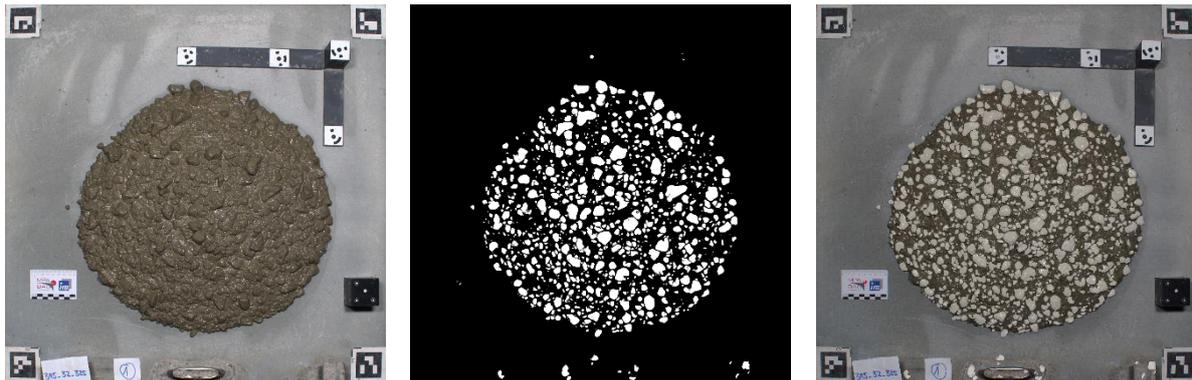


Abbildung 4.14: Ermittlung geometrischer 2D-Eigenschaften der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons; links: mittels Homographie transformierte Einzelaufnahme, mitte: Binärbild mittels CNN segmentierter grober Gesteinskörner; rechts: Superposition der detektierten Gesteinskörner (helle Farbgebung) mit dem ausgebreiteten Frischbeton

Auf Grundlage der semantischen Instanz-Segmentierung ist im Nachgang die Berechnung geometrischer 2D-Eigenschaften der einzelnen Gesteinskörner möglich, wie z. B. die Fläche (A_i), Umfang (P_i), minimaler oder maximaler Durchmesser ($d_{F,max}$; $d_{F,min}$) aber auch die Lage in einem definierten Koordinatensystem. Als Referenzmaßstab dient dabei der in seinen Ecken markierte Ausbreittisch mit den bekannten Dimensionen von 700 x 700 mm². Die so ermittelten geometrischen 2D-Eigenschaften der groben Gesteinskörner gestatten im Nachgang eine Umrechnung in betontechnologische bzw. granulometrische Eigenschaften, wie z. B. die Korngrößenverteilung oder in einzelne Kornformparameter. Weiterführende detaillierte Beschreibungen zu den geometrischen Beziehungen zwischen den 2D-Eigenschaften und den Kornformparametern werden in Kapitel 5.4.5 gegeben.

4.8.3 Reflexionsbasierte Eigenschaften

Die Ermittlung reflexionsbasierter Eigenschaften erfolgt im Rahmen dieser Arbeit in Anlehnung an das Messprinzip zur Ermittlung des Oberflächen-Glanzes mittels eines Reflektometers, vgl. Kapitel 2.5.2. Das Prinzip beruht auf der Erfassung der gerichteten Lichtreflexion. Die Intensität des reflektierten Lichts wird unter einem bestimmten vorgegebenen Winkel mit einem Sensor erfasst. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Sensor durch die Spiegelreflexkamera in der zuvor beschriebenen Aufnahmekonfiguration realisiert. Die Beleuchtung

erfolgt mit zwei LED-Strahlern. Zur zielsicheren Erfassung der gerichteten Lichtreflexion ist sicherzustellen, dass bei der Aufnahmekonfiguration der Einfallswinkel gleich dem Ausfallwinkel entspricht. Die Abbildung 4.15 zeigt dazu die verwendete Aufnahmekonfiguration zur Erfassung der Lichtreflexion. Die LED-Strahler beleuchten dabei die Oberfläche des Frischbetons in einem Einfallswinkel von $\alpha_i = 5,0^\circ$. Die Spiegelreflexkamera ist im identischen negativen Winkel zur Mittelachse angebracht. Aufgrund der Krümmung des ausgebreiteten Frischbetons wurde für die Kamera der Standort $C_{0,0}$ gewählt (vgl. Abbildung 4.4). So ist sichergestellt, dass eine Hälfte des ausgebreiteten Frischbetons nahezu vollständig mit den LED-Strahlern beleuchtet wird. Anhand der so erzeugten Einzelbildaufnahme können in weiteren Schritten reflexionsbasierte Eigenschaften der Frischbetonoberfläche extrahiert werden. Dabei ist zu beachten, dass veränderte Randbedingungen der Beleuchtung, sowohl Umgebungsbedingungen als auch Parameter der künstlichen Belichtung, zu nicht vergleichbaren Ergebnissen führen. Eine reproduzierbare Ermittlung und auch Vergleichbarkeit der reflexionsbasierten Eigenschaften ist demnach nur unter konstanten Beleuchtungsverhältnissen möglich.

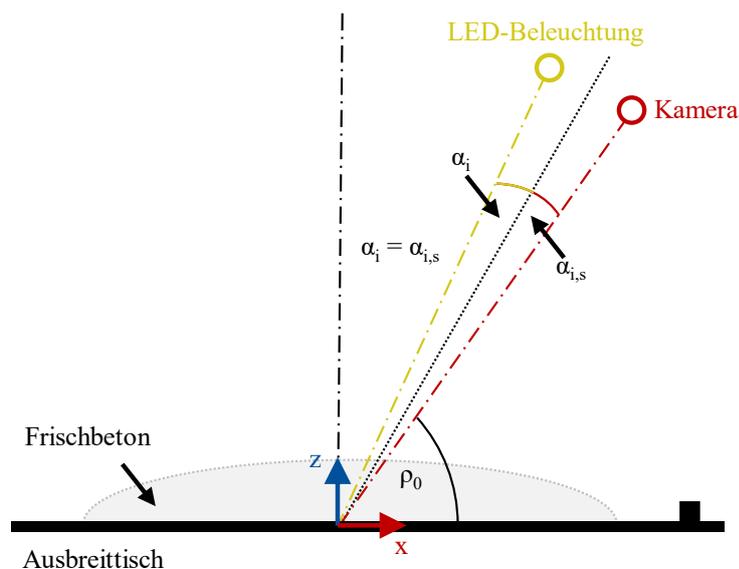


Abbildung 4.15: Schematische Darstellung der Aufnahmekonfiguration zur Ermittlung reflexionsbasierter Eigenschaften der Frischbetonoberfläche

Zur Auswertung der reflexionsbasierten Eigenschaften wurde der ausgebreitete Frischbeton auf der Einzelbildaufnahme digital halbkreisförmig freigestellt und in das 8-Bit-Bildformat konvertiert. Mit Hilfe digitaler Bildanalyse wurde in einem weiteren Schritt für den freigestellten Bereich die Häufigkeitsverteilung einzelner Intensitätswerte bzw. der Grauwerte (Histogramm) erstellt. Die Anzahl I der unterschiedlichen Grauwerte i entspricht $I = 2^8 = 256$ mit $i \in \{0; 255\}$. Je nach Reflexionseigenschaften der Frischbetonoberfläche weisen die einzelnen Pixel des freigestellten Bereichs bei konstanter Beleuchtung unterschiedliche Grauwerte und damit Intensitäten auf. Durch Auswertung der Häufigkeitsverteilung mittels punktorientiertem Segmentierungsverfahren (Schwellenwertverfahren) lassen sich Bereiche der

Frischbetonoberfläche in Abhängigkeit der Reflexion gliedern. Der Schwellenwert wurde im Rahmen dieser Arbeit mit dem Triangle-Algorithmus (Zack et al. 1977) ermittelt. Dabei wird eine virtuelle Linie vom Ursprung (hier $i_{or.} = 255$) zum Maximum der Häufigkeitsverteilung gezogen und der maximale lotrechte Abstand zur Häufigkeitsverteilung ermittelt (vgl. Abbildung 4.16). Der dazu korrespondierende Intensitätswert bzw. Grauwert wird als Schwellenwert θ herangezogen. Die anteilige Auswertung der mittels Schwellenwert segmentierten Bereiche gliedert die Häufigkeitsverteilung bzw. die Frischbetonoberfläche dementsprechend in Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften:

$$n_{no\ GL} < \theta < n_{GL} \tag{Gl. 20}$$

Hierin beschreibt $n_{no\ GL}$ die kumulierte Pixelanzahl i für die gilt $i < \theta$. Dagegen beschreibt n_{GL} die Pixelanzahl i mit erhöhten Reflexionseigenschaften, für die dementsprechend gilt $i > \theta$. Abbildung 4.16 gibt einen Überblick zur beschriebenen Vorgehensweise.

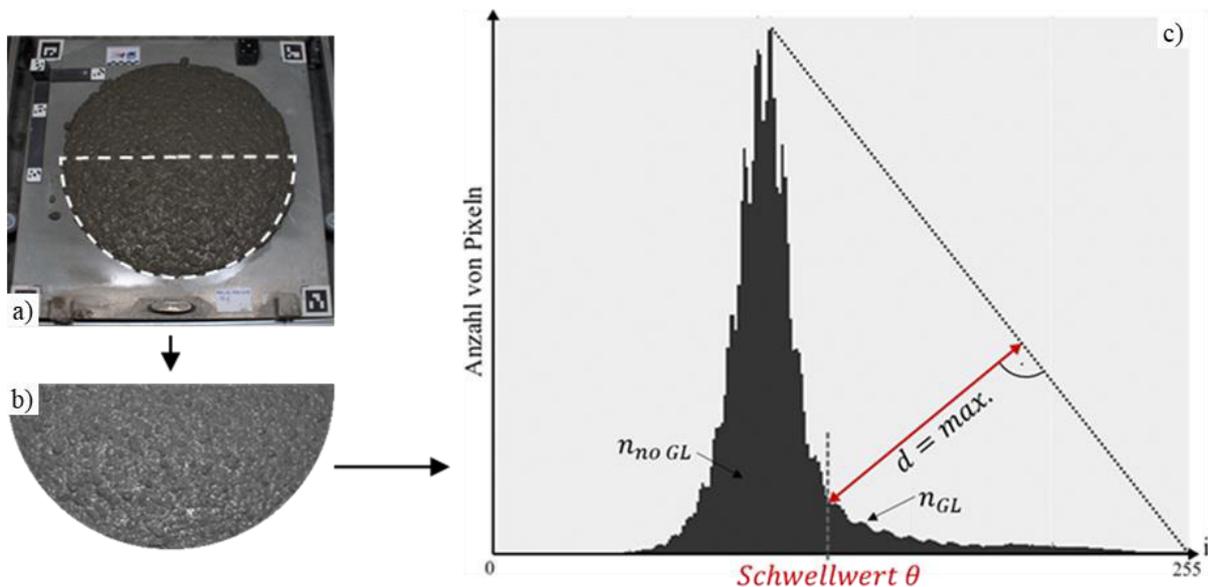


Abbildung 4.16: Schematischer Überblick zur Vorgehensweise der Extraktion reflexionsbasierter Eigenschaften der Frischbetonoberfläche - RGB-Bild (a), freigestellter Bereich der Frischbetonoberfläche (b) und Häufigkeitsverteilung mit Triangle-Algorithmus zur Schwellenwert-Ermittlung (c)

Die Fläche (A_{GK}) der an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons befindlichen groben Gesteinskörner kann im Normalfall keine erhöhten Reflexionseigenschaften aufweisen, da dort infolge des Energieeintrages (Schlag der Ausbreitplatte) kein Wasser an die Oberfläche gelangen kann. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung der Reflexionseigenschaften ausschließlich an der Fläche des Leimanteils des ausgebreiteten Frischbetons (A_{Leim}). Mit Hilfe semantischer Segmentierung unter Anwendung von CNN wird die Oberfläche hierzu in einzelne Klassen – ‚Gesteinskörnung‘ und ‚Leim‘ – eingeteilt. Die Vorgehensweise der Segmentierung entspricht den Ausführungen in Kapitel 4.8.2. Abbildung 4.17 zeigt beispielhaft die segmentierten Teilbereiche (A_{GK} und A_{Leim}) einer Frischbetonoberfläche.

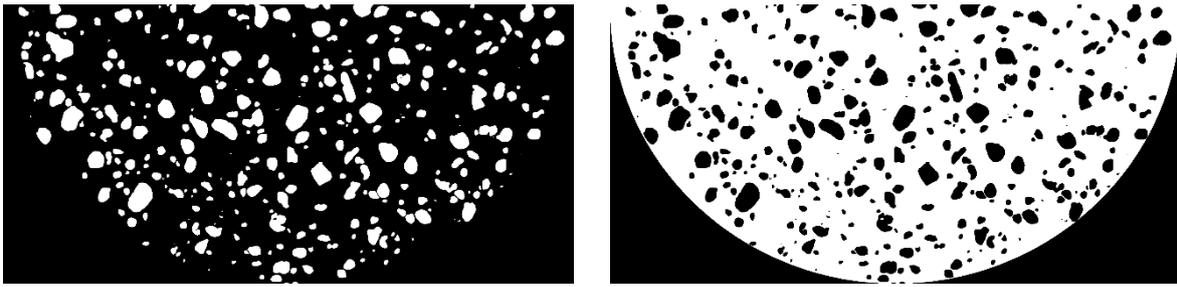


Abbildung 4.17: Segmentierte Teilbereiche (jeweils in weiß) der Frischbetonoberfläche – links: Gesteinskörnung und rechts: Leimanteil

Unter Berücksichtigung der segmentierten Teilbereiche und des Schwellenwertes θ kann eine Abschätzung der Oberflächenreflexion des Leimflächenanteils mittels Gl. 21 erfolgen:

$$b_{\text{RefL}} = \frac{n_{\text{Gl}} - n_{\text{Gl,GK}}}{n_{\text{Leim}}} \quad \text{Gl. 21}$$

Hierin beschreibt n_{Gl} die Anzahl der Pixel i der gesamten Frischbetonoberfläche (A_{FB}), für die gilt $i > \theta$ und $n_{\text{Gl,GK}}$ die Anzahl der Pixel i im segmentierten Bereich der Gesteinskörnung, für die gilt $i > \theta$. Die Anzahl der Pixel i der Leimfläche ($A_{\text{Leim}} = A_{\text{FB}} - A_{\text{GK}}$) wird von n_{Leim} beschrieben. Der Kennwert b_{RefL} beschreibt den Anteil der Pixel i des Leimanteils an der Oberfläche mit erhöhten Reflexionseigenschaften. Abbildung 4.18 gibt einen Überblick zur Verteilung dieser Pixel für die einzelnen Flächenanteile ($A_{\text{FB}}, A_{\text{GK}}, A_{\text{Leim}}$).

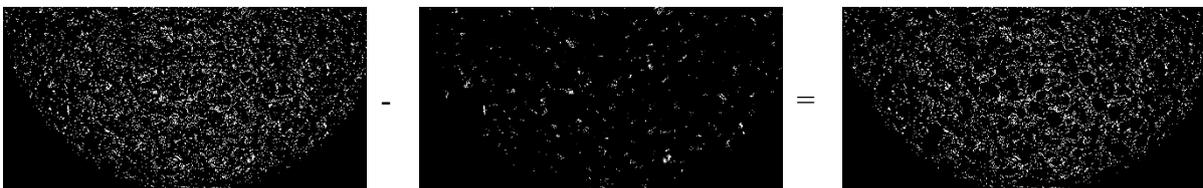


Abbildung 4.18: Verteilung der Pixel mit erhöhten Reflexionseigenschaften für die einzelnen Flächenanteile - links: A_{FB} = Fläche des gesamten ausgebreiteten Frischbetons; mitte: A_{GK} = Fläche der an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons befindlichen groben Gesteinskörner; rechts: A_{Leim} = Fläche des Leimanteils des ausgebreiteten Frischbetons

Als Maß für eine reproduzierbare Ermittlung der reflexionsbasierten Eigenschaften wurde die Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Farbtemperatur der LED-Strahler bestimmt. Die Messung der Beleuchtungsstärke erfolgte mit dem Messgerät *MS-200LED SE* (Fa. *VOLTCRAFT*) auf Höhe des Ausbreittisches. So kann sichergestellt werden, dass der Frischbeton mit einem reproduzierbaren flächenbezogenen Lichtstrom beleuchtet wird. Die Untersuchungen zeigten, dass bei der angewandten Aufnahmekonfiguration die Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Farbtemperatur vorerst zunimmt und ab einer Farbtemperatur von 4800 K die Steigung vereinzelt stagniert, vgl. Abbildung 4.19. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Untersuchungen mit einer Farbtemperatur von 4800 K durchgeführt. Hieraus resultiert eine Beleuchtungsstärke von ca. 400 bis 420 Lux, vgl. Abbildung 4.19.

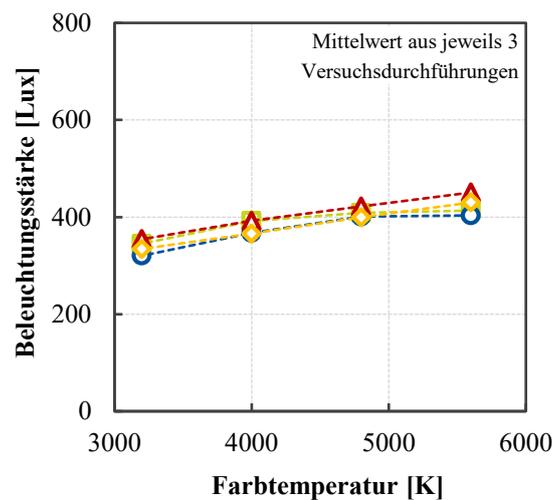


Abbildung 4.19: Beleuchtungsstärke des Frischbetons in Abhängigkeit der Farbtemperatur – Bestimmung der Beleuchtungsstärke auf Höhe des Ausbreittisches

4.9 Vergleichende Betrachtungen mit Referenz-Messmethoden

4.9.1 Oberflächengestalt und -textur

Zur Überprüfung der Eignung bzw. zur Validierung der Messmethodik wurde die Oberflächengestalt und -textur mithilfe eines berührungsfreien Profilmessgeräts (3D-Profilmeter) am Festbeton erfasst (vgl. Kapitel 4.3). Anhand der 3D-Oberflächenmodelle wurden im Nachgang 2D- als auch 3D-Oberflächenkennwerte ermittelt. Die Vorgehensweise bei der Probenentnahme und das Messprinzip sind in Kapitel 4.3 beschrieben. Die vergleichenden Betrachtungen zwischen den einzelnen Messmethoden erfolgte in drei Stadien:

- Mehrbildaufnahme am frischen ausgebreiteten Beton auf dem Ausbreittisch
- Mehrbildaufnahme am Festbeton (Aufnahmekonfiguration vgl. Kapitel 4.5)
- 3D-Profilmetermessungen an repräsentativen Festbetonproben (vgl. Kapitel 4.3)

Abbildung 4.20 visualisiert die 3D-Oberflächenmodelle in Abhängigkeit der zuvor genannten Messmethoden zur Datenaufnahme. Die Berechnung der 3D-Punktwolken erfolgte dabei unabhängig von der Messmethode zur Datenaufnahme jeweils nach dem gleichen Prinzip, vgl. Kapitel 4.8.1. Abbildung 4.20 stellt jeweils einen mittigen Ausschnitt mit einer Fläche von 100 x 100 mm² der Oberfläche des ausgebreiteten Betons dar. Die Oberflächengestalt mit vereinzelt Körnern der groben Gesteinskörnung ist unabhängig der Messmethode und der Anwendung am festen oder frischen Beton deutlich ersichtlich. Darüber hinaus ist der erhöhte Detaillierungsgrad bei der Datenaufnahme mit dem 3D-Profilmeter am Festbeton erkennbar. So können dort die Strukturen der einzelnen groben Gesteinskörner einwandfrei visuell wahrgenommen werden. Bei Anwendung der Mehrbildaufnahme nimmt der Detailgrad ab und die Strukturen sind leicht verwischt erkennbar. Dies nimmt bei der Anwendung am Frischbeton

gegenüber der Anwendung am Festbeton geringfügig zu. Unter Beachtung der identischen Aufnahmekonfiguration ist dies vor allem auf die feuchte Oberfläche des Frischbetons zurückzuführen. Darüber hinaus findet während des Hydratationsprozesses ein gewisses Schrumpfen der Zementsteinmatrix statt, welches die Strukturen und Konturen im festen Zustand deutlich besser erkennen lässt.

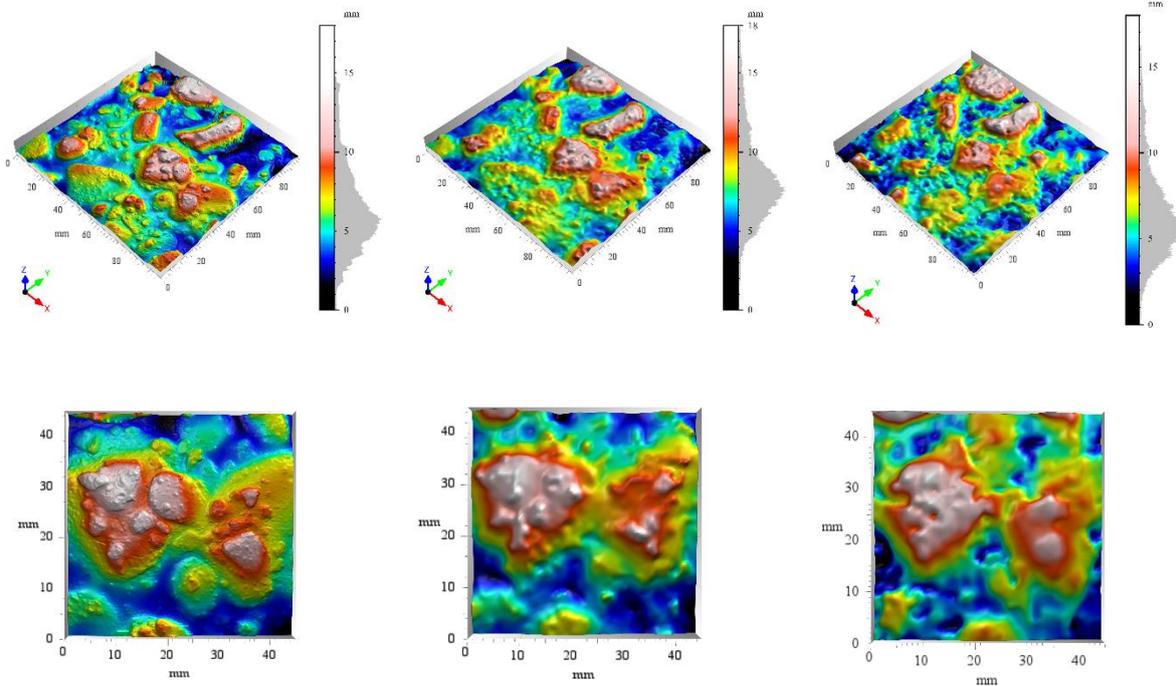


Abbildung 4.20: 3D-Oberflächenmodelle in Abhängigkeit der Messmethode zur Datenaufnahme (3D-Profilometer am Festbeton (links), Mehrbildaufnahme am Festbeton (mitte) und Mehrbildaufnahme am Frischbeton (rechts)) mit dazugehörigen Detailaufnahmen

Die visuelle Wahrnehmung wird durch die Betrachtung der Oberflächengestalt bzw. -textur im 2D-Profil bestätigt. Abbildung 4.21 zeigt 2D-Profile der Oberfläche in Abhängigkeit der Messmethode zur Datenaufnahme. Es ist sowohl das Primärprofil als auch das Welligkeits- und Rauheitsprofil dargestellt. Das Cut-Off Kriterium wurde dabei mit 16 mm festgelegt.

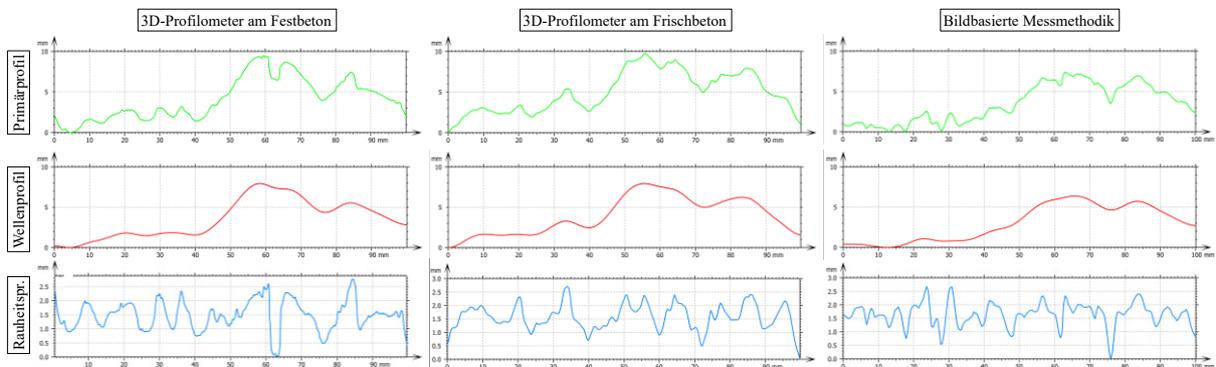


Abbildung 4.21: Primärprofil (oben), Welligkeit (mitte) und Rauheit (unten) eines 2D-Profilschnittes in Abhängigkeit der Messmethode zur Datenaufnahme (3D-Profilometer am Festbeton (links), Mehrbildaufnahme am Festbeton (mitte) und Mehrbildaufnahme am Frischbeton (rechts))

Bei vereinfachter Betrachtung ist eine adäquate Übereinstimmung der Primärprofile und demnach der Oberflächengestalt unabhängig der Messmethode zur Datenaufnahme ersichtlich. Ebenso ist eine visuelle Übereinstimmung der Welligkeitsprofile erkennbar. Das Rauheitsprofil zeigt dagegen in Abhängigkeit der Messmethode zur Datenaufnahme signifikante Unterschiede.

Anhand der zuvor beschriebenen visuellen Wahrnehmungen sowohl der Oberflächen als auch der 2D-Profile (Primär-, Welligkeit-, Rauheitsprofil) kann festgehalten werden, dass mit der Mehrbildaufnahme eine 3D-Rekonstruktion der Oberfläche mit vergleichbarer Auflösung gegenüber der Referenzmethode möglich ist. Dabei ist zu beachten, dass die Makro-Rauheit bzw. Welligkeit sehr gut ermittelbar ist, die (Mikro-)Rauheit mit der Mehrbildaufnahme und der angewendeten Aufnahmekonfiguration jedoch nicht zielsicher ermittelbar ist.

Nachfolgend werden einzelne 3D-Oberflächenkennwerte miteinander verglichen, die an den jeweiligen rekonstruierten 3D-Oberflächenmodellen der unterschiedlichen Messmethoden ermittelt wurden. So soll eine Einschätzung ermöglicht werden, ob die Genauigkeit der Rekonstruktion der Makro-Rauheit zur Berechnung gängiger Oberflächenkennwerte ausreicht. Die vorliegenden Betrachtungen werden dabei gezielt auf die Berechnung des Amplituden-Kennwertes S_z , des Hybrid-Kennwertes S_{dr} und der funktionsorientierten Kennwerte S_k und V_{mc} eingegrenzt.

Abbildung 4.22 zeigt den Amplitudenkennwert S_z und den funktionsorientierten Kennwert S_k in Abhängigkeit der Messmethode. Es sind jeweils die Kennwerte, die aus der Mehrbildaufnahme am Festbeton sowie am Frischbeton ermittelt wurden, dargestellt. Zum Vergleich wird jeweils der mit der Referenzmethode (3D-Profilometer) berechnete Oberflächenkennwert aufgeführt. Unabhängig davon, ob die Mehrbildaufnahme am Fest- oder Frischbeton erfolgte, ist eine akzeptable Übereinstimmung des Amplitudenkennwertes S_z mit der Referenzmethode feststellbar, vgl. Abbildung 4.22, links. Die Abweichungen beim Oberflächenkennwert S_k gegenüber der Referenzmethode sind dagegen deutlich größer, vgl. Abbildung 4.22, rechts.

Auffallend bei beiden Kennwerten (S_z und S_k) in Abbildung 4.22 ist ein Anstieg im geringen Wertebereich bei Ermittlung mittels Mehrbildaufnahme am Frischbeton gegenüber der Ermittlung am Festbeton, vgl. Abbildung 4.22 (rote Markierung). Erklärbar ist der deutliche Anstieg mit dem in Abbildung 4.23 dargestellten Hybrid-Kennwert S_{dr} . Dieser drückt das Verhältnis der wahren Oberfläche zur Messfläche aus und ist ein Maß für die Rauheit der Oberfläche, vgl. Kapitel 2.5.4. Dabei handelt es sich um den Prozentsatz der zusätzlichen Fläche des Definitionsbereichs, der auf die Textur zurückzuführen ist, im Vergleich zum absolut ebenen Definitionsbereich. In Abbildung 4.23 ist im geringen Wertebereich ebenfalls ein deutlicher Anstieg der Kennwertes S_{dr} bei einer Ermittlung mittels Mehrbildaufnahme am Frischbeton gegenüber der Ermittlung am Festbeton erkennbar. Demnach weisen diese Oberflächen eine erhöhte Rauheit gegenüber der Referenzmethode auf. Dieses steht im Gegensatz zu der zuvor beschriebenen nicht zielsicheren Ermittlung der (Mikro-)Rauheit mit der angewendeten Aufnahmekonfiguration bei der Mehrbildaufnahme am Frischbeton. Da jedoch insbesondere bei

sehr glatten Oberflächen und dementsprechend geringen Sdr -Werten bei der Berechnung der 3D-Punktwolke nur wenige korrespondierende Verknüpfungspunkte zur Verfügung stehen, muss ein großer Teil der 3D-Oberfläche mittels Interpolation rekonstruiert werden. Dabei entsteht eine geringfügig erhöhte Rauheit bei der Anwendung der Mehrbildaufnahme zur 3D-Rekonstruktion der Oberfläche und führt somit im geringen Wertebereich zu erhöhten Sdr -, Sz - und Sk -Kennwerten.

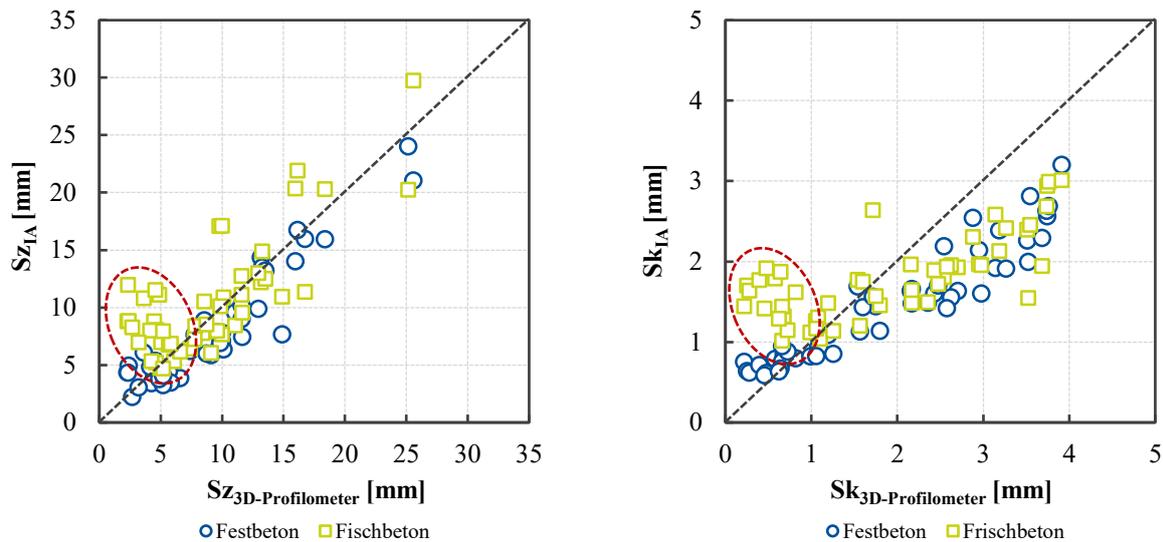


Abbildung 4.22: Oberflächenkennwert Sz (links) und Oberflächenkennwert Sk (rechts) in Abhängigkeit der Messmethodik (IA = bildbasierte Methodik) zur Rekonstruktion des 3D-Oberflächenmodells; Gegenüberstellung mit der Referenzmethode

Demgegenüber kann bei Betrachtung des Sdr -Kennwertes im höheren Wertebereich eine deutliche Reduzierung des Kennwertes bei der Ermittlung mittels Mehrbildaufnahme gegenüber der Referenzmethode festgestellt werden. Dies ist vor allem auf die höhere Genauigkeit der Referenzmethode und somit der ermittelbaren (Mikro-)Rauheit zurückzuführen. Die Reduktion des Sdr -Wertes kann visuell anhand der in Abbildung 4.20 dargestellten 3D-Oberflächen abgeschätzt werden. So weist die 3D-Oberfläche, die mit der Referenzmethode ermittelt wurde einen Sdr -Wert von 30,8 % auf. Dagegen reduzieren sich die Sdr -Werte für den entsprechenden Oberflächenbereich bei Ermittlung mittels Mehrbildaufnahme am Frischbeton auf 20,4 % und am Festbeton auf 15,6 %.

Der Vmc -Kennwert zeigt unabhängig, ob am Frisch- oder Festbeton ermittelt eine sehr gute Übereinstimmung mit der Referenzmethode über den gesamten Wertebereich, vgl. Abbildung 4.23, rechts. Lediglich eine geringfügige Verschiebung zu etwas höheren Vmc -Werten kann bei der Ermittlung am Frischbeton beobachtet werden. Da zur Berechnung des funktionsorientierten Kennwertes Vmc die Oberfläche volumenmäßig integral berücksichtigt wird, ist dieser Kennwert deutlicher robuster gegenüber einzelnen Spitzen oder Tälern als z. B. der Amplituden-Kennwert Sz . Deutlich wird dies an der verminderten Streuung des Vmc -Kennwertes in Abhängigkeit der unterschiedlichen Messmethoden.

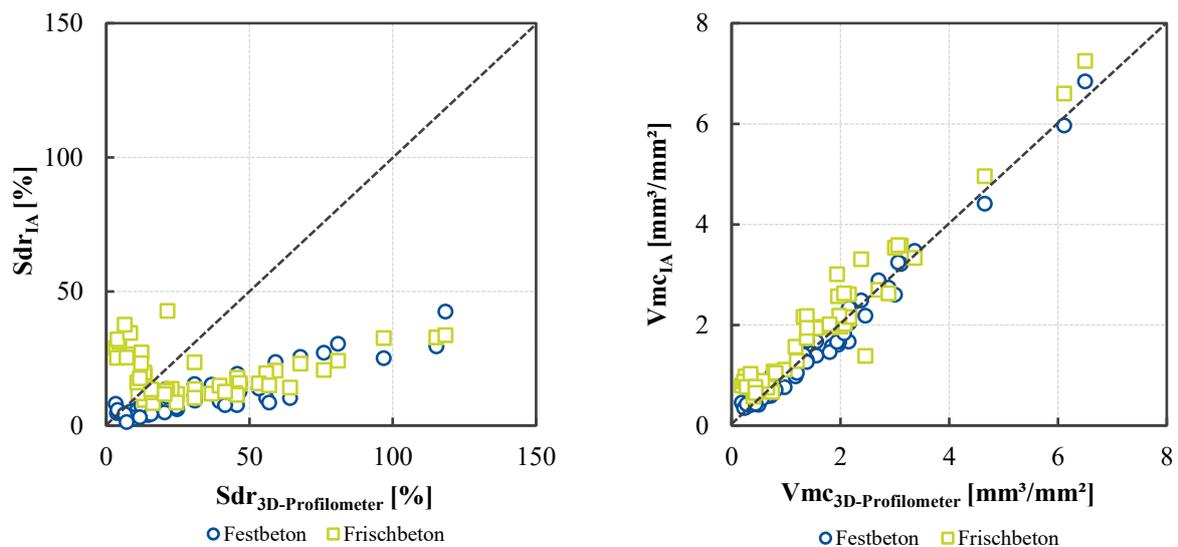


Abbildung 4.23: Oberflächenkennwert Sdr (links) und Oberflächenkennwert Vmc (rechts) in Abhängigkeit der Messmethodik (IA = bildbasierte Methodik) zur Rekonstruktion des 3D-Oberflächenmodells; Gegenüberstellung mit der Referenzmethode

Zusammenfassend kann festgehalten, dass mit der entwickelten Messmethodik bzw. der Mehrbildaufnahme am Frischbeton unter Anwendung der gewählten Aufnahmekonfiguration eine zielsichere Quantifizierung gängiger Oberflächenkennwerte möglich ist. Die Übereinstimmung mit der Referenzmethode ist dabei bei einzelnen Kennwerten u. a. vom Wertebereich abhängig. Vor allem funktionsorientierte Volumen-Kennwerte lassen sich zielsicher ermitteln. Darüber hinaus können die nachfolgenden grundsätzlichen Erkenntnisse zur Genauigkeit der Messmethodik zusammenfassend genannt werden:

- Eine 3D-Rekonstruktion der Oberflächengestalt ist mittels Mehrbildaufnahme unter Anwendung der gewählten Aufnahmekonfiguration mit vergleichbarer Auflösung wie bei der Referenzmethode (3D-Profilometer) möglich.
- Die Makro-Rauheit bzw. Welligkeit ist mit der Methodik bzw. der Auswertung mittels Photogrammetrie am Frischbeton zielsicher ermittelbar.
- Eine Ermittlung bzw. Rekonstruktion der (Mikro-)Rauheit ist mit der entwickelten Methodik unter Anwendung der gewählten Aufnahmekonfiguration nicht möglich.

4.9.2 Reflexionseigenschaften

Um Rückschlüsse zur Eignung optischer Eigenschaften der Betonoberfläche zur Abschätzung einzelner (Frisch-)Betoneigenschaften, wie z. B. der Wasserabsonderung, ziehen zu können, wurde mit Hilfe eines berührungsfreien Spektralphotometers die zeitabhängige Entwicklung des Oberflächenglanzes von Mörtelproben bestimmt. Die Untersuchungen wurden an zylindrischen Mörtelprobekörpern mit einer Höhe von 15 cm und einem Durchmesser von 5,0 cm durchgeführt. Es wurde in einem definierten Zeitintervall die Entwicklung des Glanzes der Oberfläche mit einem Einfallswinkel des Lichts von 60° bestimmt. Darüber hinaus wurde an

den Mörtelproben die Setzung des Mörtels nach 24 Stunden ermittelt, so dass auf die abgesonderte Wassermenge der Mörtel geschlossen werden konnte. Eine Messung an deutlich raueren Betonoberflächen, insbesondere während der Konsistenzprüfung, war mit dem eingesetzten Messgerät nicht möglich.

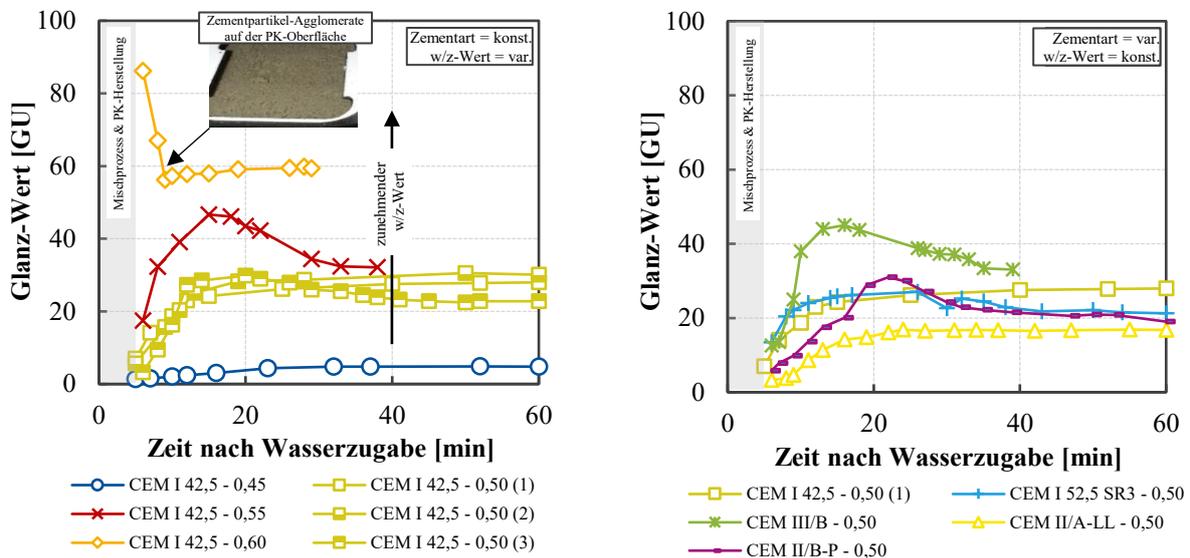


Abbildung 4.24: Zeitliche Entwicklung des Glanzes bei identischer Zementart und unterschiedlichen w/z-Werten (links) und zeitliche Entwicklung des Glanzes bei unterschiedlichen Zementarten und konstantem w/z-Wert (rechts)

Abbildung 4.24 (links) zeigt die zeitabhängige Entwicklung des Oberflächenglanzes von Mörtelproben mit unterschiedlichem w/z-Wert unter Verwendung der identischen Zementart. Deutlich ersichtlich ist eine Zunahme des Glanz-Wertes mit zunehmenden w/z-Wert. So weist die Probe mit einem w/z-Wert von 0,60 nach 15 Minuten einen Glanz-Wert von ca. 58,0 auf. Dagegen beträgt der Glanz-Wert zur gleichen Zeit bei einem w/z-Wert von 0,45 ca. 2,80. Auffällig ist darüber hinaus der Verlauf der Glanzentwicklung in den ersten Minuten nach der Herstellung. Bei einem w/z-Wert von 0,45 kann nur ein sehr geringer zeitabhängiger Anstieg des Glanz-Wertes festgestellt werden. Mit steigenden w/z-Wert lässt sich eine zunehmend steilere Veränderung in diesem Zeitintervall feststellen. Eine Ausnahme stellt dabei die Probe mit einem w/z-Wert von 0,60 dar. Dort wird direkt nach Herstellung ein starker Abfall des Glanz-Wertes festgestellt, bis sich nach wenigen Minuten ein konstanter Glanzwert einstellt. Zurückzuführen ist dies auf eine schnelle Ansammlung feiner Zementpartikel-Agglomerate auf der sich bildenden Flüssigkeitsschicht an der Oberfläche der Probe, vgl. Abbildung 4.24. Sobald sich ein konstanter Glanz-Wert einstellt, ist annähernd die gesamte Oberfläche mit solchen Agglomeraten bedeckt. Die beschriebene Agglomerat-Bildung an der Oberfläche erklärt auch den Abfall des Glanz-Wertes bei der Probe mit einem w/z-Wert von 0,55. Dort setzte die Agglomerat-Bildung jedoch deutlich zeitverzögert, ab ca. 18 Minuten nach Herstellung, ein. Die Variation der Zementart bei konstanten w/z-Wert führte zu zeitabhängigen Verläufen des Oberflächen-Glanzes mit vergleichbarer Charakteristik, jedoch mit unterschiedlichen Maxima der Glanz-Werte, vgl. Abbildung 4.24 rechts.

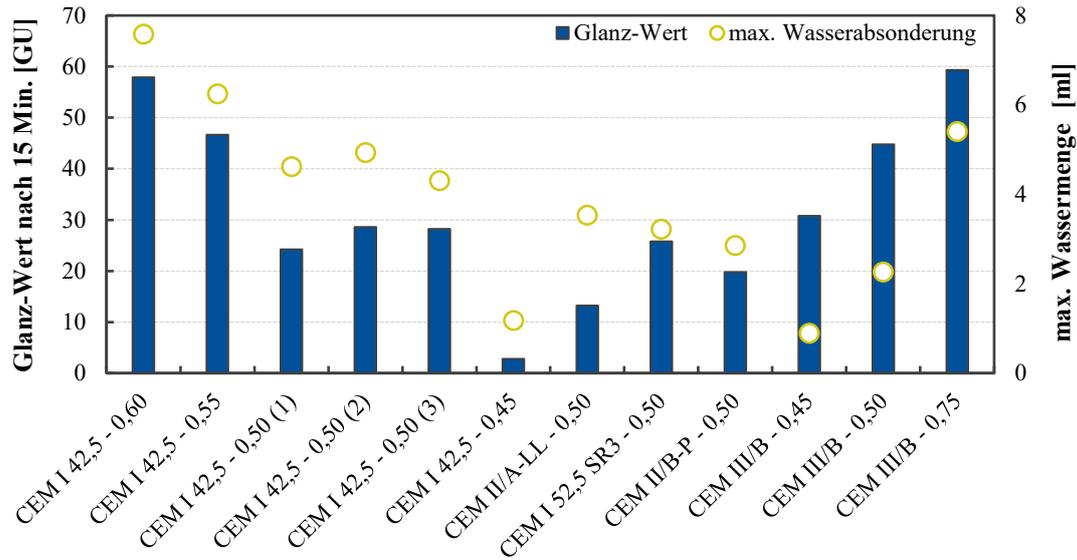


Abbildung 4.25: Glanz-Wert der Mörteloberfläche nach 15 Minuten sowie maximale Wasserabsonderung in Abhängigkeit der Zementart und des w/z-Wertes

Zur Abschätzung der Eignung des Oberflächenglanzes wurde zur Prognose der maximalen Wasserabsonderung als Vergleichs-Messgröße die Setzung des Mörtels nach 24 Stunden ermittelt. Anhand dessen erfolgte eine Umrechnung auf die maximale Wassermenge. Abbildung 4.25 zeigt den Glanz-Wert nach 15 Minuten in Abhängigkeit der maximalen Wasserabsonderung für alle untersuchten Mörtelproben unter Variation der Zementart und des w/z-Wertes. Grundsätzlich ist ein systematischer Zusammenhang zwischen diesen beiden Kennwerten erkennbar. So kann z. B. bei Variation des w/z-Wertes eine Abnahme der maximalen Wasserabsonderung als auch des Glanz-Wertes nach 15 Minuten festgestellt werden.

Der beschriebene Zusammenhang zwischen der maximalen Wasserabsonderung und dem Glanz-Wert der Mörteloberfläche nach 15 Minuten unter Variation des w/z-Wertes ist in Abbildung 4.26 (links) noch einmal verdeutlicht. Ein direkter Zusammenhang dieser beiden Kennwerte ist deutlich ersichtlich: Mit zunehmender Wasserabsonderung steigt auch der Glanz-Wert nach 15 Minuten. Veränderungen der chemisch-physikalischen Eigenschaften des verwendeten Zementes führen zu einer veränderten Wasserabsonderung der Mörtel, vgl. Kapitel 2.3.2. Der Zusammenhang zwischen dem Oberflächenglanz und der maximalen Wasserabsonderung gilt prinzipiell auch für unterschiedliche Zementarten (CEM II), vgl. Abbildung 4.26, rechts. Der Einsatz eines sehr zusatzstoffreichen Zementes (CEM III/B) führt dagegen zu einer veränderten Charakteristik zwischen den beiden Messgrößen, wobei auch dort innerhalb der Zementart ein direkter Zusammenhang vorliegt. CEM III/B führt unabhängig vom w/z-Wert zu einem erhöhten Glanz-Wert bei einer geringeren maximal abgesonderten Wassermenge.

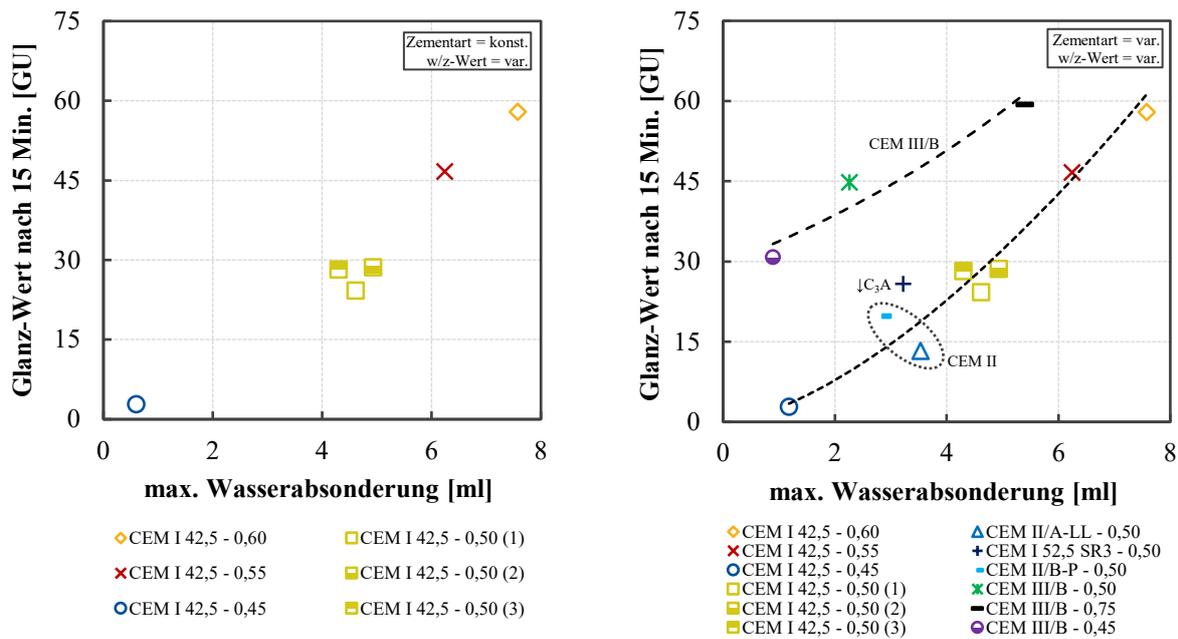


Abbildung 4.26: Glanz-Wert der Mörteloberfläche 15 Minuten nach Wasserzugabe in Abhängigkeit der maximalen Wasserabsonderung; links: in Abhängigkeit des w/z-Wertes und rechts: in Abhängigkeit der Zementart; Trendlinien gemäß Gl. 22 und Gl. 23

Die maximale Wasserabsonderung kann entsprechend der in Abbildung 4.26, rechts dargestellten Zusammenhänge anhand des Glanz-Wertes der zylindrischen Mörtel-Probekörper, ermittelt 15 Minuten nach Wasserzugabe, in Abhängigkeit der Zementart mit der Gl. 22 und Gl. 23 prognostiziert werden.

$$\text{CEM I und CEM II} \quad WA_{max} = 2,67 \cdot GU_{15}^{1,55} \quad (R^2_{adj.} = 0,90) \quad \text{Gl. 22}$$

$$\text{CEM III/B} \quad WA_{max} = 29,5 \cdot GU_{15}^{0,14} \quad (R^2_{adj.} = 0,82) \quad \text{Gl. 23}$$

Hierin beschreibt WA_{max} die maximale abgesonderte Wassermenge, hier ermittelt anhand der Setzung nach 24 Stunden und GU_{15} den Glanz-Wert der Mörteloberfläche ermittelt 15 Minuten nach Wasserzugabe.

Die zuvor beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass auf Basis der optischen Eigenschaften bzw. der zeitlichen Entwicklung des Oberflächenglanzes von Mörtelproben bereits 15 Minuten nach Wasserzugabe eine zielsichere Abschätzung der absoluten Wasserabsonderung möglich ist. Demnach kann eine schnelle und zeitnahe Prognose der absoluten Wasserabsonderung nach vielen Stunden unmittelbar nach der Herstellung des Mörtels erfolgen. Übertragen auf Beton und insbesondere auf die Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) bedeutet dies, dass auch dort eine unmittelbare (relative) Abschätzung der Wasserabsonderung anhand der optischen Eigenschaften des ausgebreiteten Betons möglich zu sein scheint. Es ist lediglich eine für das Prüfverfahren und die Prüfandbedingungen kompatible Mess- und Auswertemethodik notwendig.

4.10 Präzisionsdaten

4.10.1 Abschätzung der Wiederholpräzision

3D-Oberflächenkennwerte

Die Abschätzung der Wiederholpräzision erfolgt in der vorliegenden Arbeit an ausgewählten Betonzusammensetzungen des gesamten Konsistenzbereiches von F2 bis F6. Die Parameter der einzelnen Betonzusammensetzungen wurden bereits in Tabelle 4.1 vorgestellt. An zwölf Betonzusammensetzungen wurden jeweils drei Wiederholungsversuche durchgeführt. Die Prüfungsdurchführung sowie Anwendung der bildbasierten Messmethodik erfolgte an drei verschiedenen Prüfgeräten (Ausbreitische gemäß *DIN EN 12350-5*) und wurde von zwei Prüfenden durchgeführt. Dabei wurde ein Prüfgerät jeweils durchgängig von einem Prüfenden bedient. Die in diesem Kapitel ermittelte Präzision stammt demnach aus Prüfstreuungen der Versuchsdurchführung (jeweils gleicher Prüfer und gleiches Prüfgerät) sowie der stofflich bedingten Streuungen der Betonzusammensetzungen.

Gemäß *DIN ISO 5725-1* kann zwischen dem Streuungsmaß und dem untersuchten Merkmal eine funktionale Beziehung bestehen. Aus Abbildung 4.27 geht jedoch hervor, dass die ermittelten Variationskoeffizienten unabhängig vom untersuchten Merkmal streuen. Dies ist sowohl beim Ausbreitmaß a_{10} (Abbildung 4.27, links) als auch beim Oberflächenkennwert V_{mc} (Abbildung 4.27, rechts) der Fall.

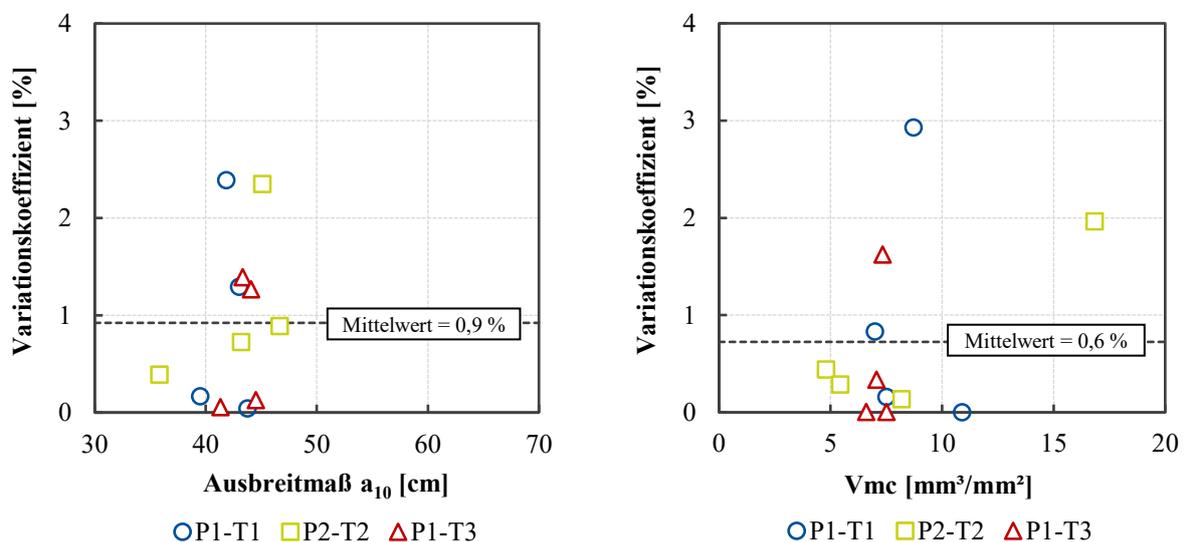


Abbildung 4.27: Variationskoeffizienten bei der Ermittlung der Konsistenz und der Oberflächenkennwerte in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes (links) und des Oberflächenkennwertes V_{mc} (rechts); P = Prüfer und T = Prüfgerät

Der mittlere Variationskoeffizient bei der Ermittlung der Konsistenz unter Berücksichtigung des Prüfenden und des Prüfgerätes wurde in der vorliegenden Arbeit zu 0,9 % ermittelt.

BONZEL und KRELL (1986) bestimmen in ihren Untersuchungen einen mittleren Variationskoeffizienten von 3,0 % für die Ermittlung des Ausbreitmaßes. WIERIG und NELSKAMP (1983) geben darüber hinaus eine Wiederholstreuung für den Ausbreitversuch von ca. 1,0 cm an. Zur Abschätzung der Präzisionsdaten der bildbasierten Messmethodik wird stellvertretend der Oberflächenkennwert Vmc betrachtet. Der mittlere Variationskoeffizient in Abhängigkeit des Oberflächenkennwertes Vmc beträgt für die untersuchten Betonzusammensetzungen 0,6 %. Demzufolge können mit der entwickelten Messmethodik Oberflächenkennwerte im Rahmen der Konsistenzprüfung bei Durchführung durch einen Prüfer an einem Prüfgerät mit einer leicht geringeren Prüfstreuung als beim Ausbreitmaß zielsicher ermittelt werden.

Reflexionsbasierte Eigenschaften

An sechs Betonzusammensetzungen des gesamten Konsistenzbereiches (F2 bis F6) wurden jeweils drei Wiederholungsuntersuchungen mit einem Prüfenden und einem Prüfgerät durchgeführt. Abbildung 4.28 zeigt die Variationskoeffizienten bei der Ermittlung der reflexionsbasierten Eigenschaften in Abhängigkeit des Parameters b_{RefL} . Eine Abhängigkeit vom untersuchten Merkmal b_{RefL} ist nicht feststellbar. Der mittlere Variationskoeffizient der reflexionsbasierten Eigenschaften unter Berücksichtigung des Prüfenden und Prüfgerätes beträgt 4,7 %. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs wird auf die explizite Angabe einer Wiederholpräzision im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Eine zielsichere Anwendung der entwickelten Methodik zur Ermittlung reflexionsbasierter Eigenschaften kann anhand der Untersuchungen jedoch angenommen werden.

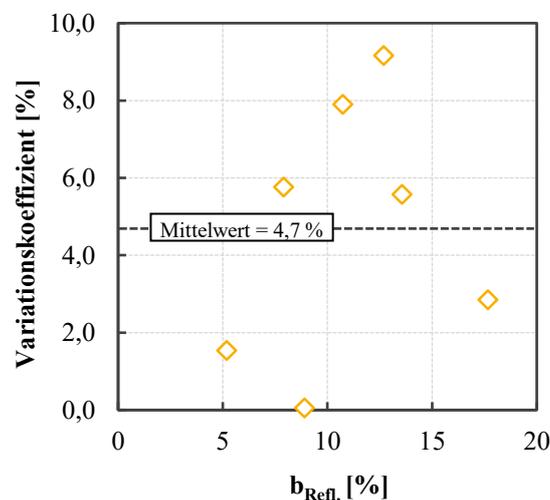


Abbildung 4.28: Variationskoeffizienten bei der Ermittlung reflexionsbasierter Eigenschaften in Abhängigkeit von b_{RefL} .

4.10.2 Abschätzung der Präzision unter Zwischenbedingungen

Eine Abschätzung der Präzision unter Zwischenbedingungen (d. h. bei gleichzeitiger Variation von Herstellung, Prüfende und Prüfgerät ($M = 3$)) erfolgt an einem breiten Spektrum von Betonzusammensetzungen des gesamten Konsistenzbereiches (F2 bis F6). Die Prüfungen wurden,

wie im vorherigen Kapitel beschrieben, jeweils von zwei Prüfenden an drei Prüfgeräten durchgeführt. Dabei wurde ein Prüfgerät jeweils durchgängig von einem Prüfenden bedient. Die Präzision unter Zwischenbedingungen wurde ausschließlich für die 3D-Oberflächenkennwerte ermittelt. Abbildung 4.29 zeigt die Variationskoeffizienten sowohl in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10} (links) als auch in Abhängigkeit von Vmc (rechts). Die einzelnen Variationskoeffizienten stellen die Prüfstreuung einer Betonzusammensetzung unter Berücksichtigung des Einflusses der Herstellung, dem Prüfenden und dem Prüfgerät dar.

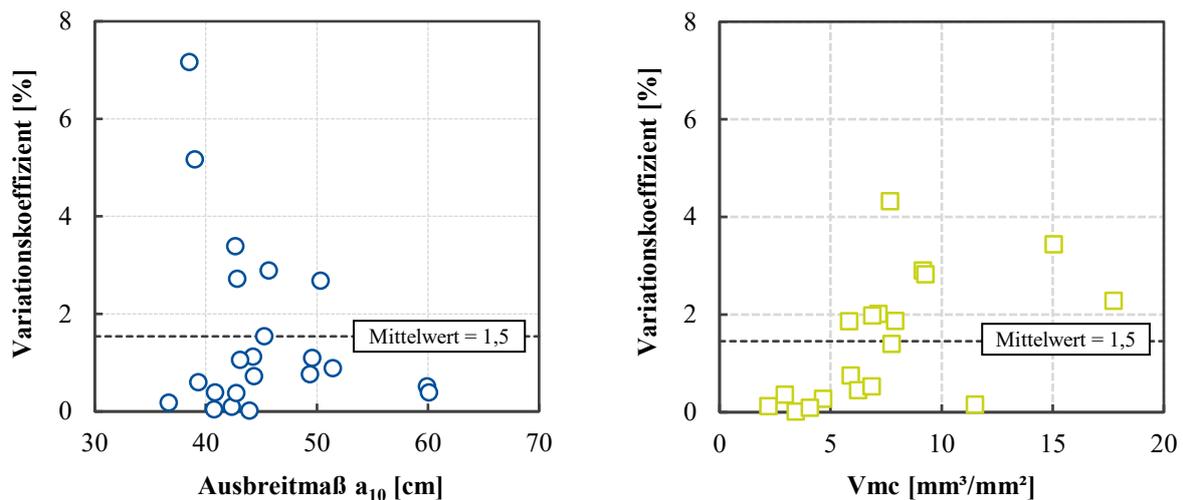


Abbildung 4.29: Präzision unter Zwischenbedingungen ($M = 3$) bei der Ermittlung der Konsistenz und der Oberflächenkennwerte, ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10} (links) und des Oberflächenkennwertes Vmc (rechts)

Eine Abhängigkeit zwischen dem Streuungsmaß und dem untersuchten Merkmal ist bei beiden Merkmalen nicht feststellbar. Im Mittel beträgt der Variationskoeffizient unter Berücksichtigung des Einflusses der Herstellung, des Prüfenden und des Prüfgerätes für die Konsistenz $a_{10} = 1,5 \%$ sowie für den Oberflächenkennwert $Vmc = 1,5 \%$. Der mittlere Variationskoeffizient unter Zwischenbedingungen ($M = 3$) liegt demnach auf einem vergleichbaren niedrigen Niveau wie bei der Abschätzung der Wiederholpräzision, vgl. Kapitel 4.10.1.

Zur Veranschaulichung des Einflusses des Prüfenden sind in Abbildung 4.30 sowohl die Ausbreitmaße a_{10} als auch die Oberflächenkennwerte Vmc in Abhängigkeit des Prüfenden und des Prüfgerätes dargestellt. Unter Annahme eines sehr geringen Prüfgeräte-Einflusses (alle Prüfgeräte gemäß *DIN EN 12350-5*) kann für beide Kennwerte eine vergleichbare Beeinflussung durch den Prüfenden erkannt werden. Speziell bei Betrachtung der Ergebnisse von Prüfer 2 kann eine entgegengesetzte Tendenz des Oberflächenkennwertes Vmc zum Ausbreitmaß festgestellt werden. Daraus kann geschlossen werden, dass zwischen den beiden Kennwerten – a_{10} und Vmc – eine relativ starke Abhängigkeit besteht.

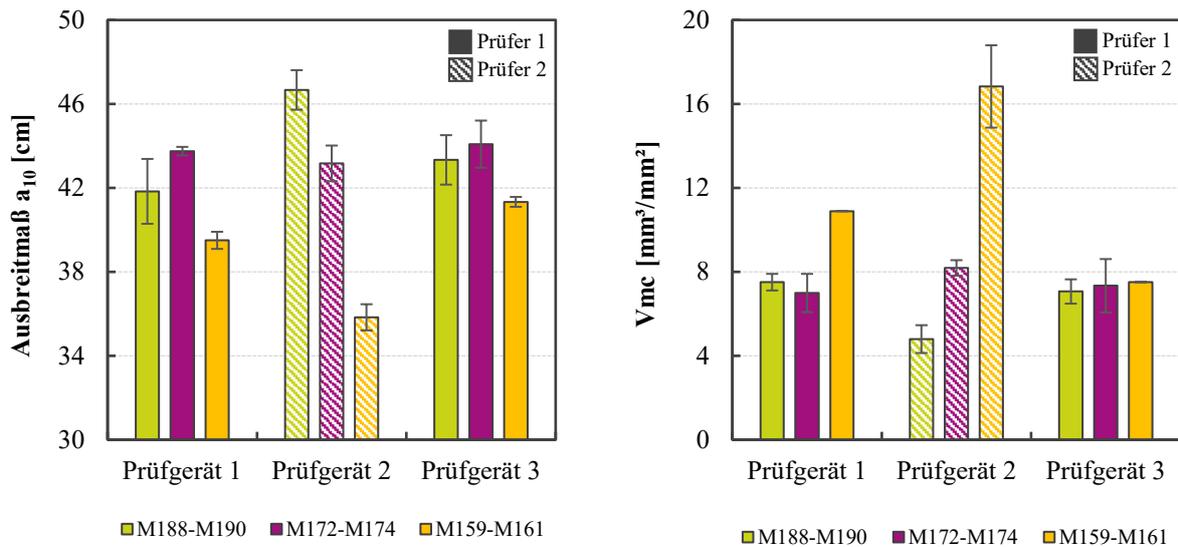


Abbildung 4.30: Ausbreitmaß in Abhängigkeit des Prüfenden und des Prüfgerätes (links) und Oberflächenkennwert V_{mc} in Abhängigkeit vom Prüfenden und vom Prüfgerät (rechts)

Tabelle 4.3 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die ermittelten Variationskoeffizienten zur Abschätzung der Präzision sowohl für das Ausbreitmaß a_{10} als auch der bildbasierten Messmethodik. Als Oberflächenkennwert wird dabei V_{mc} betrachtet.

Tabelle 4.3: Variationskoeffizienten zur Abschätzung der Präzision für die Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) sowie der bildbasierten Messmethodik

		Ausbreitmaß a_{10}	Oberflächenkennwert V_{mc}
Variationskoeffizient zur Abschätzung der ...	Wiederholpräzision	0,9 %	0,6 %
	Präzision unter Zwischenbedingungen (M=3)	1,5 %	1,5 %

Kapitel 5

Bildbasierte Frischbetonprüfung

Basierend auf photogrammetrischen Messprinzipien und digitaler Bildanalyse wird in diesem Kapitel mit der im vorangegangenen Kapitel eingeführten bildbasierten Methodik ein Konzept für die bildbasierte Frischbetonprüfung anhand von Oberflächeneigenschaften aufgezeigt. Gezielt wird der Einfluss betontechnologischer und insbesondere granulometrischer Einflussfaktoren auf die Oberflächeneigenschaften (u. a. Oberflächengestalt und optische Eigenschaften) der Frischbetonoberfläche im Ausbreitversuch untersucht. Aufbauend darauf erfolgt die Formulierung von Kriterien bzw. Ansätzen zur Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften in Abhängigkeit geometrischer und reflexionsbasierter Oberflächeneigenschaften.

5.1 Überblick über das experimentelle Untersuchungsprogramm

Ziel der hier vorgestellten experimentellen Untersuchungen war die umfassende Charakterisierung betontechnologischer und granulometrischer Einflussfaktoren auf die Oberflächeneigenschaften von Frischbeton im Ausbreitversuch. Als Parameter wurden u. a. der Leimgehalt und die granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung systematisch variiert. In einem ersten Schritt wurden mittels der bildbasierten Messmethodik geeignete Oberflächenkennwerte zur Beschreibung der Oberflächengestalt sowie optischer Eigenschaften identifiziert. Aufbauend darauf erfolgte die Formulierung von Kriterien bzw. Ansätzen zur Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften in Abhängigkeit geometrischer und reflexionsbasierter Oberflächeneigenschaften.

Abbildung 5.1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die systematisch variierten betontechnologischen Eigenschaften und Parameter und den damit verknüpften und untersuchten (Frisch-)Betoneigenschaften und -parametern.

Eigenschaft	Leim- gehalt	w/z _{eq} - Wert	FM- Gehalt	Wasserg.- schw.	Zement- art	KGV	Größt- korn	Kornform
Konsistenz	x	x	x	x	x	x	x	x
granulometrische Eig.	x	x	x	x	x	x	x	x
Leimabsonderung	x	x	x	x				
Wasserabsonderung	x	x	x	x	x	x	x	

Abbildung 5.1: Überblick über die untersuchten (Frisch-)Betoneigenschaften in Abhängigkeit der systematisch variierten Parameter

5.2 Ausgangsstoffe und Herstellung

Im Rahmen des Untersuchungsprogramms wurden drei unterschiedliche Zementarten verwendet. Ein Großteil der experimentellen Untersuchungen erfolgte mit einem Zement CEM II/A-S 42,5 R. Vereinzelt kamen darüber hinaus ein CEM I 42,5 R und ein CEM II/A-LL 42,5 N zum Einsatz. Als Zusatzstoff wurde Steinkohlenflugasche (SFA) eingesetzt. Die Eigenschaften der einzelnen Zemente und Zusatzstoffe sind in Anhang B.1 zusammengefasst.

Die Gesteinskörnung bestand vorzugsweise aus natürlichen Flusskies (Weser und Rhein). Die Korngrößenverteilung wurde systematisch zwischen den Sieblinien A bis C gemäß *DIN 1045-2* variiert. Punktuell wurde gebrochene grobe Gesteinskörnung (Splitt) eingesetzt. Das Größtkorn der groben Gesteinskörnung variierte zwischen 8 mm und 32 mm, wobei der Großteil der Untersuchungen mit einem Größtkorn von 16 mm durchgeführt wurde. Die Eigenschaften der verwendeten Gesteinskörnungen sind in Anhang B.1 zusammengefasst.

Zur Herstellung aller Betonzusammensetzungen wurde Wasser aus dem Leitungsnetz der Stadt Hannover verwendet. Als verflüssigende Zusatzmittel kamen sowohl Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) als auch vereinzelt auf Basis von Naphtalin-Sulfonat zum Einsatz. Die Dosierung des Fließmittels erfolgte bezogen auf den Zementgehalt.

Eine zusammenfassende Übersicht der untersuchten Betonzusammensetzungen sowie daran ermittelter Kennwerte ist in Anhang B.2 gegeben.

Die Herstellung der Betonzusammensetzungen erfolgte zum einen in einem Zwangsmischer vom Typ ZK 75 HE (Fa. *Pemat Mischtechnik GmbH*) mit einem maximalen Fassungsvermögen von etwa 75 Liter. Das Bindemittel sowie die ofengetrocknete Gesteinskörnung wurden zunächst 15 Sekunden trocken vorgemischt. Anschließend erfolgte innerhalb der folgenden 30 Sekunden die Zugabe des Anmachwassers. Direkt im Anschluss an die Wasserzugabe wurde ggf. das verflüssigende Zusatzmittel zugegeben. Der Frischbeton wurde anschließend für weitere 60 Sekunden gemischt. Für vereinzelte Untersuchungen wurde unter Einhaltung des Mischregimes ein Kleinmischer (Fa. *THB Technischer Handel Beckel*) mit einem Fassungsvermögen von ca. 8 Liter eingesetzt.

5.3 Experimentelle Untersuchungsmethoden

Unmittelbar nach dem Mischende wurden verschiedene Frischbetonkennwerte der Betonzusammensetzungen ermittelt. Es wurden die Temperatur, der Luftporengehalt gemäß *DIN EN 12350-7* sowie die Rohdichte nach *DIN EN 12350-6* ermittelt. Darüber hinaus wurde die Wasserabsonderung in Anlehnung an (DBV-MB 2014) ermittelt. Abweichend von dieser Prüfvorschrift erfolgte die Befüllung des Prüfgefäßes in zwei Lagen, wobei jede Lage auf dem Rütteltisch mit einer konstanten Frequenz von 4500 U/min für 15 Sekunden unabhängig von der Konsistenz verdichtet wurde. An vereinzelt Betonzusammensetzungen wurde darüber hinaus der Wassergehalt des Frischbetons mittels Mikrowellentrocknung gemäß (DBV-MB 2014) bestimmt.

Das Ausbreitmaß a gemäß *DIN EN 12350-5* wurde bei jeder Betonzusammensetzung zehn Minuten nach Zugabe des Anmachwassers ermittelt. Direkt im Anschluss an die manuelle Bestimmung des Durchmessers des ausgebreiteten Frischbetons wurde die Bilddatenaufnahme mittels der in Kapitel 4 vorgestellten Messmethodik durchgeführt. Ausgewählte Betone wurden im Anschluss an den Ausbreitversuch auf einem Sieb mit einer Maschenweite von 4 mm ausgewaschen, so dass im Nachgang die Ermittlung der Korngrößenverteilung mittels maschineller Siebanalyse gemäß *DIN EN 933-1* möglich war.

Abbildung 5.2 gibt einen Überblick über die Vorgehensweise bei den experimentellen Untersuchungen.

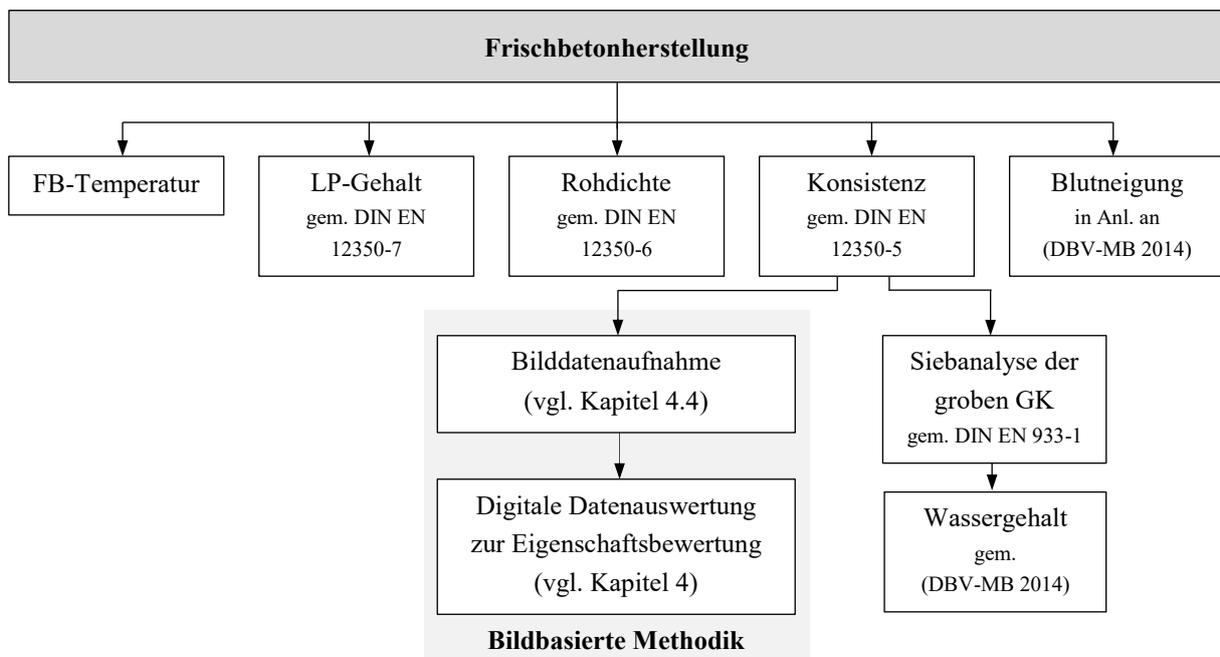


Abbildung 5.2: Überblick über die Vorgehensweise bei den experimentellen Untersuchungen

5.4 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Nachfolgend werden lediglich Ergebnisse dargestellt und bewertet, die mit der entwickelten bildbasierten Methodik (Einzel- oder Mehrbildaufnahme) am ausgebreiteten Frischbeton ermittelt wurden. Als Vergleichsgrößen dienen vor allem Betoneigenschaften, die mit konventionellen Prüfverfahren ermittelt wurden. Für einen Vergleich mit Referenz-Methoden zur Bewertung der Oberflächengestalt bzw. -textur sei auf Kapitel 4.3 verwiesen.

5.4.1 Richtungsabhängigkeit der Oberflächengestalt bzw. -textur

Die Eigenschaften der Oberflächengestalt bzw. -textur sind sowohl mit 2D- als auch 3D-Kennwerten beschreibbar, vgl. Kapitel 2.5.4. 2D-Kennwerte sind vor allem bei Oberflächentexturen mit einer bestimmten Vorzugsrichtung anwendbar. Gemäß *DIN EN ISO 251678-2* kann das Seitenverhältnis der Oberflächentextur Str als Parameter zur Bewertung der Richtungsabhängigkeit einer Oberflächengestalt bzw. -textur berechnet werden. Basierend auf einer Fourier-Transformation und einer Autokorrelation können so die richtungsabhängigen Eigenschaften einer Oberfläche mit Hilfe von Kennwerten quantifiziert werden. Der Oberflächenkennwert Str kann Werte im Bereich zwischen 0 und 1 annehmen. Oberflächentexturen, für die $0,5 < Str < 1,0$ gilt, weisen in jeder Richtung identische Eigenschaften auf (isotrop). Oberflächen mit periodischen Strukturen bzw. einer Vorzugsrichtung weisen dagegen Str -Werte im Bereich $0 < Str \leq 0,5$ auf (anisotrop).

Abbildung 5.3 zeigt den Str -Wert der untersuchten Betone in Abhängigkeit vom Ausbreitmaß a_{10} zum Zeitpunkt $t = 10$ Minuten nach Wasserzugabe. Zur Verdeutlichung der Oberflächenisotropie sind zusätzlich die Oberflächentexturen von zwei Schalungsplatten aus Brett-schichtholz mit unterschiedlicher Phenolharz-Beschichtung dargestellt. Die unterschiedlichen Beschichtungen führen zu ungleichen Oberflächentexturen. Bei Betrachtung der Oberflächentexturen der Schalungsplatten kann dieser Unterschied deutlich erkannt werden. So weist die zweite Schalungsplatte (b) eine deutlich erkennbare Texturrichtung auf, die bei der ersten Schalungsplatte (a) nicht erkannt werden kann. Darüber hinaus sind die jeweiligen Str -Werte der Schalungsplatten gekennzeichnet. Die Str -Werte sind mit $Str = 0,60$ (isotrop; (a)) und mit $Str = 0,05$ (stark anisotrop; (b)) stark differenziert und bestätigen das visuelle Empfinden.

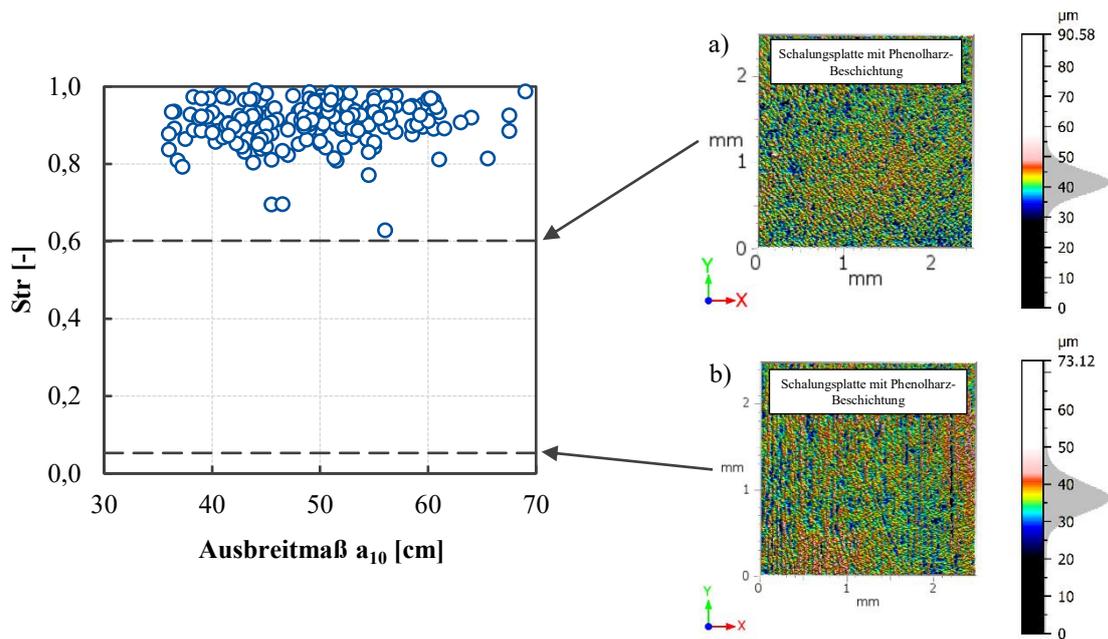


Abbildung 5.3: Oberflächenkennwert Str in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10} für unterschiedliche Betone (links) und visuelle Darstellung unterschiedlicher Schalungsplatten zum Teil mit Oberflächenriefen zur Verdeutlichung der Oberflächenisotropie bzw. -anisotropie

Die untersuchten Betonzusammensetzungen weisen in der Mehrzahl Str -Werte zwischen 0,8 und 1,0 auf. Lediglich vereinzelte Werte liegen in dem Wertebereich $0,6 < Str < 0,8$. Die Oberflächentexturen des ausgebreiteten Frischbetons auf dem Ausbreittisch weisen demnach eine ausgeprägte Isotropie ohne Vorzugsrichtung auf. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 5.4 das Polarspektrum einer ausgebreiteten Frischbetonoberfläche sowie als Vergleich die Polarspektren der in Abbildung 5.3 dargestellten Schalungsplatten. Es ist deutlich ersichtlich, dass die anisotrope Schalungsplatte (b) mit $Str = 0,05$ eine Vorzugsrichtung bei 90° aufweist. Demgegenüber kann bei der isotropen Frischbetonoberfläche ($Str = 0,89$) keine Vorzugsrichtung festgestellt werden. Demzufolge ist grundsätzlich eine Bewertung der Oberflächengestalt bzw. -textur bei den hier untersuchten Frischbetonoberflächen sowohl mit 2D- als auch 3D-Kennwerten möglich, vgl. Kapitel 2.5.4. Aufgrund der erweiterten Messfläche und daraus resultierenden erhöhten Aussagekraft werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch ausschließlich 3D-Kennwerte zur Bewertung der Oberflächengestalt angewendet.

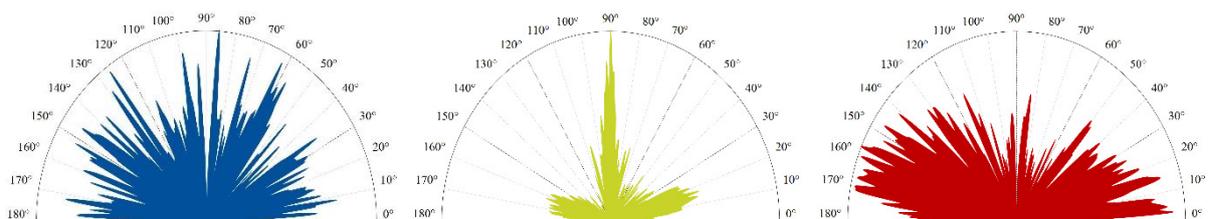


Abbildung 5.4: Polarspektren zur Abschätzung der Vorzugsrichtung unterschiedlicher Oberflächen – links: ausgebreiteter Frischbeton; mitte: Schalungsplatte (b) und rechts: Schalungsplatte (a) (vgl. Abbildung 5.3)

5.4.2 Konsistenz

Gegenwärtig wird der Ausbreitversuch quantitativ allein zur Ermittlung des Ausbreitmaßes und damit der Konsistenz genutzt. Zur Einteilung in Konsistenzklassen dient der manuell ermittelte mittlere Durchmesser des ausgebreiteten Frischbetons (vgl. Kapitel 2.4.1.1). In diesem Kapitel wird die bildbasierte Ermittlung des mittleren Durchmessers bzw. die Einteilung der Konsistenzklassen vorgestellt. Dabei werden zum einen flächenbasierte 2D-Eigenschaften zur Ermittlung als auch 3D-Oberflächenkennwerte zur Einteilung herangezogen.

5.4.2.1 Flächenbasierte 2D-Eigenschaften

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine quantitative Bestimmung des Ausbreitmaßes mittels digitaler Bildanalyse bzw. regionsbasierten Segmentierungsverfahren jeweils an einer Einzelaufnahme des ausgebreiteten Frischbetons. Als Verfahren zur Segmentierung der beiden Klassen – ‘Frischbeton’ und ‘Hintergrund’ – wird der Region Growing Algorithmus verwendet (eine Beschreibung des Verfahrens ist in Anhang A.1 gegeben). Auf diese Weise ist eine exakte Bestimmung der Fläche des ausgebreiteten Frischbetons möglich. In einem weiteren Schritt ist mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung die Berechnung flächenbasierter 2D-Eigenschaften der segmentierten Bereiche möglich. Als Referenzmaßstab dienen dabei die Dimensionen des Ausbreittisches von $700 \times 700 \text{ mm}^2$. Anhand der geometrischen Beziehungen lässt sich bei einer angenommenen Kreis-Fläche ($A_{FB,RG}$) der mittlere Durchmesser des ausgebreiteten Frischbetons mittels Gl. 24 berechnen.

$$a_{i,IA} = \sqrt{4 \cdot \frac{A_{FB,RG}}{\pi}} \quad \text{Gl. 24}$$

Hierin beschreibt $a_{i,IA}$ den bildbasiert ermittelten mittleren Durchmesser des ausgebreiteten Frischbetons zum Zeitpunkt i nach Wasserzugabe und $A_{FB,RG}$ die mittels Region Growing segmentierte Fläche des ausgebreiteten Frischbetons. Abbildung 5.5 gibt einen Überblick über die geometrischen Zusammenhänge zur Berechnung von $a_{i,IA}$.

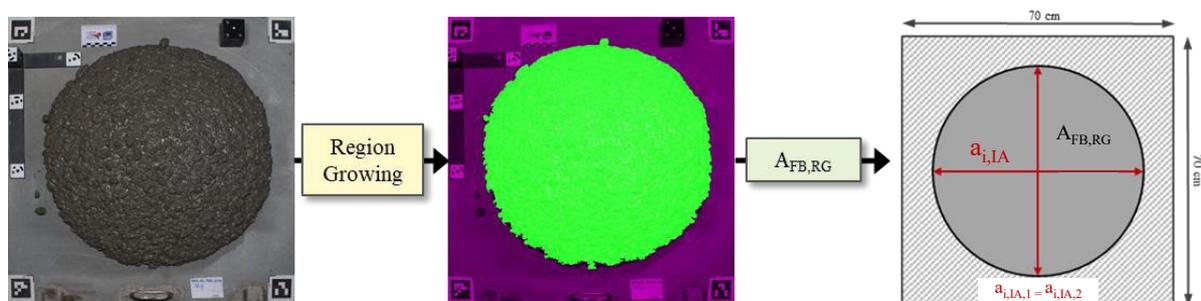


Abbildung 5.5: Einzelaufnahme eines ausgebreiteten Frischbetons (links) und mittels Region Growing segmentierte Bereiche (mitte) sowie schematische Zusammenhänge zur Berechnung von $a_{i,IA}$ (rechts)

Abbildung 5.6 zeigt eine Gegenüberstellung des mittels digitaler Bildanalyse und des manuell gemäß *DIN EN 12350-5* ermittelten Ausbreitmaßes. Es liegt eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte über den gesamten Konsistenzbereich von F2 bis F6 vor. Die Abweichung beträgt bei keinem Wertepaar mehr als 10 %. Der mittlere absolute Fehler (MAE, engl. Mean Absolute Error) der bildbasierten Daten ($a_{i,IA}$) gegenüber den manuell ermittelten Daten (a_i) beträgt 1,78 cm.

Bei der manuellen Messung werden die zwei Achsen mit dem größten Durchmesser augenscheinlich vom Prüfer festgelegt, so dass dort eine gewisse Abweichung auftreten kann. Dagegen erfolgt bei der digitalen Analyse die Berechnung des Durchmessers unter Annahme einer idealen Kreisgeometrie. Diese Kombination kann dementsprechend zu der geringfügigen systematischen Erhöhung bei der digitalen Bildanalyse führen. Betrachtet man die in Abbildung 5.6 dargestellten mittleren Ausbreitmaße (jeweils drei Wiederholungsversuche) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen, wird deutlich, dass die ermittelten Werte unabhängig von der Ermittlungsmethode jeweils vergleichbare prüfabhängige Streuungen aufweisen. Im Mittel liegen die ermittelten Werte unabhängig der Ermittlungsmethode auf vergleichbarem Niveau.

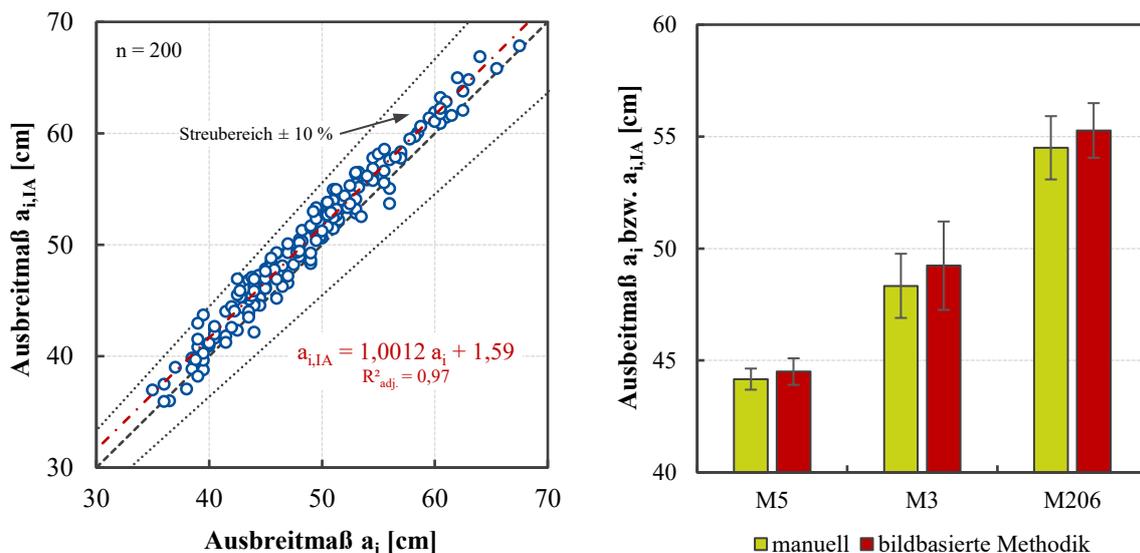


Abbildung 5.6: Gegenüberstellung des Ausbreitmaßes ermittelt mit der bildbasierten Methodik ($a_{i,IA}$) und zum anderen manuell (a_i) gemäß *DIN EN 12350-5* (links); mittlere Ausbreitmaße unterschiedlicher Betonzusammensetzungen zur Abschätzung der Abweichungen (rechts)

Voraussetzung für eine exakte Bestimmung des Ausbreitmaßes mit der digitalen Bildanalyse ist, dass keine Absonderungen von Leim im Randbereich vorhanden sind. In diesem Fall wird mit der Methode der abgesonderte Leim ebenfalls als 'Frischbeton' segmentiert und bei der Berechnung des Ausbreitmaßes berücksichtigt. Auf diesen speziellen Fall wird in Kapitel 5.4.6.1 näher eingegangen. Gemäß *DIN EN 12250-5* ist bei Vorhandensein von Entmischungserscheinungen keine ausreichend genaue Bestimmung des Ausbreitmaßes möglich.

5.4.2.2 3D-Oberflächenkennwerte

Der multivariate Datensatz mit zahlreichen Amplituden-, räumlichen, hybriden und funktionsorientierten Kennwerten der Frischbetonoberfläche unterschiedlicher Betonzusammensetzungen wurde mittels einer Streudiagramm-Matrix zur Beschreibung der Konsistenz bewertet. Auf eine Darstellung der Streudiagramm-Matrix wird im Rahmen dieser Arbeit, zu Gunsten der Übersichtlichkeit, verzichtet. Zur hinreichend genauen Beschreibung der Oberflächengestalt bzw. -textur von Frischbeton konnte der funktionsorientierte Kennwert Vmc als geeignet identifiziert werden, vgl. Kapitel 4.9.1. Demnach wird in diesem Kapitel nachfolgend allein der Kennwert Vmc als Oberflächenkennwert zur Auswertung herangezogen. In Abbildung 5.7 sind 3D-Oberflächenmodelle von ausgebreiteten Frischbetonen in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10} im Konsistenzbereich F2 bis F5 dargestellt. Die Veränderung der Konsistenz erfolgte durch systematische Variation des Leimgehaltes von ca. 304 l/m³ bis 404 l/m³, bei sonst identischen betontechnologischen Parametern.

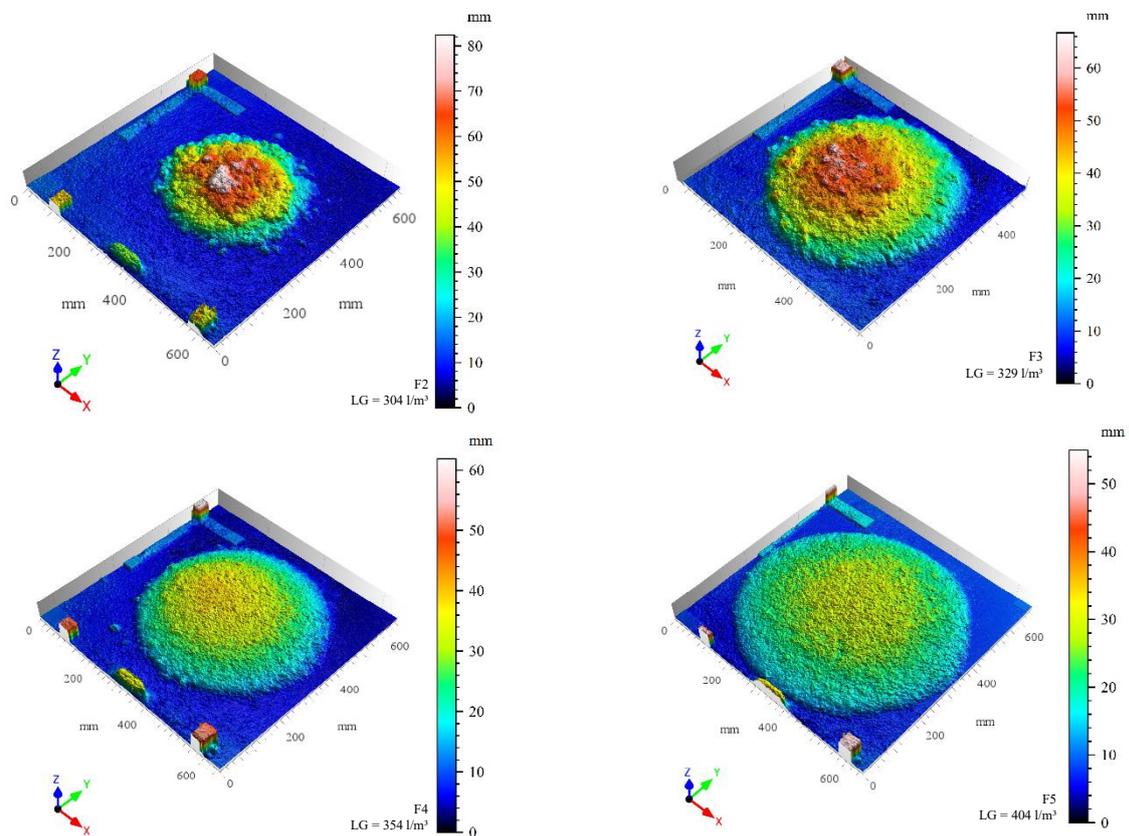


Abbildung 5.7: 3D-Oberflächenmodelle und Höhenprofil von ausgebreiteten Frischbetonen in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes (F2 bis F5); Veränderung der Konsistenz durch systematische Variation des Leimgehaltes (LG) (Betonzusammensetzungen: $w/z = 0,50$; $GK = 16$ mm; Sieblinie A/B; kein FM; LG: siehe einzelne Abbildungen)

Die visuelle Wahrnehmung der 3D-Oberflächenmodelle lässt deutliche Unterschiede in der Oberflächengestalt der einzelnen Frischbetone erkennen. Sowohl Unterschiede in der Oberflächengestalt, im vertikalen Höhenprofil als auch im Durchmesser können eindeutig quantifiziert

werden. Noch deutlicher werden die Unterschiede der Oberflächengestalt bei Betrachtung der Detailansichten in Abbildung 5.8. Dargestellt ist jeweils der mittige Bereich des ausgebreiteten Frischbetons mit einem Durchmesser von $\varnothing = 35$ cm. Insbesondere bei dem steifen Beton (F2) mit einem Leimgehalt von 304 l/m^3 kann z. B. eine noch stark zusammenhängende Oberflächengestalt erkannt werden. Aufgrund des geringen Leimgehalts und der daraus resultierenden geringen Fließfähigkeit findet keine vollständige Separierung einzelner grober Gesteinskörner während der 15 Schläge statt. Demgegenüber können mit zunehmender Fließfähigkeit einzelne grobe Gesteinskörner in den 3D-Oberflächenmodellen visuell sehr gut wahrgenommen werden. Zur Bestätigung der visuellen Wahrnehmung stellt Abbildung 5.9 sowohl das Ausbreitmaß a_{10} in Abhängigkeit des Leimgehaltes als auch den Oberflächenkennwert V_{mc} in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10} dar. Erwartungsgemäß kann eine nahezu lineare Zunahme des Ausbreitmaßes a_{10} mit zunehmendem Leimgehalt festgestellt werden. Darüber hinaus ist eine starke Verringerung des Oberflächenkennwertes V_{mc} mit zunehmender Fließfähigkeit des Frischbetons erkennbar. So nimmt der Oberflächenkennwert von $15,1 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ bei einer steifen Konsistenz bis auf $2,2 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ bei einer sehr fließfähigen Konsistenz ab. Im Gegensatz zu den Abhängigkeiten beim Ausbreitmaß ist beim Verlauf des Oberflächenkennwertes V_{mc} kein linearer Zusammenhang feststellbar.

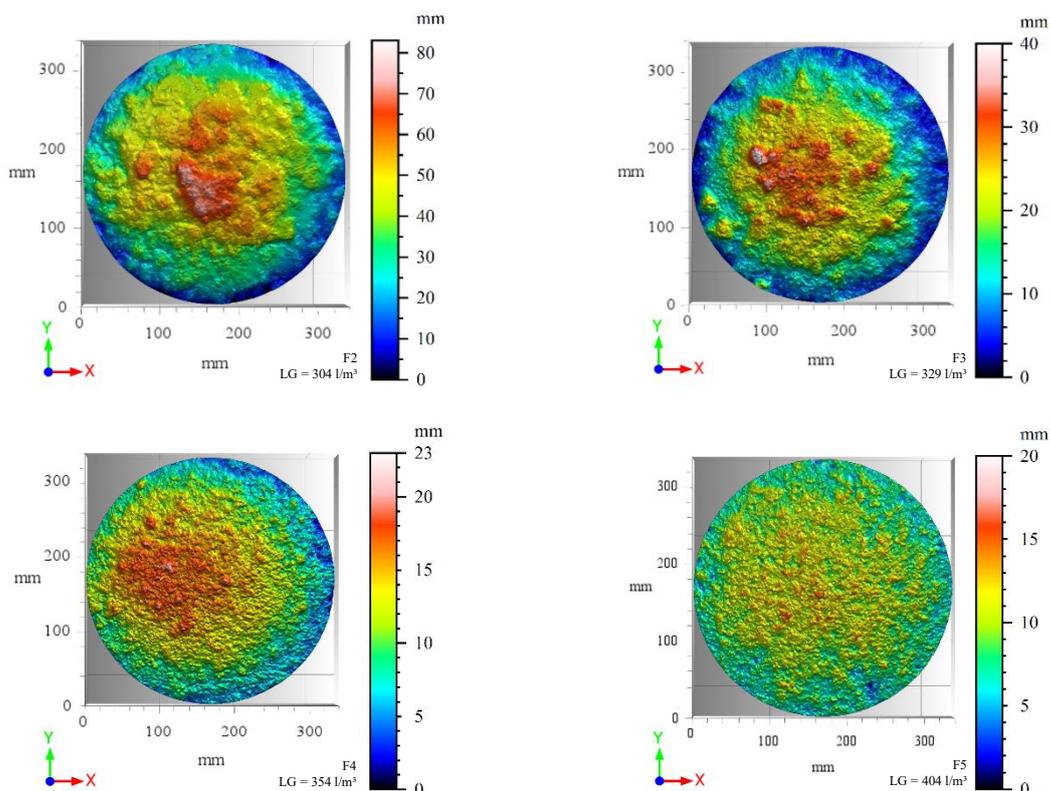


Abbildung 5.8: Detailansicht ($\varnothing = 350$ mm) der 3D-Oberflächenmodelle sowie zugehöriges Höhenprofil von ausgebreitetem Frischbetonen in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes (F2 bis F5) - Veränderung der Konsistenz durch systematische Variation des Leimgehaltes (LG) von 304 l/m^3 bis 404 l/m^3 (Betonzusammensetzungen: $w/z = 0,50$; $GK = 16$ mm; Sieblinie A/B; kein FM; LG: siehe einzelne Abbildungen)

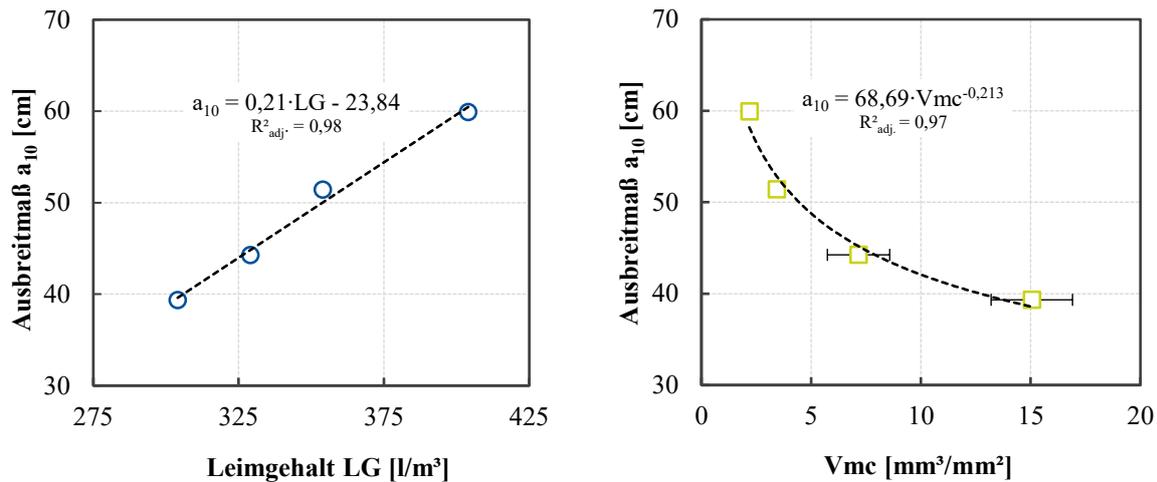


Abbildung 5.9: Ausbreitmaß a_{10} in Abhängigkeit des Leimgehaltes (LG) (links) sowie Ausbreitmaß a_{10} in Abhängigkeit des Oberflächenkennwert Vmc (rechts)

Die Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10} zum Oberflächenkennwert Vmc des ausgebreiteten Frischbetons aller im Rahmen der experimentellen Programms untersuchten Betone ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Die (Frisch-)Betoneigenschaften und Zusammensetzungen der einzelnen Betone variieren in einer großen Bandbreite von betontechnologischen Parametern (vgl. Abbildung 5.1). Zwischen den beiden Kennwerten a_{10} und Vmc ist über den gesamten Konsistenzbereich von F2 bis F6 ein nicht-linearer Zusammenhang erkennbar. Mit zunehmender Fließfähigkeit des Frischbetons nimmt der Oberflächenkennwert Vmc ab. Im Bereich steifer Frischbetone (F2) ist zunächst eine starke Abnahme des Oberflächenkennwertes Vmc mit geringen Veränderungen von a_{10} feststellbar. Demgegenüber verläuft die Abnahme von Vmc ab einem Wendepunkt bei $a_{10} \approx 45$ cm bei weicheren Frischbetonen deutlich moderater. Die in Gl. 25 dargestellte Exponential-Funktion bildet den Zusammenhang zwischen Vmc und a_{10} , insbesondere im Übergangsbereich weicher Betone (F3), gut ab.

$$a_{10,Vmc} = A_1 \cdot \exp\left(-\frac{Vmc}{Vmc_{crit}}\right) + a_0^* \quad \text{Gl. 25}$$

Hierin bezeichnet $a_{10,Vmc}$ das durch Regression abgeschätzte Ausbreitmaß, das sich aus dem exponentiellen Zusammenhang des Oberflächenkennwertes Vmc und den Konstanten A_1 , Vmc_{crit} und a_0^* ergibt. Für sehr raue Oberflächen und dementsprechend hohe Vmc -Werte > 17 mm^3/mm^2 liefert die Gl. 25 den Wert $A_1 + a_0^*$, wobei in diesem Wertebereich $a_0^* \gg A_1$ gilt. Demnach kann in diesem Wertebereich der Anteil von A_1 mit einem entstehenden Fehler von kleiner als 1,0 % vernachlässigt werden. Trotz dieser Vernachlässigung findet in diesem hohen Wertebereich von Vmc eine geringfügige Überschätzung der Messdaten mit der Gl. 25 statt. Weitere Defizite weist die Exponential-Funktion bei der Abbildung fließfähiger Betone mit $a_{10} > 70$ cm auf. Solche Betone (SVB) sind nicht Bestandteil der experimentellen Untersuchungen.

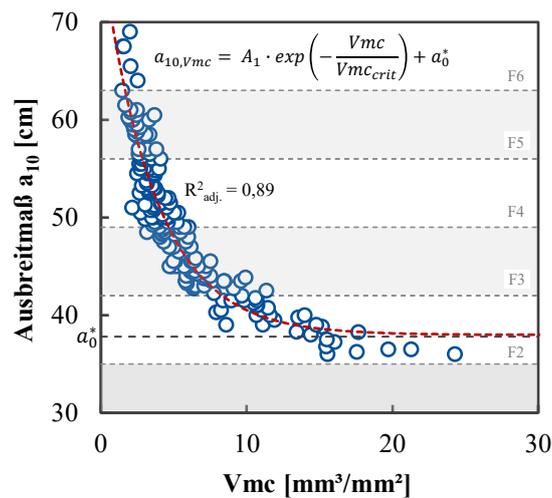


Abbildung 5.10: Ausbreitmaß a_{10} in Abhängigkeit von Vmc aller untersuchten Betonzusammensetzungen

Die in Gl. 25 dargestellte Exponential-Funktion erlaubt eine zielsichere Bestimmung der Konsistenzklasse mittels am ausgebreiteten Frischbeton ermittelten Oberflächenkennwert Vmc . Zur Überprüfung, ob auch innerhalb einer Konsistenzklasse eine trennscharfe Bestimmung der Konsistenz mittels Vmc möglich ist, wurden die einzelnen Konsistenzklassen jeweils separat betrachtet. Abbildung 5.11 zeigt das Ausbreitmaß a_{10} sowohl für den Konsistenzbereich F3 (links) als auch F4 (rechts) in Abhängigkeit des Oberflächenkennwertes Vmc . Innerhalb einer Konsistenzklasse wird zur Vereinfachung ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Messwerten angenommen. Neben der linearen Regressionsgeraden ist zusätzlich ein Streubereich von $\pm 5\%$ gekennzeichnet. Deutlich ersichtlich ist, dass innerhalb einer Konsistenzklasse mit der Methodik bzw. in Abhängigkeit von Vmc keine trennscharfe Bestimmung der Konsistenz vorgenommen werden kann. So weisen z. B. Frischbetone mit einem Ausbreitmaß zwischen 49 cm und 55 cm einen Vmc -Wert von $4,0 \pm 0,2 \text{ mm}^3/\text{mm}^2$ auf.

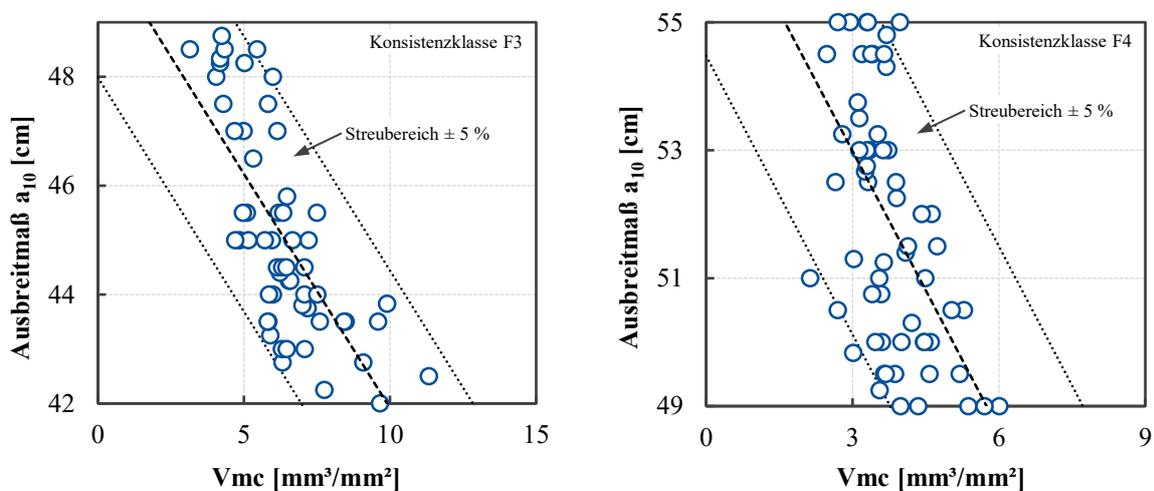


Abbildung 5.11: Ausbreitmaß a_{10} in Abhängigkeit des Oberflächenkennwertes Vmc für die Konsistenzbereiche F3 (links) und F4 (rechts) – angenommener linearer Zusammenhang mit Streubereich von $\pm 5\%$ gekennzeichnet

5.4.3 Leimgehalt

Wie in Kapitel 2.3.1 bereits ausführlich beschrieben, stellt der Leimgehalt LG bei sonst identischen Eigenschaften (w/z-Wert etc.) einen maßgeblichen Parameter zur Einstellung der Frischbetonkonsistenz dar. Aus den vorangegangenen Ausführungen wird deutlich, dass die Oberflächengestalt des ausgebreiteten Frischbetons maßgeblich durch den Leimgehalt bestimmt wird. Aus Abbildung 5.7 ist ersichtlich, dass sich die Oberflächengestalt bzw. -textur mit variierenden Leimgehalt, bei sonst identischen Eigenschaften, deutlich verändert. Da die Konsistenz des Frischbetons, insbesondere in der modernen Betontechnologie, neben dem Leimgehalt bzw. dem w/z-Wert primär durch verflüssigende Zusatzmittel gesteuert wird, ist auch der Einfluss solcher chemischen Zusätze auf die Oberflächengestalt zu berücksichtigen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit setzt sich der Leimgehalt aus den volumetrischen Bestandteilen des Zementes, der Zusatzstoffe, des Wassers sowie dem Mehlkorngesamt der feinen Gesteinskörnung ($d < 0,125$ mm) zusammen. Zielsetzung der nachfolgenden Betrachtungen ist es, den Leimgehalt LG des Betons allein anhand von Bilddaten zu ermitteln. Hierzu werden verschiedene Ansätze verfolgt, deren Einflussgrößen betrachtet und die Ansätze miteinander verglichen.

5.4.3.1 Flächenbasierte 2D-Eigenschaften

Eine Möglichkeit zur bildbasierten Ermittlung des Leimgehaltes am ausgebreiteten Frischbeton stellen flächenbasierte 2D-Eigenschaften dar (vgl. Kapitel 4.8.2). Dazu erfolgt die semantische Instanz-Segmentierung der groben Gesteinskörnung (≥ 4 mm) am ausgebreiteten Frischbeton mittels Convolutional Neural Networks (vgl. Kapitel 2.7.1). Die Summe der so segmentierten Bereiche bzw. Flächen der einzelnen groben Gesteinskörner ($A_{GK \geq 4mm}$) wird im Nachgang über Algorithmen der digitalen Bildverarbeitung ermittelt. Als Referenzmaßstab dienen in diesem Kapitel bei allen Flächenberechnungen die Dimensionen des Ausbreittisches von 700×700 mm². In einem nächsten Schritt erfolgt eine Segmentierung des ausgebreiteten Frischbetons mit dem Region Growing Algorithmus (vgl. Kapitel 5.4.2.1). Anhand der so segmentierten Flächenanteile ist eine Bestimmung des relativen Leimanteils an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons mittels Gl. 26 möglich.

$$\alpha_{Leim} = \frac{A_{FB, RG} - A_{GK \geq 4mm}}{A_{FB, RG}} \quad \text{Gl. 26}$$

Hierin beschreibt α_{Leim} den relativen Leimanteils der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons. $A_{FB, RG}$ beschreibt die mittels Region Growing (vgl. Anhang A.1) segmentierte Fläche und $A_{GK \geq 4mm}$ die Fläche der groben Gesteinskörner (≥ 4 mm) an der Oberfläche. Die Differenz zwischen $A_{FB, RG}$ und $A_{GK > 4mm}$ beschreibt dabei die Fläche des Leimanteils an der Oberfläche A_{Leim} . Abbildung 5.12 gibt einen schematischen Überblick zur Ermittlung des Leimanteils der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons.

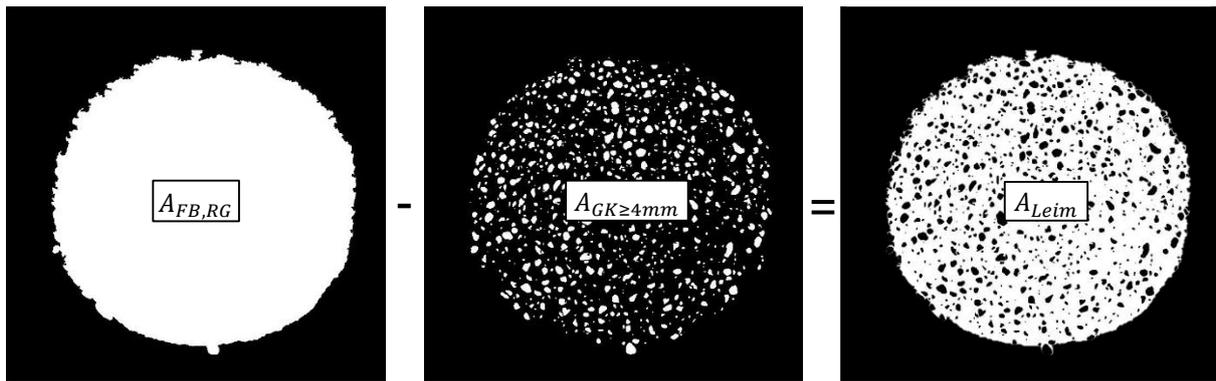


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung zur Berechnung des Leimanteils der Oberfläche A_{Leim} des ausgebreiteten Frischbetons anhand der segmentierten Flächenteile $A_{FB, RG}$ und $A_{GK \ge 4mm}$

Abbildung 5.13 zeigt die Oberfläche von Frischbetonen im Rahmen der Konsistenzprüfung. Der theoretische Leimgehalt variiert von 314 l/m^3 bis 354 l/m^3 . Darüber hinaus weisen die unterschiedlichen Betonzusammensetzungen differierende w/z -Werte auf, so dass sich in Kombination der Parameter vergleichbare Fließfähigkeiten einstellen. Visuell lässt sich eine leichte Abnahme der groben Gesteinskörner an der Oberfläche mit zunehmendem theoretischen Leimgehalt erkennen. Eine trennscharfe bzw. klare visuelle Unterscheidung hinsichtlich des theoretischen Leimgehaltes der einzelnen Frischbetonoberflächen ist jedoch nicht möglich.

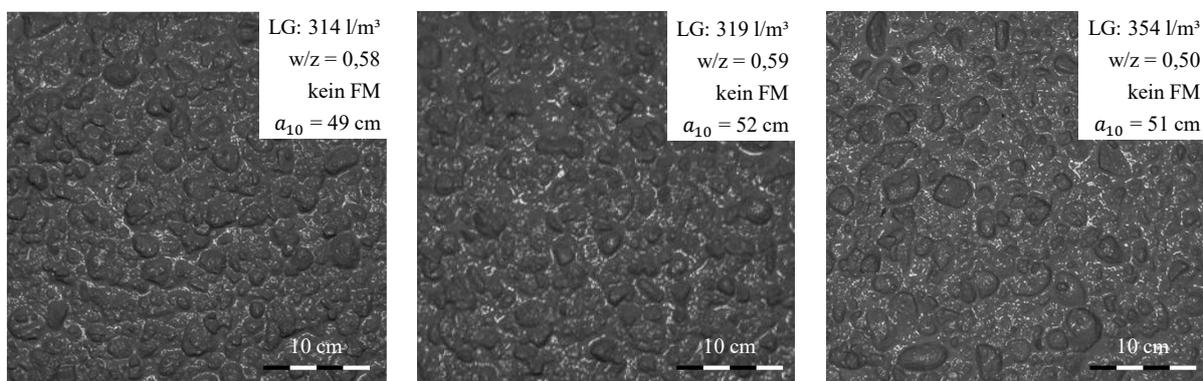


Abbildung 5.13: Oberflächenanschnitte von Frischbetonen unterschiedlicher Betonzusammensetzungen mit differierenden theoretischen Leimgehalt im Rahmen der Konsistenzprüfung

Eine Gegenüberstellung des relativen Leimanteils der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons mit dem theoretischen Leimgehalt ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Der relative Leimanteil nimmt mit zunehmenden theoretischen Leimanteil nahezu linear zu. Dabei ist jedoch der verhältnismäßig große Streubereich im gesamten Wertebereich zu beachten. Da die untersuchten Betonzusammensetzungen eine sehr große Bandbreite variiertes betontechnologischer Eigenschaften aufweisen, sind die starken Abweichungen als akzeptabel zu bewerten.

Eine Abhängigkeit zwischen dem Ausbreitmaß und dem relativen Leimanteil ist nicht gegeben (vgl. Abbildung 5.14, rechts). Dies wird durch die Betrachtung der Fläche $A_{FB, RG}$ und $A_{GK > 4mm}$

in Abhängigkeit der Konsistenz verdeutlicht. Erwartungsgemäß steigt die Fläche des ausgebreiteten Frischbetons ($A_{FB,RG}$) nahezu linear mit zunehmender Konsistenz an. Die Fläche der groben Gesteinskörnung ist demgegenüber unabhängig von der Konsistenz, da die Fließfähigkeit nicht über den Anteil der groben Gesteinskörnung gesteuert wird, vgl. Abbildung 5.9.

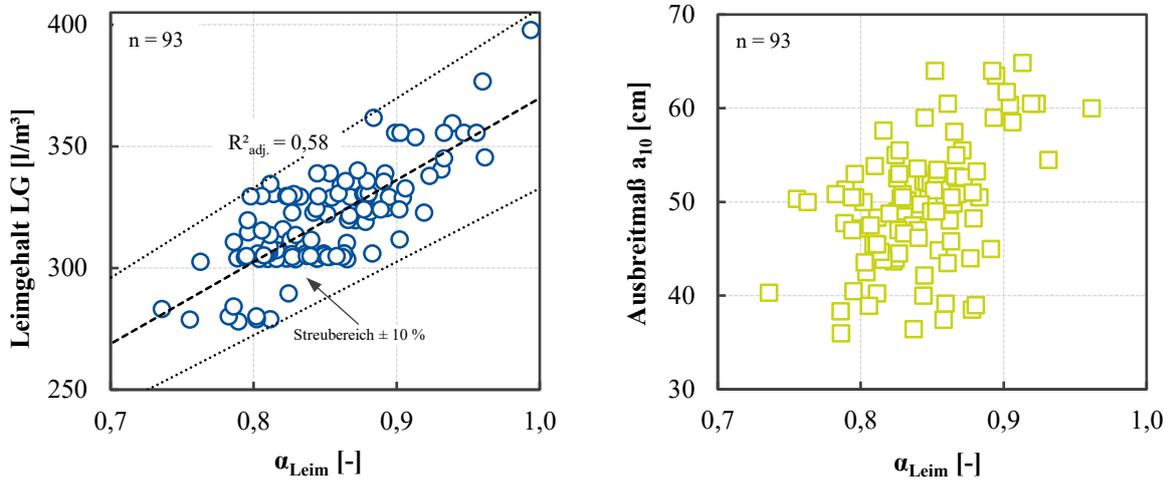


Abbildung 5.14: Relativer Leimanteil α_{Leim} in Abhängigkeit des Leimgehaltes (links) und relativer Leimanteil α_{Leim} in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10} (rechts)

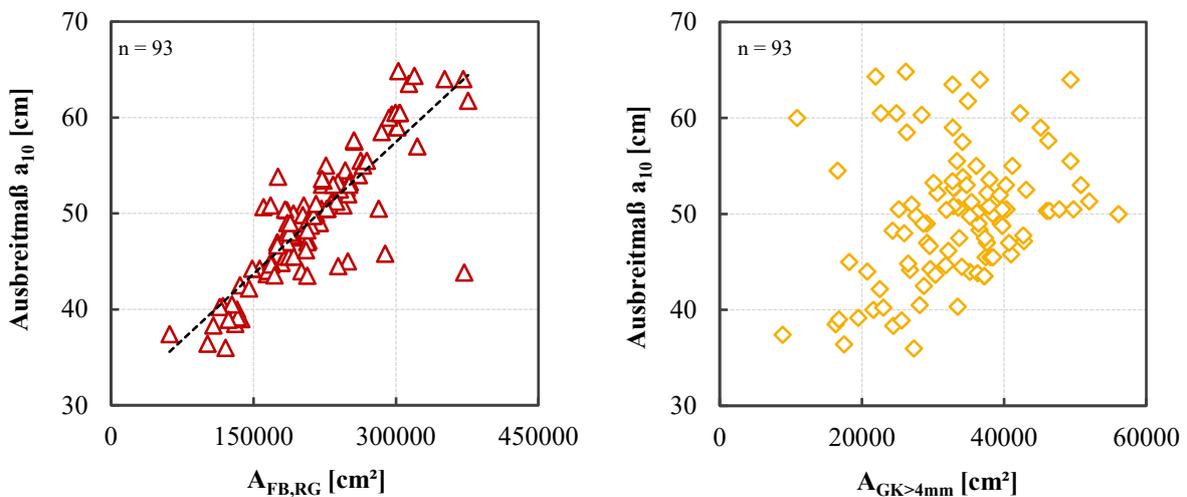


Abbildung 5.15: $A_{FB,RG}$ (links) und $A_{GK>4mm}$ (rechts) in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10}

Aufgrund der relativen Betrachtung des Leimanteils der Oberfläche α_{Leim} ist dieser Kennwert tendenziell unabhängig vom Ausbreitmaß. Dies wird mit dem in Abbildung 5.16 dargestellten Zusammenhang dieser beiden Kennwerte für unterschiedliche Betonzusammensetzungen weitestgehend bestätigt. So steigt der relative Leimanteil α_{Leim} unabhängig der Konsistenz (eingestellt mit verflüssigendem Zusatzmittel) mit zunehmenden theoretischen Leimgehalt, vgl. Abbildung 5.16, links. Dabei ist jedoch zu beachten, dass bei einem konstanten Leimgehalt von 329 l/m^3 mit zunehmender Konsistenz leicht erhöhte Werte für α_{Leim} festgestellt werden. So kann bei einem Ausbreitmaß von 45 cm ein relativer Leimanteil α_{Leim} von $0,85$ und bei einem

Ausbreitmaß von 61 cm ein relativer Leimanteil α_{Leim} von 0,90 festgestellt werden. Diese Abweichungen lassen sich jedoch auf messtechnische Einflüsse bzw. Einflüsse bei der Segmentierung zurückführen. Gerade bei einer sehr fließfähigen Konsistenz (> 60 cm) führen Absinkprozesse einzelner grober Gesteinskörner schnell zu einer geringfügigen Unterschätzung der Gesteinskörnungsfläche an der Oberfläche. Infolgedessen steigt der daraus resultierende relative Leimanteil α_{Leim} . Ebenfalls führen systematische Wassergehaltsschwankungen, die ebenso zu einer Erhöhung des Leimgehaltes führen, zu einem Anstieg des relativen Leimanteils α_{Leim} (vgl. Abbildung 5.16, rechts).

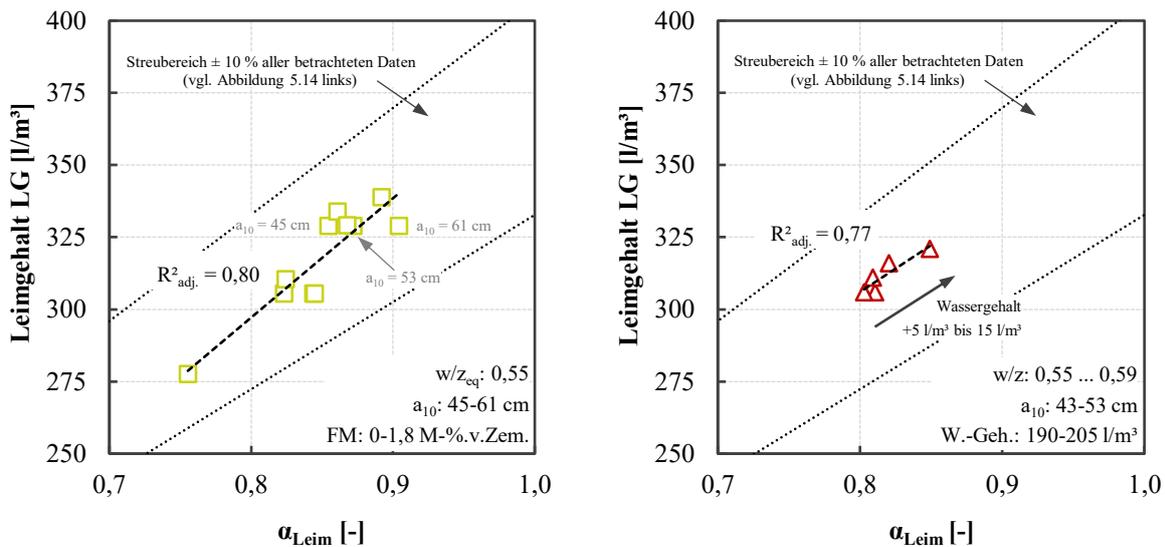


Abbildung 5.16: Relativer Leimanteil α_{Leim} in Abhängigkeit des Leimgehaltes unterschiedlicher Betonzusammensetzungen: unterschiedliche Konsistenzbereiche eingestellt mit verflüssigendem Zusatzmittel (links) und systematische Wassergehaltsveränderungen (rechts)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass aus bildbasierten 2D-Daten und entsprechender Flächenanteile (Gesteinskörnung und gesamter Frischbeton) an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons Rückschlüsse z. B. auf den Leimgehalt des Betons gezogen werden können. Da die Ausbildung der Frischbetonoberfläche jedoch von einer Vielzahl von Wechselwirkungen der einzelnen betontechnologischen Eigenschaften beeinflusst wird, ist diese Abschätzung mit Unsicherheiten behaftet, die jedoch durch Hinzuziehung weiterer Parameter reduziert werden können.

5.4.3.2 3D-Oberflächenkennwerte

Als weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Leimgehaltes im Rahmen der Konsistenzprüfung können 3D-Oberflächenkennwerte herangezogen werden. Wie bereits in Kapitel 5.4.2.2 erläutert, wird nachfolgend primär auf den funktionsorientierten Oberflächenkennwert Vmc fokussiert. Abbildung 5.17 zeigt den dreidimensionalen Zusammenhang zwischen dem Leimgehalt LG , der Konsistenz a_{10} und dem Oberflächenkennwert Vmc aller im Rahmen des experimentellen Untersuchungsprogramms untersuchten Betonzusammensetzungen. Der zuvor

in Kapitel 5.4.2.2 beschriebene Zusammenhang zwischen dem Ausbreitmaß a_{10} und dem Oberflächenkennwert Vmc ist deutlich ersichtlich. Mit zunehmendem Ausbreitmaß steigt Vmc an. Unter Berücksichtigung des Leimgehaltes zeigt sich, dass zwischen allen drei Kennwerten kein klarer Trend vorliegt. Dies ist vor allem drauf zurückzuführen, dass die Konsistenz bei unterschiedlichen Leimgehalten durch betontechnologische Parameter und insbesondere bei konstantem Leimgehalt durch verflüssigende Zusatzmittel gesteuert werden kann. So können in Abhängigkeit des Leimgehaltes, jeweils parallel verschoben, die nahezu identischen Steigungen von Vmc mit abnehmendem Ausbreitmaß beobachtet werden. Mit zunehmenden Leimgehalt nimmt dabei der maximale Wert von Vmc ab, da jeder Leimgehalt eine gewisse Mindest-Fließfähigkeit aufweist und diese mit zunehmenden Leimgehalt zunimmt. Ein weiterer Anstieg von Vmc ist demnach bei solch hohen Leimgehalten nicht möglich.

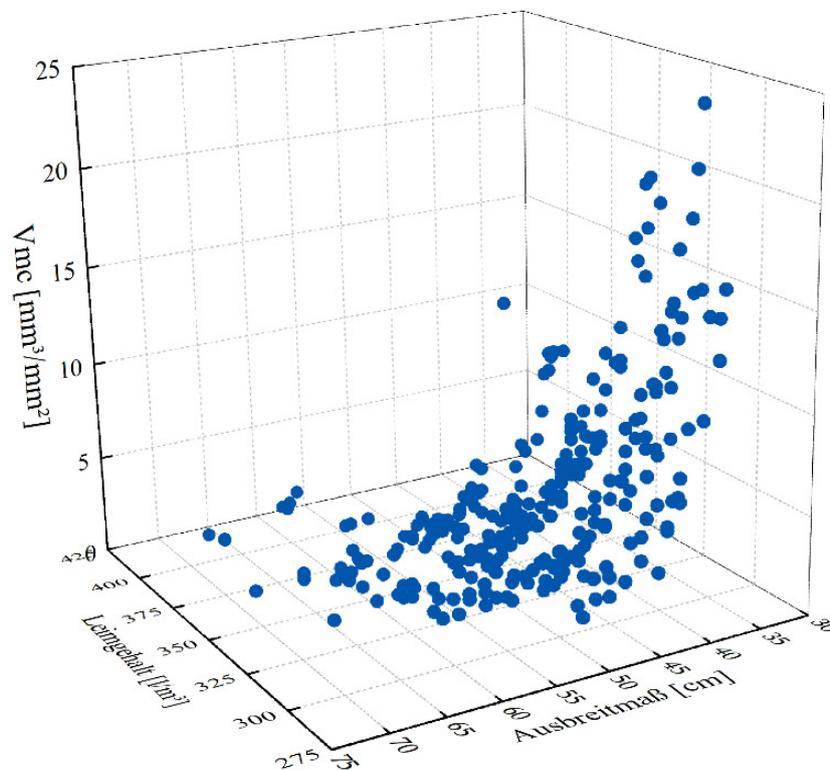


Abbildung 5.17: Dreidimensionaler Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß a_{10} , Oberflächenkennwert Vmc und theoretischen Leimgehalt LG aller im Rahmen dieser Arbeit untersuchter Betonzusammensetzungen

Infolge der zuvor beschriebenen mehrschichtigen Zusammenhänge zwischen dem Leimgehalt LG , dem Ausbreitmaß a_{10} und dem Oberflächenkennwert Vmc werden die einzelnen Einflussfaktoren nachfolgend getrennt voneinander untersucht:

- Leimgehalt unter Variation der Konsistenz (ohne Verwendung verflüssigender Zusatzmittel)
- Leimgehalt unter Hinzunahme verflüssigender Zusatzmittel zur zielsicheren Einstellung der Konsistenz

Leimgehalt unter Variation der Konsistenz (ohne verflüssigende Zusatzmittel)

Ohne die Zugabe verflüssigender Zusatzmittel stellt der Leimgehalt in Verbindung mit dem w/z- bzw. w/b-Wert den entscheidenden Steuerungs-Parameter für die Konsistenz des Frischbetons dar. Wie bereits ausführlich beschrieben und auch in Abbildung 5.9 gezeigt, ist mit zunehmenden Leimgehalt LG , bei ansonsten konstanten Bedingungen, eine steigende Konsistenz festzustellen. Im Rahmen einer Parameterstudie wurden 90 Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichen betontechnologischen Eigenschaften untersucht. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die jeweiligen Grenzen der systematisch variierten Parameter. Die Steuerung der Fließfähigkeit erfolgte dabei ohne den Einsatz verflüssigender Zusatzmittel.

Tabelle 5.1: Variierte Parameter mit den dazugehörigen Grenzen der untersuchten Betonzusammensetzungen

Bezeichnung	Einheit	Einsatzbereich
w/z-Wert	-	0,50 bis 0,63
Zementgehalt	kg/m ³	259 bis 485
Leimgehalt	l/m ³	284 bis 404
Mehlkorngehalt	kg/m ³	314 bis 498
Wasser-Mehlkorn-Verhältnis (V_w/V_{MK})	-	1,24 bis 1,98
Größtkorn	mm	8; 16; 32
Korngrößenverteilung gem. DIN 1045-2	-	A; A/B; B; (C)
Gesteinsart	-	rund (Weser, Rhein); gebrochen

Abbildung 5.18 zeigt die Konsistenz in Abhängigkeit des Leimgehaltes LG der untersuchten Betonzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 16 mm. Die weiteren Parameter variieren dabei in den entsprechenden Grenzen gemäß Tabelle 5.1. Tendenziell ist mit steigendem Leimgehalt eine Zunahme der Konsistenz erkennbar. Dessen ungeachtet sind ebenso relativ starke Variationen der Konsistenz bei konstantem Leimgehalt erkennbar. Diese Variationen sind auf die Wechselwirkungen der einzelnen Einflussgrößen zurückzuführen und lassen erkennen, dass die Konsistenz von einer Vielzahl von Eigenschaften und dessen Wechselwirkungen beeinflusst wird. Deutlich erkennbar ist z. B. der Einfluss eines erhöhten w/z-Wertes bei gleichbleibenden Leimgehalt. Die Fließfähigkeit nimmt dabei stark zu (vgl. Abbildung 5.18, markierter Bereich). Zur Verdeutlichung des Einflusses einer systematischen Erhöhung des Leimgehaltes bei ansonsten konstanten Eigenschaften sind die entsprechenden Betonzusammensetzungen (grüne quadratische Symbole) hervorgehoben. Die Trendlinie lässt den bereits in Kapitel 5.4.2.2 beschriebenen nahezu linearen Anstieg der Fließfähigkeit mit Erhöhung des Leimgehaltes erkennen.

Darüber hinaus ist in Abbildung 5.18 die Abhängigkeit zwischen dem Leimgehalt und dem mittleren Oberflächenkennwert V_{mc} der Betonzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 16 mm dargestellt. Da der Oberflächenkennwert V_{mc} des ausgebreiteten Frischbetons stark von der Konsistenz (vgl. Kapitel 5.4.2.2) abhängig ist, sind bei konstantem Leimgehalt auch hier relativ starke Variationen festzustellen. Unter Berücksichtigung der Vielzahl systematisch variiertes Eigenschaften kann jedoch festgehalten werden, dass V_{mc} mit steigendem Leimgehalt

zunimmt. Ab einem Leimgehalt von etwa 300 l/m^3 ist dabei ein überproportionaler Anstieg der Steigung feststellbar. Ein Leimgehalt von ca. 300 l/m^3 bedeutete bei den untersuchten Betonzusammensetzungen ein mittleres Ausbreitmaß von ca. 38 cm . Für diesen Konsistenzbereich konnte bereits in Kapitel 5.4.2.2 festgestellt werden, dass dort eine trennscharfe Ermittlung von Vmc nicht mehr möglich ist.

Die in Gl. 25 in Kapitel 5.4.2.2 dargestellte Exponential-Funktion zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Vmc und a_{10} ist ebenso zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Vmc und dem Leimgehalt LG geeignet. Insbesondere der Bereich geringer Leimgehalte (ca. 304 l/m^3) mit einer gewissen Stagnation von Vmc wird von Gl. 25 entsprechend gut abgebildet. Noch geringere Leimgehalte können nur bedingt berücksichtigt werden, da hier keine ausreichende Fließfähigkeit ($a_{10} \leq 38 \text{ cm}$) mehr gegeben ist und Vmc bei solch geringen Ausbreitmaßen nicht zielsicher bewertet werden kann, vgl. Abbildung 5.10. Betrachtet man auch hier ausschließlich den Einfluss einer systematischen Erhöhung des Leimgehaltes bei ansonsten konstanten Bedingungen (grüne quadratische Symbole), ist ersichtlich, dass die Gl. 25 den Zusammenhang zwischen Vmc und Leimgehalt LG gut abbildet.

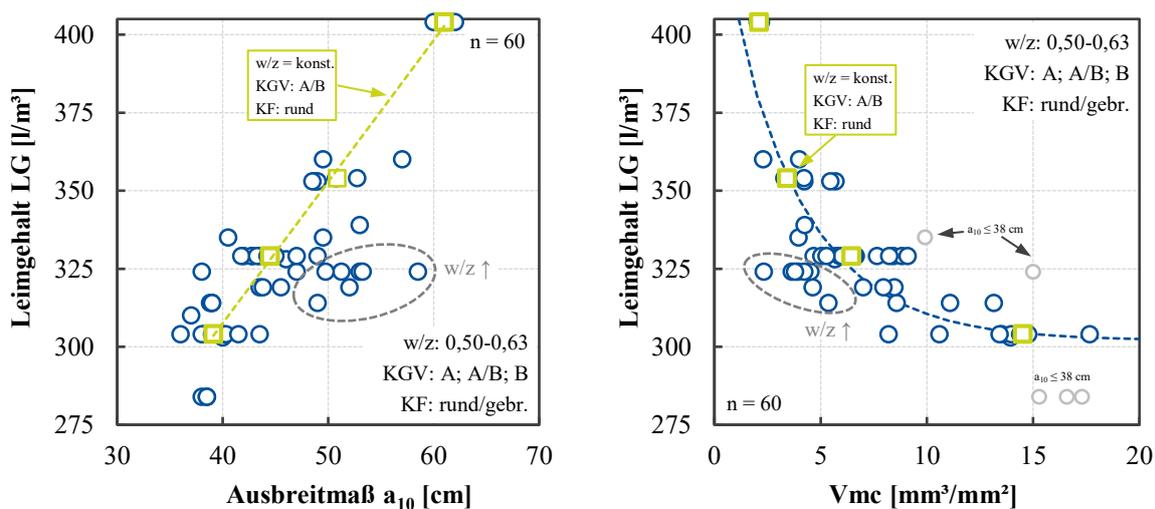


Abbildung 5.18: Ausbreitmaß a_{10} (links) und Oberflächenkennwert Vmc (rechts) in Abhängigkeit des Leimgehaltes der untersuchten Betonzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 16 mm

In diesem Abschnitt werden ausschließlich Betone ohne verflüssigende Zusatzmittel betrachtet, so dass die Konsistenz maßgeblich durch die Korngrößenverteilung in Abhängigkeit des Größtkorns beeinflusst wird. Dementsprechend wird der Oberflächenkennwert Vmc auch von der Korngrößenverteilung in Abhängigkeit des Größtkorns beeinflusst, da ein direkter Zusammenhang zum Ausbreitmaß a_{10} besteht (vgl. Abbildung 5.10). Abbildung 5.19 zeigt die Abhängigkeit zwischen dem Leimgehalt LG und dem mittleren Oberflächenkennwert Vmc der Betonzusammensetzungen aus Abbildung 5.18 mit einem Größtkorn von 16 mm . Deutlich ersichtlich ist die hohe Passgenauigkeit der zuvor beschriebenen Exponential-Funktion (vgl. Gl. 25). Bei der Regressionsanalyse blieben Betonzusammensetzungen mit $a_{10} \leq 38 \text{ cm}$ unberücksichtigt.

In Abbildung 5.19 ist dazu ein mittlerer Ausschnitt eines 3D-Oberflächen-modells einer solchen Betonzusammensetzung dargestellt. Die Oberflächengestalt weist noch deutliche Konturen der Konusform auf. Der Frischbeton hat sich infolge der 15 Schläge nicht ausreichend ausgebreitet, so dass eine zielsichere Ermittlung von V_{mc} nicht möglich ist. Darüber hinaus stellt Abbildung 5.19 den Zusammenhang zwischen dem Leimgehalt LG und Oberflächenkennwert V_{mc} unterschiedlicher Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichem Größtkorn dar. Vor allem bei den Betonzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 8 mm können bei höheren Leimgehalten erhöhte Werte für V_{mc} gegenüber den Betonen mit größerem Größtkorn festgestellt werden. Zurückzuführen ist dies auf die stark ausgeprägte Reduzierung der Fließfähigkeit bei geringerem Größtkorn infolge der erhöhten spezifischen Partikeloberfläche. Unabhängig des Größtkorns lässt sich der Leimgehalt für Betonzusammensetzungen ohne die Zugabe verflüssigender Zusatzmittel mit der in Gl. 25 dargestellten exponentiellen Regressionsfunktion gut abbilden. Die Parameter dieser Regressionsfunktion sind in Abhängigkeit des Größtkorns anzupassen (vgl. Tabelle 5.2).

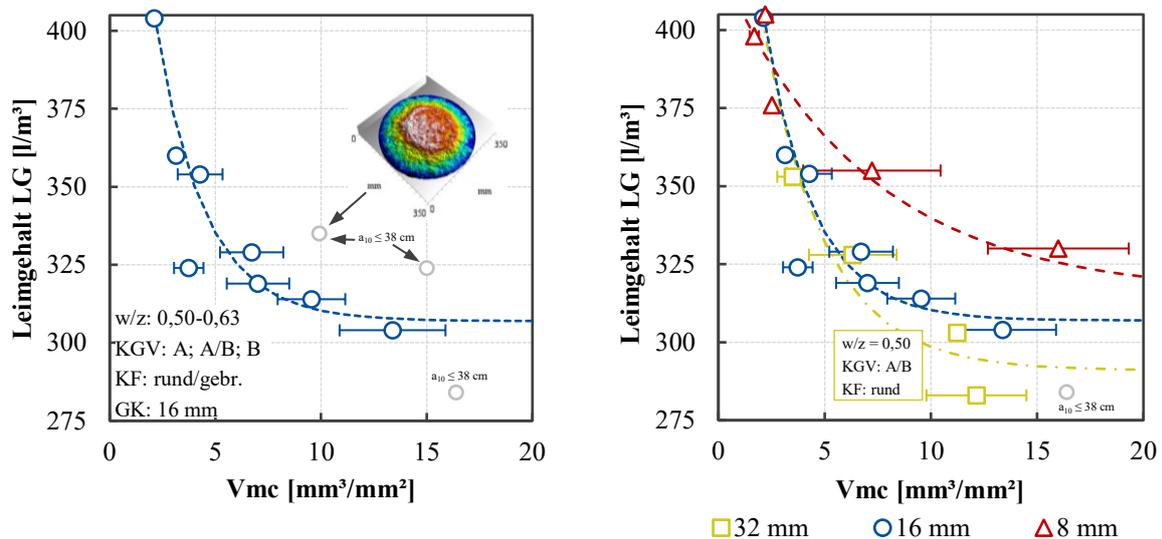


Abbildung 5.19: Mittlerer Oberflächenkennwert V_{mc} in Abhängigkeit des Leimgehaltes der untersuchten Betonzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 16 mm (links) und mittlerer Oberflächenkennwert V_{mc} in Abhängigkeit des Leimgehaltes unter Berücksichtigung des Größtkorns (rechts)

Tabelle 5.2: Werte für Konstanten gemäß Gl. 25 in Abhängigkeit des Größtkorns

Konstante	Größtkorn		
	8 mm	16 mm	32 mm
A_1	105,3	239,7	224,1
$V_{mc_{crit}}$	6,9	2,3	3,0
a_0^*	315,3	307,0	291,0
$R^2_{adj.}$	0,84	0,97	0,92

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die in diesem Kapitel abgeleiteten Ausgleichsfunktionen keinem direkten physikalischen Hintergrund unterliegen. Es wurde hier lediglich mittels der

Methode der kleinsten Quadrate eine Regressionsfunktion bestimmt, die möglichst nahe an den Datenpunkten verläuft und somit den untersuchten Datensatz bestmöglich beschreibt.

Als weiterer betontechnologischer Parameter neben dem Leimgehalt beeinflusst der w/z_{eq} -Wert maßgeblich die Konsistenz des Betons. Abbildung 5.20 zeigt den Zusammenhang zwischen dem w/z_{eq} -Wert und Vmc unter Berücksichtigung des theoretischen Leimgehalts. Bei konstantem Leimgehalt ist mit zunehmendem w/z -Wert jeweils eine Abnahme von Vmc festzustellen.

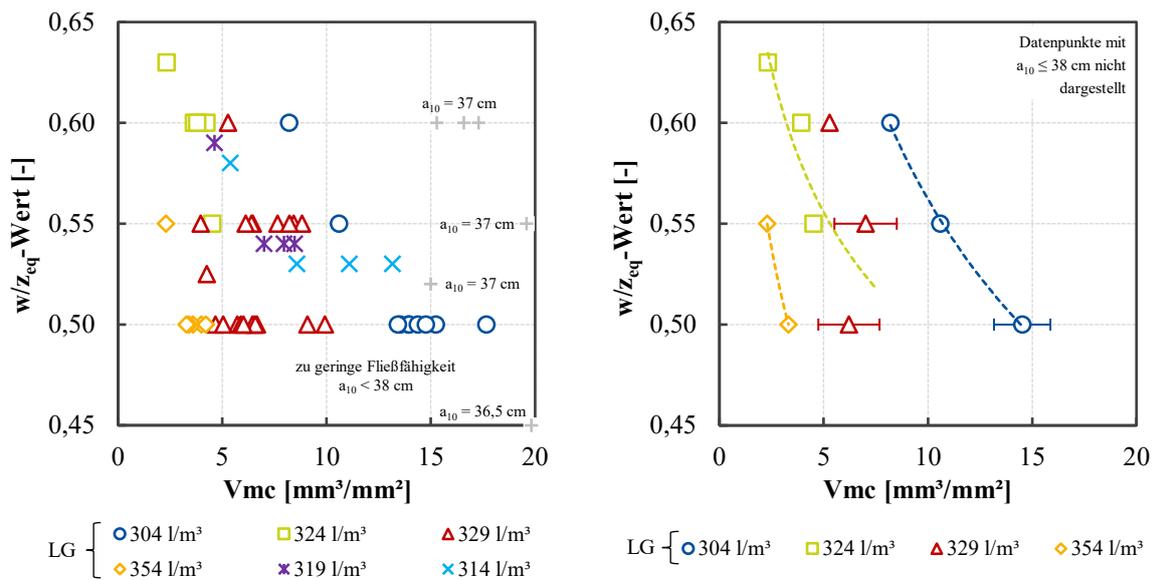


Abbildung 5.20: Oberflächenkennwert Vmc in Abhängigkeit des w/z_{eq} -Wertes der untersuchten Betone mit einem Größtkorn von 16 mm (links) und mittlerer Oberflächenkennwert Vmc in Abhängigkeit des w/z -Wertes der untersuchten Betonzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 16 mm (rechts)

Betrachtet man den in Abbildung 5.21 dargestellten Zusammenhang zwischen dem Leimgehalt und dem Oberflächenkennwert Vmc unter Berücksichtigung des w/z -Wertes, kann zum einen die bereits beschriebene Abnahme von Vmc mit zunehmenden Leimgehalt festgestellt werden. Zum anderen ist unter Berücksichtigung des w/z_{eq} -Wertes bei konstanten Leimgehalt eine Abnahme von Vmc mit zunehmenden w/z -Wert zu beobachten. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die daraus resultierende erhöhte Fließfähigkeit. Der Zusammenhang zwischen Leimgehalt und Vmc unter Berücksichtigung des w/z_{eq} -Wertes lässt sich mit einer potenziellen Ausgleichsfunktion abbilden, vgl. Abbildung 5.21, rechts.

$$LG_{CV,w/z_{eq}} = A_{\omega} \cdot Vmc^{n_{\omega}} \quad \text{Gl. 27}$$

Hierin beschreibt Vmc den Oberflächenkennwert und A und n die in Tabelle 5.3 aufgeführten Konstanten in Abhängigkeit des w/z -Wertes. Im Bereich geringer Leimgehalte (< 300 l/m³) und hoher w/z -Werte (0,55 und 0,60) ist eine trennscharfe Beurteilung des Leimgehaltes mittels der berücksichtigten Potenz-Funktion nicht mehr möglich. Grundsätzlich ist anzumerken, dass die

Trennschärfe zur Beurteilung des Leimgehalts in Abhängigkeit des w/z_{eq} -Wertes auf einem geringen Niveau ist.

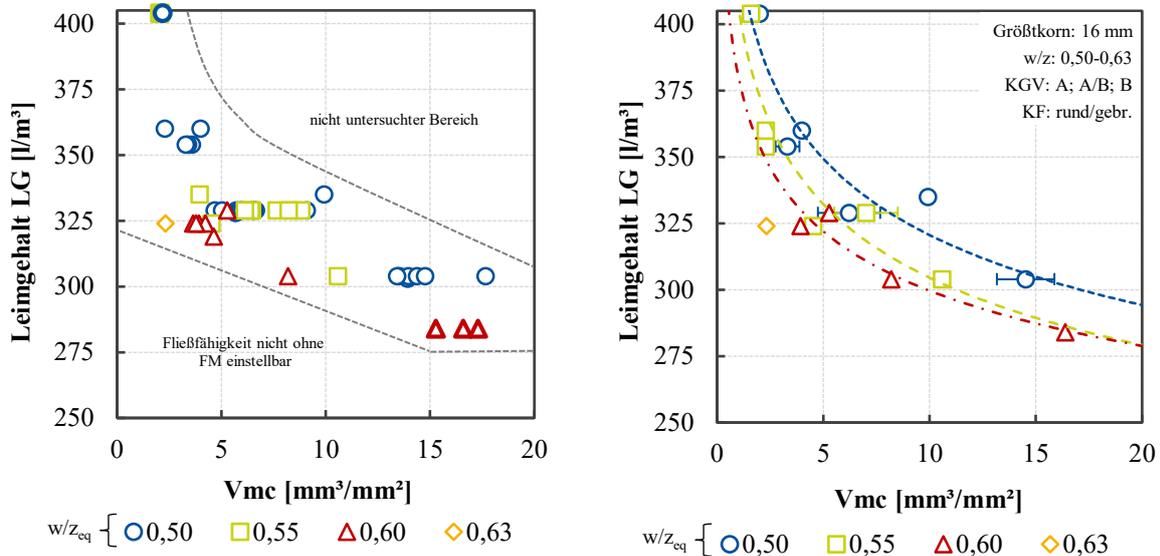


Abbildung 5.21: Oberflächenkennwert V_{mc} in Abhängigkeit des Leimgehaltes der untersuchten Betonzusammensetzungen unterschiedlicher w/z_{eq} -Werte (links) und mittlerer Oberflächenkennwert V_{mc} in Abhängigkeit des w/z_{eq} -Wertes der untersuchten Betonzusammensetzungen unterschiedlicher w/z_{eq} -Werte (rechts)

Die Konstanten der Ausgleichsfunktion sind in Abhängigkeit des w/z_{eq} -Wertes anzupassen. Tabelle 5.3 gibt einen Überblick der Konstanten A_{ω} und n_{ω} in Abhängigkeit des w/z_{eq} -Wertes.

Tabelle 5.3: Werte für Konstanten gemäß Gl. 27 in Abhängigkeit des w/z_{eq} -Wertes

Konstante	w/z_{eq} -Wert		
	0,50	0,55	0,60
A_{ω}	426,4	406,8	380,5
n_{ω}	-0,12	-0,13	-0,10
$R^2_{adj.}$	0,88	0,85	0,90

Zusammenfassend sind in Abbildung 5.22 die von V_{mc} abhängigen Gleichungsverläufe sowohl zur Beschreibung des Leimgehaltes in Abhängigkeit des Größtkorns als auch in Abhängigkeit des w/z_{eq} -Wertes dargestellt. Es ist deutlich ersichtlich, dass der Oberflächenkennwert V_{mc} einen geeigneten Kennwert zur Abschätzung des Leimgehaltes einer Betonzusammensetzung (ohne Verwendung verflüssigender Zusatzmittel) im Konsistenzbereich von F2 bis F6 darstellt. Dabei gilt es jedoch den Einfluss des Größtkorns zu berücksichtigen. Dies ist vor allem auf die unterschiedlichen spezifischen Partikeloberflächen in Abhängigkeit des Größtkorns bei variierenden Leimgehalten zurückzuführen.

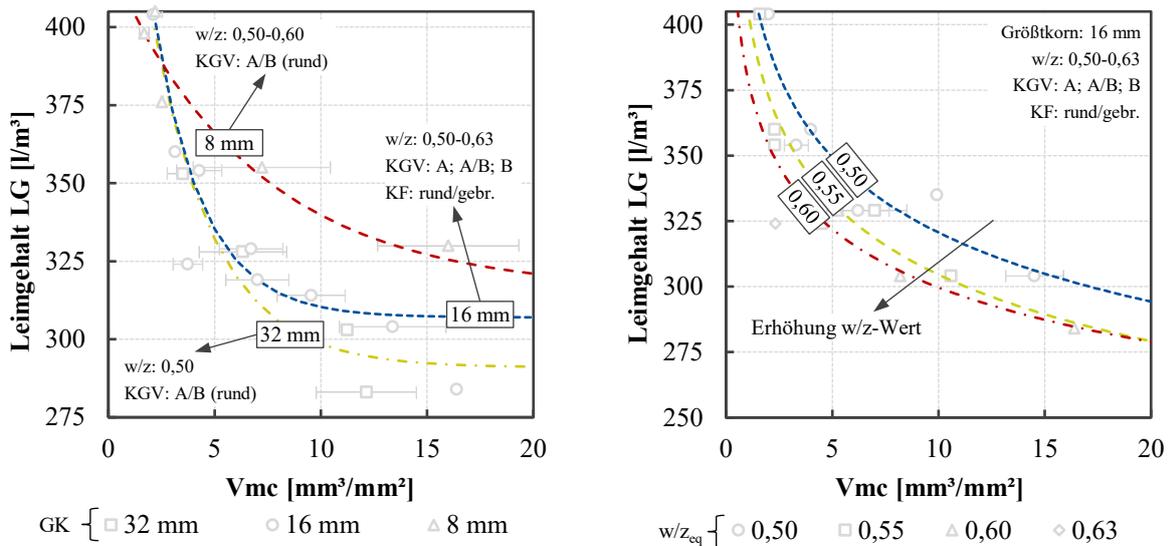


Abbildung 5.22: Oberflächenkennwert V_{mc} in Abhängigkeit des Leimgehaltes (links) und Oberflächenkennwert V_{mc} in Abhängigkeit des w/z-Wertes der untersuchten Betonzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 16 mm (rechts)

Leimgehalt unter Hinzunahme verflüssigender Zusatzmittel zur Einstellung der Konsistenz

In der modernen Betontechnologie werden zur Konsistenzsteuerung primär verflüssigende Zusatzmittel bei gleichzeitig niedrigen Leimgehalten und w/z-Werten eingesetzt. Betone der Konsistenzklassen $\geq F4$ werden in der praktischen Anwendung standardmäßig mit verflüssigenden Zusatzmitteln hergestellt.

Neben der Konsistenz beeinflussen verflüssigende Zusatzmittel auch die Oberflächengestalt bzw. die Oberflächenkennwerte des ausgebreiteten Frischbetons. Abbildung 5.23 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Leimgehalt LG , dem Ausbreitmaß a_{10} und dem Oberflächenkennwert V_{mc} einzelner Betonzusammensetzungen mit und ohne den Einsatz verflüssigender Zusatzmittel. Die x-z-Projektion lässt die verflüssigende Wirkung der Zusatzmittel bei konstantem Leimgehalt erkennen. Demgegenüber kann zudem die verflüssigende Wirkung infolge einer Erhöhung des Leimgehalts erkannt werden. Die y-z-Projektion zeigt den bereits in Kapitel 5.4.2.2 beschriebenen Zusammenhang zwischen dem Ausbreitmaß und V_{mc} . Eine klare Trennung zwischen den Betonzusammensetzungen mit und ohne verflüssigender Zusatzmittel kann nicht festgestellt werden. Tendenziell führt der Einsatz verflüssigender Zusatzmittel zu einer verstärkten Reduzierung des Oberflächenkennwertes V_{mc} gegenüber dem Leimgehalt bei vergleichbarer Fließfähigkeit.

Es lässt sich festhalten, dass eine Vorgehensweise, wie in Kapitel 5.4.3.2 beschrieben, zur Ermittlung des Leimgehalts anhand des Oberflächenkennwertes V_{mc} in Abhängigkeit des Größtkorns oder w/z-Wertes bei einem Einsatz verflüssigender Zusatzmittel nicht realisierbar

ist. Verflüssigende Zusatzmittel bewirken eine erhöhte Fließfähigkeit bei konstantem Leimgehalt, so dass für solche Betone der Oberflächenkennwert Vmc unabhängig der Konsistenz allein nicht zur Abschätzung des Leimgehaltes ausreicht. Deutlich wird dies vor allem bei Betrachtung der x-y-Projektion in Abbildung 5.23.

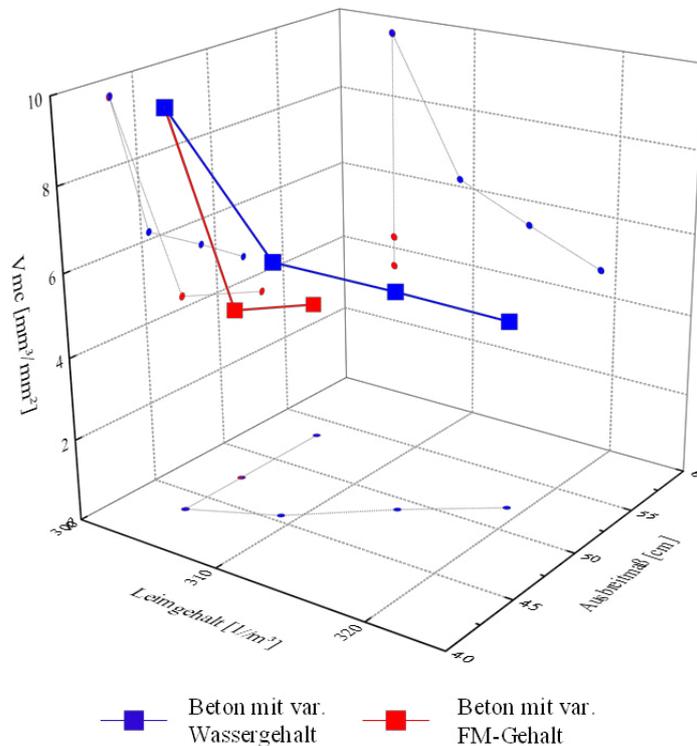


Abbildung 5.23: Dreidimensionaler Zusammenhang zwischen Ausbreitmaß a_{10} , Oberflächenkennwert Vmc und Leimgehalt unterschiedlicher Betonzusammensetzungen zum einen ohne den Einsatz verflüssigender Zusatzmittel und zum anderen mit dem Einsatz verflüssigender Zusatzmittel

Verflüssigende Zusatzmittel verändern bei konstantem Leimgehalt sowohl die Konsistenz als auch die Oberflächengestalt der Frischbetonoberfläche. Unter Berücksichtigung der Wirkung verflüssigender Zusatzmittel auf die Oberflächengestalt ist eine Abschätzung des Leimgehaltes nur bei konstanter Konsistenz möglich. Hierzu wird nachfolgend der Oberflächenkennwert Vmc auf die scheinbare Leimfläche normiert und als normierte Oberflächentextur κ bezeichnet, vgl. Gl. 28.

$$\kappa = \frac{Vmc}{A_{Leim}} \cdot A_{a_{i,IA}} \quad \text{Gl. 28}$$

Hierin wird die Oberflächengestalt durch den Kennwert Vmc beschrieben. Der Parameter A_{Leim} beschreibt die Fläche des Leims an der Oberfläche (vgl. Kapitel 5.4.3.1) und $A_{a_{i,IA}}$ beschreibt die gesamte Fläche des ausgebreiteten Frischbetons ermittelt mit $a_{i,IA}$ unter Annahme eines ideal kreisrunden Flächenquerschnitts.

Abbildung 5.24 zeigt die normierte Oberflächentextur κ in Abhängigkeit des Leimgehaltes für Betone unterschiedlicher Konsistenzklassen, die mit Zugabe von Fließmittel hergestellt wurden. Zur Auswertung der Zusammenhänge wurden insgesamt 83 Konsistenzprüfungen unterschiedlicher Betonzusammensetzungen berücksichtigt. Die betontechnologischen Parameter variierten in einer großen Bandbreite, sowohl im w/z_{eq} -Wert (0,48-0,60) als auch in der Korngrößenverteilung (A, A/B, B). Entsprechend ihres Ausbreitmaßes wurden die Betone in die Konsistenzklassen F3 (43-48 cm), F4 (49-55cm) und F5 (56-62 cm) eingeteilt. Eine Auswertung von Betonen der Konsistenzklassen F2 und F6 ist mit der Methode aufgrund der sehr rauen Oberfläche (F2) bzw. der sehr glatten Oberfläche (F6) nicht möglich.

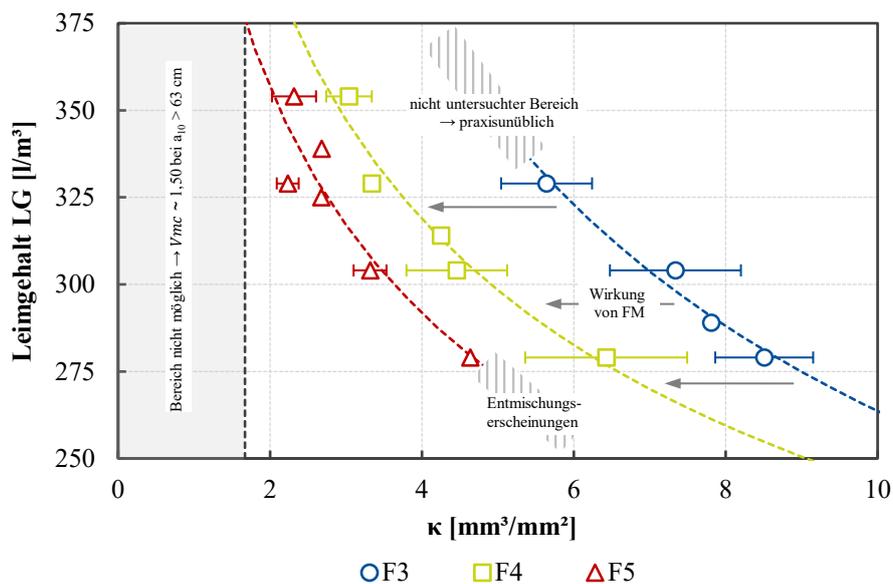


Abbildung 5.24: Zusammenhang zwischen der normierten Oberflächentextur κ gemäß Gl. 28 und dem theoretischen Leimgehalt LG in Abhängigkeit der Konsistenzklasse (F3, F4, F5) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen

Aus Abbildung 5.24 sind charakteristische Unterschiede zwischen den einzelnen Konsistenzklassen in Abhängigkeit des Parameters κ ersichtlich. So nimmt der Parameter κ mit zunehmender Konsistenz bei identischem Leimgehalt ab. Zurückzuführen ist diese Abnahme u. a. auf die Reduktion von V_{mc} mit zunehmenden Ausbreitmaß (vgl. Abbildung 5.10, Kapitel 5.4.2.2). Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 5.25 infolge des Zusammenhangs von κ und dem Ausbreitmaß a_{10} bei jeweils konstantem Leimgehalt verdeutlicht. In Abbildung 5.24 wird zudem die Wirkung von verflüssigenden Zusatzmitteln auf die Ausbildung der Oberflächentextur verdeutlicht. Eine erhöhte Fließfähigkeit bewirkt eine Abnahme von V_{mc} , die mit einer Glättung der Frischbetonoberfläche einhergeht. Infolge des Einsatzes von Fließmittel resultiert bei identischen Leimgehalt eine erhöhte Fließfähigkeit und demnach ein geringerer Wert für V_{mc} (vgl. Kapitel 5.4.2). Da die normierte Oberflächentextur κ u. a. von V_{mc} abhängig ist, resultiert daraus auch für diesen Parameter eine Abnahme infolge des Einsatzes von verflüssigendem Zusatzmittel bei konstanten Leimgehalt (horizontaler Pfeil in Abbildung 5.24).

In Abhängigkeit des Leimgehaltes ist innerhalb einer Konsistenzklasse jeweils eine signifikante Veränderung der normierten Oberflächentextur κ feststellbar. So nimmt mit abnehmenden Leimgehalt LG unabhängig der Konsistenzklasse der Parameter κ ab. Ferner verändert sich die Steigung von κ in Abhängigkeit der Konsistenzklasse. Bei der Konsistenzklasse F5 ist ein sehr stark ausgeprägter Einfluss erkennbar. Die in Gl. 29 dargestellte Regressionsfunktion bildet den Zusammenhang zwischen κ und dem Leimgehalt LG , insbesondere im Bereich von 279 l/m³ bis 354 l/m³ der Konsistenzklassen F3 und F4 sehr gut ab. Die Trennschärfe zur präzisen Ermittlung des Leimgehalts zwischen den einzelnen Konsistenzklassen nimmt mit zunehmender Fließfähigkeit deutlich ab. Zwischen der Konsistenzklasse F3 und F4 ist bei einem Leimgehalt zwischen 279 l/m³ und 329 l/m³ eine sehr präzise Beurteilung möglich ($R^2_{\text{adj.F3}} = 0,96$ und $R^2_{\text{adj.F4}} = 0,95$). Diese nimmt für die Konsistenzklasse F5 dagegen deutlich ab ($R^2_{\text{adj.F5}} = 0,85$).

$$LG_{IA,Fx} = A_F \cdot \kappa^{n_F} \quad \text{Gl. 29}$$

In Gl. 29 bezeichnet κ die normierte Oberflächentextur gemäß Gl. 28 und A_F und n_F beschreiben die in Tabelle 5.4 aufgeführten Konstanten in Abhängigkeit der Konsistenzklasse. Wie aus Abbildung 5.24 ersichtlich ist, nähert sich Vmc bei sehr fließfähigen Frischbetonen für $a_{10} > 63$ cm einem Grenzwert von etwa 1,50 mm³/mm² an. Demnach ergibt sich unter Annahme der Steigung von F5 theoretisch die Möglichkeit den Leimgehalt bis maximal etwa 375 l/m³ mit dieser Methode bei fließfähigen Frischbetonen zu bestimmen. Die Bestimmung geringer Leimgehalte ($LG < 279$ l/m³) wird vor allem durch Entmischungerscheinungen der Frischbetone beeinflusst, so dass eine zielsichere Ermittlung in diesem Wertebereich, vor allem bei erhöhter Fließfähigkeit, nicht gegeben ist. Grundsätzlich gilt jedoch, dass mit dem hier vorliegenden Wertebereich weit mehr als 80 % des deutschen Betonmarktes abgedeckt werden.

Tabelle 5.4: Werte für Konstanten gemäß Gl. 29 in Abhängigkeit der Konsistenzklasse

Konstante	Konsistenzklasse		
	F3	F4	F5
A_F	657,6	481,1	435,5
n_F	-0,40	-0,30	-0,29
$R^2_{\text{adj.}}$	0,96	0,95	0,85

Zur Bewertung der Anwendbarkeit und Genauigkeit der Methode zeigt Abbildung 5.25 sowohl den theoretischen Leimgehalt LG als auch den auf Basis von Gl. 29 bildbasiert ermittelten Leimgehalt $LG_{IA,Fx}$ unterschiedlicher Betonzusammensetzungen. Die dort untersuchten Betone waren nicht Bestandteil der Untersuchungen zur Herleitung von Gl. 29. Die bildbasiert ermittelten Leimgehalte $LG_{IA,Fx}$ zeigen gegenüber dem theoretischen Leimgehalt LG vergleichbare Werte. Die Abweichung beträgt bei keinen der bildbasiert ermittelten Leimgehalte mehr als 3,0 % gegenüber dem theoretischen Leimgehalt.

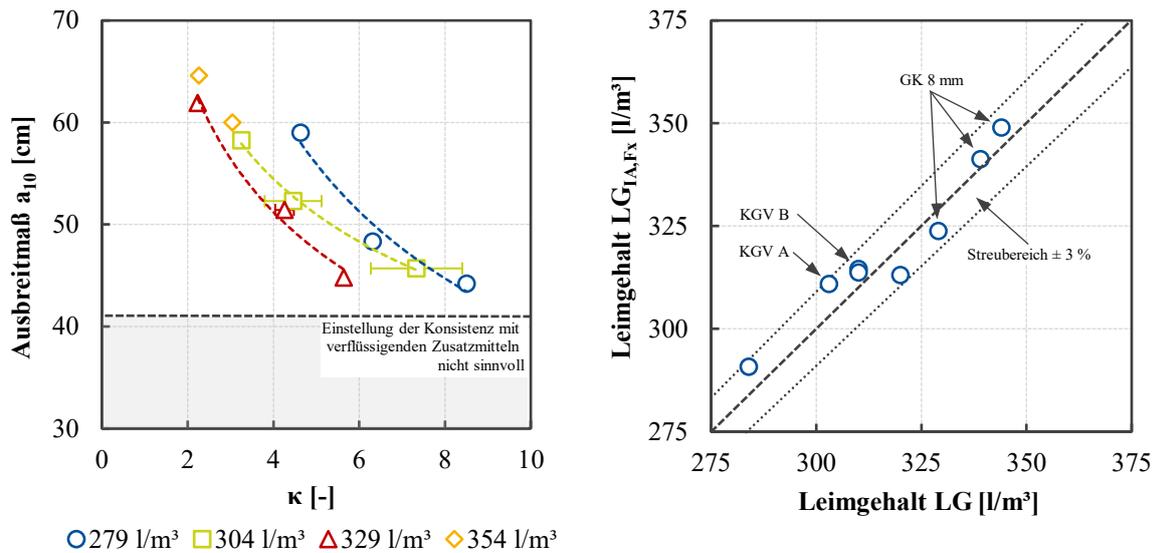


Abbildung 5.25: Zusammenhang zwischen der normierten Oberflächentextur κ und dem Ausbreitmaß a_{10} in Abhängigkeit des Leimgehalts LG (links) sowie Gegenüberstellung des bildbasiert ermittelten Leimgehalts (vgl. Gl. 29) und dem theoretischen Leimgehalt (rechts)

5.4.4 Wassergehaltsschwankungen

Abbildung 5.26 zeigt die Veränderung des Ausbreitmaßes a_{10} sowie des Oberflächenkennwertes Sk_u gemäß Kapitel 2.5.4 in Abhängigkeit einer systematischen Wasserüberdosierung (5 bis 15 l/m³) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen. Erwartungsgemäß ist mit zunehmender Wasserdosierung eine Zunahme des Ausbreitmaßes bzw. der Konsistenz feststellbar. Der Effekt ist dabei stark von der Grund-Betonzusammensetzung und den entsprechenden Ausgangs-Betoneigenschaften abhängig. So ist je nach Ausgangszusammensetzung bei einer Ausgangskonsistenz von ca. 43,5 cm ein Anstieg auf 49 cm (M101) bzw. auf 53 cm (M182) bei einer Wasserüberdosierung von 10 l/m³ zu beobachten. Die Veränderung des Oberflächenkennwertes Sk_u ist dagegen vergleichsweise unabhängig der Ausgangsbeton-zusammensetzung.

Zur verbesserten Vergleichbarkeit der einzelnen Kennwerte zeigt Abbildung 5.27 die relative Veränderung des Ausbreitmaßes a_{10} und des Oberflächenkennwertes Sk_u infolge einer systematischen Wasserüberdosierung. Hierzu wird das Ausbreitmaß a_{10} des überdosierten Betons auf das des planmäßig dosierten Betons bezogen. Gleiches gilt für den Oberflächenkennwert Sk_u . Die Konsistenz weist im Mittel eine maximale Zunahme gegenüber der Ausgangskonsistenz von etwa 20 % bei einer Wasserüberdosierung von 15 l/m³ auf. Betrachtet man die relative Veränderung des Oberflächenkennwertes Sk_u , so ergeben sich die in Abbildung 5.26 dargestellten Zusammenhänge. Die relative Veränderung des Oberflächenkennwertes Sk_u ist dabei deutlich stärker von der Betonzusammensetzung bzw. den Eigenschaften abhängig. So weist die mittlere Veränderung des Oberflächenkennwertes bei einer Wasserüberdosierung von 15 l/m³ eine Größenordnung von etwa 70 % auf.

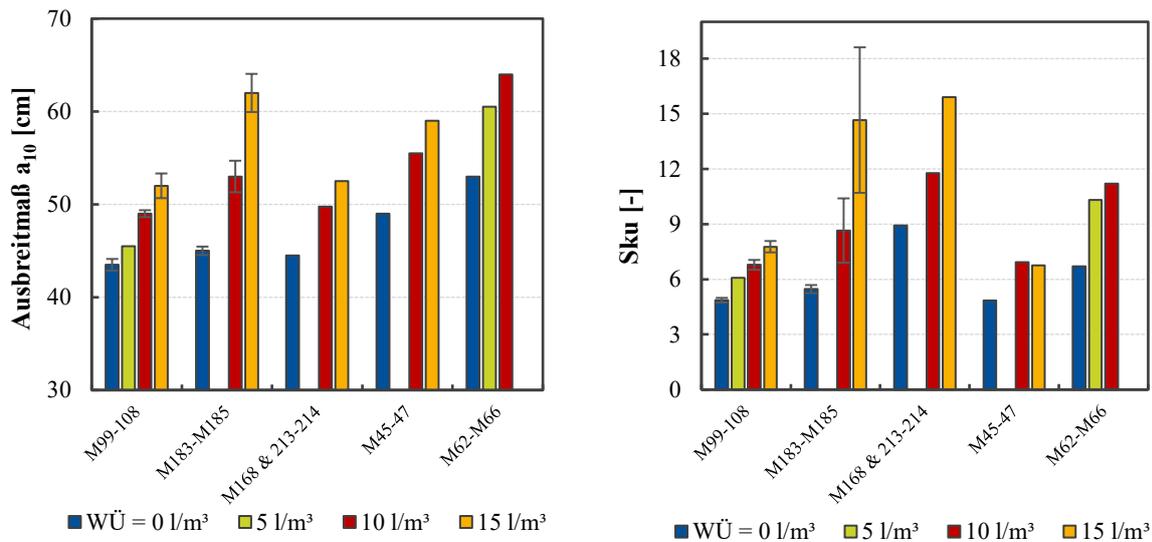


Abbildung 5.26: Ausbreitmaß a_{10} in Abhängigkeit einer systematischen Wasserüberdosierung (5-15 l/m^3) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen (links) und Oberflächenkennwert Sk_u in Abhängigkeit einer systematischen Wasserüberdosierung (rechts); Betonzusammensetzungen vgl. Anhang B

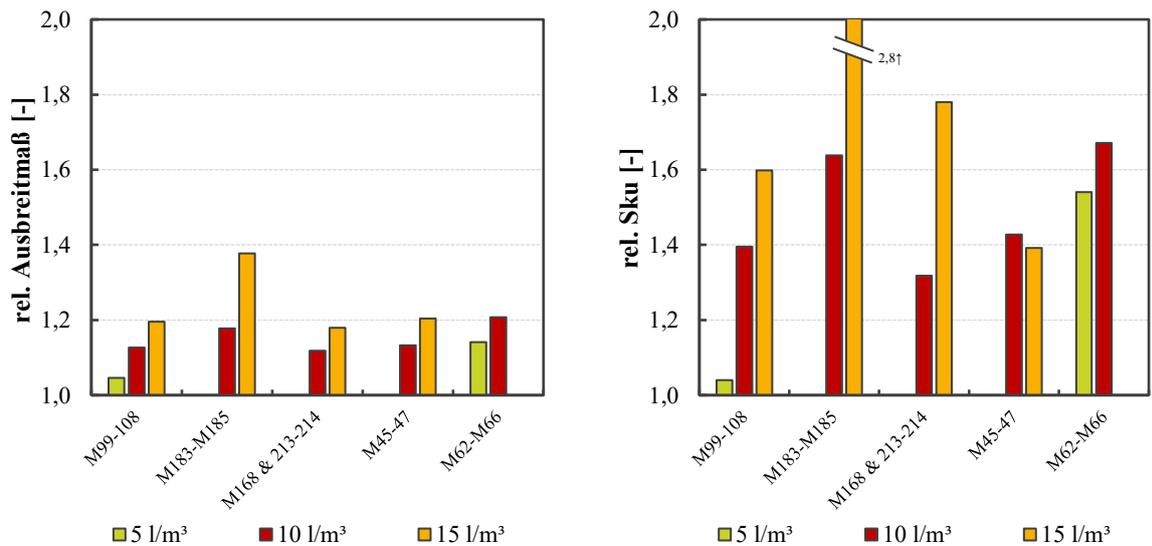


Abbildung 5.27: Ausbreitmaß bezogen auf das Ausbreitmaß der Grundmessung in Abhängigkeit einer Wasserüberdosierung (5-15 l/m^3) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen (links) und Oberflächenkennwert Sk_u ebenfalls bezogen auf den Wert der Grundmessung in Abhängigkeit einer Wasserüberdosierung (rechts); Betonzusammensetzungen vgl. Anhang B

Die Schwankungen des Ausbreitmaßes weisen vor allem bei Wasserüberdosierungen von bis zu 10 l/m^3 vielfach eine Schwankungsbreite von $\leq 6 \text{ cm}$ auf und liegen somit innerhalb einer Konsistenzklasse. Demgegenüber scheint der Oberflächenkennwert Sk_u einen Kennwert mit vergrößerter Trennschärfe zur systematischen Bewertung von Wassergehaltsschwankungen darzustellen.

Abbildung 5.28 zeigt beispielhaft die Oberflächenmodelle einer Betonzusammensetzung in Abhängigkeit der systematischen Wasserüberdosierung von 10 l/m^3 und 15 l/m^3 . Der Bereich zur

Berechnung von Sk_u wurde jeweils mittig aus dem ausgebreiteten Frischbeton mit einem Durchmesser von 350 mm extrahiert (vgl. Kapitel 4.8.1). Visuell sind Unterschiede in der Oberflächengestalt bzw. -textur in Abhängigkeit der Wasserüberdosierung ersichtlich. So lassen sich an der Oberfläche der Referenz-Betonzusammensetzung ($\pm 0 \text{ l/m}^3$) im mittleren Bereich eine Vielzahl grober Gesteinskörner feststellen. Aufgrund des geringen Ausbreitmaßes von 43,5 cm haben sich die groben Gesteinskörner noch nicht ausgebreitet und sammeln sich vor allem im mittleren Bereich an. Mit zunehmender Wasserzugabe ($+ 10 \text{ l/m}^3$) und dementsprechend steigender Konsistenz (49 cm) findet eine zunehmende Separierung der groben Gesteinskörner statt. So sind bei einer weiteren Steigerung der Wasserüberdosierung ($+ 15 \text{ l/m}^3$) nur noch vereinzelte grobe Gesteinskörner im betrachteten mittleren Bereich des Oberflächenmodells ersichtlich. Die beschriebenen visuell erkennbaren Abweichungen führen zu einer Veränderung des Oberflächenkennwertes Sk_u in Abhängigkeit der Wasserüberdosierung. Die so ermittelten Ergebnisse können genutzt werden, um eine bildbasierte Bewertung des Frischbetons hinsichtlich einer Wasserüberdosierung vorzunehmen.

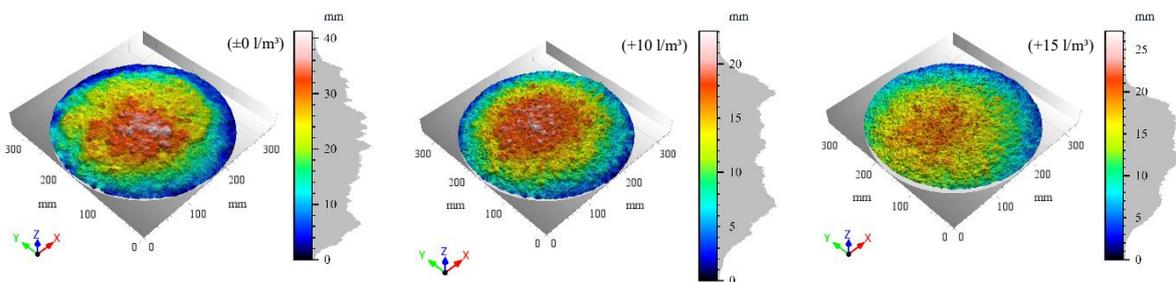


Abbildung 5.28: Detailansicht ($\varnothing = 350 \text{ mm}$) der 3D-Oberflächenmodelle von ausgebreiteten Frischbetonen für unterschiedliche Wasserüberdosierungen - links: Ausgangsbetonzusammensetzung ($\pm 0 \text{ l/m}^3$); mitte: $+ 10 \text{ l/m}^3$; rechts: $+ 15 \text{ l/m}^3$

Eine Bewertung von Wassergehaltsschwankungen im Rahmen der Konsistenzprüfung ist mittels dem in Abbildung 5.29 dargestellten Zusammenhang zwischen der relativen Veränderung des Oberflächenkennwertes Sk_u und der Wasserüberdosierung möglich. Als Vergleichsgröße ist zudem die relative Entwicklung des Ausbreitmaßes in Abhängigkeit der Wasserüberdosierung dargestellt. Zur Berechnung der Zusammenhänge wurden 15 Betone mit differierenden Eigenschaften (Leimgehalt, w/z-Wert, Sieblinie, FM etc.) bei einer Wasserüberdosierung von 10 l/m^3 und 15 l/m^3 herangezogen. Punktuelle Ergänzungen erfolgten mit unterschiedlichen Betonzusammensetzungen bei einer Wasserüberdosierung von 5 l/m^3 und 20 l/m^3 .

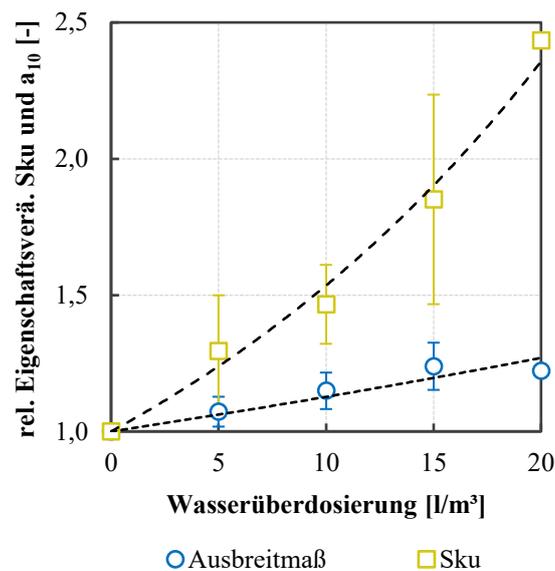


Abbildung 5.29: Relative Eigenschaftsveränderung in Abhängigkeit einer Wasserüberdosierung (5-20 l/m³) - Ausbreitmaß a_{10} und Oberflächenkennwert Sku

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Oberflächenkennwert Sku sehr gut geeignet ist, eine bildbasierte bzw. photogrammetrische Bewertung von Wassergehaltsschwankungen zu ermöglichen. Diese Bewertung ist jedoch nur unter der Voraussetzung möglich, dass der Oberflächenkennwert Sku_0 der Ausgangsbetonzusammensetzung ohne Wassergehaltsschwankung, z. B. aus der Erstprüfung, bekannt ist. Die relativ großen Streubereiche in Abbildung 5.29 deuten an, dass eine allgemeingültige Bewertung vielfältiger Betonzusammensetzungen mit differierenden Eigenschaften nur mit gewissen Abweichungen möglich ist. Wird jedoch bereits in der Erstprüfung der Einfluss von Wassergehaltsschwankungen untersucht und somit Sku für den spezifischen Beton kalibriert, ist eine sehr hohe Präzision möglich.

Da die Fließfähigkeit des Frischbetons die Oberflächengestalt bzw. -textur entscheidend beeinflusst (vgl. Kapitel 5.4.2), wird dadurch folglich auch der Oberflächenkennwert Sku indirekt beeinflusst. Die Fließfähigkeit wird durch eine Vielzahl betontechnologischer Parameter beeinflusst (vgl. Kapitel 2.3.1). So führt eine Erhöhung des Wassergehaltes zu einer Erhöhung des Leimgehaltes und dementsprechend zu einer erhöhten Fließfähigkeit. Neben dem Leimgehalt wird die Fließfähigkeit in der modernen Betontechnologie primär durch den Einsatz verflüssigender Zusatzmittel sichergestellt. Folglich führt der Einsatz verflüssigender Zusatzmittel neben der Steigerung der Fließfähigkeit ebenfalls zu einer Veränderung der Oberflächengestalt bzw. -textur (vgl. Kapitel 5.4.3.2). Demnach ist bei der Bewertung einer Wasserüberdosierung in Abhängigkeit von Sku die Kenntnis über den Einflussfaktor bzw. die Einflussfaktoren, die zur erhöhten Fließfähigkeit geführt haben, unbedingt erforderlich. Eine genaue Kenntnis über die verwendeten Feststoffmengen (Zement, Zusatzstoffe) ist in der Praxis über die Einwaageprotokolle gegeben. Neben ungewollten Feuchteschwankungen, z. B. der Gesteinskörnung, ist eine erhöhte Fließfähigkeit daher zumeist auf die Zugabe verflüssigender Zusatzmittel bzw.

unerwünschter Interaktionen der verflüssigenden Zusatzmittel mit weiteren Ausgangsstoffen zurückzuführen. Eine Abschätzung des Einflussfaktors (Wasser oder verflüssigendes Zusatzmittel), der zur erhöhten Fließfähigkeit der Betonzusammensetzung geführt hat, kann im Rahmen der Konsistenzprüfung über das Verhältnis des Setzfließmaßes zum Ausbreitmaß erfolgen, vgl. Gl. 30.

$$\beta = \frac{a_i}{s_i} \tag{Gl. 30}$$

Hierin beschreibt β den Verhältniswert des Ausbreitmaßes a_i und des Setzfließmaßes s_i . Der Index i beschreibt jeweils den Zeitpunkt der Konsistenzprüfung. Abbildung 5.30 stellt dazu die Verhältniswerte $\beta_{W,j}$ einer Betonzusammensetzung bezogen auf den Verhältniswert β_0 der Ausgangsbetonzusammensetzung ohne Wasserüberdosierung dar. Darüber hinaus sind weitere Verhältniswerte von Betonzusammensetzungen dargestellt, wobei die Konsistenz auf ein vergleichbares Ausbreitmaß mit verflüssigendem Zusatzmittel eingestellt wurde. Deutlich ersichtlich ist, dass die Verhältniswerte bei einer Konsistenzveränderung infolge einer Wasserüberdosierung vergleichbare Größenordnungen (mindestens 0,95) gegenüber der Ausgangsbetonzusammensetzung ohne Wasserüberdosierung aufweisen. Bei Verwendung von verflüssigenden Zusatzmittel sinken die Verhältniswerte $\beta_{W,j}/\beta_0$ bei vergleichbarer Konsistenz deutlich auf 0,83 (47-50 cm) und 0,77 (50-53 cm) ab.

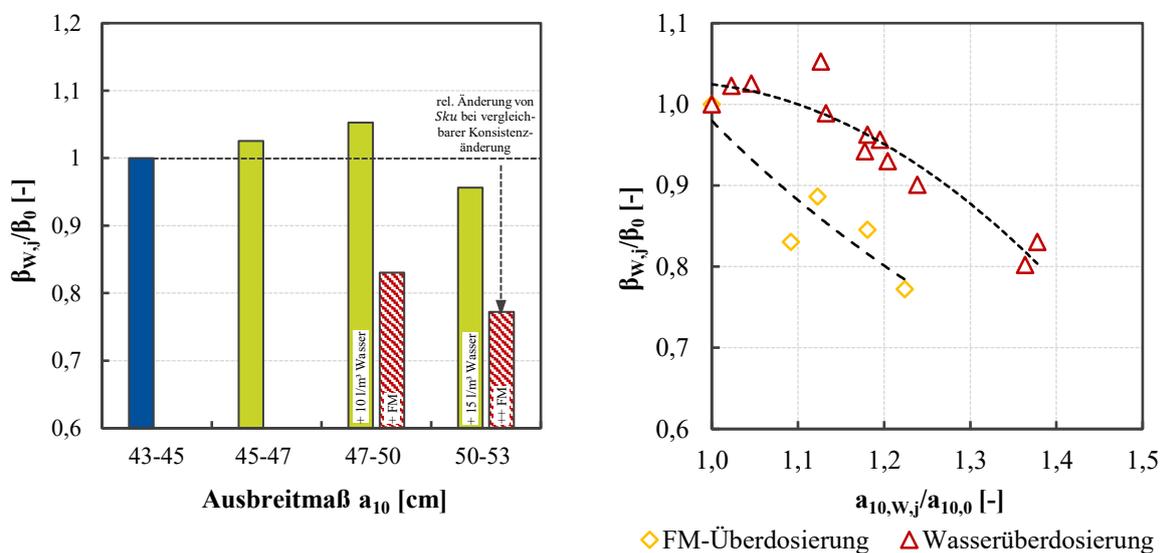


Abbildung 5.30: Verhältnis $\beta_{W,j}/\beta_0$ einzelner Betonzusammensetzungen in Abhängigkeit der Konsistenz (links) und Verhältnis $\beta_{W,j}/\beta_0$ in Abhängigkeit des Verhältnisses $a_{10,W,j}/a_{10,0}$ (rechts)

Weiterhin dargestellt ist in Abbildung 5.30 eine Gegenüberstellung der Verhältniswerte $\beta_{W,j}/\beta_0$ von Betonzusammensetzungen in Abhängigkeit der bezogenen Konsistenzsteigerung $a_{10,W,j}/a_{10,0}$, bei denen die Konsistenz zum einen mittels Wasserüberdosierung als auch mittels verflüssigendem Zusatzmittel eingestellt wurde. Bei einer Konsistenzveränderung mittels

verflüssigendem Zusatzmittel ist eine deutlich stärkere Abnahme des relativen Verhältniswertes $\beta_{W,j}/\beta_0$ zu beobachten. Eine Abschätzung ist jedoch nur bis Konsistenzveränderungen von etwa + 30 % gegenüber der Ausgangsbetonzusammensetzung ohne erhöhten Wassergehalt bzw. FM-Gehalt möglich. Mit Blick auf die Praxis wird dies aber als vollkommen ausreichend bewertet.

In Abhängigkeit des relativen Verhältniswertes $\beta_{W,j}/\beta_0$ lassen sich die folgenden Bedingungen hinsichtlich einer Abschätzung der Eigenschaft (Wasser oder verflüssigendes Zusatzmittel), die zur erhöhten Fließfähigkeit des Frischbetons geführt hat, ableiten:

$$0,9 \leq \beta_{W,j}/\beta_0 \quad \rightarrow \text{Wasserüberdosierung}$$

$$\beta_{W,j}/\beta_0 < 0,9 \quad \rightarrow \text{Zugabe von verflüssigendem Zusatzmittel}$$

Wie bereits erläutert, ist eine zielsichere Abschätzung jedoch nur bis zu einer Konsistenzsteigerung von

$$a_{10,W,j}/a_{10,0} < 1,30$$

möglich. Weitere Zusatzmittel, die gegebenenfalls eine (wenn auch ungewollte) Veränderung der Konsistenz bewirken, wie z. B. Luftporenbildner, wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Der Einfluss von Schwankungen in der Menge von Zusatzstoffen, die zu einer gewissen Verbesserung der Fließfähigkeit führen, wie z. B. Steinkohlenflugasche, kann in der Praxis über die Kontrolle der Einwaage-Protokolle erfolgen und muss daher nicht am Frischbeton geprüft werden.

Abbildung 5.31 gibt einen zusammenfassenden schematischen Überblick zur Bewertung einer Wasserüberdosierung mittels des Oberflächenkennwertes Sk_u . Zusätzlich ist die Einbindung der Erstprüfung in die Bewertung dargestellt.

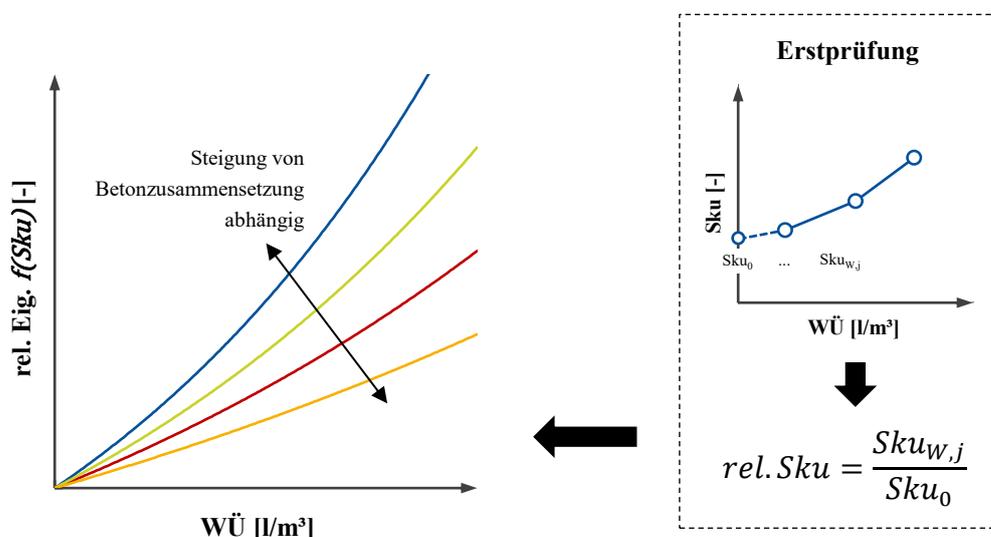


Abbildung 5.31: Schematischer Überblick zur Bewertung einer Wasserüberdosierung $W\ddot{U}$ unter Einbeziehung der Erstprüfung mittels des Oberflächenkennwertes Sk_u

5.4.5 Granulometrische Eigenschaften

5.4.5.1 Überblick und Methodik

Der Gehalt, das Größtkorn und insbesondere die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung im Beton haben signifikanten Einfluss auf die Betoneigenschaften. Alle genannten Parameter unterliegen dabei jedoch mehr oder minder ausgeprägten Schwankungen, die folglich die Betoneigenschaften beeinflussen. Hinzu kommen Entmischungsprozesse, die die Homogenität des Betons beeinträchtigen können. Ziel der experimentellen Untersuchungen mit dem nachfolgend vorgestellten Verfahren, ist eine präzise Bestimmung granulometrischer Eigenschaften anhand von Oberflächeneigenschaften des ausgebreiteten Frischbetons. Darüber hinaus sollen bildbasierte Kennwerte bzw. Kriterien z. B. zur Beurteilung von Entmischungsprozessen abgeleitet werden.

Die in Kapitel 4.8.2 beschriebene Methodik erlaubt eine zielsichere semantische Instanz-Segmentierung der groben Gesteinskörnung am ausgebreiteten Frischbeton unter Anwendung von CNN in einer Einzelaufnahme. In einem weiteren Schritt ist mit Hilfe digitaler Bildverarbeitungsalgorithmen die Berechnung geometrischer 2D-Eigenschaften der einzelnen segmentierten Bereiche bzw. Gesteinskörner möglich. Im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich die ermittelten 2D-Eigenschaften auf die Fläche (A_i), den Umfang (P_i) sowie den maximalen und minimalen Feret-Durchmesser ($d_{F,max}$ und $d_{F,min}$) eines jeden detektierten Gesteinskorns bzw. Partikels. Der Feret-Durchmesser beschreibt gemäß *DIN ISO 9276-6* den maximalen sowie minimalen Abstand zweier paralleler Tangenten eines Partikels. Diese Messgröße wurde in den Untersuchungen angewendet, da u. a. der minimale Feret-Durchmesser theoretisch ausschlaggebend dafür ist, ob ein Partikel durch die Maschen eines Siebes bei der mechanischen Siebung passt oder nicht. Abbildung 5.32 gibt einen Überblick über die ermittelten geometrischen 2D-Eigenschaften der einzelnen Partikel.

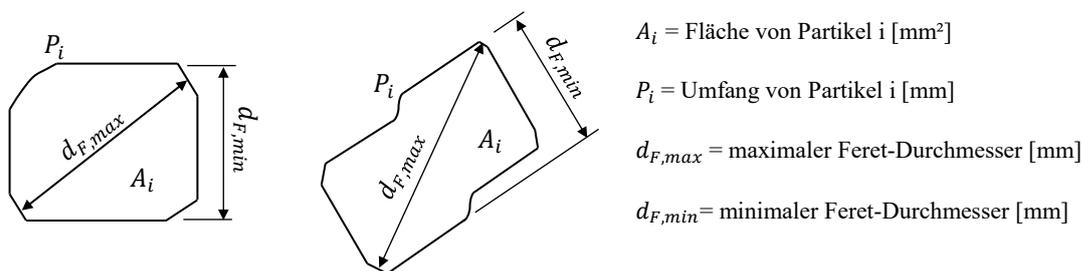


Abbildung 5.32: Geometrische 2D-Eigenschaften einzelner Partikel (in Anlehnung an DIN ISO 9276-6)

Die so ermittelten geometrischen 2D-Eigenschaften der groben Gesteinskörner gestatten im Nachgang eine Berechnung granulometrischer Eigenschaften, wie z. B. der Korngrößenverteilung oder von Kornformparametern. In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Ansätzen zur Berechnung einzelner Kornformparameter (Al-Rousan et al. 2007; Zlatev 2009), die auch u. a. in *DIN ISO 9276-6* normativ geregelt sind. Die Ermittlung der notwendigen geometrischen

Eigenschaften erfolgt dabei zum einen mittels digitaler Bildanalyse an Einzelbildaufnahmen und demnach mit 2D-Eigenschaften (Han et al. 2016) oder an Mehrbildaufnahmen mit 3D-Eigenschaften (Sun et al. 2020). Bei der Einzelbildaufnahme bzw. 2D-Projektionsverfahren werden die Partikelkonturen nur aus einer Projektionsrichtung erfasst und demnach nur in einer Ebene abgebildet. Veränderungen der Konturen in anderen Ebenen bzw. Raumrichtungen können so nicht erfasst werden. Zur Bewältigung dieses Problems liegen in der Literatur vielfältige 3D-Projektionsverfahren vor, die Projektionsbilder der einzelnen Partikel aus verschiedenen Messrichtungen erzeugen. Eine Übersicht geometrischer Formparameter ist nachfolgend in Tabelle 5.5 sowie in (Al-Rousan et al. 2007; Zlatev 2009; Koffler 2019) gegeben.

Tabelle 5.5: Übersicht über in der Literatur verwendeter Kornformparameter

Formparameter	Gleichung	Literaturangabe
Rundheit (engl. Roundness)	$R = \frac{P^2}{4 \cdot \pi \cdot A}$	(AL-ROUSAN 2007)
Seitenverhältnis (engl. Elongation)	$E = \frac{d_{F,max}}{d_{F,min}}$	(DIN ISO 9276-6)
Sphärität (engl. Sphericity)	$SPHT = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} = \frac{1}{C}$	(DIN ISO 9276-6); (HUSS 2010)
Flächenäquivalenter Durchmesser (engl. Equivalent Circle Diameter)	$d_A = \sqrt{4 \cdot A / \pi}$	(KOFFLER 2019)

A = Fläche [mm²]; P = Umfang [mm]; d_{F,max} = max. Feret-Durchmesser [mm]; d_{F,min} = min. Feret-Durchmesser [mm];

Neben der Ermittlung von Kornformparametern finden sich in der Literatur ist eine Vielzahl von Untersuchungen zur Ermittlung der Korn- bzw. Partikelgrößenverteilung mittels digitaler Bildanalyse (Mora et al. 1998). Als Referenzmethode zur Überprüfung der Genauigkeit wird dabei zumeist die mechanische Siebanalyse (vgl. *DIN EN 933-1*) angewendet. Untersuchungen von PICANDET in (Amziane und Collet 2017) zeigen, dass eine Berechnung der kumulierten Korngrößenverteilung auf Basis der Flächeninhalte der einzelnen Partikel zu vergleichbaren Ergebnissen wie die mechanische Siebanalyse führt. Die Berechnung der kumulierten Korngrößenverteilung – wie in der Betontechnologie üblich – kann u. a. in Anlehnung an (Amziane und Collet 2017) gemäß Gl. 31 erfolgen. In weiteren Untersuchungen wurden darüber hinaus vergleichbare Ergebnisse zur mechanischen Siebanalyse bei einer Berechnung auf Basis des diagonalen Durchmessers erzielt (Kumara et al. 2012). Dabei muss berücksichtigt werden, dass Partikel, die ein Quadratloch-Sieb passieren, eine größere Dimension als die Lochweite aufweisen können. Vor allem längliche Partikel können geringere Lochweiten als deren Partikelgröße passieren. Die Sieb-Lochweite ist dabei als Maß der seitlichen Partikelabmessung anzusehen (Kwan et al. 1999). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Korngrößenverteilung auf Basis des Flächeninhaltes der einzelnen Partikel mittels Gl. 31 berechnet.

$$D_A(X < x_n) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i \quad \text{Gl. 31}$$

Hierin beschreibt X die betrachtete Größe der Partikel und $D_A(X < x_n)$ den kumulierten prozentualen Anteil der projizierten Fläche der Partikel, die kleiner der Partikelgröße x_n sind. A_i definiert den Flächeninhalt jedes einzelnen segmentierten Partikels und A_T den summierten Flächeninhalt aller segmentierten Partikel. Verfahren bzw. Vorgehensweisen zur bildbasierten Ermittlung der Korngrößenverteilung, die z. B. eine Ermittlung in Vol.-% gestatten, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. NEUMANN (2018) beschreibt u. a. die bildbasierte Ermittlung der Korngrößenverteilung auf Basis des äquivalenten Volumens des Ellipsoids der einzelnen Gesteinskörner.

5.4.5.2 Korngrößenverteilung

Abbildung 5.33 zeigt die Korngrößenverteilung unterschiedlicher Betonzusammensetzungen ermittelt sowohl mit mechanischer Siebanalyse als auch mit der bildbasierten Methodik. Die zugehörige mechanische Siebanalyse erfolgte indem die zuerst bildoptisch erfasste Frischbetonprobe über einem 4 mm Sieb ausgewaschen, anschließend getrocknet und im Siebversuch gemäß DIN EN 933-1 untersucht wurde. Die Berechnung der bildbasierten Korngrößenverteilung erfolgte unter Anwendung von Gl. 31. Als Lochweite wurde $d_{F,min}$ angenommen.

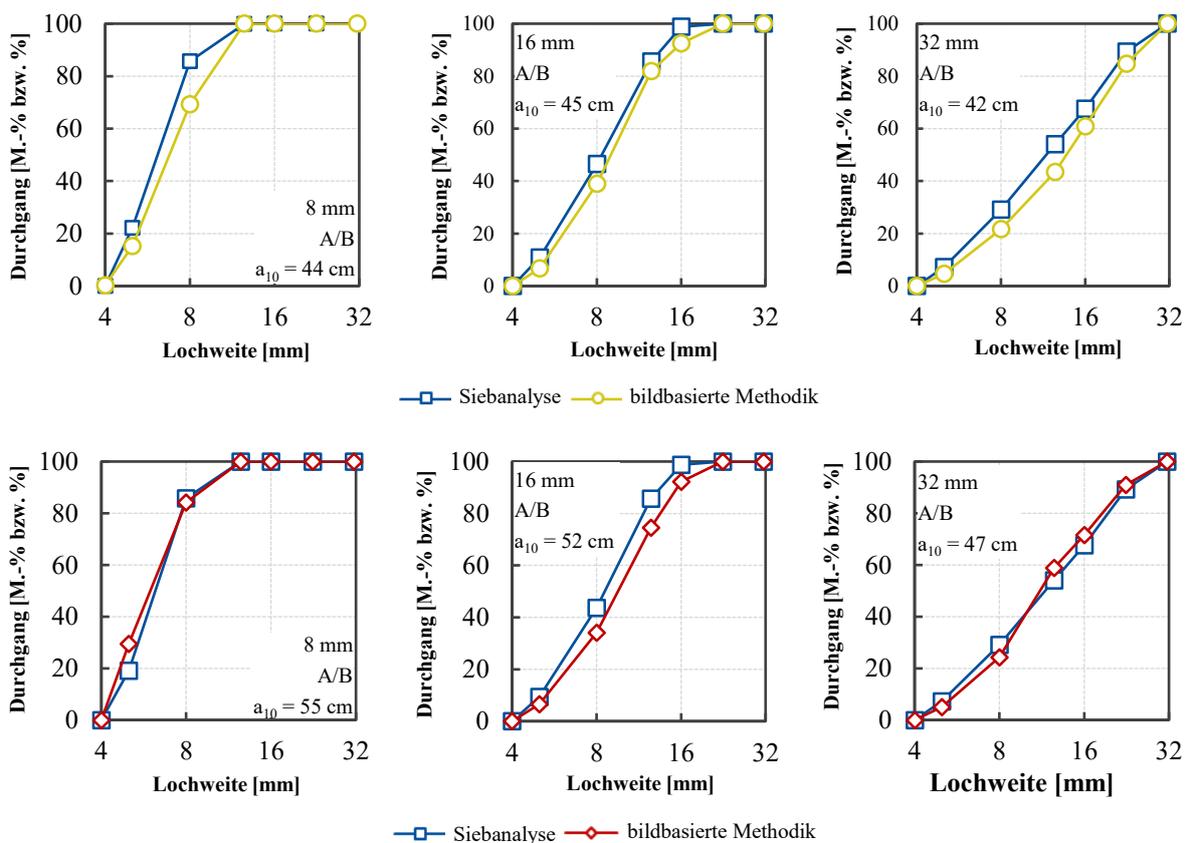


Abbildung 5.33: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung (≥ 4 mm) mit unterschiedlichem Größtkorn (8 mm, 16 mm, 32 mm) unterschiedlicher Betone ($a_{10} = 42$ cm bis 55 cm) in Abhängigkeit der Ermittlungsmethode – Siebanalyse und bildbasierte Ermittlung

Zwischen den beiden Methoden zur Ermittlung der Korngrößenverteilung ist eine sehr gute Übereinstimmung feststellbar. Bis auf minimale Unterschiede weisen die Korngrößenverteilungen unabhängig der Methode vergleichbare Durchgangssummen auf. Dabei muss beachtet werden, dass bei der mechanischen Siebung die Ermittlung der Durchgänge in Massen-% und bei der bildbasierten Ermittlung im Rahmen dieser Arbeit prozentual in Abhängigkeit der Gesamtfläche der 2D-Projektionen der einzelnen Gesteinskörner erfolgt.

Die Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen macht deutlich, dass die Anzahl der segmentierten Gesteinskörner an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons auf dem Ausbreittisch offenbar ausreicht um daraus zielsicher deren Korngrößenverteilung zu ermitteln. Darüber hinaus scheint die Anzahl der Gesteinskörner groß genug zu sein, um die entstehenden Nachteile von nur einer Projektionsrichtung für eine Ermittlung der mittleren Korngrößenverteilung zu kompensieren. Abbildung 5.34 zeigt die Anzahl der segmentierten Partikel an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10} . Die absolute Partikelanzahl nimmt mit zunehmender Konsistenz geringfügig zu, wobei die Partikelanzahl im Konsistenzbereich von F2 bis F6 zwischen ca. 350 und 750 recht stark streut. Die Zunahme der absoluten Partikelanzahl mit zunehmender Konsistenz ist u. a. auf die stärkere Ausbreitung des Frischbetons und somit einer größeren Fläche zur Segmentierung zurückzuführen. Normiert auf die Partikelanzahl pro cm^2 kehrt sich der Trend um (vgl. Abbildung 5.34, rechts), so dass bei geringerer Konsistenz mehr Partikel pro cm^2 segmentiert werden. So ist eine Abnahme von etwa $0,40$ Partikel/ cm^2 im Konsistenzbereich F2 auf ca. $0,15$ Partikel/ cm^2 im Konsistenzbereich F6 feststellbar.

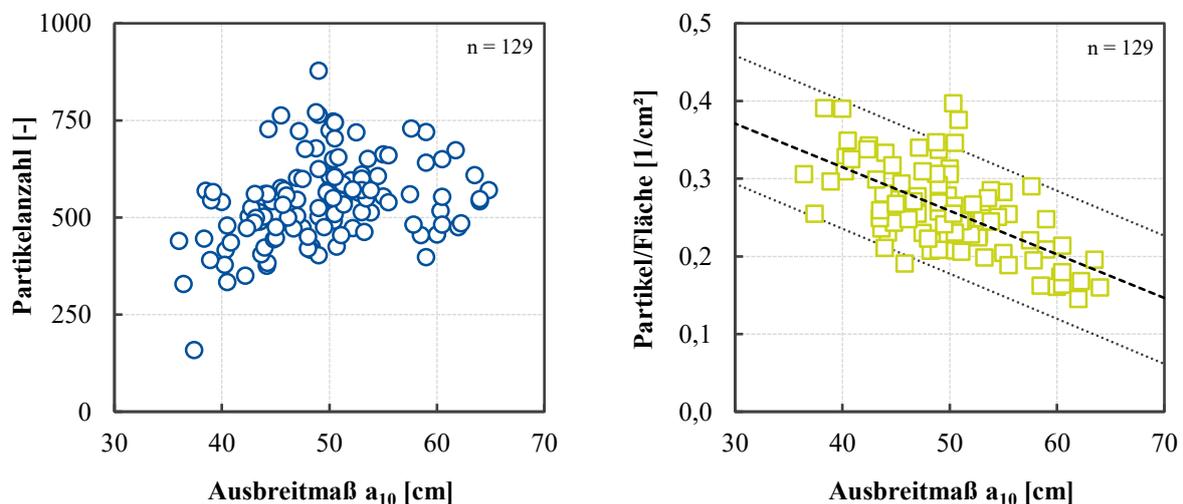


Abbildung 5.34: Anzahl der segmentierten Partikel an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes (links) und Partikel pro Fläche in Abhängigkeit des Ausbreitmaßes a_{10} (rechts)

Da mit zunehmendem Ausbreitmaß die mittlere Höhe h des ausgebreiteten Frischbetons immer weiter abnimmt, ist zu erwarten, dass eine ausreichende Anzahl zielsicher segmentierter Gesteinskörner erst ab einer bestimmten Konsistenz vorliegt. Abbildung 5.35 stellt dazu idealisiert den Querschnitt zweier Modell-Betone mit ideal runden Partikeln als Gesteinskörnung

gegenüber. Idealisiert als 2-Korn-Modell (ausschließlich zwei Korngrößen $\rightarrow D$ und $0,5 \cdot D$) ist zu erkennen, dass eine Segmentierung des Größtkorn-Durchmessers ab einer Höhe des ausgebreiteten Frischbetons von $h = D$ möglich ist. Unter der vereinfachten Annahme, dass sich der Frischbeton infolge der 15 Schläge als runde Scheibe mit konstanter Höhe ausbreitet, wäre gemäß dieser Modellvorstellung eine Segmentierung des Größtkorn-Durchmessers bei einem theoretischen Größtkorn-Durchmesser von 16 mm ab einer Konsistenz von 56 cm möglich, vgl. Abbildung 5.35, unten links. Die in der Regel abgestufte Korngrößenverteilung bewirkt im Frischbeton jedoch eine deutlich verbesserte Abstützung der einzelnen Gesteinskörner unterschiedlicher Größe. Die stützende Wirkung für die größeren Gesteinskörner durch die nächstkleineren Gesteinskörner kann mit dem von WALLEVIK (2003) beschriebenen sogenannten Netzeffekt erklärt werden (vgl. Kapitel 2.3.2). Infolge der Abstützung der einzelnen Gesteinskörner unterschiedlicher Größe ist bereits in der angenommenen Modellvorstellung eine Segmentierung des Größtkorn-Durchmessers ab einer Höhe des ausgebreiteten Frischbetons von $h \approx 1,5 \cdot D$ möglich. Demnach kann ab einer Konsistenz von etwa 45 cm der Größtkorn-Durchmesser bei einem theoretischen Größtkorn-Durchmesser von 16 mm zielsicher an der Oberfläche segmentiert werden.

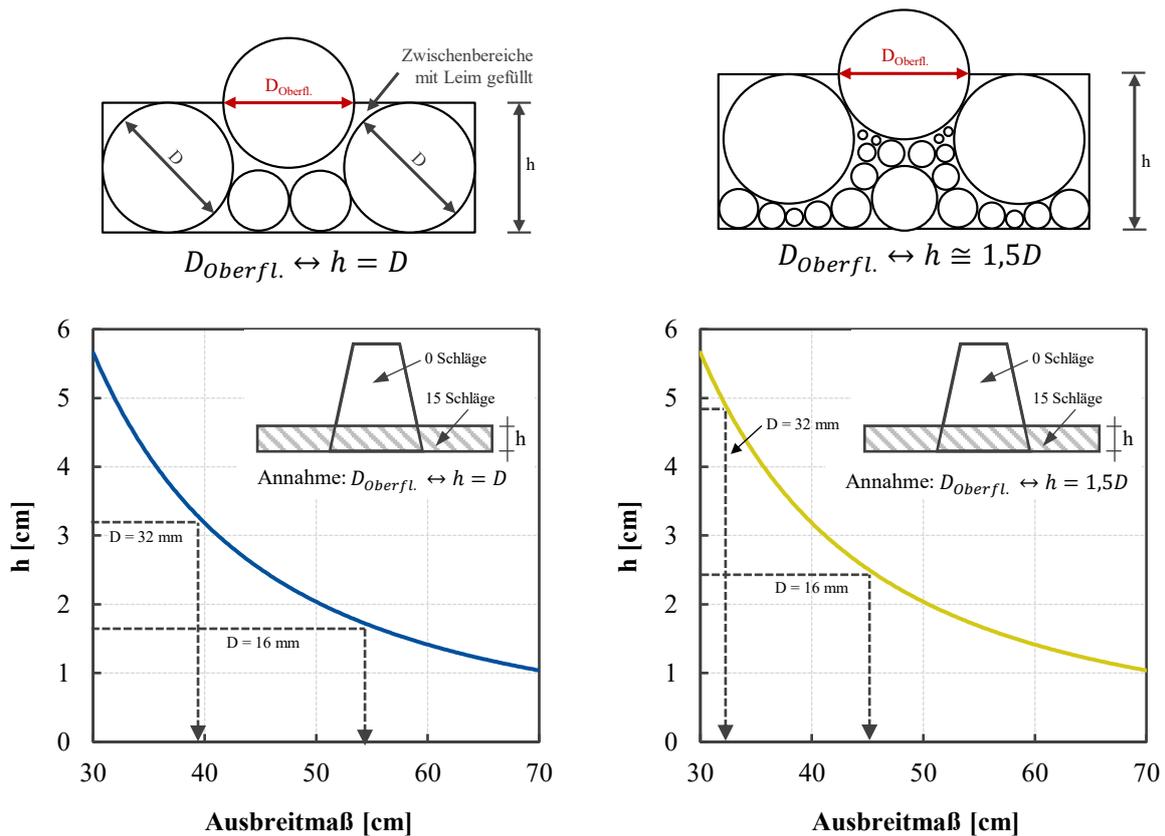


Abbildung 5.35: Schematische Darstellung des Querschnitts von Modell-Betonen mit ideal runden Partikeln als Gesteinskörnung - zwei Korngrößen $\rightarrow D$ und $0,5D$ (links) und abgestufte Korngrößenverteilung (rechts) - mit dazugehöriger Höhe des ausgebreiteten Frischbetons nach 15 Schlägen

Der visuelle Eindruck der Querschnitte ausgewählter Betonzusammensetzungen nach der Konsistenzprüfung bestätigt die zuvor angenommenen Modellvorstellungen. Abbildung 5.36 zeigt die Querschnitte unterschiedlicher Betonzusammensetzungen, die sich sowohl im Größtkorn als auch weiteren stofflichen Parametern und dementsprechend auch in der Konsistenz unterscheiden. Die gegenseitige Abstützung der einzelnen Gesteinskörner unterschiedlicher Größe ist unabhängig vom Größtkorn als auch der Konsistenz deutlich ersichtlich. An der Oberfläche des Frischbetons sind somit Gesteinskörner unterschiedlicher Größe erfassbar und somit hinsichtlich der Korngrößenverteilung bewertbar. Unabhängig von der beschriebenen gegenseitigen Abstützung der Gesteinskörner erscheint eine zielsichere Segmentierung jedoch erst ab einer Konsistenz von etwa 45 cm möglich. Abbildung 5.37 gibt dazu einen Überblick über unterschiedliche Oberflächen von Frischbetonen mit unterschiedlicher Konsistenz. Bei einer plastischen Konsistenz hat sich der Frischbeton noch nicht ausreichend ausgebreitet, so dass separierte vereinzelt Körner visuell noch nicht zielsicher erkennbar sind. Dagegen können bei den weicheren bzw. fließfähigeren Frischbetonen einzelne grobe Gesteinskörner visuell einwandfrei erkannt werden.

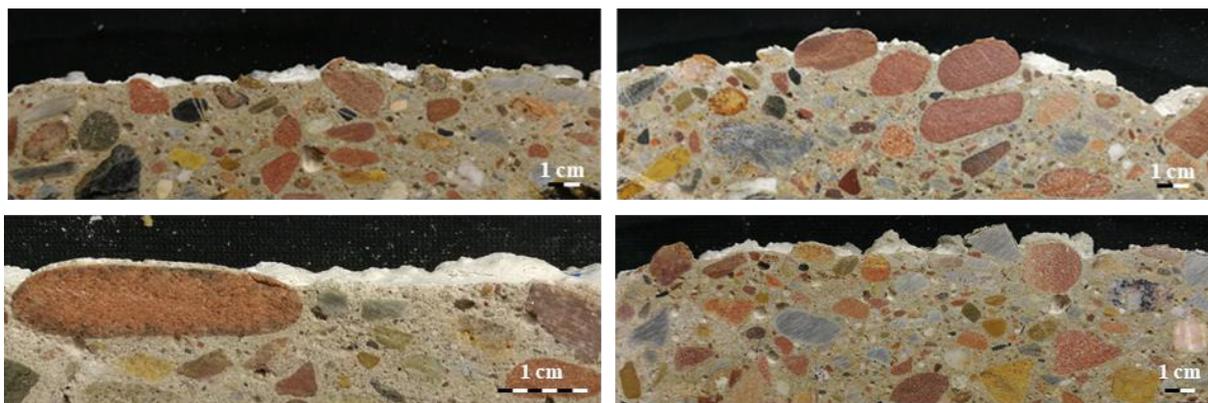


Abbildung 5.36: Querschnitte von aus dem Frischbeton entnommenen Probekörpern mit unterschiedlichem Größtkorn und unterschiedlicher Konsistenz - die gegenseitige Abstützung der einzelnen Gesteinskörner unterschiedlicher Größe ist deutlich erkennbar

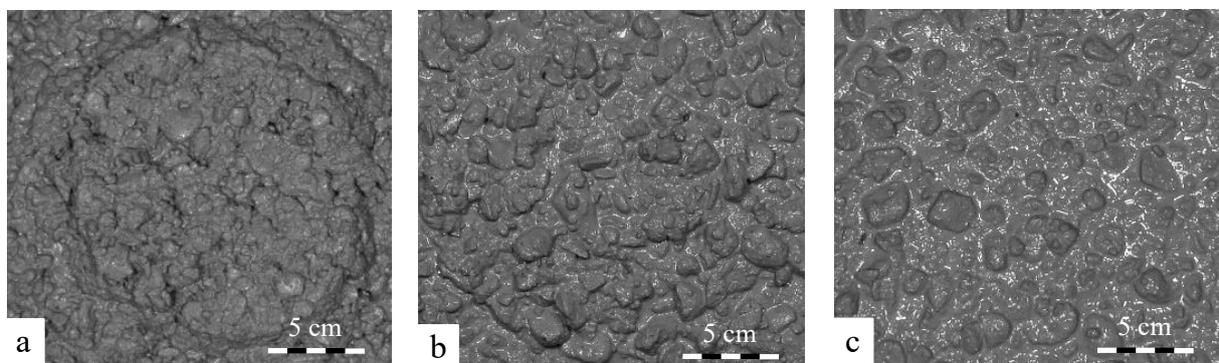


Abbildung 5.37: Oberflächen des ausgebreiteten Frischbetons im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) unterschiedlicher Konsistenzklassen – a: F2 (plastisch); b: F3 (weich); c: F4 (sehr weich)

Zur Überprüfung der Anwendung im nahezu gesamten Konsistenzbereich von F3 bis F6 u. a. unter Variation des Leimgehaltes, des w/z-Wertes, der Sieblinie, des Größtkorns sowie der Gesteinsart sind in Abbildung 5.38 die mittleren Partikelgrößen bei unterschiedlichen Durchgangssummen - D_{10} , D_{50} , D_{90} - in Abhängigkeit der eingesetzten Ermittlungsmethode dargestellt. Die D_x -Werte geben die mittlere Partikelgröße an, bei der x % der Partikel kleiner als der benannte Wert x sind. Es wird deutlich, dass bildbasiert an Einzelaufnahmen des ausgebreiteten Frischbetons die Ermittlung der Korngrößenverteilung im gesamten Anwendungs- bzw. Konsistenzbereich in guter Übereinstimmung mit den Referenzwerten der Siebung möglich ist. Die Abweichungen der Messwerte der unterschiedlichen Methoden betragen dabei i. d. R. weniger als $\pm 15\%$, vgl. Streubereiche in Abbildung 5.38.

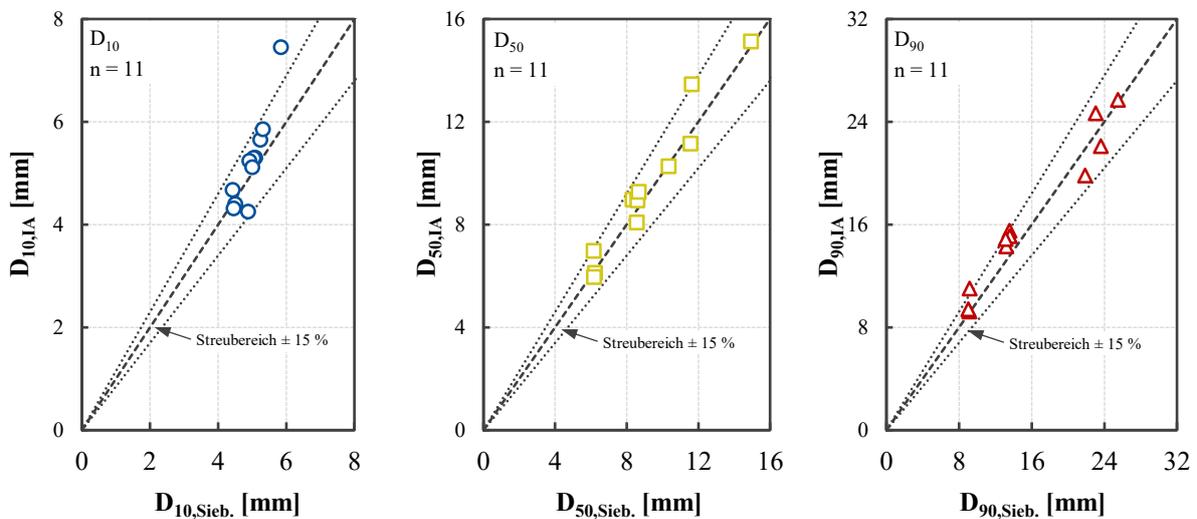


Abbildung 5.38: Mittlere Partikelgröße D_{10} (links), D_{50} (mitte), D_{90} (rechts) - in Abhängigkeit der Ermittlungsmethode - maschinelle Siebanalyse $D_{x,Sieb.}$ und bildbasierte Bestimmung am Ausbreitmaß $D_{x,IA}$

In weiteren Untersuchungen wurden Betonzusammensetzungen mit Korngrößenverteilungen entsprechend der Regelsieblinien A, B und C gemäß DIN 1045-2 mit unterschiedlichem Größtkorn hergestellt. Betrachtet man die in Abbildung 5.39 dargestellten Korngrößenverteilungen lässt sich eine gute Übereinstimmung der einzelnen Methoden feststellen. Die Korngrößenverteilung kann in allen Bereichen der Regelsieblinien A, B und C bei einem Größtkorn von 32 mm und der Regelsieblinien A und B bei einem Größtkorn von 16 mm bei der Konsistenzprüfung bildbasiert zielsicher ermittelt werden.

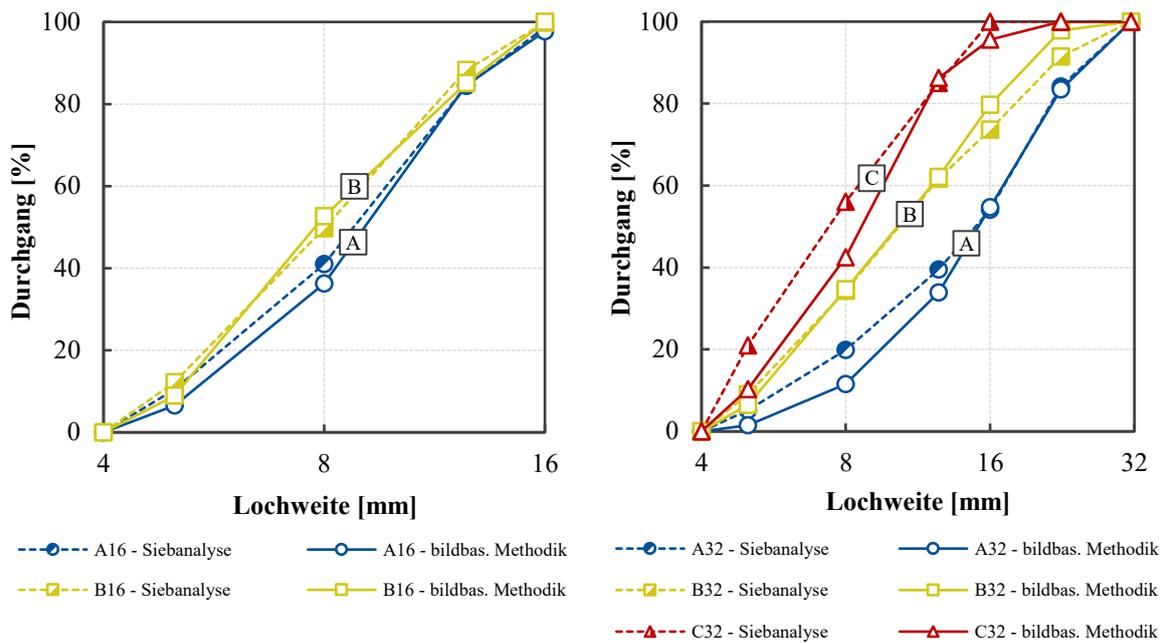


Abbildung 5.39: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung (≥ 4 mm) von Betonzusammensetzungen mit Gesteinskörnung entsprechend der Regelsieblinien A, B und C in Abhängigkeit der Ermittlungsmethode – mechanische Siebanalyse und Bestimmung am ausgebreiteten Frischbeton mittels bildbasierter Methodik

5.4.5.3 Geometrische Verteilung der Gesteinskörnung

Neben der Bestimmung der Korngrößen(häufigkeits-)verteilung kann darüber hinaus mit der bildbasierten Methodik anhand der 2D-Eigenschaften die geometrische Lage bzw. Verteilung der einzelnen Gesteinskörner an der Oberfläche in einem definierten Koordinatensystem ermittelt werden. Dazu wurde jeweils der Flächenschwerpunkt der einzelnen Gesteinskörner als Koordinate in Abhängigkeit des Radius bestimmt. Der Koordinatenursprung wurde im Schwerpunkt der mittels Convex-Hull segmentierten Fläche festgelegt, vgl. Abbildung 5.40 (die Anwendung des Segmentierungsverfahrens wird im Kapitel 5.4.6.1 näher beschrieben). In Kombination mit den geometrischen 2D-Eigenschaften ist es so möglich, eine ortsabhängige Ermittlung der groben Gesteinskörner an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons vorzunehmen.

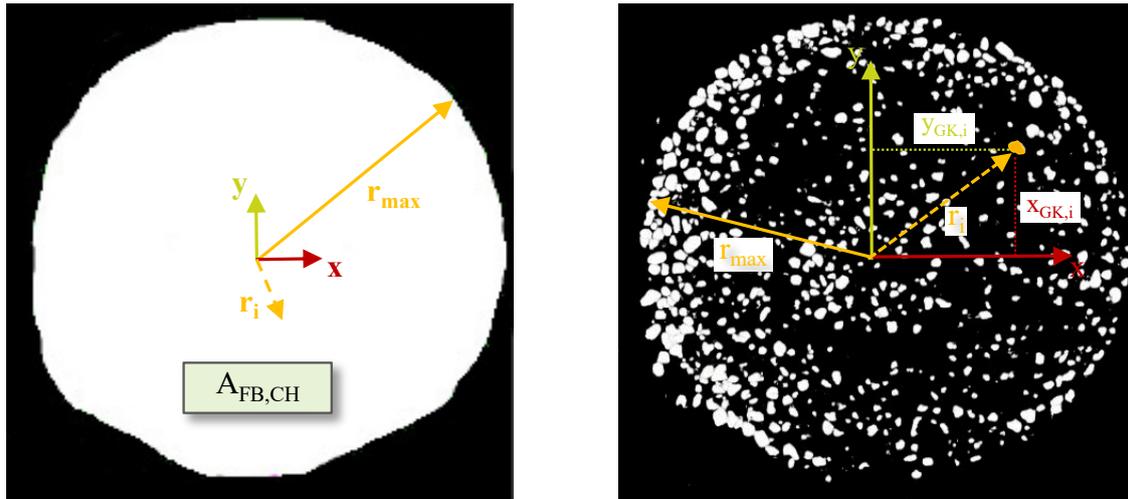


Abbildung 5.40: Mittels Convex-Hull segmentierte Fläche ($A_{FB,CH}$) mit Koordinatenursprung im Flächenschwerpunkt (links) und schematischer Überblick zur Ermittlung der ortsabhängigen Koordinaten eines Gesteinskorns (rechts)

Abbildung 5.41 zeigt sowohl die Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons als auch die bildbasiert ermittelte ortsabhängige Verteilung der groben Gesteinskörnung (≥ 4 mm) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen unter Variation des Wassergehaltes ($+ 15$ l/m³). Anhand der visuellen Beurteilung der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons können keine signifikanten Unterschiede in der Verteilung der groben Gesteinskörnung zwischen den einzelnen Betonzusammensetzungen festgestellt werden. In Anlehnung an die Kriterien zur Bewertung des VSI (vgl. Kapitel 2.4.4) ist eine Einordnung in die Klassen 0 bzw. 1 möglich. Als einziges Anzeichen ist ein leichter Glanz auf der Oberfläche erkennbar.

Für die Berechnung der geometrischen Lage bzw. Verteilung der einzelnen Gesteinskörner ist es zweckmäßig, diese anhand ihres minimalen Feret-Durchmessers ($d_{F,min}$) in Klassen einzuteilen. Die Klassenbreite wird im Größenbereich von 4 mm bis 12 mm auf 4 mm festgelegt. Bis zum theoretischen Größtkorn von 16 mm ist die Klassenbreite im darüber liegenden Größenbereich auf 2 mm festgelegt.

Abbildung 5.41 zeigt zudem die geometrische Verteilung der Gesteinskörner eines Betons ohne (links) und mit Wasserüberdosierung (rechts). Visuell kann eine durchaus homogene Verteilung der detektierten groben Gesteinskörner über die Fläche des ausgebreiteten Frischbetons erkannt werden. Vor allem im Größenbereich von 4 mm bis 12 mm zeigt sich eine gleichmäßige Verteilung der Gesteinskörnung über alle Bereiche des ausgebreiteten Frischbetons. Bei Betrachtung der Gesteinskörnung > 14 mm fällt vor allem bei der Betonzusammensetzung mit einer Wasserüberdosierung von 15 l/m³ eine deutlich inhomogenere Verteilung auf, vgl. Abbildung 5.41, rechts. So kann sowohl eine partielle Separation im mittleren Bereich als auch im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons festgestellt werden. In dem dazwischenliegenden Kreisring ist die Konzentration grober Gesteinskörner > 14 mm dagegen deutlich geringer.

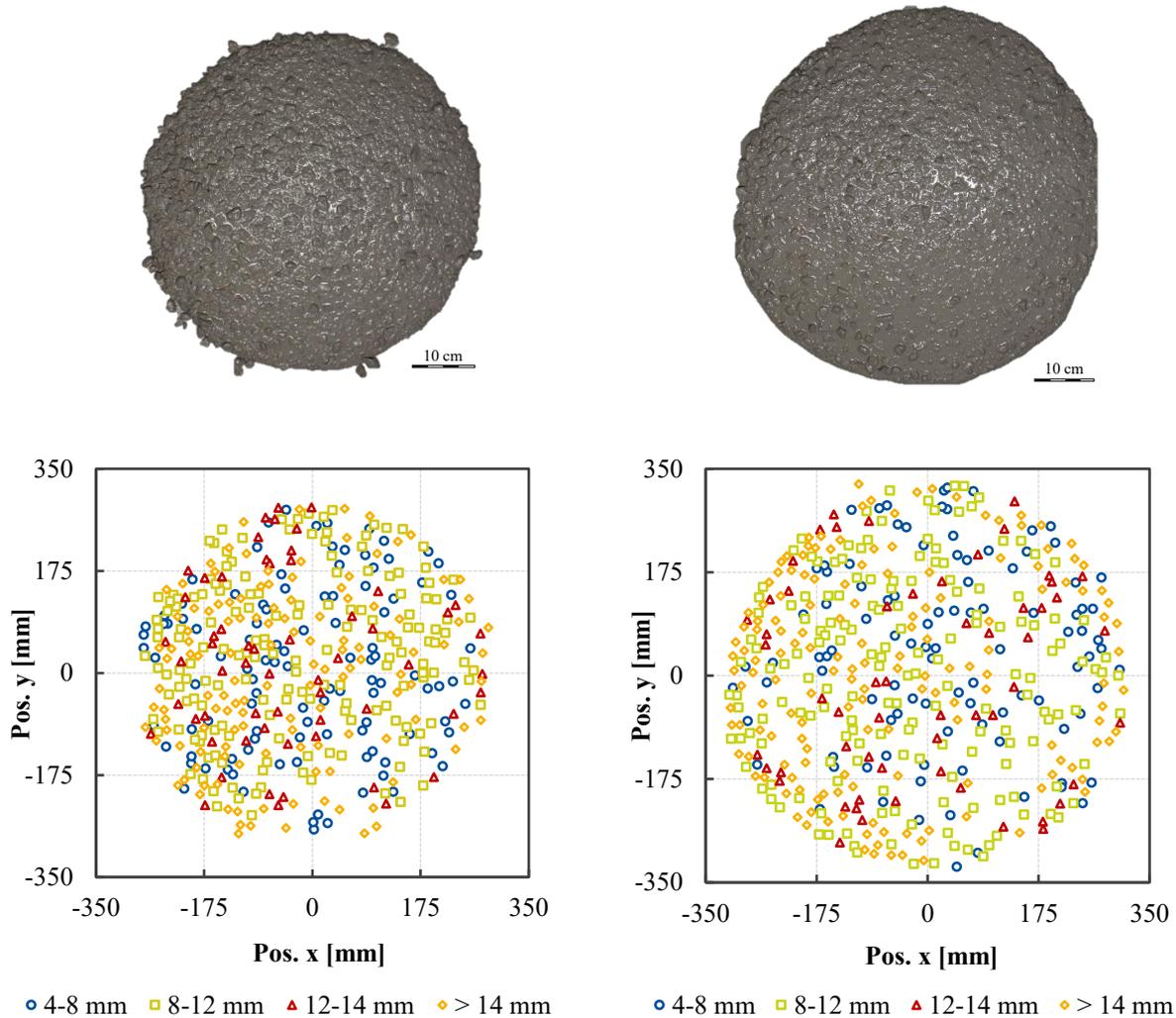


Abbildung 5.41: Ausgebreiteter Frischbeton im Rahmen der Konsistenzprüfung (obere Reihe) - Größtkorn: 16 mm und Leimgehalt: 329 l/m³ (links) und Leimgehalt: 329 l/m³ + 15 l/m³ Wasser (rechts) – sowie geometrische Verteilung der groben Gesteinskörner ≥ 4 mm (untere Reihe)

Verdeutlicht wird dies in Abbildung 5.42. Die einzelnen Klassenbereiche (4-8 mm, 8-12 mm, 12-14 mm und > 14 mm) sind hier jeweils separat dargestellt. Die zuvor beschriebene homogene Verteilung der Gesteinskörnung ≤ 14 mm ist unabhängig der Betonzusammensetzung deutlich erkennbar. Dagegen lassen sich bei der größeren Gesteinskörnung vor allem bei der Betonzusammensetzung mit einer Wasserüberdosierung von 15 l/m³ Agglomerationen grober Partikel > 14 mm im mittleren Bereich als auch im äußeren Randbereich feststellen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dieser Methode eine ortsabhängige Segmentierung der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons im Rahmen der Konsistenzprüfung möglich ist. So können z. B. Bereiche mit Agglomerationen von groben Gesteinskörnern zielsicher festgestellt werden, die ggf. zur Abschätzung der Entmischungsneigung verwendet werden können.

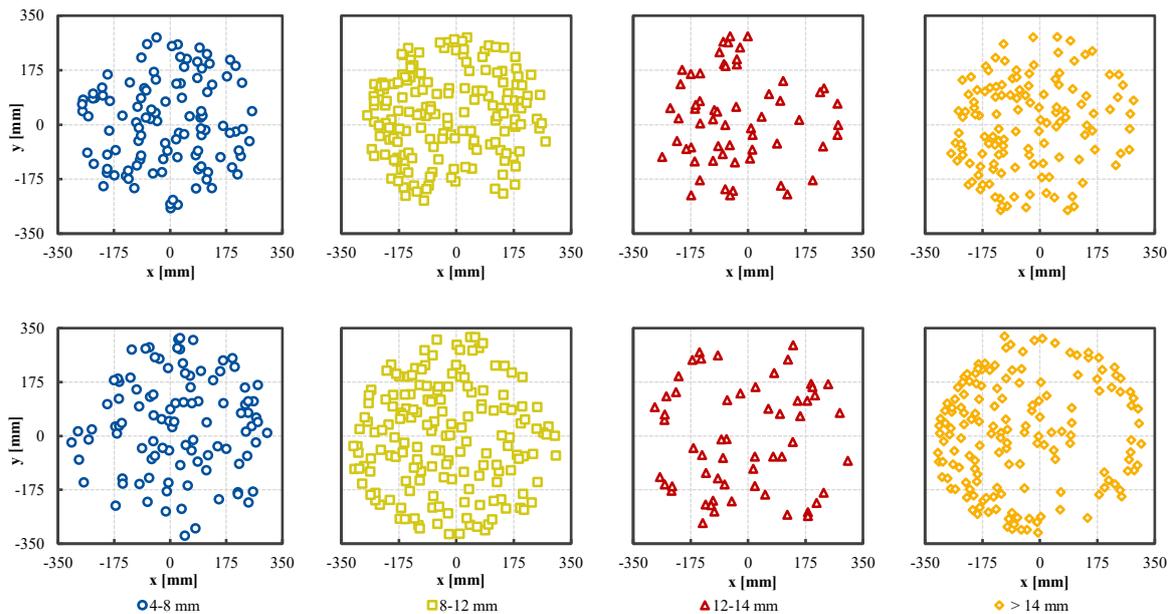


Abbildung 5.42: Ortsabhängige Verteilung der groben Gesteinskörnung unterschiedlicher Klassenbereiche (4-8 mm, 8-12 mm, 12-14 mm und > 14 mm) – Betonzusammensetzungen: Größtkorn: 16 mm und Leimgehalt: 329 l/m³ (obere Reihe) und Leimgehalt: 329 l/m³ + 15 l/m³ Wasser (untere Reihe)

Vereinzelte Untersuchungen in der Literatur wenden die Verteilung der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche des Setzfließmaßes von SVB als Kriterium zur Beurteilung der dynamischen Entmischung bzw. Sedimentation an (Tregger et al. 2010; Tregger et al. 2012; Gökçe und Andiç-Çakır 2018). TREGGER et al. (2012) unterteilt in seinen Untersuchungen den ausgebreiteten Frischbeton im Rahmen des Setzfließmaß-Versuchs in drei runde Teilflächen ein und ermittelt mittels Auswaschversuch den jeweiligen Gesteinskörnungsgehalt. Die Steigung der relativen Verteilung der Gesteinskörnung in Abhängigkeit des normierten Setzfließmaßes dient als Kriterium zur Bewertung der dynamischen Sedimentation. Vergleichbare Untersuchungen zur Bewertung der dynamischen Entmischung bzw. Sedimentation mittels einer bereichsweisen Ermittlung des Gesteinskörnungsgehalts durch Auswaschen wurden von GÖKCE und ANDIÇ-ÇAKIR (2018) durchgeführt. Darüber hinaus stellt die starke Agglomeration grober Gesteinskörnung in der Mitte des ausgebreiteten Frischbetons ein Kriterium sehr instabiler Frischbetone bei der qualitativen Bewertung mittels VSI gemäß *ASTM C 1611/C 1611M* dar.

Abbildung 5.43 stellt eine Möglichkeit zur objektiven Beurteilung der ortsabhängigen Verteilung der groben Gesteinskörnung dar. Die Grobkornverteilung ist als relative Summenhäufigkeit in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen der Position (Radius (r_i)) und dem maximalen Radius (r_{max}) dargestellt. Deutlich ersichtlich ist, dass bei einer homogenen Verteilung der groben Gesteinskörnung über die Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons vergleichbare Kurvenverläufe unabhängig der Korngrößenbereiche festzustellen sind, vgl. Abbildung 5.43, links. Dagegen ist bei der Betonzusammensetzung mit einer Wasserüberdosierung von 15 l/m³ vor allem für die Kornklasse der groben Partikel > 14 mm ein abweichender Kurvenverlauf

erkennbar. Die bereits beschriebene Agglomeration dieser grober Partikel bei dieser Betonzusammensetzung lässt sich demnach anhand der veränderten Kurvencharakteristik abschätzen, vgl. Abbildung 5.43, rechts.

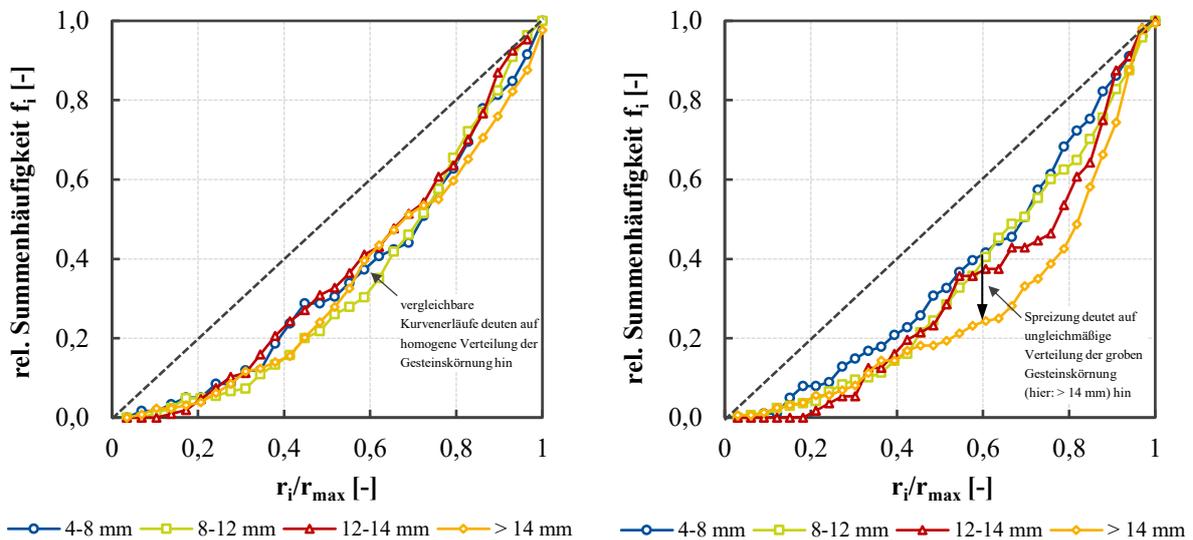


Abbildung 5.43: Relative Summenhäufigkeit f_i der groben Gesteinskörnung unterschiedlicher Korngrößenbereiche (4-8 mm, 8-12 mm, 12-14 mm und > 14 mm) in Abhängigkeit von seiner Position im ausgebreiteten Frischbeton (relativer Radius r_i/r_{max}) - Betonzusammensetzungen: Größtkorn: 16 mm und Leimgehalt: 329 l/m³ (links) und Leimgehalt: 329 l/m³ + 15 l/m³ Wasser (rechts)

Eine quantitative Abschätzung der geometrischen Verteilung der größten Gesteinskörner kann mit dem Verhältnis der relativen Häufigkeiten f_i der Kornklasse der kleinsten Gesteinskörner (4-8 mm) und der Kornklasse der größten Gesteinskörner (hier: > 14 mm) vorgenommen werden. Die Berechnung des Verhältnis-Wertes erfolgt bei $r_i/r_{max} = 0,5$. Die geometrische Verteilung der größten Körner kann demnach für Betonzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 16 mm (bei anderem GK sind die Klassen entsprechend anzupassen) wie folgt abgeschätzt werden:

$$f_{4-8 \text{ mm}} / f_{> 14 \text{ mm}} \cong 1,0 \quad \rightarrow \text{homogene Verteilung}$$

$$f_{4-8 \text{ mm}} / f_{> 14 \text{ mm}} \gg 1,0 \quad \rightarrow \text{ungleichmäßige Verteilung}$$

Auch im Wertebereich $\ll 1,0$ ist ein Grenzwert für eine homogene Verteilung anzunehmen. Insbesondere bei sehr fließfähigen Betonen bzw. SVB ist bei der Prüfung des Setzfließmaßes an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons vielfach eine Ansammlung grober Gesteinskörnung in der Mitte festzustellen. Die relative Summenhäufigkeit der groben Gesteinskörner stellt in einem solchen Fall einen über der Winkelhalbierenden (vgl. Abbildung 5.43) gewölbten Kurvenverlauf dar. In diesem Fall ergeben sich $f_{4-8 \text{ mm}}/f_{> 14 \text{ mm}}$ -Werte $\ll 1,0$. Die Untersuchung solcher Betone war nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Ein Grenzwert wird in diesem Wertebereich dementsprechend nicht angegeben.

Der in Abbildung 5.43 dargestellte Beton ohne Wasserüberdosierung (links) weist einen $f_{4-8\text{ mm}}/f_{>14\text{ mm}}$ -Wert von 0,91 auf. Dagegen wächst der $f_{4-8\text{ mm}}/f_{>14\text{ mm}}$ -Wert bei dem Beton mit einer Wasserüberdosierung von + 15 l/m³ (rechts) auf 1,69 an und deutet demnach auf eine ungleichmäßige Verteilung der groben Gesteinskörner an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons hin.

Eine Bewertung der Homogenität des Frischbetons, insbesondere der Sedimentationsstabilität der groben Gesteinskörnung, wurde an Sedimentationsrohren mit einem Durchmesser von 150 mm (Verdichtung jeweils 45 sec bei 4500 U/min) im erhärteten Zustand bildanalytisch vorgenommen (Prüfverfahren siehe (Haist und Breitenbücher 2021)). In diesem Abschnitt wird nur die Sedimentationstiefe der groben Gesteinskörnung als Messgröße betrachtet. Weitere Auswertemöglichkeiten an den Sedimentationsrohren zu Entmischungsphänomenen werden in Kapitel 5.4.6.1 beschrieben. Abbildung 5.44 zeigt die Schnittbilder der zuvor dargestellten Betone. Eine übermäßig starke Sedimentation der groben Gesteinskörnung kann bei keiner der beiden Betone festgestellt werden. Die größte Sedimentationstiefe der groben Gesteinskörnung beträgt ca. 3,5 cm bei einem Leimgehalt von 329 l/m³ und einer Wasserüberdosierung von 15 l/m³. Demnach bestätigen die Schnittbilder bzw. die Sedimentation der groben Gesteinskörnung die vorangegangene Abschätzung der geometrischen Verteilung mittels $f_{4-8\text{ mm}}/f_{>14\text{ mm}}$. Der Beton mit einem $f_{4-8\text{ mm}}/f_{>14\text{ mm}}$ -Wert von 0,91 weist ein sehr homogenes Schnittbild und keinerlei Sedimentation auf. Dagegen können bei dem Beton mit einem $f_{4-8\text{ mm}}/f_{>14\text{ mm}}$ -Wert von 1,69 geringfügige Sedimentationserscheinungen im Sedimentationsrohr am Festbeton festgestellt werden.

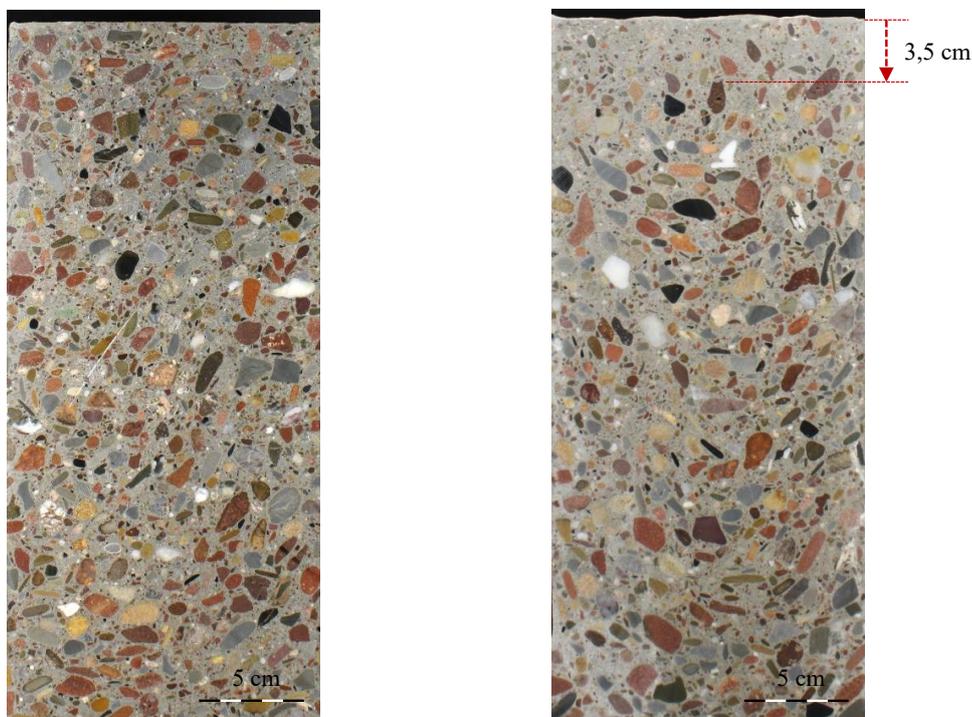


Abbildung 5.44: Schnittbilder der Sedimentationsrohre – Betonzusammensetzungen: Größtkorn: 16 mm und Leimgehalt: 329 l/m³ (links) und Leimgehalt: 329 l/m³ + 15 l/m³ Wasser (rechts)

5.4.5.4 Größtkorn

Im vorangegangenen Kapitel 5.4.5.2 wurde bereits die zielsichere bildbasierte Ermittlung der Korngrößenverteilung an Einzelbildaufnahmen des ausgebreiteten Frischbetons beschrieben. Da zu jedem bildbasiert segmentierten Gesteinskorn an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons geometrische Eigenschaften vorliegen (insbesondere der maximale und minimale Feret-Durchmesser), ist ebenso eine Abschätzung des Größtkorndurchmessers möglich. Vor allem zur Beurteilung der Betonierbarkeit als auch der Blockierneigung des Frischbetons ist eine zielsichere Ermittlung der größten Dimension der Gesteinskörner von entscheidender Bedeutung. Der theoretische Größtkorn-Durchmesser repräsentiert nur einen mittleren Richtwert. Infolge der bildbasiert ermittelten Daten kann darüber hinaus eine Einordnung der Dimensionen (min. und max.) der vorhandenen einzelnen Gesteinskörner im Frischbeton vorgenommen werden.

Abbildung 5.45 stellt den maximalen sowie minimalen Feret-Durchmesser der segmentierten Gesteinskörner in aufsteigender Sortierung für unterschiedliche Betonzusammensetzungen dar. Die Spreizung zwischen den beiden Durchmessern ist bei den dargestellten Betonzusammensetzungen vergleichbar. Zurückzuführen ist dies auf die identische Korngrößenverteilung entsprechend der Regelsieblinie A/B einzig unter Variation des Größtkorns. Betrachtet man die maximalen Feret-Durchmesser der einzelnen Betonzusammensetzungen, ist eine Abschätzung der maximalen Dimensionen der Gesteinskörner möglich. Abbildung 5.46 stellt eine Gegenüberstellung des theoretischen Größtkorns und des bildbasiert ermittelten Größtkorns (Mittelwert der letzten 5 % der aufsteigend sortierten maximalen Feret-Durchmesser) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen dar, bei denen sowohl die Eigenschaften der Gesteinskörnung als auch betontechnologische Parameter variieren. Es ist eine gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Größtkorn der jeweiligen Korngrößenverteilung der Betonzusammensetzung feststellbar. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass der bildbasiert ermittelte Durchmesser des Größtkorns oberhalb des theoretischen Durchmessers des Größtkorns liegt. Vor allem bei einem theoretischen Größtkorn von 8 mm ist bildbasiert ein erhöhter Durchmesser feststellbar. Dass es sich hierbei um keinen systematischen Fehler infolge des Messprinzips handelt, bestätigen die in Abbildung 5.46 zusätzlich dargestellten Größtkorn-Durchmesser der einzelnen Gesteinskörnungs-Fraktionen (grüne quadratische Symbole). Diese wurden nach dem identischen Prinzip an Einzelbildaufnahmen bildbasiert an den reinen Gesteinskörnern der einzelnen Fraktionen ermittelt. Der mittlere Größtkorn-Durchmesser liegt dabei jeweils geringfügig oberhalb des theoretischen Größtkorn-Durchmessers und im Mittel auf vergleichbarem Niveau wie die bildbasiert am ausgebreiteten Frischbeton ermittelten Durchmesser.

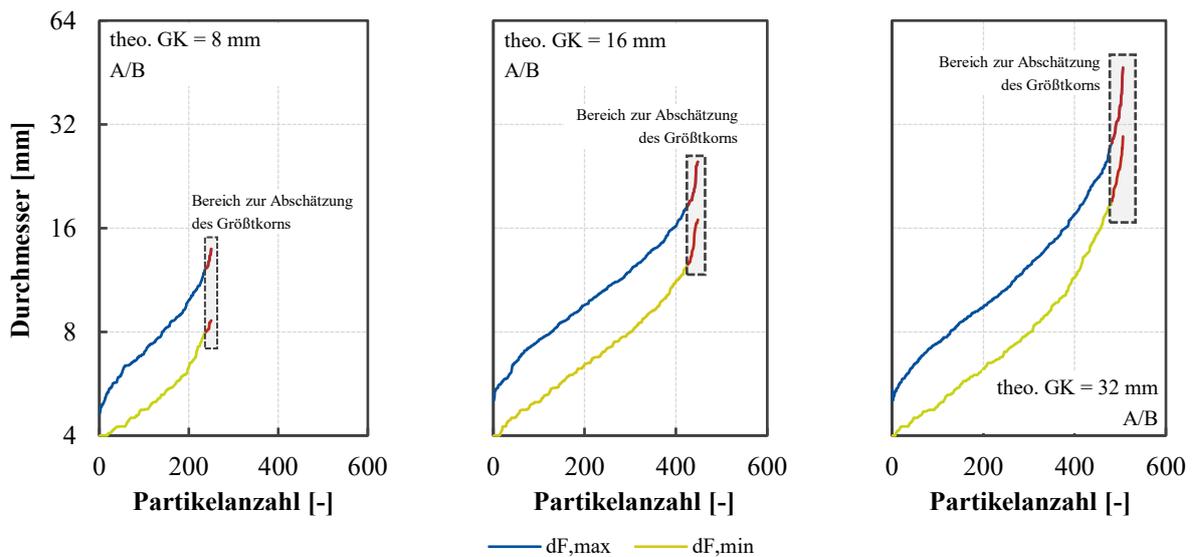


Abbildung 5.45: Minimaler ($d_{F,min}$) und maximaler ($d_{F,max}$) Feret-Durchmesser der einzelnen segmentierten Gesteinskörner - aufsteigend sortiert (Größtkorn: 8 mm (links), 16 mm (mitte), 32 mm (rechts))

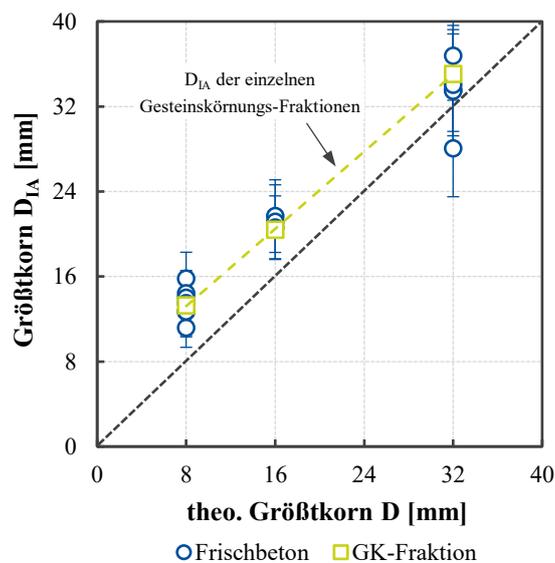


Abbildung 5.46: Gegenüberstellung des bildbasiert ermittelten Größtkorns und dem theoretischen Größtkorn für eine Vielzahl von Betonzusammensetzungen

Bei der bildbasierten Ermittlung des Durchmessers ist darüber hinaus zu beachten, dass die Gesteinskörner an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons unter Umständen nicht mit der vollständigen Dimension sichtbar und demnach auch nicht vollständig segmentierbar sind. Wie die Abbildung 5.47 zeigt, findet bei der Ermittlung an Einzelaufnahmen teilweise eine gewisse Unterschätzung des mittleren Größtkorn-Durchmessers bei Betonen mit größeren Gesteinskörnern ($D = 32$ mm) statt. Diese mittlere Unterschätzung ist u. a. von den betontechnologischen Parametern, wie z. B. Leimgehalt, Sieblinie oder Konsistenz, abhängig. Aufgrund der erhöhten Masse mit steigendem Durchmesser sinken zudem größere Gesteinskörner stärker im Leimanteil des Frischbetons ab, so dass der Effekt der Unterschätzung mit zunehmendem Durchmesser zunimmt.

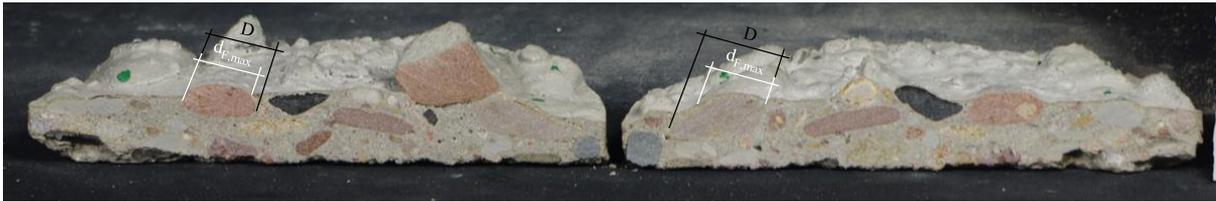


Abbildung 5.47: Querschnitt eines aus dem Frischbeton entnommenen Probekörpers - Beispielhafte Darstellung der bildbasierten Bestimmung von ($d_{F,max}$) und dem theoretischen D_{max}

Da bei der bildbasierten Ermittlung der Korngrößenverteilung sowie des Größtkorns zu jedem Gesteinskorn die geometrischen Eigenschaften vorliegen, ist z. B. auch die Ermittlung des Überkorn-Anteils gegenüber dem theoretischen Größtkorn möglich. Abbildung 5.48 zeigt die relative Summenhäufigkeit der segmentierten Gesteinskörner unterschiedlicher Betonzusammensetzungen in Abhängigkeit vom Größtkorn. Der Überkorn-Anteil kann direkt aus einer solchen Darstellung abgelesen werden (vgl. Abbildung 5.48, rechts). So weist der Überkorn-Anteil der Betonzusammensetzung mit einem Größtkorn von 8 mm etwa 6,0 % auf. Darüber hinaus ermöglicht die bildbasiert ermittelte Korngrößenverteilung eine präzisere Erfassung einzelner Klassenbreiten gegenüber der mechanischen Siebung. Bei der mechanischen Siebung sind die Klassenbreiten durch die entsprechenden Grund- und Zwischensiebe fest vorgegeben. Demgegenüber ermöglicht die bildbasierte Ermittlung eine flexible Einteilung der Klassen und so z. B. eine präzise feinabgestufte Einteilung innerhalb der Klassen mit einer Schrittweite beispielsweise von 2 mm, vgl. Abbildung 5.48, rechts. Ein solches Vorgehen stellt z. B. bei der Anwendung von Ausfallkörnungen erweiterte Möglichkeiten zur Auswertung dar.

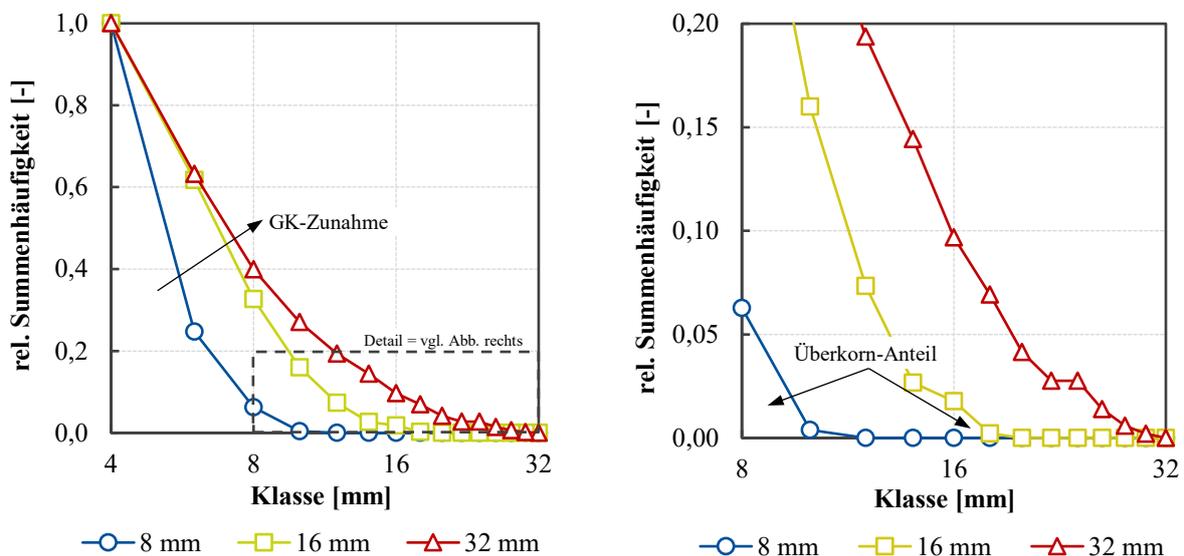


Abbildung 5.48: Relative Summenhäufigkeit von Korngrößenverteilungen (≥ 4 mm) mit unterschiedlichen Größtkorn (8 mm, 16 mm, 32 mm) zur Bewertung des Überkorn-Anteils (links) mit dazugehöriger Detaildarstellung (rechts)

5.4.5.5 Kornformparameter

Die berechneten geometrischen Kennwerte der einzelnen groben Gesteinskörner gestatten eine Ermittlung vielfältiger Kornformparameter. Tabelle 5.5 in Kapitel 5.4.5.1 gibt einen Überblick gängiger Kornformparameter. Abbildung 5.49 zeigt das berechnete Seitenverhältnis ($d_{F,max}/d_{F,min}$) der bildbasiert segmentierten groben Gesteinskörner (≥ 4 mm) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen. Ein Seitenverhältnis $d_{F,max}/d_{F,min}$ nahe 1,0 bedeutet eine nahezu kubische Partikel-Form mit identischen Abmessungen in x- und y-Richtung. Für längliche Partikel mit unterschiedlichen Abmessungen resultieren $d_{F,max}/d_{F,min}$ -Werte $\gg 1,0$. Die Korngruppen $> 8/16$ wurden systematisch mit einer Vielzahl kubischer Gesteinskörner (Abbildung 5.49, links) sowie länglichen Gesteinskörnern (Abbildung 5.49, rechts) variiert. Deutlich ersichtlich ist, dass die ermittelten Seitenverhältnisse im Bereich $< 8,0$ mm vergleichbare Größenordnungen in einer ausgedehnten Spannweite zwischen etwa 1,1 und 3,0 aufweisen. Im Bereich > 8 mm sind dagegen Unterschiede erkennbar. So weist die Betonzusammensetzung mit kubischen Gesteinskörnern in diesem Bereich ein maximales Seitenverhältnis von etwa 2,0 auf. Demgegenüber sind bei der Betonzusammensetzung mit länglichen Gesteinskörnern eine Vielzahl deutlich erhöhter $d_{F,max}/d_{F,min}$ -Werte $> 2,0$ festzustellen.

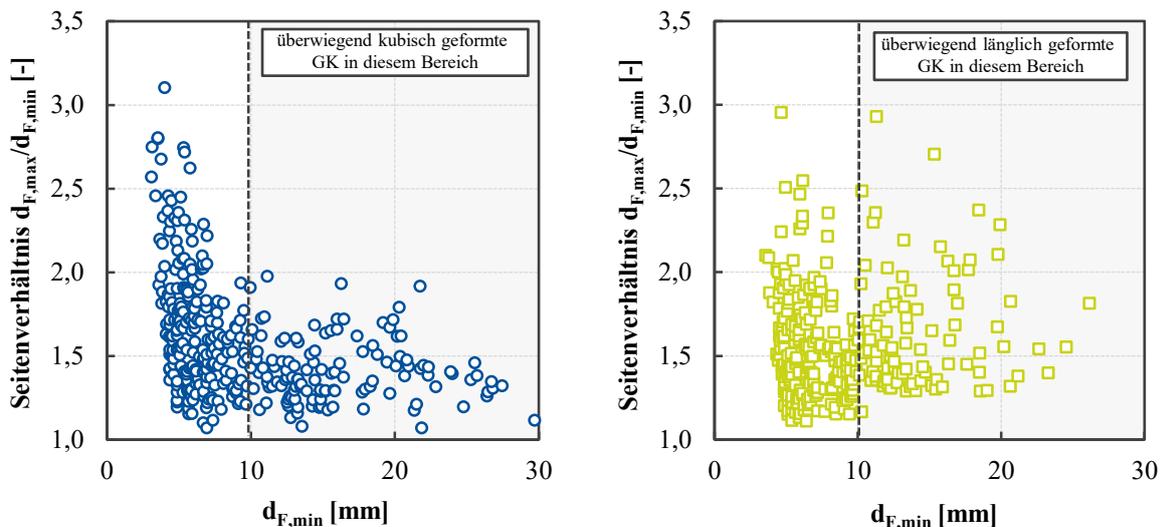


Abbildung 5.49: Seitenverhältnis ($d_{F,max}/d_{F,min}$) der segmentierten groben Gesteinskörner (≥ 4 mm) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen - die Korngruppe 8/16 wurde jeweils systematisch mit entsprechenden Gesteinskörnern ausgetauscht - kubisch (links) und länglich (rechts)

Eine Gegenüberstellung des Seitenverhältnisses der groben Gesteinskörnung unterschiedlicher Betonzusammensetzungen unter Variation der Gesteinsart bzw. Kornform – rund und gebrochen – zeigt Abbildung 5.50. Im Bereich kleinerer Korngrößen < 8 mm können keine signifikanten Unterschiede erkannt werden, die Werte schwanken allesamt in einem Bereich von etwa 1,1 bis 3,0. Im Bereich der groben Gesteinskörnung ($d_{F,min} > 12$ mm) können hingegen Unterschiede in Abhängigkeit der Gesteinsart bzw. Kornform festgestellt werden. So weisen die

Betonzusammensetzungen mit rundem Kies in diesem Bereich teilweise erhöhte Seitenverhältnisse ($d_{F,max}/d_{F,min}$) gegenüber dem gebrochenen Splitt auf.

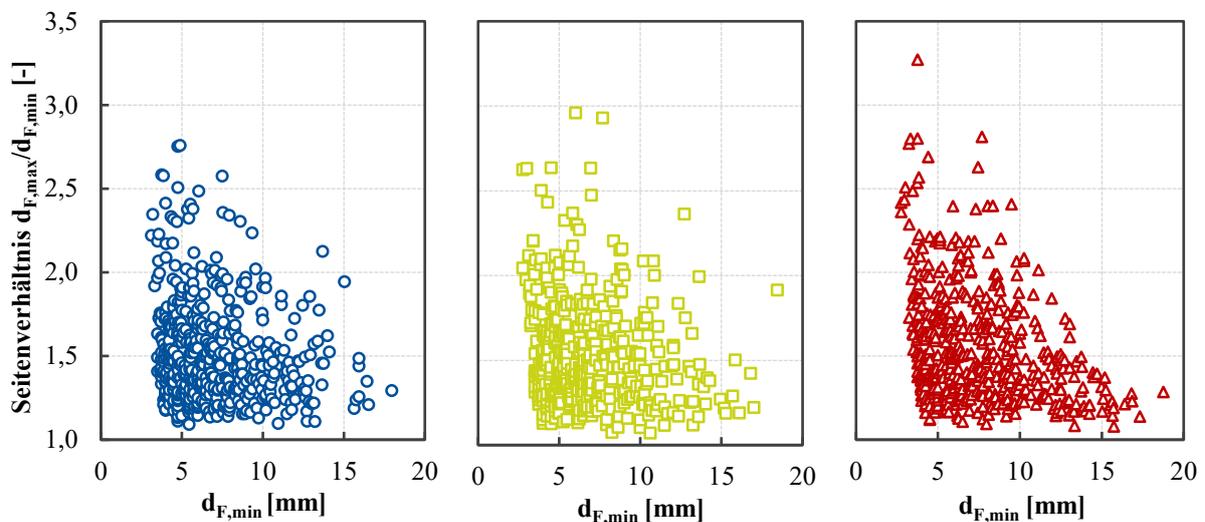


Abbildung 5.50: Seitenverhältnis ($d_{F,max}/d_{F,min}$) der segmentierten groben Gesteinskörner (≥ 4 mm) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen unter Variation der Gesteinsart- bzw. Kornform - Kies/Weser (links), Kies/Rhein (mitte), Splitt (rechts)

Zur Verdeutlichung finden sich in Abbildung 5.51 die relativen Häufigkeiten der Seitenverhältnisse unter Variation der Gesteinsart bzw. Kornform. Darüber hinaus sind die relativen Häufigkeiten der in Abbildung 5.51 dargestellten Betonzusammensetzungen mit kubisch und länglich geformter grober Gesteinskörnung abgebildet. Als weiterer Vergleich ist ein ‘Modell’-Beton dargestellt, bei dem die Gesteinskörnung durch Holz-Kugeln ausgetauscht wurde. Deutlich ersichtlich ist, dass der ‘Modell’-Beton die geringsten $d_{F,max}/d_{F,min}$ -Werte aufweist. Die gesamten ‘Modell’-Gesteinskörner weisen Seitenverhältnisse kleiner als 1,25 auf. Bezüglich der kubischen und länglichen Gesteinskörnung kann eine deutliche Abstufung zu höheren Seitenverhältnissen beobachtet werden. Die Betonzusammensetzungen weisen vergleichbare Verläufe der relativen Häufigkeiten auf und liegen nahezu vollständig im Bereich „kubisch-länglich“, mit einer eindeutigen Verschiebung zur kubischen Vergleichslinie. Die Verwendung vom Splitt führt zu einer weiteren Verschiebung zu geringeren $d_{F,max}/d_{F,min}$ -Werten. Zurückzuführen ist dies auf die durch den Brechprozess verursachte kubische Formgebung gegenüber gerundeten Flusskies, vgl. Abbildung 5.50.

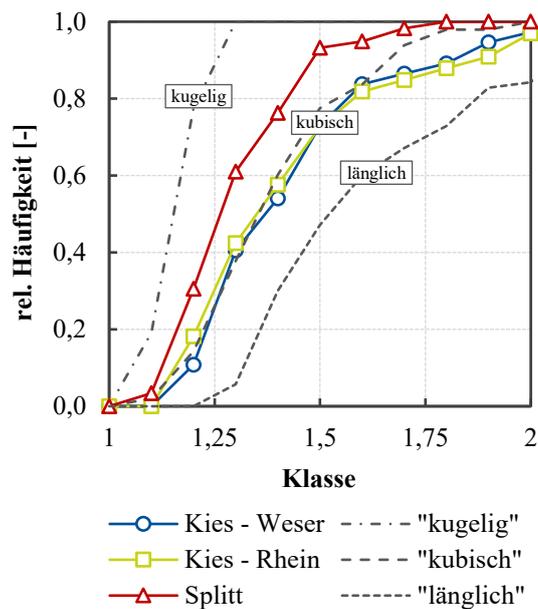


Abbildung 5.51: Relative Häufigkeit des Seitenverhältnisses ($d_{F,max}/d_{F,min}$) der segmentierten groben Gesteinskörner (> 12 mm) unterschiedlicher Betonzusammensetzungen unter Variation der Gesteinsart bzw. Kornform

Bei der bildbasierten Ermittlung der Kornformparameter aus einer Einzelbildaufnahme muss beachtet werden, dass dort das Verhältnis der größten und der mittleren Dimension eines Gesteinskorns berechnet wird, vgl. Abbildung 5.52 – Achse a und Achse b. Die geringste Dimension (Achse c) ist an der Frischbetonoberfläche nicht ermittelbar, da diese zumeist in den Frischbeton zeigt (z-Richtung). Zurückzuführen ist diese Ausrichtung der Gesteinskörner auf die Schlagenergie bei der Durchführung der Konsistenzprüfung. Die größte und mittlere Achse richten sich dabei parallel zur Tischoberkante aus. Abbildung 5.52 gibt einen schematischen Überblick der Achsen eines Gesteinskorns sowie über die Ausrichtung der Gesteinskörner im ausgebreiteten Frischbeton nach der Konsistenzprüfung. Eine direkte Ermittlung und Gegenüberstellung mit der in der praktischen Betontechnologie standardmäßig ermittelten Kornformkennzahl gemäß *DIN EN 933-4* ist demnach mit den bildbasiert ermittelten Parametern nicht möglich. Die Kornformkennzahlen (SI) der unterschiedlichen Gesteinsarten in Abhängigkeit der Fraktion sind im Anhang B-1 zusammenfassend dargestellt.

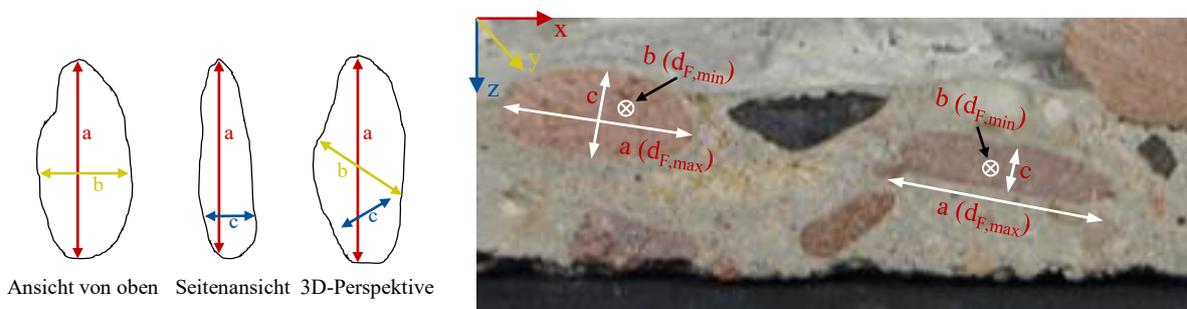


Abbildung 5.52: Schematischer Überblick der Achsen (a, b, c) eines Gesteinskorns sowie über die Ausrichtung der Gesteinskörner im ausgebreiteten Frischbeton nach der Konsistenzprüfung

Die trennscharfe Ermittlung von Kornformparametern in Abhängigkeit der Fläche und insbesondere des Umfangs, wie z. B. die Rundheit oder die Kompaktheit, sind mittels der im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Aufnahmekonfiguration nicht möglich. Die Auflösung der Einzelbildaufnahme mit 6000 x 4000 Pixeln lässt keine ausreichende Erfassung der Kontur bzw. des Umfangs der einzelnen Gesteinskörner zu, die zur Berechnung der Parameter aber notwendig wäre.

5.4.6 Homogenität

Die Homogenität beschreibt den Widerstand des Betons gegen Entmischung, d. h. gegen die Separierung einzelner Bestandteile. Entmischung tritt in nicht stabilen Suspensionen auf allen Skalenebenen – Beton (Makroebene), Mörtel (Mesoebene), Leim (Mikroebene) – auf. Im Rahmen dieser Arbeit wird primär die methodische Detektion von Eigenschaften zur Bewertung der Homogenität im Rahmen der Konsistenzprüfung am ausgebreiteten Frischbeton untersucht. Der Fokus liegt dabei auf den folgenden visuell erfassbaren Eigenschaften:

- Leimabsonderung im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons
- Reflexionseigenschaften der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons

Auf Basis dieser Eigenschaften bzw. daraus abgeleiteter Kennwerte und Kriterien wird eine Bewertung unterschiedlicher Formen der Entmischung, wie z. B. der Absonderung von Leim aus der Mörtelphase oder der Absonderung von Wasser aus der Leimphase, zur Beurteilung der Homogenität vorgenommen.

5.4.6.1 Leimabsonderung im Randbereich

Leimabsonderungen im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons können visuell eindeutig bei der Konsistenzprüfung wahrgenommen werden, vgl. Abbildung 5.53. Dabei kann jedoch nur eine qualitative Einschätzung der Ausprägung, insbesondere der geometrischen Ausdehnung des Leimrandes vorgenommen werden. Deutlich ersichtlich in Abbildung 5.53 ist die unterschiedlich starke Ausprägung der Leimabsonderung im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die quantitative Bestimmung des abgesonderten Leims im Randbereich bildbasiert mit unterschiedlichen Segmentierungsverfahren an einer Einzelbildaufnahme des ausgebreiteten Frischbetons. Die Segmentierung der beiden Klassen – ‘Frischbeton’ und ‘Hintergrund’ – erfolgt mit dem Region Growing Algorithmus (vgl. Anhang A.1). Auf diese Weise ist eine exakte Bestimmung der Fläche des ausgebreiteten Frischbetons ($A_{FB, RG}$), inklusive eines möglichen Leimrandes, möglich. In einem weiteren Schritt erfolgt eine Segmentierung des ausgebreiteten Frischbetons mit dem Convex-Hull-Algorithmus. Dabei erfolgt eine Segmentierung des ausgebreiteten Frischbetons in Abhängigkeit der groben Gesteinskörner im Randbereich. Als Fixpunkte werden näherungsweise die Schwerpunkte der

einzelnen groben Gesteinskörner im Randbereich verwendet, so dass in diesem Berechnungsschritt das kleinste konvexe Polygon des ausgebreiteten Frischbetons in Abhängigkeit der groben Gesteinskörner ermittelt wird. Demnach lässt sich so die konvexe Fläche des ausgebreiteten Frischbetons mit gleichverteilten groben Gesteinskörnern im Randbereich ($A_{FB,CH}$) ermitteln. Die einzelnen Segmentierungsverfahren sind in Anhang A.1 zusammengefasst beschrieben. Als Referenzmaßstab dienen in diesem Kapitel bei allen Flächen-Berechnungen die Dimensionen des Ausbreittisches von 700 x 700 mm².

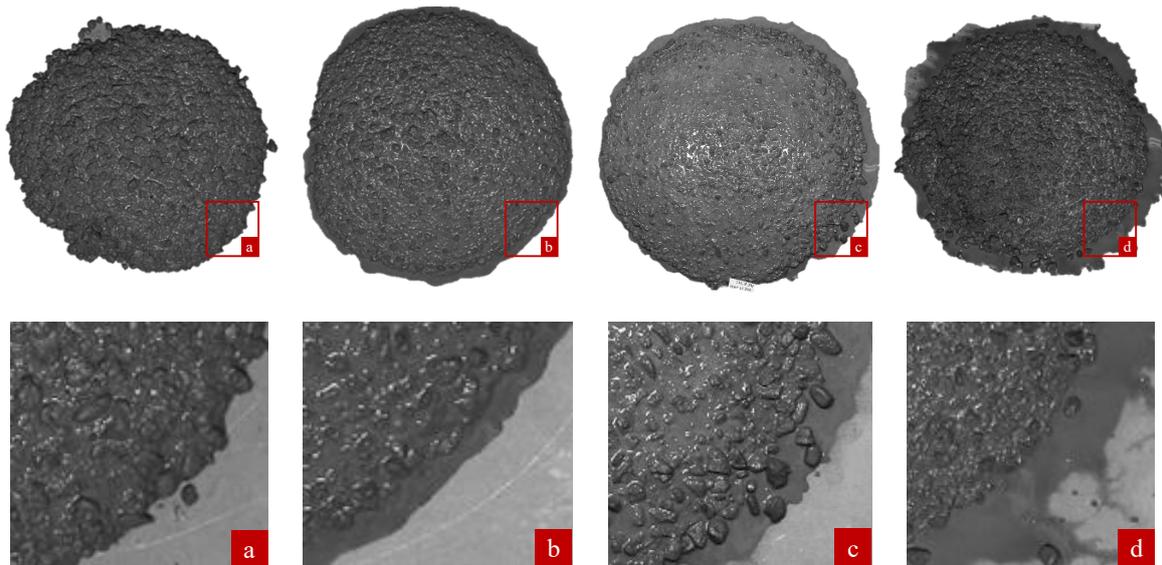


Abbildung 5.53: Ausgebreitete Frischbetone bei der Konsistenzprüfung mit unterschiedlich starken Ausprägungen von Entmischung (Leimrand) – gesamter ausgebreiteter Frischbeton (oben) und Detailaufnahme vom Rand (unten) – a) kein Leimrand; b) geringe Leimrandbildung; c) starke Leimrandbildung mit vereinzelter Grobkornseparation; d) sehr starke Leimrandbildung

Abbildung 5.54 illustriert das Berechnungsschema zur Ermittlung der Leimabsonderung im Randbereich mittels der zuvor genannten Segmentierungsverfahren. In Abhängigkeit der beschriebenen Berechnungsschritte der jeweiligen Flächen des ausgebreiteten Frischbetons lassen sich die folgenden Bedingungen hinsichtlich einer Leimabsonderung im Randbereich formulieren:

$$A_{FB,RG} \cong A_{FB,CH} \rightarrow \text{keine Leimabsonderung im Randbereich}$$

$$A_{FB,RG} > A_{FB,CH} \rightarrow \text{Leimabsonderung im Randbereich}$$

Folglich sind bei vergleichbaren Dimensionen der segmentierten Flächen - $A_{FB,RG}$ und $A_{FB,CH}$ - keine Leimabsonderungen im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons zu erwarten. Die Ausprägung einer Leimabsonderung steigt somit mit einer zunehmenden Differenz der beiden ermittelten Flächen. Da im Bereich einer Leimabsonderung nahezu keine grobe Gesteinskörnung vorhanden ist, ist die an den einzelnen groben Gesteinskörnern ermittelte konvexe Fläche $A_{FB,CH}$ dementsprechend kleiner als die Fläche $A_{FB,RG}$.

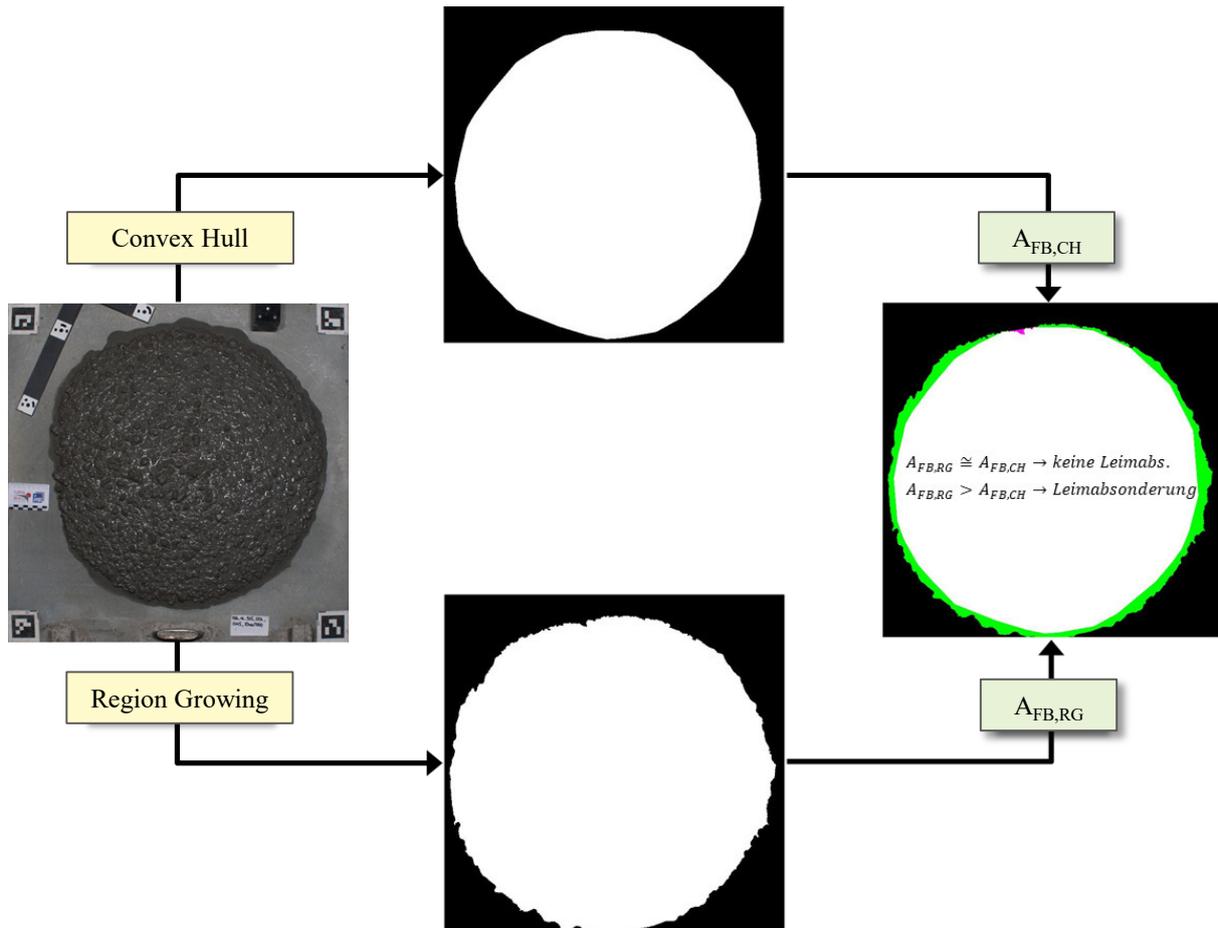


Abbildung 5.54: Schematischer Überblick der Vorgehensweise zur Segmentierung der unterschiedlichen Flächen zur Abschätzung bzw. Berechnung einer Leimabsonderung im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons

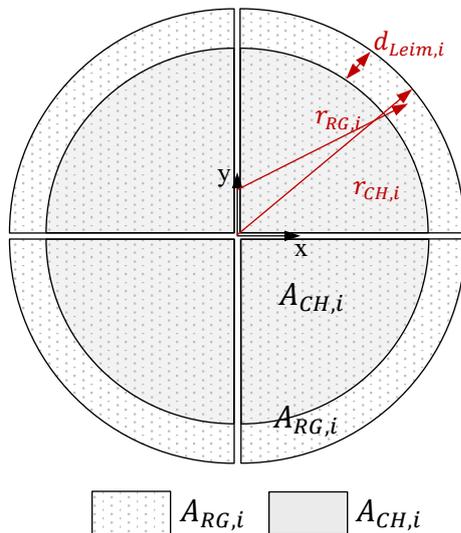
Quantitative Angaben zur Ausprägung können durch Subtraktion der einzelnen Flächen gewonnen werden. So ist mit Gl. 32 eine quantitative Abschätzung der Ausprägung des Leimrandes gegenüber dem zusammenhängenden ausgebreiteten Frischbeton möglich.

$$\vartheta_{Leim} = \frac{A_{FB,RG} - A_{FB,CH}}{A_{FB,CH}} \cdot 100 \quad \text{Gl. 32}$$

Hierin beschreibt ϑ_{Leim} den prozentualen Anteil der Leimabsonderung gegenüber dem ausgebreiteten zusammenhängenden Frischbeton. $A_{FB,RG}$ beschreibt die mittels Region Growing segmentierte Fläche und $A_{FB,CH}$ die mittels Convex Hull segmentierte Fläche.

Eine visuelle Beurteilung der Leimabsonderung findet zumeist infolge einer Abschätzung der mittleren Leimranddicke statt. Dabei weist diese vielfach eine nicht homogene Ausprägung um den gesamten ausgebreiteten Frischbeton auf. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit an der bildbasiert ermittelten Leimabsonderung eine bereichsweise Berechnung der mittleren Stärke durchgeführt. Der ausgebreitete Frischbeton wird dazu in vier Quadranten eingeteilt. Zur Vereinfachung wird die Gestalt des Frischbetons als idealer Kreis angenommen, so dass in

Abhängigkeit der geometrischen Beziehungen der einzelnen Flächen-Abschnitte eine bereichsweise Berechnung des entstandenen Kreisring-Abschnittes erfolgen kann. Abbildung 5.55 gibt einen schematischen Überblick über die geometrischen Beziehungen der einzelnen Flächen-Abschnitte sowie die dazugehörigen Gleichungen. Der mittlere Stärke der Leimabsonderung ($d_{Leim,IA}$) ergibt sich durch Mittelung der einzelnen Flächenabschnitte.



$$r_{RG,i} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{RG,i}}{\pi}} \quad \text{Gl. 33}$$

$$r_{CH,i} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{CH,i}}{\pi}} \quad \text{Gl. 34}$$

$$d_{Leim,i} = r_{RG,i} - r_{CH,i} \quad \text{Gl. 35}$$

$$d_{Leim,IA} = \frac{\sum_{i=1}^n d_{Leim,i}}{n} \quad \text{Gl. 36}$$

Abbildung 5.55: Schematischer Überblick der geometrischen Beziehungen der einzelnen Flächen-Abschnitte zur Berechnung der mittleren Stärke der Leimabsonderung mit dazugehörigen Gleichungen

Abbildung 5.56 zeigt eine Gegenüberstellung der bildbasiert ermittelten mittleren Stärke der Leimabsonderung zur manuell an der Einzelaufnahme ermittelten Stärke der Leimabsonderung. Zur manuellen Bestimmung der mittleren Stärke wurde jeder Flächen-Abschnitt gleichmäßig in zehn Messstellen aufgeteilt und die Stärke der Leimabsonderung manuell bestimmt. Die mittlere Stärke berechnet sich demnach als Mittelwert aus 40 Einzelmesswerten. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der mittleren Stärke der Leimabsonderung feststellbar. Die relativ großen Streumaße bei der manuellen Ermittlung ergeben sich infolge der nicht homogenen Ausprägung der Leimabsonderung um den gesamten ausgebreiteten Frischbeton. Da gerade bei sehr großen Leimabsonderungen die Dicke bereichsweise stark streut, sind die Streumaße dort auch am größten, vgl. z. B. Abbildung 5.53, Teilbild d.

Darüber hinaus zeigt Abbildung 5.56 eine Gegenüberstellung der mittleren Stärke der Leimabsonderung und dem prozentualen Anteil des Leimrandes ϑ_{Leim} gegenüber dem ausgebreiteten zusammenhängenden Frischbeton $A_{FB,CH}$. Zwischen diesen beiden Kennwerten ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung feststellbar. Tendenziell weist der prozentuale Anteil des Leimrandes etwas geringere Werte gegenüber der mittleren Stärke der Leimabsonderung auf. Die Abweichung nimmt mit zunehmender Ausprägung der Leimabsonderung zu. Zusammenfassend

lässt sich festhalten, dass beide bildbasiert ermittelten Messwerte gut zur Abschätzung der Ausprägung einer Leimabsonderung geeignet sind.

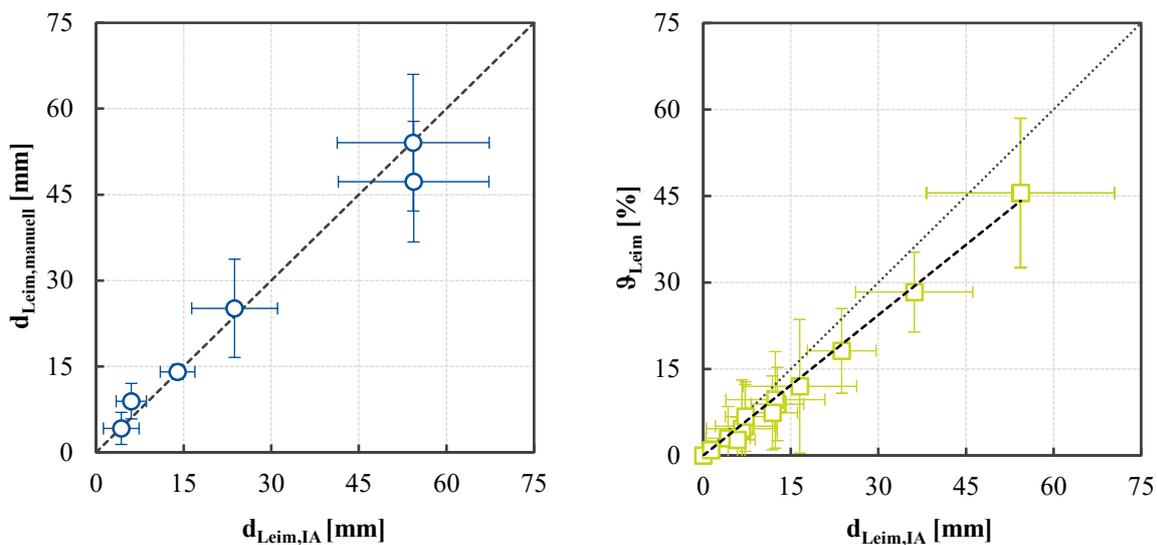


Abbildung 5.56: Mittlere Stärke der Leimabsonderung in Abhängigkeit der Ermittlungsmethode (links) und Gegenüberstellung der mittleren Stärke der Leimabsonderung und dem prozentualen Anteil des Leimrandes (rechts) – die Streubalken in x- und y-Richtung geben jeweils die Streubreite (doppelte Standardabweichung) der Ergebnisse der einzelnen Quadranten an (vgl. Abbildung 5.55)

Die Absonderung von Leim im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons stellt eine Trennung zwischen der Leim- und Mörtelphase und dementsprechend ein Entmischungsphänomen dar. Infolgedessen wurden im Rahmen dieser Arbeit systematisch Betoneigenschaften, die die Entmischungsneigung beeinflussen, variiert, um die Eignung der bildbasierten Kennwerte zur Abschätzung der Entmischungsneigung zu überprüfen.

Wasserüberdosierung bei unterschiedlichen Leimgehalten

In einer ersten Parameterstudie wurde an Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichen Leimgehalten (279 l/m^3 , 304 l/m^3 und 329 l/m^3) systematisch eine Wasserüberdosierung von $+10 \text{ l/m}^3$ bzw. $+15 \text{ l/m}^3$ simuliert. Die Konsistenz der Betonzusammensetzungen ohne Wasserüberdosierung wurde dabei mit verflüssigendem Zusatzmittel auf ein vergleichbares Niveau von $50 \pm 3 \text{ cm}$ eingestellt. Eine Bewertung der Homogenität, sowohl die Sedimentation der groben Gesteinskörnung als auch die Trennung von Leim und Mörtel, wurde an Sedimentationsrohren mit einem Durchmesser von 150 mm (Verdichtung jeweils 45 sec bei 4500 U/min) im erhärteten Zustand bildanalytisch vorgenommen (Prüfverfahren siehe (Haist und Breitenbücher 2021)).

Abbildung 5.57 zeigt das jeweilige Ausbreitmaß in Abhängigkeit des Leimgehaltes und der Wasserüberdosierung. Erwartungsgemäß kann mit zunehmender Wasserüberdosierung eine Steigerung der Konsistenz festgestellt werden. Je höher der Leimgehalt, desto stärker wirkt sich der erhöhte Wassergehalt auf die Konsistenz aus. Darüber hinaus ist in Abbildung 5.57 die

mittlere Stärke des abgesonderten Leimrandes in Abhängigkeit der Wasserüberdosierung dargestellt. Mit zunehmender Wasserüberdosierung ist ein nahezu linearer Anstieg der mittleren Stärke des Leimrandes bei einem Leimgehalt von 279 l/m³ und 304 l/m³ feststellbar. Einzig bei einem Leimgehalt von 329 l/m³ ist erst bei einer Wasserüberdosierung von 15 l/m³ eine geringe Ausprägung einer Leimabsonderung detektierbar. Die relativ großen Streumaße deuten auf hohe Unterschiede bei den einzelnen Messwerten der Wiederholungsversuche hin. Diese Streuungen sind u. a. mit der geringen prozentualen Ausprägung der Leimabsonderung in diesem Wertebereich von unter 10 % gegenüber dem restlichen ausgebreiteten Frischbeton erklärbar. Ferner beeinflussen neben stofflichen Einflüssen eine Vielzahl von ausführungstechnischen Einflüssen die Bildung eines Leimrandes bei der Konsistenzprüfung. Trotz der relativ hohen Streumaße ist eine begründbare Zunahme der mittleren Stärke der Leimabsonderung mit zunehmender Wasserüberdosierung klar erkennbar.

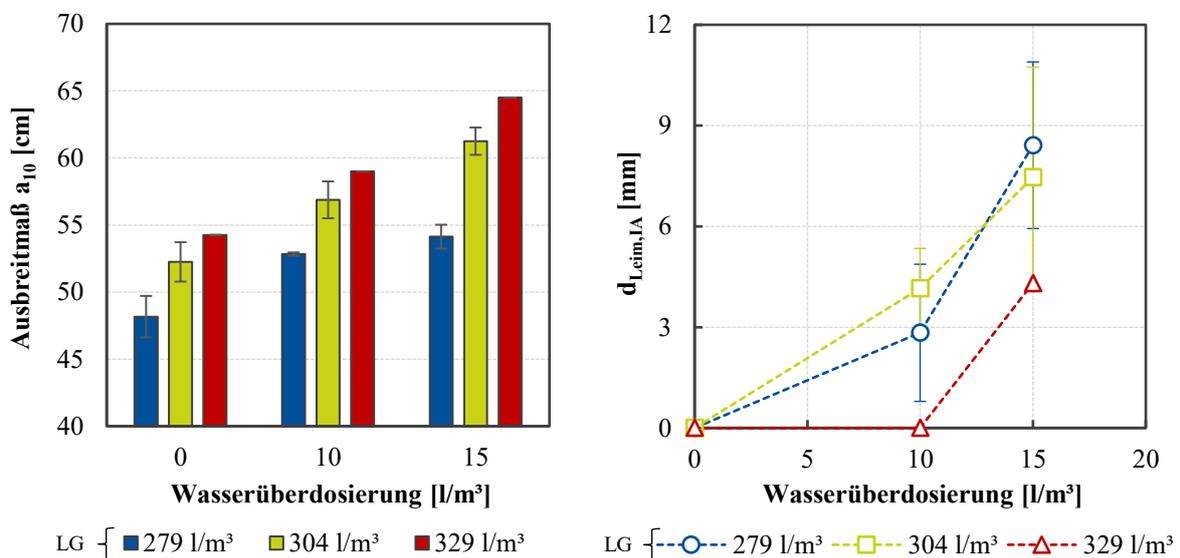


Abbildung 5.57: Ausbreitmaß a_{10} (links) und mittlere Stärke der Leimabsonderung $d_{Leim,IA}$ in Abhängigkeit des Leimgehaltes jeweils für unterschiedliche Wasserüberdosierungen (rechts)

Als Vergleichsgröße zur Bewertung der Entmischungsneigung wurde u. a. die Sedimentationstiefe am Festbeton (h_{Leim}) ermittelt. Abbildung 5.58 gibt einen Überblick der einzelnen Schnittbilder des Festbetons in Abhängigkeit des Leimgehaltes und der Wasserüberdosierung. Es sind jeweils nur Ausschnitte der obersten 4 cm der Sedimentationsrohre dargestellt. Eine übermäßig starke Sedimentation der groben Gesteinskörnung konnte bei keiner Betonzusammensetzung festgestellt werden. Die größte Sedimentationstiefe der groben Gesteinskörnung beträgt ca. 3,5 cm bei einem Leimgehalt von 329 l/m³ und einer Wasserüberdosierung von 15 l/m³. Auffällig bei den Schnittbildern ist jedoch eine verstärkte Leimabsonderung an der Oberfläche mit zunehmender Wasserüberdosierung, vgl. Abbildung 5.58, rote gestrichelte Linie. Besonders stark ausgeprägt ist diese Leimabsonderung bei einem Leimgehalt von 279 l/m³ sowie 304 l/m³. Dagegen ist bei einem Leimgehalt von 329 l/m³ eine deutlich geringere Leimabsonderung einzig bei einer Wasserüberdosierung von 15 l/m³ feststellbar.

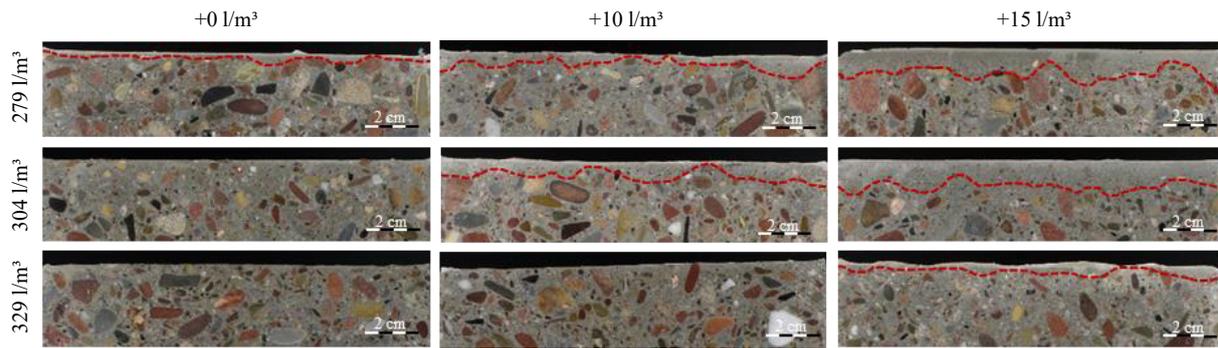


Abbildung 5.58: Schnittbilder der Sedimentationsrohre der Betonzusammensetzungen mit einem Leimgehalt von 279 bis 329 l/m³ unter Variation der Wasserdosierung (+10 l/m³ und +15 l/m³) mit markierter Leimabsonderung (rote gestrichelte Linie) an der Oberfläche - 279 l/m³ (obere Reihe), 304 l/m³ (mittlere Reihe), 329 l/m³ (untere Reihe); jeweils von links nach rechts: +0 l/m³, +10 l/m³, +15 l/m³

Die mittlere Stärke der Leimabsonderung an der Oberkante der Sedimentationsrohre (h_{Leim}) wurde jeweils an zehn Messstellen manuell bestimmt (gemittelte Messwerte siehe Abbildung 5.58). Eine Gegenüberstellung in Abbildung 5.59 mit der mittleren Stärke der Leimabsonderung am ausgebreiteten Frischbeton ($d_{Leim,IA}$) lässt einen eindeutigen Zusammenhang dieser beiden Kennwerte erkennen. So nimmt mit zunehmender Leimabsonderung an der Oberfläche der Sedimentationsrohre auch die Leimabsonderung am ausgebreiteten Frischbeton nahezu linear zu. Die mittlere Steigung ist dabei nahezu unabhängig vom Leimgehalt. Auch hier ist trotz der großen Streubreiten eine klare Tendenz erkennbar.

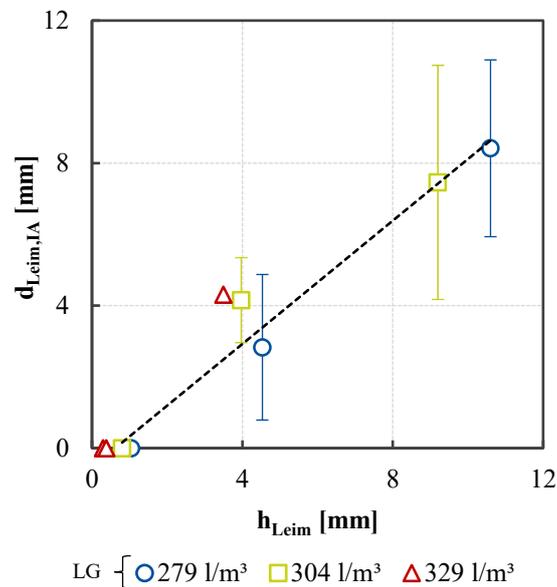


Abbildung 5.59: Mittlere Stärke der Leimabsonderung ($d_{Leim,IA}$) in Abhängigkeit der mittleren Stärke der Leimabsonderung an der Oberfläche der Sedimentationsrohre (h_{Leim})

Einfluss unterschiedlicher verflüssigender Zusatzmittel

In einer weiteren Parameterstudie wurde die systematische Variation verflüssigender Zusatzmittel auf die Leimabsonderung im Randbereich bei der Konsistenzprüfung untersucht. Die Konsistenz von 55 ± 3 cm wurde dabei unter konstanten stofflichen Parametern ($LG = 307 \text{ l/m}^3$ und $w/z_{\text{eq}} = 0,44$) ausschließlich über die Zugabe unterschiedlicher verflüssigender Zusatzmittel eingestellt. Die verflüssigenden Zusatzmittel unterschieden sich sowohl in der Wirkstoffbasis (2x PCE und 1x Naphthalin-Sulfonat) als auch in den Eigenschaften. Die Bewertung der Entmischungsneigung, sowohl der Sedimentation der groben Gesteinskörnung als auch die Trennung von Leim und Mörtel, wurde analog zur bereits im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise an Sedimentationsrohren mit einem Durchmesser von 150 mm (Verdichtung jeweils 45 sec bei 4500 U/min) im erhärteten Zustand vorgenommen. Darüber hinaus erfolgte eine visuelle Bewertung der Mantelflächen hinsichtlich einzelner Entmischungserscheinungen.

Je nach Art und Wirkung variierte die erforderliche Menge des verflüssigenden Zusatzmittels. Erwartungsgemäß war von FM2 auf Basis von Naphthalin-Sulfonat die höchste Menge zur Einstellung der Ziel-Konsistenz notwendig, vgl. Abbildung 5.60. Weiterhin kann Abbildung 5.60 entnommen werden, dass die Leimabsonderung im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons stark vom verwendeten Fließmittel abhängt. Eine direkte Abhängigkeit zur Fließmittel-Menge ist dabei nicht festzustellen. So ist von FM3 zur Einstellung der Zielkonsistenz die geringste FM-Menge notwendig, jedoch weist diese Betonzusammensetzung mit etwa 48 mm die stärkste Leimabsonderung auf. Die mittlere Stärke der Leimabsonderung variiert in einem breiten Spektrum von etwa 7 mm bis 48 mm. Abbildung 5.61 gibt einen Überblick zu den ausgebreiteten Frischbetonen mit entsprechender Leimrandbildung.

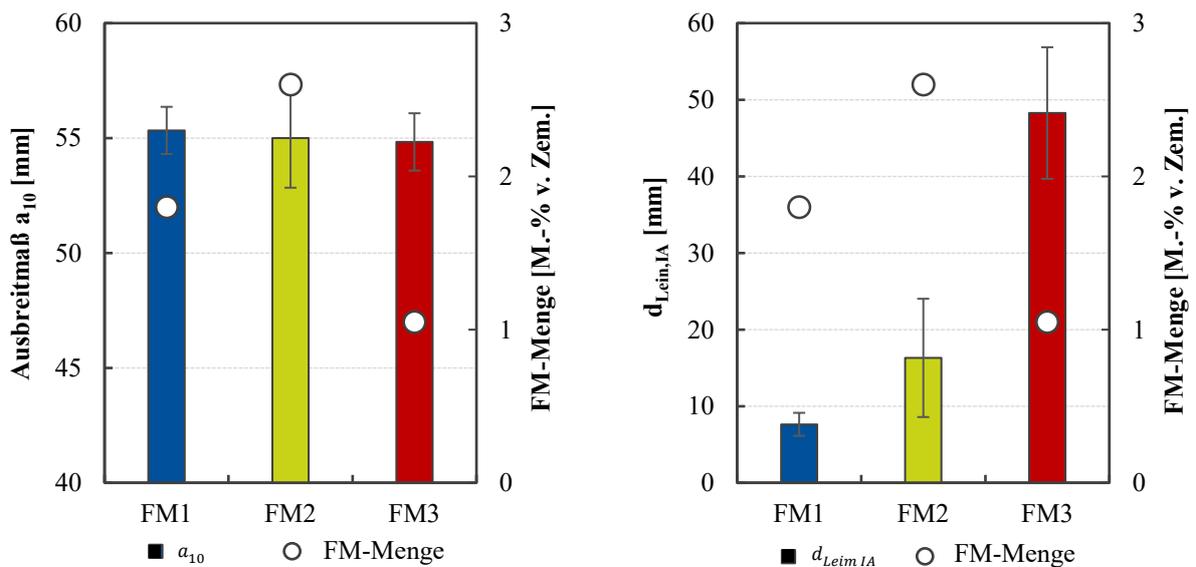


Abbildung 5.60: Ausbreitmaß a_{10} und notwendige FM-Menge zur Einstellung der Konsistenz (links) und mittlere Stärke der Leimabsonderung bei Anwendung der unterschiedlichen Fließmittel (rechts)

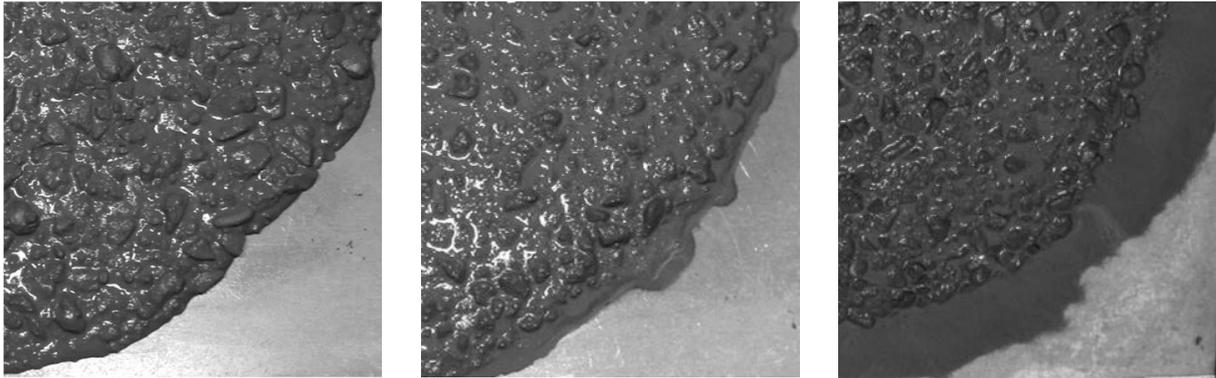


Abbildung 5.61: Ausgebreitete Frischbetone unter Variation des verflüssigenden Zusatzmittels bei der Konsistenzprüfung mit unterschiedlich starken Ausprägungen von Entmischung (Leimabsonderungen im Randbereich) - FM1 (links); FM2 (mitte); FM3 (rechts)

Ein direkter Zusammenhang zwischen der mittleren Stärke der Leimabsonderung an der Oberfläche des erhärteten Sedimentationsrohrs (h_{Leim}) und der mittleren Stärke der Leimabsonderung im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons konnte nicht festgestellt werden (vgl. Abbildung 5.62). Zwar nimmt die Leimabsonderung an der Oberfläche der Sedimentationsrohre in vergleichbarer Tendenz zu ($h_{Leim,FM1} < h_{Leim,FM2} < h_{Leim,FM3}$), die Ausprägung der Leimabsonderung ist dabei jedoch so gering, dass kein direkter Zusammenhang abgeleitet werden kann.

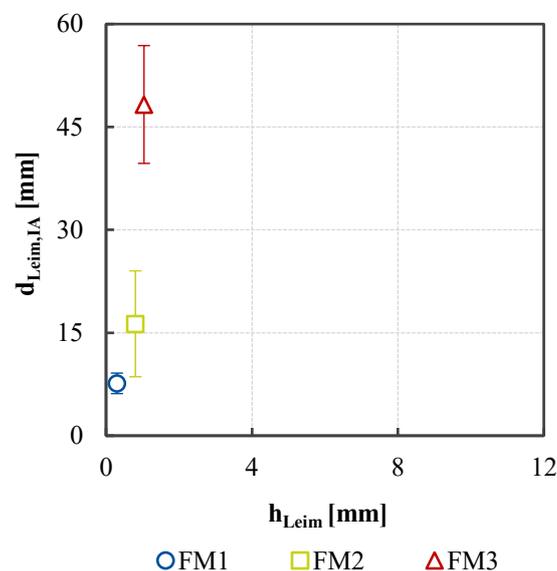


Abbildung 5.62: Mittlere Stärke der Leimabsonderung ($d_{Leim,IA}$) in Abhängigkeit der mittleren Stärke der Leimabsonderung an der Oberfläche der Sedimentationsrohre (h_{Leim}) unter Verwendung unterschiedlicher Fließmittel bei konstantem Leimgehalt

Zur Erklärung der unterschiedlich starken Entmischungserscheinungen am Rand der ausgebreiteten Frischbetone wurden die rheologischen Eigenschaften des abgesonderten Leims unter-

sucht. Dazu wurde der Leim auf einem Sieb mit einer Lochweite von 0,25 mm aus dem Frischbeton separiert. Im Anschluss erfolgte nach einer erneuten Durchmischung die Ermittlung der rheologischen Eigenschaften in einem Rheometer vom Typ Viskomat NT (*Fa. Schleibinger*). Die Umrechnung der Messergebnisse in absolute Einheiten erfolgte gemäß (Haist et al. 2020).

Abbildung 5.63 zeigt die Fließgrenze des jeweiligen separierten Leims der untersuchten Betonzusammensetzungen in Abhängigkeit der verwendeten Fließmittel. Es sind deutlich unterschiedliche Fließgrenzen der Leime in Abhängigkeit der verwendeten Fließmittel ersichtlich, wobei gilt: $\tau_{0,FM1} \gg \tau_{0,FM2} > \tau_{0,FM3}$. Die Gegenüberstellung der Fließgrenze des jeweiligen Leims mit der mittleren Stärke des abgesonderten Leims im Rahmen der Konsistenzprüfung in Abbildung 5.63 zeigt, dass mit abnehmender Fließgrenze eine deutliche Zunahme der mittleren Stärke des abgesonderten Leims ($d_{Leim,IA}$) im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons festgestellt werden kann.

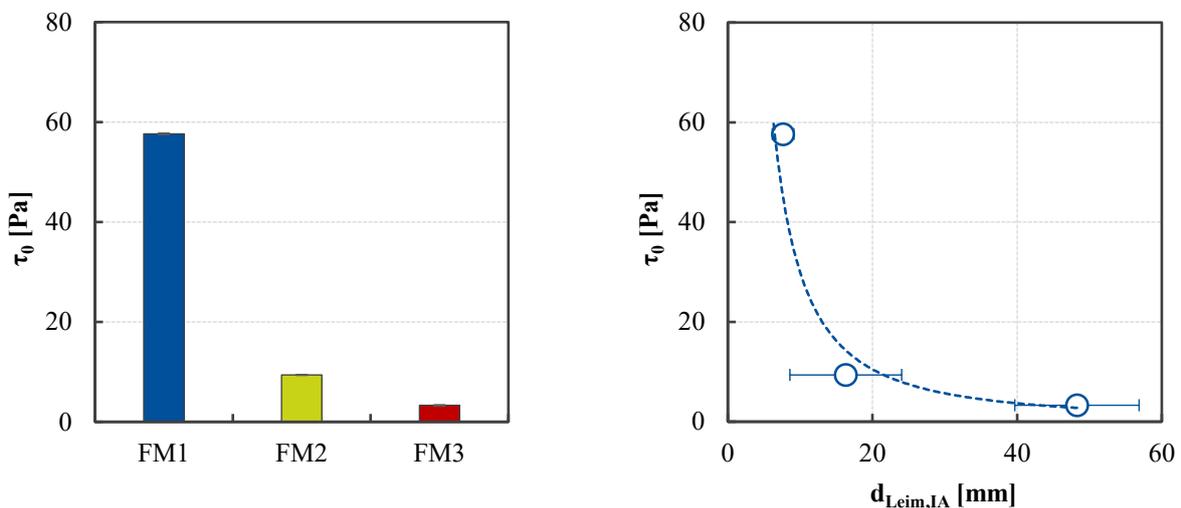


Abbildung 5.63: Fließgrenze (τ_0) des separierten Leims der Betone in Abhängigkeit der verwendeten Fließmittel FM1 bis FM3 (links) und Fließgrenze (τ_0) des separierten Leims der Betonzusammensetzungen in Abhängigkeit der mittleren Stärke des abgesonderten Leims im Rahmen der Konsistenzprüfung ($d_{Leim,IA}$)

5.4.6.2 Wasserabsonderung

Die Wasserabsonderung des Frischbetons ist von einer Vielzahl betontechnologischer Parameter abhängig (vgl. Kapitel 2.3.2). Abbildung 5.64 zeigt die maximale Wasserabsonderung einer Vielzahl unterschiedlicher Betonzusammensetzungen ($n = 86$) in Abhängigkeit betontechnologischer Parameter. Eine klare Abhängigkeit der maximalen Wasserabsonderung von einzelnen Parametern ist nicht ersichtlich. So kann zwar festgestellt werden, dass z. B. tendenziell mit steigendem Wassergehalt oder steigendem Wasser-Bindemittel-Verhältnis ein Anstieg der Wasserabsonderung einhergeht. Die Spreizung ist jedoch dementsprechend groß, so dass kein klarer Trend abgeleitet werden kann. Eine Prognose der Neigung zur Wasserabsonderung mittels vereinzelter betontechnologischer Parameter, wie z. B. dem w/z-Wert, ist daher nicht möglich.

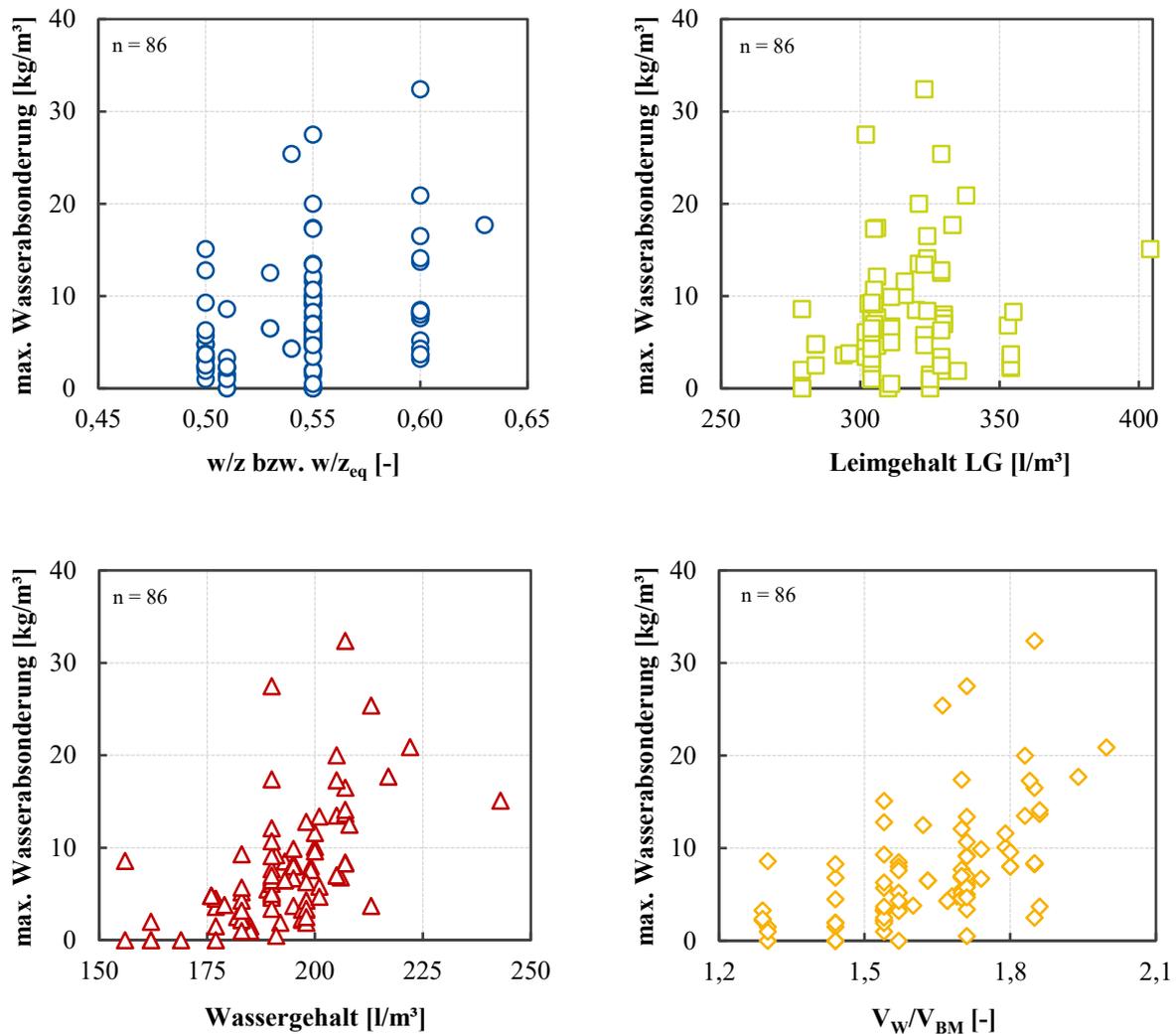


Abbildung 5.64: Maximale Wasserabsonderung unterschiedlicher Betonzusammensetzungen in Abhängigkeit betontechnologischer Parameter: oben links: w/z bzw. w/z_{eq} ; oben rechts: Leimgehalt; unten links: Wassergehalt; unten rechts: vol. Wasser-Bindemittel-Verhältnis

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine Methodik zur Bewertung der Reflexionseigenschaften der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons bei der Konsistenzprüfung entwickelt und erprobt. Detailliert ist die methodische Vorgehensweise in Kapitel 4.8.3 in Kapitel 4 beschrieben. In Einzelbildaufnahmen, die unter konstanten Beleuchtungs- und Aufnahmebedingungen aufgenommen werden, wird eine Segmentierung der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons in Teilmengen der Häufigkeitsverteilung der Grauwerte in Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften vorgenommen. Als Kennwert bzw. Kriterium zur Bewertung der Wasserabsonderung des ausgebreiteten Frischbetons wird λ_{RefL} entsprechend Gl. 37 definiert:

$$\lambda_{RefL} = b_{RefL} \cdot k_{a_i} \quad \text{Gl. 37}$$

Hierin beschreibt der Kennwert b_{RefL} den Verhältniswert der Pixel-Teilmenge ($n_{Leim,RefL}$) der Grauwert-Häufigkeitsverteilung wobei gilt $i > \theta$, zur Gesamtanzahl der Pixel (n_{Beton}). Die

Vorgehensweise zur Ermittlung von b_{RefL} und der resultierende Schwellenwert θ wurden bereits in Kapitel 4.8.3 beschrieben. Der Parameter k_{a_i} berücksichtigt den Einfluss einer partiellen Beleuchtung infolge der verwendeten LED-Beleuchtung in Abhängigkeit des Durchmessers des ausgebreiteten Frischbetons, wobei gilt:

$$k_{a_i} = \begin{cases} a_i \leq 40 \text{ cm} \rightarrow 1,0 \\ a_i > 40 \text{ cm} \rightarrow \frac{a_i}{40} \end{cases} \quad \text{Gl. 38}$$

Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 5.65 Oberflächen von ausgebreiteten Frischbetonen im Rahmen der Konsistenzprüfung dargestellt. Die Wasserabsonderung variiert dabei von 6,3 kg/m³ (links) bis 20,4 kg/m³ (rechts). In Übereinstimmung dazu, lässt sich visuell mit zunehmender Wasserabsonderung ein erhöhter Flächenanteil mit starker Reflexion erkennen. Der Kennwert λ_{RefL} steigt mit zunehmender abgesonderten Wassermenge von 0,08 (6,3 kg/m³ max. Wasser) bis auf 0,18 (20,4 kg/m³ max. Wasser) an. Abbildung 5.66 stellt dazu die segmentierten Reflexionsanteile bzw. Pixel-Teilmengen ($n_{Leim,RefL}$) der Frischbetone dar.

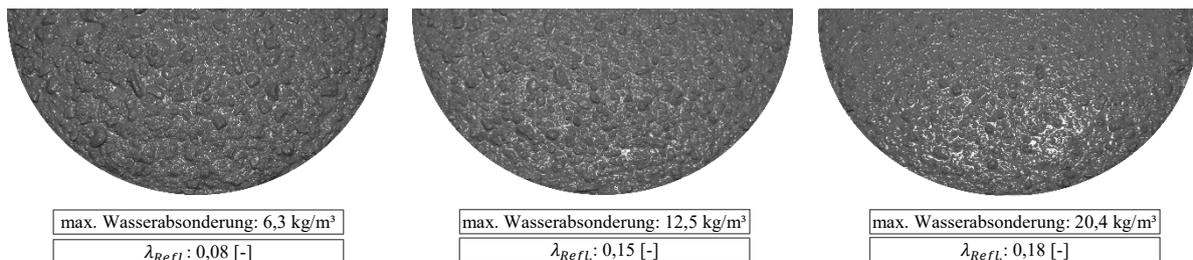


Abbildung 5.65: Oberflächen von ausgebreiteten Frischbetonen im Rahmen der Konsistenzprüfung unter konstanten Beleuchtungs- und Aufnahmebedingungen - visuelle Wahrnehmung unterschiedlich starker Reflexion - von links nach rechts: Zunahme des Wassergehalts um 10 kg/m³ (mitte) bzw. 15 kg/m³ (rechts)

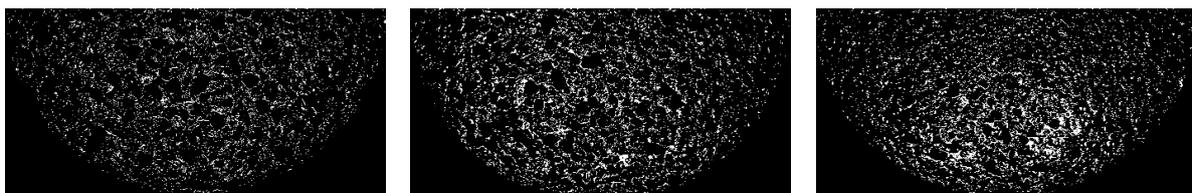


Abbildung 5.66: Pixel-Teilmenge ($n_{Leim,RefL}$) an der Oberfläche des Frischbetons unterschiedlicher Betonzusammensetzungen - links: $\lambda_{RefL} = 0,08$ und max. WA = 6,3 kg/m³; mitte: $\lambda_{RefL} = 0,15$ und max. WA = 12,5 kg/m³; rechts: $\lambda_{RefL} = 0,18$ und max. WA = 20,4 kg/m³

Abbildung 5.67 zeigt die maximale Wasserabsonderung unterschiedlicher Betonzusammensetzungen unter Variation betontechnologischer Parameter in Abhängigkeit des Kennwertes λ_{RefL} . Tendenziell ist eine gute Überstimmung der beiden Eigenschaften bzw. Kennwerte erkennbar. Mit zunehmender maximaler Wasserabsonderung steigt der Kennwert λ_{RefL} an. Das bedeutet, dass mit zunehmender Wasserabsonderung des Frischbetons ein erhöhter Flächenanteil des Leimanteils mit starker Reflexion an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons bei der Konsistenzprüfung bildbasiert festgestellt werden kann. Aufgrund der Berücksichtigung

der Gesamtanzahl der Pixel des ausgebreiteten Frischbetons bei der Berechnung des Kennwertes b_{RefL} , ist der Kennwert λ_{RefL} von den Dimensionen des ausgebreiteten Frischbetons und damit vom Ausbreitmaß unabhängig.

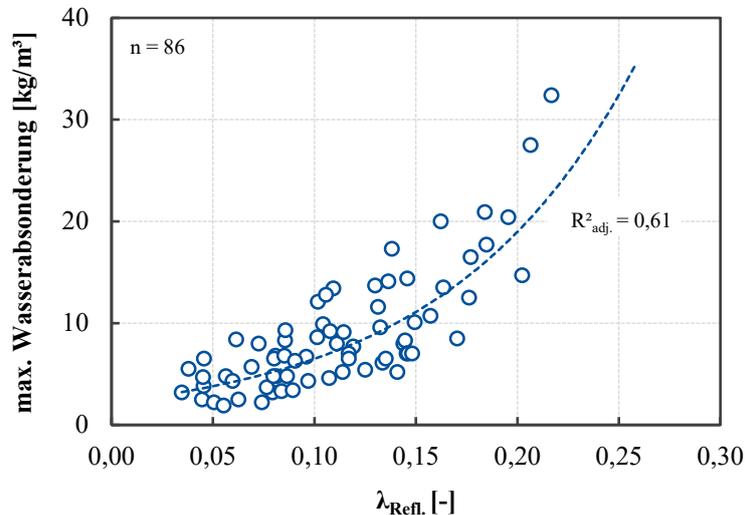


Abbildung 5.67: Maximale abgesonderte Wassermenge unterschiedlicher Betonzusammensetzungen unter Variation betontechnologischer Parameter in Abhängigkeit des Kennwertes λ_{RefL} .

Die Wasserabsonderung wurde mit dem Eimerverfahren in Anlehnung an (DBV-MB 2014) unter Verwendung einer gleichmäßigen Verdichtungsenergie unabhängig von der Konsistenz des Frischbetons ermittelt, vgl. Kapitel 5.3. Bei der Gegenüberstellung ist demnach zu beachten, dass die Zusammenhänge einzig für die im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Prüfrandbedingungen gelten. Darüber hinaus weisen alle in Abbildung 5.67 dargestellten Betonzusammensetzungen einen zeitlichen Verlauf der Wasserabsonderung auf, der durch eine direkt nach Verdichtung beginnende Wasserabsonderung gekennzeichnet ist. Die Verläufe entsprechen der Charakteristik A oder B gemäß Abbildung 2.6 in Kapitel 2.3.2

Die Streuungen bzw. Abweichungen sowohl der maximalen Wasserabsonderung als auch des Kennwertes λ_{RefL} vor allem im geringen Wertebereich lassen sich durch die starke Variation der betontechnologischen Parameter der untersuchten Betonzusammensetzungen erklären. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben bzw. in Abbildung 5.64 gezeigt, ist die Neigung zur Wasserabsonderung von Frischbeton von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Da, wie zuvor gezeigt, die Reflexion der Oberfläche und somit auch der Kennwert λ_{RefL} einen starken Zusammenhang zur Wasserabsonderung besitzt, sind auch dort Abweichungen in einer vergleichbaren Größenordnung zu beobachten. Betrachtet man demgegenüber in Abbildung 5.69 vereinzelte Betonzusammensetzungen mit nur einer Variation der stofflichen Parameter, z. B. des Wassergehaltes oder Veränderungen der Korngrößenverteilung, kann erkannt werden, dass die Streuungen von λ_{RefL} deutlich geringer ausfallen. So führen Wassergehaltsschwankungen (+5 l/m³ bis +15 l/m³) zu einer erwartungsgemäß verstärkten Wasserabsonderung des Frischbetons, vgl. Abbildung 5.69, rechts oben. Diese veränderte maximale

Wassermenge lässt sich sehr gut mit dem Kennwert λ_{RefI} abbilden. Es ist ein ausgeprägter exponentieller Anstieg von λ_{RefI} mit zunehmender maximaler Wassermenge infolge der Wassergehaltsschwankungen erkennbar. Eine Veränderung, z. B. der Charakteristik der Korngrößenverteilung, bei sonst identischen betontechnologischen Parametern führt ebenso zu einer veränderten maximalen Wassermenge des Frischbetons, vgl. Abbildung 5.69, rechts unten. Diese Veränderungen spiegeln sich in einer Zunahme des Kennwertes λ_{RefI} wieder, wobei die Steigung hier sehr steil verläuft und somit die Trennschärfe verringert. Festzuhalten ist jedoch, dass auch derartige Veränderungen, die zu einer Beeinflussung der Wasserabsonderung führen, mit dem Kennwert λ_{RefI} im Rahmen der Konsistenzprüfung detektierbar und bewertbar sind.

Auch hier ist anzumerken, dass die in Abbildung 5.67 abgeleitete Ausgleichsfunktionen keinem direkten physikalischen Hintergrund unterliegen. Es wurde lediglich mittels der Methode der kleinsten Quadrate jeweils eine Ausgleichsfunktion bestimmt, die möglichst nahe an den Datenpunkten verläuft und somit den untersuchten Datensatz bestmöglich beschreibt. Aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren, die sowohl die Wasserabsonderung aber dementsprechend auch die Reflexion der Frischbetonoberfläche beeinflussen, erscheint eine ganzheitliche Betrachtung auch nur eingeschränkt möglich. Vielmehr scheint die Betrachtung der Zusammenhänge einzelner Betonzusammensetzungen unter Variation einzelner Parameter zielführend für eine zielsichere (relative) digitale Bewertung der Wasserabsonderung anhand der Reflexionseigenschaften der Frischbetonoberfläche.

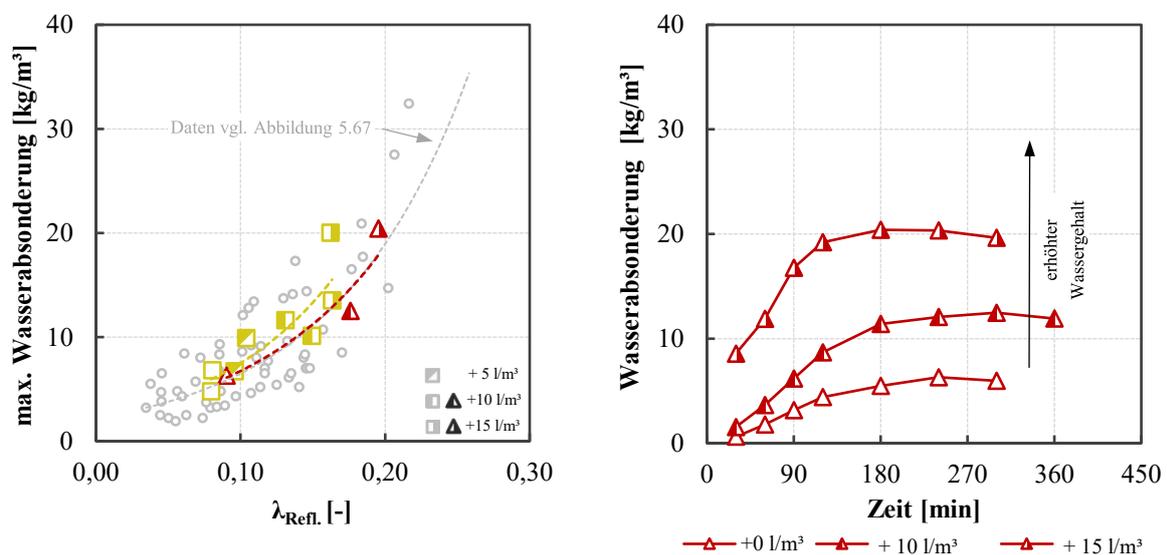


Abbildung 5.68: Maximale Wasserabsonderung unterschiedlicher Betonzusammensetzungen unter Variation von Wassergehaltsschwankungen (+5 bis +15 l/m³) in Abhängigkeit des Kennwertes λ_{RefI} . (links) und Verlauf des Wasserabsonderung in Abhängigkeit der Zeit (rechts)

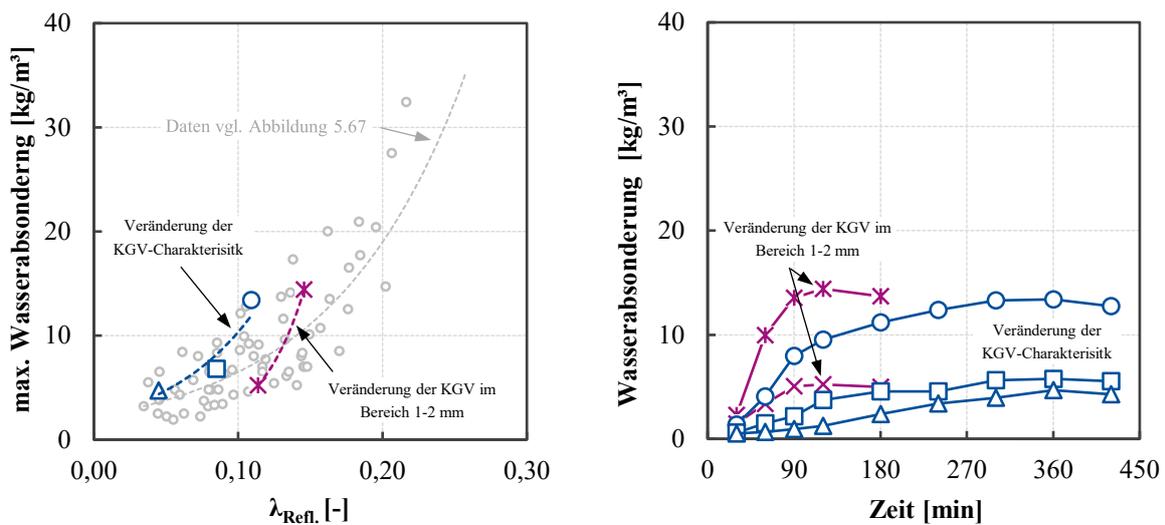


Abbildung 5.69: Maximale Wasserabsonderung unterschiedlicher Betonzusammensetzungen unter Variation Veränderung der KGV-Charakteristik (A; A/B; B) und Veränderungen im Sand-Bereich von 1-2 mm in Abhängigkeit des Kennwertes $\lambda_{\text{Refl.}}$ (links) und Verlauf des Wasserabsonderung in Abhängigkeit der Zeit (rechts)

Abbildung 5.70 zeigt die maximale Wasserabsonderung (links) sowie das Ausbreitmaß (rechts) in Abhängigkeit von $\lambda_{\text{Refl.}}$ für unterschiedliche Betonzusammensetzungen im Konsistenzbereich F4 ($a_{10} = 49-51 \text{ cm}$). Bei einer Abweichung im Ausbreitmaß von $\pm 1 \text{ cm}$ können die betrachteten Betonzusammensetzungen in der Fließfähigkeit als vergleichbar eingestuft werden (vgl. Präzisionsdaten in Kapitel 4.10). Die Betrachtung aller dargestellten Betonzusammensetzungen führt sowohl beim Ausbreitmaß als auch bei der maximalen Wasserabsonderung zu keinem Zusammenhang der jeweiligen Kennwerte. Es ist festzuhalten, dass die betrachteten Betonzusammensetzungen stark in den jeweiligen betontechnologischen Eigenschaften differieren.

Die Betrachtung einzelner Betonzusammensetzungen mit nur jeweils einer variierenden Eigenschaft zeigen demgegenüber bei der maximalen Wasserabsonderung in Abhängigkeit von $\lambda_{\text{Refl.}}$ einen systematischen Zusammenhang. So führt z. B. die Veränderung der Korngrößenverteilung zu einer Veränderung der maximalen Wasserabsonderung, die sich ebenso beim Kennwert $\lambda_{\text{Refl.}}$ einstellt (lila Symbole). Vergleichbares gilt bei der Veränderung des Leimgehaltes bei sonst identischen Eigenschaften (gelbe Symbole). Da all diese Betonzusammensetzungen eine vergleichbare Fließfähigkeit von $a_{10} = 49 - 51 \text{ cm}$ aufweisen, kann festgehalten, dass der Kennwert $\lambda_{\text{Refl.}}$ eine (relative) Bewertung der Wasserabsonderung unabhängig des Ausbreitmaßes im Rahmen der Konsistenzprüfung gestattet.

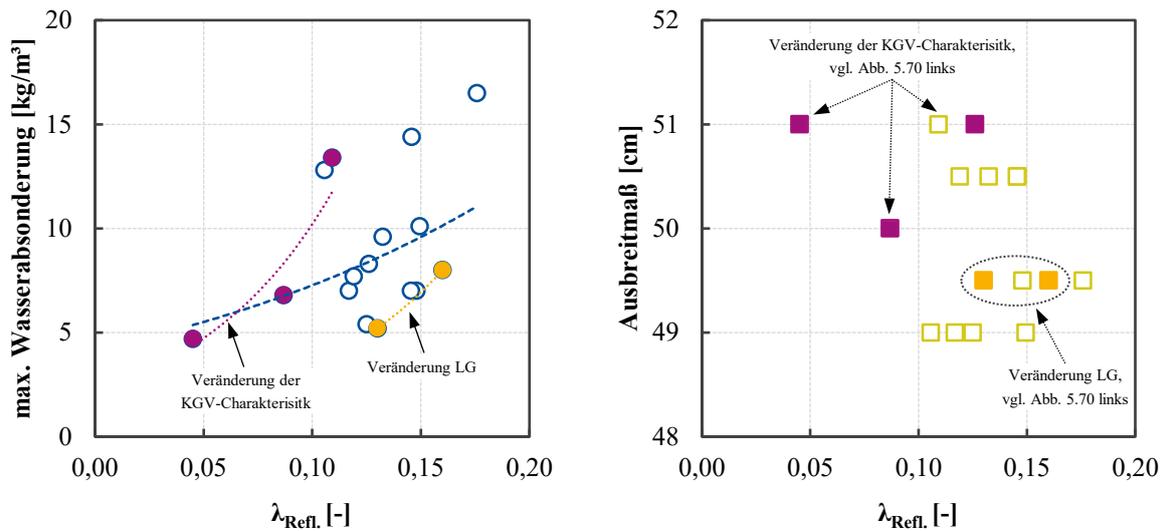
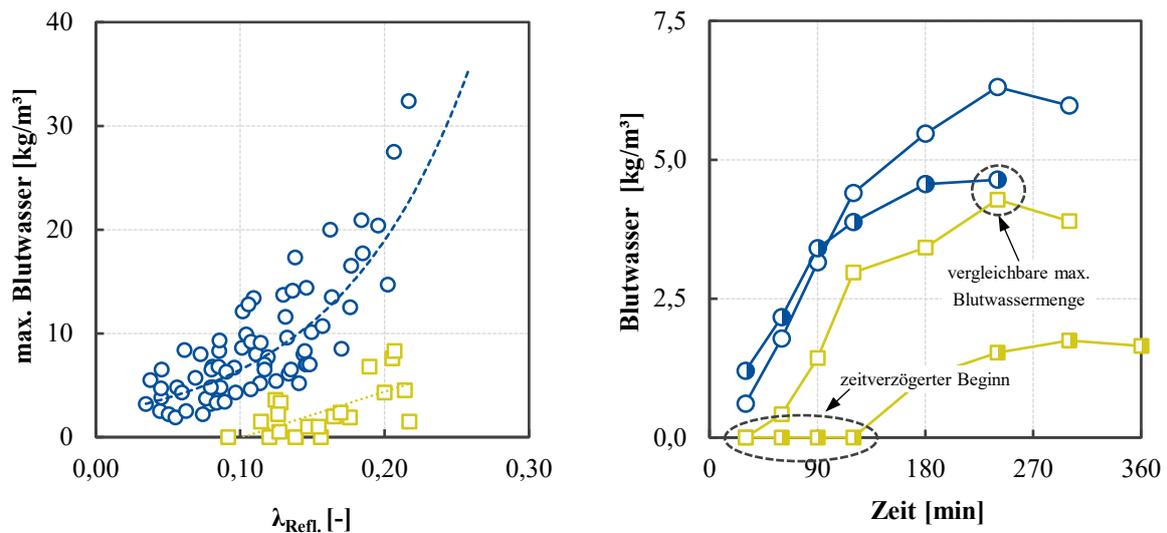


Abbildung 5.70: Maximale Wasserabsonderung (links) und Ausbreitmaß a_{10} (rechts) in Abhängigkeit von $\lambda_{Ref.}$ unterschiedlicher Betonzusammensetzungen des Konsistenzbereiches F4

Zahlreiche Untersuchungen in der Literatur zeigen bereits, dass Wechselwirkungen zwischen dem Zement und dem verflüssigenden Zusatzmittel die Wasserabsonderung von Frischbeton maßgeblich beeinflussen können (Rickert und Hermann 2013; Alonso et al. 2015).

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen war auffällig, dass eine Vielzahl von Betonzusammensetzungen unter Verwendung verflüssigender Zusatzmittel auf Basis von Polycarboxylatether eine überdurchschnittlich hohe Reflexion an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons, bei vergleichsweise geringer Wasserabsonderung, aufwiesen. Dementsprechend konnte bei diesen Betonzusammensetzungen zwar ein hoher Wert für $\lambda_{Ref.}$ festgestellt werden, die maximale Wasserabsonderung war jedoch sehr gering bzw. nicht messbar. Abbildung 5.71 verdeutlicht die zuvor beschriebenen Zusammenhänge. Zum einen ist die bereits zuvor beschriebene Abhängigkeit zwischen der maximalen Wasserabsonderung und dem Kennwert $\lambda_{Ref.}$ erkennbar (blaue Kreis-Symbole). Demgegenüber zeigt eine Vielzahl von Betonzusammensetzungen (grüne Quadrat-Symbole) einen hohen Kennwert $\lambda_{Ref.}$ bei einer vergleichsweise geringen maximalen Wasserabsonderung. Die Auswertung der zeitabhängigen Verläufe der Wasserabsonderung zeigt, dass Betonzusammensetzungen mit einem hohen $\lambda_{Ref.}$ -Wert bei einer vergleichsweise geringen maximalen Wasserabsonderung jeweils einen zeitverzögerten Beginn der Wasserabsonderung aufweisen, vgl. Abbildung 5.71 (grüne Quadrat-Symbole). Ein zeitverzögerter Beginn wird angenommen, wenn sich in den ersten 30 Minuten nach der Verdichtung der Probe keine messbare Wassermenge auf der Frischbetonoberfläche gebildet hat. Bei den anderen Betonzusammensetzungen kann dagegen eine direkt nach der Verdichtung der Probe beginnende Wasserabsonderung festgestellt werden (blaue Kreis-Symbole).



○ sofortiger Beg. der WA □ zeitverz. Beg. der WA

Abbildung 5.71: Maximale Wasserabsonderung unterschiedlicher Betonzusammensetzungen unter Variation betontechnologischer Parameter in Abhängigkeit des Kennwertes $\lambda_{\text{Refl.}}$ (links) und dazugehörige exemplarische zeitliche Verläufe der Wasserabsonderung (rechts)

Abbildung 5.72 zeigt, dass die Betonzusammensetzungen mit einem zeitlich verzögerten Beginn der Wasserabsonderung tendenziell leicht erhöhte Zugabe-Mengen von Fließmittel auf PCE-Basis beinhalten. Untersuchungen von RÖBLER (2006) zeigen, dass verflüssigende Zusatzmittel auf PCE-Basis eine verzögernde Wirkung auf den frühen Hydratationsverlauf bewirken. Die Ausprägung der Verzögerung ist dabei insbesondere von der bevorzugten Adsorption der Fließmittel am C_3A und dementsprechend von dessen Gehalt abhängig. Darüber hinaus konnte in den Untersuchungen von RÖBLER (2006) gezeigt werden, dass der Verdichtungsgrad des Zementleims infolge der dispergierenden Wirkung der PCE-Fließmittel erhöht wird. Es kann angenommen werden, dass die zeitlich verzögerte einsetzende Wasserabsonderung bei Betonzusammensetzungen mit erhöhtem Gehalt an Fließmitteln auf PCE-Basis u. a. auf die Wechselwirkungen zwischen PCE-Fließmittel und Bindemittel, die den Hydratationsverlauf verzögern, zurückzuführen ist. Des Weiteren ist anzunehmen, dass veränderte Mikro-Sedimentationserscheinungen den zeitlichen Verlauf der Wasserabsonderung beeinflussen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf ein vertieftes Verständnis der Mechanismen zum zeitlichen Verlauf der Wasserabsonderung von Frischbeton nicht weiter eingegangen. Das Hauptaugenmerk soll stattdessen auf einer praxisnahen Betrachtung zur Abschätzung der Charakteristik des zeitlichen Verlaufs der Wasserabsonderung liegen.

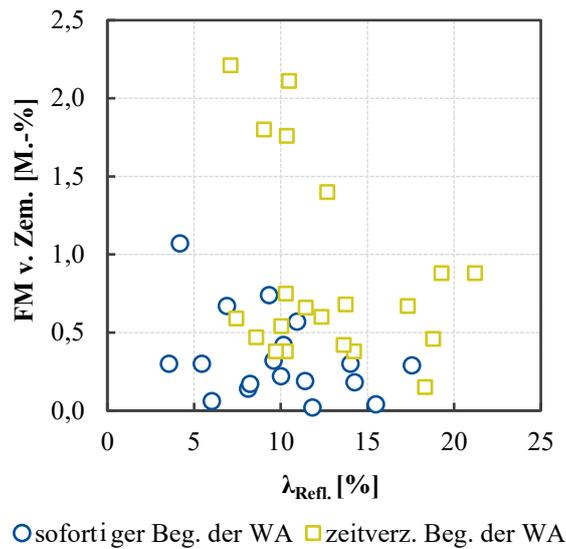


Abbildung 5.72: Fließmittelmenge der untersuchten Betone in Abhängigkeit des Kennwertes λ_{Refl} .

Im Rahmen dieser Arbeit war vor allem bei Betonzusammensetzungen mit einem volumetrischen Wasser-Bindemittel-Verhältnis $V_W/V_{BM} < 1,50$ ein zeitverzögerter Beginn der Wasserabsonderung zu beobachten. Abbildung 5.73 verdeutlicht, dass eine zielsichere Bewertung der Wasserabsonderung mittels λ_{Refl} möglich ist, wenn gilt: $V_W/V_{BM} \geq 1,60$. Gilt dagegen: $V_W/V_{BM} < 1,60$, ist eine zielsichere Bewertung nur möglich, wenn der Frischbeton keinen zeitverzögerten Beginn der Wasserabsonderung aufweist (Char. A, vgl. Abbildung 5.73).

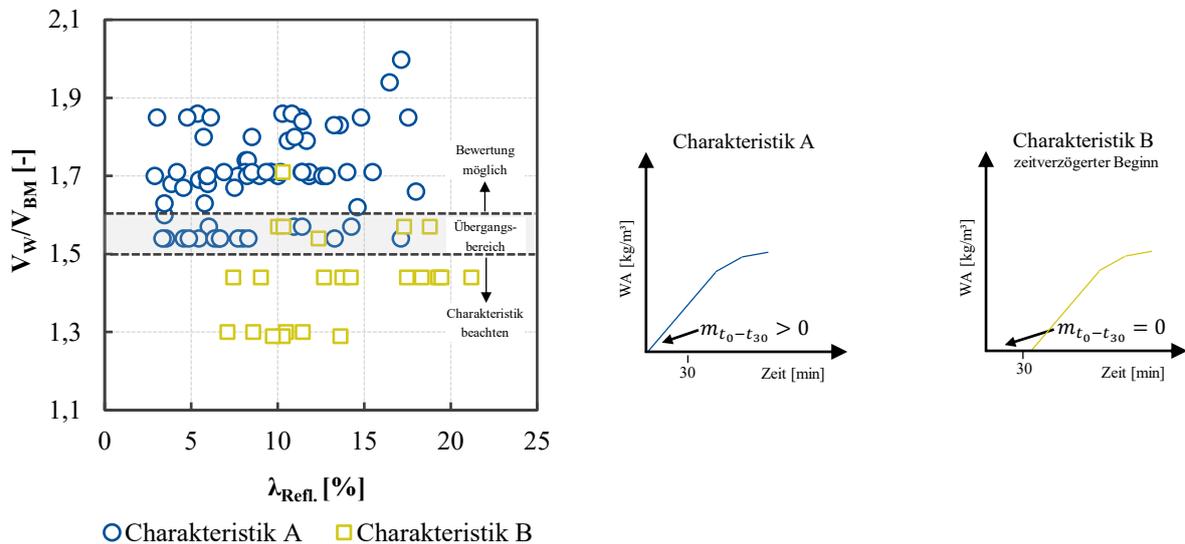


Abbildung 5.73: Vol. Wasser-Bindemittel-Verhältnis V_W/V_{BM} der untersuchten Betone in Abhängigkeit von λ_{Refl} . (links) und unterschiedliche Charakteristika der zeitlichen Verläufe der Wasserabsonderung (rechts)

Es können folgende Kriterien zur bildbasierten Bewertung der Wasserabsonderung im Rahmen der Konsistenzprüfung definiert werden:

$$\begin{array}{l}
 V_W/V_{BM} \geq 1,60 \rightarrow \text{Char. A} \rightarrow \text{Bewertung möglich} \\
 V_W/V_{BM} < 1,60 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} m_{t_0-t_{30}} > 0 \rightarrow \text{Char. A} \rightarrow \text{Bewertung möglich} \\ m_{t_0-t_{30}} = 0 \rightarrow \text{Char. B} \rightarrow \text{Bewertung nicht möglich} \end{array} \right\}
 \end{array}$$

Hierin beschreibt V_W/V_{BM} das volumetrische Wasser-Bindemittel-Verhältnis. Die Einstufung einer möglichen Bewertung erfolgt mit der Geradensteigung ($m_{t_0-t_{30}}$) der zeitlichen Wasserabsonderung im Zeitraum von 0 bis 30 Minuten nach Verdichtung des Betonprobe. In Abhängigkeit der Geradensteigung in diesem Zeitabschnitt erfolgt darüber hinaus eine Bewertung der Charakteristik der Wasserabsonderung, vgl. Abbildung 5.73.

5.5 Zusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen zeigen deutlich, dass eine zielsichere digitale Erfassung und Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften mit der bildbasierten Methodik im Rahmen der Konsistenzprüfung möglich ist. Als (Oberflächen-)Eigenschaften des ausgebreiteten Frischbetons eignen sich sowohl 3D-Oberflächenkennwerte (extrahiert aus Mehrbildaufnahmen) sowie geometrische 2D-Eigenschaften als auch die Oberflächenreflexion (extrahiert aus einer Einzelaufnahme). Anhand der unterschiedlichen Eigenschaften können eine Vielzahl betontechnologischer Eigenschaften und Parameter (z. B. Konsistenz, Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung oder Leimgehalt) bewertet werden. Zur Bewertung einzelner Eigenschaften sind darüber hinaus zuvor festgelegte bzw. ermittelte Soll-Werte (z. B. in der Erstprüfung) notwendig. Im Rahmen der Konsistenzprüfung ist dann ein Soll-Ist-Vergleich einzelner Qualitätsmerkmale am Frischbeton möglich. Abweichungen, z. B. im Wassergehalt, können so zielsicher detektiert werden. Festzuhalten ist, dass mit der bildbasierten Methodik eine Auswertung der Eigenschaften nahezu in Echtzeit möglich ist. So können sogar (Frisch-)Betoneigenschaften, wie die Wasserabsonderung, die erst zeitlich versetzt einsetzt, zielsicher vor dem Frischbetoneinbau auf der Baustelle abgeschätzt werden.

Wie zuvor beschrieben, können mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten bildbasierten Methodik eine Vielzahl von Oberflächeneigenschaften bzw. Kennwerte am ausgebreiteten Frischbeton ermittelt werden. Anhand dieser ist dann eine digitale Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften möglich. Die Bewertung einzelner Eigenschaften erfolgt dabei teilweise unter Berücksichtigung mehrerer bildbasiert ermittelter Kennwerte. Abbildung 5.74 gibt einen Überblick der Zusammenhänge der einzelnen Input-Größen (bildbasierte Kennwerte) und den Output-Größen ((Frisch-)Betoneigenschaften). Es sind die einzelnen Beziehungen zwischen den einzelnen Kennwerten und den Eigenschaften gekennzeichnet (schwarze Pfeile). Deutlich ersichtlich wird dadurch die Komplexität zur Ermittlung der einzelnen Eigenschaften. Unter Berücksichtigung des breiten Eigenschaftsspektrums ist durch Anwendung der bildbasierten Methodik im Rahmen der Konsistenzprüfung nicht nur die Feststellung etwaiger Abweichungen möglich, eine ergänzende Ermittlung möglicher Ursachen ist so auch möglich.

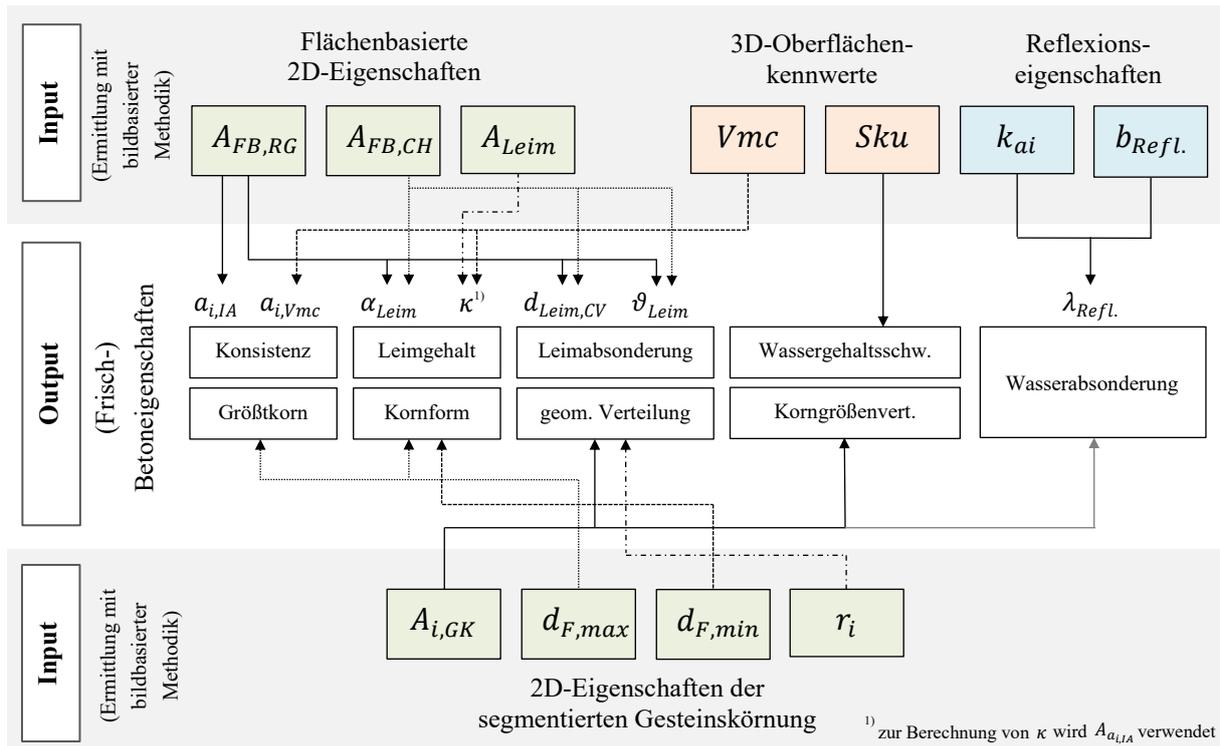


Abbildung 5.74: Überblick der Zusammenhänge der einzelnen Input-Größen (bildbasierte Kennwerte) und den Output-Größen ((Frisch-)Betoneigenschaften)

Nachfolgend werden die wesentlichsten Erkenntnisse zur digitalen Ermittlung und Bewertung einzelner Eigenschaften mittels der bildbasierten Frischbetonprüfung zusammengefasst. Dabei wird die chronologische Reihenfolge aus Kapitel 5 beibehalten.

Konsistenz

- Eine zielsichere Ermittlung des Ausbreitmaßes ist bildbasiert über den gesamten Konsistenzbereich von F2 bis F6 möglich.

Leimgehalt

- Flächenbasierte Eigenschaften der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons – Gesamtfläche des Frischbetons ($A_{FB,RG}$) und die Fläche der groben Gesteinskörnung ($A_{GK \geq 4mm}$) – können zur Abschätzung des Leimanteils der Betonzusammensetzung genutzt werden.
- Der Oberflächenkennwert Vmc gestattet eine Abschätzung des Leimgehalts bei Betonzusammensetzungen ohne die Zugabe verflüssigender Zusatzmittel in Abhängigkeit des Größtkorns.
- Unter Berücksichtigung der Wirkung verflüssigender Zusatzmittel auf die Oberflächengestalt ist eine Ermittlung des Leimgehaltes in Abhängigkeit der Konsistenzklassen mit der normierten Oberflächentextur κ möglich.

Wassergehaltsschwankungen

- Veränderungen des Oberflächenkennwertes Sk_u erlauben eine relative Bewertung von Schwankungen im Wassergehalt im Rahmen der Konsistenzprüfung. Eine Bewertung ist jedoch nur unter der Voraussetzung möglich, dass der Oberflächenkennwert Sk_{u_0} der Ausgangsbetonzusammensetzung ohne Wassergehaltsschwankung als Soll-Wert bekannt ist.
- Zur Ermittlung spezifischer Zusammenhänge einzelner Betonzusammensetzungen kann der Kennwert Sk_u für die jeweilige Betonzusammensetzung in Vorversuchen kalibriert werden, z. B. im Rahmen der Erstprüfung.

Granulometrische Eigenschaften

- Unabhängig des Größtkorns (8 mm - 32 mm) ist eine bildbasierte Bestimmung der Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung (≥ 4 mm) an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons in allen Bereichen der Regelsieblinien A und B möglich.
- Die Ermittlung einer geometrischen Verteilung der Gesteinskörner an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons ist bildbasiert möglich, so dass z. B. Bereiche mit Agglomerationen von groben Gesteinskörnern festgestellt werden können.
- Die Ermittlung längenbasierter Kornformparameter, wie z. B. das Seitenverhältnis ($d_{F,max}/d_{F,min}$), der groben Gesteinskörner ist möglich.

Homogenität

- Die bildbasierte Methodik ermöglicht die Ermittlung des prozentualen Anteils der Leimabsonderung im Randbereich gegenüber dem ausgebreiteten zusammenhängenden Frischbeton.
- Eine (relative) Abschätzung der Wasserabsonderung des Frischbetons kann über die Reflexionseigenschaften der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons mit dem Kennwert λ_{RefL} erfolgen.
- Für Betonzusammensetzungen, die eine unmittelbare Wasserabsonderung nach der Verarbeitung bzw. Verdichtung an der Oberfläche des Frischbetons zeigen, ist die Methodik zielsicher anwendbar.

Kapitel 6

Anwendung der bildbasierten Frischbetonprüfung in der praktischen Betontechnologie

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten zur Anwendung der bildbasierten Frischbetonprüfung in der praktischen Betontechnologie diskutiert. Im Vordergrund steht dabei die Einbindung der Methodik in die Identitätsprüfung des Frischbetons auf der Baustelle. Abschließend wird die praktische Umsetzung der bildbasierten Frischbetonprüfung anhand einzelner Beispieluntersuchungen unter praktischen Randbedingungen aufgezeigt.

6.1 Allgemeines

In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, dass eine digitale Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften mittels der bildbasierten Methodik im Rahmen der Konsistenzprüfung möglich ist. Als Oberflächeneigenschaften des ausgebreiteten Frischbetons eignen sich sowohl 3D-Oberflächenkennwerte (extrahiert aus Mehrbildaufnahmen) als auch geometrische 2D-Eigenschaften sowie Reflexionseigenschaften (extrahiert aus einer Einzelaufnahme).

Das bauausführende Unternehmen muss bei der Herstellung von Betonbauwerken die Ausführung in Übereinstimmung mit der *DIN EN 13670* bzw. der *DIN 1045-3* sicherstellen. Als Grundlage wird in den Richtlinien eine mehrstufige Vorgehensweise formuliert (vgl. Kapitel 2.1). Dabei beinhaltet die Identitätsprüfung des Frischbetons auf der Baustelle grundsätzlich die Prüfung des Lieferscheins. Darüber hinaus ist unter anderem eine optische Beurteilung des Frischbetons sowie die Charakterisierung der Konsistenz mittels normativen Prüfverfahren (z. B. Ausbreitmaß gemäß *DIN EN 12350-5*) beim ersten Einbringen einer Betonzusammensetzung notwendig.

6.2 Bildbasierte Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften

Abbildung 6.1 gibt einen schematischen Überblick zur Vorgehensweise einer digitalen Bewertung der (Frisch-)Betoneigenschaften im Rahmen der Identitätsprüfung. Die Ausbreitmaßprüfung stellt dabei die Basis dar. Im Anschluss daran können mit der entwickelten bildbasierten

Methodik unterschiedliche Oberflächeneigenschaften (2D-Eigenschaften, 3D-Oberflächenkennwerte, Oberflächenreflexion) ermittelt und darüber maßgebende (Frisch-) Betoneigenschaften digital bewertet werden. So lassen sich z. B. das Ausbreitmaß oder die Korngrößenverteilung direkt aus einem Bild zielsicher ermitteln. Zur Bewertung des Leimgehaltes sind mehrere Bilder notwendig, da mit photogrammetrischen Messprinzipien ein 3D-Oberflächenmodell des Frischbetons berechnet werden muss. Weitere Eigenschaften können dagegen nur mit weiteren Eingangsdaten, z. B. Soll-Werte aus der Erstprüfung oder dem Abgleich mit den Einwaage-Daten des Bindemittels, präzise bewertet werden. So können z. B. Wassergehaltsschwankungen bildbasiert über den 3D-Kennwert Sk_u infolge einer vorherigen Kalibrierung des Kennwertes für den spezifischen Beton mit hoher Präzision detektiert werden. In der Gesamtheit ergeben sich so mit der bildbasierten Methodik im Rahmen der Identitätsprüfung neue Möglichkeiten einer vollumfänglichen digitalen Bewertung der (Frisch-)Beton-eigenschaften vor dem Einbau des Frischbetons. Darüber hinaus ist somit eine deutlich effektivere und unmittelbare Anpassung festgestellter Abweichungen in Zusammenarbeit mit dem Betonhersteller bei der Frischbetonherstellung möglich (diese Schnittstelle wird detailliert in Kapitel 7 beschrieben).

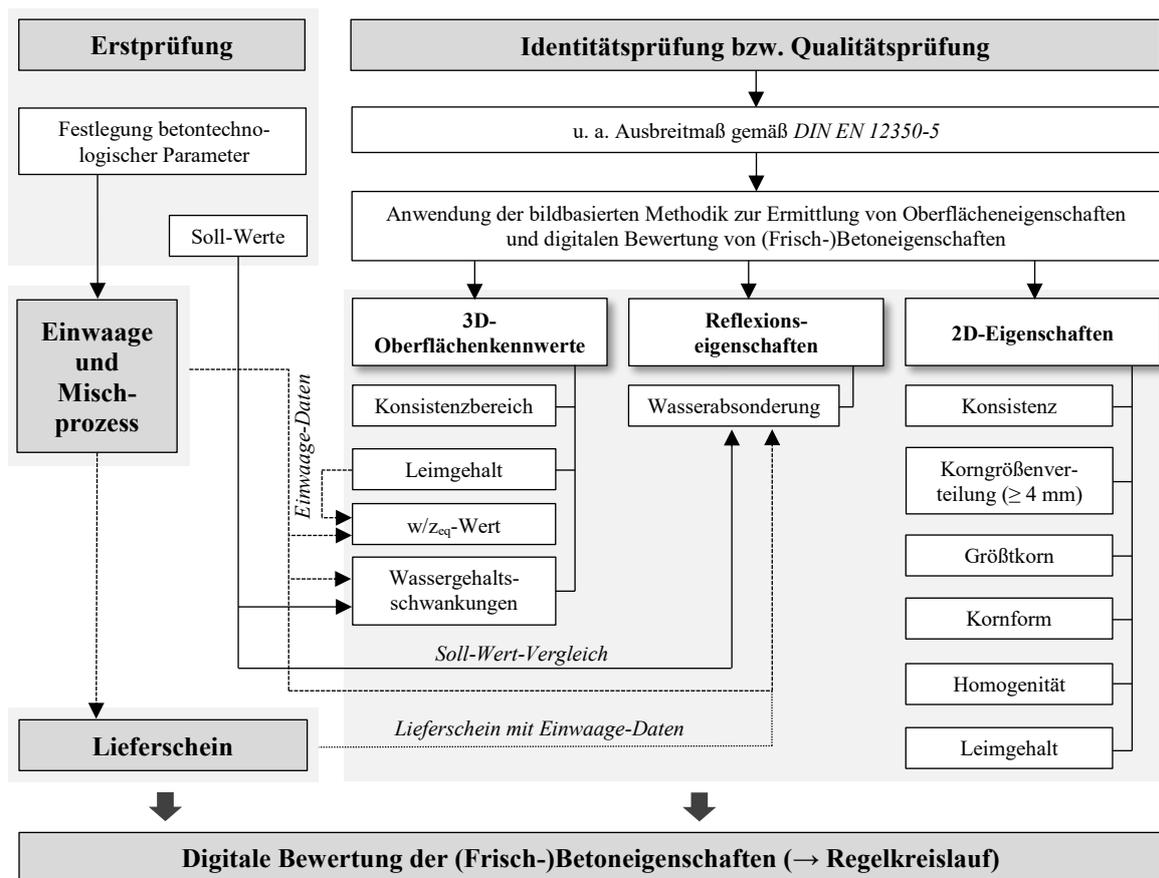


Abbildung 6.1: Überblick zur Vorgehensweise für eine bildbasierte bzw. digitale Bewertung von (Frisch-) Betoneigenschaften

Der bereits angesprochene Bedarf an weiteren Informationen neben den Bilddaten zur präzisen und vollumfänglichen Bewertung einzelner (Frisch-)Betoneigenschaften ist in Abbildung 6.2 schematisch zusammengefasst. Daraus wird ersichtlich, dass die Mehrzahl der Eigenschaften bereits mit einer Einzelbildaufnahme digital bewertbar ist. Wie bereits beschrieben, sind z. B. zur präzisen Bewertung von Wassergehaltsschwankungen Soll-Werte der Ausgangsbetonzusammensetzung, z. B. aus der Erstprüfung, notwendig.

Zur präzisen Bewertung der Wasserabsonderung anhand der Oberflächenreflexion sind dagegen u. a. Daten zu den Massen des Bindemittels aus dem Einwaage-Protokoll hilfreich. Darüber hinaus kann auch hier eine vorherige Kalibrierung des Kennwertes λ_{RefL} für eine spezifische Betonzusammensetzung im Rahmen der Erstprüfung die Präzision der Methodik signifikant erhöhen.

Eine gewisse Sonderrolle nimmt die Ermittlung des w/z_{eq} -Wertes ein. Dieser kann mit dem bildbasiert ermittelten Leimgehalt LG_{IA} und den Einwaage-Daten des Bindemittels (und ggf. der Gesteinskörnung) berechnet werden.

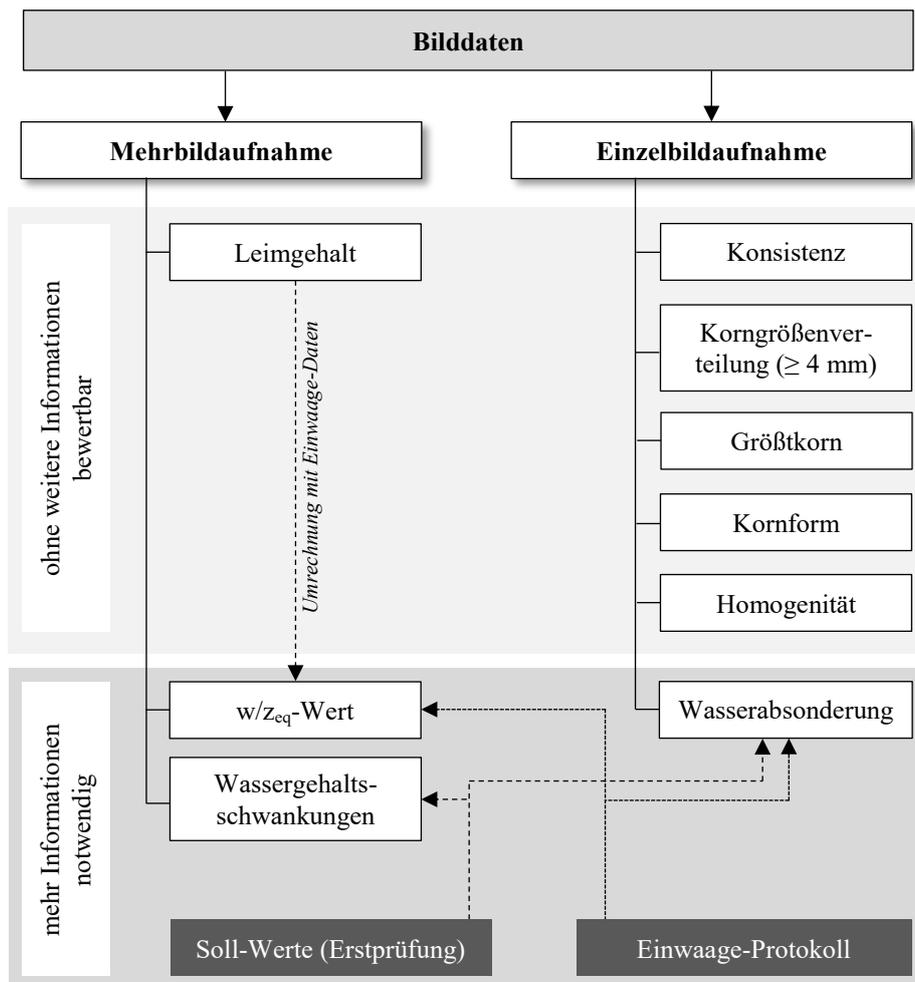


Abbildung 6.2: Daten- und Informationsbedarf zur präzisen und vollumfänglichen Bewertung der (Frisch-) Betoneigenschaften mit der entwickelten bildbasierten Methodik

6.3 Praktische Anwendung

Zur Verifizierung der in Abbildung 6.1 vorgestellten Methodik wurden vereinzelte Untersuchungen unter baustellenpraktischen Randbedingungen durchgeführt. Die Untersuchungen fanden dazu in einem Transportbetonwerk an Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichsten Eigenschaften statt. Es wurden sowohl Betonzusammensetzungen mit unterschiedlichen Druckfestigkeits- und maßgebenden Expositionsklassen als auch variierender Korngrößenverteilung und variierenden Größtkorn untersucht. Darüber hinaus wurde punktuell der Einfluss von Luftporenbildner untersucht. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick zu den Frisch- und Festbetoneigenschaften der untersuchten Betone.

Tabelle 6.1: Überblick über die Frisch- und Festbetoneigenschaften der untersuchten Betone unter baustellenpraktischen Randbedingungen

Bezeichnung	Exp.-Klassen	Ausbreitmaß [cm]	Rohdichte [kg/m ³]	LP [Vol.-%]	Temperatur		f _{c,cube,28d} [N/mm ²]
					Luft [°C]	Beton	
M1-W	XC3	52,5	2,38	n.b.	17,5	20,2	38,8
M2-W	XC4, XF1, XA1	51,0	2,36	n.b.	18,5	20,9	32,1
M3-W	XC4, XF1, XA1	46,5	2,39	n.b.	20,7	22,0	33,8
M4-W	X0	54,5	2,33	n.b.	18,5	20,1	n.b.
M5-W	XC4, XF1, XA1	49,0	2,28	n.b.	17,5	21,2	38,1
M6-W	XC4, XF2, XA1	42,0	2,26	5,9	18,5	22,2	40,0

Die Untersuchungen unter praktischen Randbedingungen dienten insbesondere zur Erfassung und Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Witterungsbedingungen. Dementsprechend erfolgten die Untersuchungen an unterschiedlichen Tagen sowie Tageszeiten mit differierenden Witterungs- und damit Beleuchtungsbedingungen (sonnig, bewölkt etc.).

Einfluss von Witterungsbedingungen

Eine zielsichere Bewertung einzelner Eigenschaften, insbesondere mittels reflexionsbasierter Oberflächeneigenschaften, ist nur bei konstanten Beleuchtungsverhältnissen möglich (vgl. Kapitel 4.9.2). Zur Sicherstellung solch konstanter Beleuchtungsverhältnisse wurde der in Abbildung 4.5 dargestellte Messaufbau mit nahezu lichtundurchlässigen Stoff überzogen. Abbildung 6.3 zeigt dazu zwei ausgebreitete Frischbetone auf dem Ausbreittisch bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen, aufgenommen mit dem konstruierten Messaufbau. Visuell ist eine hinreichende und gleichmäßige Beleuchtung des Frischbetons erkennbar. Es sind die Konturen der groben Gesteinskörnung und zudem keine übermäßigen ungewollten Reflexionen an der Oberfläche ersichtlich.

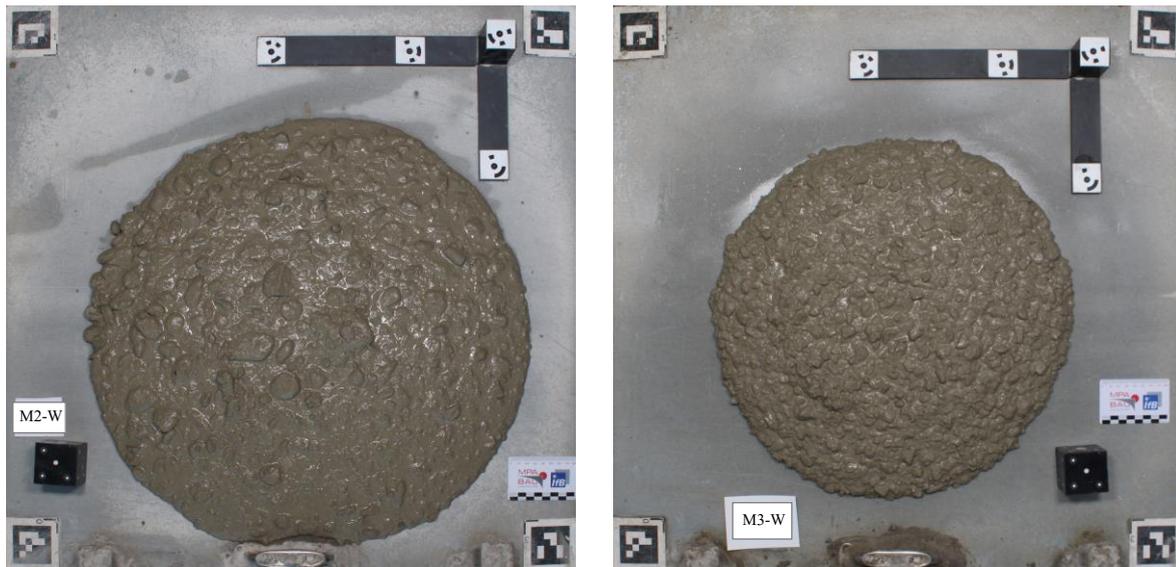


Abbildung 6.3: Ausgebreitete Frischbetone auf dem Ausbreittisch, aufgenommen mit dem konstruierten Messaufbau bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen (M2-W: bewölkt (links) und M3-W: sonnig (rechts))

Zur Überprüfung des visuellen Eindrucks zeigt Tabelle 6.2 die in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen ermittelte Beleuchtungsstärke auf Höhe des ausgebreiteten Frischbetons. Als künstliche Beleuchtung dienten, wie in Kapitel 4.6 beschrieben, ausschließlich die zwei installierten LED-Strahler mit einer Farbtemperatur von 4800 K.

Tabelle 6.2: Beleuchtungsstärke im konstruierten Messaufbau in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen

Bezeichnung	M1-W	M2-W	M3-W	Labor
Witterungsbedingungen	stark bewölkt, leichter Regen	bewölkt	sonnig	-
Beleuchtungsstärke [Lux]	472	521	602	400-420

M4-W, M5-W, M6-W: vergleichbare Bedingungen wie bei M2-W mit vergleichbaren Beleuchtungsstärken

Tendenziell ist ersichtlich, dass unter praktischen Randbedingungen eine geringfügig erhöhte Beleuchtungsstärke gegenüber den Laborbedingungen vorliegt, die zudem in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen leichten Veränderungen unterliegt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Als Vergleichsgrößen sind dazu gemessene Beleuchtungsstärken bei natürlichen Witterungsbedingungen ohne den konstruierten Messaufbau und damit ohne die resultierende Abschirmung eingetragen. Unter Berücksichtigung dieser Beleuchtungsstärken kann angenommen werden, dass der konstruierte Messaufbau konstante Beleuchtungsverhältnisse, auch unter praktischen Randbedingungen, sicherstellt. Diese konstanten Beleuchtungsverhältnisse sind insbesondere zur Bewertung der Oberflächenreflexion und demnach für eine bildbasierte Bewertung der Wasserabsonderung (vgl. Kapitel 5.4.6.2) entscheidend. Folglich scheint auch eine Bewertung dieser Eigenschaften unter praktischen Randbedingungen mit der entwickelten Messmethodik möglich zu sein.

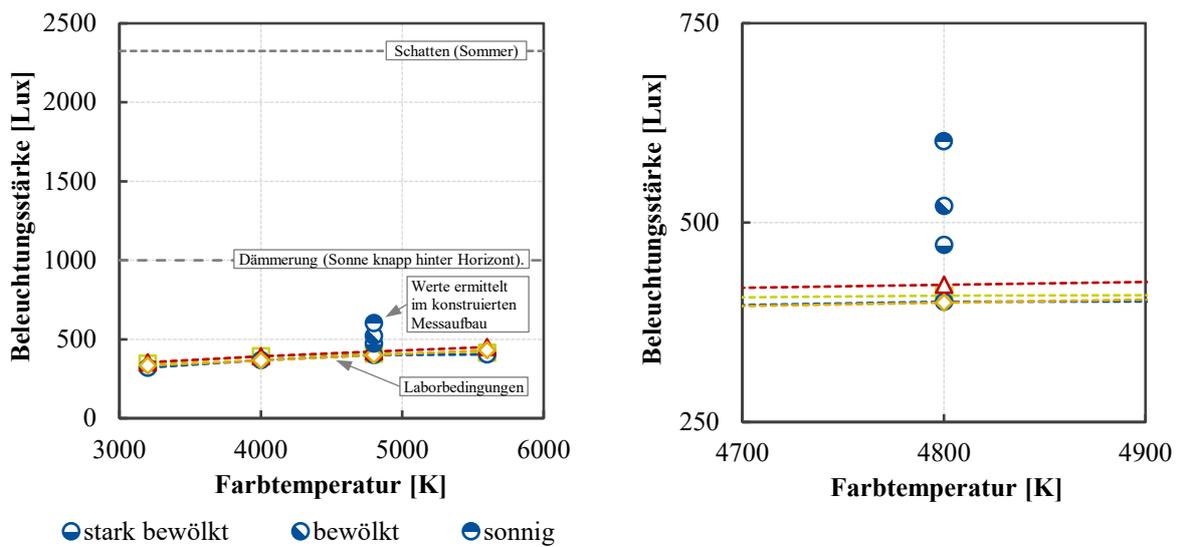


Abbildung 6.4: Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Farbtemperatur im konstruierten Messaufbau unter Berücksichtigung natürlicher Witterungsbedingungen - zusätzliche Kennzeichnung ermittelter Beleuchtungsstärken infolge natürlicher Witterungsbedingungen ohne den konstruierten Messaufbau

Einen Einfluss auf die 3D-Rekonstruktion der Oberfläche scheinen die geringfügigen Veränderungen der Beleuchtungsverhältnisse nicht zu besitzen. Abbildung 6.5 zeigt dazu beispielhaft 3D-Oberflächenmodelle von zwei ausgebreiteten Frischbetonen (M2-W und M3-W). Die Oberflächengestalt kann visuell gut wahrgenommen werden. Eine Abnahme der Genauigkeit gegenüber den unter Laborbedingungen ermittelten 3D-Oberflächenmodelle ist nicht festzustellen, vgl. Abbildung 5.7.

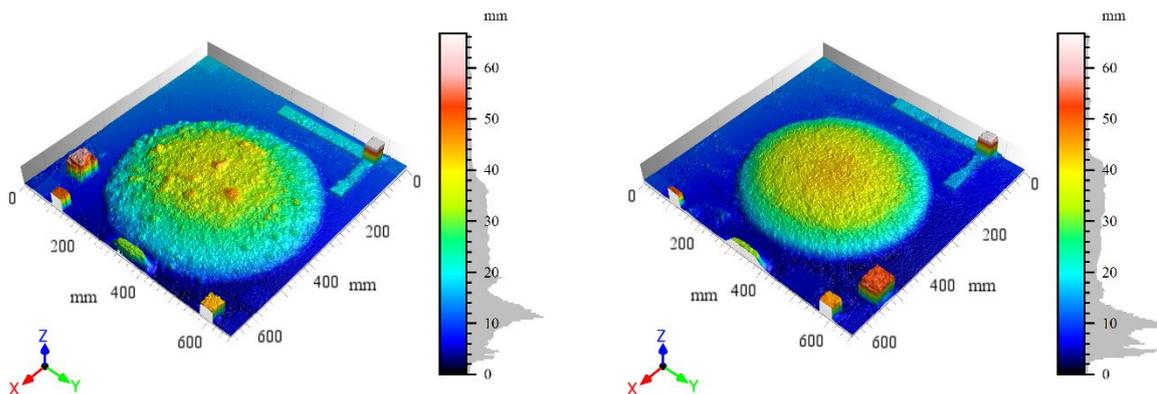


Abbildung 6.5: 3D-Oberflächenmodelle der ausgebreiteten Frischbetone - M2-W (links) und M3-W (rechts)

Konsistenz

Abbildung 6.6 zeigt eine Gegenüberstellung der Ausbreitmaße zum einen bildbasiert und zum anderen manuell gemäß *DIN EN 12350-5* ermittelt. Die bildbasierte Ermittlung erfolgte sowohl mit 2D-Eigenschaften (vgl. Kapitel 5.4.2.1) als auch mittels des Oberflächenkennwertes V_{mc} (vgl. Kapitel 5.4.2.2).

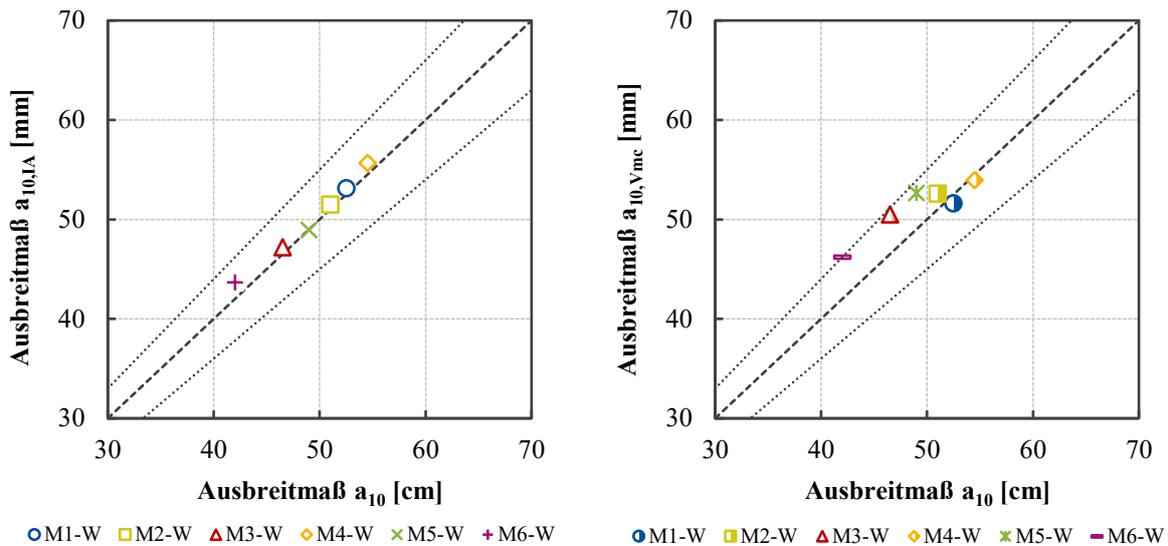


Abbildung 6.6: Gegenüberstellung der Ausbreitmaße zum einen mittels bildbasierter Methodik ($a_{10,IA}$ bzw. $a_{10,Vmc}$) und zum anderen manuell (a_{10}) gemäß DIN EN 12350-5 bestimmt - links: $a_{10,IA}$ (vgl. Kapitel 5.4.2.1) und rechts: $a_{10,Vmc}$ (vgl. Kapitel 5.4.2.2)

Bei der Ermittlung mittels 2D-Eigenschaften ($a_{10,IA}$) ist eine sehr hohe Übereinstimmung der Ausbreitmaße zwischen den unterschiedlichen Ermittlungsmethoden feststellbar. Die Ermittlung des Ausbreitmaßes mittels der *Vmc*-Methode zeigt dagegen etwas größere Abweichungen gegenüber der Referenzmethode. Die Konsistenz der Betone mit einem Größtkorn von 32 mm (M1-W, M2-W und M4-W) ist dabei mittels *Vmc* zielsicher ermittelbar. Stärkere Abweichungen sind dagegen bei den Betonzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 8 mm und 16 mm festzustellen. Dabei findet eine Überschätzung bei der Ermittlung des Ausbreitmaßes mittels dem Oberflächenkennwert *Vmc* statt. Die Abweichungen betragen nicht mehr als 10 %. Folglich resultieren die Abweichungen aus der feineren Oberflächentextur mit sinkenden Größtkorn und nicht durch die Beleuchtungsverhältnisse unter baustellenpraktischen Verhältnissen.

Korngrößenverteilung

Abbildung 6.7 zeigt die Korngrößenverteilung der untersuchten Betonzusammensetzungen sowohl ermittelt mit mechanischer Siebanalyse als auch mit digitaler Bildanalyse (vgl. Kapitel 5.4.5.2). Die mechanische Siebanalyse erfolgte an der identischen Probenmenge des ausgebreiteten Frischbetons infolge nachträglichem Auswaschen der groben Gesteinskörnung (≥ 4 mm) und Ermittlung von deren Korngrößenverteilung. Zur Berechnung der bildbasierten Korngrößenverteilung wurde Gl. 31 angewendet und als Sieb-Lochweite der minimale Feret-Durchmesser angenommen (vgl. Kapitel 5.4.5.2).

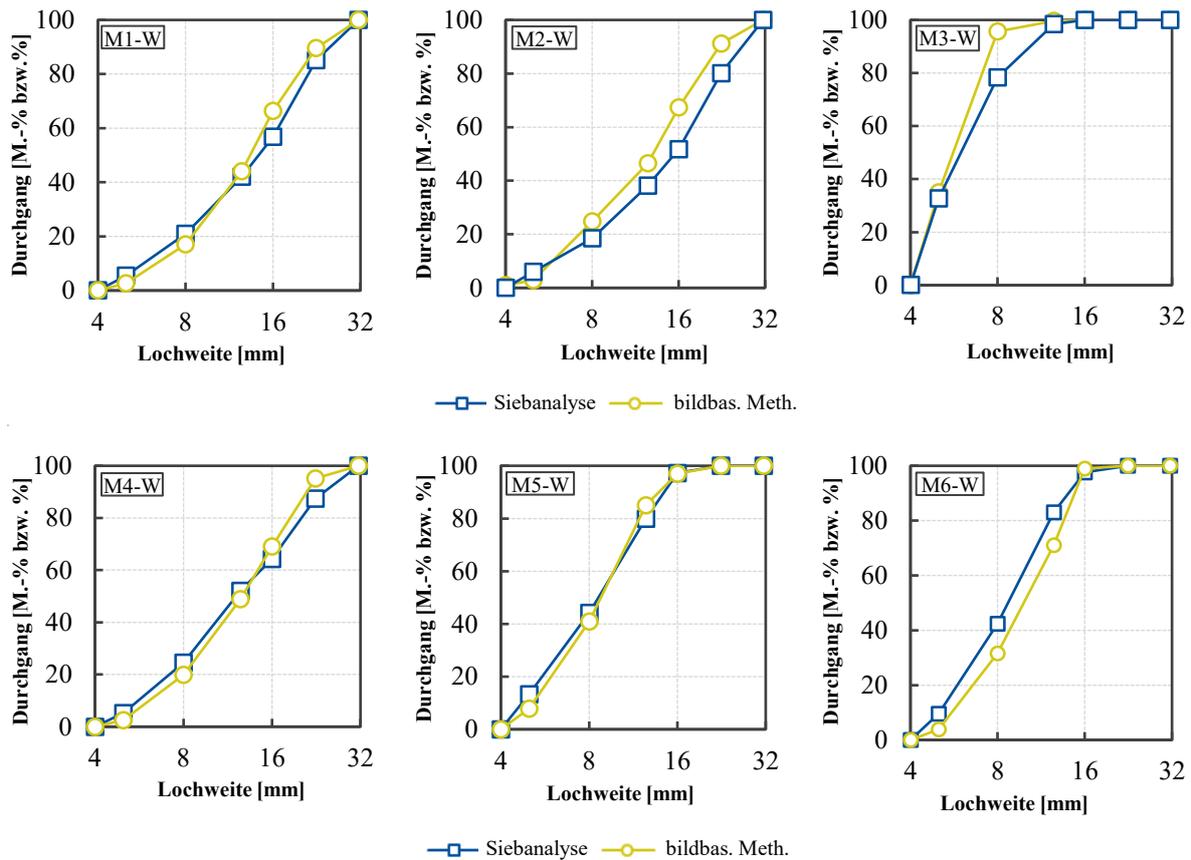


Abbildung 6.7: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung (≥ 4 mm) der untersuchten Betonzusammensetzungen in Abhängigkeit der Ermittlungsmethode – mechanische Siebanalyse und bildbasierte Methodik

Zwischen den unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Korngrößenverteilung ist eine sehr hohe Übereinstimmung feststellbar. Bis auf minimale Unterschiede weisen die Korngrößenverteilungen unabhängig von der Methode vergleichbare Durchgangssummen auf. Dabei muss beachtet werden, dass bei der mechanischen Siebung die Ermittlung der Durchgänge in Massen-% und bei der bildbasierten Ermittlung prozentual in Abhängigkeit der Gesamtfläche der 2D-Projektionen der einzelnen Gesteinskörner erfolgt.

Größtkorn

Abbildung 6.8 stellt zu den entsprechenden Korngrößenverteilungen das bildbasiert ermittelte Größtkorn dar. Zur Auswertung wurde der Mittelwert der letzten 5,0 % der aufsteigend sortierten maximalen Feret-Durchmesser herangezogen. Bei den Betonzusammensetzungen mit einem theoretischen Größtkorn von 32 mm (M1-W, M2-W und M4-W) kann eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen der bildbasierten Ermittlung und dem theoretischen Größtkorn festgestellt werden. Die bildbasierte Auswertung führt dagegen bei der Betonzusammensetzung mit einem Größtkorn von 8 mm (M3-W) zu einem deutlich größeren Größtkorn-Durchmesser von 14,7 cm. Das Ergebnis bestätigt die in Kapitel 5.4.5.4 bildbasierten ermittelten Größtkorn-Durchmesser von Betonzusammensetzungen mit theoretischem Größtkorn von 8 mm unter Laborbedingungen. So konnte auch dort bei der Auswertung der reinen Gesteinskörnung ein

erhöhter Größtkorn-Durchmesser von etwa 14 mm festgestellt werden. Die Betonzusammensetzungen mit einem theoretischen Größtkorn von 16 mm zeigen ebenfalls eine geringfügige Überschätzung des Größtkorns bei der bildbasierten Ermittlung. Mögliche Ursachen dazu sind Kapitel 5.4.5.4 aufgeführt.

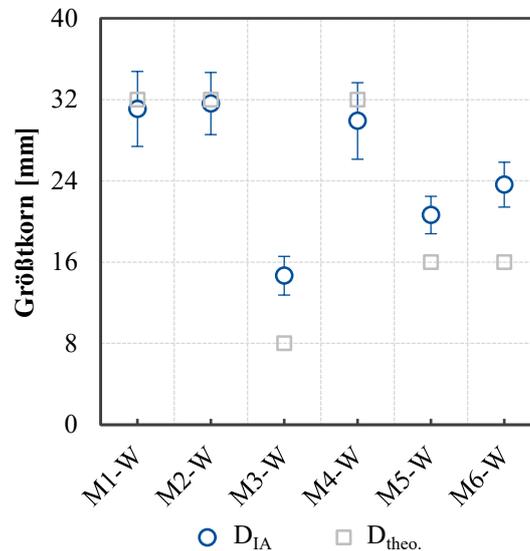


Abbildung 6.8: Bildbasiertes und theoretisches Größtkorn der untersuchten Betonzusammensetzungen

Neigung zur Wasserabsonderung

Abbildung 6.9 zeigt den Zusammenhang zwischen der maximalen abgesonderten Wassermenge und dem Parameter λ_{RefL} der Betone M2-W und M3-W. Die Wasserabsonderung wurde in Anlehnung an (DBV-MB 2014) geprüft, vgl. Kapitel 5.3. Die maximale Wasserabsonderung von 7,7 kg/m³ (M2-W) wurde nach ca. 190 Minuten sowie von 8,9 kg/m³ (M3-W) nach ca. 200 Minuten erreicht.

Unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Werte der maximalen Wasserabsonderung im Eimerverfahren ist ersichtlich, dass mit dem Parameter λ_{RefL} eine Abschätzung der maximalen Wasserabsonderung im Rahmen der Konsistenzprüfung in vergleichbarer Größenordnung möglich ist. Über die Ermittlung der Oberflächenreflexion des ausgebreiteten Frischbetons ist so demzufolge eine Abschätzung der zeitabhängigen Wasserabsonderung der Betonzusammensetzungen bereits vor der Frischbetonverarbeitung möglich.

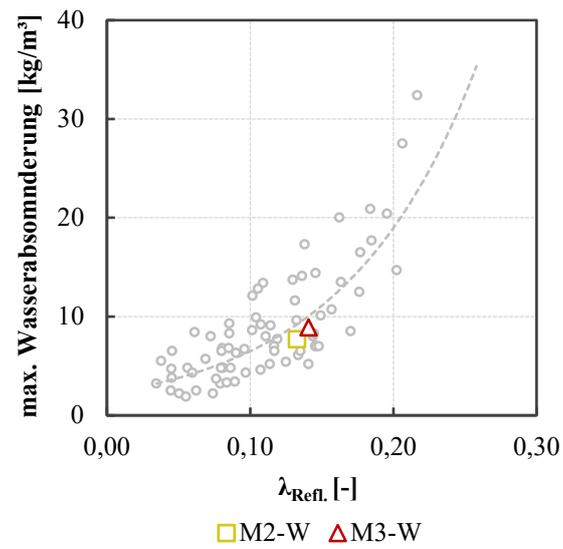


Abbildung 6.9: Abschätzung der max. Wasserabsonderung mittels $\lambda_{Ref.}$ im Rahmen der Konsistenzprüfung der Betonzusammensetzungen M2-W und M3-W

Kapitel 7

Konzept zur digitalen Qualitätsregelung von Frischbeton

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die Entwicklung und Anwendung der bildbasierten Methodik zur digitalen Bewertung einzelner (Frisch-)Betoneigenschaften im Vordergrund stand, soll darauf aufbauend in diesem Kapitel ein Konzept zur digitalen Qualitätsregelung bei der Frischbetonherstellung und -verarbeitung abgeleitet werden. Dies erfolgt durch die Einführung eines Qualitätsregelkreises unter Berücksichtigung der Grundbegriffe der Regelungstechnik technischer Prozesse. In einem ersten Schritt werden dazu die Grundbegriffe der Qualitätsregelung und Qualitätsregelkreise erläutert. Darauf aufbauend wird die praktische Relevanz der entwickelten bildbasierten Methodik zur Bewertung der Qualitätsmerkmale des Frischbetons durch die Einführung eines angepassten Qualitätsregelkreises aufgezeigt.

7.1 Grundbegriffe der Qualitätsregelung

Die wesentlichen Elemente des Qualitätsbegriffs wurden bereits in Kapitel 2.1 beschrieben. Zu der Begrifflichkeit ‚Qualitätsregelung‘ sind in der Literatur bisher keine spezifischen Definitionen vorhanden. Nachfolgend soll die Qualitätsregelung anhand der klassischen Regelungstechnik näher erläutert. Die Qualitätsprüfung soll mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten bildbasierten Methodik zu einer Qualitätsregelung – hier adaptiert für die Erfordernisse des Betonbaus – erweitert werden.

Zur Beschreibung der Qualitätsregelung technischer Prozesse können die Grundbegriffe der Regelungstechnik angewendet werden. *DIN EN 19226-1* definiert einen Prozess als Gesamtheit von aufeinander wirkenden Vorgängen in einem System, infolgedessen Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder gespeichert werden.

7.1.1 Steuerung

Eine Steuerung ist gemäß *DIN 19226-1* dadurch gekennzeichnet, dass die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht erneut über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken (offener Wirkungsablauf). Dabei werden externe Sollwerte (Führungsgrößen) in das lenkende System (Steuereinrichtung) übergeben, welches daraufhin Informationen (Stellgrößen) in das gelenkte System (Steuerstrecke) weiterleitet. Das Lenkungsergebnis (Steuergrößen) wird dabei nicht berücksichtigt, vgl. Abbildung 7.1. (Bettin 2004; Dörmann Osuna 2008)

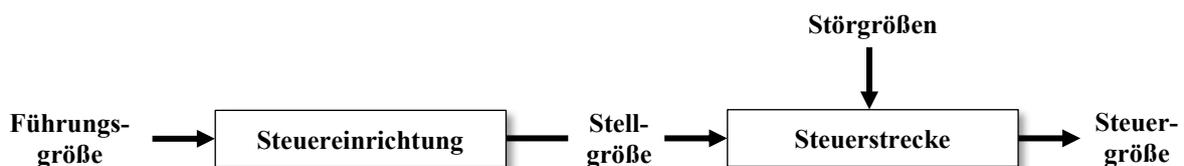


Abbildung 7.1: Steuerung gemäß *DIN 19226-1*

7.1.2 Regelung

DIN 19226-1 beschreibt die Regelung als Vorgang mit fortlaufender Erfassung der Regelgröße und ggf. Angleichung der Führungsgröße. Die Regelung ist durch einen geschlossenen Wirkungskreis gekennzeichnet, bei dem die Regelgröße fortlaufend durch sich selbst beeinflusst wird, vgl. Abbildung 7.2.

Gegenüber der Steuerung unterscheidet sich die Regelung durch die Rückführung der Regelgröße an die Regeleinrichtung. Nach der Regelstrecke können mit Hilfe von Sensoren und Messmethoden die Ausgangssignale erfasst und zur Regeleinrichtung zurückgeführt und mit den Führungsgrößen (Sollwerten) abgeglichen werden. Bei Abweichungen werden die Stellgrößen von der Regeleinrichtung angepasst (Bettin 2004; Dörmann Osuna 2008).

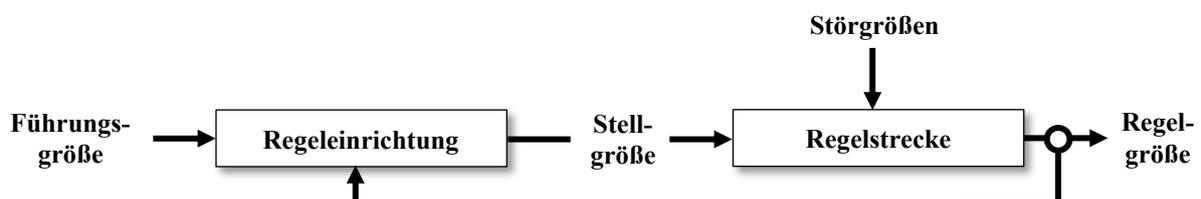


Abbildung 7.2: Regelung gemäß *DIN 19226-1*

BETTIN (2004) beschreibt die folgenden Voraussetzungen für eine Regelung:

- Messmethoden und Sensorik müssen zur Erfassung und Aufbereitung in der Lage sein;
- Anpassungen der Stellgrößen an etwaige Abweichungen zwischen Regel- und Stellgrößen müssen von der Regeleinrichtung ermöglicht und durchgeführt werden.

7.2 Qualitätsregelkreise

Ein Qualitätsregelkreis ist ein technisch und organisatorisch abgeschlossener Wirkungsablauf in einem Prozess zur Herstellung eines Produktes (Linß 2018). Qualitätsregelkreise bieten sich zur Sicherstellung der Soll-Qualität materieller und immaterieller Produkte an. Ganzheitlich betrachtet ist der Herstellungsprozess von Produkten und Dienstleistungen in kleine Qualitätsregelkreise (direkte Qualitätsregelung) und große Qualitätsregelkreise (indirekte Qualitätsregelung) zu unterteilen (Linß 2018). Große Qualitätsregelkreise nehmen indirekt Einfluss auf die Qualitätsmerkmale zukünftig herzustellender Produkte, da die Prüfung und Qualitätsbestätigung im Nachgang stattfinden. Die Qualitätsprüfung im Betonbau ist daher eher dem zweiten Typ zuzuordnen.

Darüber hinaus gliedert PFEIFER (2001) Qualitätsregelkreise in vier Typen – maschineninterne und maschinennahe Regelkreise sowie ebeneninterne und ebenenübergreifende Regelkreise. Maschinennahe und maschineninterne Qualitätsregelkreise unterscheiden sich in der Erfassung der Regelgröße. Ein maschineninterner Regelkreis erfasst die Regelgröße an der Maschine und führt diese direkt zur Regeleinrichtung zurück. Maschinennahe Regelkreise erfassen die Regelgröße erst nach Verlassen des Prozesses infolge externer Messmethoden. Daraus resultierend können ggf. prozessoptimierende Maßnahmen eingeleitet werden (Dörmann Osuna 2008).

Des Weiteren unterscheidet BETTIN (2004) Qualitätsregelkreise in Abhängigkeit der Richtung der Informationsverarbeitung in vorwärts- und rückwärtsverkettete Regelkreise. Im vorwärtsverketteten Qualitätsregelkreis werden Informationen an nachfolgende Prozessschritte weitergeleitet, sodass auch Änderungen am derzeit hergestellten Produkt vorgenommen werden können. Rückwärtsverkettete Regelkreise erkennen Prozessabweichungen vorheriger Prozessstufen erst nach Fertigstellung dieser Stufen. Anpassungen betreffen somit nicht das aktuell produzierte Produkt. Erkannte Qualitätsabweichungen können im rückwärtsverketteten Regelkreis an vorgelagerte Prozessschritte zurückgemeldet werden, sodass entsprechende Maßnahmen zur Wiederherstellung der Soll-Werte initiiert werden können.

Der Aufbau eines Qualitätsregelkreises erfordert die Beachtung vielfältiger Voraussetzungen hinsichtlich Fertigungseinrichtung, Messeinrichtung, Regeleinrichtung und Informationsfluss, vgl. Abbildung 7.3 (Bettin 2004).

Fertigungseinrichtung	Messeinrichtung	Regeleinrichtung	Informationsfluss
<ul style="list-style-type: none"> - Vermeidung planerischer und konstruktiver Störeinflüsse - Beherrscher und fähiger Prozess - Identifizierung von kritischen Parametern - Eingriffsmögl. in den Prozess - Materialflusstechnische Verkettung 	<ul style="list-style-type: none"> - Präzise und schnelle Messsysteme - Robuste Messverfahren - Prozessintegrierte „intelligente“ Sensorik - Datenvorverarbeitung - Kalibrierung - Korrektur 	<ul style="list-style-type: none"> - Schnelle Signalverarbeitung und Bewertung - Leistungsfähige Datenbank als Qualitätssystem - Geeignete Datenverdichtung 	<ul style="list-style-type: none"> - Leistungsfähiges Bussystem - Definierte Schnittstellen zwischen Unternehmensbereichen - Systeme zur Automatisierung des Informationsflusses

Abbildung 7.3: Voraussetzungen zum Aufbau von Qualitätsregelkreisen (Bettin 2004)

Die Bestandteile eines Qualitätsregelkreises lassen sich grundlegend in Analogie zur klassischen Regelungstechnik beschreiben, vgl. Abbildung 7.2. Allerdings sind die Inhalte der Begriffe gegenüber der klassischen Regelungstechnik verschieden. Die Begriffe der klassischen Regelungstechnik können in Zusammenhang mit Qualitätsregelkreisen für Prozessketten bzw. in der Produktion entsprechend beschrieben werden (Bettin 2004):

- | | |
|--------------------|---|
| • Regelstrecke | Prozessschritte |
| • Regeleinrichtung | Methoden des Qualitätsmanagements |
| • Führungsgrößen | Qualitätsforderungen (Soll-Werte) |
| • Stellgrößen | Maßnahmen des Qualitätsmanagements |
| • Regelgröße | Qualitätsmerkmale (Ist-Wert) |
| • Störgrößen | äußerliche Einflüsse ('7M' = Mensch, Maschine, Material, Mitwelt, Methode, Management, Messbarkeit) |

Bei der Übertragbarkeit der Grundbegriffe ist zu beachten, dass in der Fertigungstechnik zumeist eine ganze Abfolge von Prozessen (Prozesskette) bis zur Fertigstellung des Endprodukts durchlaufen wird. Die einzelnen Prozessschritte werden dabei diskret bearbeitet (Stück für Stück). Zur Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessschritten sind verkettete Qualitätsregelkreise erforderlich, vgl. Abbildung 7.4. Folglich können Abweichungen einzelner Prozessergebnisse verursachergerecht rückverfolgt und ursachenbezogen behoben werden.

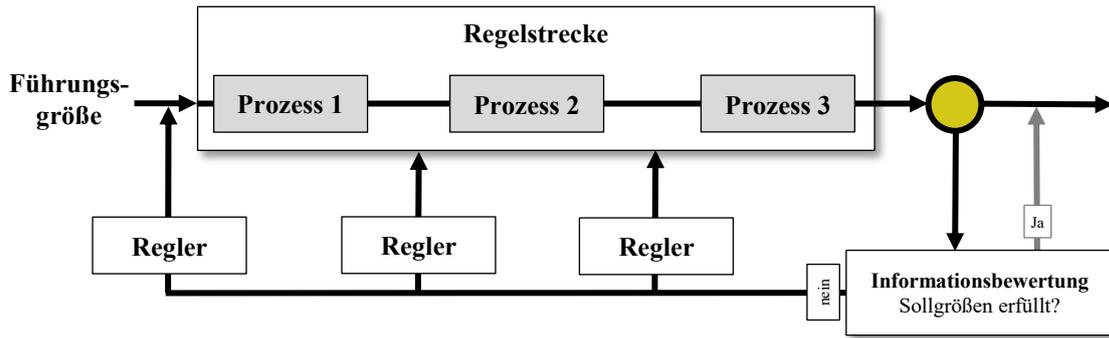


Abbildung 7.4: Qualitätsregelkreis bei Prozessketten (in Anlehnung an (Bettin 2004))

7.3 Regelkreislauf zur Frischbetonherstellung und -verarbeitung

Die Frischbetonproduktion, sowohl bei der Herstellung von Fertigteilen als auch Transportbeton, ist durch einen diskreten Fertigungsprozess charakterisiert. Die Erstellung von Betonbauteilen bzw. -bauwerken erfolgt durch die Herstellung und Verarbeitung einzelner hergestellter und ggf. transportierter Chargen von Frischbeton. Entsprechend der festgelegten Frisch- und Festbetoneigenschaften (z. B. in der Eignungsprüfung) unter Berücksichtigung der zu erfüllenden Expositionsklassen stellen die Eigenschaften der Ausgangsstoffe sowie dessen Wechselwirkungen die Führungsgrößen bei der Frischbetonherstellung dar (Input). Die entsprechenden Qualitätsmerkmale bzw. Regelgrößen muss der Frischbeton nach dem Mischprozess und Transport am Einbauort aufweisen (Output). Zwischen den Führungs- und Regelgrößen besteht eine direkte Abhängigkeit, vgl. Abbildung 7.5. Die Regelstrecke, charakterisiert durch den Mischprozess und den Transport und kann bisher als „Black Box“ eingeordnet werden, da bisher nur eine begrenzte Regelung der Eigenschaften während dieser Phasen möglich ist.

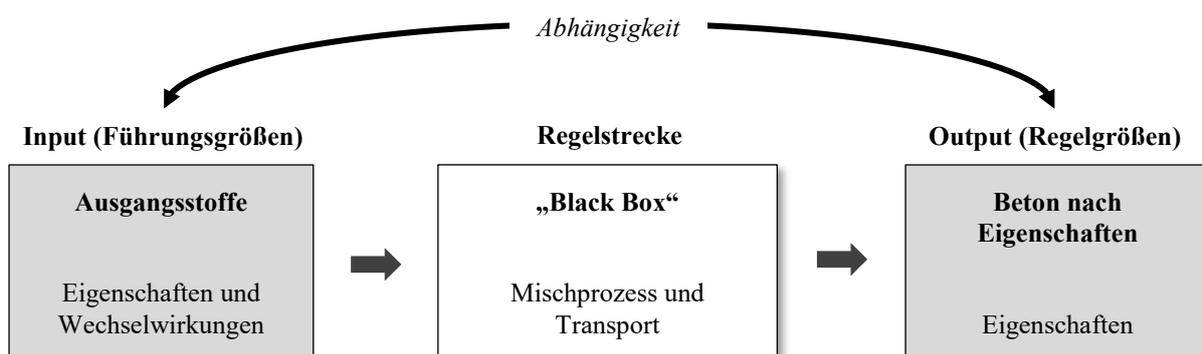


Abbildung 7.5: Abhängigkeit zwischen Input- und Output bei der Frischbetonherstellung

Bauausführende Unternehmen müssen gemäß *DIN EN 13670* infolge einer regelmäßigen Überwachung aller Tätigkeiten die Übereinstimmung ihrer Leistungen mit den geltenden Regelwerken sowie der Projektbeschreibung sicherstellen. Die diskrete Herstellung und der daraus resultierende chargenweise Transport von Frischbeton erlaubt bisher keine vollständige

kontinuierliche Prüfung der gesamten Produktion. Die Beurteilung der Qualitätsmerkmale erfolgt daher an einer begrenzten Anzahl repräsentativer Stichproben, die während des Produktionszyklus entnommen werden. Die diskontinuierliche Beurteilung bedingt sowohl ein Risiko für den Abnehmer, dass Teilmengen mit nicht normgerechten Qualitätsmerkmalen nicht erkannt werden, als auch ein Risiko für den Hersteller, dass normgerechte Teilmengen bei statistischem Nachweis als nicht normkonform eingestuft werden (VDZ 2008). Durch die Wahl eines ausreichenden Stichprobeumfangs und einer zulässigen Annahmewahrscheinlichkeit sollten die Risiken so gering wie technisch sinnvoll und wirtschaftlich vertraglich gehalten werden. Angaben zum Prüfungsaufwand bzw. Stichprobenumfang, sowohl für den Abnehmer als auch für den Hersteller formulieren die *DIN EN 13670* sowie die *DIN 1045-3* in Abhängigkeit der jeweiligen Baumaßnahme (detaillierte Angaben sind in Kapitel 2.1 enthalten). Vereinzelt Prüfmethode, wie z. B. Augenscheinprüfung, lassen eine Erfassung der Qualitätsmerkmale nur als attributive Merkmale bzw. linguistische Ausdrücke zu. Eine direkte digitale Verarbeitung und Einbindung solcher unscharfen Attribute in einen Qualitätsregelkreis ist nicht möglich und bedingt besondere Methoden.

Die bei der Identitäts- bzw. Qualitätsprüfung entnommenen Stichproben repräsentieren die Qualitätsmerkmale der jeweiligen Charge. Demnach werden bei diesem Vorgehen die Regelgrößen des Frischbetons nach Verlassen des Prozesses ermittelt. Eine direkte Rückkopplung der erfassten Merkmalsdaten in den diskreten Produktionsprozess findet bisher jedoch nicht statt, da die Daten zunächst analog erfasst und erst im Anschluss vom Prüfenden weitergeleitet werden können. Verglichen mit den verschiedenen Typen von Qualitätsregelkreisen ähnelt die Erfassung der Qualitätsmerkmale sowohl dem Vorgehen in einem maschinennahen als auch in einem rückwärtsverketteten Regelkreis. Zur Ausbildung eines zeitlich effizienten Regelkreises fehlt die direkte Rückmeldung der Daten an vorgelagerte Prozessschritte.

Die in dieser Arbeit entwickelte bildbasierte Methodik gestattet eine direkte Erfassung und Bewertung von Qualitätsmerkmalen bei der Identitätsprüfung in digitaler Form. Infolgedessen ist durch Anwendung dieser Methodik eine direkte Rückmeldung erkannter Qualitätsabweichungen an vorgelagerte Prozessschritte bzw. ins Herstellwerk möglich, sodass entsprechende Maßnahmen zur Wiederherstellung der Soll-Werte bei der weiteren Produktion initiiert werden können.

Vor dem Hintergrund der Grundlagen der Regelungstechnik lässt sich für die Frischbetonherstellung und -verarbeitung unter Verwendung der in dieser Arbeit angewendeten bildbasierten Methodik der in Abbildung 7.6 dargestellte Qualitätsregelkreislauf ableiten. Der Regelkreis stellt einen rückwärtsverketteten Regelkreislauf dar, da die Erfassung der Qualitätsmerkmale nach den einzelnen Prozessschritten stichprobenartig auf der Baustelle stattfindet und erkannte Qualitätsabweichungen erst durch Wiederherstellung der Soll-Werte bei der weiteren Frischbetonproduktion initiiert werden können.

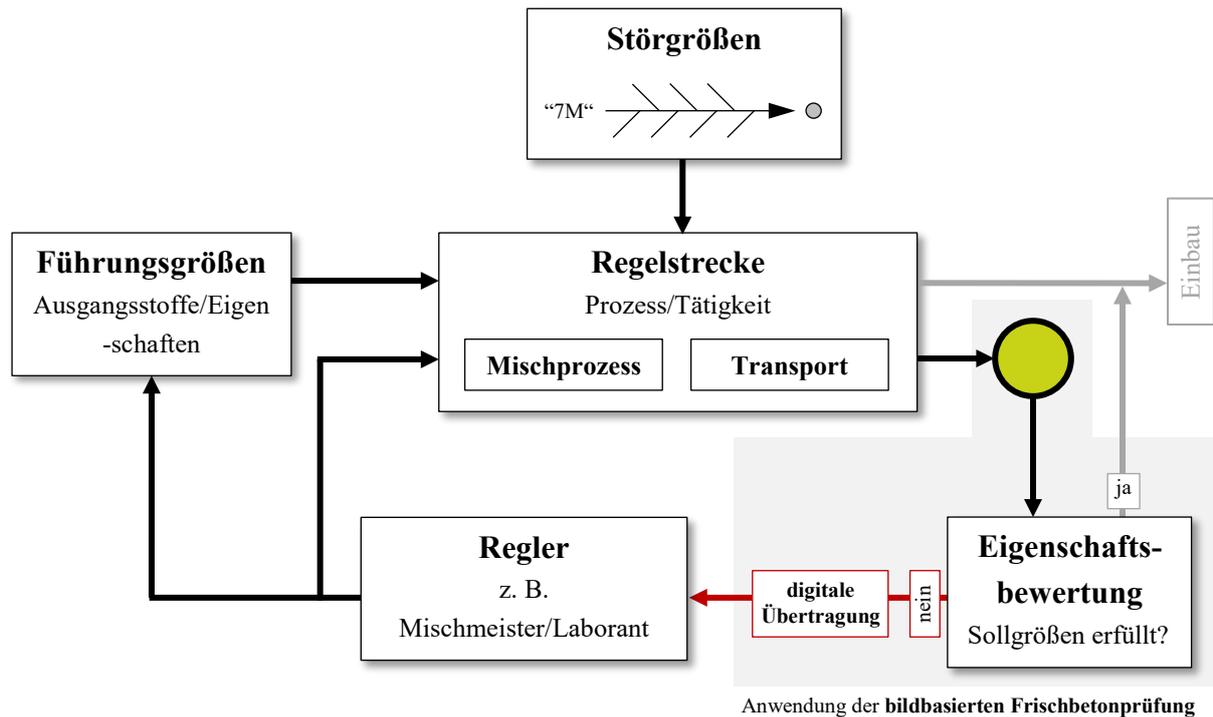


Abbildung 7.6: Qualitätsregelkreislauf zur Frischbetonherstellung und -verarbeitung unter Anwendung der bildbasierten Frischbetonprüfung

Die Regelstrecke bildet in dem Regelkreis die Prozessschritte des Mischens und Transports ab, auf die ggf. Störgrößen („7M“ vgl. Kapitel 7.2) einwirken können. Entsprechend der festgelegten Frisch- und Festbetoneigenschaften unter Berücksichtigung der zu erfüllenden Expositionsklassen werden die Führungsgrößen (Soll-Werte bzw. Ergebnisse der Eignungsprüfungen) in die Regelstrecke als Vorgaben eingegeben. Im Anschluss an die Regelstrecke findet auf der Baustelle eine stichprobenartige Bewertung der Qualitätsmerkmale mittels der entwickelten bildbasierten Methodik bei der Konsistenzprüfung statt. Festgestellte Qualitätsabweichungen können so direkt digital an das Herstellwerk übermittelt werden, sodass der „Regler“ aktiv werden kann und die Regelstrecke durch Anpassung der Führungsgrößen wieder in den gewünschten Zustand zurückgeführt wird. Da bei der Frischbetonherstellung bisher keine Regler für eine automatisierte Ableitung von Veränderungen vorhanden sind, können Anpassungen und Veränderungen der Führungskenngrößen bisher nur manuell vom Personal (Mischmeister oder Laborant) des Herstellwerkes vorgenommen werden. Die Ausprägung der Anpassungen und Korrekturen erfolgt demnach empirisch auf Basis des Fachwissens bzw. der Erfahrung des Personals. Darüber hinaus können Daten, wie z. B. Chargen- und Einwaageprotokolle, zum einen der Regelstrecke (R_{i-1}) als auch vorheriger Regelstrecken (R_{i-n}) des Produktionszyklus genutzt werden. Denkbar ist zur Regelung etwaiger festgestellter Schwankungen zudem die Integration sogenannter Kontrollkartensysteme, wie z. B. Shewhart- oder CUSUM-Kontrollkarten (Caspele und Taerwe 2009; Schmidt et al. 2014; Schmidt und Kühne 2015). Solche Kontrollkartensysteme können zur Optimierung von Produktionsprozessen als effektives und leistungsstarkes Werkzeug eingesetzt werden.

Abbildung 7.7 gibt einen Überblick zur Vorgehensweise bei der Erfassung und Bewertung der Qualitätsmerkmale auf der Baustelle sowie der manuellen Korrektur festgestellter Abweichungen durch das Personal (Mischmeister oder Laborant) im Rahmen des Regelkreislaufes. Die Kommunikation zwischen der Baustelle und dem Transportbetonwerk wird auf digitaler Basis deutlich vereinfacht und beschleunigt. Insbesondere dieser Schritt, der durch Anwendung der bildbasierten Frischbetonprüfung möglich ist, stellt einen entscheidenden Schritt zur Digitalisierung des Produktionszyklus unter Berücksichtigung der Qualitätsmerkmale des Frischbetons dar.

Darüber hinaus bietet die digitale Eigenschaftsbewertung und die resultierende Möglichkeit zur automatisierten Speicherung der (Eigenschafts-)Kennwerte neue Möglichkeiten zum effizienten Qualitätsmanagement bei der Frischbetonherstellung. So ist z. B. eine nahezu lückenlose Dokumentation von Abweichungen der (Frisch-)Betoneigenschaften möglich, die u. a. sowohl zur „ad-hoc“-Anpassung aber auch zur langfristigen Optimierung des Produktionsprozesses genutzt werden können. Darüber hinaus können die erfassten Daten auch in das Lebenszyklusmanagement von Bauwerken integriert werden.

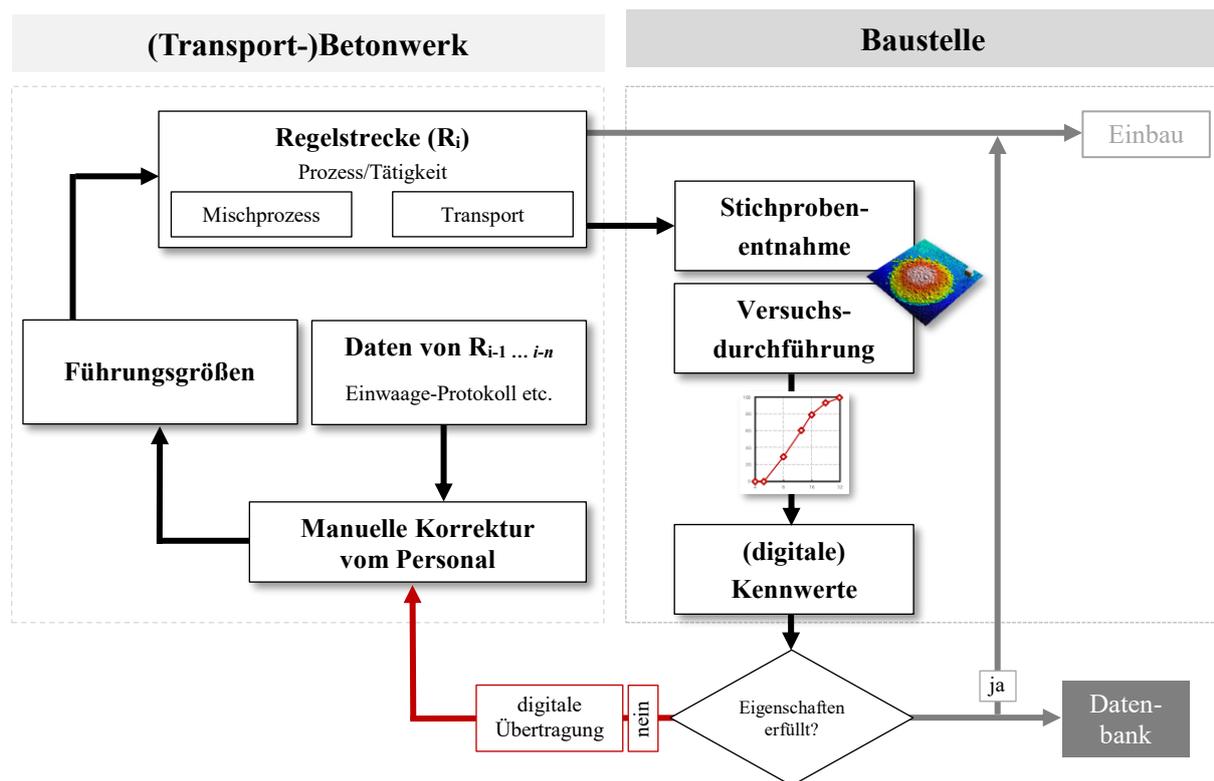


Abbildung 7.7: Qualitätsprüfung sowie manuelle Korrektur im Regelkreislauf zur Frischbetonherstellung unter Anwendung der bildbasierten Frischbetonprüfung

7.4 Anwendungsbeispiel der bildbasierten Frischbetonprüfung im Regelkreislauf

Abbildung 7.8 (links) zeigt die Ergebnisse der Ausbreitmaßprüfung von fünf Betonen. Das Ausbreitmaß der Referenz-Betonzusammensetzung (Ref.) stellt dabei die in der Erstprüfung ermittelten Daten dar (roter Balken). Als Soll-Wert wurde ein weicher Beton der Konsistenzklasse F3 (45 ± 3 cm) angestrebt. Die weiteren Betonzusammensetzungen stehen exemplarisch für die nachfolgende Produktion z. B. im Transportbetonwerk. Demnach wurden die Ergebnisse der Ausbreitmaßprüfung bei der Identitätsprüfung ermittelt. Es ist deutlich ersichtlich, dass eine Mehrzahl der Betone eine erhöhte Konsistenz aufweisen (P1-P3). Einzig der Beton P4 weist eine vergleichbare Konsistenz mit 45,5 cm gegenüber der Erstprüfung auf. Mit dem klassischen Ausbreitmaßversuch können diese Abweichungen der Konsistenz zwar festgestellt werden, eine Ursache dafür ist jedoch nicht direkt ermittelbar. Mit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten bildbasierten Methodik können im Rahmen der Konsistenzprüfung darüber hinaus auch Ursachen für eine solche Konsistenzsteigerung festgestellt werden. Die Integration der Daten in den vorgestellten digitalen Regelkreislauf bietet zudem eine sofortige Anpassung der weiteren Produktion.

Unter Annahme einer im Toleranzbereich von $\pm 3,0\%$ befindlichen Einwaage des Bindemittels können mit der bildbasierten Methodik z. B. mögliche Schwankungen im Wassergehalt untersucht werden. Abbildung 7.8 (rechts) zeigt dazu die $\beta_{W,j}/\beta_0$ -Werte der Betone. Deutlich ersichtlich ist, dass der Beton P1 einen signifikant geringeren $\beta_{W,j}/\beta_0$ -Wert von 0,77 aufweist. Entsprechend der hergeleiteten Kriterien in Kapitel 5.4.4 kann die Konsistenzsteigerung für diesen Beton auf eine erhöhte Dosierung von verflüssigendem Zusatzmittel zurückgeführt werden ($\beta_{W,j}/\beta_0 < 0,90$). Die weiteren Betone zeigen dagegen $\beta_{W,j}/\beta_0$ -Werte $> 0,90$, so dass dort von einer Schwankung im Wassergehalt ausgegangen werden kann.

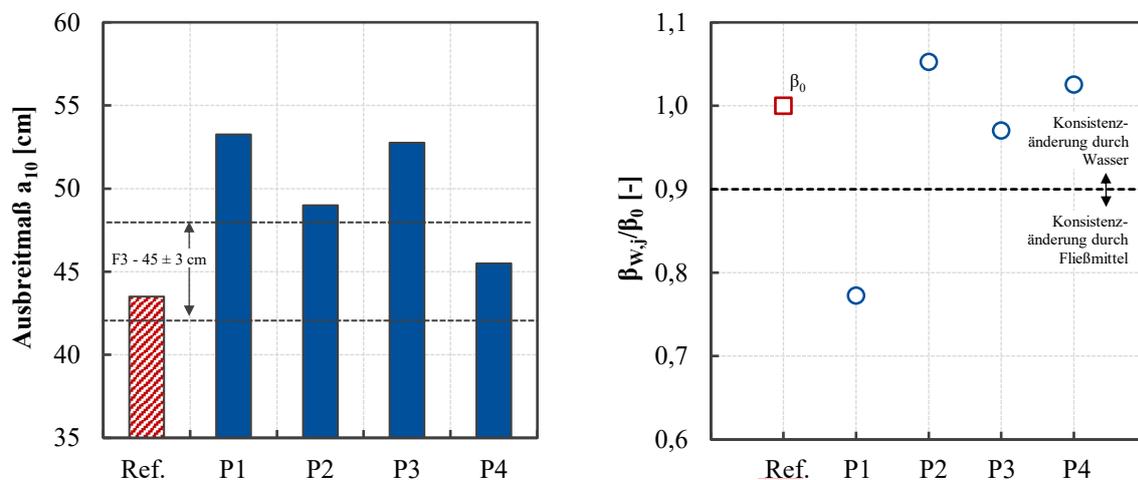


Abbildung 7.8: Ausbreitmaß a_{10} (links) und β_i/β_0 -Wert von fünf Betonzusammensetzungen (Ref. stellt dabei jeweils die ermittelten Daten der Erstprüfung dar)

Quantifiziert können Wassergehaltsschwankungen entsprechend Kapitel 5.4.4 mit der bildbasierten Bewertung des Oberflächenkennwertes Sk_u im Verhältnis zum Sk_{u0} -Wert (z. B. Soll-Wert aus der Erstprüfung). In Abbildung 7.9 (links) sind die Verhältniswerte $Sk_{u_{W,j}}/Sk_{u0}$ der Betone dargestellt. Mit dem in Kapitel 5.4.4 hergeleiteten Zusammenhang zwischen einer Wasserüberdosierung und dem Oberflächenkennwert Sk_u lassen sich so für die Betone Schwankungen im Wassergehalt von $+7 \text{ l/m}^3$ (P2, Soll = $+10 \text{ l/m}^3$), $+14 \text{ l/m}^3$ (P3, Soll = $+15 \text{ l/m}^3$) und $+1 \text{ l/m}^3$ (P4, Soll = $+5 \text{ l/m}^3$) abschätzen. Diese Werte können durch die bildbasierte Berechnung des Leimgehaltes mit der normierten Oberflächentextur κ tendenziell bestätigt werden (vgl. Abbildung 7.9, rechts). Die bildbasiert ermittelten Leimgehalte LG_{IA} weisen zwar jeweils eine geringfügige Unterschätzung gegenüber dem wahren Leimgehalt auf, eine zielsichere Abschätzung ist jedoch möglich. Die Streuungen sind geringer als $\pm 3,0 \%$. Eine Abstufung in Abhängigkeit der Wasserüberdosierung ist darüber hinaus klar ersichtlich. Folglich kann festgehalten werden, dass mit der bildbasierten Methodik sowohl der Leimgehalt als auch Schwankungen im Wassergehalt zielsicher digital erfasst und bewertet werden können.

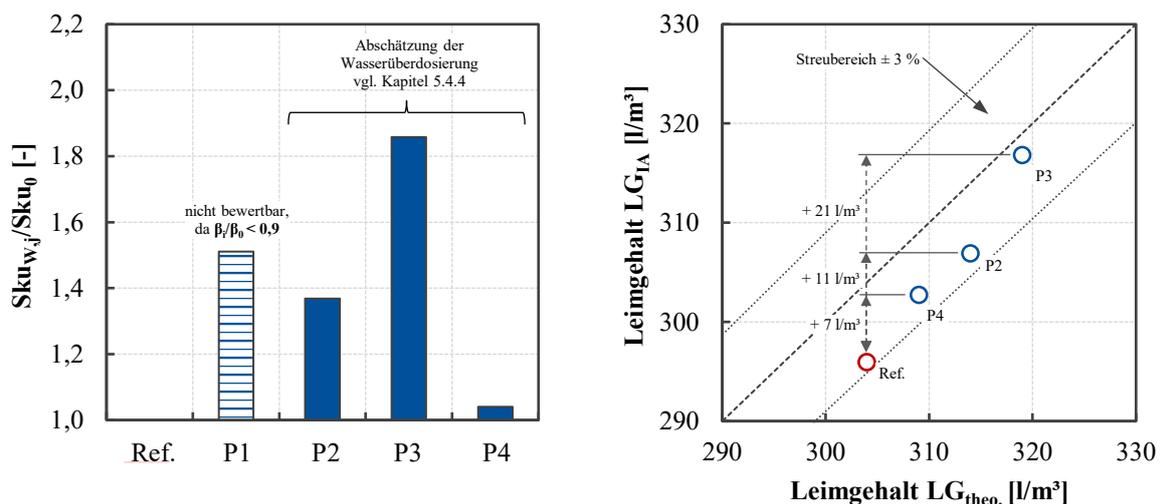


Abbildung 7.9: Sk_{u_i}/Sk_{u0} -Wert (links) und LG_{IA} in Abhängigkeit des theoretischen Leimgehalts (rechts) von fünf Betonzusammensetzungen (Ref. stellt dabei jeweils die ermittelten Daten der Erstprüfung dar)

Das vorangegangene Anwendungsbeispiel der bildbasierten Frischbetonprüfung zeigt deutlich, dass damit eine zielsichere digitale Erfassung und Bewertung maßgeblicher (Frisch-)Betoneigenschaften gelingt. Das Anwendungs- und Bewertungsspektrum der Qualitätsprüfung wird dadurch signifikant erhöht. So können im Rahmen der Identitäts- oder Qualitätsprüfung nicht nur Abweichungen von Soll-Werten (z. B. der Konsistenz) festgestellt werden, sondern auch Ursachen, die für die Abweichungen verantwortlich sind ermittelt werden. Aufgrund der digitalen Erfassung der Eigenschaften und Parameter ist darüber hinaus eine direkte Anpassung der Produktion in dem vorgestellten Regelkreislauf möglich (vgl. Kapitel 7.3). Abbildung 7.10 gibt einen schematischen Überblick (Flussdiagramm) zur Vorgehensweise im digitalen Regelkreislauf mit der bildbasierten Methodik exemplarisch unter Berücksichtigung des zuvor beschriebenen Anwendungsbeispiels.

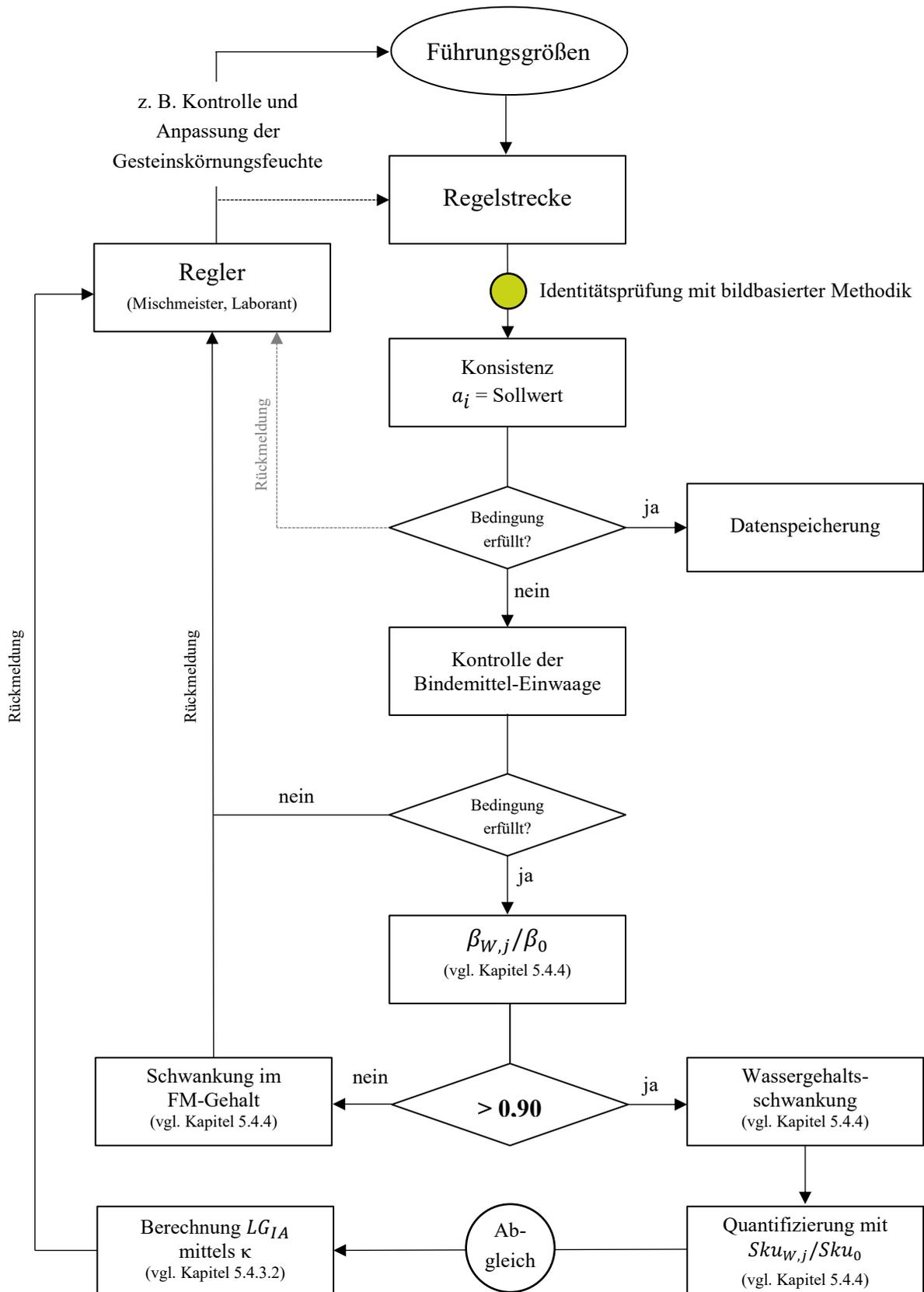


Abbildung 7.10: Flussdiagramm im Regelkreislauf unter Anwendung der bildbasierten Methodik (Vorgehensweise angepasst auf das vorangegangene Anwendungsbeispiel)

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Insbesondere die in einem sehr kurzen Zeitraum (gegenüber der Nutzungsdauer) von der Betonherstellung, dem Betoneinbau und der Nachbehandlung ablaufenden Prozesse bestimmen maßgeblich die entsprechenden Eigenschaften eines Betonbauwerks hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Dauerhaftigkeit. Demzufolge ist eine präzise und vor allem vollumfängliche Überprüfung der Eigenschaften bei der Frischbetonherstellung und -verarbeitung von entscheidender Bedeutung.

Gegenwärtig erfolgt die Sicherstellung der (Frisch-)Betoneigenschaften gemäß den gültigen Normen deskriptiv auf Basis umfassender Erfahrungen mit den üblichen Ausgangsstoffen und Zusammensetzungen. Die (Frisch-)Betoneigenschaften werden auf der Baustelle mit einfachen empirischen Prüfverfahren und vor allem subjektiver Augenscheinprüfung stichprobenartig bewertet. Als Prüfverfahren wird in Deutschland standardmäßig das Ausbreitmaß eingesetzt. Speziell die dabei durchgeführte Augenscheinprüfung ist stark vom Erfahrungswissen des Prüfenden abhängig. Eine Überführung der subjektiv visuell wahrgenommenen Eindrücke in eine quantitative Bewertung gelingt mit den bisherigen Methoden nicht.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, eine Messmethodik basierend auf photogrammetrischen Messprinzipien und digitaler Bildanalyseverfahren (u. a. Computer Vision) sowie Methoden der künstlichen Intelligenz zur bildbasierten Frischbetonprüfung im Rahmen der Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) von Frischbeton zu entwickeln. Die bildbasierte Methodik ermöglicht die Ermittlung von Oberflächeneigenschaften im Rahmen der Konsistenzprüfung. Darauf aufbauend ist eine umfassende digitale Bewertung von betontechnologischen Eigenschaften möglich.

Mit dem Ausbreitmaß zur Konsistenzprüfung steht eine Methode zur Verfügung, die infolge des relativ homogenen Energieeintrages (15 Schläge) eine reproduzierbare Erfassung unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften des ausgebreiteten Frischbetons erlaubt. Daher wurde der Fokus in dieser Arbeit auf die bildbasierte Ermittlung von Oberflächeneigenschaften des ausgebreiteten Frischbetons im Rahmen dieser Konsistenzprüfung gelegt.

Grundsätzlich kann die Vorgehensweise der Methodik in Bildanalyse und Eigenschaftsbewertung gegliedert werden. In den aufgenommenen Bilddaten wurden im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche Oberflächeneigenschaften segmentiert bzw. ermittelt:

- 3D-Oberflächenkennwerte
- Geometrische 2D-Eigenschaften
- Reflexionsbasierte Eigenschaften

Da zur Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften mittels Oberflächeneigenschaften des Frischbetons bisher nur sehr wenige Ansätze in der internationalen Literatur vorhanden sind, wurde in einer systematischen und umfassenden Parameterstudie der Einfluss unterschiedlicher betontechnologischer Eigenschaften und Parameter auf die Oberfläche des Frischbetons im Rahmen der Konsistenzprüfung untersucht. Zur Ermittlung der Oberflächeneigenschaften wurde ein breites Spektrum sowohl photogrammetrischer als auch bildbasierter Methoden angewendet. Es wurden zum einen photogrammetrische Methoden zur 3D-Rekonstruktion der Oberfläche als auch die semantische Instanz-Segmentierung unter Anwendung von Convolutional Neural Networks zur Ermittlung geometrischer 2D-Eigenschaften eingesetzt. Darüber hinaus wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt, Reflexionseigenschaften der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons bildbasiert zu ermitteln.

Die Anwendung der entwickelten bildbasierten Methodik erweitert das bewertbare Eigenschaftsspektrum im Rahmen der Konsistenzprüfung signifikant. Hierzu wird im Anschluss an den Ausbreitmaßversuch der ausgebreitete Frischbeton systematisch fotografiert und aus den so resultierenden Bilddaten u. a. mittels semantischer Segmentierung oder der 3D-Rekonstruktion charakteristische Oberflächeneigenschaften ermittelt. Anhand dieser Eigenschaften ist eine Bewertung vielfältiger (Frisch-)Betoneigenschaften möglich. Das Ausbreitmaß des Betons kann dabei mit einer sehr guten Übereinstimmung zum manuell ermittelten Referenzwert bestimmt werden ($R^2_{\text{adj.}} = 0,97$). Weiterhin kann der Leimgehalt des Frischbetons (Wasser und Feinststoffe $< 0,125$ mm) bildbasiert mittels der normierten Oberflächentextur κ für die Konsistenzklassen F3 bis F5 ermittelt werden. Die Abweichungen der Prognosen betragen bei keinem der im Rahmen dieser Arbeit bildbasiert ermittelten Leimgehalte mehr als 3,0 % gegenüber dem theoretischen Leimgehalt. Schwankungen im Wassergehalt können bildbasiert bzw. photogrammetrisch über die Veränderung des 3D-Oberflächenkennwertes Sk_u bewertet werden. Eine präzise Bewertung ist jedoch nur unter der Voraussetzung möglich, dass der Oberflächenkennwert Sk_{u_0} der Betonzusammensetzung ohne Wassergehaltsschwankung bekannt ist. Wird bereits in der Erstprüfung der Einfluss von Wassergehaltsschwankungen untersucht und somit Sk_u für den spezifischen Beton kalibriert, ist eine sehr hohe Präzision möglich. Granulometrische Eigenschaften, wie die Korngrößenverteilung (≥ 4 mm), das Größtkorn oder Kornformparameter können mit Hilfe semantischer Segmentierung unter Anwendung von CNN bestimmt werden. Neben der Bestimmung der Korngrößen(häufigkeits-)verteilung kann darüber hinaus anhand der 2D-Eigenschaften, die geometrische Verteilung der einzelnen

Gesteinskörner an der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons ermittelt werden. So lassen sich u. a. Rückschlüsse auf die Homogenität des Frischbetons ziehen. Diese können durch die bildbasierte Berechnung möglicher Leimabsonderungen im Randbereich des ausgebreiteten Frischbetons erweitert werden. Darüber hinaus kann die Oberflächenreflexion des Frischbetons zur bildbasierten Abschätzung der Wasserabsonderung dienen. So ist eine (relative) Abschätzung der Wasserabsonderung des Frischbetons anhand der Reflexionseigenschaften der Oberfläche des ausgebreiteten Frischbetons mit dem Kennwert λ_{RefL} möglich. Für Betonzusammensetzungen, die eine unmittelbare Wasserabsonderung nach der Verarbeitung bzw. Verdichtung an der Oberfläche des Frischbetons zeigen, ist die Methodik zielsicher anwendbar.

Abbildung 8.1 gibt einen Überblick über das bewertbare Eigenschaftsspektrum infolge der Anwendung der hier vorgestellten bildbasierten Methodik im Rahmen der Konsistenzprüfung. Darüber hinaus stellt die Abbildung 8.1 die relevanten zu prüfenden (Frisch-)Beton-eigenschaften im Rahmen der Identitätsprüfung gemäß *DIN 1045-3* dar. Die bisherige Qualitätsprüfung besteht dabei vor allem aus der Augenscheinprüfung technischer Daten und dem Erscheinungsbild des Frischbetons sowie der Ermittlung der Konsistenz. Die signifikante Erweiterung des bewertbaren Eigenschaftsspektrums infolge der hier vorgestellten bildbasierten Frischbetonprüfung wird so nochmal verdeutlicht. Insbesondere die Vielzahl der digital erfassbaren und bewertbareren Eigenschaften und Parameter bietet neue Möglichkeiten zur vollumfänglichen Eigenschaftsbewertung im Rahmen der Qualitätsprüfung von Frischbeton. So sind zwar die Zusammenhänge einzelner Eigenschaften und Parameter (z. B. der Einfluss des Leimgehalts auf die Konsistenz) hinlänglich bekannt, eine ganzheitliche Bewertung des gesamten Eigenschaftsspektrums ist mit den bisherigen Ansätzen jedoch nicht möglich. Die digitale Erfassung der Eigenschaften mit der bildbasierten Methodik bietet demnach neue Ansätze zur vollumfänglichen Eigenschaftsbewertung, z. B. unter Anwendung von *Big-Data*-Methoden.

Eine zentrale Anforderung an die zu entwickelnde Messmethodik war zudem eine hinreichende Präzision und Genauigkeit zur zielsicheren Eigenschaftsermittlung bei gleichzeitiger Anwendbarkeit unter baustellenpraktischen Randbedingungen. Dabei galt es, das verwendete Kamerasystem auf die Aufnahmekonfiguration anzupassen, so dass in Verbindung mit dem Auswertesystem unter praktischen Randbedingungen eine hinreichend genaue digitale Ermittlung und Bewertung der Eigenschaften durchgeführt werden kann. Die zielsichere Anwendbarkeit unter baustellenpraktischen Randbedingungen wurde beispielhaft an vereinzelt Betonzusammensetzungen im Transportbetonwerk untersucht und aufgezeigt.

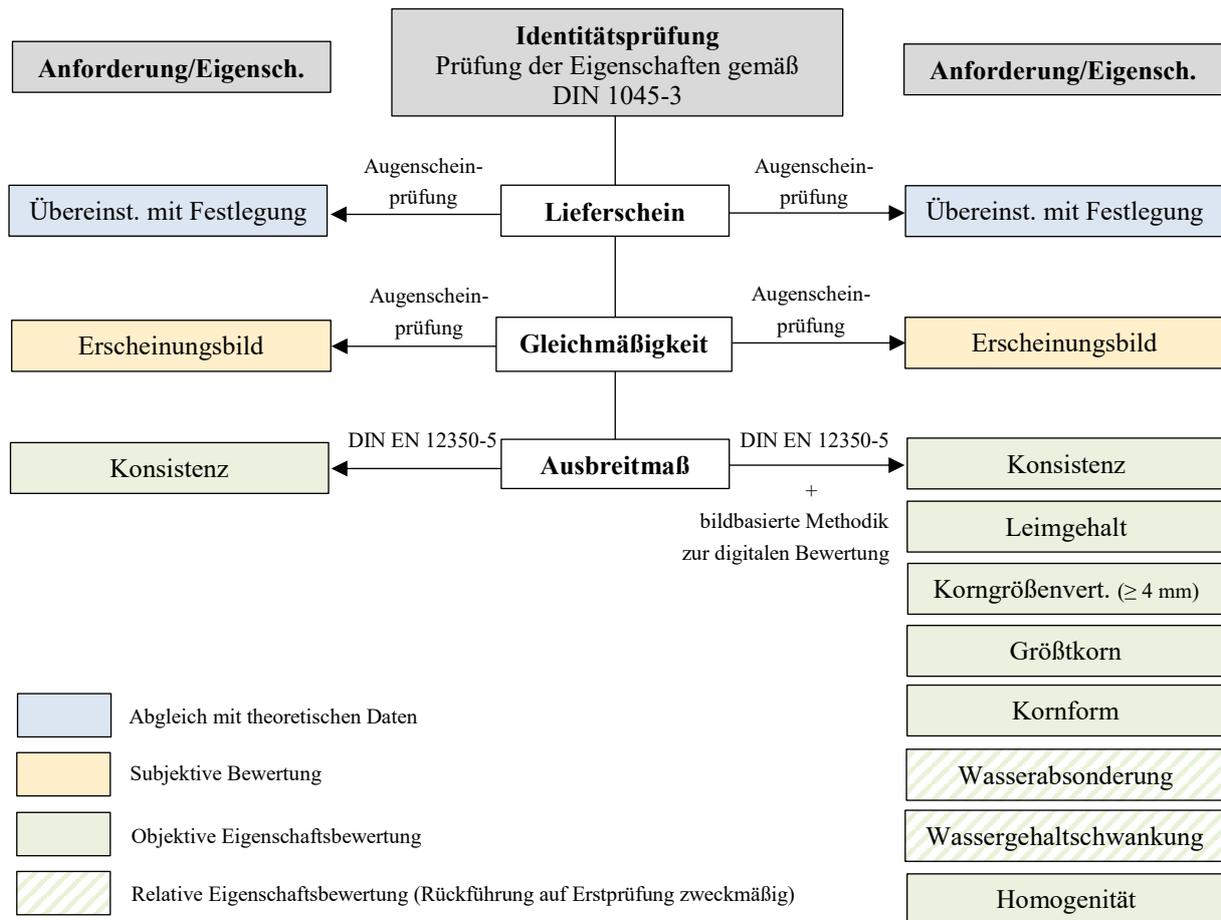


Abbildung 8.1: Überblick der zu prüfenden (Frisch-)Betoneigenschaften im Rahmen der Identitätsprüfung gemäß *DIN 1045-3* (links) und unter Anwendung der bildbasierten Methodik (rechts)

In einem weiteren Schritt wurde auf Grundlagen der Regelungstechnik ein Konzept zur digitalen Qualitätsregelung von Frischbeton unter Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten bildbasierten Methodik erarbeitet. Dazu wurde ein rückwärtsverketteter Qualitätsregelkreis formuliert. Die Anwendung der bildbasierten Methodik bzw. die daraus resultierende digitale Eigenschaftsbewertung gestattet eine direkte und kontinuierliche Weiterleitung möglicher festgestellter Qualitätsabweichungen an vorgelagerte Prozessschritte bzw. ins Herstellwerk. Dort können direkt entsprechende Maßnahmen zur Wiederherstellung der Soll-Werte bei der weiteren Produktion initiiert werden, so dass der Frischbeton im weiteren Produktionszyklus die erforderlichen Qualitätsmerkmale aufweist.

Zusammen ergeben die Schritte - *Messmethodik, Bildanalyse, Eigenschaftsbewertung und Regelungskonzept* - ein Konzept zur bildbasierten Prüfung und Bewertung von (Frisch-) Betoneigenschaften bei der Frischbetonherstellung und -verarbeitung. Insbesondere das Konzept der digitalen Qualitätsregelung stellt einen entscheidenden Schritt zur Digitalisierung des Produktionszyklus unter Berücksichtigung der Qualitätsmerkmale des Frischbetons dar. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte bildbasierte Frischbetonprüfung stellt ein leicht handhabbares Instrument zur digitalen Bewertung von (Frisch-)Betoneigenschaften dar.

8.2 Ausblick

Die Anwendbarkeit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten bildbasierten Methodik zur Eigenschaftsermittlung und -bewertung von Frischbeton ist bisher auf die Konsistenzprüfung (Ausbreitmaß) begrenzt. Dies bietet zum einen den Vorteil, dass die Ausbreitung des Frischbetons bei einem nahezu konstanten Energieeintrag stattfindet und demnach die Oberflächeneigenschaften reproduzierbar in Abhängigkeit der betontechnologischen Eigenschaften bewertet werden können. Demgegenüber stellt die Konsistenzprüfung eine Stichproben-Prüfung dar, die die Grundgesamtheit der produzierten Frischbetonmenge repräsentiert, die jedoch mit gewissen Schwankungen z. B. durch die Probeentnahme, behaftet sein kann. Zur Kompensation solcher möglicher Schwankungen ist die Anwendung der bildbasierten Methodik z. B. beim Entladeprozess des Frischbetons aus dem Fahrmischer denkbar. So ist es möglich den Entladeprozess des Frischbetons aus dem Fahrmischer bildbasiert zu erfassen und anhand der ermittelten Oberflächeneigenschaften auf die (Frisch-)Betoneigenschaften zu schließen. Da der Entladeprozess gegenüber der Konsistenzprüfung ein dynamischer Prozess ist, ist die Datenaufnahme dabei jedoch deutlich komplexer. Einflüsse wie z. B. die Geschwindigkeit des Frischbetons und daraus resultierende ungleiche Füllstände sind zu berücksichtigen. Die Datenaufnahme muss dabei mit einer deutlich erhöhten Datenrate erfolgen.

Bisher werden die erhobenen Daten hauptsächlich im Bereich der Operational Technologies (OT) eingesetzt. D. h. es werden die für einen speziellen Zweck erhobenen Daten zur direkten Problemlösung und Prozessoptimierung eingesetzt. Die vielfältigen Methoden der künstlichen Intelligenz stellen dort, vor allem infolge erweiterter Möglichkeiten der Datenanalyse und des Maschinellen Lernens, erfolgshöfliche erweiterte Anwendungsmethoden dar. Die angewendeten Auswertemethoden basieren bisher zumeist auf der Regressionsanalyse anhand empirischer Beobachtungen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwar vereinzelt mehrere Kennwerte systematisch miteinander kombiniert. Eine Betrachtung in einem multivariaten System, z. B. unter Anwendung von Neural Networks, wurde bisher aber nicht durchgeführt. Insbesondere das vorwärts gerichtete und vorausschauende Datenmanagement zeigt dort Möglichkeiten zur Optimierung von Produktionsprozessen.

Die vorherigen Ausführungen zeigen deutlich, dass im Bereich der Datenauswertung Potenzial zur Optimierung vorhanden ist. Das ermittelbare und bewertbare Eigenschaftsspektrum lässt sich mit erweiterten Auswertemethoden noch weiter steigern. Neben der Datenauswertung besitzt auch die Sensorik ein enormes Potenzial zur Erweiterung der Bewertungsmöglichkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ausschließlich Sensorik in dem für den Menschen sichtbaren Spektrum der elektromagnetischen Strahlung angewendet. Weitere Sensorik, die Daten in einem anderen elektromagnetischen Spektrum aufnimmt, bietet zur Erweiterung der ermittelbaren Oberflächeneigenschaften ein großes Potenzial. Als Beispiel seien hier die Spektren der UV-Strahlung sowie der Infrarot-Strahlung genannt.

Literatur

Abebe, Y. A. (2017) *Flowable and Stable Concrete: Design, Characterization and Performance Evaluation* [Dissertation]. Leibniz Universität Hannover.

Alberts, E.; Arndt, W.; Beckmann, A.; Besser, E.; Born, F.; Dresler, A. et al. (1938) *Handbuch der Lichttechnik. Erster Teil*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Albertz, J.; Wiggenhagen, M. (2009) *Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung*. Berlin: Wichmann.

Alfes, C.; Aßbrock, O.; Begemann, C.; Breitenbücher, R.; Ckovic, A.; Cotardo, D.; et al. (2021) *Sachstandbericht Frischbeton - Eigenschaften, Einflüsse und Prüfungen*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. - DAfStb [Hrsg.]. Berlin: Beuth.

Alonso, M. T.; Schäffel, P. (2014) *Das Wasserabsondern von Beton fuer Industrieboeden? Laborergebnisse und Uebertragbarkeit auf praktische Verhältnisse; Teil 1*. beton 64 (11), S. 455-460.

Alonso, M. T.; Schäffel, P.; Breitenbücher, R. (2015) *Zielsichere Herstellung von Industriebetonboeden? Praxis- und Laborergebnisse sowie Hinweise zur Stabilität; Teil 1*. beton 65 (1+2), S. 109-114.

Alpaydm, E. (2014) *Introduction to machine learning*. Third edition (Online-Ausg.). Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press (Adaptive computation and machine learning).

Al-Rousan, T.; Masad, E.; Tutumluer, E.; Pan, T. (2007) *Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics*. Construction and Building Materials 21 (5), pp. 978-990.

Amziane, S.; Collet, F. (2017) *Bio-aggregates Based Building Materials. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM*. Dordrecht: Springer Netherlands (RILEM State-of-the-Art Reports, v.23).

Andreasen, A. H. M. (1930) *Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)*. Kolloid-Zeitschrift 50 (3), S. 217-228.

Assaad, J.; Khayat, K. H.; Daczko, J. (2004) *Evaluation of Static Stability of Self-Consolidating Concrete*. Materials Journal 101 (3), pp. 207-215.

Atha, D. J.; Jahanshahi, M. R. (2018) *Evaluation of deep learning approaches based on convolutional neural networks for corrosion detection*. Structural Health Monitoring 17 (5), pp. 1110-1128.

Baer, R. (2006) *Beleuchtungstechnik*. 3. vollst. überarb. Aufl. Berlin: Huss-Medien.

- Baker, J. W.;** Schubert, M.; Faber, M. H. (2008) *On the assessment of robustness*. *Structural Safety* 30 (3), pp. 253-267.
- Balázs, G. L.;** Bigaj-van Vlie, A.; Peiretti, H. C.; Elighausen, R. et al. (2009) *Structural Concrete – Textbook on behaviour, design and performance*. 2. ed. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib) (Bulletin / Fédération Internationale du Béton, 51).
- Banfill, P. F. G.** (1996) *Vibration and the Rheology of Fresh Concrete: A Further Look* in: Bartos, P.; marris, D. L.; Cleland, D. J. [eds.] *Production methods and workability of concrete: Proceedings of the International RILEM Conference*, Paisley, Scotland. London: E&FN Spon
- Banfill, P. F. G.** (2006) *Rheology of fresh cement and concrete*. *Rheology Reviews*, pp. 61-130.
- Barber, C.;** Dobkin, D.; Huhdanpaa, H. (1996) *The quickhull algorithm for convex hulls*. *ACM Transactions on Mathematical Software* 22 (4), pp. 469-483.
- Barnes, H. A.;** Hutton, J. F.; Walters, K. (1993) *An introduction to rheology*. 3. Impression. Amsterdam: Elsevier (Rheology series, 3).
- Beck, C.** (2009): *Quo vadis, Rauheitsmessung?* *Qualität und Zuverlässigkeit* 54 (5), S. 40-46.
- Begemann, C.;** Cotardo, D.; Lohaus, L. (2018) *Mischungsstabilität fließfähiger Betone*. *Bautechnik* 95 (4), S. 316-323.
- Bergmann, L.;** Schaefer, C. (1993) *Optik: Wellen- und Teilchenoptik* in: Niedrig, H. et al. [Hrsg.] *Lehrbuch der Experimentalphysik 9. Auflage*. Berlin: de Gruyter.
- Bettin, V.** (2004) *Ansatz zur übergreifenden Qualitätsregelung von Prozessketten in der Fertigung* [Dissertation]. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Billberg, P. H.;** Westerholm, M. (2008) *Robustness of Fresh VMA-modified SCC to Varying Aggregate Moisture*. *NCR Journal* 38 (7). pp. 103-119.
- Billberg, P. H.;** Khayat, K. H. (2008) *Use of Viscosity-Modifying Admixtures to enhance Robustness of SCC* in: Shah, S. P. [ed.] *3rd North American Conf. on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Chigago, USA. ACBM. pp. 566-571.
- Bonzel, J.;** Krell, J. (1986) *Konsistenzprüfung von Frischbeton*. *Betontechnische Berichte* 1984/85, S. 17-40.
- Brameshuber, W.;** Uebachs, S. (2003) *Sedimentationsstabilität von selbstverdichtenden Betonen*. *beton* 53 (1), S. 10-15.
- Breitenbücher, R.** (2001) *Selbstverdichtender Beton - Chancen und Voraussetzungen*. *beton* 51 (9), S. 496-499.
- Breitenbücher, R.;** Müller, C. (2017) *Randbedingungen für das zielsichere Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe*. Schlussbericht zum IGF-Vorhaben 17517 N, VDZ gGmbH, Forschungsinstitut der Zementindustrie und Ruhr-Universität Bochum.
- Breul, P.;** Geoffray, J.-M.; Haddani, Y. (2008) *On-Site Concrete Segregation Estimation Using Image Analysis*. *Journal of Advanced Concrete Technology* 6 (1), pp. 171-180.

- Browne, R. D.;** Bamforth, P. B. (1977) *Tests to Establish Concrete Pumpability*. ACI Journal Proceedings 74 (5), pp. 193-203.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung** [Hrsg.] (2019) *Fortschrittsbericht zur Hightech-Strategie 2025*. Berlin.
- Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V** [Hrsg.] (2021) *Jahresbericht 2021*. Berlin.
- Carrivick, J. L.;** Quincey, D. J.; Smith, M. (2016) *Structure from motion in the geosciences*. Chichester, West Sussex: Wiley Blackwell (New analytical methods in earth and environmental science).
- Caspeele, R.;** Taerwe, L. (2009) *Combined production and conformity control of concrete with acceptance cusum control cards* in: Proske, D. [ed.] *Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop 2009*, Delft, Niederlande. pp. 73-86.
- Cha, Y.-J.;** Choi, W.; Büyüköztürk, O. (2017) *Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 32 (5), pp. 361-378.
- Chadwick, A. C.;** Kentridge, R. W. (2015) *The perception of gloss: a review*. Vision Research 109, pp. 221-235.
- Chen, F.-C.;** Jahanshahi, M. R. (2018) *NB-CNN: Deep Learning-Based Crack Detection Using Convolutional Neural Network and Naïve Bayes Data Fusion*. IEEE Transactions on Industrial Electronics 65 (5), pp. 4392-4400.
- Chen, K.;** Yadav, A.; Khan, A.; Meng, Y.; Zhu, K. (2019) *Improved Crack Detection and Recognition Based on Convolutional Neural Network*. Modelling and Simulation in Engineering 2019, pp. 1-8.
- Chidiac, S.;** Habibbeigi, F.; Chan, D. (2006) *Slump and Slump Flow for Characterizing Yield Value of Fresh Concrete*. Materials Journal 103 (6), pp. 413-418.
- Chidiac, S. E.;** Habibbeigi, F. (2005) *Modelling the rheological behaviour of fresh concrete: An elasto-viscoplastic finite element approach*. Computers and Concrete 2 (2), pp. 97-110.
- Chidiac, S. E.;** Maadani, O.; Razaqpur, A. G.; Mailvaganam, N. P. (2000) *Controlling the quality of fresh concrete - a new approach*. Magazine of Concrete Research 52 (5), S. 353-363.
- Cleven, S.** (2016) *Überprüfung des Wasserabsonderns von Beton: Forschungsvorhaben zur Entwicklung eines Prüfverfahrens*. beton 66 (4), S. 136-138.
- Coenen, M.;** Schack, T.; Beyer, D.; Heipke, C.; Haist, M. (2021) *Semi-Supervised Segmentation of Concrete Aggregate using Consensus Regularisation and prior Guidance*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences V-2-2021, pp. 83-91.
- Coenen, M.** (2020) *Probabilistic Pose Estimation and 3D Reconstruction of Vehicles from Stereo Images*. [Dissertation] Leibniz Universität Hannover.
- Cussigh, F.** (2007) *SCC in practice: opportunities and bottleneck* in: De Schutter, G.; Boel, V. [eds.] *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Ghent, Belgien. pp. 21-27.

- De Larrard, F.** (1999) *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*. Boca Raton: CRC Press.
- Di Tian, H.;** Wang, B.; Guan, T.; Gu, H.; Wei, W. (2022) *Review of object instance segmentation based on deep learning*. Journal of Electronic Imaging 31 (04), 041205.
- Dörmann Osuna, H. W.** (2008) *Ansatz für ein prozessintegriertes Qualitätsregelungssystem für nicht stabile Prozesse* [Dissertation] Technische Universität Ilmenau.
- Erdem, T. K.;** Bilgiç, E.; Kanpara Cıvaş, Z. (2019) *A new method to quantify the robustness of self-consolidating grouts*. Construction and Building Materials 229, 116849.
- Fennis, S. A. A. M.** (2011) *Design of ecological concrete by particle packing optimization* [PhD-Thesis]. Technische Universität Delft.
- Ferraris, C. F.** (1999) *Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report*. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 104 (5), pp. 461-478.
- Ferraris, C. F.;** Brower, L. E.; Banfill, P.; Beaupré, D.; Chapdelaine, F.; de Larrard, F.; et al. (2001) *Comparison of concrete rheometers*. National Institute of Standards and Technology.
- Ferraris, C. F.;** de Larrard, F. (1998) *Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology*. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg.
- Fierenkothen C.** (2019) *Numerische Simulation und Laborversuche zur Ausbreitung von Frischbeton in Bohrpfählen* [Dissertation]. Bergische Universität Wuppertal.
- Fingerloos, F.;** Meyer, L.; Breitenbücher, R. (2019) *Die BBQ-Richtlinie des DAfStb. Beton- und Stahlbetonbau* 114 (11), S. 857-868.
- Förstner, W.;** Wrobel, B. (2016) *Photogrammetric computer vision. Statistics, geometry, orientation, and reconstruction*. Cham: Springer.
- Fuller, W. B.;** Thompson, S. E. (1907) *The Laws of Proportioning Concrete*. T. Am. Soc. Civ. Eng. 59 (2), pp. 67-143.
- Gaich, A.;** Pötsch, M. (2015) *3D images for data collection in tunnelling - applications and latest developments*. Geomechanics and Tunnelling 8 (6), S. 581-588.
- Gaich, A.;** Pötsch, M. (2016) *3D images for digital tunnel face documentation at TBM headings - Application at Koralmtunnel lot KAT2*. Geomechanics and Tunnelling 9 (3), S. 210-221.
- Gall, D.** (2007) *Grundlagen der Lichttechnik. Kompendium. 2. Aufl.* München: Pflaum (Licht und Beleuchtung).
- Geisenhanslücke, C.** (2009) *Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen* [Dissertation]. Universität Kassel.
- Gerlach, J.;** Steinborn, T. (2014) *Robustheit - Notwendiges Entwurfskriterium beim Bauen mit Beton?!*. in: Steinborn, T. [Hrsg.] *Festschrift Ludger Lohaus zur Vollendung des sechzigsten Lebensjahres, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 12*, S. 55-64
- Ghoddousi, P.;** Salehi, A. M. (2016) *The Robustness of Self Consolidating Concrete Due to Changes in Mixing Water*. Period. Polytech. Civil Eng. 61 (2), pp. 216-225.

- Ghouchian, S.;** Wyrzykowski, M.; Lura, P. (2016) *The bleeding test: A simple method for obtaining the permeability and bulk modulus of fresh concrete*. Cement and Concrete Research 89, pp. 249-256.
- Gläser, T.** (2017) *Optimierung der Wassereffizienz von Mörtelzusammensetzungen als Basis für den Entwurf von Hochleistungsbetonen* [Dissertation]. Leibniz Universität Hannover.
- Gökçe, H. S.;** Andiç-Çakır, Ö. (2018) *A new method for determination of dynamic stability of self-consolidating concrete: 3-Compartment sieve test*. Construction and Building Materials 168, pp. 305-312.
- Goodfellow, I.;** Bengio, Y.; Courville, A. (2016) *Deep learning*. Cambridge, Massachusetts, London, England: MIT Press.
- Goulet, J.-A.** (2020) *Probabilistic machine learning for civil engineers*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Gram, H.-E.;** Piiparinen, P. (2005) *Camflow - automatized slump flow measurements* in: Shah, S. P. [ed.] *Proceedings for the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Northwestern University, pp. 701-704.
- Große, C. U.** (2019) *Entwicklung und Anwendung der Ultraschalltechnik zur Qualitätssicherung von Beton*. Beton- und Stahlbetonbau 114 (12), S. 938-946.
- Grzelka, M.;** Majchrowski, R.; Sadowski, Ł. (2011) *Investigations of Concrete Surface Roughness by means of 3D Scanner*. Proceedings of Electrotechnical Institute.
- Gutzeit, E.** (2015) *Automatische bildbasierte Segmentierung organischer Objekte einer gleichartigen Gruppe* [Dissertation] Universität Rostock.
- Hackley, V. A.;** Ferraris, C. F. (2001) *Guide to rheological nomenclature: measurements in ceramic particulate systems*. Washington, DC: U.S. Gov. Print. Off (NIST special publication).
- Hafiz, A. M.;** Bhat, G. M. (2020) *A survey on instance segmentation: state of the art*. International Journal of Multimedia Information Retrieval 9 (3), pp. 171-189.
- Haist, M.** (2009) *Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen* [Dissertation] Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).
- Haist, M.;** Breitenbücher, R. (2021) *Gemeinsamer Abschlussbericht zur Phase 2 des Forschungsvorhabens „Beurteilung der Sedimentationsstabilität von Frischbeton“*. Schlussbericht zum Vorhaben S019 vom DAfStb. Leibniz Universität Hannover und Ruhr-Universität Bochum.
- Haist, M.;** Link, J.; Nicia, D.; Leinitz, S.; Baumert, C.; von Bronk, T.; et al. (2020) *Interlaboratory study on rheological properties of cement pastes and reference substances: comparability of measurements performed with different rheometers and measurement geometries*. Materials and Structures 53 (4).
- Haist, M.;** Moffatt, J. S.; Breiner, R.; Müller, H. S. (2014) *Entwicklungsprinzipien und technische Grenzen der Herstellung zementarmer Betone*. Beton- und Stahlbetonbau 109 (3), S. 202-215.
- Haist, M.;** Moffatt, J. S.; Breiner, R.; Vogel, M.; Müller, H. S. (2016) *Ansatz zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit von Beton auf der Baustoffebene*. Beton- und Stahlbetonbau 111 (10), S. 645-656.

- Hampel, U.** (2008) *Photogrammetrische Erfassung der Verformungs- und Rissentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen* [Dissertation]. Technische Universität Dresden.
- Han, J.;** Wang, K. (2016) *Influence of bleeding on properties and microstructure of fresh and hydrated Portland cement paste*. Construction and Building Materials 115, pp. 240-246.
- Han, J.;** Wang, K.; W., Xuhao; M., Paulo J.M. (2016) *2D image analysis method for evaluating coarse aggregate characteristic and distribution in concrete*. Construction and Building Materials 127, pp. 30-42.
- Hartmann, W. D.** (2015) *Mess- und Auswertestrategien zur modellbasierten Bewertung funktionaler Eigenschaften mikrostrukturierter Oberflächen* [Dissertation]. Universität Erlangen-Nürnberg.
- Heese, C.** (2014) *Simulation des rheologischen Verhaltens von zementgebundenen Feinkornsystemen* [Dissertation]. Technische Universität Kaiserslautern.
- Heese, C.;** Breit, W. (2012) *Ermittlung der Blutneigung im Eimerverfahren. Verfahrensbedingte Einflussparameter*. beton 62 (4), S. 110-115.
- Heipke, C.** (Hrsg.) (2017) *Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie*. Freeden, W.; Rummel, R. [Hrsg.], Berlin, Heidelberg: Springer.
- Heipke, C.;** Rottensteiner, F. (2020) *Deep learning for geometric and semantic tasks in photogrammetry and remote sensing*. Geo-spatial Information Science 23 (1), pp. 10-19.
- Heller, A.** (2012) *Systemeigenschaft Robustheit – Ein Ansatz zur Bewertung und Maximierung von Robustheit eingebetteter Systeme* [Dissertation]. Technische Universität Chemnitz.
- Henze, F.** (2015) *Digitale Bildverarbeitung für die automatisierte Auswertung in der Architekturphotogrammetrie* [Dissertation]. Technische Universität Cottbus-Senftenberg.
- Hooton, R. D.;** Khayat, K. H.; Yahia, A. (1998) *Simple Field Tests to Characterize Fluidity and Washout Resistance of Structural Cement Grout*. Cement, Concrete, Aggregates 20 (1), pp. 145-156.
- Hosseinpour, M.;** Koura, B.-I. O.; Yahia, A. (2021) *New diphasic insight into the restricted flowability and granular blocking of self-consolidating concrete: Effect of morphological characteristics of coarse aggregate on passing ability of SCC*. Construction and Building Materials 308, 125001.
- Höveling, H.** (2006) *Robustheit von selbstverdichtendem Beton (SVB)* [Dissertation]. Leibniz Universität Hannover.
- Hu, C.;** de Larrard, F. (1996) *The rheology of fresh high-performance concrete*. Cement and Concrete Research 26 (2), pp. 283-294.
- Hu, J.;** Wang, K. (2011) *Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology*. Construction and Building Materials 25 (3), pp. 1196-1204.
- Hunter, R. S.** (1937) *Methods of determining gloss*. Journal of Research of the National Bureau of Standards 18 (1), pp. 19-41.

- Huß, A.** (2010) *Mischungsentwurf und Fließeigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Berücksichtigung der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- Jäger, E.;** Patzsche, S.; Heipke, C. (2020) *Geotopographie und Photogrammetrie* in: Kummer K., Kötter T., Kutterer H., Ostrau S. [Hrsg.] *Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen*. Berlin: vde-Verlag.
- Jesse, F.;** Kutzner, T. (2013) *Digitale Photogrammetrie in der Bautechnik*. Bautechnik 90 (11), S. 703-714.
- Jiang, X. J.;** Whitehouse, D. J. (2012) *Technological shifts in surface metrology*. CIRP Annals 61 (2), pp. 815-836.
- Josserand, L.;** Coussy, O.; Larrard, F. de (2006) *Bleeding of concrete as an ageing consolidation process*. Cement and Concrete Research 36 (9), pp. 1603-1608.
- Josserand, L.;** Larrard, F. de (2004) *A method for concrete bleeding measurement*. In: *Materials and Structures* 37 (10), pp. 666-670.
- Khayat, K.-H.;** Vanhove, Y.; Pavate, T. V.; Jolicoeur, C. (2007) *Multi-Electrode Conductivity Method to Evaluate Static Stability of Flowable and Self-Consolidating Concrete*. Materials Journal 104 (4), pp. 424-433.
- Kickingeder, R.** (2006) *Optische Vermessung partiell reflektierender Oberflächen* [Dissertation]. Universität Passau.
- Kiltz, D.;** Siebert, B. (2013) *Erfahrungen mit dem Eimerverfahren zur Bestimmung der Blutneigung von Beton*. beton 63 (1+2), S. 14-17.
- Kim, J.-H.;** Park, M. (2018) *Visualization of Concrete Slump Flow Using the Kinect Sensor*. Sensors 18 (3).
- Koffler, M.** (2019) *Partikelagglomeration und Partikelgrößenverteilung beim Speichern von Eisbreigemischen* [Dissertation]. Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).
- Köhler, S.** (2011) *Messtechnische Bestimmung von Leuchtdichtekoeffizienten für Fahrbahndeckschichten unter flachen Anstrahlwinkeln* [Dissertation]. Technische Universität Berlin.
- Kordts, S.;** Breit, W. (2007) *Kombiniertes Prüfverfahren zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB - Auslaufkegel*. Betontechnische Berichte 2004-2006, S. 7-15.
- Kränkell, T.;** Weger, D.; Gehlen, C. (2020) *Flowable Concrete during Compaction-Effect of External Vibration on the Evolution of Yield Stress and Viscosity and the Resulting Deaeration and Segregation Behaviour* in: Middendorf, B.; Fehling, E.; Wetzel, A. [eds.] *Proceedings of HiPerMat 2020, 5th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*, Kassel. Kassel: University Press. pp. 33–34.
- Kraus, M. A.;** Drass, M. (2020) *Künstliche Intelligenz im Bauingenieurwesen – Hintergründe, Status Quo und Potenziale/Artificial Intelligence in Civil Engineering – Background, Status Quo and Potential Applications*. Bauingenieur 95 (10), S. 369-378.
- Krell, J.** (1985) *Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung*. Düsseldorf: Beton-Verlag (Schriftenreihe der Zementindustrie, 46).

- Krell, J.** (2013) *Bluten von Frischbeton*. beton 63 (1+2), S. 8-12.
- Krell, J.** (2015) *Schnelle Wassergehaltsbestimmung am Frischbeton mittels „Eintauchsonde“*. BWI BetonWerk International (5), S. 60-66.
- Kubat, M.** (2017) *An Introduction to Machine Learning. 2nd edition*. Cham: Springer (SpringerLink Bücher).
- Kubens, S.** (2010) *Interaction of cement and admixtures and its influence on rheological properties* [Dissertation]. Bauhaus-Universität Weimar.
- Kühne, H.-C.; Oppat, K.; Gluth, G. J. G.; Vogler, N.** (2017) *Surface characterization of building elements – roughness measurements by conventional and laser-based methods*. Bauingenieur 92 (3), S. 97-104.
- Kumara, G. H. A. J. J.; Hayano, K.; Ogiwara, K.** (2012) *Image analysis techniques on evaluation of particle size distribution of gravel*. International Journal of GEOMATE 3 (1), pp. 290-297.
- Kupfer, K.** (1997) *Materialfeuchtemessung. Grundlagen, Meßverfahren, Applikationen, Normen*. Renningen: Expert-Verlag.
- Kupfer, K.** (2001) *Feuchtemessung - Bestimmung der Qualität*. Betonwerk und Fertigteiltechnik (1), S. 109-115.
- Kurokawa, Y.; Tanigawa, Y.; Mori, H.; Komura, R.** (1994) *Study on the Slump Test and Slump-Flow Test of Fresh Concrete*. Transactions of the Japan Concrete Institute (16), pp. 25-32.
- Kwak, H.-G.; Ha, S.; Weiss, W. J.** (2010) *Experimental and Numerical Quantification of Plastic Settlement in Fresh Cementitious Systems*. Journal of Materials in Civil Engineering 22 (10), pp. 951-966.
- Kwan, A. K. H.; Mora, C. F.; Chan, H. C.** (1999) *Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing*. Cement and Concrete Research 29 (9), pp. 1403-1410.
- Laskar, A. I.** (2009) *Correlating slump, slump flow, vebe and flow tests to rheological parameters of high-performance concrete*. Mat. Res. 12 (1), pp. 75-81.
- Le, T.-T.; Nguyen, V.-H.; Le, M. V.** (2021) *Development of Deep Learning Model for the Recognition of Cracks on Concrete Surfaces*. Applied Computational Intelligence and Soft Computing 2021, pp. 1-10.
- Leach, R.** (2013) *Characterisation of Areal Surface Texture*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- LeCun, Y.; Bengio, Y.; Hinton, G.** (2015) Deep learning. In: *Nature* 521 (7553), pp. 436-444.
- Lesage, K.** (2014) *Interactions between Cement and Combined Concrete Admixtures. The Influence on Cement Paste Rheology* [PhD Thesis]. KU Leuven – Arenberg Doctoral School of Science, Engineering & Technology.
- Ley-Hernandez, A. M.; Feys, D.; Hartell, J. A.** (2019) *Effect of dynamic segregation of self-consolidating concrete on homogeneity of long pre-cast beams*. Materials and Structures 52 (1).
- Lieber, W.** (1968) *Das Sedimentieren (Bluten) von Zementen*. Zement-Kalk-Gips 21 (11), S. 457-463.

- Linß, G.** (2018) *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. 4. aktualisierte Auflage. München: Hanser Carl.
- Lohaus, L.;** Begemann, C.; Cotardo, D.; Schack, T.; Beyer, D. (2018) *Robustheit – Schlüsselkompetenz für Hochleistungsbeton* in: Stark, J.; Fischer, H.-B. [Hrsg.] *Tagungsbericht ibausil, 20. Internationale Baustofftagung*, Weimar. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. Band 1, S. 231-242.
- Lohaus, L.;** Breitenbücher, R. (2019) *Gemeinsamer Abschlussbericht zur Phase 1 des Forschungsvorhabens „Beurteilung der Sedimentationsstabilität von Frischbeton“ Schlussbericht zum Vorhaben S017 vom DAfStb*. Leibniz Universität Hannover und Ruhr-Universität Bochum.
- Lowke, D.** (2013) *Sedimentationsverhalten und Robustheit Selbstverdichtender Betone* [Dissertation]. Technische Universität München.
- Lüders, K.;** Pohl, R. O. (2018) *Pohls Einführung in die Physik. Band 2: Elektrizitätslehre und Optik*. 24. überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Ludwig, F.** (2015) *Mobile Feuchtemessung mit Wireless-Technologie*. Betonwerk und Fertigteiltechnik (06).
- Luhmann, T.** (2018) *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen - Methoden - Beispiele*. 4. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Offenbach: Wichmann.
- Luo, H.;** Xiong, C.; Fang, W.; Love, P. E. D.; Zhang, B.; Ouyang, X. (2018) *Convolutional neural networks: Computer vision-based workforce activity assessment in construction*. In: *Automation in Construction* 94, pp. 282-289.
- Maack, S.;** Küttenbaum, S.; Epple, N.; Aligholizadeh, M. (2021) *Die Ultraschall-Echomethode – von der Messung zur bautechnischen Kenngröße*. Beton- und Stahlbetonbau 116 (3), S. 200-211.
- Maas, H.-G.** (1992) *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik* [Dissertation]. ETH Zurich.
- Maas, H.-G.** (1997) *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie*. [Habilitationsschrift]. ETH Zürich.
- Maas, H.-G.** (2012) *Digitale Nahbereichsphotogrammetrie im bautechnischen Versuchswesen*. Bautechnik 89 (11), S. 786-793.
- Marzahn, P.** (2013) *Multi-dimensional characterization of soil surface roughness for microwave remote sensing applications* [PhD Thesis]. Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Massoussi, N.;** Keita, E.; Roussel, N. (2017) *The heterogeneous nature of bleeding in cement pastes*. Cement and Concrete Research 95, pp. 108-116.
- Mesbah, H. A.;** Yahia, A.; Khayat, K. H. (2011) *Electrical conductivity method to assess static stability of self-consolidating concrete*. Cement and Concrete Research 41 (5), pp. 451-458.
- Meyer, L.;** Fingerloos, F.; Schwabach, E.; Wiens, U. (2018) *Aktuelle Tendenzen in der Betonbautechnik - Ein Ausblick mit kurzen Rückblicken*. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2), S. 158-165.

- Mockenhaupt, A.** (2021) *Qualitätsmanagement 4.0.* in: Mockenhaupt, A. [Hrsg.] *Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Produktion.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 285-296.
- Moffatt, J. S.;** Haist, M.; Stiefel, S.; Müller, H. S. (2015) *Probabilistic Mix-Design Methods as Basis for the Development of Robust Cement-Reduced High Performance Concretes* in: Stark, J.; Fischer, H.-B. [Hrsg.] *Tagungsbericht ibausil, 20. Internationale Baustofftagung,* Weimar. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. Band 1, S. 1115-1124.
- Mora, C. F.;** Kwan, A. K. H.; Chan, H. C. (1998) *Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing.* *Cement and Concrete Research* 28 (6), pp. 921-932.
- Morris, P. H.;** Dux, P. F. (2010) *Analytical solutions for bleeding of concrete due to consolidation.* *Cement and Concrete Research* 40 (10), pp. 1531-1540.
- Mouhasseb, H.** (2007) *Bestimmung des Wassergehalts bei Beton mittels eines neuen dielektrischen Messverfahrens* [Dissertation] Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).
- Müller, F. V.** (2012) *Design criteria for low binder Self-Compacting Concrete, Eco-SCC.* [PhD Thesis], Reykjavik University.
- Murata, J.;** Kukawa, H. (1992) *Viscosity Equation for Fresh Concrete.* *Materials Journal* 89 (3), pp. 230-237.
- Naji, S.;** Hwang, S. W.; Khayat, K. H. (2011) *Robustness of self-consolidating concrete incorporating different viscosity-enhancing admixtures.* *ACI Materials Journal,* pp. 432-438.
- Naji, S.;** Khayat, K.-H.; Karray, M. (2017) *Assessment of Static Stability of Concrete Using Shear Wave Velocity Approach.* *Materials Journal* 114 (1), pp. 105-115.
- Navarrete, I.;** Lopez, M. (2016) *Estimating the segregation of concrete based on mixture design and vibratory energy.* *Construction and Building Materials* 122, pp. 384-390.
- Nehdi, M.;** Al-Martini, S. (2009) *Coupled Effects of High Temperature, Prolonged Mixing Time, and Chemical Admixtures on Rheology of Fresh Concrete.* *Materials Journal* 106 (3), pp. 231-240.
- Neumann, J.;** Simon, J.-W.; Reese, S. (2018) *Digital sieving of irregular 3D particles - a study using XRCT and statistically similar synthetic data.* *Powder Technology* 338, pp. 1001-1015
- Nguyen, M. T.;** van Hau, Q.; Chin, S.; Park, S. (2021) *In-situ concrete slump test incorporating deep learning and stereo vision.* *Automation in Construction* 121, 103432.
- Nguyen, T. L. H.;** Roussel, N.; Coussot, P. (2006) *Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid.* *Cement and Concrete Research* 36 (10), pp. 1789-1796.
- Nunes, S.;** Figueiras, H.; Milheiro O., Paula; C., Joana S.; Figueiras, J. (2006) *A methodology to assess robustness of SCC mixtures.* *Cement and Concrete Research* 36 (12), pp. 2115-2122.
- Otsu, N.** (1979) *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms.* *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9 (1), pp. 62-66.

- Özcan, S.** (2010) *Prozessorientiertes ProjektQualitätsManagement (PPQM). Ein Beitrag für das organisationsübergreifende Projekt- und Qualitätsmanagement am Beispiel des Straßenbaus* [Dissertation]. Universität Kassel.
- Ozen, M.;** Guler, M. (2020) *Quantification of Segregation in Portland Cement Concrete Based on Spatial Distribution of Aggregate Size Fractions*. Image Analysis & Stereology 39 (3), pp. 147-159.
- Panesar, D. K.;** Shindman, B. (2012) *The effect of segregation on transport and durability properties of self consolidating concrete*. Cement and Concrete Research 42 (2), pp. 252-264.
- Pauß, M.** (1957) *Die Wasserabsonderung bei frischen Zementleimen und nassen Steinmehlen* [Dissertation]. RWTH Aachen.
- Peiponen, K-E.;** Juuti, M. (2006) *Statistical parameters for gloss evaluation*. Applied Physics Letters 88 (7), pp. 71-104.
- Peng, Y.;** Jacobsen, S. (2013) *Influence of water/cement ratio, admixtures and filler on sedimentation and bleeding of cement paste*. Cement and Concrete Research 54, S. 133–142.
- Petersson, Ö.;** Billberg, P. (1999) *Investigation on blocking of self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler* in: Skarendahl, A.; Petersson, Ö. [eds.] *First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Stockholm, Schweden. RILEM Publications SARL. pp. 333-344.
- Peyerl, M. A.** (2012) *Fracture mechanical and stereoscopic characterization of cement bonded interfaces* [Phd-Thesis]. Technische Universität Wien.
- Pfeifer, T.** (2001) *Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken*. 3. völlig überarb. und erw. Aufl. München: Hanser.
- Powers, T. C.** (1939) *The Bleeding of Portland cement paste, mortar and concrete*. ACI Journal Proceedings (95), pp. 465-480.
- Powers, T. C.** (1968) *The Properties of Fresh Concrete*. New York: John Wiley & Sons.
- Proske, T.;** Graubner, C.-A. (2003) *Influence of the coarse aggregates on the fresh concrete properties*. Darmstadt Concrete 18.
- Rautenberg, U.;** Wiggenhagen, M. (2002) *Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1. PFG 2*, S. 117-124.
- Reinecke, R.** (2002) *Haftverbund und Rissverzahnung in unbewehrten Betonschubfugen* [Dissertation]. Technische Universität München.
- Reiner, M.:** (1958) *Rheology* in: Flügge, S. [ed.] *Elasticity and Plasticity*, 3/6 pp. 434-550.
- Reiners, J.;** Müller, C.; Penttilä, J.; Breitenbücher, R. (2015) *Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe*. beton 65 (12), S. 617-622.
- Reinhardt, H. W.;** Grosse, C. U. (2004) *Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete*. Construction and Building Materials 18 (3), pp. 145-154.
- Reinhardt, H. W.;** Große, C. U.; Herb, A. T. (2000) *Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar - A new device*. Materials and Structures 33 (9), pp. 581-583.

- Ren, S.;** He, K.; Girshick, R.; Sun, J. (2015) *Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks*. Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS) (28), pp. 91-99.
- Rickert, J.;** Hermann, J. (2013) *Verringerung von Farbunterschieden in Sichtbetonflächen: Einflüsse verflüssigender Betonzusatzmittel und der Vibrationsverdichtung*. beton 63 (3), S. 72-79.
- Rodehorst, V.** (2004) *Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion im Nahbereich durch Auto-Kalibrierung mit projektiver Geometrie* [Dissertation]. Technische Universität Berlin. Berlin.
- Rosquoët, F.;** Alexis, A.; Khelidj, A.; Phelipot, A. (2003) *Experimental study of cement grout*. Cement and Concrete Research 33 (5), pp. 713-722.
- Rößler, C.** (2006) *Hydratation, Fließfähigkeit und Festigkeitsentwicklung von Portlandzement – Einfluss von Fließmitteln, Alkalisulfaten und des Abbindereglers* [Dissertation]. Bauhaus-Universität Weimar.
- Roussel, N.;** Coussot, P. (2005) *"Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: from slump to spreading flow*. Journal of Rheology 49 (3), pp. 705-718.
- Roussel, N.** (2006) *Correlation between Yield Stress and Slump: Comparison between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results*. Materials and Structures 39 (4), pp. 501-509.
- Roussel, N.** (2007a) *A Theoretical Frame to Study Stability of Fresh Concrete*. Materials and Structures 39 (1), pp. 81-91.
- Roussel, N.** (2007b) *The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC*. Materials and Structures 40 (9), pp. 889-896.
- Safawi, M. I.;** Iwaki, I.; Miura, T. (2005) *A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete*. Cement and Concrete Research 35 (9), pp. 1834-1845.
- Santos, P. M. D.;** Júlio, E. N. B. S. (2013) *A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces*. Construction and Building Materials 38, pp. 912-923.
- Schaeper, M.;** Kreye, J. (2011) *Feuchtemessung an Beton mit elektronischen Messgeräten*. Bauingenieur 86 (11), S. 501-509.
- Schiebl, P.** (1998) *Bluten von Frischbeton. Schlußberichte zu den Forschungsaufträgen 3118 und 3119 der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)*. Düsseldorf: Beton-Verlag, (Schriftenreihe des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. Duisburg).
- Schmidt, W.** (2014) *Design concepts for the robustness improvement of self-compacting concrete: effects of admixtures and mixture components on the rheology and early hydration at varying temperatures* [PhD Thesis]. Technische Universität Eindhoven.
- Schmidt, W.;** Kühne, H.-C. (2015) *Kusum-Kontrollkarten mit V-Maske in der Prozesssteuerung*. BWI – BetonWerk International (4), S. 72-78.
- Schmidt, W.;** Kühne, H.-K.; Haamkens, F. (2014): *Shewhart- und CUSUM-Kontrollkarten zur gleichzeitigen Prozesssteuerung und Konformitätsbewertung*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 109 (6), S. 417–427.

- Schowalter, W. R.** (1998) *Toward a rationalization of the slump test for fresh concrete. Comparisons of Calculations and Experiments* 42 (4), pp. 865-870.
- Schulz, R.-R.** (2016) *Fortschritte bei der Rauheitsbewertung von Betonoberflächen*. beton 66 (12), S. 502-510.
- Schulz, R.-R.** (2017) *Laser schlägt Sand - Rautiefenmessung an Betonoberflächen*. B+B Bauen im Bestand (4), S. 44-48.
- Schwanda, F.** (1959) *Der Hohlraumgehalt von Korngemischen*. beton 9 (9), S. 12–19.
- Seyler, S.; Schwarz, W.** (2006) *Moderne Industriephotogrammetrie im Bauwesen - Monitoring und Bewertung von Bauwerken* in: 17. Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen, Weimar. Bauhaus-Universität.
- Shelhamer, E.; Long, J.; Darrell, T.** (2017) *Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 39 (4), pp. 640-651.
- Shen, L.; Jovein, H. B.; Li, M.** (2014) *Measuring static stability and robustness of self-consolidating concrete using modified Segregation Probe*. Construction and Building Materials 70, pp. 210-216.
- Shen, L.; Jovein, H. B.; Wang, Q.** (2016) *Correlating Aggregate Properties and Concrete Rheology to Dynamic Segregation of Self-Consolidating Concrete*. J. Mater. Civ. Eng. 28 (1), 4015067.
- Shen, L.; Strubble, I.; Lange, D. A.** (2009a) *Modeling Dynamic Segregation of Self-Consolidating Concrete*. Materials Journal 106 (4), pp. 375-380.
- Shen, L.; Struble, L.; Lange, D.** (2009b) *Modeling Static Segregation of Self-Consolidating Concrete*. In: *ACI Materials Journal* 106 (4), pp. 367-374.
- Shotton, J.; Kohli, P.** (2014) *Semantic Image Segmentation* in: Katsushi, I. [ed.] *Computer vision. A reference guide*. Boston: Springer, pp. 713-716.
- Shyshko, S.** (2013) *Numerical simulation of the rheological behavior of fresh concrete* [Dissertation]. Technische Universität Dresden.
- Siebert, B.; Hegner, L.; Nink, J.** (2020) *Überwachung des Wassergehaltes im Frischbeton mittels Mikrowellensonde*. BWI - BetonWerk International (5), S. 34-42.
- Simonyan, K.; Zisserman, A.** (2015) *Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition*. In: *Proceedings of ICLR 2015*.
- Spangenberg, J.; Roussel, N.; Hattel, J. H.; Stang, H.; Skocek, J.; Geiker, M. R.** (2012) *Flow induced particle migration in fresh concrete: Theoretical frame, numerical simulations and experimental results on model fluids*. Cement and Concrete Research 42 (4), pp. 633-641.
- Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.** (1998) *Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel*. Betontechnische Berichte 1995-1997, S. 45-60.

- Spörel, F.** (2018) *Anwendung eines Prüfverfahrens zur Ermittlung der Sedimentationssensibilität von Rüttelbeton* in: Stark, J.; Fischer, H.-B.: *Tagungsbericht ibausil, 20. Internationale Baustofftagung*, Weimar. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. Band 1, S. 1089-1097.
- Spörel, F.** (2019) *Entmischungssensibilität von Beton – Bauliche Defizite, Erkenntnisstand, normatives Konzept* in: Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] *Neubau von Wasserbauwerken*. Karlsruhe. S. 12-20.
- Steinauer, B.;** Ueckermann, A. (1999) *Ein vereinfachtes Verfahren zur Auswertung der Längsebenheit von Straßen*. Straße und Autobahn (4), S. 173-182.
- Steinhäuser, H.;** Begemann, C.; Lohaus, L. (2015) *Stabilität und Robustheit fließfähiger Betone unter Rüttelwirkung* in: Stark, J.; Fischer, H.-B. [Hrsg.] *Tagungsbericht ibausil, 19. Internationale Baustofftagung*, Weimar. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. Band 1, S. 1239-1246
- Steinour, H. H.** (1945) *Further Studies of the Bleeding of Portland Cement Paste*. Chigago: Research Laboratory of the Portland.
- Stieß, M.** (2009) *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sun, Z.;** Wang, C.; Hao, X.; Li, W.; Zhang, X. (2020) *Quantitative evaluation for shape characteristics of aggregate particles based on 3D point cloud data*. Construction and Building Materials 263,120156.
- Süße, H.;** Rodner, E. (2014) *Bildverarbeitung und Objekterkennung. Computer Vision in Industrie und Medizin*. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).
- Szeliski, R.** (2011) *Computer vision. Algorithms and applications*. London: Springer (Texts in computer science).
- Tan, T. S.;** Wee, T. H.; Tan, S. A.; Tam, C. T.; Lee, S. L. (1987) *A consolidation model for bleeding of cement paste*. Advances in Cement Research 1 (1), pp. 18-26.
- Tatarin, R.;** Erfurt, W.; Stark, J. (2006) *Untersuchungen mit Laser-Ultraschall während der Hydratation zementgebundener Baustoffe* in: Stark, J.; Fischer, H.-B. [Hrsg.] *Tagungsbericht ibausil, 16. Internationale Baustofftagung*, Weimar. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. Band 1, S. 1131-1139.
- Tattersall, G. H.** (1991) *Workability and Quality Control of Concrete*. Boca Raton: CRC Press.
- Tattersall, G. H.;** Baker, P. H. (1988) *The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete*. Magazine of Concrete Research 40 (143), pp. 79-89.
- Thrane, L. N.** (2007) *Form Filling with Self-Compacting Concrete* [PhD Thesis]. Technical University of Denmark.
- Thrane, L. N.;** Pade, C.; Nielsen, C. V.; Jeknavorian, A. A.; Schemmel, J. J.; Dean, S. W. (2010) *Determination of Rheology of Self-Consolidating Concrete Using the 4C-Rheometer and How to Make Use of the Results*. Journal ASTM International 7 (1), 102003.

- Tregger, N.;** Ferrara, L.; Shah, S.; Jeknavorian, A. A.; Schemmel, J. J.; Dean, S. W. (2010) *Predicting Dynamic Segregation of Self-Consolidating Concrete from the Slump-Flow Test*. In: Journal of ASTM International 7 (1), 101970.
- Tregger, N.;** Gregori, A.; Ferrara, L.; Shah, S. (2012) *Correlating dynamic segregation of self-consolidating concrete to the slump-flow test*. Construction and Building Materials 28 (1), pp. 499-505.
- Tuttas, S. A.** (2017) *Erfassung von Bauteilen durch photogrammetrische Punktwolken und Abgleich eines 4D-Bauwerkmodells zur Baufortschrittskontrolle* [Dissertation]. Technische Universität München.
- van der Vurst, F.** (2017) *The mechanisms governing the robustness of fresh self-compacting concrete* [Phd-Thesis]. Universität Gent.
- van der Vurst, F.;** Grünewald, S.; De Schutter, G. (2015) *The positive and negative influences of VMA's on the robustness of fresh self-compacting concrete*. in: Stark, J.; Fischer, H.-B. [Hrsg.] *Tagungsbericht ibausil, 19. Internationale Baustofftagung*, Weimar. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. Band 1, S. 1-8.
- Verein Deutscher Zementwerke e. V.** [Hrsg.] (2008) *Zement-Taschenbuch 2008*. 51. Auflage. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH.
- Vogel, M.;** Kotan, E.; Müller, H. S. (2018) *Zerstörungsfreie Untersuchung von Beton mittels Impuls-Echo-Methode - Möglichkeiten und Grenzen*. Bautechnik 95 (2), S. 148-156.
- Vogler, N.;** Gluth, G. J. G.; Oppat, K.; Kühne, H.-C. (2015) *Charakterisierung von Bauteiloberflächen mittels Lasertriangulation bei der Instandsetzung* in: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik [Hrsg.] *Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer*. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 53. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 445-454.
- Wagner, J. P.** (2018) *Baustellenrelevante Betoneigenschaften - ein Weg zur Qualitätsverbesserung*. in: Stark, J.; Fischer, H.-B. [Hrsg.] *Tagungsbericht ibausil, 20. Internationale Baustofftagung*, Weimar. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde. Band 1, S. 221-229.
- Wagner, J.-P.;** Reichertz, A. (2007) *Bluten von Frischbeton. Versuchsergebnisse mit dem Eimerverfahren des DBV-Merkblatts*. beton 57 (12), S. 558-565.
- Wallevik, J. E.** (2006) *Relationship between the Bingham parameters and slump*. Cement and Concrete Research 36 (7), pp. 1214-1221.
- Wallevik, O.** (2003) *Rheology - A scientific approach to develop self-compacting concrete* in: Wallevik, O.; Nielsson, I. [Hrsg.] *3rd International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete*, Reykjavik, Island. RILEM Publications S.A.R.L. pp. 23-31.
- Wang, D.;** Ren, B.; Cui, B.; Wang, J.; Wang, X.; Guan, T. (2021) *Real-time monitoring for vibration quality of fresh concrete using convolutional neural networks and IoT technology*. Automation in Construction 123, 103510.

- Wang, T.;** Chen, Y.; Qiao, M.; Snoussi, H. (2018) *A fast and robust convolutional neural network-based defect detection model in product quality control*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 94 (9-12), S. 3465–3471.
- Weingraber, H.;** Abou-Aly, M. (1989) *Handbuch Technische Oberflächen. Typologie, Messung und Gebrauchsverhalten*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Wenzl, P.** (2008) *Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften von texturierten Verkehrsflächen aus Beton* [Dissertation]. Technische Universität München.
- Wheeler, J.** (1966) *Mechanism of Settling in Cement Paste*. Nature 212 (5066), pp. 1035-1036.
- Wheeler, J.;** Chatterji, K. (1972) *Settling of Particles in Fresh Cement Pastes*. Journal of the American Ceramic Society 55 (9), pp. 461-464.
- Wiggenhauser, H.;** Taffe, A. (2004) *Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen* in: Cziesielski, E. [Hrsg.] *Bauphysik-Kalender 2004*. Berlin: Ernst & Sohn. S. 305-418.
- Wiedemann, A.** (2004) *Handbuch Bauwerksvermessung. Geodäsie, Photogrammetrie, Laserscanning*. Basel: Birkhäuser Basel (Bauhandbuch).
- Wierig, H.-J.** (1989) *Verfahren zur Prüfung der Konsistenz von Frischmörtel und Frischbeton. Literaturlauswertung*. 2. unveränd. Auflage. Düsseldorf: Beton-Verl. (Schriftenreihe des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie).
- Wierig, H.-J.;** Nelskamp, H. (1983) *Messstreuungen bei der Prüfung der Frischbetonkonsistenz*. beton 33 (10), S. 380-384.
- Wiggenhagen, M.** (2008) *Anwendungsbeispiele der Nahbereichsphotogrammetrie in der Automobilindustrie*. PFG (5), S. 385-393.
- Wolf, G. W.** (1991) *A FORTRAN subroutine for cartographic generalization*. Computers & Geosciences 17 (10), S. 1359-1381.
- Wüstholtz, T.** (2005) *Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- Yang, M.;** Neubauer, C. M.; Jennings, H. M. (1997) *Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions*. Advanced Cement Based Materials 5 (1), pp. 1-7.
- Zack, G. W.;** Rogers, W. E.; Latt, S. A. (1977) *Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency*. Journal of Histochemistry and Cytochemistry 25 (7), pp. 741-753.
- Zerbino, R.;** Barragán, B.; Garcia, T.; Agulló, L.; Gettu, R. (2009) *Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete*. Materials and Structures 42 (7), pp. 947-960.
- Zhang, Z.;** Xiao, J.; Zhang, Q.; Han, K.; Wang, J.; Hu, X. (2021) *A state-of-the-art review on the stability of self-consolidating concrete*. Construction and Building Materials 268, 121099.
- Zilch, K.;** Lenz, P. (2016) *Digitale Bestimmung der Rauheit – Potenziale für Schubfugen/Digital measurement of roughness – potentials for interface shear*. Bauingenieur 91 (06), S. 248-258.
- Zlatev, M.** (2009) *Beitrag zur quantitativen Kornformcharakterisierung unter besonderer Berücksichtigung der digitalen Bildaufnahmetechnik* [Dissertation]. Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Zuo, W.; Liu, J.; Tian, Q.; Xu, W.; She, W.; Miao, C. (2018) *Norm method to define and evaluate robustness of self-compacting concrete due to component quantity variations*. Construction and Building Materials 161, p1p. 246-253.

Normen, Merkblätter und Patente

ASTM C232/C232M:2014-04 (2014) *Standard Test Method for Bleeding of Concrete*. American Society for Testing and Materials.

ASTM C 1611/C1611M:2018-10 (2018) *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. American Society for Testing and Materials.

DIN EN 206:2021-06 (2021) *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Beuth Verlag, Berlin. Fassung 2021-06

DIN EN 933-1:2021-07 (2021) *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren*. Beuth, Berlin.

DIN EN 933-4:2015-01 (2015) *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl*. Beuth, Berlin.

DIN 1045-2:2008-08 (2008) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Beuth, Berlin.

DIN 1045-3:2013-03 (2013) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung - Anwendungsregeln zu DIN EN 13670*. Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 4287:2010-07 (2010) *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 4288:1998-04 (1998) *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*. Beuth, Berlin.

DIN 4760:1982-06 (1982) *Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem*. Beuth, Berlin.

DIN ISO 5725-1:1997-11 (1997) *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe*. Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 9000:2015-11 (2015) *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Beuth, Berlin.

DIN ISO 9276-6:2012-01 (2012) *Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 6: Deskriptive und quantitative Darstellung der Form und Morphologie von Partikeln.* Beuth, Berlin.

DIN EN 12350-2:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton - Teil 2: Setzmaß.* Beuth, Berlin.

DIN EN 12350-4:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß.* Beuth, Berlin.

DIN EN 12350-5:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß.* Beuth, Berlin.

DIN EN 12350-6:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte.* Beuth, Berlin.

DIN EN 12350-7:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren.* Beuth, Berlin.

DIN EN 12350-8: 2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch.* Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 13565-3:200-08 (2000) *Geometrische Produktspezifikation - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 3: Beschreibung der Höhe von Oberflächen mit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurve.* Beuth, Berlin.

DIN EN 13670:2011-03 (2011) *Ausführung von Tragwerken aus Beton.* Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 16610-21:2013-06 (2013) *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 21: Lineare Profilverfilter: Gauß-Filter.* Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 16610-40:2016-12 (2016) *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 40: Morphologische Profilverfilter: Grundlegende Konzepte.* Beuth, Berlin.

DIN 18716-1:2017-06 (2017) *Photogrammetrie und Fernerkundung - Begriffe.* Beuth, Berlin.

DIN EN 19226-1:1995-01 (1995) *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe.* Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 25178-2:2012-09 (2012) *Geometrische Produktspezifikation - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen.* Beuth, Berlin.

DIN 55350:2021-10 (2021) *Begriffe zum Qualitätsmanagement.* Beuth, Berlin.

- (BAW-Ri 2019) Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] (2019): *Entmischungssensibilität von Beton (MESB)*. BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien. Karlsruhe
- (DBV-MB 2014) Deutscher Beton- und Bautechnikverein E.V. [Hrsg.] (2014) *DBV-Merkblatt: Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton*. Beuth, Berlin.
- (DBV-MB 2014a) Deutscher Beton- und Bautechnikverein E.V. [Hrsg.] (2014) *DBV-Merkblatt: Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen*. Beuth, Berlin.
- (FGSV-MB 2004) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [Hrsg.] (2004): *Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Fahrbahndecken aus Beton (M OB)*. FGSV Verlag GmbH, Köln
- (ÖVBB-MB 2009) Österreichische Bautechnik Vereinigung [Hrsg.] (2009) *ÖVBB-Merkblatt: Weiche Betone*. Wien
- (DAfStb-Ri 2012) Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [Hrsg.] (2012): *Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)*. Beuth, Berlin
- (DAEWOO 2007) DAEWOO ENGINEERING & CONSTRUCTION CO., LTD. (2008) *Automatic test system and test method for slump flow of concrete using computing device*. International Publication Number: WO 2008/111724 A1, filed 26.12.2007 and issued 18.09.2008.

Anhang

A-1 Segmentierungsverfahren

Schwellenwertverfahren

Das punktorientierte Schwellenwertverfahren (Tresholding) vergleicht den z-Wert (z. B. Grauwert (va)) jedes einzelnen Pixels mit einem festgelegten Schwellenwert (θ) mit der folgenden Segmentierungsfunktion ($f_s^{px}(px)$):

$$f_s^{px}(px) = \begin{cases} 1, & va < \theta \\ 0, & va \geq \theta \end{cases} \quad \text{Gl. A.1.1}$$

Bei Überschreitung von θ erhält das Pixel den Wert 1 in der Ergebnismatrix, andernfalls den Wert 0. Das Ergebnis ist stets eine binäre Segmentierung und stark vom gewählten Schwellenwert abhängig. Der Schwellenwert wird entweder manuell vom Nutzer oder automatisch durch lokale oder globale Analyseverfahren, z. B. mit der Methode nach Otsu (Otsu 1979) oder dem Triangle-Algorithmus (Zack et al. 1977) bestimmt. (Gutzeit 2015)

Region Growing

Region Growing ist ein halbautomatisches Segmentierungsverfahren. Beginnend vom sogenannten 'seed point' werden benachbarte Pixel iterativ zu einem Segment gruppiert. Die Gruppierung des Segmentes wächst bis ein festgelegtes Kriterium für die benachbarten Pixel nicht mehr erfüllt ist. Ähnlichkeit der Pixel sowie Homogenität oder Diskontinuität eines Segments stellen geeignete Kriterien dar. (Gutzeit 2015)

Convex Hull

Convex Hull beschreibt einen Algorithmus zur Ermittlung der konvexen Hülle einer planaren Punktwolke. Dabei wird das konvexe Polygon mit der minimalen Fläche gebildet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der sogenannte Quick Hull angewendet (Barber et al. 1996), da dieser direkt in *MATLAB* zur Verfügung steht. Als Bezeichnung wird im Rahmen dieser Arbeit Convex Hull verwendet.

Watershed

Der Watershed-Algorithmus betrachtet die einzelnen Pixel eines Bildes als Höhenwerte und „flutet“ das so entstehende Gebirge mit Wasser. Während des iterativen Prozesses bilden sich wachsende Seen. Bei Zusammenstoß zweier Seen bilden sich sogenannte Wasserscheiden bzw. Segmentgrenzen. Der iterative Prozess wird bis zur vollständigen „Flutung“ des Bildes fortgesetzt. (Gutzeit 2015)

B-1 Charakteristische Daten der verwendeten Ausgangsstoffe

Tabelle B1.1: Überblick über die charakteristischen Daten der verwendeten Zemente und Zusatzstoffe

Bezeichnung	Dichte	Mahlfeinheit nach Blaine	Erstarrungsbeginn	Erstarrungsende	Wasseranspruch (Puntke-Verf.)	Druckfestigkeit		
	[kg/dm ³]	[cm ² /g]	[min]	[min]	[%]	2 Tage	7 Tage	28 Tage
CEM I 42,5 R	3,13	2980	145	230	43,7	30,5	45,5	54,2
CEM II/A-S 42,5 R	3,08	3284	130	155	43,3	28,8	43,2	56,6
CEM II/A-LL 42,5 N	3,08	4545	125	165	43,2	23,7	44,0	57,2
Steinkohlenflugasche	2,28	3625	-	-	40,3	-	-	-

Tabelle B1.2: Überblick über die charakteristischen Daten der verwendeten Gesteinskörnungs-Fractionen (Weser)

Fraktion	Siebdurchgang [M.-%]							
	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
	[mm]							
0/2	10,5	46,1	80,9	97,2	100,0	100,0	100,0	100,0
2/8	0,1	0,5	1,5	8,8	38,3	90,6	100,0	100,0
8/16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	12,9	97,8	100,0
16/32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	16,8	100,0

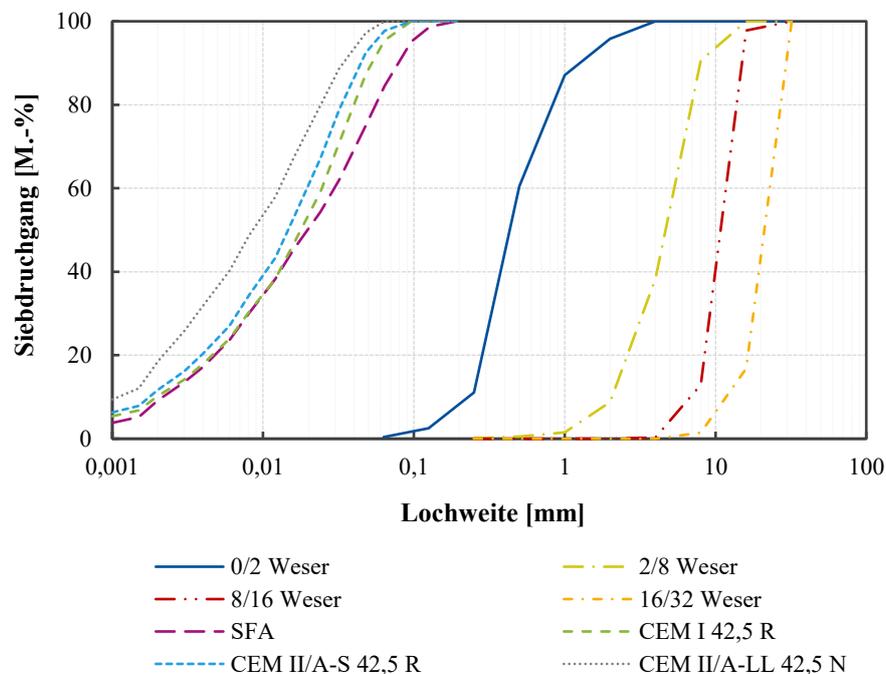


Abbildung B1.1: Korngrößenverteilung der verwendeten Zemente und Zusatzstoffe sowie der einzelnen Gesteinskörnungsfractionen (0/2, 2/8, 8/16, 16/32); dargestellt ist Weser-Kies; die weiteren verwendeten Gesteinsarten wiesen vergleichbare Verteilungskurven auf

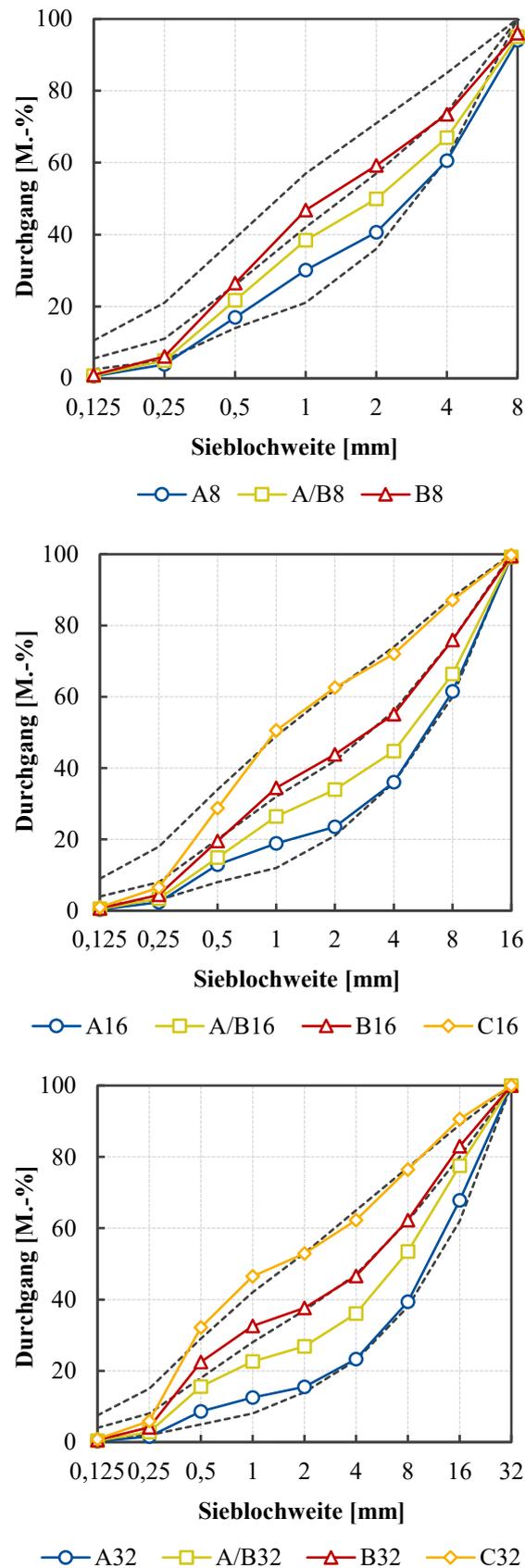


Abbildung B1.2: Korngrößenverteilungen entsprechend der Regelsieblinien A, B, C in Abhängigkeit des Größtkorns; dargestellt ist Weser-Kies



Abbildung B1.3: Visueller Eindruck der verwendeten Gesteinsarten der einzelnen Fraktionen (2/8, 8/16, 16/32) mit dazugehörigen Kornformparametern; SI = Shape-Index gemäß *DIN EN 933-4:2015-01*

B-2 Betonzusammensetzungen

Tabelle B2.1: Betonzusammensetzungen und Frischbetoneigenschaften

Mischungs- bezeichnung	Z	ZS	GK	Sieb- linie	MKG	LG	w/z bzw. w/z _{eq.}	FM	Ausbreitmaß			Roh- dichte	max. WA	
	[-]	[-]	[mm]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[M.-% v. Zem.]	[cm]	Ø	[kg/dm ³]			
M1	Z1	-	16	A/B	435	354	0,50	-	50,8	50,8	52,8	51,4	2,37	-
M2	Z1	SFA	16	A/B	322	279	0,60	0,5	43,5	-	-	43,5	2,39	-
M3	Z1	SFA	16	A/B	322	279	0,60	1,0	48,5	50,0	46,5	48,3	2,39	0,0
M4	Z1	SFA	16	A/B	322	279	0,60	1,3	51,5	52,5	48,0	50,7	2,38	-
M5	Z1	SFA	16	A/B	339	279	0,55	0,6	44,5	43,5	44,5	44,2	2,39	0,0
M6	Z1	SFA	16	A/B	338	279	0,55	1,8	50,0	53,0	48,0	50,3	2,41	0,0
M7	Z1	SFA	16	A/B	339	279	0,55	1,8	49,0	-	-	49,0	2,40	-
M8	Z1	SFA	16	A/B	339	279	0,55	1,8	46,0	-	-	46,0	2,39	-
M9	Z1	SFA	16	A/B	339	279	0,55	1,8	49,5	-	-	49,5	2,39	-
M10	Z1	SFA	16	A/B	339	279	0,55	1,8	49,0	-	-	49,0	2,41	-
M11	Z1	SFA	16	A/B	339	289	0,58	1,8	53,0	-	-	53,0	2,38	-
M12	Z1	SFA	16	A/B	339	289	0,58	1,8	52,8	-	-	52,8	2,38	-
M13	Z1	SFA	16	A/B	339	289	0,58	1,8	53,3	-	-	53,3	2,39	-
M14	Z1	SFA	16	A/B	339	289	0,58	1,8	53,3	-	-	53,3	2,36	-
M15	Z1	SFA	16	A/B	339	294	0,60	1,8	53,5	-	-	53,5	2,36	-
M16	Z1	SFA	16	A/B	339	294	0,60	1,8	53,0	-	-	53,0	2,35	-
M17	Z1	SFA	16	A/B	339	294	0,60	1,8	55,0	-	-	55,0	2,36	-
M18	Z1	SFA	16	A/B	339	294	0,60	1,8	55,0	-	-	55,0	2,35	-
M19	Z1	SFA	16	A/B	338	294	0,60	0,5	51,5	49,5	50,0	50,3	2,36	3,6
M20	Z1	SFA	32	A/B	337	278	0,55	0,7	52,5	51,3	50,3	51,3	2,38	2,0
M21	Z1	SFA	16	A/B	350	304	0,60	0,1	43,8	45,0	44,0	44,3	2,37	5,2
M22	Z1	SFA	16	A/B	350	304	0,60	0,6	49,5	52,0	51,0	50,8	2,38	3,2
M23	Z1	SFA	16	A/B	350	304	0,60	0,6	53,0	-	-	53,0	2,35	-
M24	Z1	SFA	16	A/B	350	304	0,60	0,7	56,0	59,5	57,0	57,5	2,36	4,3
M25	Z1	SFA	16	A/B	358	280	0,51	2,1	44,0	52,0	45,5	47,2	2,42	-
M26	Z1	SFA	16	A/B	358	280	0,51	2,2	47,0	56,0	47,0	50,0	2,38	0,0
M27	Z1	SFA	16	A/B	358	280	0,51	2,3	46,5	54,5	51,5	50,8	2,44	8,6
M28	Z1	SFA	8	A/B	373	306	0,55	2,4	51,5	49,5	50,5	50,5	2,35	-
M29	Z1	SFA	16	A/B	368	304	0,55	0,4	43,5	44,0	43,5	43,7	2,39	-
M30	Z1	SFA	16	A/B	368	304	0,55	0,9	50,0	50,5	56,0	52,2	2,38	1,5
M31	Z1	SFA	16	A/B	368	304	0,55	0,9	53,5	-	-	53,5	2,39	-
M32	Z1	SFA	16	A/B	368	304	0,55	0,9	53,8	-	-	53,8	2,41	-
M33	Z1	SFA	16	A/B	368	304	0,55	0,9	50,3	-	-	50,3	2,40	-
M34	Z1	SFA	16	A/B	368	304	0,55	0,9	53,5	-	-	53,5	2,38	-
M35	Z1	SFA	16	A/B	368	309	0,57	0,9	55,0	-	-	55,0	2,39	-
M36	Z1	SFA	16	A/B	339	304	0,63	0,9	58,3	-	-	58,3	2,36	-
M37	Z1	SFA	16	A/B	339	304	0,63	0,9	55,5	-	-	55,5	2,36	-
M38	Z1	SFA	16	A/B	368	319	0,60	0,9	61,3	-	-	61,3	2,37	-
M39	Z1	SFA	16	A/B	368	319	0,60	0,9	61,3	-	-	61,3	2,35	-
M40	Z1	SFA	16	A/B	368	319	0,60	0,9	60,3	-	-	60,3	2,34	-
M41	Z1	SFA	16	A/B	368	319	0,60	0,9	62,5	-	-	62,5	2,36	-
M42	Z1	SFA	16	A/B	368	304	0,55	0,9	58,5	60,0	58,5	59,0	2,37	-
M43	Z1	SFA	16	A	365	303	0,55	0,2	50,0	-	-	50,0	2,39	4,5
M44	Z1	SFA	16	B	385	310	0,55	1,4	50,5	53,0	46,0	49,8	2,35	0,0

Anhang

Mischungs- bezeichnung	Z	ZS	GK	Sieb- linie	MKG	LG	w/z bzw. w/z _{eq.}	FM	Ausbreitmaß				Roh- dichte	max. WA
	[-]	[-]	[mm]	[-]	[kg/m³]	[kg/m³]	[-]	[M.-% v. Zem.]	[cm]	Ø		[kg/dm³]		
M45	Z3	SFA	16	B	385	310	0,55	-	49,0	-	-	49,0	2,36	-
M46	Z3	SFA	16	B	385	320	0,58	-	55,5	-	-	55,5	2,34	-
M47	Z3	SFA	16	B	385	325	0,60	-	59,0	-	-	59,0	2,32	-
M48	Z1	SFA	16	A/B	368	320	0,60	0,2	53,0	52,5	-	52,8	2,35	8,5
M49	Z1	SFA	32	A/B	366	304	0,55	0,5	51,8	49,8	50,0	50,5	2,39	-
M50	Z1	-	16	A/B	314	284	0,60	-	38,0	38,5	38,5	38,3	2,40	2,5
M51	Z1	SFA	16	A/B	378	290	0,48	1,9	45,3	43,3	43,3	44,0	2,40	-
M52	Z1	SFA	16	A/B	379	329	0,60	-	49,5	50,0	51,0	50,2	2,34	8,0
M53	Z1	SFA	16	A/B	378	329	0,60	-	50,0	-	-	50,0	2,36	-
M54	Z1	SFA	16	A/B	378	329	0,60	0,5	60,5	67,0	63,0	63,5	2,38	7,6
M55	Z1	SFA	16	A/B	389	304	0,50	1,8	53,0	57,0	51,5	53,8	2,42	0,0
M56	Z1	SFA	16	A/B	389	304	0,50	1,5	46,5	45,5	43,0	45,0	2,41	-
M57	Z1	SFA	16	A/B	389	304	0,50	1,4	54,3	-	61,0	57,6	2,39	-
M58	Z1	-	32	A/B	329	283	0,50	-	39,5	41,5	40,0	40,3	2,39	4,8
M59	Z1	SFA	16	A/B	398	329	0,55	0,3	54,3	-	-	54,3	2,36	-
M60	Z1	SFA	16	A/B	398	329	0,55	0,3	50,0	53,0	49,5	50,8	2,39	-
M61	Z1	SFA	16	A/B	398	329	0,55	0,1	45,0	45,0	44,5	44,8	2,35	-
M62	Z1	SFA	16	A/B	398	329	0,55	0,4	53,0	54,0	51,0	52,7	2,36	1,9
M63	Z1	SFA	16	A/B	398	339	0,58	0,4	64,0	-	-	64,0	2,36	-
M64	Z1	SFA	16	A/B	398	334	0,56	0,4	60,5	-	-	60,5	2,39	-
M65	Z1	SFA	16	A/B	398	339	0,58	0,3	63,0	-	-	63,0	2,34	-
M66	Z1	SFA	16	A/B	398	344	0,59	0,3	64,5	-	-	64,5	2,36	-
M67	Z1	SFA	16	A/B	398	329	0,55	0,3	50,0	53,0	49,5	50,8	2,34	-
M68	Z1	SFA	16	A/B	398	329	0,55	0,6	59,5	60,5	61,0	60,3	2,36	-
M69	Z1	SFA	16	A/B	397	346	0,60	-	54,5	52,5	55,0	54,0	2,34	14,7
M70	Z1	SFA	32	A/B	396	329	0,55	-	49,8	51,8	49,8	50,5	2,37	-
M71	Z1	SFA	8	A/B	402	331	0,55	0,6	44,0	-	-	44,0	2,32	-
M72	Z1	SFA	8	A/B	402	341	0,58	0,6	54,5	-	-	54,5	2,35	-
M73	Z1	SFA	8	A/B	402	346	0,59	0,6	60,0	-	-	60,0	2,32	-
M74	Z1	SFA	8	A/B	402	336	0,56	0,6	45,0	-	-	45,0	2,34	-
M75	Z1	-	8	A/B	402	331	0,55	1,0	51,0	49,0	49,0	49,7	2,30	-
M76	Z2	-	16	A/B	335	304	0,60	-	40,5	45,0	42,0	42,5	2,36	3,7
M77	Z1	-	16	A/B	335	304	0,60	-	42,0	48,0	43,5	44,5	2,38	8,3
M78	Z2	-	16	A/B	335	307	0,60	-	42,5	46,5	42,5	43,8	2,34	8,0
M79	Z1	SFA	16	A/B	406	354	0,60	-	60,5	Foto	Foto	60,5	2,34	-
M80	Z1	SFA	16	A/B	406	354	0,60	0,3	62,5	66,0	66,0	64,8	2,26	-
M81	Z1	SFA	16	A/B	411	314	0,48	1,2	51,5	50,5	54,5	52,2	2,34	-
M82	Z1	SFA	16	A/B	421	307	0,44	1,8	55,5	-	-	55,5	2,36	-
M83	Z1	SFA	16	A/B	421	307	0,44	1,8	56,5	-	-	56,5	2,37	-
M84	Z1	SFA	16	A/B	421	307	0,44	1,8	54,0	-	-	54,0	2,35	-
M85	Z1	SFA	16	A/B	421	307	0,44	1,0	53,5	-	-	53,5	-	-
M86	Z1	SFA	16	A/B	421	307	0,44	1,0	56,5	-	-	56,5	-	-
M87	Z1	SFA	16	A/B	421	307	0,44	1,0	54,5	-	-	54,5	-	-
M88	Z1	SFA	16	A/B	421	307	0,44	3,0	58,0	-	-	58,0	2,32	-
M89	Z1	SFA	16	A/B	421	307	0,44	2,6	53,0	-	-	53,0	2,35	-
M90	Z1	SFA	16	A/B	421	307	0,44	2,6	54,0	-	-	54,0	2,34	-
M91	Z1	SFA	16	A/B	421	330	0,51	0,5	43,0	48,0	43,0	44,7	2,38	1,5
M92	Z1	SFA	16	A/B	421	330	0,51	0,7	49,0	51,0	51,3	50,4	2,39	1,0
M93	Z1	-	16	B	371	311	0,55	-	36,0	-	-	36,0	2,36	5,5

Mischungs- bezeichnung	Z	ZS	GK	Sieb- linie	MKG	LG	w/z bzw. w/z _{eq.}	FM	Ausbreitmaß		Roh- dichte	max. WA	
	[-]	[-]	[mm]	[-]	[kg/m³]	[kg/m³]	[-]	[M.-% v. Zem.]	[cm]	Ø	[kg/dm³]		
M94	Z2	-	16	A/B	355	323	0,60	0,1	52,8	-	52,8	2,34	-
M95	Z2	-	16	A/B	355	323	0,60	0,2	51,0	-	51,0	2,36	-
M96	Z2	-	16	A/B	355	323	0,60	0,1	53,5	-	53,5	2,33	-
M97	Z3	-	16	A/B	355	322	0,60	0,1	52,0	-	52,0	2,34	-
M98	Z3	-	16	A/B	355	322	0,60	0,1	52,5	-	52,5	2,38	-
M99	Z1	-	16	A/B	355	306	0,55	-	43,5	-	43,5	2,38	4,8
M100	Z1	-	16	A/B	355	306	0,55	-	43,5	-	43,5	2,37	6,8
M101	Z1	-	16	A/B	355	306	0,55	0,1	47,5	-	47,5	2,36	-
M102	Z1	-	16	A/B	355	306	0,55	-	53,3	-	53,3	2,39	-
M103	Z1	-	16	A/B	355	316	0,55	-	49,0	-	49,0	2,35	10,1
M104	Z1	-	16	A/B	355	316	0,58	-	48,8	-	48,8	2,35	11,6
M105	Z1	-	16	A/B	355	321	0,55	-	52,0	-	52,0	2,34	13,5
M106	Z1	-	16	A/B	355	321	0,59	-	52,8	-	52,8	2,36	20,0
M107	Z1	-	16	A/B	355	311	0,55	-	45,5	-	45,5	2,35	6,7
M108	Z1	-	16	A/B	355	311	0,57	-	46,0	-	46,0	2,32	9,9
M109	Z3	-	16	A	352	304	0,55	0,1	47,8	-	47,8	2,36	9,2
M110	Z3	-	16	B	373	312	0,55	0,8	47,0	-	47,0	2,33	0,5
M111	Z3	-	16	B	373	312	0,55	0,6	52,5	-	52,5	2,34	-
M112	Z3	-	16	B	373	312	0,55	0,8	61,8	-	61,8	2,37	-
M113	Z1	-	16	*	376	314	0,55	0,1	48,5	-	50,5	2,35	17,4
M114	Z1	-	16	*	363	309	0,55	0,1	45,5	-	45,5	2,34	12,1
M115	Z1	-	16	*	376	314	0,55	0,2	46,5	-	45,5	2,37	5,2
M116	Z2	-	16	A/B	355	322	0,60	-	51,3	-	51,3	2,34	13,7
M117	Z2	-	16	A/B	355	338	0,64	-	60,5	-	60,5	2,30	20,9
M118	Z2	-	16	A/B	355	323	0,60	0,3	60,5	-	60,5	2,31	32,4
M119	Z2	-	16	A/B	355	323	0,60	-	53,0	-	53,0	2,36	14,1
M120	Z1	-	16	A/B	356	295	0,52	-	37,5	-	37,5	2,34	3,8
M121	Z1	-	16	A/B	355	306	0,55	0,2	45,8	-	45,8	2,38	4,6
M122	Z1	-	16	A/B	355	306	0,55	0,2	50,5	-	50,5	2,32	7,7
M123	Z1	-	16	A/B	355	306	0,55	-	47,0	-	47,0	2,30	-
M124	Z1	-	16	A/B	355	323	0,60	-	49,8	-	49,8	2,33	16,5
M125	Z1	-	16	A	352	322	0,60	-	55,0	-	55,0	2,35	-
M126	Z1	-	16	B	372	329	0,60	-	48,3	-	48,3	2,32	-
M127	Z1	-	16	B/C	345	319	0,60	0,9	51,0	-	51,0	2,35	-
M128	Z1	-	16	A	352	322	0,60	-	56,0	-	56,0	2,34	27,5
M129	Z1	-	16	A	352	322	0,60	-	56,5	-	56,5	2,38	-
M130	Z1	-	16	A/B	355	333	0,63	-	58,5	-	58,5	2,32	17,7
M131	Z3	-	16	A/B	355	305	0,55	0,2	47,5	-	47,5	2,34	6,1
M132	Z3	-	16	A/B	355	305	0,55	0,3	49,0	-	49,0	2,36	3,4
M133	Z3	-	16	A/B	355	323	0,60	-	53,3	-	53,3	2,31	-
M134	Z3	-	32	C	359	307	0,55	1,3	43,5	-	43,5	2,37	-
M135	Z3	-	32	A/B	354	305	0,55	-	47,0	-	47,0	2,36	6,5
M136	Z3	-	32	A	354	305	0,55	-	55,5	-	55,5	2,38	9,1
M137	Z3	-	32	B	354	305	0,55	0,2	48,0	-	48,0	2,39	6,5
M138	Z3	-	32	B/C	354	305	0,55	0,4	49,0	-	49,0	2,40	5,0
M139	Z3	-	32	A/B	354	315	0,58	-	50,5	-	50,5	2,34	9,6
M140	Z3	-	32	A/B	354	320	0,59	-	53,0	-	53,0	2,34	17,3
M141	Z3	-	32	A/B	354	305	0,55	-	50,5	-	50,5	2,36	7,0
M142	Z3	-	32	A/B	354	305	0,55	0,3	64,0	-	64,0	2,35	10,7

Anhang

Mischungs- bezeichnung	Z	ZS	GK	Sieb- linie	MKG	LG	w/z bzw. w/Ze _q .	FM	Ausbreitmaß			Roh- dichte	max. WA	
	[-]	[-]	[mm]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[M.-% v. Zem.]	[cm]	Ø	[kg/dm ³]			
M143	Z1	-	8	A/B	359	324	0,60	-	40,0	-	-	40,0	2,38	8,4
M144	Z1	SFA	16	A/B	426	363	0,58	-	52,0	53,5	57,0	54,2	2,32	-
M145	Z1	SFA	16	A/B	426	353	0,55	0,5	62,5	70,5	60,0	64,3	2,36	6,8
M146	Z1	SFA	16	A/B	426	363	0,58	0,2	58,5	60,5	60,5	59,8	2,29	-
M147	Z1	SFA	16	A/B	428	354	0,55	-	52,0	-	-	52,0	2,33	-
M148	Z1	SFA	16	A/B	428	364	0,58	-	56,0	-	-	56,0	2,36	-
M149	Z1	SFA	16	A/B	428	369	0,59	-	58,3	-	-	58,3	2,35	-
M150	Z1	SFA	8	A/B	432	356	0,55	0,5	54,3	53,5	53,5	53,8	2,33	8,3
M151	Z1	-	8	A/B	366	331	0,60	-	39,0	35,0	41,5	38,5	2,29	-
M152	Z1	-	8	A/B	366	331	0,60	-	39,5	36,0	41,5	39,0	2,30	-
M153	Z1	-	8	A/B	366	331	0,60	-	39,0	37,5	41,0	39,2	2,36	-
M154	Z1	SFA	16	A/B	444	339	0,48	0,6	52,0	54,0	-	53,0	2,34	-
M155	Z1	SFA	16	A/B	444	339	0,48	0,4	43,0	41,0	42,5	42,2	2,37	-
M156	Z1	SFA	16	A/B	452	354	0,50	0,4	44,5	49,5	46,0	46,7	2,36	2,2
M157	Z1	SFA	16	A/B	452	354	0,50	0,2	45,0	49,5	44,0	46,2	2,36	3,3
M158	Z1	SFA	16	A/B	452	354	0,50	0,4	51,8	54,0	54,5	53,4	2,36	2,4
M159	Z1	-	16	A	371	303	0,50	-	40,0	-	-	40,0	2,39	-
M160	Z1	-	16	A/B	376	305	0,50	-	38,3	39,8	40,0	39,3	2,40	2,2
M161	Z1	-	16	A/B	375	305	0,50	-	36,5	36,0	36,8	36,4	2,46	5,7
M162	Z1	-	16	A/B	375	305	0,50	0,3	39,5	40,5	41,5	40,5	2,39	2,2
M163	Z1	-	16	A/B	375	305	0,50	0,6	51,3	54,5	55,0	53,6	2,40	1,0
M164	Z1	-	16	A/B	375	305	0,50	-	36,0	38,3	38,0	37,4	2,38	3,2
M165	Z1	-	16	A/B	375	335	0,50	-	39,0	40,3	41,5	40,3	2,50	9,3
M166	Z1	-	16	A/B	375	315	0,53	-	38,8	39,0	39,0	38,9	2,39	6,5
M167	Z1	-	16	A/B	375	320	0,56	-	43,5	43,8	45,5	44,3	2,36	4,3
M168	Z1	-	32	A/B	374	304	0,50	-	40,5	40,8	41,0	40,8	2,41	-
M169	Z3	-	8	A/B	379	324	0,55	0,7	50,5	-	-	50,5	2,33	13,4
M170	Z3	-	8	A	379	324	0,55	0,7	49,0	-	-	49,0	2,35	5,8
M171	Z3	-	8	B	379	324	0,55	1,1	50,5	-	-	50,5	2,38	4,7
M172	Z2	-	16	A/B	382	330	0,55	-	43,5	42,0	42,8	42,8	2,36	-
M173	Z2	-	16	A/B	382	330	0,55	-	43,8	44,0	44,0	43,9	2,35	-
M174	Z2	-	16	A/B	382	330	0,55	-	44,0	43,5	45,5	44,3	2,35	-
M175	Z1	-	16	B	399	336	0,55	-	49,5	-	-	49,5	2,34	7,0
M176	Z1	SFA	16	A/B	477	363	0,47	0,4	52,0	50,8	51,3	51,3	2,32	-
M177	Z1	-	16	A/B	405	330	0,50	-	42,8	45,0	45,0	44,3	2,37	3,3
M178	Z1	-	16	A	402	329	0,50	-	46,0	-	-	46,0	2,33	-
M179	Z1	-	16	B	422	336	0,50	-	40,5	-	-	40,5	2,34	-
M180	Z1	-	16	B	422	336	0,50	-	40,5	-	-	40,5	2,36	1,9
M181	Z1	-	16	A/B	405	330	0,50	-	41,8	43,3	44,3	43,1	2,38	-
M182	Z1	-	16	A/B	405	330	0,50	-	44,5	47,0	44,3	45,3	2,35	-
M183	Z1	-	16	A/B	405	330	0,50	-	45,0	46,0	45,8	45,0	2,38	6,3
M184	Z1	-	16	A/B	405	340	0,52	-	53,0	50,0	54,0	53,0	2,37	12,5
M185	Z1	-	16	A/B	405	345	0,54	-	62,0	57,0	60,0	62,0	2,38	20,4
M186	Z1	-	16	A/B	405	330	0,50	-	49,0	-	-	49,0	2,41	12,8
M187	Z1	-	32	A/B	403	329	0,50	-	50,5	52,3	48,3	50,3	2,40	-
M188	Z1	-	32	A/B	403	329	0,50	-	41,0	46,0	42,5	43,2	2,38	3,4
M189	Z1	-	32	A/B	403	329	0,50	-	40,5	46,0	42,5	43,0	2,36	2,5
M190	Z1	-	32	A/B	403	329	0,50	-	44,0	48,0	45,0	45,7	2,40	-
M191	Z1	-	8	A/B	409	331	0,50	-	36,5	36,3	37,3	36,7	2,33	-

Mischungs- bezeichnung	Z	ZS	GK	Sieb- linie	MKG	LG	w/z bzw. w/z _{eq.}	FM	Ausbreitmaß				Roh- dichte	max. WA
	[-]	[-]	[mm]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[M.-% v. Zem.]	[cm]	Ø		[kg/dm ³]		
M192	Z2	-	16	B	427	331	0,48	0,5	39,5	-	-	39,5	2,39	-
M193	Z1	-	16	B	426	360	0,55	-	59,0	-	-	59,0	2,37	-
M194	Z1	-	16	B	454	362	0,50	-	48,0	-	-	48,0	2,38	3,7
M195	Z1	-	16	A	432	353	0,50	-	48,8	49,0	48,5	48,8	2,35	-
M196	Z1	-	16	C	492	376	0,50	-	41,0	41,3	41,5	41,3	2,28	-
M197	Z1	-	32	A/B	433	354	0,50	-	49,3	51,0	48,5	49,6	2,39	-
M198	Z1	-	32	A/B	434	324	0,50	-	48,5	54,5	50,3	51,1	2,37	-
M199	Z1	-	8	A/B	438	377	0,55	-	56,5	58,8	58,3	57,8	2,32	-
M200	Z1	-	8	A/B	438	377	0,55	-	53,8	55,0	56,3	55,0	2,34	-
M201	Z1	-	8	A/B	438	398	0,60	-	67,5	69,0	67,5	68,0	2,27	-
M202	Z1	-	8	A/B	439	356	0,50	-	42,0	42,8	42,3	42,3	2,34	-
M203	Z1	-	8	A/B	439	356	0,50	-	41,0	40,0	41,5	40,8	2,34	-
M204	Z1	-	8	A/B	439	356	0,50	0,2	53,5	53,0	50,0	52,2	2,35	-
M205	Z1	-	8	A/B	439	356	0,50	0,4	53,5	55,5	52,5	53,8	2,34	-
M206	Z1	-	8	A/B	439	356	0,50	0,6	-	63,0	61,5	62,3	2,35	-
M207	Z1	-	16	A/B	434	384	0,57	-	59,0	60,8	60,0	59,9	2,33	-
M208	Z1	-	8	A/B	498	405	0,50	-	60,8	59,3	60,3	60,1	2,34	8,7
M209	Z1	SFA	16	A/B	379	295	0,50	0,3	50,8	-	-	50,8	2,36	-
M210	Z1	SFA	16	A/B	379	305	0,53	0,3	54,0	-	-	54,0	2,35	-
M211	Z1	SFA	16	A/B	379	310	0,55	0,3	57,5	-	-	57,5	2,35	-
M212	Z1	SFA	16	A/B	379	295	0,50	0,6	57,8	-	-	57,8	2,37	-
M213	Z1	-	32	A/B	374	314	0,52	-	49,8	-	-	40,8	2,41	-
M214	Z1	-	32	A/B	374	319	0,53	-	52,5	-	-	40,8	2,41	-
M215	Z1	-	16	A7B	434	354	0,50	-	50,8	50,8	52,8	51,5	2,38	-

Z = Zement; ZS = Zusatzstoff; GK = Größtkorn, MKG = Mehlkorngelalt; LG = Leimgehalt; WA = Wasserabsonderung im Eimerverfahren

Z1 = CEM II/A-S 42,5 R

Z2 = CEM II/A-LL 42,5 N

Z3 = CEM I 42,5 R

B-3 Oberflächenkennwerte

Tabelle B3.1: Oberflächenkennwerte in Abhängigkeit der angewendeten Methoden zur Ermittlung

Mischungs- bezeichnung	Referenzmethode (3D-Profilometer)				bildbasierte Methodik								Ausbreitmaß
	Sz _{3D-Prof.}	Sk _{3D-Prof.}	Sdr _{3D-Prof.}	Vmc _{3D-Prof.}	Festbeton				Frischbeton				a ₁₀
					Sz _{A,Fest.}	Sk _{A,Fest.}	Sdr _{A,Fest.}	Vmc _{A,Fest.}	Sz _{A,Fr.}	Sk _{A,Fr.}	Sdr _{A,Fr.}	Vmc _{A,Fr.}	
[mm ² /mm ²]													[cm]
M160	15,96	3,55	80,85	3,36	14,01	2,81	30,50	3,47	20,34	2,46	24,16	3,33	38,3
	13,27	3,74	67,72	3,00	13,48	2,56	25,56	2,60	14,88	2,94	23,06	3,54	39,8
	13,52	3,73	75,96	3,06	13,21	2,63	27,14	3,24	12,48	2,68	20,73	3,59	40,0
M168	13,16	3,51	56,17	2,70	14,36	2,26	18,56	2,89	12,17	2,40	16,49	2,69	40,5
	16,74	2,88	45,71	2,38	15,96	2,54	19,21	2,49	11,36	2,30	17,83	3,31	40,8
	16,13	3,14	59,09	3,11	16,74	1,92	23,65	3,21	21,92	2,58	20,45	3,58	41,0
M177	11,07	2,70	46,66	2,00	9,57	1,64	15,62	1,95	8,43	1,93	15,61	1,97	42,8
	7,39	1,80	24,73	1,17	6,21	1,14	6,02	0,97	6,40	1,45	11,77	1,56	45,0
	8,79	2,17	30,93	1,56	8,04	1,48	9,26	1,39	7,94	1,49	13,53	1,96	45,0
M181	11,58	3,26	55,79	2,15	10,20	1,91	10,24	1,67	12,74	2,42	19,53	2,13	41,8
	12,95	2,95	46,47	2,15	9,87	2,14	12,62	2,34	12,98	1,97	15,84	2,61	43,3
	8,41	2,54	36,75	1,55	8,41	2,19	15,21	1,67	7,76	1,80	11,93	1,94	44,3
M182	11,57	3,68	64,11	2,88	8,98	2,29	10,20	2,74	11,11	1,94	14,13	2,63	44,5
	9,99	3,52	53,30	2,46	7,79	1,99	13,73	2,18	7,66	1,54	15,65	1,38	47,0
	9,10	1,75	22,82	1,38	5,84	1,44	7,42	1,30	6,05	1,57	13,62	1,74	44,3
M187	14,89	2,16	30,83	2,08	7,66	1,63	15,49	1,93	10,94	1,96	23,57	2,02	50,5
	9,59	1,54	21,19	1,32	7,86	1,69	13,50	1,41	7,97	1,77	12,75	2,16	52,3
	11,64	2,17	30,77	2,16	7,45	1,66	11,25	2,04	9,55	1,64	10,28	2,16	48,3
M191	25,17	3,19	115,25	6,11	24,01	2,38	29,53	5,97	20,24	2,13	32,81	6,60	36,5
	25,58	3,76	96,80	4,65	21,03	2,69	25,10	4,41	29,74	2,99	32,63	4,96	36,3
	18,38	3,91	118,40	6,49	15,93	3,20	42,45	6,84	20,30	3,01	33,62	7,25	37,3
M197	9,78	1,60	20,84	1,38	6,58	1,43	13,58	1,26	17,06	1,75	12,73	2,18	49,3
	7,81	2,35	21,04	1,84	7,53	1,49	9,48	1,58	8,38	1,50	12,91	1,95	51,0
	9,99	1,71	21,40	1,39	7,10	1,56	10,68	1,69	17,09	2,64	42,73	1,94	48,5
M199	4,46	0,58	8,84	0,35	4,77	0,79	5,38	0,43	8,04	1,79	26,47	0,91	56,5
	4,47	0,81	12,23	0,50	3,93	0,80	4,86	0,41	8,78	1,62	27,27	0,80	58,8
	4,65	0,68	13,22	0,39	3,81	0,85	5,42	0,46	8,04	1,32	19,72	0,77	58,3
M201	2,28	0,22	3,32	0,19	4,36	0,75	8,07	0,45	8,79	1,44	28,93	0,80	67,5
	2,39	0,25	3,78	0,25	4,92	0,64	4,62	0,36	8,83	1,70	25,19	0,97	69,0
	2,34	0,28	4,52	0,23	4,33	0,62	5,16	0,35	11,96	1,64	31,20	0,88	67,5
M202	10,13	2,62	44,99	1,95	6,36	1,55	8,19	1,60	10,88	1,95	12,06	2,57	42,0
	5,66	1,57	24,52	1,19	4,44	1,13	6,77	1,05	6,73	1,20	8,56	1,28	42,8
	8,73	2,43	39,51	1,98	5,99	1,60	9,05	1,67	8,52	1,89	14,86	2,18	42,3
M203	7,76	2,47	45,59	1,80	7,63	1,70	7,64	1,46	7,23	1,72	11,43	2,01	41,0
	8,56	2,58	41,40	1,94	8,87	1,42	7,59	1,66	10,52	1,94	12,64	3,01	40,0
	9,84	2,97	56,82	2,07	6,89	1,60	8,49	1,84	10,10	1,96	14,91	2,63	41,5

Mischungs- bezeichnung	Referenzmethode (3D-Profilometer)				bildbasierte Methodik								Ausbreitmaß
	S _{Z3D-Prof.}	S _{K3D-Prof.}	S _{d3D-Prof.}	V _{mC3D-Prof.}	Festbeton				Frischbeton				a ₁₀
					S _{Z1A,Fest.}	S _{K1A,Fest.}	S _{d1A,Fest.}	V _{mC1A,Fest.}	S _{Z1A,Fr.}	S _{K1A,Fr.}	S _{d1A,Fr.}	V _{mC1A,Fr.}	
[mm ² /mm ²]												[cm]	
M204	4,96	1,10	16,35	0,72	3,60	0,90	5,07	0,59	4,74	1,04	8,36	0,72	53,5
	4,61	0,99	15,00	0,62	3,59	0,82	4,49	0,58	5,21	1,12	12,40	0,71	53,0
M205	5,83	1,26	20,38	0,74	3,45	0,85	4,89	1,00	6,85	1,14	11,76	0,67	50,0
	4,25	0,66	11,18	0,40	3,40	0,76	4,58	0,43	5,33	1,01	12,01	0,57	53,5
	4,14	0,72	10,79	0,42	4,82	0,88	5,92	0,44	8,00	1,15	15,98	0,78	55,5
M207	5,19	1,05	15,62	0,65	3,23	0,82	4,22	0,58	4,68	1,16	13,43	0,76	52,5
	3,61	0,39	3,97	0,35	6,06	0,71	5,77	0,46	10,78	1,77	32,12	0,94	59,0
	4,87	0,64	8,31	0,56	3,76	0,67	3,29	0,53	11,09	1,87	34,50	0,89	60,8
M208	4,56	0,48	6,44	0,35	5,34	0,62	4,24	0,40	11,52	1,92	37,55	1,03	60,0
	2,67	0,45	7,07	0,28	2,21	0,58	1,32	0,42	8,26	1,41	25,32	0,77	60,8
	5,18	0,66	12,14	0,43	4,09	0,95	7,51	0,53	7,94	1,44	23,23	0,76	59,3
M215	3,21	0,62	11,69	0,44	3,04	0,63	3,09	0,43	6,97	1,29	17,58	0,64	60,3
	6,08	1,05	13,19	0,77	3,75	1,11	6,55	0,72	5,33	1,26	9,44	1,07	50,8
	5,02	1,19	13,38	0,97	4,14	1,09	6,69	0,76	6,97	1,48	18,71	1,11	50,8
	6,59	1,08	14,64	0,81	3,86	0,93	3,96	0,71	6,14	1,30	13,38	1,05	52,8

Werdegang

Name: Tobias Schack

Schulische Ausbildung

1994 - 1998	Grundschule Eschede
1998 - 2000	Orientierungsstufe Eschede
2000 - 2004	Realschule Lachendorf
2004 - 2005	Berufsfachschule Informatik, BBS II Celle
2005 - 2007	Fachgymnasium Technik, BBS II Celle Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Akademische Ausbildung

2010 - 2013	Studium Bau- und Umweltingenieurwesen, Leibniz Universität Hannover Abschluss: Bachelor of Science
2013 - 2015	Studium Konstruktiver Ingenieurbau, Leibniz Universität Hannover Abschluss: Master of Science

Beruflicher Werdegang

2007 - 2010	Ausbildung zum Baustoffprüfer, Holcim Beton und Zuschlagstoffe GmbH in Höver/Anderten
seit 2016	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover

Berichte aus dem Institut für Baustoffe

Bisher in dieser Reihe erschienene Hefte:

- Heft 1: Thomas Freimann: „Einfluß von Steinkohlenflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und -mörteln“, 2002
- Heft 2: Susanne Thoke-Weidlich: „Alkaliionendiffusion in carbonatisierte und nicht carbonatisierte Betone“, 2002
- Heft 3: Lasse Petersen: „Einfluss baustofflicher Schädigungsprozesse auf das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen“, 2003
- Heft 4: Holger Höveling: „Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB)“, 2006
- Heft 5: Jens Uwe Pott: „Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume“, 2006
- Heft 6: Steffen Anders: „Betontechnologische Einflüsse auf das Tragverhalten von Grouted Joints“, 2008
- Heft 7: Maik Wefer: „Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung“, 2010
- Heft 8: Fongjan Yirasit: „Chemical, Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Cement“, 2010
- Heft 9: Ludger Lohaus; Thomas Steinborn: „Fortschritte in der Baustofftechnik: Festschrift 10 Jahre Institut für Baustoffe“, Leibniz Universität Hannover und 70 Jahre Harald Schorn, 2011
- Heft 10: Nick Lindschulte: „Drucktragverhalten von Rohren aus Ultrahochfestem Beton mit Stahlblechummantelung“, 2013
- Heft 11: Karen Fischer: „Betontechnische Einflüsse auf das Erscheinungsbild von Sichtbetonflächen bei Zementleimleckagen“, 2014
- Heft 12: Thomas Steinborn (Hrsg.): „Festschrift Ludger Lohaus zur Vollendung des sechzigsten Lebensjahres“, 2014
- Heft 13: Nadja Oneschkow: „Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung“, 2014
- Heft 14: Yared Assefa Abebe: "Flowable and Stable Concrete: Design, Characterization and Performance Evaluation“, 2017
- Heft 15: Michael Werner: „Realitätsnahe Materialeigenschaften von hochfesten Feinkornbetonen in Grouted Joints“, 2017
- Heft 16: Jesko Gerlach: „Ein performance-basiertes Konzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung chemisch beanspruchter Betonbauteile“, 2017
- Heft 17: Thomas Gläser: „Optimierung der Wassereffizienz von Mörtelzusammensetzungen als Basis für den Entwurf von Hochleistungsbetonen“, 2017
- Heft 18: Julian Hümme: „Ermüdungsverhalten von hochfestem Beton unter Wasser“, 2018

- Heft 19: Kerstin Elsmeier: „Einfluss der Probekörpererwärmung auf den Ermüdungswiderstand von hochfestem Vergussbeton“, 2019
- Heft 20: Hannes Weicken: „Experimentelle Methodik zur Bestimmung des autogenen Schwindens von Hochleistungsbetonen“, 2019
- Heft 21: Niklas Scholle: „Zum Bauteiltragverhalten von stahlummantelten Hybridrohren mit Ultrahochfestem Beton“, 2021
- Heft 22: Christoph Tomann: „Wasserinduzierte Ermüdungsschädigung von Beton“, 2021
- Heft 23: Dries Beyer: „Bewertungskonzept für das Potenzial einer Bindemittelzusammensetzung hinsichtlich einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton“, 2021

Der Autor:

Tobias Schack, Jahrgang 1987, studierte von 2010 bis 2013 Bau- und Umweltingenieurwesen und von 2013 bis 2015 Konstruktiver Ingenieurbau an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Von 2016 bis 2022 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover tätig. Im Rahmen dieser Tätigkeit leitete er von 2020 bis 2022 die Arbeitsgruppe Betontechnologie.

Neben der digitalen und bildbasierten Bewertung von Frischbetoneigenschaften beschäftigte er sich in dieser Zeit mit weiteren vielfältigen betontechnologischen Problemstellungen. Themenschwerpunkte waren u. a. die Charakterisierung und Bewertung von Verfärbungserscheinungen an Sichtbetonflächen sowie die Entwicklung ressourceneffizienter Betone mit reduzierten Klinkergehalt.

Dieses Buch stellt die genehmigte Dissertation des Autors dar.

ISBN 978-3-936634-27-3