



Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde der degradierende und mechanische Einfluss von ausgewählten Kernformstoffen mit unterschiedlichen Bindervariationen bei unterschiedlichen thermischen und atmosphärischen Bedingungen untersucht. Für die verschiedenen Untersuchungen wurden genormte Prüfkörper aus den verwendeten Kernformstoffen Quarzsand, Kerphalit und Cerabeads mit organischen bzw. anorganischen Bindern hergestellt. Die thermische Auslagerung erfolgte bei fest vorgegebenen Temperaturniveaus, wobei das Aufheizverhalten der Kernformstoffe, zur Ermittlung der Einstellparameter, in Vorversuchen ermittelt wurde. Zylinder- bzw. Biegeiegelproben wurden für die thermischen Versuche bei einer oxidierenden Atmosphäre sowie reduzierenden in Versuchsöfen ausgelagert. Reduzierende Auslagerungsbedingungen wurden über eine eigene Versuchsvorrichtung, durch Zuhilfenahme eines Sandbettes, ermöglicht. Die ausgelagerten Proben wurden im Anschluss hinsichtlich derer Biege-, Scher-, Druck-, Spalt- und Zugfestigkeit untersucht, ausgewertet und mit unbehandelten Referenzproben verglichen. Zudem erfolgten Auswertungen hinsichtlich der Bruchwahrscheinlichkeit und des Aushärtfortschrittes zur Ermittlung des optimalen Handling Zeitpunktes. Erkenntnisse aus den unterschiedlichen mechanischen Analysen wurden im Mohr'schen Spannungskreis zusammengefasst und ausführlich beschrieben.

Es konnten im Rahmen dieser Arbeit neue Erkenntnisse hinsichtlich der Kernstoff Degradation, dem Atmosphäreneinfluss und der Festigkeitsauswertung mittels Mohr'schen Spannungskreises gewonnen werden.



Abstract

The degradation influence of different thermal and atmospheric conditions on the mechanical properties of selected core materials with different binder variations was investigated in this work. For various tests, standardized specimens were prepared from quartz sand, Kerphalit and Cerabeads with organic or inorganic binders. Thermal ageing at defined temperature conditions was used to assess the heating behaviour of the different core materials. In preliminary tests the ideal thermal ageing parameters were determined. For thermal ageing cylinder and bending samples were used in an oxidizing or reducing atmosphere. A separate test device was used for the reducing conditions, in which sand was used to achieve a reducing environment. Samples were examined after thermal ageing for bending, shear, compressive, splitting and tensile strength and compared with untreated reference samples. In addition, evaluations were performed regarding the Weibull probability and the chronological strengthening progress of the samples. Therefore, the optimum core handling time was determined. The different results of the mechanical analyses were summarized in the Mohr circle and described in detail. In this work, new insights were gained regarding the degradation of the core material, the atmospheric influence and the strength evaluation for the Mohr's circle.



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Mirnes Berbić

Leoben, im März 2017



Danksagung

Während der Erstellung dieser Arbeit haben mich zahlreiche Personen begleitet und unterstützt. Dafür möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr. Peter Schumacher für die Betreuung und die Möglichkeit meine Diplomarbeit am Lehrstuhl für Gießereikunde zu absolvieren. Er stand mir stets als hilfreicher und kompetenter Betreuer zu Seite und sein fachliches Wissen hat einen wesentlichen Teil zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen.

Mein Dank geht auch an Dipl.-Ing. Bernhard Stauder, der als Betreuer mit viel Engagement und Tatkraft eine große Hilfe bei der Verwirklichung dieses Projektes war und durch Bereitstellung seiner Fachkenntnisse maßgeblich dazu beigetragen hat, dass diese Arbeit in dieser Form vorliegt.

An dieser Stelle bedanke ich mich auch beim Österreichischen Gießerei-Institut für die Bereitstellung der, für die Versuchsdurchführung, notwendigen Anlagen und Materialien. Ebenso bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern für die konstruktive und herzliche Zusammenarbeit. Erst durch deren Unterstützung und Feedback war die Verwirklichung dieses Projektes möglich.

Mein Dank geht auch an die Firma Nematik Linz. Erst durch deren Interesse in dieses Forschungsgebiet konnte dieses Projekt in die Wege geleitet werden. Zudem bedanke ich mich für die Möglichkeit vor Ort Vergleichsversuche durchführen zu können.

Schließlich geht mein Dank noch an meine Familie und meine Frau Lejla Berbić die mich mit viel Verständnis für den Zeitbedarf unterstützt haben.



Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract.....	II
Eidesstattliche Erklärung	III
Danksagung.....	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Einleitung.....	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Formgrundstoffe	3
2.1.1 Anforderung an Kerne	8
2.2 Bindersysteme.....	10
2.2.1 Organisch gebundene Sande.....	12
2.2.2 Anorganisch gebundene Sande	16
2.3 Thermomechanische Belastung von Kernformstoffen	21
2.3.1 Entkernverhalten und Kernzerfall	23
2.3.2 Ermittlung der mechanischen Kennwerte.....	28
2.3.3 Mohr'scher Spannungskreis	33
2.3.4 Weibull-Verteilung.....	36
3 Experimentelle Methoden	38
3.1 Versuchsplan und Probenherstellung	38
3.2 Probenvorbereitung und -herstellung	40
3.3 Thermische Degradationsversuche.....	44



3.3.1	Oxidierende Degradationsversuche	48
3.3.2	Reduzierende Degradationsversuche	51
3.4	Ermittlung der physikalischen Kennwerte	55
3.4.1	Glühverluste.....	55
3.4.2	Schlammstoffanteil	56
3.4.3	Schüttdichte	56
3.4.4	Verdichtbarkeit.....	58
3.5	Ermittlung der mechanischen Kennwerte.....	59
3.6	Probenlagerung.....	62
3.7	Rasterelektronenmikroskop (REM)	63
4	Ergebnisse	64
4.1	Physikalische Kennwerte	64
4.2	Visuelle Beurteilung der behandelten Kerne	68
4.3	Auswertung der REM Analyse	76
4.4	Einfluss von unterschiedlichen Bindemitteln auf Quarzsand H32	79
4.4.1	Auslagerungsserie.....	79
4.4.2	Bruchwahrscheinlichkeit für Biegefestigkeit bei Raumtemperatur	84
4.4.3	Festigkeiten nach WBH	86
4.4.4	Mohr'scher Spannungskreis.....	97
4.5	Einfluss von anorganischem Bindemittel Wasserglas Modul 3,2 auf unterschiedliche Formgrundstoffe	108
4.5.1	Auslagerungsversuche	108
4.5.2	Bruchwahrscheinlichkeit für Biegefestigkeit bei Raumtemperatur	114
4.5.3	Festigkeiten nach WBH	116
4.5.4	Mohr'scher Spannungskreis.....	125
4.6	Abhängigkeit Spalt- zu Zugfestigkeit bei Raumtemperatur	133
5	Diskussion der Ergebnisse.....	136
5.1	Allgemein.....	136
5.2	Konklusion.....	136
5.3	Ausblick.....	140
6	Literaturverzeichnis.....	143
	Tabellenverzeichnis	151
	Abbildungsverzeichnis.....	153
A	Anhang: Gesamter Probenplan	A-1



B	Anhang: Bestandteile der verwendeten organischen Binder	B-1
C	Anhang: Bestandteile der verwendeten anorganischen Binder	C-1
D	Anhang: Bruchwahrscheinlichkeit Organik	D-1
D.1	Druckfestigkeit.....	D-2
D.2	Scherfestigkeit.....	D-3
D.3	Spaltfestigkeit.....	D-4
E	Anhang: Bruchwahrscheinlichkeit Anorganik	E-1
E.1	Druckfestigkeit.....	E-1
E.2	Scherfestigkeit.....	E-3
E.3	Spaltfestigkeit.....	E-4
	Akronyme.....	I



Einleitung

Die Gießerei unterliegt einem stetigen Wandel und etablierte Herstellprozess werden kontinuierlich vor neue Herausforderungen gestellt. Immer aufwendigere Bauteilanforderungen hinsichtlich Qualität und konstruktiven Begebenheiten werden zunehmend durch einen komplexen Zusammenschluss aus den verschiedensten Kernpaketen gelöst. Die Anforderung an diese Kerne steigen somit mit jedem Gussbauteil und stellen zukünftige Entwicklungen zunehmend vor neue Herausforderungen, sowohl während als auch nach dem Abguss.

Um umweltbewusster fertigen zu können und beispielsweise zukünftige Motorentwicklungen, welche auf geringere Gusskomponentengewichte hinzielen, zu begünstigen müssen formgebende Gusskomponenten wie Kerne entsprechend den Anforderungen optimiert werden. Ein bedeutender Schritt in eine umweltbewusstere Herstellung ist der Einsatz von anorganischen Wasserglasbindern statt den verbreiteten organischen Bindersystemen. Über das letzte Jahrzehnt hat durch die maßgebenden Entwicklungen der Nemak Linz das Bewusstsein und die Präsenz von Wasserglasbindern im europäischen Raum stetig zugenommen und es konnten erste Schritte für die weitere Entwicklung der Gießerei gesetzt werden.



Da jedoch der Einsatz von anorganischen Bindersystemen mit Herausforderungen hinsichtlich des Kernzerfalls nach dem Abguss einhergeht, müssen die Gießprozesse und Fertigungsprozesse auf das Bindersystem entsprechend optimiert werden. Um dies jedoch erreichen zu können ist eine Kenntnis der makroskopischen und mikroskopischen Einflussfaktoren über den gesamten Gussprozess und die verwendeten Binder notwendig.

Um die Einflussfaktoren der thermischen Degradation von Kernformstoffen näher zu untersuchen, wurden im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche Kombinationen aus Formstoffen und organischen bzw. anorganischen Bindersystemen unter vorgegebenen thermischen Bedingungen bei zwei unterschiedlichen Atmosphären behandelt. In weiterer Folge erfolgte eine Gegenüberstellung von deren mechanische Festigkeiten um Korrelationen in Bezug auf die verschiedenen Einflussfaktoren aufzuzeigen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Formgrundstoffe

Als eine Grundlage im Guss dienen Formstoffe, welche zur Anfertigung von verlorenen Formen verwendet werden. Deren Zusammensetzung wird im Wesentlichen auf das Formverfahren, das Gießmetall und den Zweck abgestimmt, wobei eine Änderung der Stoffeigenschaften, je nach Verfahren, unterschiedliche Auswirkungen auf das fertige Gussbauteil ausüben kann. Grundlegend können Formstoffe als ein Zusammenschluss von festen Partikeln betrachtet werden, welche unterschiedlichen Korngrößen und Formen besitzen und über Adhäsion und Kohäsion zusammen gehalten werden [1 - 3]. In Abb. 2-1 ist der Grundaufbau eines Formstoffes abgebildet.

Die mechanischen Eigenschaften des Formstoffs werden durch die Sandmatrix und deren Korneigenschaften beeinflusst. Wobei es eine Unterscheidung zwischen Kornform und Kornoberfläche gibt. Die Bindung des Grundstoffes erfolgt über organische oder anorganische Bindersysteme. Durch Zugabe von Zusatzstoffen oder die Verwendung von alternativen Formstoffen wie Schamotte, Chromerze oder Zirkonsande können negative Effekte von Quarzsand, wie beispielsweise der Quarzprung, ausgeglichen werden [4].

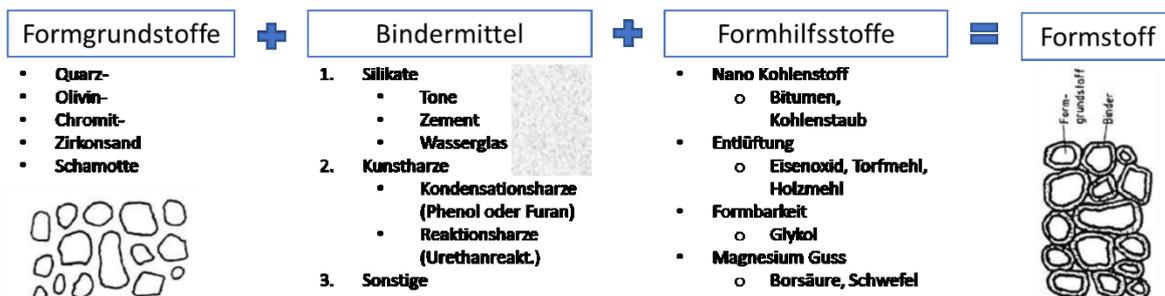


Abb. 2-1: Schematische Darstellung vom Formstoffaufbau, nach [5].



Die Anforderungen an Formstoffe lassen sich in mehrere Kategorien einteilen, wobei deren Einsatz stark von den Umgebungsbedingungen abhängt [4 - 7].

- **Bildsamkeit**
 - Eher für das Handformen gedacht.
- **Fließfähigkeit**
 - Ist bei der Kernherstellung kritisch, da beim Kernschießen und -blasen die Fließfähigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Bildsamkeit ausübt und somit enge Querschnitte und Hinterschneidungen bei der Kernherstellung realisierbar sind.
- **Standfestigkeit**
 - Durch die Ermittlung der mechanischen Festigkeitsparameter (Biege-, Druck-, Zug-, Scherfestigkeit) kann Auskunft über die Formbeständigkeit ermittelt werden.
- **Hochtemperaturbeständigkeit**
 - Kommt nur zu tragen, wenn der Schmelzpunkt des Formstoffes über jenem der Schmelze liegt.
- **Zerfall**
 - Gussstücke sollen kostengünstig entkernbar sein.
- **Rezyklierbarkeit**
 - Eine Wiederaufbereitung der Sande soll gegeben sein.

Einen signifikanten Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften hat die Wärmeabfuhrgeschwindigkeit und das dadurch ausgebildete Gefüge [8]. Beispiele für die Wärmeausdehnung der verwendeten Sande (H32 Quarzsand, Cerabeads und Kerphalit) sind in Abb. 2-2 und Abb. 2-3 ersichtlich.

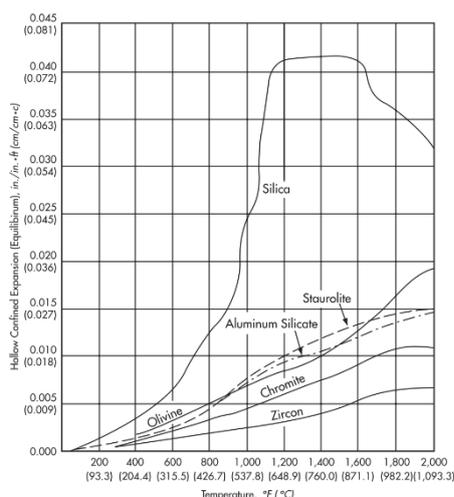


Abb. 2-2: Wärmeausdehnung bei unterschiedlichen Formstoffen, nach [9].

Linearer Ausdehnungskoeffizient $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$			
	20 - 300°C	20 - 600°C	20 - 800°C
Quarz	14	23	17
Bauxit-Sand*	6,2	7,2	7,4
Chromit	7,1	7,5	7,5
Kerphalite KF	5,3	6,5	7,0
Schamotte**	4,7	4,8	4,5
M-Sand	4,2	4,5	4,8
Cerabeads	3,5	4,0	4,3
Zirkon	3,4	4,1	4,5
SiC (ESK-SiC GmbH)			4,7 (20 -1400°C)

Abb. 2-3: lineare Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Formgrundstoffe [10].

Quarzsand entsteht durch die mechanische und chemische Verwitterung von Quarz (kristallisiertem SiO_2). Obwohl Quarzsande auf Grund des natürlichen Vorkommens und Häufigkeit einen überwiegenden Anteil der Gussformstoffe ausmachen, wird deren Einsatz durch die relativ hohe Wärmeausdehnung, ersichtlich in Abb. 2-2, erschwert. Die charakteristische Quarzverbindung, vorliegend als Alpha-Quarz, dehnt sich konstant bis zu einem Temperaturbereich von 573°C aus. Mit ansteigender Temperatur nimmt die Ausdehnung rapide zu, bis das primäre Alpha-Silizium in eine Beta-Struktur umklappt. Dieser Quarzsprung kann auf Grund der thermischen Ausdehnung im Gussbauteil zu Toleranzabweichungen und Gussfehlern führen. Näheres hierzu wird im Kapitel 2.2 behandelt. Der Quarzsprung kann jedoch durch die

Binderart und Korngröße beeinflusst werden. Beispielsweise haben Coldbox Binder einen wesentlichen Einfluss auf das Ausdehnungsverhalten. So zeigen Untersuchungen nach Thiel [11] eine Abnahme der Ausdehnung sowie ein Verschieben der Quarzsprungtemperatur. Mit feiner werdender Korngröße sind ebenfalls geringere Ausdehnungen zu beobachten [4, 9, 11 - 14]. Die verwendeten Spezialsande wie Cerabeads und Kerphalit weisen keine ausdehnungsbedingten mineralogischen Veränderungen bei höheren Temperaturen auf. Grund hierfür ist deren chemischer Aufbau, im Falle von Kerphalit 60,8 % Al_2O_3 und 38,1 % SiO_2 Rest weitere Oxide. Die Verwendung von Spezialsanden hat jedoch unterschiedliche Einflüsse auf das Binderverhalten und das Wasseraufnahmevermögen. Dieses hat einen direkten Einfluss auf den aufgenommenen Bindergehalt und dient als Indiz für die Oberflächenporosität. Mit steigendem Wassergehalt nimmt beispielsweise bei niedrigviskosen Bindemitteln der Bindemittelbedarf zu [10, 15]. Ein Vergleich der unterschiedlichen Korngrößen für die verwendeten Sande ist in Abb. 2-4 dargestellt.

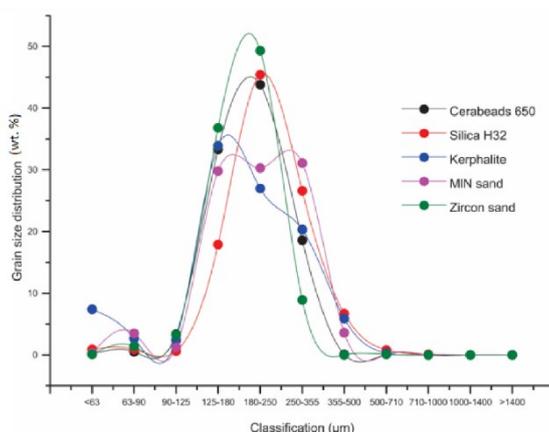


Abb. 2-4: Korngrößenverteilung, nach [16].

Neben den thermophysikalischen Eigenschaften der Sande hat deren Form, Verteilung und Beschaffenheit einen signifikanten Einfluss auf das Gussverhalten und im Endeffekt auf das Gussbauteil selbst. Kugelförmige Sande weisen die geringste Packungsdichte auf und somit auch die geringste Verdichtung, die höchste Gasdurchlässigkeit und Porosität. Eine Packungsdichte wie bei Metallen von 74,1 % kann jedoch bei Sanden nicht erreicht werden. Anzumerken ist jedoch, dass eine ungleichmäßige Kornform die Verdichtung des Sandes verbessert [6, 17]. In Abb. 2-5 ist eine Übersicht der gängigen Kornformen angeführt, eine mögliche Idealkornform wären abgerundete Körner (Cerabeads) mit hoher bis guter Rundheit. Dies würde Eigenschaften wie Fließverhalten und Binderaufnahme positiv

beeinflussen, wobei die Ausbildung der Kanten und Kornoberfläche hierbei einen starken Einfluss ausüben. Größere Körner neigen hingegen zu einer niedrigeren Packungsdichte und schlechteren Fließfähigkeit [14].

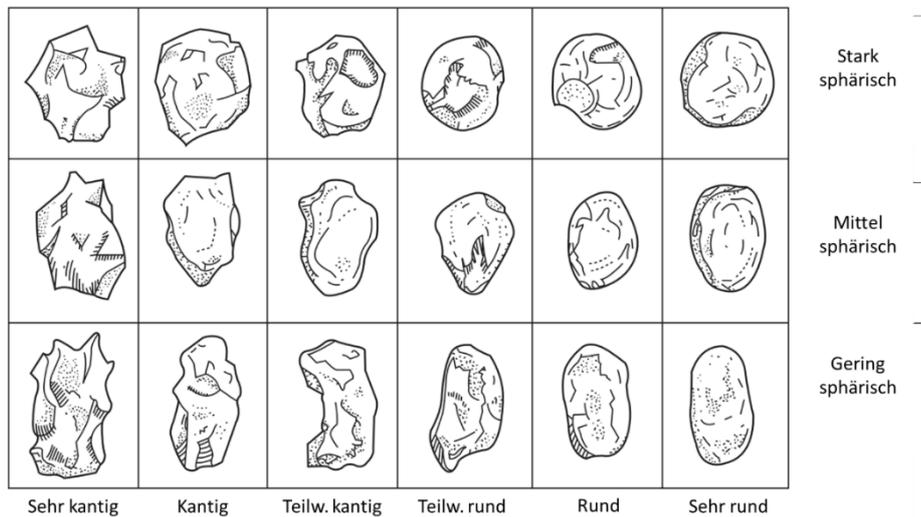


Abb. 2-5: Einteilung der Kornstrukturklassen, nach [14].

2.1.1 Anforderung an Kerne

Die Gestaltung von Hohlräumen im Guss wird erst durch den Einsatz von Kernen ermöglicht. Neben Dauerkernen aus metallischen Werkstoffen kann beispielsweise bei verlorenen Kernen zwischen getrockneten Kernen sowie in der Nachkriegszeit verwendeten Grünsandkernen unterschieden werden. Der allgemeine Unterschied zwischen Grünsandkernen und getrockneten Kernen ist deren Aufbau. Grünsandkerne sind im Allgemeinen ein Teil der Gussform und somit aus demselben Formsand. Getrocknete Sandkerne können hingegen eine unterschiedliche Sandzusammensetzung haben und werden im Allgemeinen über separierte Herstellprozesse gefertigt [18]. Kernherstellung und Sandformherstellung haben ähnliche Berührungspunkte, der Unterschied und die daraus folgende Unterteilung ist auf die Gussbedingungen zurückzuführen. Kerne müssen beim Guss eine maßhaltige Abbildung der Gussgeometrie ermöglichen und je nach Produktionsabschnitt sind Kerne unterschiedlichen Einflüssen ausgesetzt. Bei der Vorbereitung soll eine geeignete Festigkeit gegeben sein um ein unproblematisches Handling zu ermöglichen. Während dem Guss sollten, auch ohne die Unterstützung durch die Gussform, unterschiedlichste mechanische und thermische Belastungen aufgenommen werden. Zu diesen zählen beispielsweise der thermomechanische Einfluss der Schmelze oder Auftriebskräfte die durch Dichteunterschiede zwischen Kern und Schmelze verursacht werden. Nach dem Abguss muss hingegen eine niedrige Festigkeit hinsichtlich Entkernbarkeit gegeben sein. Neben der Entkernbarkeit ist auch die anschließende Recyclierbarkeit von Kernen entscheidend [19, 20]. Eine Gegenüberstellung Verhältnisse, an Hand von Quarzsandkernen, ist in Tab. 2-1 ersichtlich.

Tab. 2-1: Auftrieb von Kernen in verschiedenen Schmelzen, nach [14].

Flüssiges Metall	Verhältnis Auftrieb zu Kerngewicht
Aluminium	0,66
Kupfer	4,50
Gusseisen	3,50
Stahl	3,90
Bronze	4,25

Eine Durchwärmung des Kernes erfolgt nicht schlagartig, sondern hängt von dessen Dicke, der Auslagerungszeit sowie dessen Wärmeleitfähigkeit ab. Je dicker ein Kernpaket ist, desto höher ist auch die Durchwärmzeit. Eine theoretische Betrachtung der Kernerwärmung ist in Abb. 2-6 ersichtlich.

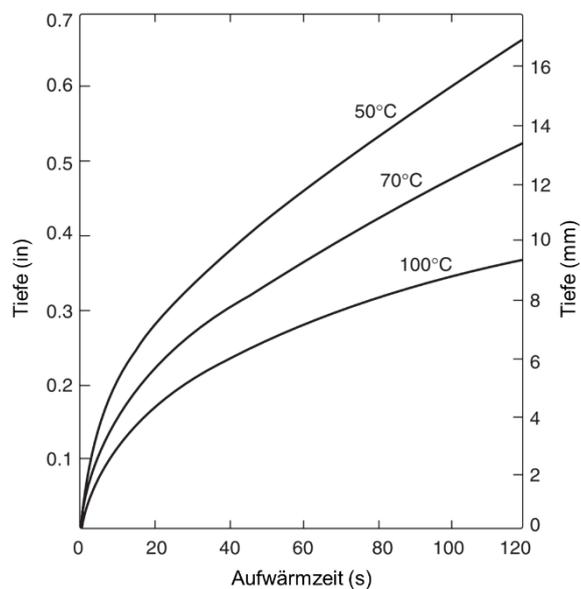


Abb. 2-6: Theoretische Betrachtung des Aufheizverhaltens von Sandkernen, nach [14].

2.2 Bindersysteme

Die grundlegende Aufgabe eines Binders ist es strukturellen Belastungen entgegenzuwirken und die Formstoffmatrix über Kohäsion zu stabilisieren. Wobei die Adhäsionskraft, Kraft die die Haftung an die Oberfläche bestimmt, verglichen zu der Kohäsionskraft, Eigenfestigkeit des Binders überwiegt. Die heute etablierten und modernen Bindersysteme für Kerne haben ihren Ursprung in natürlichen Ölen wie den Leinsamenölen. Diese haben nach einer Aushärtung bei 200-240°C eine relativ gute Festigkeit bei guter Entkernbarkeit. Auf deren Basis aufbauend folgte die Entwicklung früher synthetischer Bindersysteme, wie beispielsweise Phenol. Synthetische Binder brachten durch selektive Modifizierbarkeit der verschiedenen Eigenschaften, kürzere Aushärtezeiten, höhere Festigkeiten und führten die Entwicklung der Gießereitechnologie weiter [17, 19, 21]. Eine Übersicht der verschiedenen Bindersysteme ist in Abb. 2-7 ersichtlich.

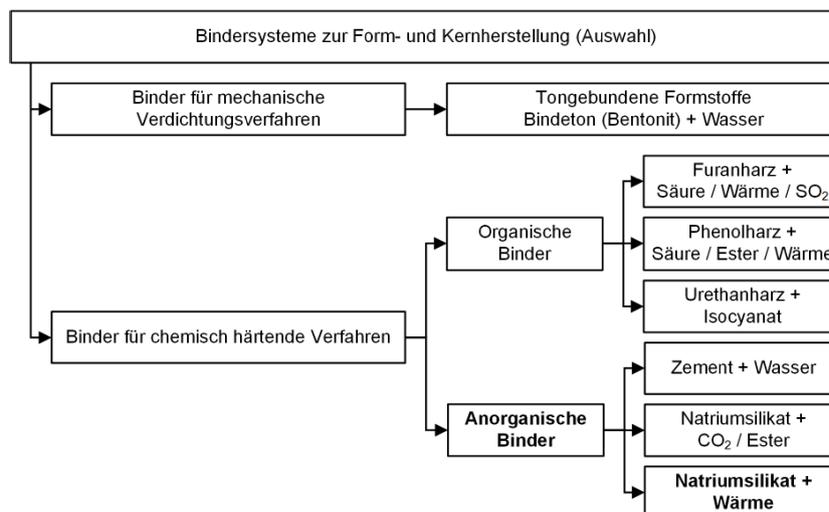


Abb. 2-7: Übersicht der verschiedenen Bindersysteme die zur Form- und Kernherstellung dienen [22].

Laut Görke konnte [23] ein Zusammenhang zwischen Binder und Korn ermittelt werden. Je feiner der Sand (an Hand von Quarzsand) desto mehr nimmt der Einfluss des Binders zu und desto höher fällt die Festigkeit aus. Bei grobkörnigem Sanden kann sich schon bei 0,5 % Binderanteil eine Sättigung einstellen, wodurch eine weitere Festigkeitssteigerung nicht mehr möglich ist.



2.2.1 Organisch gebundene Sande

Organische Binder zählen zu den bedeutendsten Bindersystemgruppen und basieren z.B. auf Phenolen. Eine Einteilung der organischen Binder kann auf verschiedene Weisen erfolgen, nach Molekülbildung, Komponenten oder Aushärtetemperatur [6, 24]. Zudem lassen sich diese über deren Aushärteprinzip einteilen.

Warmaushärtende Formstoffe:

- Aushärtung durch beheiztes Werkzeug, wobei häufige Kombinationen Harnstoff-Formaldehyd-Furfurylalkohl oder Phenol-Formaldehyd Harnstoffe sind. Ein Beispiel hierfür wäre das Hotbox Verfahren.

Kaltaushärtende Formstoffe:

- Binder beruhen meist auf Furan-, Phenolharz oder Polyurethan.
 - Wobei Furanharze auf einer Furfurylalkohl-Basis aufgebaut sind.
- Phenolharze entstehen durch Kondensation von Phenol und Formaldehyd und ähnelt Furanharz.
 - Phenol-Resolharze werden beispielsweise mit alkalischen Esterhärttern beim Resol Ester Verfahren angewendet.

Die Binderreaktion von organisch gebundenen Sanden kann sowohl über eine Zugabe von Härttern oder durch thermische Energie gestartet werden.



2.2.1.1.1 Coldbox Verfahren

Das Coldbox-Verfahren zählt zu den kaltaushärtenden organischen Verfahren, wobei die Bezeichnung eine Aushärtung bei Raumtemperatur suggeriert. Durch die kurzen Zykluszeiten und die hohe Prozesssicherheit ist das Coldbox-Verfahren in der Industrie weit verbreitet.

Bei der Aushärtung entsteht durch Polyaddition ein Polyurethane Molekülverbund, wobei der Abbindevorgang durch den Amin-Katalysator hervorgerufen wird, wobei ein Stickstoffanteil von 3-4 % frei wird.

Phenolic resin + Polyisocyanate - (Amin Kat.) → Urethane

Die Aushärtezeiten können durch eine Variation des Harzanteils und der Katalysatormenge verändert werden. Die ideale Herstelltemperatur liegt zwischen 20-25°C, niedrigere Temperaturen beeinflussen das Vermischungsverhalten und erhöhen die notwendige Katalysatormenge. Frische Sandmischungen haben eine Haltbarkeit von 1-2 Stunden, wobei diese von der Luftfeuchtigkeit oder einem steigenden pH-Wert beeinflusst wird. Bei der Herstellung muss zudem auf ein übermäßiges Mischen geachtet werden, um eine Erwärmung des Sandes zu vermeiden und somit einer schlechteren Bindung entgegenzuwirken

[5, 14, 25, 26].

2.2.1.1.2 Warmbox Verfahren

Das Warmbox-Verfahren zählt zu den warmaushärtenden organischen Verfahren und weist im Gegensatz zum Hotbox-Verfahren einen niedrigeren Stickstoffanteil von 2,5 % auf. Dieser hat einen direkten Einfluss auf die Entgasungsneigung der Kerne, welche bei Warmbox vergleichsweise niedriger ausfällt als bei Hotbox. Neben guten Zerfallseigenschaften weisen Warmbox-Mischungen eine Lagerfähigkeit von bis zu 8 Stunden auf.

Bei der Herstellung werden die gebundene Sandmischung in einem erwärmten Werkzeug geschossen. Wobei ein hochreaktiver Furan-Alkohol-Binder verwendet wird. Dieser basiert auf der Sulfonsäure (methanhaltige Lösung) und wird mit Kupfer Salzen gemischt und anschließend in ein bis zu 180°C erwärmtes Werkzeug geschossen. Die Kupfersalze dienen als Katalysatoren und scheiden bei der Herstellung aus einer methanhaltigen Lösung aus.



Die Aushärtetemperatur der Katalysatorbestandteile liegt im Schnitt bei 65°C [14, 25]. Ein wesentliches Merkmal von Warmbox-Kernen ist deren hohe Biegefestigkeit.

Furan Resin + Latent Säure (H⁺) + Hitze → Furan Binder

2.2.1.1.3 Hotbox Verfahren

Ähnlich dem Warmbox-Verfahren zählt auch das Hotbox-Verfahren zu den warmhärtenden organischen Verfahren und eignet sich ebenfalls zur Herstellung von komplexen Kernpaketen mit einer hohen Festigkeit bei einer vergleichsweise geringen Querschnittsfläche. Die Hotbox-Bindersysteme basieren auf einer Phenol-Formaldehyd Basis, die über Chlorid oder Bromid Katalysatoren durch einen thermischen Impuls zur Reaktion gebracht werden. Die Katalysatorauswahl richtet sich nach den Randbedingungen, wie Säurebeständigkeit oder Einsatzzeitraum (Sommer, Winter). Beispielsweise werden im Sommer Nitrathaltige und im Winter Chloridhaltige Katalysatoren bevorzugt. Bei der Herstellung wird ein feuchtes Sand-Bindergemisch in ein vorgewärmtes Werkzeug, im Temperaturbereich von 180 bis 340°C, geschossen. Hotbox Binder können zudem auch in furan- und phenolhaltige Bindersysteme eingeteilt werden, wobei Furan Bindersysteme eine schnellere Aushärtung und bessere Entkernbarkeit aufweisen.

Flüssiges Resin + Katalysator + Hitze → festes Resin, Wasser und Hitze

Hotbox ist auf Grund seiner guten Oberflächeneigenschaften und Festigkeiten, bei guter Entkernbarkeit, bei dickwandigen Kernpaketen in Verwendung. Diese werden jedoch zunehmend durch Coldbox Kernpakete verdrängt. Grund hierfür ist die Ausdehnung beim Thermischen Einfluss und die abnehmende Entkernbarkeit bei einem steigendem Phenol-Formaldehyd Anteil.

Ein wesentlicher Vorteil von Hotbox-Bindern ist deren visuelles Qualitätskriterium. Anhand der Kernfärbung kann auf die Mischqualität geschlossen werden. Im Idealfall sollte diese im hellen Braun liegen. Die Lagerfähigkeit von Hotbox ist im Vergleich zu Warmbox geringer und liegt bei etwa 1-2 Stunden [4, 6, 14, 19, 25]. Es konnte zudem in Untersuchungen von Lucarz [27] festgestellt werden, dass bei der thermischen Behandlung von gebundenen Kernsand in oxidierender und Argon Atmosphäre die Bindermengen unterschiedlichen Mengenverhältnissen reagieren. So konnte ermittelt werden, dass sich beim verwendeten Hotbox-Binder ein Unterschied von 30% einstellt. Bei einer Temperatur von 523,65°C hat die oxidierende Reaktion die höchste Wirkung.

2.2.2 Anorganisch gebundene Sande

Um den Nachteilen von konventionellen organischen Bindersystemen, wie Phenolemissionen und -kondensationen, entgegen zu steuern werden alternative Kerntechnologien zunehmend attraktiver. Eine mögliche Alternative sind hierbei anorganische Bindersysteme, die durch verkürzte Aushärtezeiten, gute Festigkeiten bei Raumtemperatur und eine geringe Emissionsbelastung klare Vorzüge im Gießereibereich genießen. Bevor sich dieses Kernverfahren jedoch weiter durchsetzen kann, müssen bestimmte Prozessschritte abgesichert werden. Zu diesen kritischen Faktoren zählen der mäßige Kernzerfall nach dem Abguss, die atmosphärisch bedingte Festigkeitsabnahme oder die nachträgliche Sandaufbereitung [28].

Grundsätzlich können Wasserglas Binder auf die Grundkomponenten SiO_2 , Alkalioxid (Na_2O) und Wasser zusammengefasst werden. Spezifische Eigenschaften werden über das Modul eingestellt. Dieses Verhältnis, aus SiO_2 zu Alkalioxid, übt einen wesentlichen Einfluss auf physikalischen Eigenschaften wie Viskosität oder Dichte des Binders aus. So nimmt beispielsweise die Dichte mit steigendem Modul ab.

In Abhängigkeit vom Alkalioxid orientiert sich das Modul am Gewichts- oder Molverhältnis, dieses liegt beim Natriumsilikat bei 1,032. Anhand der Molverhältniszahl kann das Modul der Natriumwassergläser in unterschiedliche Klassen unterteilt werden.

- Alkalische WG MVZ < 2,5
- Neutrale Wassergläser MVZ 2,5-3,4
- Saure Wassergläser MVZ > 3,4

Die Mischung von Wasserglas gebundenen Formstoffen wird in konventionellen Mischern durchgeführt, wobei die Lagerfähigkeit in Abgeschlossenen Gefäßen, bedeckt von einem feuchten Tuch, bei mehrere Stunden liegt. Die Wahl der Aushärtung geschieht je nach Anwendungsfall. Durch eine Zugabe von schwachen Säuren (CO_2 oder Ester), durch beimengen von mineralogischen Pulvern (di-Calcium Silikate, Anhydrite etc.) oder durch das direkte Entfernen des Wassers kann die Aushärtung erfolgen, eine Übersicht der verschiedenen Aushärtefälle ist in Abb. 2-8 ersichtlich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Aushärtung mittels Mikrowelle bzw. direktem Entzug des Wassers über die Werkzeugvorwärmung gewählt. Beim Wasserentzug bildet sich eine wasserarme SiO_2 -Gel-Phase, die auf Grund einer niedrigen Viskosität die Körner fixiert [14, 24, 29, 30]. In Abb. 2-9 ist die dementsprechende Kieselsäurereaktion mit dem Einfluss des pH-Wertes abgebildet.

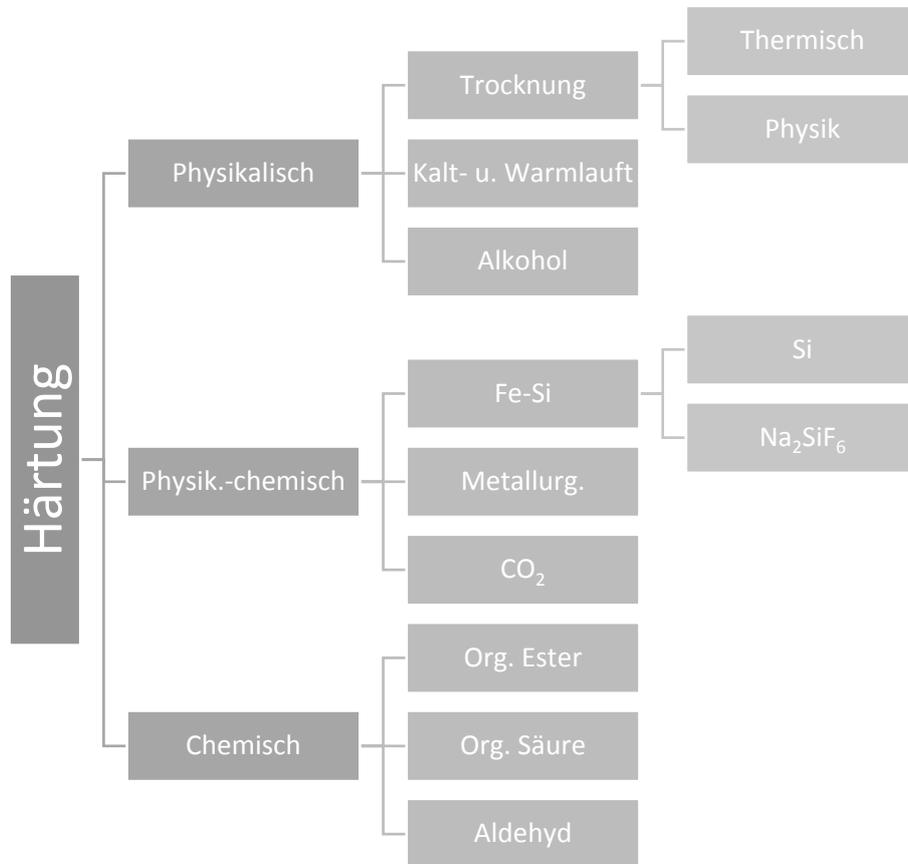


Abb. 2-8:Verfestigungsvarianten von Wasserglasformstoff, nach [30].

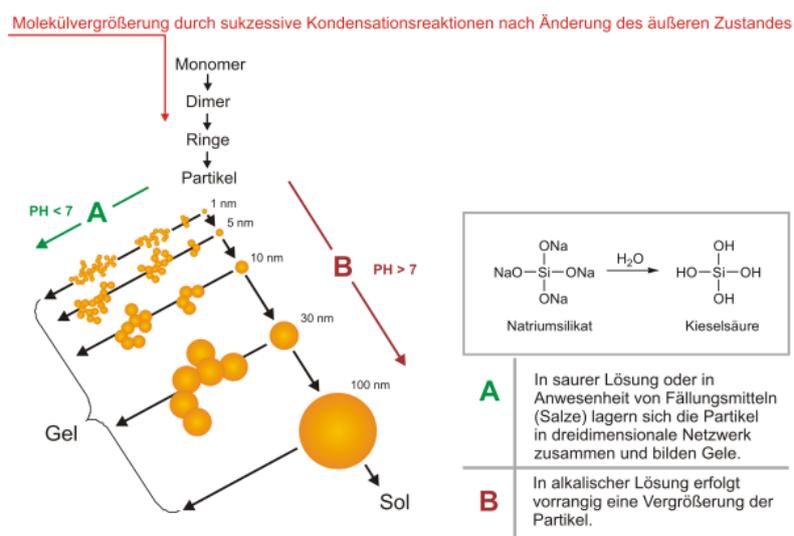


Abb. 2-9: Kieselsäurereaktion, nach [31].



Anzumerken ist, dass der hier verwendete Wasserglas-Binder (ASK-Inotec) ein zweiteiliges Bindersystem ist, wobei die erste Komponente aus einer Alkalisilikat-Lösung besteht und die zweite Komponente einer Feststoffmischung basiert. Diese beeinflussen in weiterer Folge die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Formstoffes. Die Aushärtung wird durch Verdampfung von Wasser und Initialisierung einer Polykondensationsreaktion ermöglicht. Hierbei spaltet sich das Wasser ab und die Ausbildung eines dreidimensionalen SiO_4 -Tetraeder Netzwerks wird ermöglicht [26]. Neben der konventionellen Trocknung kann entweder kalte oder heiße Luft herangezogen werden um das Wasser aus den Kernen auszutreiben. Gegenüber der Trocknung an Atmosphäre führt die Warmlufttrocknung zu höheren Festigkeiten und zu einer besseren Lagerfähigkeit der Kerne. Eine weitere Möglichkeit neben der Warmlufttrocknung ist eine direkte Trocknung mittels Werkzeug. Obwohl ein höherer Wärmeaufwand der Werkzeugvorwärmung notwendig ist, bietet dieses Verfahren auf Grund der einfachen Nutzung wesentliche Vorteile [32].

2.2.2.1 Mikrowellenverfestigung

Die Mikrowellenverfestigung beruht auf einer Polarisierung von Wasser und einem alternierenden Umschalten des elektromagnetischen Feldes. Hierdurch werden die polarisierten Moleküle angeregt und die gespeicherte kinetische Energie wird als Wärmeenergie abgeführt wodurch das Wasser letztendlich verdampft. Der Wellenlängenbereich liegt hierbei zwischen 1 und 1000 mm bei einer Frequenz von 300 GHz bis 300 MHz. Um die Mikrowellenbehandlung entsprechend dem Wasserglas anzupassen, ist die Kenntnis bestimmter Einflussfaktoren notwendig. Hierzu zählt die Permeabilität oder der "loss-Faktors" (dielektrischer Verlustfaktor). Der Einfluss von Wasserglas auf die Permeabilität ist nicht unerheblich und kann zu einer höheren elektrischen Kapazität führen. Ein weiterer entscheidender Faktor bei der Mikrowellentrocknung sind die verwendeten Sande und deren Zusammensetzung. So weist Quarzsand, unabhängig von der Korngrößenverteilung, eine konstante Permeabilität auf, hat jedoch einen hohen Verlustfaktor. Dies führt, bei einer Frequenz von 2,45 GHz, zu einer relativ schlechten Erwärmung des Quarzsands, wodurch ein effektives Austreiben des Wassers erschwert wird. Chromitsand verfügt über den geringsten Verlustfaktor, wodurch auch das Austreiben von Wasserglas vergleichsweise schneller abläuft als die Erwärmung des Sandes an sich. Die besten Ergebnisse werden mit Olivinsand erreicht [33 bis 35]. Der grundlegende Vorteil der Mikrowellentrocknung ist eine homogene Bauteil Durchwärmung bei geringer Zeitdauer. Es kann laut Untersuchungen von Polzin [32] eine wesentlich höhere Festigkeit von

Wasserglas gebundenen Kernen durch die Mikrowellenaushärtung erreicht werden. Eine Gegenüberstellung zu konventionellen Verfahren wie der CO₂-Begasung und einer Aushärtung im Umluftofen ist in Abb. 2-10 abgebildet.

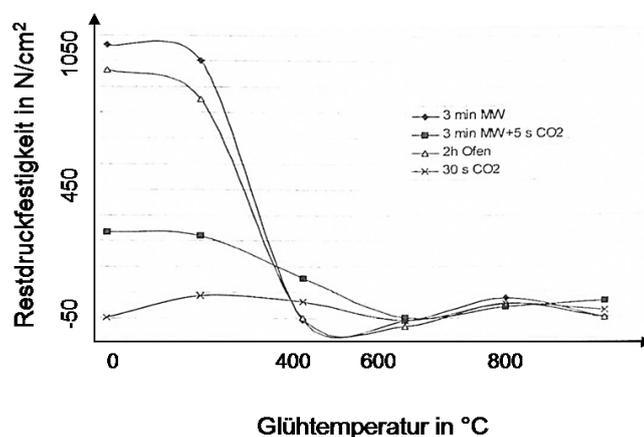


Abb. 2-10: Restdruckfestigkeit bei ver. Auslagerungen für Wasserglas Modul 2,5, nach [32].

Wesentlich höhere Festigkeiten werden durch eine gute Benetzung der Körner durch den Binder und einen vollständigen Wasserentzug aus der Binderlösung erreicht. Eine langsame Mikrowellenaufheizung macht sich durch eine glatte Silikagelverbindung bemerkbar. Zudem nimmt die Festigkeit mit steigender Irregularität der Verbindungsschicht zunehmend ab [32, 36]. Eine Gegenüberstellung des Einflussfaktors Modul auf die mechanischen Eigenschaften nach einer Mikrowellentrocknung ist in Tab. 2-2 ersichtlich.

Tab. 2-2: Einfluss des Moduls auf die mechanischen Eigenschaften nach einer Mikrowellentrocknung, nach [32].

	Modul > 2,5	Modul < 2,5
Reaktivität	↑	↓
Verarbeitbarkeit	↓	↑
Lagerfähigkeit	↓	↑
Festigkeitsverhalten	↓	↑
Abriebfestigkeit	↓	↑



Restfestigkeit	↓	↑
----------------	---	---

2.3 Thermomechanische Belastung von Kernformstoffen

Der Wärmestrom der flüssigen Schmelze beim Gussprozess einen wesentlichen Einfluss auf den Formstoff bzw. die verwendeten Kerne.

Beispielsweise weichen granulare Medien durch den Einfluss der Thermik, im Gegensatz zu festen Stoffen, im physikalischen und thermischen Verhalten ab. Wobei das mechanische Bruchverhalten von granularen Medien nicht im selben Umfang untersucht wurde, wie beispielsweise von Metallen. So zeigen Sande bei Druck- oder Scherbelastung einen nicht linearen Anstieg der thermischen Leitfähigkeit auf. Grund hierfür ist eine erhöhte Anzahl an Berührungspunkten bei Druckbelastung bzw. eine Abnahme von Berührungspunkten (Erhöhung des freien Volumens) im Fall von Scherung [3, 37]. Diese mechanischen und thermischen Belastungen können anhand von Untersuchungen nach Hofmann [38] näher verdeutlicht werden.

Erste Untersuchungen zum thermischen Einfluss auf bentonitgebundene Formstoffe (Grünsand) und zur der Ausbildung unterschiedlicher thermischer Zonen wurden durch Levelink [39] durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass sich beim Erstkontakt zwischen Schmelze und Formstoff eine Feuchtigkeitskondensationszone ausbildet. Diese hat einen erhöhten Wassergehalt, wodurch wiederum die Festigkeit in dieser Zone abnimmt. Formstoffbestandteile können sich auf Grund von Druckspannungen lösen, wodurch formstoffbedingte Fehler wie Schülpen während dieser Schalenbildung begünstigt werden. In Untersuchungen durch Boenisch [39] wurde die Grundlage für formstoffbedingte Gussfehler wie Schülpen und Blattrippen, welche durch mechanische Spannungsunterschiede bei der Schalenbildung entstehen, näher behandelt. Laut Boenisch werden diese Spannungsunterschiede durch die Wärmeausdehnungen des Quarzsandes eingeleitet und verursachen Druckspannungen im Formstoff, wodurch eine Infiltration der Schmelze und somit Blattrippenfehler begünstigt werden. Die vorherrschende Druckspannung ist wiederum vom Ausdehnungsvermögen sowie der entgegenwirkenden Starrheit der einzelnen Kornverbindungsstellen abhängig [39 - 41].

Entgegen dem angenommenen einachsigen Spannungsmodell von Boenisch, kann jedoch nach theoretischen Überlegungen von einem mehrachsigen Spannungszustand, wie in Abb. 2-11 ersichtlich, ausgegangen werden. Da der Wärmestrom in der ersten Kontaktzone zu einer Volumenabnahme und Quellverlust des Bentonits führt und dieser Effekt nur teilweise durch den Formstoff und auch Quarzprung kompensiert wird, können Zugbelastungen in der Formstoffmatrix entstehen. Mit fortschreitendem Wärmeeinfluss nimmt die Sättigung in der Kondensationszone zu. Wodurch ein Feuchtigkeitsanstieg, der ein Quellen des Bentonits

innerhalb der Formstoffmatrix begünstigt und somit Druckspannungen ausübt, im Formstoff einsetzt. Ein Spannungsabbau findet beim Übergang zur unbeeinflussten Zone statt.

Anhand dieses Ansatzes kann für die thermomechanische Belastung von Kernformstoffen ein ähnlicher Ansatz angenommen werden. Im Gegensatz zu einer definierten Kondensationstemperatur wie bei bentonitgebundenen Formstoffen, bildet sich bei Kernformstoffen stattdessen ein undefinierter Temperaturbereich aus, in welchem die Binderdegradation, Verdampfung und Kondensation von beispielsweise phenolhaltigen Bestandteile abläuft [42].

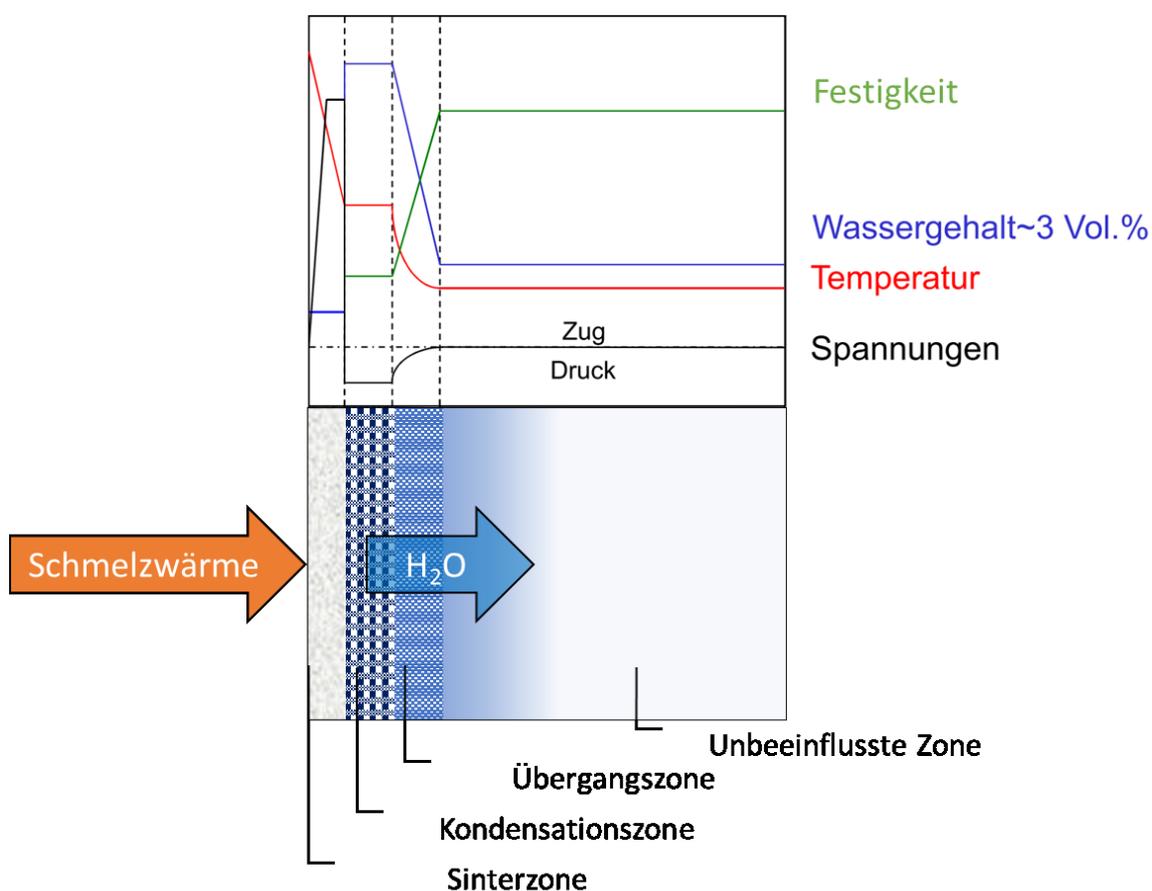


Abb. 2-11: Mechanisch-thermisches Verhalten von Formstoffen beim Guss, nach [42].

2.3.1 Entkernverhalten und Kernzerfall

Da der Kernzerfall maßgeblich durch thermische Einflüsse gesteuert wird, ist die Entkernbarkeit der Gussbauteile und somit auch die entsprechenden Fertigungsprozesse vom Entkernverhalten abhängig. Unter der Entkernbarkeit versteht man im Allgemeinen das Entfernen der sich noch im abgegossenen Gussbauteil befindlichen Kerne. So werden Sandreste, teilweise degradierte Kernpakete und etwaige Materialien nass oder trocken aus den Gussbauteilen entfernt. Beim Nassentkernen werden Hochleistungs-Wasserdüsen herangezogen um Kerne und Binder über das Anbringen von Wasser zu entfernen. Durch den zusätzlichen Eintrag von Sand können schwer anhaftende Bestandteile ebenfalls entfernt werden. Die trockene Entkernung wird überwiegend verwendet und lässt sich in eine pneumatische oder mechanische Entkernung bzw. eine Kombination aus beiden Varianten mit optionaler Erwärmung unterteilen. Hierbei werden, durch das Einbringen von kinetischer Energie (Hammerschläge oder Rotation), die Sandverbindungen gelockert und das Gussbauteil somit vom Kern gelöst. Eine zusätzliche Erwärmung wird unter Umständen herangezogen um bei oxidierenden Bedingungen schwerlösliche organische Kernreste zu entfernen. Die Kernfestigkeit übt einen wesentlichen Einfluss hierbei aus, mit steigender Festigkeit nimmt dementsprechend auch die Entkernbarkeit stetig ab und nachfolgende Prozesse werden hierdurch unweigerlich verlängert und Kosten erhöht [21, 25]. Beim ersten Schmelzekontakt, setzt eine thermische Aushärtung des gebundenen Kernmaterials ein. Im weiteren Verlauf schreitet das Ausbacken der Binderverbindungen bis hin zu einer kompletten Degradation des Bindersystems weiter voran. Je nach Anwendungsgebiet sind unterschiedliche Anforderungen an die Kernmaterialien gefordert. So üben etwa Faktoren wie die Werkstückdicke, Verhältnis Sand zu Metall oder die Gießtemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Entkernbarkeit aus. So ist beispielsweise ein schnellerer Kernzerfall bei Aluminiumlegierungen gefordert. Bei Gusseisen hingegen kann auf Grund der physikalischen Bedingungen ein vergleichsweise geringeren Energieeintrag bei der Entkernung beobachtet werden [43]. Um die Komplexität des Kernzerfalls näher beschreiben zu können, wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Einflussfaktoren Atmosphäre, Temperatur, Formstoff und Binder näher eingegangen.

Der Grundstoff übt einen immensen Einfluss auf den Kernzerfall nach dem Abguss aus. So wird der Kernzerfall durch die Wärmeausdehnung von Quarzsand und den damit verbundenen Quarzprung erschwert, welcher einen Spannungsanstieg hervorruft. Dieser wird jedoch durch die Sandmatrix selbst ausgeglichen. Durch beimengen Al_2O_3 haltiger Additive können Ausdehnungseffekte zudem gemindert werden und ermöglichen somit einen besseren Kernzerfall [44].

Laut Izdebska [45] wurde ein Kernzerfall bei organischen Bindern, wie Coldbox-Bindern schon bei 280°C festgestellt. Wobei ebenfalls festgestellt wurde, dass inkohärente Wärmezonen zu inkohärenten Spannungszonen führen können.

Laut Grabowska [46] stellt sich während der thermischen Degradation eine Reduktion der molaren Masse, auf Grund des Binderbrückenzerfalls, siehe Abb. 2-12. Während der thermischen Degradation von organischen Verbindungen können irreversible Umwandlungen erfolgen, meist in der Verbindung mit einer "Abkopplung" von leicht flüchtigen Molekülverbindungen. Somit kann eine generelle Verbindung zwischen der Degradationstemperatur und der chemischen Struktur abgeleitet werden.

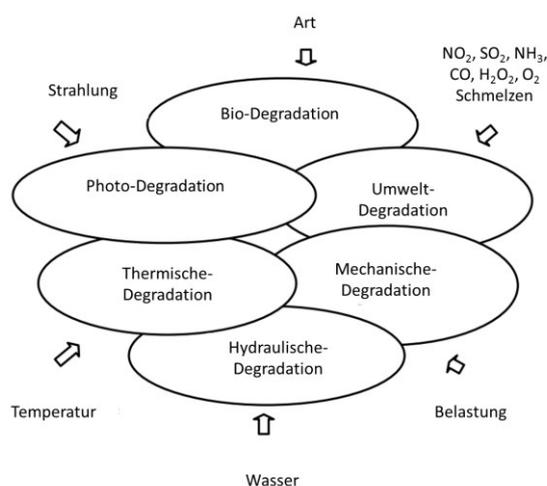


Abb. 2-12: Arten und Einflüsse von Degradation von organischen Bindern, nach [46].

Bei anorganisch gebundenen Formstoffen liegt laut Untersuchungen von Binderherstellern (ASK-Chemicals) [47] die optimale Entkerntemperatur für anorganisch gebundenen Kerne bei 60-100°C. Zudem konnte laut Kleinheyer [48] ein Zusammenhang zwischen Kernzerfall und Zusammensetzung festgestellt werden. So spielen die Natriumatome und Hydroxylgruppen eine wesentliche Rolle für die Hygroskopizität, jene Eigenschaft Feuchtigkeit aus der Umgebung aufzunehmen. Der Kernzerfall wird durch die Ausbildung von niedragschmelzenden eutektischen Verbindungen aus Na_2O und SiO_2 erschwert. Diese lassen sich durch das Beimengen von anorganischen Karbonatgruppen verbessern.

Anorganisch gebundene Sande verfügen über einen ausgeprägten Festigkeitsverlauf. Dieser bildet bei 200°C und 800°C ein Maximum. Das erste Maximum beginnt sich auf Grund des ausdiffundierenden Lösungswassers zu bilden und das zweite in Folge von Schmelz- und Sinterprozessen im wasserlosen Silikat. Eine merkliche Abnahme der Festigkeit ist mit zunehmender Temperatur, auf Grund einer Trocknung im Gelfilm, feststellbar. Das Minimum liegt hierbei zwischen 500°C und 600°C. Die Ausbildung von Glasphasen, niedrigschmelzenden eutektischen Verbindungen, und der daraus resultierende Festigkeitsanstieg erschwert in weiterer Folge die nachträgliche Entkernbarkeit der Gussteile. Um die Restfestigkeit zu senken können auch organische Bestandteile (z.B. Graphit, Glukose oder Phosphor) zwischen 5 % bis 20 % dem Binder hinzugegeben werden. Diese bilden bei höheren Temperaturen Fehlstellen im Silikatverbund aus und setzen die Restfestigkeit somit herab [14, 30, 32, 49 bis 51]. Der Festigkeitsverlauf für anorganisch gebundenen Formstoffe ist in Abb. 2-13 ersichtlich.

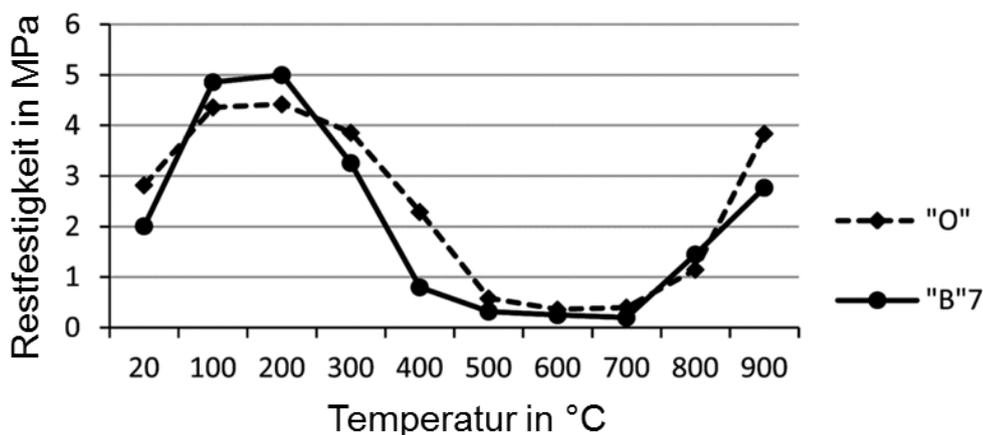
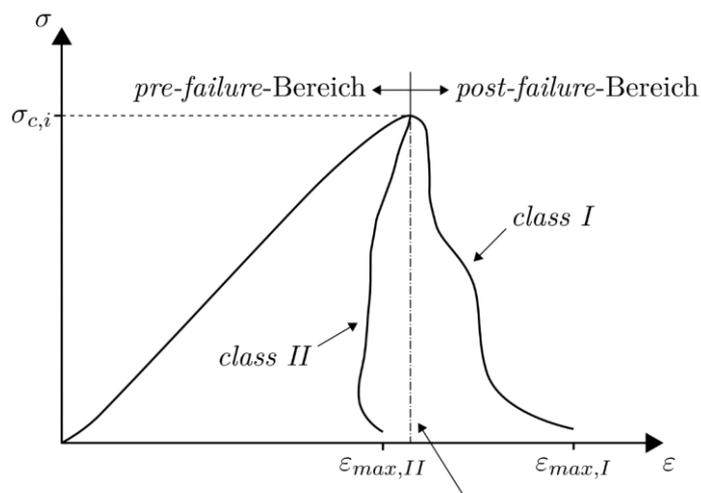


Abb. 2-13: Festigkeitsverlauf über Temperatur, nach [49].

Um eine Auskunft über das Entkernverhalten zu erlangen, ist die Restfestigkeit bei Raumtemperatur gealterter Proben von Interesse. So liefert hierbei die Zeit bis zum Versagen, bei konstanter Belastung einen Bezug zur Entkernbarkeit [19]. So wurde laut Döpp [52] der Kernzerfall des Wasserglas CO_2 Verfahrens über Druckversuche an thermisch ausgelagerten Normprüfkörpern ermittelt.

Eine Auskunft über die Restfestigkeit, kann ebenfalls durch die Analyse des Spannungsverlaufes der Biegefestigkeit erhalten werden. Die Restfestigkeit von granularen Medien kann hierbei durch den post-failure-Bereich beschrieben werden. Dieser gibt einen Zusammenhang zum Kernzerfall und zur notwendigen Energie, welche über das Hooke'sche Gesetz hergeleitet werden kann. Das Hooke'sche Gesetz bildet einen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung, wobei der Elastizitätsmodul E als proportionaler Faktor notwendig ist. Der post-failure-Bereich kann zudem in zwei Klassen unterteilt werden. Diese beschreiben plastisches (Class 1) und sprödes (Class 2) Nachbruchverhalten [53 bis 56]. Der Zusammenhang des Hooke'schen Gesetztes und der Bruchenergie wird ebenfalls in den Untersuchungen von Stauder [57] ausführlich behandelt.



Gespeicherte Energie = Erforderliche Energie für totales Versagen

Abb. 2-14: Bruchbereiche im Spannungs-Dehnung-Diagramm [53].

Der Kernzerfall sowie die hierfür notwendige Bruchenergie wurde durch Major-Gabrys [58] untersucht. Hierfür werden zylindrische Proben (50x50 mm) in vordefinierte Formen gegeben und mit flüssigem Aluminium übergossen. Nach dem Abkühlen wird der umgossene Kern im Anschluss über eine Vorrichtung mit 1,63 J ausgeschlagen, wobei die gesamte Kernbruchenergie von der Schlagzahl abhängt. Das Entkernverhalten der Proben wird jedoch durch ausdehnungsbedingte Kern-Eigenspannung erschwert und somit teilweise verfälscht. Durch Kenntnis der Formstoffausdehnung nach dem Gießvorgang kann dem entgegengewirkt werden. Eine Übersicht zum Versuchsaufbau ist in Abb. 2-15 dargestellt.

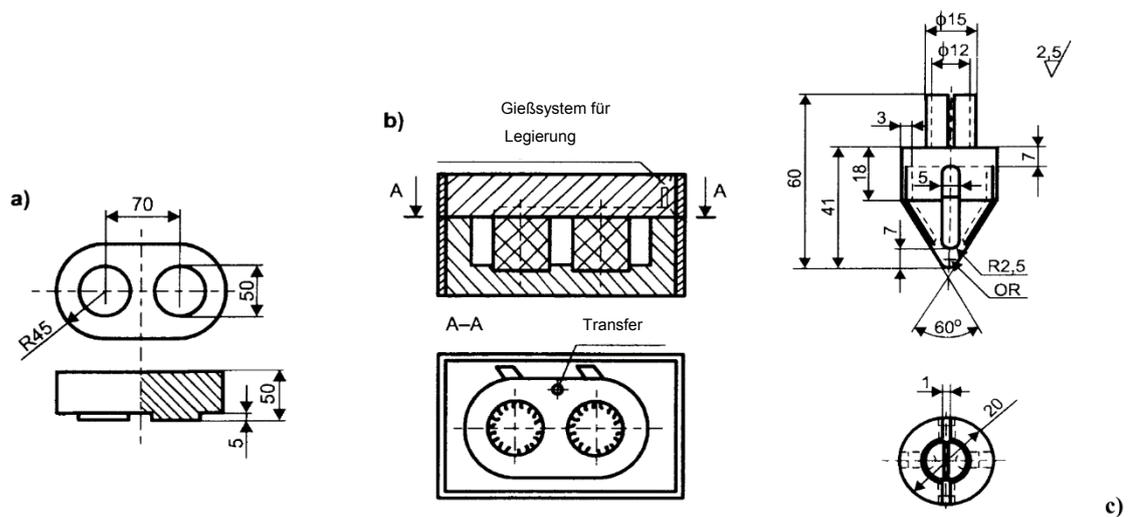


Abb. 2-15: Kernzerfall-Versuchsaufbau (a) Herstellform, (b) Versuchsaufbau nach PN-85/H-11005 und (c) Ausschlagstift, nach [59].

2.3.2 Ermittlung der mechanischen Kennwerte

Nach Zein [60] weichen heterogene granulare Medien wie Formsande von den theoretischen Begebenheiten und dem linear-elastischen Verformungsverhalten nach Hooke ab. Dies kann auf deren Zusammensetzung und Aufbau zurückgeschlossen werden. Zudem zeigen granulare Medien eine direkte Abhängigkeit von der Belastungsart, wodurch sich unterschiedliche Versagensformen ergeben und die ermittelten Festigkeiten von der Art der Verformung abhängen. An Hand von Triaxialversuchen kann zwischen unterschiedlichen Brucharten, wie Spalt-, Scher- und Gefügebruch unterschieden werden. Im Gegensatz zu granularen Medien besitzen kristalline Stoffen eine regelmäßige Raumgitterstruktur und weisen bei einer Deformation, auf Grund von äußere Krafteinwirkung, eine Verschiebung der Atome aus ihrer Gleichgewichtslage auf [3, 61, 62]. Um die Festigkeit und somit den Widerstand eines Körpers gegen die eigene Verformung zu ermitteln, wird bei der Formstoffprüfung auf unterschiedliche Einzelmessungen, wie in Abb. 2-16 ersichtlich, zurückgegriffen. Diese die Festigkeit bildet den Widerstand eines Körpers gegen Verformung. Wobei diese Verformung durch Spannungen wie Druck (a), Scherung (b), Zug (c) Biegung (d) oder Spalt (in Abbildung nicht ersichtlich) eingeleitet werden kann.

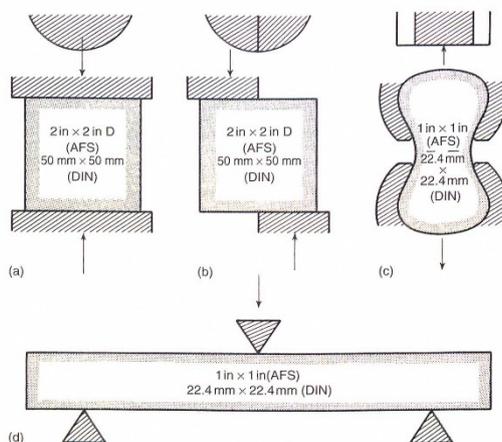


Abb. 2-16: Übersicht der verschiedenen Prüfmethode ohne Spaltfestigkeitsprüfung zur Bestimmung der Formsandfestigkeit [19].

Je nach Herstellverfahren kann zwischen der Grünfestigkeit und Trockenfestigkeit von Formstoffen unterschieden werden. Die Grünfestigkeit ist überwiegend bei Sandformen ausschlaggebend und bezieht sich auf jene Eigenschaft die diese im nicht getrockneten Zustand haben müssen. Bei Kernen kommt hingegen die Trockenfestigkeit zum Tragen, da

Kerne im Allgemeinen in vorgeheizten Werkzeugen geschossen werden bzw. ausgebacken werden. Die Trockenfestigkeit umfasst hingegen all jene Herstellverfahren bei der die Kerne eine dedizierte Aushärtung oder Trocknung durchlaufen müssen. Die Trocknung führt im Allgemeinen zu einem Verlust an Plastizität, welche ebenfalls durch eine Selbstaushärtung der Formstoffe hervorgerufen werden kann. Obwohl die Grünfestigkeit eine untergeordnete Rolle spielt, gibt es vereinzelte Beispiele in denen die Grünstandfestigkeit von Kernen ausschlaggebend ist. Ein Beispiel hierfür wären überdimensionale Kernpakete die an Atmosphäre getrocknet werden müssen oder auch im Grünzustand vergossen werden [17].

Bei der mechanischen Belastung von Kernen werden unterschiedliche Spannungen impliziert. Es kann hierbei zwischen der totalen Spannung, jener Spannung die sich aus der Maximalkraft und belasteten Fläche zusammensetzt und der effektiven Spannung, jener Spannung die den Kornzusammenschluss verformt und Reibungskräfte hervorruft, unterschieden werden. Das signifikante Bruch- und Deformationsverhalten von Formstoffen spiegelt sich ebenfalls im Versagen der Proben wieder. Das Bruchverhalten von Kernen kann auf Erkenntnisse aus der Geologie zurückgeschlossen werden. So kann beispielsweise bei einer Zugbeanspruchung eine Ausbildung von absorbierenden Mikrorissen innerhalb des Gefüges beobachtet werden. Bei steigender Belastung nimmt der Rissfortschritt zu und es kommt zu einer Ausbildung von Makrorissen [3, 63, 64]. Diese Makrorisse schließen sich bei einer Belastungserhöhung zusammen, wodurch letztendlich der Bruch zustande kommt.

Bei der Betrachtung der Biegebelastung oder Scherbelastung wirken sich diese Unregelmäßigkeiten im Aufbau, wie Poren, Risse, oder Partikel, auf den eigentlichen Bruchpunkt aus. Nach Simmer [63] korreliert beispielsweise die Porenzahl im Bereich der Scherfuge mit der Abnahme nach Erreichen der höchsten Spannung (Bruchfestigkeit). Diese Einflüsse haben letztendlich einen direkten Bezug mit der Bruchzähigkeit des Formstoffes. Um die Mehrachsigen Spannungsbegebenheiten näher zu beschreiben wird der Bruchvorgang von granularen Medien (Gestein oder Formstoffen) entweder über das Mohr-Coulomb'sche Versagenskriterium oder eine angepasste Versagenskurve nach Hoek und Brown beschreiben. Unter dem Hoek-Brown Kriterium versteht man eine empirische Anpassung der Bruchgeraden mittels Triaxialversuche um eine Abschätzung der Festigkeit von inhomogenen granularen Medien zu ermöglichen [3, 56, 65]. Eine Gegenüberstellung der beiden Festigkeitsmodelle ist in Abb. 2-17 dargestellt. Für die Auswertungen dieser Arbeit wurde jedoch das Mohr-Coulomb'sche Versagenskriterium herangezogen.

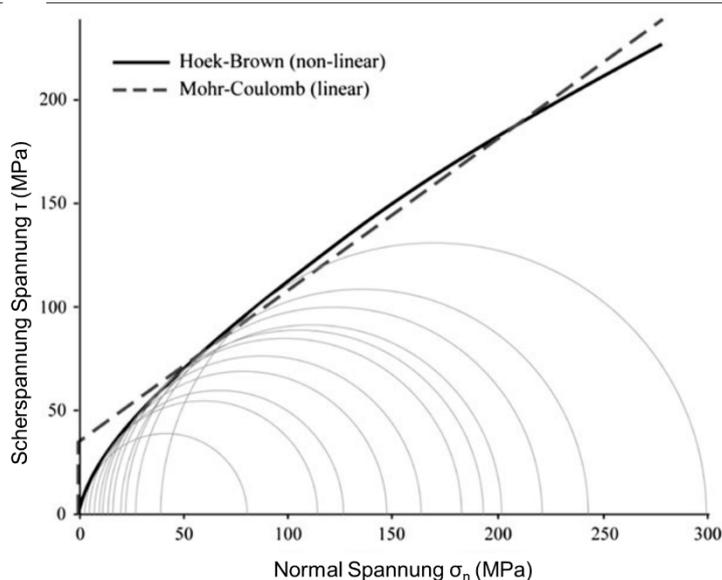


Abb. 2-17: Gegenüberstellung von linearem Mohr-Coulomb und nicht linearem Hoek-Brown Kriterium, nach [65].

Da eine Messung der Zugfestigkeit im Rahmen dieser Arbeit nur bedingt möglich war wurde aus diesem Zweck eine Vergleichende Messung herangezogen. Diese sollte über eine Spaltzugfestigkeitsmessung bewerkstelligt werden, wobei die Belastung einer liegenden zylindrischen Probe radial mit Druck erfolgt. Nach Bonzel [66] wurden Zusammenhänge zwischen Spalt- und Zugfestigkeit näher untersucht und dokumentiert. Obwohl es sich bei der Spaltzugfestigkeit um einen zweiachsigen Spannungszustand handelt, Zug und Druck wie in Abb. 2-18 ersichtlich, ist eine geometrieunabhängige Annäherung möglich. Dies ist auch in Abb. 2-19 ersichtlich, wobei erkennbar ist, dass eine Messung mittels der Spaltzugfestigkeit zu einer geringeren Streuung der Werte und somit einer genaueren Annäherung zur Zugfestigkeit erreicht werden kann als mit der konventionellen Biegezugfestigkeit. In Abb. 2-19 ist der Wirkungsbereich der Zugspannung erkennbar. Dieser liegt entlang des Durchmessers zwischen 0,85 bis 0,9 d und entlang der Höhe von 0,5 bis 0,7 d, wobei äußere Einflüsse (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) eine untergeordnete Rolle spielen [67].

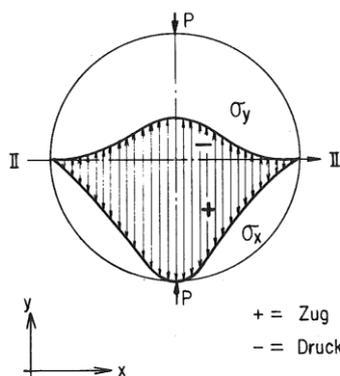


Abb. 2-18: Spannungsverteilung für Spaltfestigkeit, nach [60].

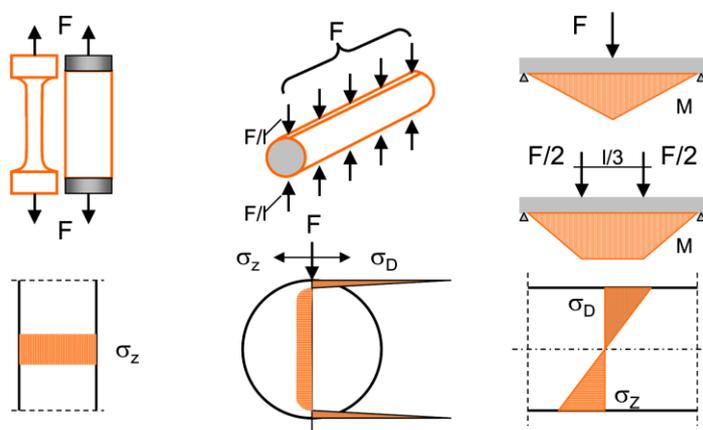


Abb. 2-19: Prüfanordnung und Spannungszustände bei verschiedenen Zugbeanspruchungen [67].

Laut Malarics [68] zeigt die Spaltzugprüfung eine Abhängigkeit von der Prüffläche. Um einen gezielten Zugbruch zu erzielen wird in der Literatur die Verwendung eines Lastverteilungstreifens empfohlen. Dieser soll die Tendenz zu Mehrachsigen Spannungszuständen vermindern bzw. vermeiden und die gleichmäßige Verteilung der Spannung ermöglichen. In der Praxis wird hierfür ein Hartfilzstreifen mit vordefinierter Geometrie (z.B. Breite= $d/10$) verwendet und muss an die Proben und die Prüfung angepasst werden, beispielsweise führt ein breiter Lastverteilungstreifen zu einem keilförmigen Ausbruch und somit zu einem Schubbruch. Abhängig vom überwiegenden Spannungsanteil, Zug- bzw. Druckfestigkeit, bilden sich unterschiedliche Lastverläufe in der Probe, wobei zwischen Druck-, Zug- und Schubbruch unterschieden werden muss. Auf Grund dieser unterschiedlichen Spannungsanteile konnte in Gegenversuchen eine geringere

Zugfestigkeit, wobei das Verhältnis bei 0,75 lag, ermittelt werden [60, 66 bis 68]. Die unterschiedlichen Lastverläufe sind in Abb. 2-20 ersichtlich.

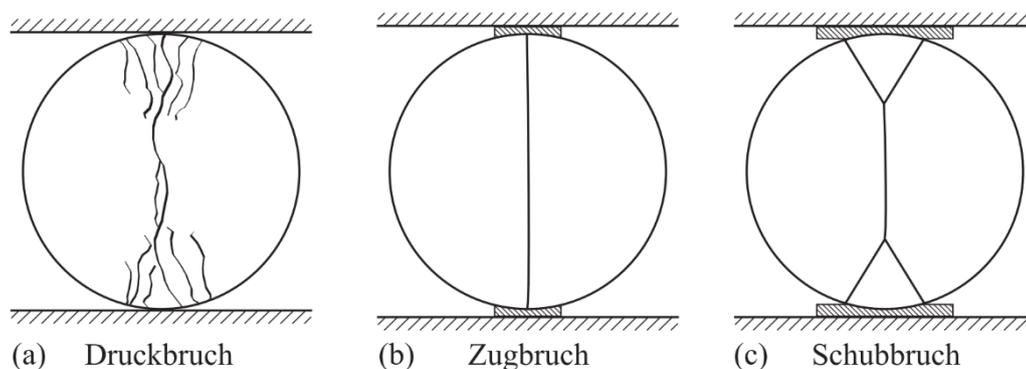


Abb. 2-20: Brucharten bei Spaltfestigkeit (a) Druck-, (b) Zug- und (c) Schubbruch, nach [68].

Anhand von Untersuchungen zum Spannungsverhalten von Beton, sind neben dem Zusammenhang zwischen Spalt- und Zugfestigkeit auch weitere Zusammenhänge erkennbar und daraus folgend eine Unregelmäßigkeit in der Spannungsverteilung über den Bruchquerschnitt. So hängt beispielsweise die Biegezugfestigkeit stark von der Geometrie des Probenkörpers und dessen Belastungsart ab. Aus Erfahrungswerten der Betonprüfung konnte ein Verhältnis 2:1 zwischen Biege- zu Zugfestigkeit festgestellt werden. Laut Bika [66] liegt ebenfalls ein Verhältnis zwischen der Druck- und Zugfestigkeit von Beton vor. Über ein Verhältnis von größer 10:1 können erfahrungsgemäß die besten Ergebnisse und somit eine deutliche Annäherung für Beton erzielt werden [60, 66]. Inwiefern solche Verhältnisse für Formstoffe übernommen werden können, muss noch ermittelt werden.

2.3.3 Mohr'scher Spannungskreis

Unter dem Spannungskreis versteht man die visuelle Zusammenführung der Normalspannung und Scherspannung. Wobei in den verschiedenen Auswertungen zwischen zwei Darstellungsarten unterschieden wird, welche sich wiederum am Belastungsfokus orientieren. So liegt beispielsweise der Fokus bei keramischen Werkstoffen auf der Druckfestigkeit und bei metallischen auf der Zugfestigkeit. Die abgebildeten Spannungskreise im theoretischen Abschnitt dieser Arbeit befassen sich mit keramischen Werkstoffen und somit dem Druck-Spannungskreis. Für die Auswertung der Ergebnisse wurde jedoch die metallurgische Darstellung gewählt, welche den Fokus auf den Zug-Spannungskreis legt.

In Abb. 2-21 ist eine schematische Darstellung zum Spannungskreis ersichtlich. In (1) ist die Aufteilung der Hauptspannungen σ_1 und σ_3 auf die Normalspannung σ_N und Scherspannung τ entlang einer f Versagensfläche ersichtlich. Der aus σ_1 und σ_3 konstruierte Spannungskreis ist in (2) dargestellt, und verdeutlicht im σ - τ -Diagramm den vorliegenden Spannungszustand, wobei in (3) die Ermittlung der tangential anliegenden Bruchgerade ersichtlich ist. Die Hauptspannungen bilden den Kreismittelpunkt im Spannungskreis. Da eine Abhängigkeit zwischen dem Betrachtungswinkel und den Hauptspannungen besteht, können die Normalspannungen anhand dessen bestimmt werden. Zudem wird im Mohr'schen Spannungskreis der Grenzzustand (Bruchzustand) durch das Verhältnis der Hauptspannungen σ_1 und σ_3 wiedergegeben, wobei $\sigma_1 > \sigma_3$ sein sollte [62, 69, 70]. Auch der Winkel θ der Versagensfläche ist aus dem Diagramm ableitbar. Die Abschnitte (4) bis (6) zeigen den Einfluss der Kohäsion c und des Reibwinkels φ auf das Mohr'sche Kriterium und somit die Bruchgerade. Da die Bruchgerade das Probenversagen widerspiegelt, ist ein Übersteigen dieser Gerade durch die gebildeten Spannungskreise auch nicht möglich.

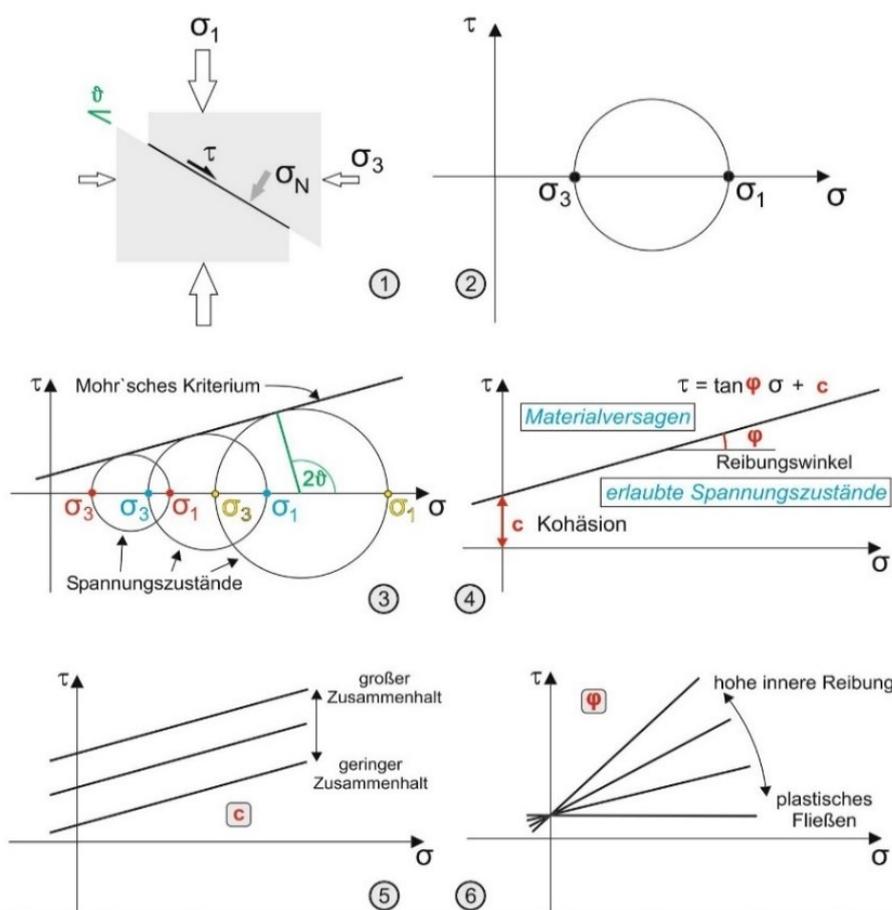


Abb. 2-21: Schematische Veranschaulichung von Einflüssen auf den Spannungskreis von keramischen Werkstoffen, nach [69].

Die Steigung der Bruchgerade wird durch den inneren Reibungswinkel wieder gespiegelt. Als direkte Einflussfaktoren können Materialparameter wie Korngrößenverteilung, Einzelkornrauheit und das Korngefüge genannt werden. Die Kohäsion entspricht dem Schnittpunkt mit der Ordinate, wobei diese im Allgemeinen der Scherfestigkeit entspricht. Die aufzuwendende Differenzialspannung für den Probenbruch ist somit proportional zur Kohäsion, wobei Einflussfaktoren wie beispielsweise der Binder eine wesentliche Rolle hierbei spielen. Wie beispielsweise in Abschnitt 4.4.4 ersichtlich, kann über den Winkel der Bruchgerade zwischen einer hohen inneren Reibung und dem plastischen fließen des Schüttgutes unterschieden werden. Unter fließen eines Schüttgutes versteht man die plastische Deformation der Kornmatrix, wobei die einzelnen Partikel eine Relativbewegung zueinander haben. Grund hierfür sind eingebrachte Spannungen in Form von Normal-, Scher- oder Schubspannungen [62, 69, 70]. Bei Kenntnis der Spannungskomponenten und Materialparameter können die spezifischen Normalspannungen und Scherspannungen für eine bestimmte Betrachtungsebene, wobei der Reibungswinkel beliebig geneigt sein kann,



visuell, mittels Mohr'schen Spannungskreis, oder wie nachfolgende beschrieben über eine analytische Vorgehensweise bestimmt werden

Zusammenfassend kann die Scherfestigkeit als linearer Zusammenhang zwischen der Kohäsion (Hafffestigkeit) und Reibung wiedergegeben werden, wobei sich die Berechnung wie folgt zusammensetzt [63].

$$\tau_f = c + \sigma_f * \tan\varphi \quad (2-1)$$

- τ_f Scherfestigkeit (Schubspannung in der Scherfuge in Richtung der Scherbewegung)
- c effektive Kohäsion (Achsenabschnitt der Gerade auf Ordinate)
- φ effektiver Reibwinkel (Neigungswinkel der Gerade im Diagramm)
- σ effektive Spannung (belastende Normalspannung in Scherfuge)

Da die Scherfestigkeit von Formstoffen bzw. granularer Medien eine Abhängigkeit von der inneren Materialstruktur aufweist, liegt somit ein direkter Zusammenhang zwischen der Reibspannung und Kohäsion vor. Die Kohäsion jene Scherfestigkeit ist, die bei fehlendem Normaldruck ($\sigma=0$) vorherrscht und auf den Bindekräften zwischen den einzelnen Körnern beruht, welche unter Umständen auch die Reibungskraft übersteigen können [63, 69, 71]. Somit liefert die Kohäsion einen wichtige Hinweise zum thermischen Degradationsverhalten.

2.3.4 Weibull-Verteilung

Um die Weibullverteilung besser verstehen zu können, kann man sich eines Gedankenexperimentes behelfen. Hierzu werden für eine Kette unter Zugbeanspruchung jeweils die Überlebenswahrscheinlichkeiten W_1 und W_2 sowie die expliziten Längen L_1 und L_2 herangezogen. Die Überlebenswahrscheinlichkeit für die gesamte Kette (L_1+L_2) wäre dementsprechend ein Produkt der einzelnen Wahrscheinlichkeiten (W_1 und W_2). Dieses Gedankenexperimente wird in der folgenden Formel wiedergespiegelt [13].

$$W(V) = W(V_0)^x = e^{[x \cdot \ln W(V_0)]} \quad (2-2)$$

Durch eine unterschiedliche Festigkeitsverteilung von keramischen und metallischen Werkstoffen erweisen sich deren Bewertung und Vergleich als ungemein schwierig. Um dieses Fertigeitsverhalten näher beurteilen zu können wird als Beurteilungsgrundlage von keramischen Werkstoffen die Weibull-Verteilung in Anspruch genommen. Diese spiegelt die Ausfallwahrscheinlichkeit der Proben wieder, wobei eine geometrieunabhängige Streuung bei der Festigkeitsmessung feststellbar ist [13, 72, 73]. Ein Vergleich zwischen der Ausfallwahrscheinlichkeit metallischer und keramischer Werkstoffe und der Festigkeitsverteilung von Keramik ist in Abb. 2-22 ersichtlich.

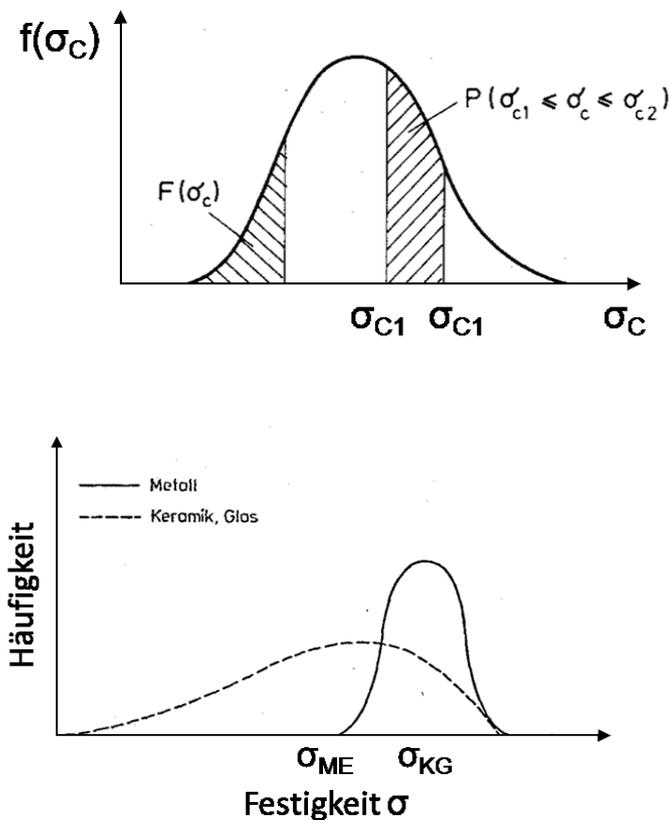


Abb. 2-22: (oben) Festigkeitsverteilung von Keramik und (unten) Ausfallwahrscheinlichkeit bei unterschiedlichen Festigkeiten für Keramik und Metall, nach [72, 73]

Zur Auswertung der Weibull-Verteilung wird eine doppelt logarithmische Darstellung in Form eines Weibullnetzes gewählt, wobei eine minimale Stichprobenanzahl von 10 Proben notwendig ist. Für die Ermittlung der Verteilung werden Parametern wie σ und m herangezogen. Der Parameter m beschreibt die Streuung bzw. die Streubreite der ermittelten Festigkeiten und σ jene mittlere Festigkeit bei der 63,2% aller Proben versagen. Beispielsweise liegt die Streubreite m für keramischen Werkstoffen zwischen 5 und 20. Allgemein gilt für m , mit steigendem Wert nimmt auch die Zuverlässigkeit der untersuchten Proben zu [13, 73]. Die Grundlage für eine doppelt logarithmische Weibull-Verteilung ist in der nachfolgenden Formel angegeben.

$$\ln \ln \frac{1}{1-F} = m \ln \sigma_c - m \ln \sigma_0 \quad (2-3)$$

3 Experimentelle Methoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Apparaturen und die Vorgehensweise ausgehend von der Probenherstellung über die thermische Alterung bis hin zur Ermittlung der mechanischen bzw. physikalischen Eigenschaften beschrieben.

Der überwiegende Anteil der Versuche erfolgten am österreichischen Gießerei Institut (ÖGI), wobei teilweise Wärmebehandlungsversuche zur Klärung der Reproduzierbarkeit bei Nemak Linz GmbH durchgeführt wurden.

3.1 Versuchsplan und Probenherstellung

Die thermische Degradation von gebundenen Kernen sollte anhand unterschiedlicher Formstoffkombinationen mit organischen bzw. anorganischen Bindersystemen näher untersucht werden. Diese wurden unter vorgegebenen thermischen Bedingungen bei unterschiedlichen Atmosphären durchgeführt und deren Eigenschaften im Weiteren wurden näher untersucht. Die Versuchspläne mit Details zur Dosierung (in Gew.-%), Aushärtung und den organischen bzw. anorganischen Bindersystemen sind in Tab. 3-1 und Tab. 3-2 ersichtlich. Die gewählte Probenbezeichnung für eine Probenserie erfolgte laut Abb. 3-1.

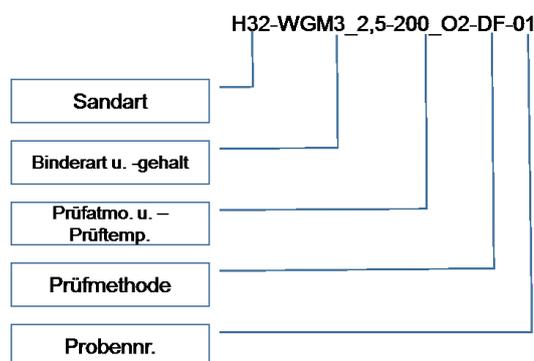


Abb. 3-1: Probenbezeichnung.

Eine gesamte Übersicht der Hergestellten Proben bzw. aller durchgeführten Versuche ist zusätzlich dem Anhang unter Tab. A-1 beigefügt.



Tab. 3-1: Probenplan Organik.

Sand	Binder	Dosierung	Aushärteparameter	Abkürzung	Prüfbedingung	Prüfmethode
Quarz H32	Warmbox 1	HA 7022/8154 1,39% / 0,25% Härter vor Harz	180°C 45s	H32-WB1	200_O2 & _RED 300_O2 & _RED	Biegefestigkeit Druckfestigkeit
	Warmbox 2	HA 8885 / 8099 1,41% / 0,35% Härter vor Harz		H32-WB2		
	Hotbox	TH 2143 / MBT 1,55% / 0,32% Harz vor Härter	220°C 45s	H32-HB	400_O2 & _RED 500_O2 & _RED	Doppelscherfestigkeit
	Coldbox	ASK Ocure 355/655 0,6% / 0,6% gleichzeitig	Begasungszeit 15s Ammoniakgehalt 2,2 g/s Arbeitsdruck 1,5 bar Eingangsdruck 6 bar	H32-CB	RT_0,5 bis 1T	Spaltfestigkeit

Tab. 3-2: Probenplan Anorganik.

Sand	Binder und -gehalt	Abkürzung	Prüfbedingung	Prüfmethode
Quarz H32	2,0% ASK INO & 0,9% WJ4000	H32-ASK_INO	200_O2 & _RED 300_O2 & _RED	Biegefestigkeit Druckfestigkeit Doppelscherfestigkeit Spaltfestigkeit
		H32-WGM3_2,5	400_O2 & _RED 500_O2 & _RED	
	2,0% WGM3	H32-WGM3_2	RT_0,5 bis 1T	
CB 650	2,5% WGM3	Cerb-WGM3	200_O2 & _RED 300_O2 & _RED	Doppelscherfestigkeit Spaltfestigkeit
Kerphalit (Andalusit)	3,0% WGM3	AN-WGM3_3	400_O2 & _RED 500_O2 & _RED	
			RT_10 bis 1T	

Eine detaillierte Übersicht der Binderbestandteile basierend auf den einzelnen Sicherheitsdatenblättern ist im Anhang Tab. B-1 und Tab. C-1 ersichtlich.

3.2 Probenvorbereitung und -herstellung

Die Aufbereitung der Formstoffe, basierend auf VDG Merkblatt 71, erfolgte in Flügelmischern von Vogel & Schemmann, mit einem Fassungsvermögen von 5 l bzw. 20 l [74]. Als Mischzeit wurden 2 Minuten gewählt wobei der Binder laut den Dosierangaben in Gew.-%, siehe Tab. 3-1 und Tab. 3-2, innerhalb der ersten Minute hinzugefügt wurde. Bei organischen Bindersystemen und dem anorganischen Wasserglas ASK-Inotec wurden die jeweiligen Komponenten in 30 Sekunden Segmenten hinzugegeben. Eine Übersicht der verwendeten Kernkästen, der Heizplatte und des Flügelmischers ist in Abb. 3-2 ersichtlich.

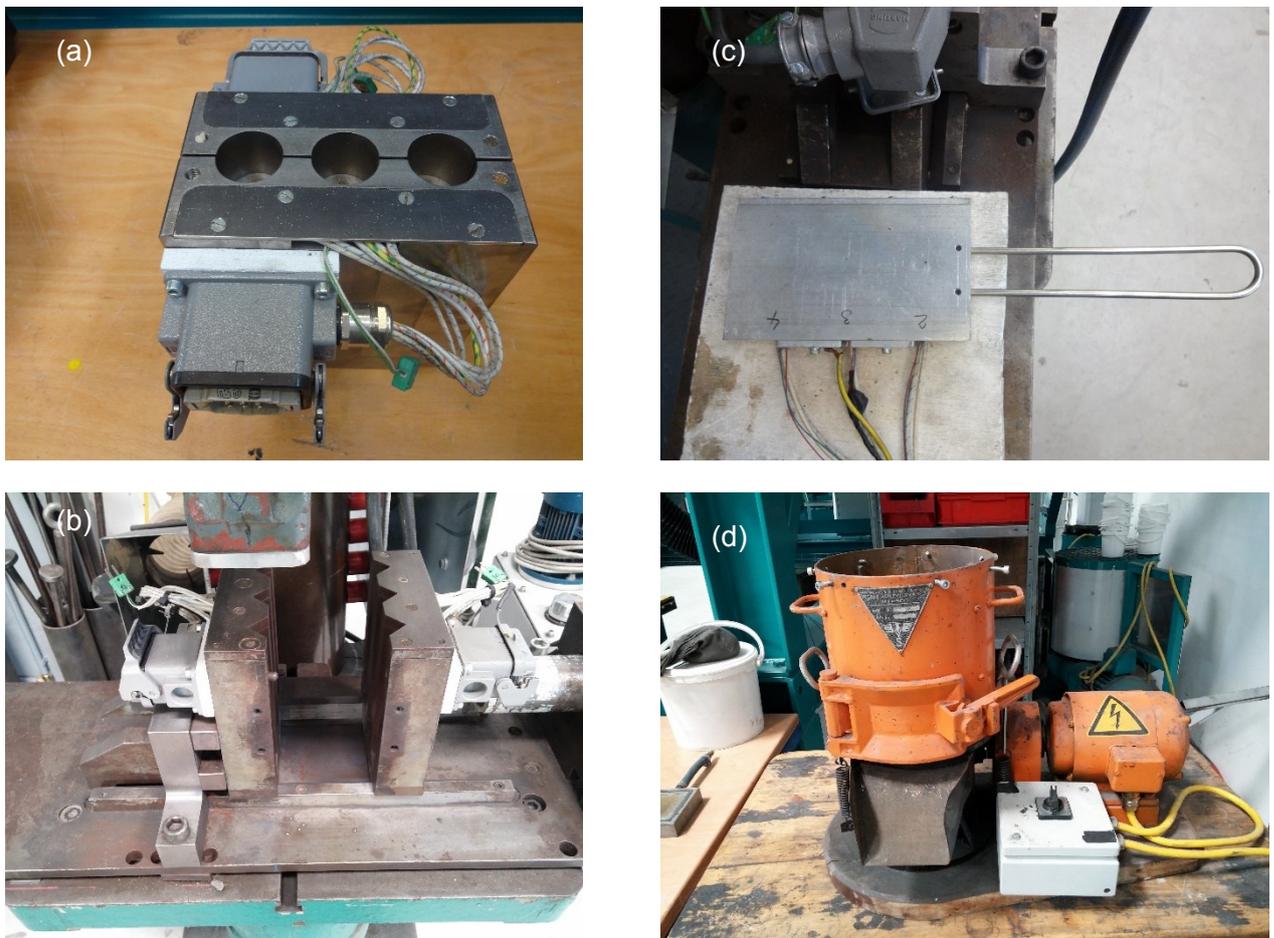


Abb. 3-2: (a) Formkasten für Zylinderproben, (b) Formkasten für Biegeriegel [75], (c) Heizplatte für Zylinderproben und (d) Flügelmischer mit Fassungsvermögen 5 l.

Eine schematische Darstellung der genormten Kernproben sowie deren Maße ist in Abb. 3-3 ersichtlich. Laut DIN 52401 werden bei tongebundenen Sanden zylindrische Probenkörper mit \varnothing 50 mm und einer Höhe von 50 mm verwendet, wobei diese über eine separierte Prüfvorrichtung mit 3 Rammschlägen für die weitere Prüfung verdichtet werden [4]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Probenkörper mit \varnothing 30 mm und einer Höhe von 30 mm verwendet.

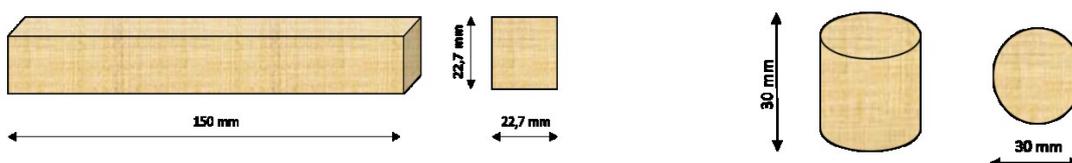


Abb. 3-3: (l) Biegeriegel, (r) zylindrische Probenkörper.

Die Probenfertigung erfolgte an einer Kernschießmaschine von Röperwerk H5/No. 524 NR80 mit einem Fassungsvermögen von 5 l. Als Arbeitsdruck wurden 3 bar gewählt. Das Grundprinzip einer Kernschießmaschine beruht auf einer Verlagerung des Formstoffes aus dem Schießzylinder in den Kernkasten, mit einer nachfolgenden Verdichtung der Kerne im Kernkasten. Diese wird durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Formstoffes und den Arbeitsdruck erreicht. Der Kernschuss wird durch einen Druckausgleich zwischen zwei Luftvorratsbehältern erreicht [24, 76]. In Abb. 3-4 die Kernschießmaschine, der Kernkasten mit Temperaturregelung sowie das Ammoniak-Begasungsgerät ersichtlich.

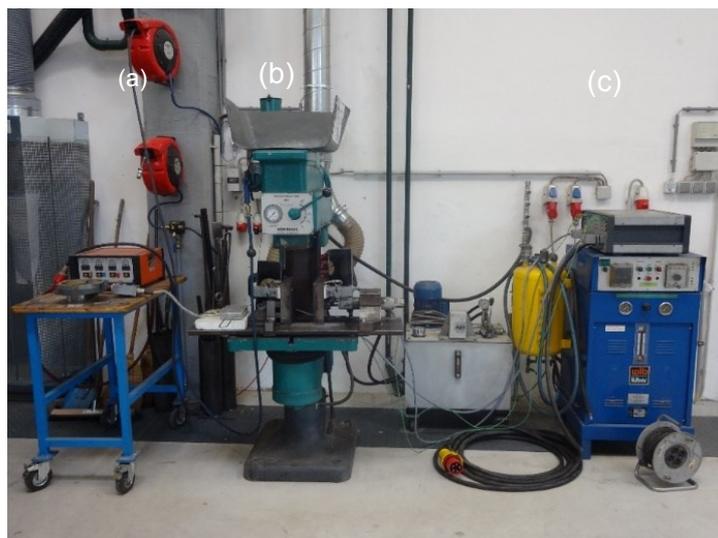


Abb. 3-4: Hasco Temperaturregelung (a), Kernschießmaschine Röperwerk (b) und (c) WLB Lüber Begasungsgerät.

Betol-Wasserglas gebundene Kernproben wurden nach der Probenherstellung zur Trocknung in eine Labormikrowelle, siehe Abb. 3-5 (l), übergeführt. Die Trocknungszeit orientierte sich an Versuchen von Grant K. [77] und betrug für jeweils 3 geschossene Kerne, bei 800 W, 6 Minuten. Wobei die Mikrowelle kontinuierlich nach dem Kernschuss in zwei Minuten Intervallen bestickt wurde. Um eine gleichmäßige Trocknung zu erreichen, wurden die Kerne intervallweise in vordefinierte Bereiche, ersichtlich in Abb. 3-5 (r), verschoben. Somit durchläuft ein Kernpaket (3 Kerne) bei jedem Schuss die Bereiche I bis III.

Bei der Herstellung von Betol-Wasserglas gebundenen Proben konnte zudem ein Einfluss der Herstellmethode auf die ermittelte Festigkeit beobachtet werden, siehe Abschnitt 4.5. Um dem entgegenzuwirken wurde die Kernschießmaschine, während der Probenherstellung, schubweise mit 2 kg Fertigsandmischung befüllt.

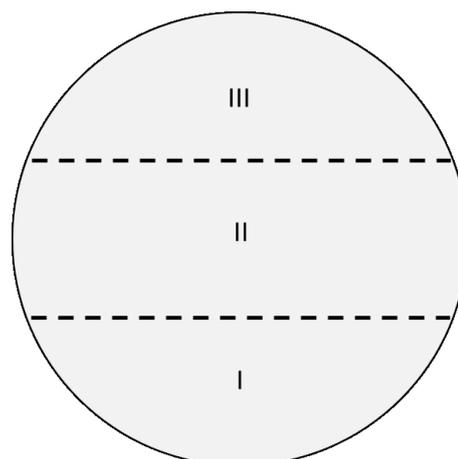


Abb. 3-5: (l) Labormikrowelle, (r) Probenanordnung.

3.3 Thermische Degradationsversuche

Die thermische Auslagerung der Proben erfolgte bei oxidierender bzw. reduzierender Atmosphäre und nach vorgegebenen Temperaturniveaus und Haltezeiten, basierend auf vorhergegangenen Untersuchungen durch Nematik Linz und Stauder [57]. Die vorgegebenen Parameter zur Auslagerung und Untersuchung der thermischen Degradation sind in Tab. 3-3 ersichtlich.

Tab. 3-3: Vorgaben für thermische Degradation.

Temperatur [°C]	Haltezeit [min]
200	60
300	30
400	10
500	5

Die Degradationsversuche wurde sowohl am ÖGI als auch bei Nematik Linz in Luft-Umwälzöfen auf mittlerer Höhe durchgeführt. Beim ÖGI wurde ein Hoffmann Trockenofen TSL 9 kW verwendet, bei Nematik Linz ein Hoffmann Versuchsofen S829, beide Öfen sind in Abb. 3-6 ersichtlich.



Abb. 3-6: (l) Hoffmann Trockenofen am ÖGI, (r) Hoffmann Versuchsofen bei Nematik Linz.

Die digitale Datenerfassung der Temperatur konnte am ÖGI über ein Sensormodul ISM 101 und die dazugehörige Software e.console-Lite der Firma Gantner bzw. die Software THERMcontrol 485 aufgezeichnet werden. Bei Nematik Linz erfolgte die Erfassung über ein 4-Kanal Temperaturmessgerät PCE-T390, siehe Abb. 3-7, wobei jeweils Thermoelemente vom Typ K verwendet wurden.



Abb. 3-7: Digitales Mehrkanaliges - Temperaturmessgerät PCE-T 390, für K-Typ, J-Typ und Pt100 Temperaturfühler.

Um eine Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten wurden Randbedingungen und Toleranzbereich für die thermische Auslagerung, basierend auf Vorversuchen zur Bestimmung des Aufheiz- bzw. Abkühlverhaltens der Kernen, definiert. Für die Ermittlung des Abkühlverhaltens wurde bei der Kernherstellung das Thermoelement mittig, bei einer Messlänge von 75 mm, an der zweiten Kernkastenposition mitgeschossen. Für die Aufzeichnung der Aufheizprofile wurden gebohrte Referenzkerne verwendet. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und eines Referenzkernes ist in Abb. 3-8 ersichtlich. In Abb. 3-9 sind die gemittelten Abkühlprofile für die Herstellparameter 180°C und 220°C ersichtlich.

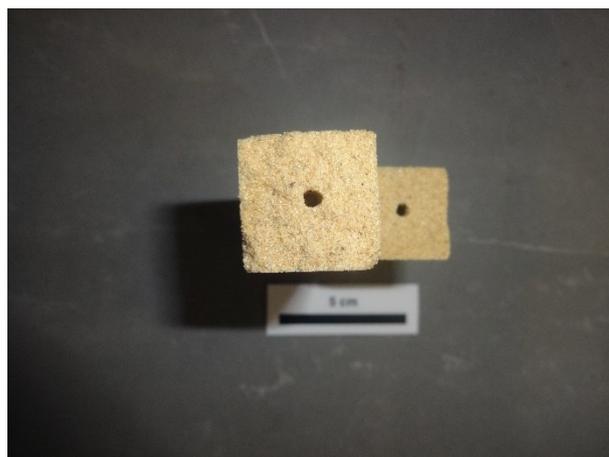
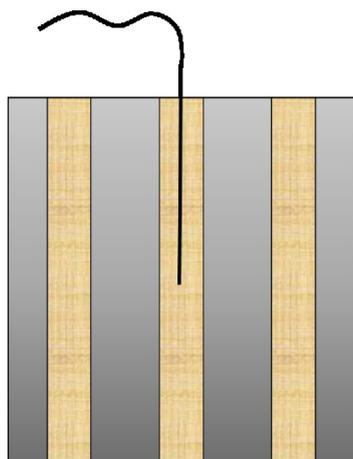


Abb. 3-8: (l) schematische Darstellung von Kernkasten mit positioniertem Thermoelement, (r) gebohrter Biegerigel für Kerntemperaturmessungen.

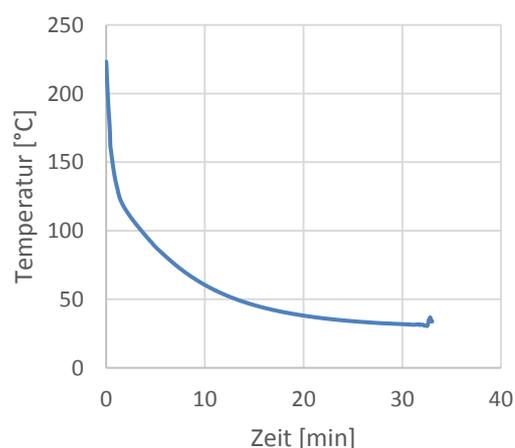
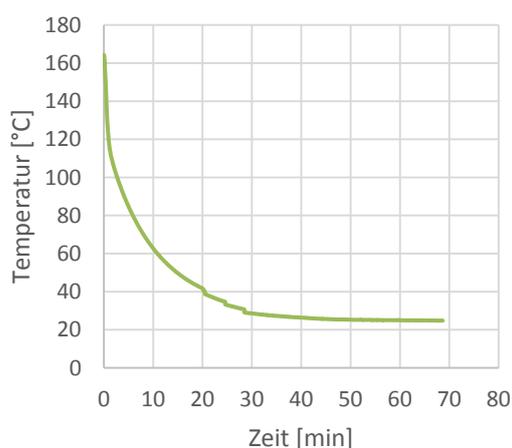


Abb. 3-9: Abkühlverhalten von geschossenen Biegeriegeln bei den Herstellparametern 180°C (l) und 220°C (r).

Auf Grund der Herstellzeit, Lagerfähigkeit und dem Degradationsverhalten wurden in weiterer Folge Coldbox Kerne für die Serienversuche im Temperaturbereich 200-400°C verwendet. Kerne mit dem Wasserglasbinder ASK-Inotec wurden für Serienversuche bei 500°C als Referenzkerne für die entsprechende Temperaturaufzeichnung gewählt. Des Weiteren wurde eine Aufheizzeit von 15 min für das Erreichen der unteren Kerntemperaturtoleranz definiert, wobei eine Toleranz von +5 min besteht. Die Kerntemperaturtoleranz für die Versuchsserien im Temperaturbereich 200-400°C beträgt

$\pm 5^{\circ}\text{C}$. Für die Versuchsserien bei 500°C wurde auf Grund der Ofenregelung eine Toleranz von $\pm 10^{\circ}\text{C}$ für die jeweilige Prüftemperatur gewählt. Der Start der vorgegebenen Haltezeit erfolgte sobald der untere Toleranzbereich erreicht wurde, wobei die Toleranz über den gesamten Versuch eingehalten werden musste. Repräsentative Aufheizprofile bei oxidierender Atmosphäre sind in Abb. 3-10 ersichtlich.

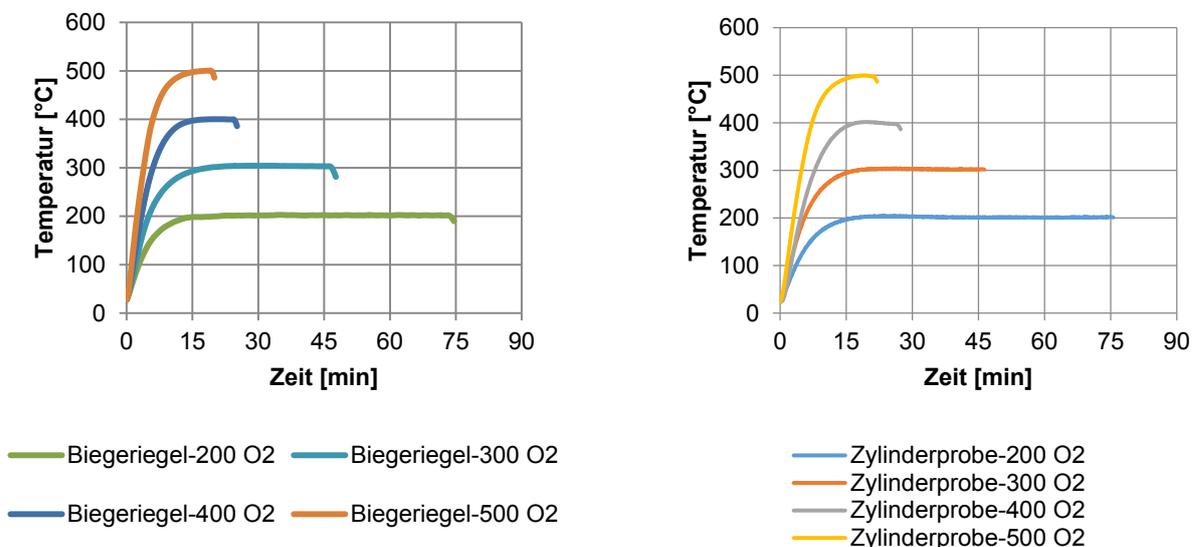


Abb. 3-10: Aufheizprofile für Biegeiegel bei oxidierender Atmosphäre (l) und Zylinderproben (r).

Als Kontrollmaßnahme wurden Kerntemperaturen, Ofenparameter, Ofenraumtemperatur sowie die Temperatur des reduzierenden Mediums für sämtliche Versuchsserien dokumentiert.

3.3.1 Oxidierende Degradationsversuche

Um eine gleichmäßige thermische Auslagerung zu gewährleisten und eine mögliche Beschädigung der Prüfflächen zu vermeiden, wurden Biegeriegelproben in vertikaler Position ausgelagert, siehe Abb. 3-11 (b). Bei Zylinderproben erfolgte die Auslagerung nach Abb. 3-11 (d). Die Probenanordnung erfolgte in fest vorgegebenen Abständen, nach Abb. 3-11 (a) und (c) und diente zugleich als eine Orientierung für die Probennummerierung. Die gewählte Position im Wärmebehandlungs-Korb (WBH-Korb) entspricht somit der Probennummerierung bei einer Probenserie, wobei eine doppelte Probenanzahl bei zylindrischen Prüfkörpern gewählt wurde. Für die Referenzproben bzw. die Kerntemperaturmessung wurden Position 6, (Biegeriegel) bzw. die mittlere Position (Zylinderproben) gewählt. Die Ofenraumtemperatur wurde anhand eines am WBH-Korb platzierten Thermoelementes erfasst. Dieses wurde mittig zwischen Position 3 und 4, bei Anordnung Abb. 3-11 (a), bzw. zwischen Position 1 und 2, bei Anordnung Abb. 3-11 (c), befestigt.

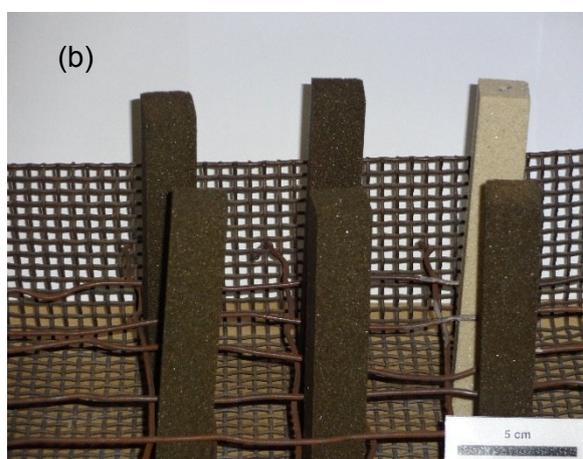
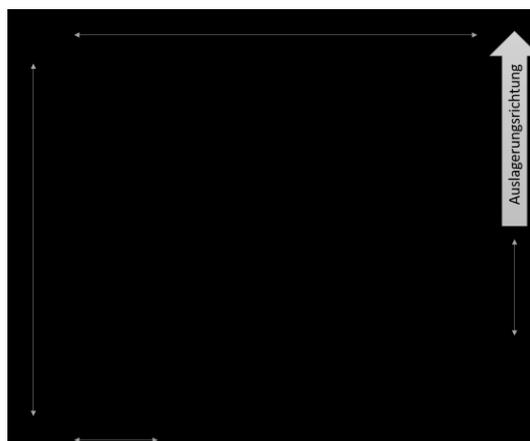
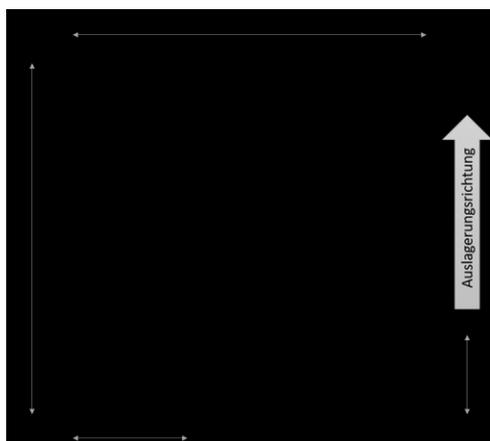




Abb. 3-11: (a) & (b) Biegeriegelpositionierung im WBH-Korb, (c) & (d) Zylinderpositionierung im WBH-Korb.

In Vorversuchsserien wurden die Ofenparameter am ÖGI und bei Nemak Linz an die vorgegebenen Toleranzbereiche angepasst und optimiert. Beispiele für gewählte Ofenparameter sind in Tab. 3-4 angeführt und zeigen die graduelle Annäherung an den geforderten Temperaturbereich durch eine manuelle Regulierung der Ofenparameter. Als Orientierung wurden die gemessenen Ofenraum- und Kerntemperaturdaten herangezogen, diese sind neben den Einstellparametern in Abb. 3-12 ersichtlich.

Tab. 3-4: Gewählte Ofenparameter für Degradationsversuche.

	Temp.Profil	Bemerkung
ÖGI	200°C	Ofen 215°C vorheizen → Proben rein → Ofentemp. ↓ 205°C → Kerntemp. 195°C; Ofentemp. ↓ 200°C
Nemak	200°C	Ofen 210°C vorheizen → Probe rein → Ofentemp. ↓ 205°C → Kerntemp. 180°C; Ofentemp. ↓ 200°C → Kerntemp. 195°C; Ofentemp. ↓ 198°C

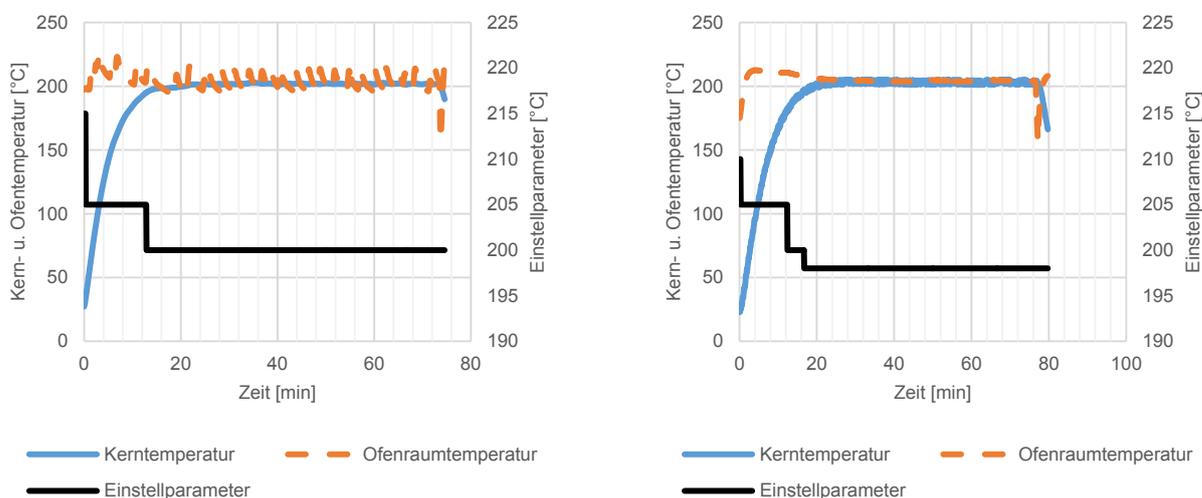


Abb. 3-12: Einstellparameter für oxidierende Auslagerungsversuche bei 200°C von Biegeriegeln bei ÖGI (l) und Nemak (r).

3.3.2 Reduzierende Degradationsversuche

Um die Proben bei der thermischen Alterung reduzierende bzw. sauerstoffarme Bedingungen auszusetzen wurden diese mit einer 13 μm Aluminiumfolie einschichtig umwickelt, mit vorgewärmten Quarzsand H32 umgeben und in Versuchsvorrichtungen ausgelagert.

Die gewählte Probenanordnung entspricht Abb. 3-11 (a), wobei die Kerntemperaturmessung für Biegeiegel und Zylinderproben von Position 6 aus erfolgte. Die Probennummerierung entspricht ebenfalls der Positionierung im WBH-Korb. Wie in Abb. 3-13 (c) ersichtlich, wurden je drei Zylinderproben übereinander ausgelagert, wobei jede Probenserie auf der identen Höhe (z.B. Pos. I) ausgelagert und durch eine Sandschicht separiert wurde. Die dokumentierte Temperaturerfassung erfolgte bei einer mittleren Höhe (Pos. II), wobei zwei weitere Referenzproben hinzugefügt wurden um die Versuchsbedingungen an die restlichen Versuchsvorrichtungen anzugleichen. Biegeiegelproben wurden wie bei den oxidierenden Degradationsversuchen vertikal ausgelagert. Beispiele für ummantelte bzw. für die entsprechende Auslagerung vorbereitete Biegeiegel-Proben sind in Abb. 3-13 (a) und (b) ersichtlich. Die Sandtemperatur konnte über ein verankertes Thermoelement am Boden der Versuchsvorrichtung (Position 5), ersichtlich in Abb. 3-13 (d), erfasst werden.



Abb. 3-13: (a) ummantelte Biegeriegel, (b) vorbereitete Biegeriegel in Versuchsvorrichtung, (c) Positionierung der Zylinderproben in Versuchsvorrichtung, (d) ummantelte Zylinderproben in Versuchsvorrichtung.

Der benötigte Sand wurde am ÖGI in einem Kammerofen Nabertherm N41/13 und bei Nemak Linz in einem Umluft-Kammerofen Nabertherm N30/85HA auf die entsprechende Temperatur erwärmt, wobei die Temperatur durch ein mittig angebrachtes Thermoelement ermittelt wurde. Durch mehrmaliges Mischen des Sandes wurde eine homogene Temperaturverteilung erzielt. In Abb. 3-14 sind die Öfen sowie der zu erwärmende Sand ersichtlich.

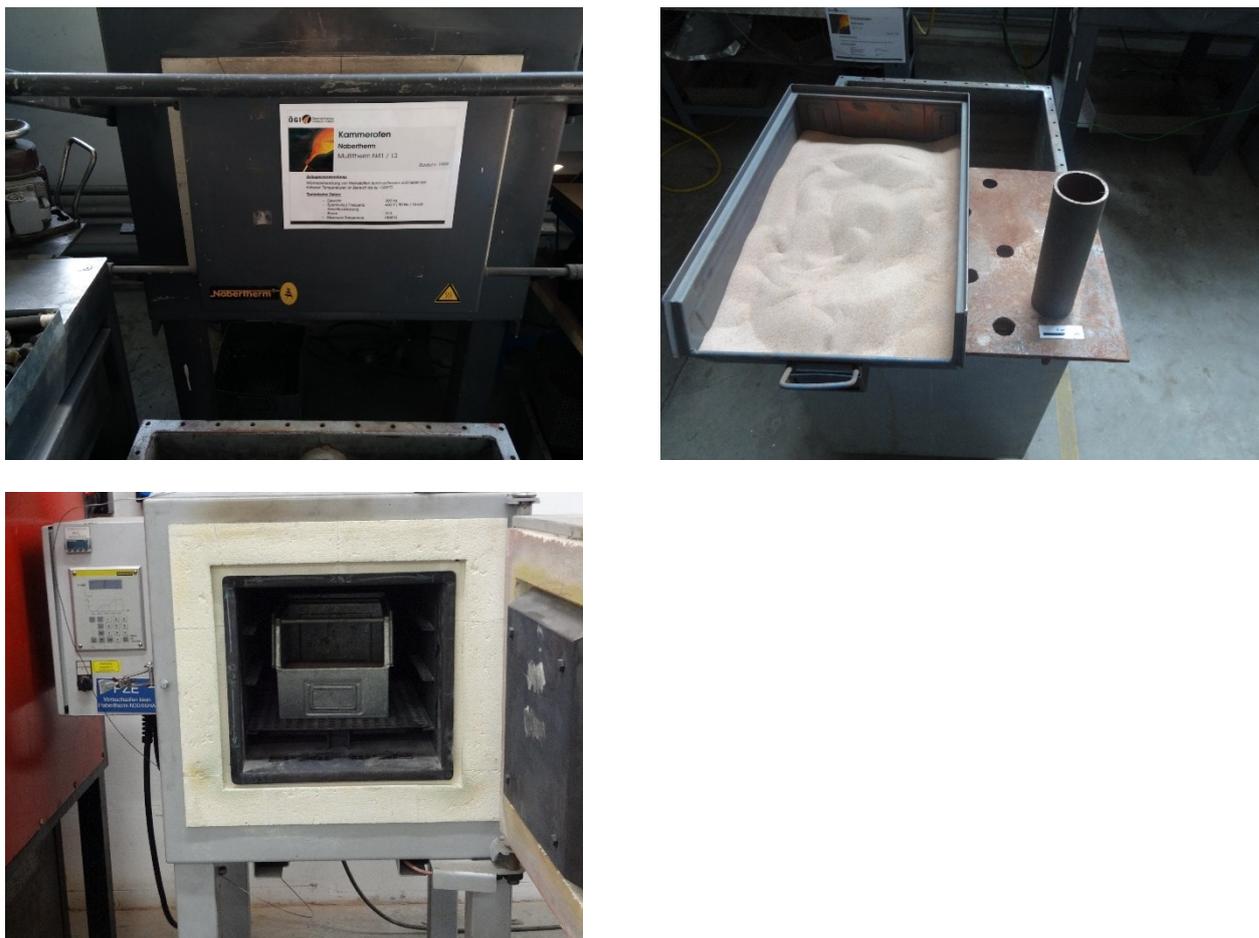


Abb. 3-14: (a) Nabertherm N41/13 am ÖGI, (b) Nabatherm N30/85HA bei Nemak Linz, (c) Proberohr und H32 Quarzsand als red. Medium.

Durch vorangegangene Versuche wurden die optimalen Einstellparameter für die Auslagerung ermittelt, wobei ein Beispiel in Tab. 3-5 angeführt ist. Vor dem Degradationsversuch wurden sowohl der Sand als auch die Versuchsvorrichtungen und der Versuchsofen auf die entsprechende Temperatur vorgeheizt. Um das anschließende Platzieren der Proben zu erleichtern und den direkten Kontakt mit dem Boden der Versuchsvorrichtung zu vermeiden wurde dieser vor dem Aufheizvorgang mit der ersten Sandschicht bedeckt. Innerhalb von 2 min erfolgte das mittige Platzieren der Proben und das anschließende Befüllen mit vorgewärmten Sand. Hierfür wurde eine fest vorgegebene Reihenfolge gewählt, wobei zu Beginn die die Referenz und anschließend die restlichen Versuchsvorrichtungen 1 bis 5 befüllt wurden. Das Auspacken der Proben erfolgte innerhalb von 2 min in der umgekehrten Reihenfolge.

Über das im Versuchsrohr 5 befestigte Thermoelement, konnte der Temperaturverlust des Sandes beim Befüllen ermittelt werden, wobei eine Übersicht über den Verlauf der Sandtemperatur und der Kerntemperatur bei 200°C bzw. 400°C in Abb. 3-15 ersichtlich ist.

Tab. 3-5: Gewählte Ofenparameter für reduzierende Degradationsversuche.

	Temp.Profil	Bemerkung
ÖGI	200°C	Sandtemperatur 270°C Ofen und Versuchsvorrichtung 240°C vorheizen → Proben rein → Ofentemp. ↓ 220°C → Kerntemp. 190°C; Ofentemp. ↓ 200°C
Nemak	400°C	Sandtemperatur 400°C Ofen und Versuchsvorrichtung 360°C vorheizen → Proben rein → Kerntemp. 200°C; Ofentemp. ↓ 310°C → Kerntemp. 225°C; Umluftklappe auf ↓ 325°C → Kerntemp. 290°C; Ofentemp. ↓ 295°C

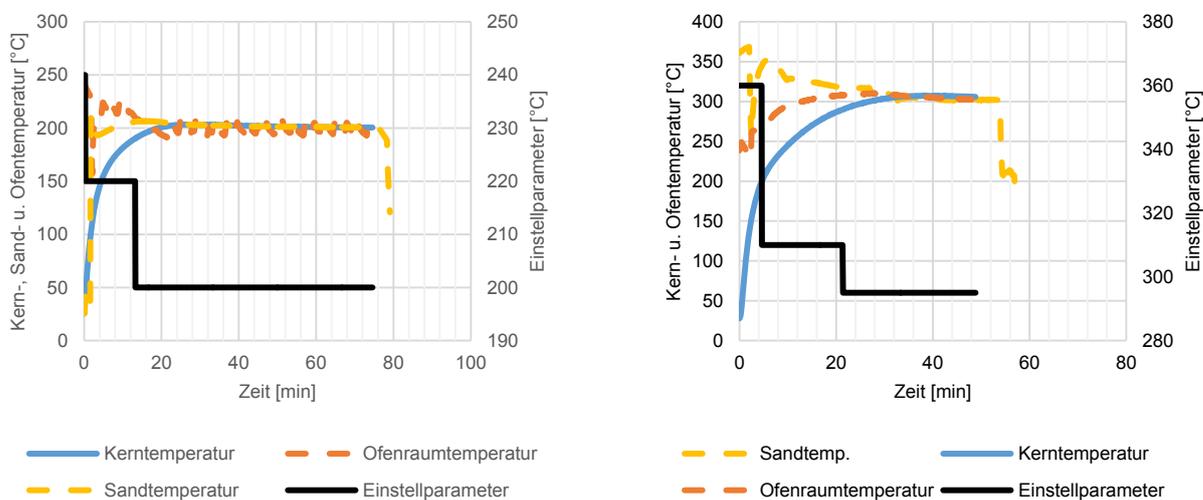


Abb. 3-15: Einstellparameter für reduzierende Auslagerungsversuche von Biegeriegeln bei 200°C am ÖGI (l) und 300°C bei Nemak Linz (r).

3.4 Ermittlung der physikalischen Kennwerte

Durch eine Anforderung auf systematische Erfassung der Gussmaterialien und eine kontinuierliche Qualitätssteigerung wurden zahlreiche Analysemethoden zur Aufklärung der physikalischen Eigenschaften entwickelt. Zahlreiche Randbedingungen haben einen Einfluss auf das mechanische und thermische Verhalten von inhomogenen Materialien. Geringste Abweichungen im Aufbau können somit eine eindeutige Differenzierung der Proben erschweren. Die Analyse von physikalischen Kennwerte liefert hilfreiche Ansätze, um dieses Verhalten näher untersuchen zu können. Die Analyse der gebundenen und nicht gebundenen Formgrundstoffe wurde an Hand der VDG-Richtlinien P36 und P37 durchgeführt [78, 79].

3.4.1 Glühverluste

Dieser zeichnet den Anteil an kohlenstoffhaltigen Bestandteilen bzw. den Anteil an Kristallwasser im Formstoff wieder. Hierfür werden mindestens 5 g Formstoff eingewogen und in einem Porzellantiegel bei 875°C geblüht, wodurch etwaige Bestandteile ausgetrieben werden [4, 80]. Die Untersuchung der Glühverluste kann Hinweise auf den Kernzerfall liefern. Nach Lucarza [81] weist die Binderzersetzung zu Beginn der Glühverlustuntersuchung die höchste Intensität auf und liefert somit Indizien zur thermischen Degradation. Die Berechnung der Glühverluste wird in den Formeln (1) und (2) näher beschriebene. Die gravimetrische Bestimmung erfolgte auf einer Laborwaage PBJ 6200-2M.

$$GV = \frac{E-A}{E} * 100 (\%) \quad (3-1)$$

$$GR = \frac{A}{E} * 100 (\%) \quad (3-2)$$

GV	Glühverluste
E	Einwaage in g
A	Auswaage in g
GR	Glührückstand

3.4.2 Schlammstoffanteil

Der Schlammstoffanteil dient zur Erfassung aller Korngrößen kleiner als 0,2 mm, zu diesen zählen beispielsweise Quarzteilchen, Steinkohlestaub oder Asche. Üblicherweise wird die Schlammstoffanalyse angewendet um tonhaltige Sande von Schlammstoffen zu separieren und um diese für die nachfolgende Siebanalyse vorzubereiten [6, 80, 80]. Bei Neusanden werden im Allgemeinen Eigenschaften wie Schüttdichte, Kornform, Korngrößenverteilung und Schlammstoffgehalt ermittelt. Für die Schlammstoffanalyse werden 50 g getrockneter Formstoff in einem 600 cm³ Gefäß mit 200 cm³ Wasser und Natriumpyrophosphatlösung (Na₂P₃O₇) 5 min gekocht. Im Anschluss erfolgt ein erneutes auffüllen des Gefäßes mit Wasser und ein Durchwirbeln für weitere 5 min. Nach einer Haltezeit von 7-10 min kann die Trübe über einen Heber getrennt werden. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt bis das Wasser völlig klar erscheint. Durch eine Wägung können die getrockneten Rückstände anhand der nachfolgenden Formel bestimmt werden [4].

$$Schl = \frac{E-A}{E} * 100 (\%) \quad (3-3)$$

Schl	Schlammstoffgehalt
E	Einwaage in g
A	Auswaage in g

3.4.3 Schüttdichte

Das Schüttverhalten zeichnet eine charakteristische Formstoffeigenschaft im losen Zustand aus und hat Einfluss auf die Kernherstellung und im Weiteren auf die Ausbildung der Modell- und Formkonturen. Eine Analyse der Schüttdichte (Raumgewicht der Schüttung) bzw. Verdichtbarkeit gibt eine Auskunft über das Schüttverhalten aus, wobei der Einfluss der Vorverdichtung miteinbezogen wird [8]. Die Schüttdichte (abh. von Kornfaktoren) übt einen entscheidenden Einfluss auf die Gasdurchlässigkeit aus. Wobei die Gasdurchlässigkeit ebenfalls durch andere Kennwerte wie Festigkeit, Oberflächengüte und Fließverhalten beeinflusst wird. Eine sehr enge Kornverteilung führt dazu, dass die Schüttdichte als auch Gasdurchlässigkeit zunimmt, wobei mit größerem Korn die Schüttdichte auch zunimmt. Nach Görke [23] kann ein Anstieg der Gasdurchlässigkeit mit Hilfe der Bernoulli Gleichung nachgewiesen werden. Diese besagt, dass die Strömungsgeschwindigkeit exponentiell mit



dem Strömungsdurchmesser zunimmt und eine hohe Strömungsgeschwindigkeit zu einem geringeren Startdruck führt.

Bei der Ermittlung der Schüttdichte wird der Formstoff in ein Litergefäß mit der definierten Höhe von 108,5 mm gesiebt, wobei eine Maschenweite von 3 mm verwendet wird. Das Sieb sollte 10 cm über der Oberkante des Gefäßes befestigt sein. Beim anschließenden abstreichen des Schüttkegels darf keine zusätzliche Verdichtung des Formstoffes erfolgen. Die Berechnung erfolgte wie in Formel (4) beschrieben [4].

$$SG = \frac{G}{1000} \quad (3-4)$$

SG Schüttgewicht in g/cm³

G Gewicht des Formstoffs in g

3.4.4 Verdichtbarkeit

Die Verdichtung bildet eine Grundlage für die Ausbildung und Verfestigung der Formkonturen. Hierbei wird der Formstoff durch aufgebrauchte Verdichtungsarbeit in einen Zustand mit höher Dichte und somit höher Packungsdichte übergeführt, wodurch sich Bindungskräfte ausgebildet werden. Im Allgemeinen gilt, dass die Verdichtung von der Geometrie abhängt, d.h. mit einer Volumenabnahme zusammenhängt, und mit steigender Verdichtungsintensität die Formstofffestigkeit und Dichte erhöht wird, wobei gleichsam das freie Volumen des Formstoffes abnimmt und somit dessen Gasdurchlässigkeit [4, 8, 38]. Beispielsweise haben Faktoren wie die Korngrößenverteilung ebenfalls Auswirkungen auf Verdichtbarkeit und in weitere Folge auf physikalische Eigenschaften wie die Wärmeleitung. Bei einer breiten Korngrößenverteilungen ergibt sich, bei gleicher Verdichtung, eine höhere Raumfüllung und dadurch ein höherer λ -Wert als bei einer engeren Kornklassierung [8]. Die Verdichtung wurde am ÖGI mittels einer Zwick/Roell-Z005 Proline Universalprüfmaschine (näheres in Kapitel 3.5) für die verwendeten Kernformstoffe durchgeführt. Eine schematische Darstellung zur Prüfung und den Parametern ist Abb. 3-16 ersichtlich.

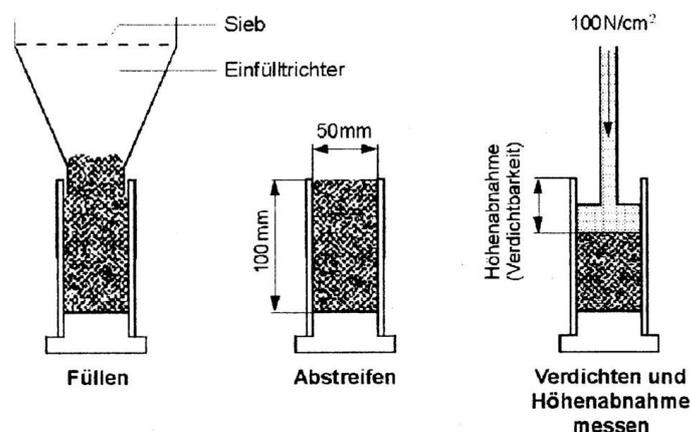


Abb. 3-16: Verdichtbarkeitsmessung durch statisches Pressen nach volumetrischer Dosierung bei konstanter Ausgangshöhe [79].

3.5 Ermittlung der mechanischen Kennwerte

Eine wesentliche Anforderung an Formstoff- und Kernmaterialien ist deren Standfestigkeit beim Handling und beim Gussvorgang. Durch eine Analyse der mechanischen Kennwerte, wie beispielsweise Biege- oder Druckfestigkeit, kann diese näher ermittelt werden und etwaige Indizien bzw. Tendenzen der Binder und Formstoffe können näher untersucht werden [5]. Im Gegensatz zur klassischen Formstoffprüfung ergeben sich merkliche Vorteile durch die Verwendung von etablierten Universalprüfmaschinen aus der Prüfung von metallischen Werkstoffen. Hierfür wurden die konventionellen Sandprüfeinsätze übernommen und auf die Prüfmaschine adaptiert. Neben einer Aufzeichnung des gesamten Kraft-Weg-Verlaufs sind höhere Messfrequenzen und höhere Messauflösungen, mit den entsprechenden Kraftmesszellen, möglich [82]. Die Ermittlung der Biege-, Spalt-, Zug- und Doppelscherfestigkeit erfolgte an der Zwick/Roell-Z005 mit einer maximalen Last von 5 kN. Wobei die Doppelscherfestigkeit für die Auswertung in die Scherfestigkeit, siehe Formel 3-5, umgewandelt wurde.

$$\text{Scherfestigkeit} = \frac{F_{\text{Doppelscherfestigkeit}}}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (3-5)$$

Alle Druckprüfungen wurden hingegen an der Zwick/Roell-Z050 mit einer maximalen Last von 50 kN durchgeführt. Als Auswertesoftware wurde in beiden Fällen testXpert II (Version 3.6) herangezogen. Eine Auflistung der Prüfparameter und der durchgeführten Prüfungen ist in Tab. 3-7 ersichtlich. Die Prüfmaschinen und die entsprechenden Prüfungen sind in Abb. 3-17 und Abb. 3-18 ersichtlich. In Abb. 3-19 sind beispielhaft Prüfkörper für die entsprechende Zugprüfung nach Georg-Fischer angeführt.

Vor jeder Messung wurden spezifische Kennwerte wie Masse und Abmaße für jede Probe entsprechend [83] dokumentiert. Des Weiteren wurden Auslagerungsversuche durchgeführt um den Einfluss der Aushärtung bei der Abkühlung der Proben sowie die Festigkeit bei Probenlagerung näher untersuchen zu können. Hierfür wurden Biegefestigkeiten in fest definierten Zeitabständen gemessen, wobei die ermittelten Abkühlkurven laut Abb. 3-9 für die näheren Auswertungen herangezogen wurden. Die entsprechenden Zeitintervalle sowie deren Toleranzbereiche sind in Tab. 3-6 ersichtlich

Tab. 3-6: Zeitintervalle für Auslagerungsversuche.

Auslagerungsversuche											
Zeit	RT_0,5	RT_1	RT_2	RT_5	RT_10	RT_20	RT_30	RT_60	RT_4Std	RT_1T	RT_1M
Toleranz	± 10 s	± 10 s	± 10 s	± 20 s	± 30 s	± 60 s	± 120 s	± 120 s	± 10 min	+ 1 d	± 1 d

Tab. 3-7: Einstellparameter an Zwick Universalprüfmaschinen.

Prüfmethode	Vorkraft [N]	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]
Biegefestigkeit	10	10
Doppelscherfestigkeit	5	20
Spaltfestigkeit	100	20
Druckfestigkeit	100	20
Zugprüfung	100	20



Abb. 3-17: Universalprüfmaschine (l) Zwick/Roell-Z050 und (r) Zwick/Roell-Z050.

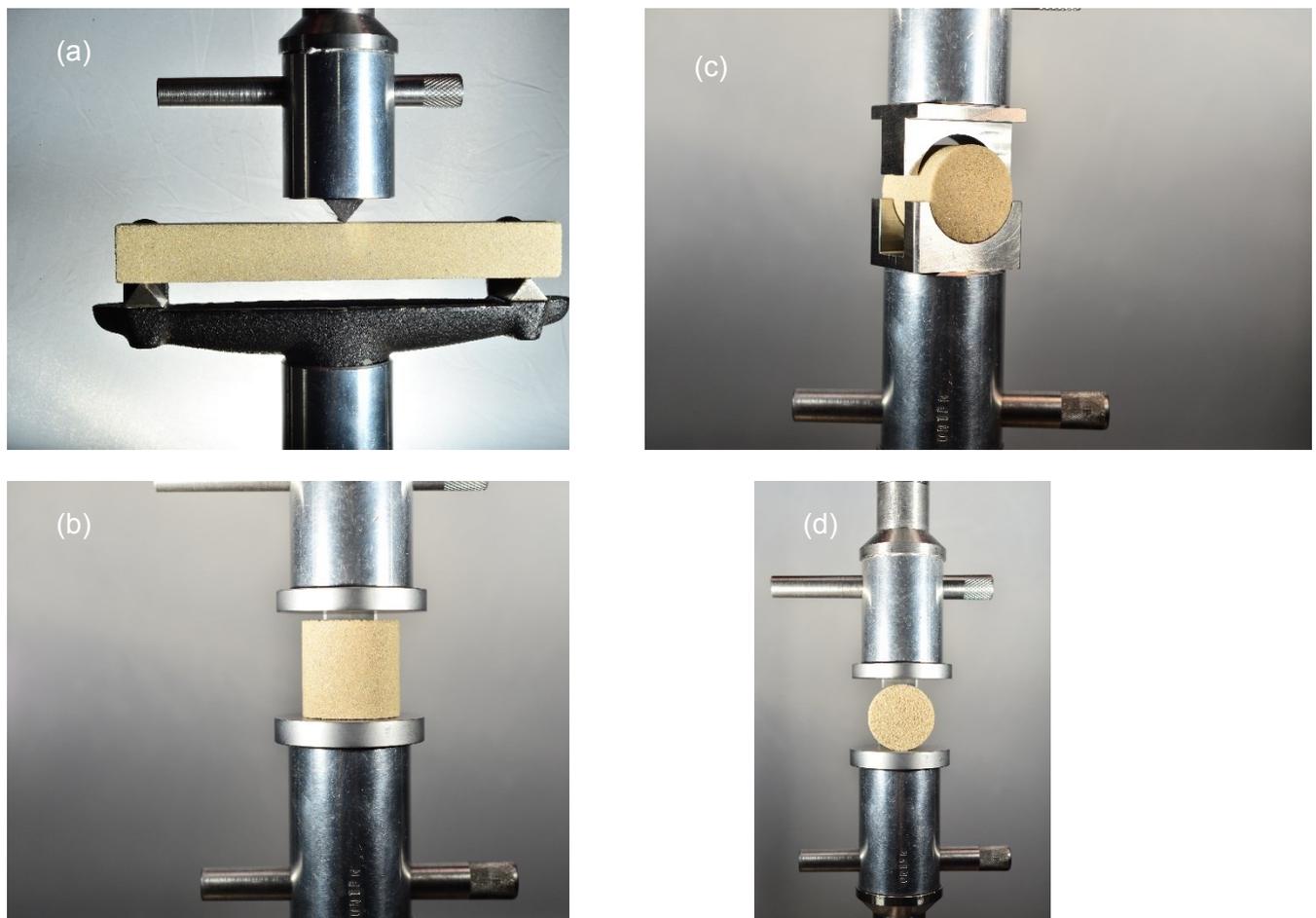


Abb. 3-18: (a) Biegefestigkeit, (b) Druckfestigkeit, (c) Doppelscherfestigkeit und (d) Spaltfestigkeit.

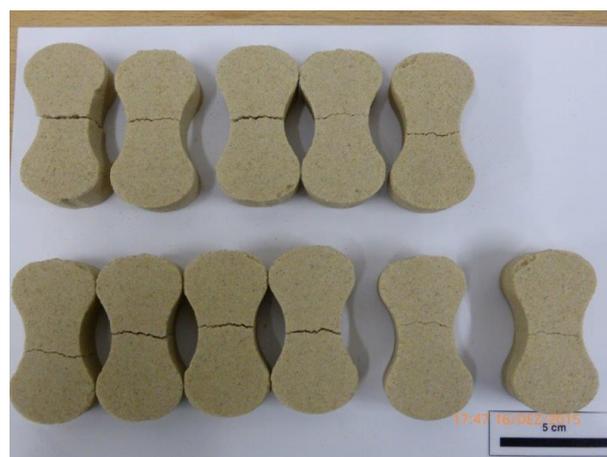


Abb. 3-19: Zug-Prüfkörper für Georg Fischer Zugprüfung mit einem Prüfquerschnitt von 22,3 mm x 22,3 mm.

3.6 Probenlagerung

Die Lagerung aller anorganischen Proben erfolgte bei konstanten Bedingungen in einem Exsikkator (Star-Exsikkator Model-Nr. 1871-07). Die organischen Proben wurden hingegen an Atmosphäre im Sandlabor gelagert, wobei relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur mittels Multi-Datenlogger (Testo 175 H1) erfasst wurden. Die entsprechenden Auswertungen sind in Abb. 3-21 angeführt, wobei die absolute Luftfeuchtigkeit für ein besseres Verständnis ebenfalls angeführt wurde.



Abb. 3-20: Exsikkator für Lagerung anorganischer Proben.

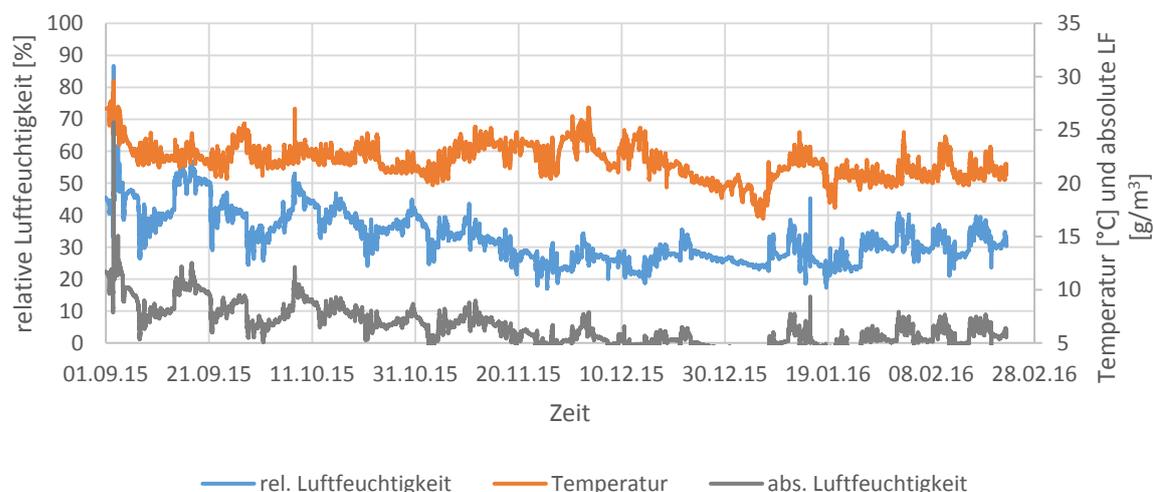


Abb. 3-21: Verlauf der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit sowie der Temperatur in Sandlabor (ÖGI).

3.7 Rasterelektronenmikroskop (REM)

Die Probenuntersuchung wurde mittels (FEI Quanta 200 MK2) REM am Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie durchgeführt. Die Probe wurde unter Hochvakuum mit einer Spannung von 20 kV und einem Back-Scattered-Detektor (BSD) untersucht. Die Funktion des REM basiert auf dem Fokussieren von Elektronenstrahlen zur Anregung von Atomen. Die Proben werden rasterförmig abgetastet. Die angeregten Atome in der Probe treten in Wechselwirkung mit dem Elektronenstrahl. Durch den Wechselwirkungsprozess werden spezifische Rückstrahlungssignale emittiert und vom Detektor ausgewertet, siehe Abb. 3-22 [84, 85]. Es wird ein Auflösungsvermögen von 0,01 μm erreicht. Die erreichbare Vergrößerung hängt von der Beschleunigungsspannung ab. Sie liegt bei etwa 200.000-facher Vergrößerung [76]. Abb. 3-22 zeigt den schematischen Aufbau eines REM. Abb. 3-23 ist die Bewegungsbahn der einfallenden Primärelektronen sowie ein Probesignal zu erkennen.

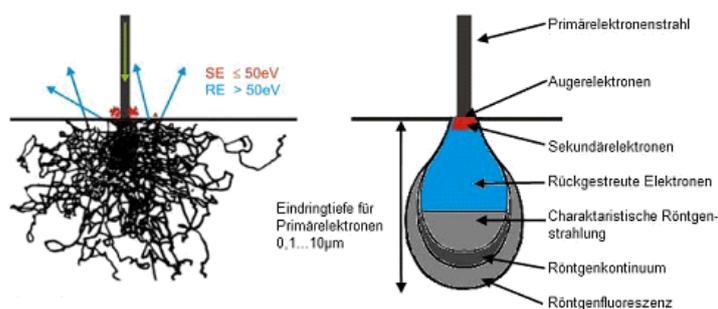


Abb. 3-22: Bewegungsbahnen der senkrecht einfallenden Primärelektronen der Streubirne (links); Probesignale (rechts) [85].

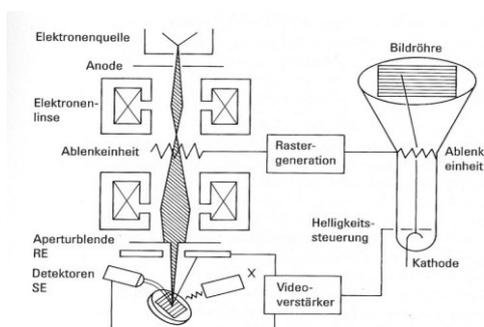


Abb. 3-23: Schematischer Aufbau eines REM [85].

4 Ergebnisse

In den nachfolgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der verschiedenen Versuchsreihen näher beschrieben. Es wurden sowohl physikalische Untersuchungen als auch thermomechanische Abhängigkeiten herangezogen um die das Degradationsverhalten der gegebenen Formstoffe näher zu untersuchen.

4.1 Physikalische Kennwerte

Die physikalischen Kennwerte sind für einen Formstoff charakteristisch und beeinflussen dessen Eigenschaften immens.

Die mittlere Verdichtbarkeit der gebundenen und losen Sande ist in Abb. 4-1 ersichtlich. Die niedrigste Verdichtbarkeit liegt bei losem Quarzsand mit 1,2 mm vor. Die Verdichtbarkeit von losem Andalusit und Cerabeads liegt in etwa auf dem gleichen Niveau größer 15 mm. Ein Vergleich zwischen losem Cerabeadssand als auch von Coldbox bzw. ASK-Inotec gebundenem Quarzsand zeigt, dass ein konstantes Verdichtungs niveau vorliegt. Die höchste Verdichtung weisen mit Betol-Wasserglas gebundene Formstoffe auf, wobei ein merklicher Anstieg, abhängig vom Modul, in der Verdichtbarkeit bei Quarzsand feststellbar ist. Die Verdichtung die restlichen organisch gebundenen Formstoffe, dh. Warmbox 1, Warmbox 2 und Hotbox, liegt in etwa auf ähnlichen Niveau, wobei Hotbox und Warmbox 1 in etwa bei 25 mm Verdichtung liegen und Warmbox 2 bei 30 mm.

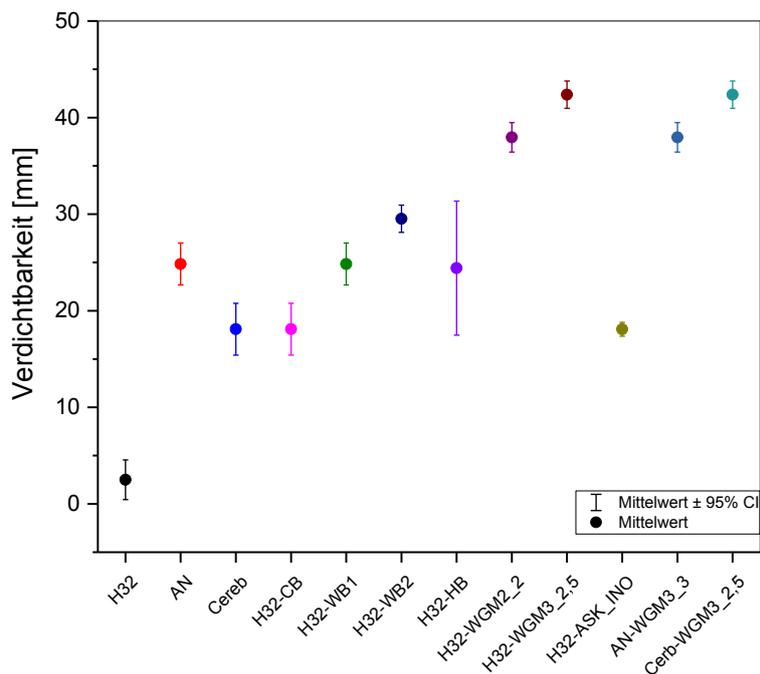


Abb. 4-1: Verdichtbarkeit gebundener und nicht gebundener Formstoffe.

Tab. 4-1 spiegelt die Schüttdichten und den Unterschied zwischen losem und gebundenem Formstoff wieder. Den höchsten Unterschied zwischen losem und mit Binder versetztem Formstoff sowie die niedrigste Schüttdichte wird durch Mischung mit Betol-Wasserglas sowie Warmbox 1 erreicht. Die höchsten Schüttdichten werden zum einen bei Coldbox Proben sowie zum anderen bei Wasserglas ASK-Inotec Proben erreicht. Die Schüttdichte von Hotbox sowie Warmbox 2 liegt auf einem gleichen Niveau unter jener von Coldbox.

In Tab. 4-2 sind die untersuchten Glühverluste für die gebundenen und trockenen Sande ersichtlich. Loser Andalusit und Cerabeads Sand haben erwartungsgemäß für Neusande die niedrigsten Glühverluste. Loser Quarzsand weist jedoch einen erhöhten Glühverlust von 1,10 % auf. Der gegenteilige Effekt spiegelt sich bei 0,02 % wasserglasgebundenem Quarzsand wieder [1]. Hier liegt der Glühverlust unter jenem vom losen Quarzsand.



Tab. 4-1: Anteil gebundener Formstoff und Schüttdichte.

Sandart	Binder	Probenmasse [g]	Schüttdichte [g/cm ³]	Unterschied loser zu gebundener Sand [%]
H32	-	1684,78	1,68	-
Cerb	-	1647,71	1,65	-
AN	-	1673,44	1,67	-
H32	CB	1498,44	1,50	11,1
	WGM3_2	1066,35	1,07	36,7
	WGM3_2,5	1057,29	1,06	37,2
	WB1	226,83	1,16	31,4
	WB2	1276,73	1,28	24,2
	ASK-INO	1461,95	1,46	13,2
	HB	1280,27	1,28	24,0
Cerb	WGM3_2,5	1132,2	1,13	31,3
AN	WGM3_3	1022,41	1,02	38,9

Tab. 4-2: Glühverluste der verwendeten Sande und Binder.

Sandart	Binder	Probenmasse vorher [g]	Probenmasse nachher [g]	Glühverluste [%]
H32	-	50,01	49,46	1,10
Cerb	-	50,24	50,2	0,08
AN	-	50,84	50,8	0,08
H32	CB	50,02	49,44	1,16
	WGM3_2	50	49,99	0,02
	WGM3_2,5	50,24	49,52	1,43
	WB1	50,55	49,87	1,35
	WB2	50,7	49,87	1,64
	ASK-INO	50,64	49,96	1,34
	HB	50,7	49,93	1,52
Cerb	WGM3_2,5	50,45	49,83	1,23
AN	WGM3_3	50,12	49,5	1,24



Der Schlammstoffgehalt der verwendeten Formstoffe ist in Tab. 4-3 ersichtlich. Ungebundene Formstoffe zeigen annähernd ähnliche Schlammstoffanteile, es konnte lediglich eine Abweichung bei Andalusit festgestellt werden. Hier liegt der gemessene Anteil bei 2,3 % und übersteigt somit jene von Cerabeads und Quarzsand. Den höchsten Schlammstoffanteil konnte bei Warmbox 2 gebundenem Formstoff festgestellt werden. Den geringsten Anteil konnte hingegen bei Coldbox Proben festgestellt werden.

Tab. 4-3: Anteil an Schlammstoff für die gebundenen und ungebundenen Sande.

Sandart	Binder	Probenmasse vorher [g]	Probenmasse nachher [g]	Schlammstoffanteil [%]
H32	-	50	49,9	0,20
Cerb	-	50	49,62	0,76
AN	-	50	48,85	2,30
H32	CB	50	49,53	0,94
	WGM3_2	50	49,46	1,08
	WGM3_2,5	50	49,36	1,28
	WB2	50	47,5	5,00
	ASK-INO	50	48,9	2,20
Cerb	WGM3_2,5	50	49,39	1,22
AN	WGM3_3	36,64	35,69	2,59

4.2 Visuelle Beurteilung der behandelten Kerne

Im Laufe der Versuche wurden die hergestellten und gemessenen Proben dokumentiert um wesentliche optischen Merkmalen hinsichtlich dem Degradationsverhalten bei unterschiedlichen Atmosphären näher untersuchen zu können. Die thermische Behandlung der Proben wirkt sich in unterschiedlichem Ausmaß auf die Oberflächenbeschaffenheit der Prüfkörper aus. Demzufolge erfolgte anhand von subjektiven Gesichtspunkten eine Bewertung der Oberfläche nach Tab. 4-4 für reduzierende als auch oxidierende Atmosphäre. Beispielsweise war eine Durchbiegung bei Hotbox-Proben ab 400°C in oxidierender Atmosphäre zu beobachten, siehe Beispiele in Abb. 4-2.

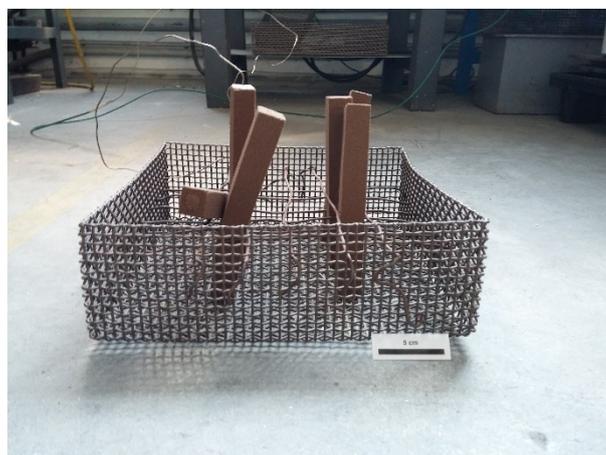
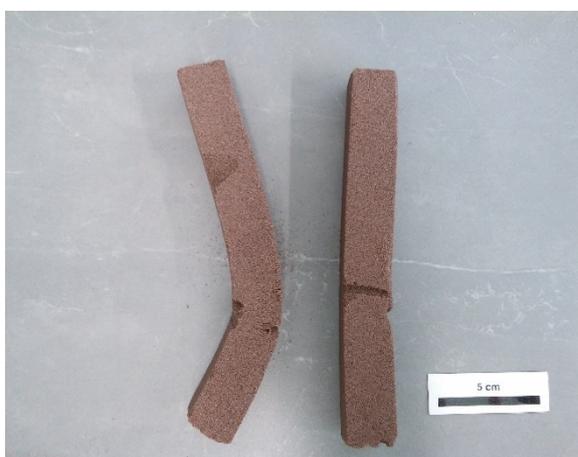


Abb. 4-2: Durchbiegung von Hotbox Proben nach 400°C bei oxidierenden Bedingungen.

Tab. 4-4: Oberflächenbeschaffenheit der Proben nach WBH.

Probe/Temperatur	200°C	300°C	400°C	500°C
H32-CB	+++	+++	++	
H32-WB1	+++	+		
H32-WB2	+++	++		
H32-HB	+++	++		
H32-ASK_INO	+++	+++	++	
H32-WGM3_2	+++	+++	+	
H32-WGM3_2,5	+++	+++	+	
Cerb-WGM3_2,5	+++	++	++	++
AN-WGM3_3	+++	++	+	

Degradationsversuche bei einer Temperatur von 500°C waren auf Grund von erschwerten Problemen beim Handling der Proben teilweise nicht möglich. Grund hierfür war der Probenzerfall bzw. eine möglichere Beschädigung der Probenkörper. Dies hatte des Weiteren zur Folge, dass Auswertungen der mechanischen Kennwerte teilweise nicht möglich waren. In den nachfolgenden Auswertungen der mechanischen Kennwerte wurden diese Proben anhand von einer subjektiven Abschätzung, in Abhängigkeit zum Probenzustand bzw. auch dem Degradationsgrad, bewertet und entsprechend dokumentiert.

In Abb. 4-3 ist eine Gegenüberstellung von verschiedenen Wasserglas gebundenen Proben ersichtlich. Bei beiden Proben ist eine Abweichung von der Form zu beobachten, was auf einen Probenzerfall in der Randschicht hindeutet. Bei der Quarzsandprobe (H32-WGM3_2) ist zudem eine Verfärbung (rosa) ersichtlich. Beide Proben weisen einen verstärkten Abrieb beim Handling auf, was sich auch in der Bewertung laut Tab. 4-4 widerspiegelt.

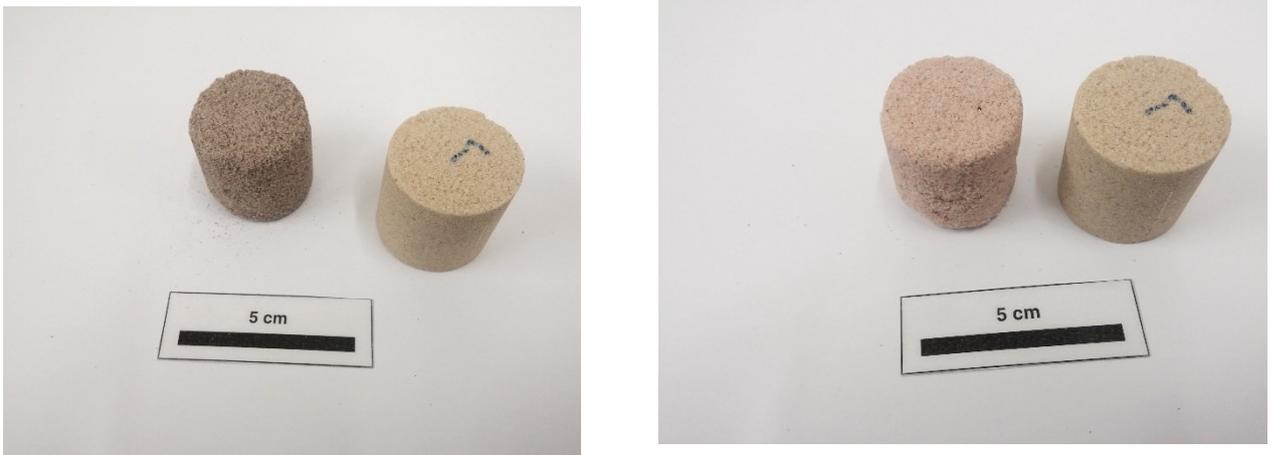


Abb. 4-3: Vergleich mit H32 Coldbox Referenzprobe (jeweils im rechten Bildabschnitt) mit (l) Kerphalit Proben bei 400°C und oxidierenden Bedingungen sowie (r) H32 Betol-Wasserglas Proben bei 400°C und oxidierenden Bedingungen.

Während reduzierenden Auslagerungsversuchen von Coldbox Proben konnte eine Kondensatbildung, siehe Abb. 4-4, beobachtet werden. Das gebildete Kondensat ist auf eine Zersetzung vom Lösungsmittel und der Phenolplaste zurückzuführen. Während der Zersetzung werden Emissionen und Luftschadstoffen in Form von HAP, Benzol oder Toluol (BTXE) frei. Jene Rückstände an Oberfläche sind unvollständig zersetzte organische Bestandteile in Form von Kondensat, Teer oder Koks möglich, wobei auch eine Ausbildung von absorbierenden PAK-Verbindungen (aromatischen Kohlenwasserstoffen), mit einem deutlich höheren Siedepunkt entstehen können [26, 86]. Auch während der Auslagerung von Cerabeadsproben unter reduzierenden Bedingungen konnte eine sichtbare Dampfentwicklung nach dem Auspacken festgestellt werden. Der gleiche Effekt war auch bei Kerphalitproben feststellbar. Im Gegensatz zu den Cerabeadsproben bildete sich hier ein stechender und nicht feststellbarer Geruch beim Entpacken der ummantelten Probenkörper.



Abb. 4-4: (a) H32 Coldbox Proben bei 400°C und reduzierenden Bedingungen sowie Kondensatablagerungen, (b) Gegenüberstellung behandelte zu unbehandelte Probe.

Wie bei Warmbox setzt auch bei Hotbox die Aushärtung nach dem Schuss, über die thermische Aktivierung, ein. Es kommt hierbei zur Ausbildung einer Randschale, die restliche Aushärtung geschieht hierbei exotherm bei Umgebungsbedingungen. In Abb. 4-5 ist die gebildete Randschale einer Hotbox-Probe nach dem Schuss ersichtlich.



Abb. 4-5: Randschalenausbildung Hotbox-Probe sofort nach dem Schuss entnommen und gebrochen.

Bei der Auslagerung bzw. nach der Prüfung der Biegefestigkeit von Cerabeads Proben konnten die in Abb. 4-6 angeführten Probenzustände bei unterschiedlichen Temperaturniveaus beobachtet werden. Die Oberflächenqualität der Proben nimmt mit steigender Temperatur ab, wobei dieser Effekt bei reduzierenden Bedingungen stärker ins Gewicht fällt. In Abb. 4-6 (b) und (d) bzw. in Abb. 4-7 sind geprüfte Biegeriegel ersichtlich. Hierbei sind Druckstellen an der Probenunterseite bzw. fehlerhafte Bruchverläufe erkennbar. Durch das Prüfprisma verursachte Druckstellen sind Abb. 4-7 besser ersichtlich.

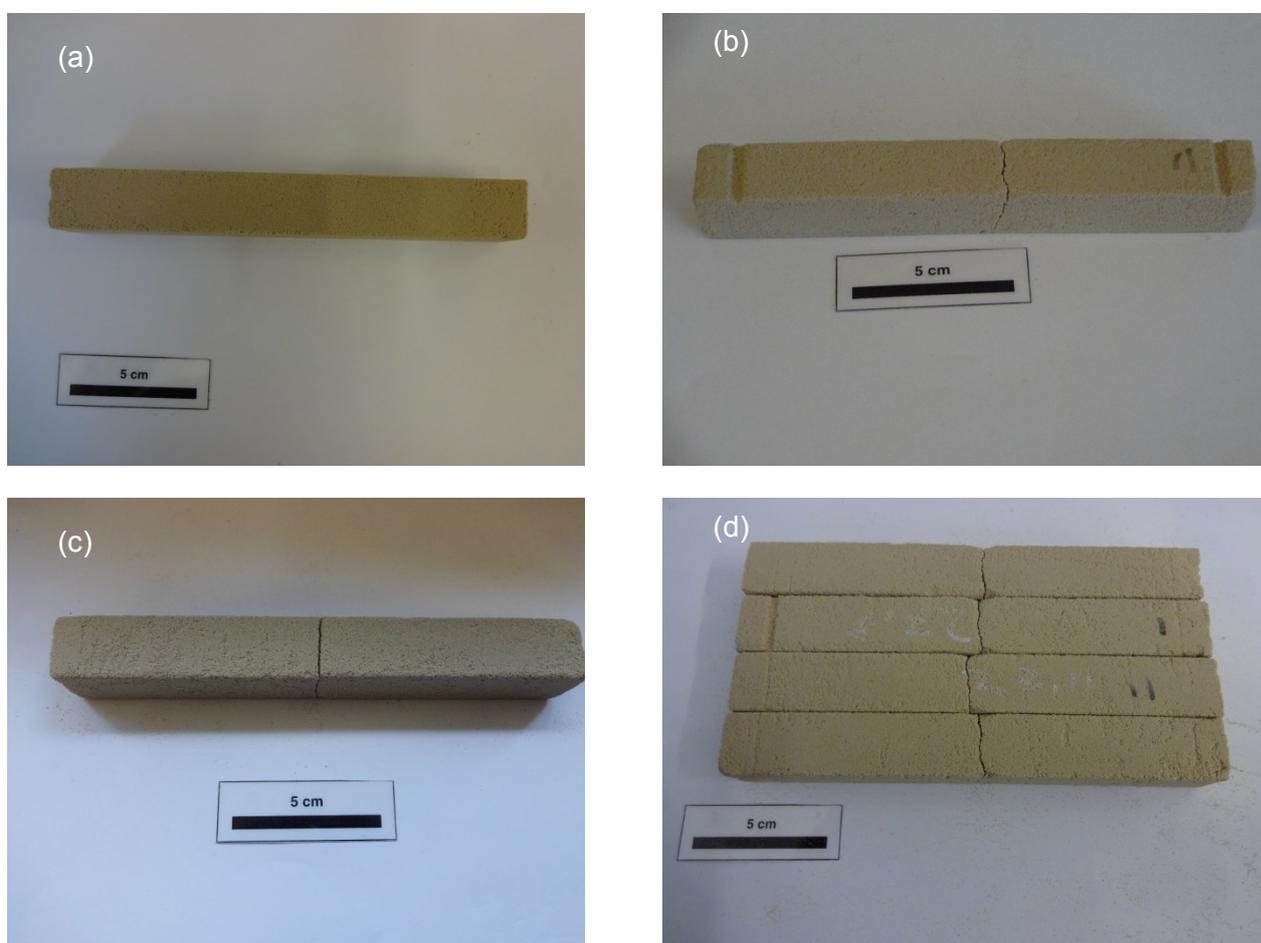


Abb. 4-6: Cerabeads Prüfkörper nach WBH, (a) 200_O2, (b) 200_RED, (c) 300_RED und (d) 400_RED.

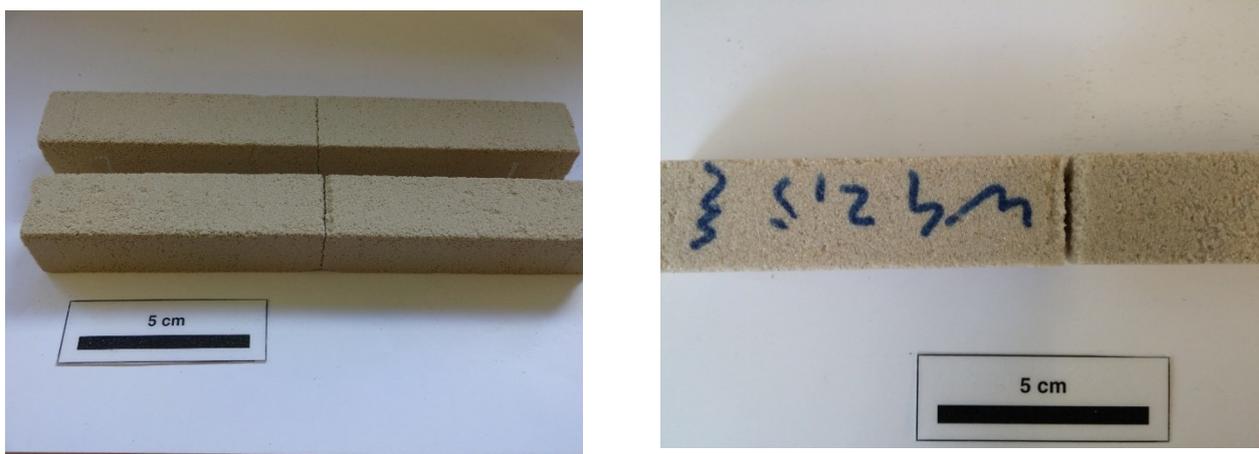


Abb. 4-7: (l) Cerabeads Proben bei 500°C und oxidierenden Bedingungen oben glatte Oberfläche und unten raue Oberfläche mit Druckstellen, (r) H32 Betol-Wasserglas Proben haben Druckstellen nach Biegeprüfung.

Die Druckstellen und ungleichmäßigen Bruchstellen spiegeln sich bei der Auswertung als eine ausgeprägte Spannungs-Dehnungs-Kurve mit Zickzackverlauf wieder, siehe Abb. 4-8. In weiterführenden Untersuchung konnte zudem eine Verbindung zwischen der Oberflächenqualität und dem Festigkeitsverlauf nachgewiesen werden. Herstellbedingt und infolge der Auslagerung kommt es wie in Abb. 4-7 links ersichtlich zur Ausbildung von einer glatten bzw. rauhen Oberfläche. Eine Positionierung der Proben mit der rauhen Fläche in Richtung der Stützprismen begünstigt das ausgeprägtes Bruchverhalten.

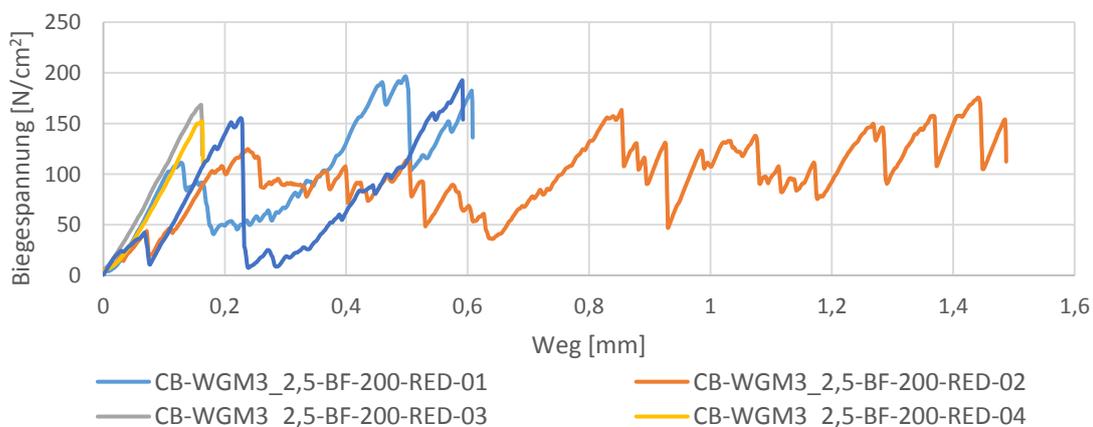


Abb. 4-8: Ausgeprägter Spannungsverlauf bei Cerabeads Betol-Wasserglas Proben ohne Zwischenscheibe.

Um das Bruchverhalten der Proben zu verbessern und somit gleichmäßige Auswertung von Wasserglasgebundenen Proben zu erhalten wurde mittels einer magnetischen Zwischenscheibe (Abmessungen 54x5x2,85 mm) die Flächenlast erhöht, siehe Abb. 4-9. Parameter wie Prüfgeschwindigkeit und Vorkraft wurden hingegen nicht verändert. Wie in Abb. 4-10 ersichtlich konnte der Spannungsverlauf und das Bruchverhalten, Abb. 4-9 rechts, verbessert werden. Die Prüfung mittels Zwischenscheibe wurde für sämtliche Betol-Wasserglas gebundenen Proben herangezogen.

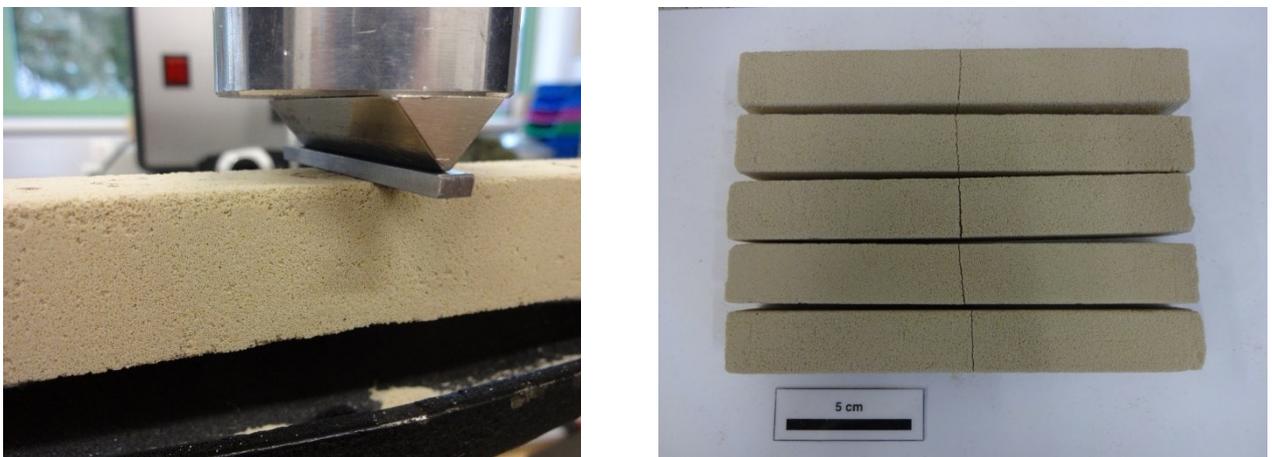


Abb. 4-9: (l) Zwischenplatte für höhere Flächenlast, (r) Bruchverlauf von verschiedenen Cerabeads Prüfrieglern.

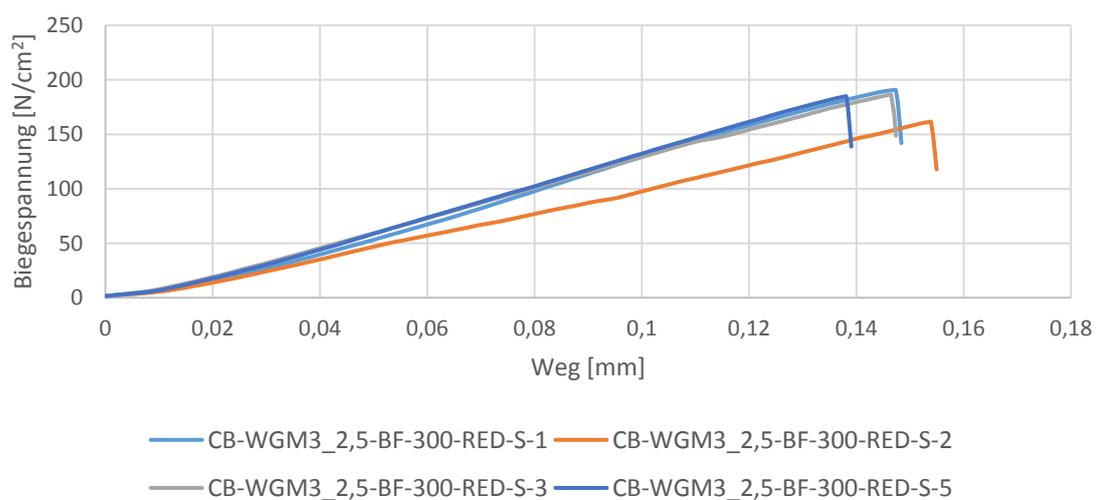


Abb. 4-10: Spannungsverlauf für Prüfung mit Zwischenscheibe für Cerabeads Betol-Wasserglas Proben.

Für die im Rahmen dieser Arbeit adaptierte Spaltzugfestigkeit wurde kein Lastverteilungstreifen verwendet, da für die Messungen eine geringere Probengröße gewählt wurde und ein Zugbruch auch ohne Lastverteilungstreifen, siehe Abb. 4-11, erzielt wurde.



Abb. 4-11: (l) Spaltzugfestigkeit mit Lastverteilungstreifen und (r) ohne Lastverteilungstreifen für verschiedene Coldbox Proben vor und nach der thermischen Auslagerung .

4.3 Auswertung der REM Analyse

Über REM-Analyse wurden gebundenen und ungebundenen Formstoffanteile näher untersucht um einen möglichen Zusammenhang zwischen der Bindung, der mechanischen Belastung und dem ausgeprägten Bruchverhalten festzustellen.

In Abb. 4-12 sind die Kornformen der ungebundenen Formstoffe dargestellt. Neben den Unterschieden in der Korngrößenverteilung (siehe Abb. 2-4) sind merkliche Unterschiede hinsichtlich der Form feststellbar. So weist Kerphalit eine schroffe kantige Kornform auf. Abgerundete Ecken bei Quarzsand bzw. eine runde Kornform ist bei Cerabeads ersichtlich.

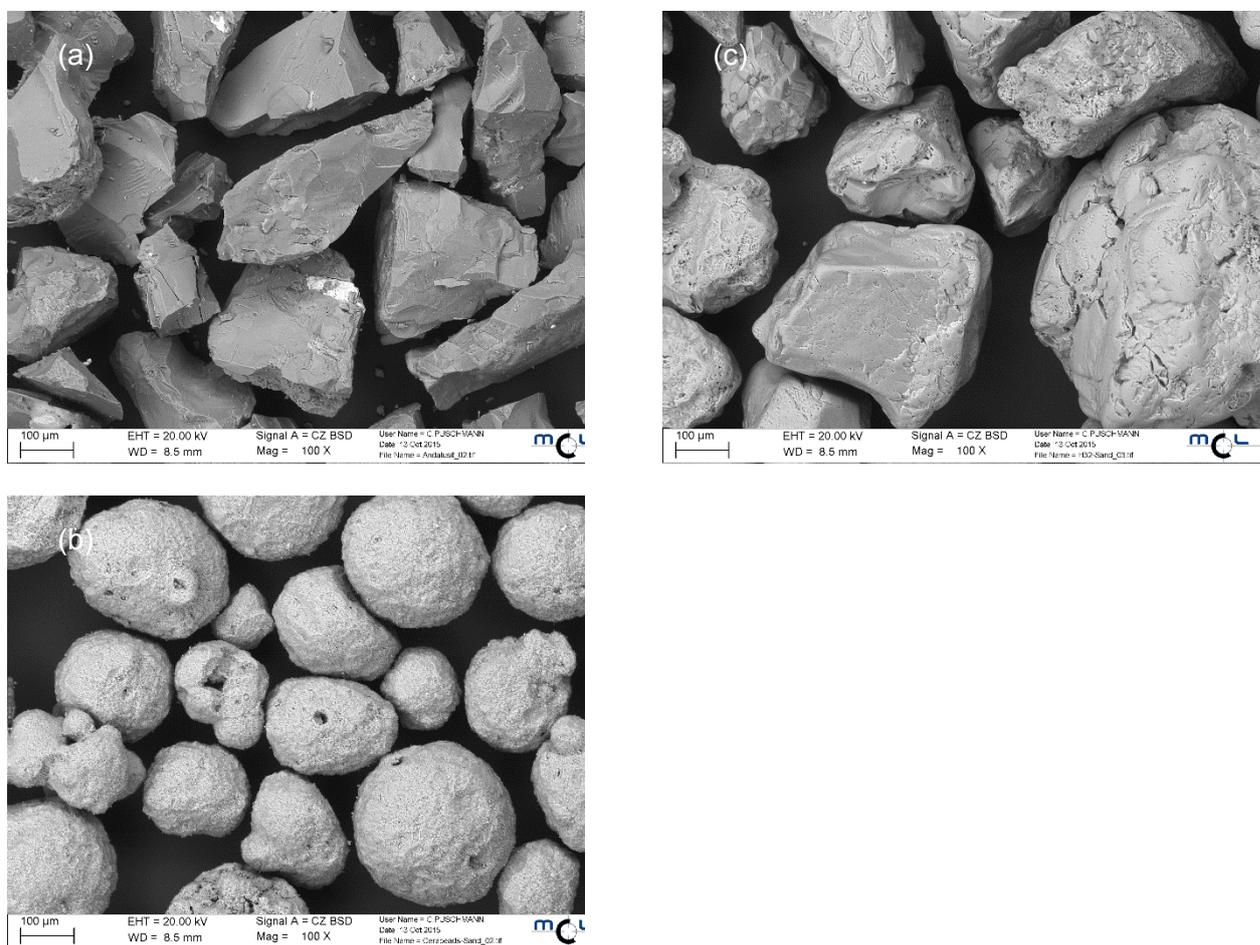


Abb. 4-12: (a) Kerphalit, (b) Cerabeads, (c) Quarz H32

Bei einem Vergleich der Bruchflächen laut Abb. 4-13 konnte lediglich ein Ablösen des Binders vom Korn (Markierung) festgestellt werden. Signifikante Unterschiede bezüglich des Bruchverhaltens konnten nicht auf die Binderbrücken zurückgeschlossen werden.

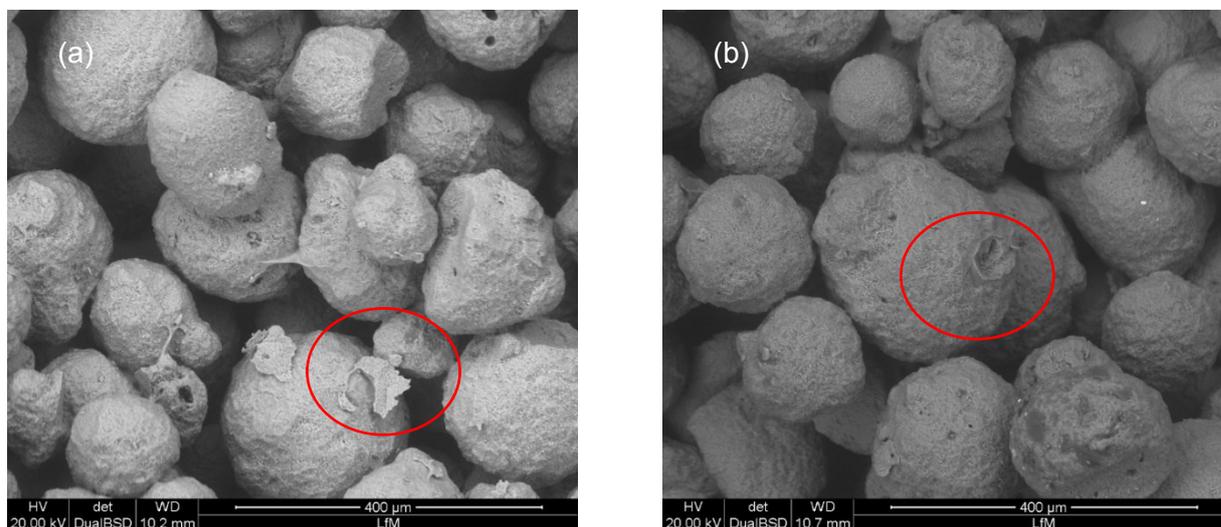


Abb. 4-13: (a) Cerabeads Betol-Wasserglas Proben mit ausgeprägtem Bruchverlauf und (b) einem regulären Bruchverlauf.

Bruchproben mit einem ausgeprägten Bruchverhalten Abb. 4-14 (a) zeigen ein Ablösen der Wasserglaskleberschicht, wie im markierten Bereich ersichtlich. Der Verbindungssaum ist bei diesen Proben rundlich ausgeführt und zeigt ein selektives Versagen Verbindungen. Jene Proben die mit einer höheren Flächenlast geprüft wurden zeigen vermeintlich ein flächiges abscheren der Klebeschicht.



Abb. 4-14: (a) H32-WGM3_2,5 Proben mit ausgepr. Bruchverlauf und (b) reg. Bruchverlauf.

Dieser Effekt kann jedoch bei Proben mit einem geringeren Wasserglasgehalt, siehe Abb. 4-15, nicht beobachtet werden. Diese zeigen sowohl bei einem ausgeprägten als auch regulären Bruchverhalten die identen Merkmale beim Ablösen der Binderschicht.

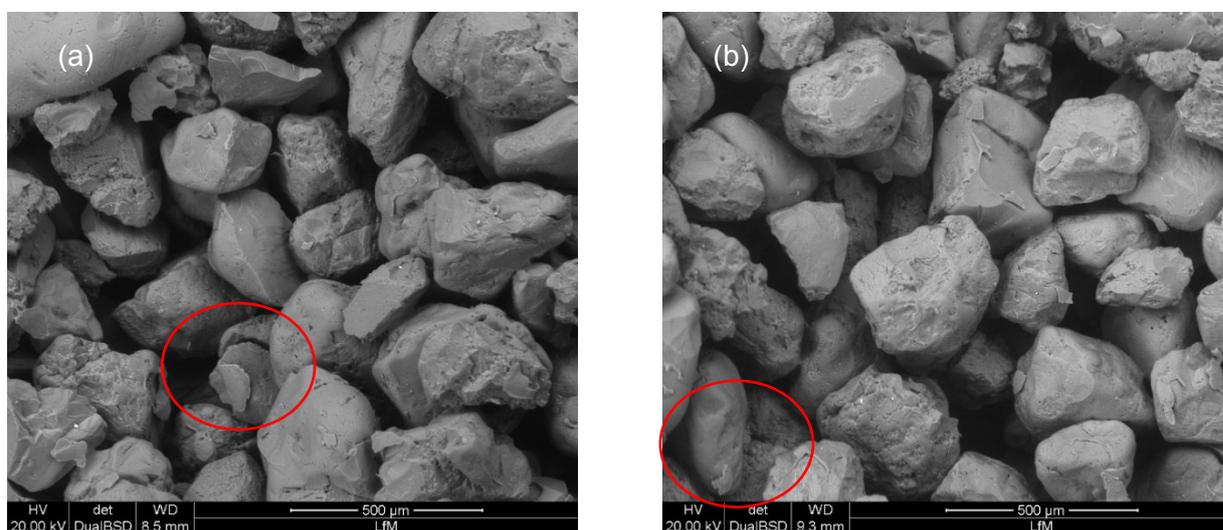


Abb. 4-15: (a) H32-WGM3_2 Proben mit ausgepr. Bruchverlauf und (b) reg. Bruchverlauf.

4.4 Einfluss von unterschiedlichen Bindemitteln auf Quarzsand H32

Um Korrelationen und den Einfluss vom Formstoff Quarzsand auf unterschiedliche organische sowie anorganische Binder, auf die thermomechanischen Eigenschaften und in weitere Folge den Einflussfaktor Formstoff auf die Degradation, näher zu untersuchen wurden mehrere Versuchsreihen und Auswertungen hinsichtlich der mechanischen Festigkeit durchgeführt.

4.4.1 Auslagerungsserie

Auslagerungsversuche mit fest definierten Zeitabständen wurden durchgeführt um das Aushärteverhalten von gebundenen Formstoffen näher zu untersuchen und somit den Einfluss des Handlings nach der Kernherstellung näher zu untersuchen. Die Biegefestigkeit der Proben wurden hierfür in fest definierten Zeitabständen gemessen, beispielhaft ersichtlich in Abb. 4-16.

So ist in Abb. 4-16 eine deutliche Nachhärtung, Reaktion der verschiedenen Methylol-Gruppen die zur Ausbildung der Phenolplasten führt, nimmt die Festigkeit der Proben stetig bis zu einem bestimmten Plateau zu [26]. Die Unterschiede zwischen der Auslagerung nach einem Jahr und einem bzw. drei Monaten kann auf unterschiedliche Lagerbedingungen zurückgeführt werden. Grundsätzlich konnte beobachtet werden, dass ca. 90 % der Festigkeit nach 4 Stunden bzw. 70 % nach einer Stunde erreicht wurden und somit ein unproblematisches Bauteilhandling ermöglicht wird. Das Maximum der Biegefestigkeit nach einem Tag beträgt ca. 391 N/cm^2 , die höhere Festigkeit nach einem Jahr Auslagerung ist auf unterschiedliche Herstellbedingungen nach Stauder [57] zurückzuführen.

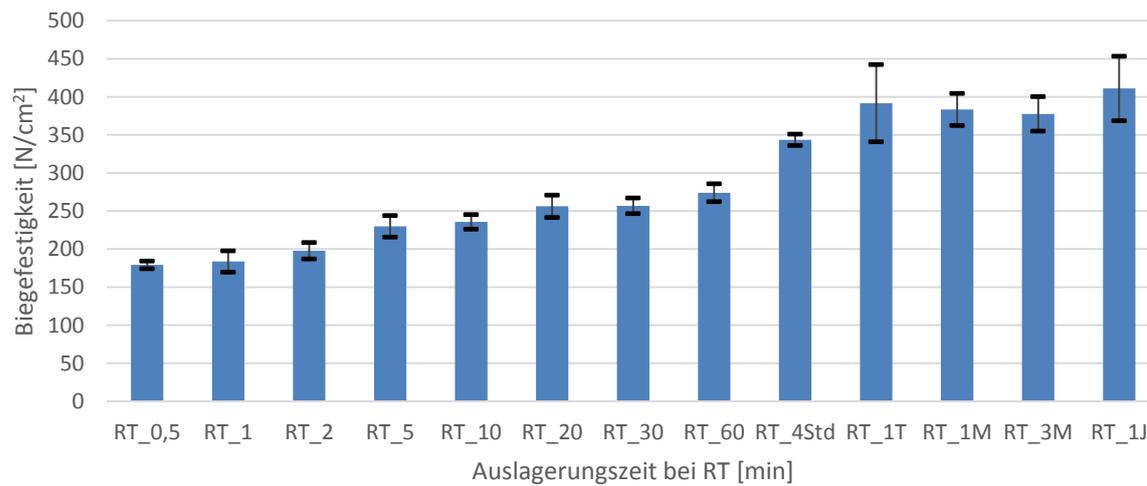


Abb. 4-16: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Coldbox in definierten Zeitintervallen.

Das Auslagerungsverhalten von Warmbox 1 Proben ist in Abb. 4-17 ersichtlich und zeigt ein Maximum von 550 N/cm² nach 30 Minuten gefolgt von einem stetigen Abfall der Biegefestigkeit. Die Aushärtung beginnt bei sofortigem Kontakt mit dem Kernkasten durch das freisetzen der Säurebestandteile, durch den Katalysator und durch die resultierende exotherme Reaktion wird eine Nachhärtung der Kerne aktiviert [25]. Nach einem Monat ist wird eine konstante Festigkeit erreicht. Die Unterschiede hinsichtlich der ausgelagerten Proben nach 2 bzw. 4 Monaten kann auf statistische Schwankungen und Lagerbedingungen zurückgeführt werden.

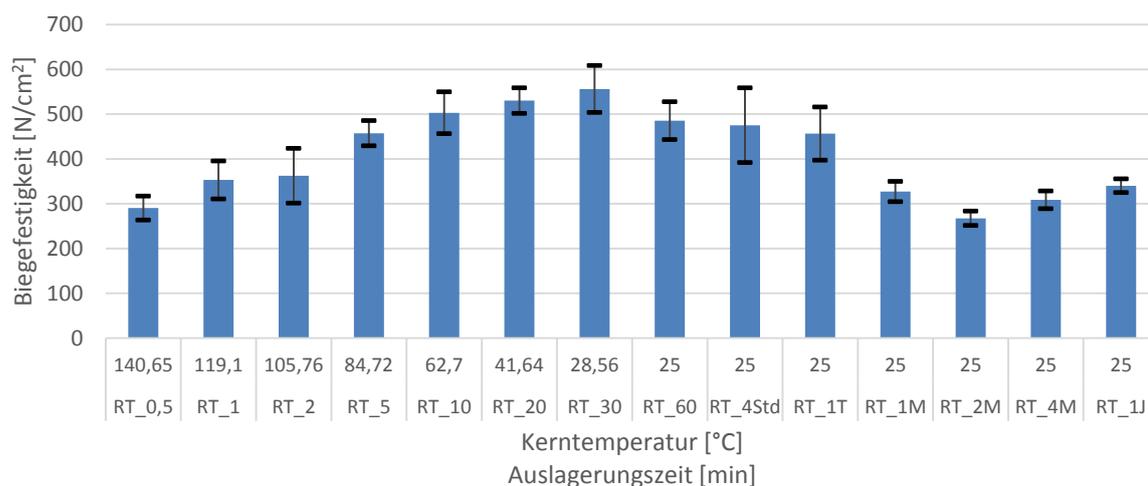


Abb. 4-17: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Warmbox 1 in definierten Zeitintervallen.

Warmboxbinder 2 zeigt deutliche Unterschiede zum Auslagerungsverhalten von Warmboxbinder 2, ersichtlich in Abb. 4-18. Das Maximum von 800 N/cm² wird nach einer Stunde erreicht. Die Auslagerung an Atmosphäre führt nach einem Monat zu einem Festigkeitsabfall um etwa 60 % auf 300 N/cm². Die Unterschiede zwischen den Festigkeiten nach zwei und vier Monaten sind auf statistische Abweichungen bei der Prüfung zurückzuführen. Die höhere Biegefestigkeit, nach einem Jahr, ist auf unterschiedliche Herstellbedingungen nach Stauder [57] und Lagerbedingungen zurückzuführen. Zudem haben zeitabhängige Effekte (z.B. Kriechen, Relaxation, Ermüdung, usw.) sowie die Temperatur Auswirkungen auf die Charakteristik der Spannungs-Dehnungskurven [62].

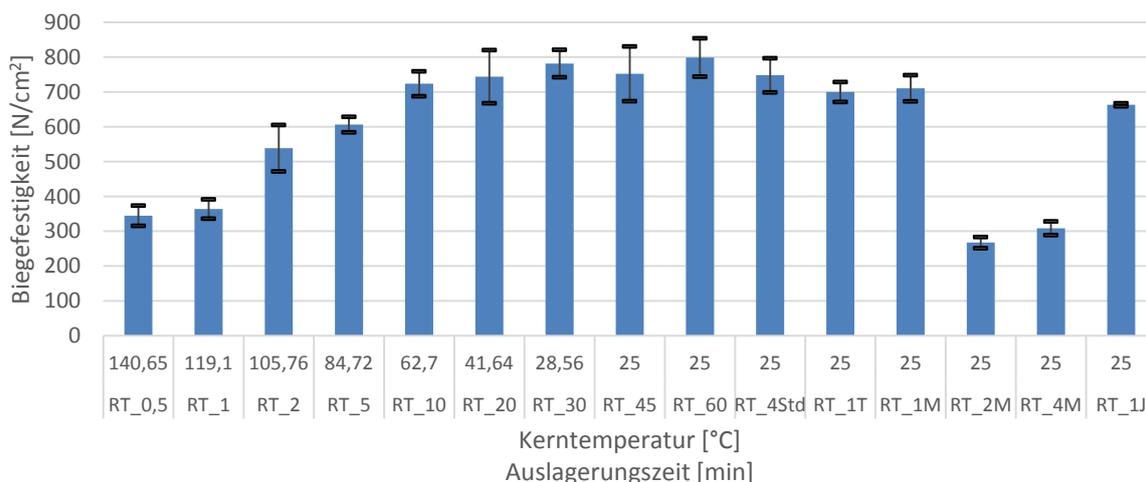


Abb. 4-18: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Warmbox 2 in definierten Zeitintervallen.

Die Maximale Biegefestigkeit von 417 N/cm² wird beim verwendeten Hotboxbinder nach einer Stunde erreicht, siehe Abb. 4-19. Das Handling der hergestellten Kerne ist somit nach relativ kurzer Zeit möglich, da die Maximalfestigkeit annähernd nach 20 Minuten erreicht wird. Mit zunehmender Lagerzeit an Atmosphäre nimmt die Biegefestigkeit stetig ab. Den höchsten Festigkeitsabfall kann man nach zwei Monaten feststellen. Wobei die eine deutliche Tendenz auch bei jenen Proben erkennbar ist die nach den Herstellparametern von Stauder [57] hergestellt wurden.

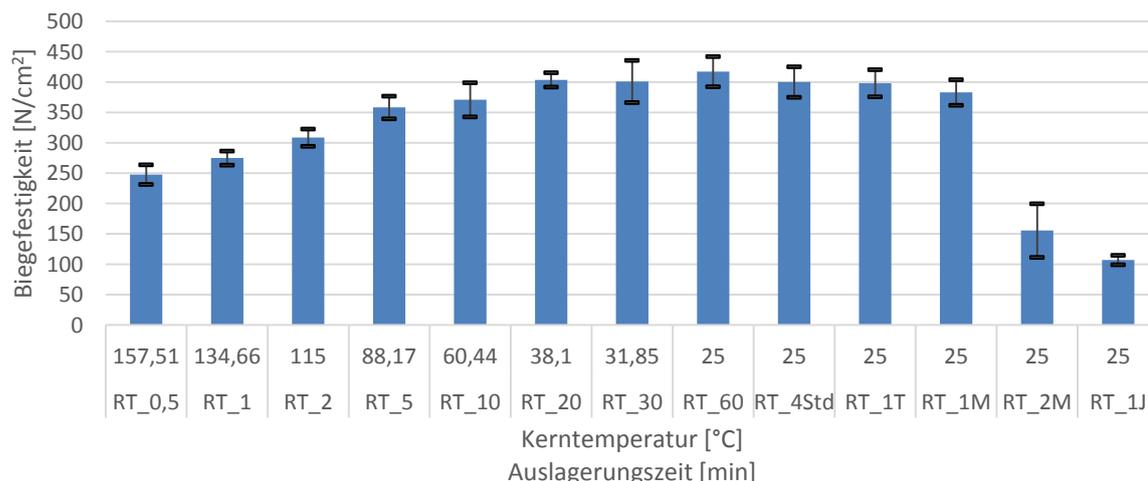


Abb. 4-19: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Hotbox in definierten Zeitintervallen.

Das Auslagerungsverhalten für die Wasserglas ASK-Inotec Proben ist in Abb. 4-20 angeführt. Die maximale Biegefestigkeit wird nach 20 Minuten erreicht und liegt bei 380 N/cm^2 . Nach Erreichen der Maximalfestigkeit stellt sich ein Festigkeitsniveau ein, welches nach einem Tag leicht abfällt. Der Festigkeitsverlust nach einem Monat liegt bei 20%, wobei die Auslagerung der Proben im Exsikkator bei konstanten Bedingungen erfolgte.

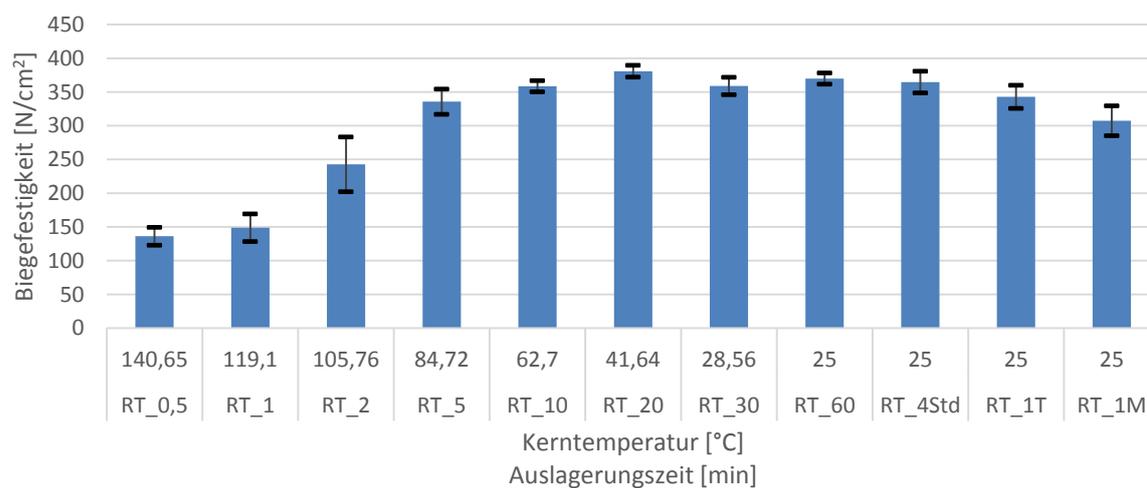


Abb. 4-20: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Wasserglas ASK-Inotec in definierten Zeitintervallen.

4.4.2 Bruchwahrscheinlichkeit für Biegefestigkeit bei Raumtemperatur

Die Weibullverteilung ermöglicht eine Vorhersage über die Streuung der Festigkeiten bzw. das Festigkeitsverhalten einzelner Messreihen. Eine Wahrscheinlichkeitsbetrachtung ist notwendig, da die gemessenen Festigkeiten stark schwanken können und von der Probengröße direkt abhängen [3, 73].

In Abb. 4-21 sind unterschiedliche Weibullverteilungen, welche sich in ein Wahrscheinlichkeitsnetz befindet, für die organisch gebundenen Proben angeführt. Anhand der ermittelten Verteilungen lassen sich mögliche Ausfallwahrscheinlichkeiten für spezifische Biegebelastungen der Prüfkörper ermitteln. So zeigt sich beispielsweise bei H32 Coldbox bei einer Belastung von 250 N/cm^2 eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 48 %. Bei den erfassten Bruchwahrscheinlichkeiten konnten vereinzelt Ausreiser ermittelt werden, welche außerhalb der eingezeichneten Regressionsgerade liegen. In Tab. 4-5 ist die Weibull Streubreite m der einzelnen Bruchgeraden abgebildet. Je höher der ermittelte Wert, desto repräsentativer ist die Auswertung bzw. desto besser ist die Reproduzierbarkeit der Messung. Die geringste Streubreite konnte bei Warmbox 1 Binder ermittelt werden.

Tab. 4-5: Ermittelte Steigung der Weibull-Regressionsgeraden für H32 bei unterschiedlichen Bindersystemen.

Sand	Binder	Streubreite m
H32	CB	41,49
	WB1	23,43
	WB2	79,20
	HB	46,56
	ASK_INO	52,73

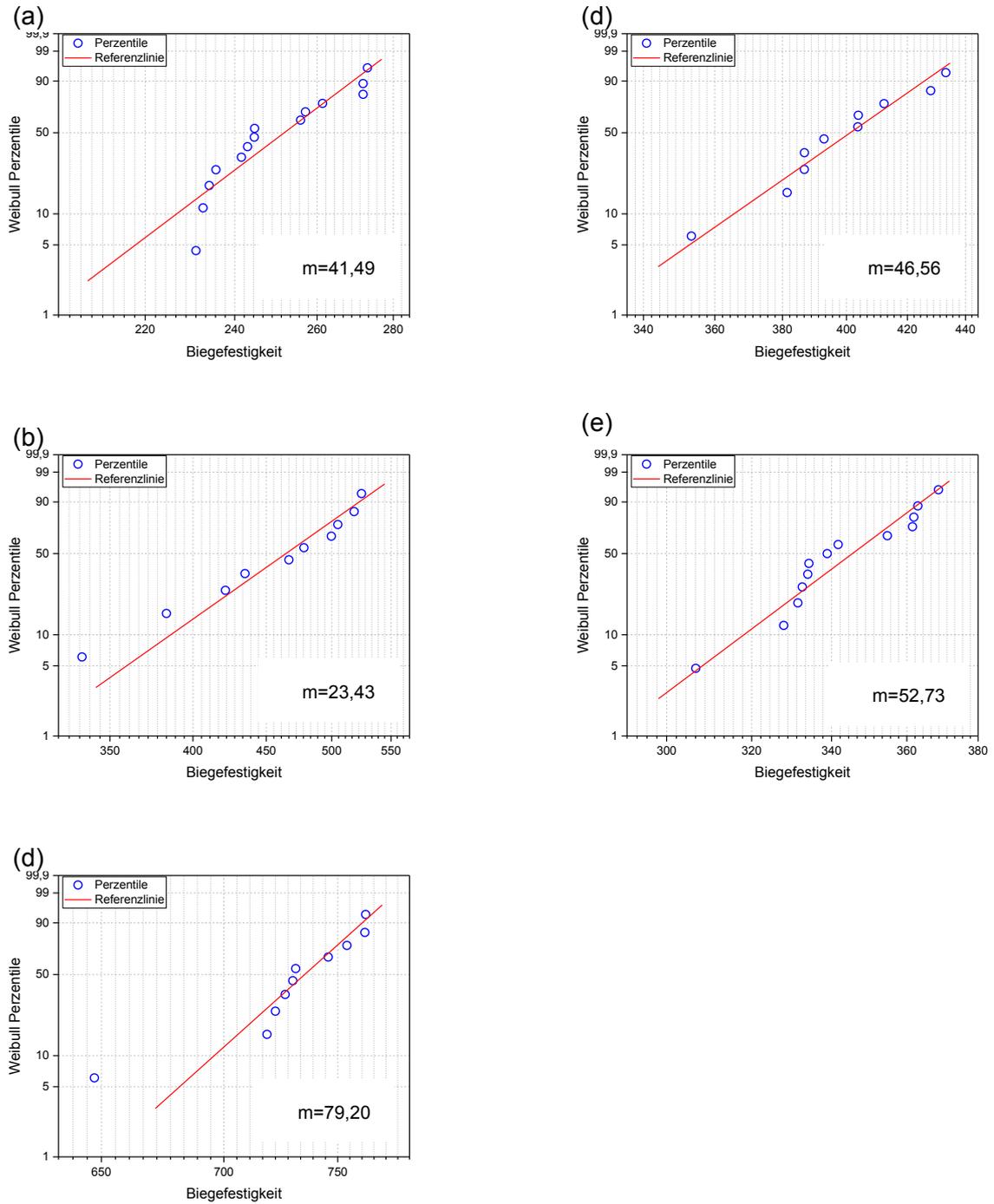


Abb. 4-21: Bruchwahrscheinlichkeit der Biegefestigkeit für (a) H32 Coldbox, (b) H32 Warmbox 1, (c) H32 Warmbox 2 und (d) H32 Hotbox und (e) H32 Wasserglasbinder ASK-Inotec.

4.4.3 Festigkeiten nach WBH

Festigkeitskennwerte für die Biege-, Druck-, Scher- und Spaltfestigkeit wurden vor und nach der thermischen Alterung der Proben ermittelt. Über einen Vergleich der Kennwerte soll eine mögliche Korrelation zwischen Belastung, Temperatur und Atmosphäre ermittelt werden. Zur besseren Orientierung wurden die Ergebnisse farblich voneinander getrennt. Zudem erfolgt eine Trennung in oxidierende und reduzierende Auslagerungsbedingungen.

Die Unterscheidung verläuft wie folgt:

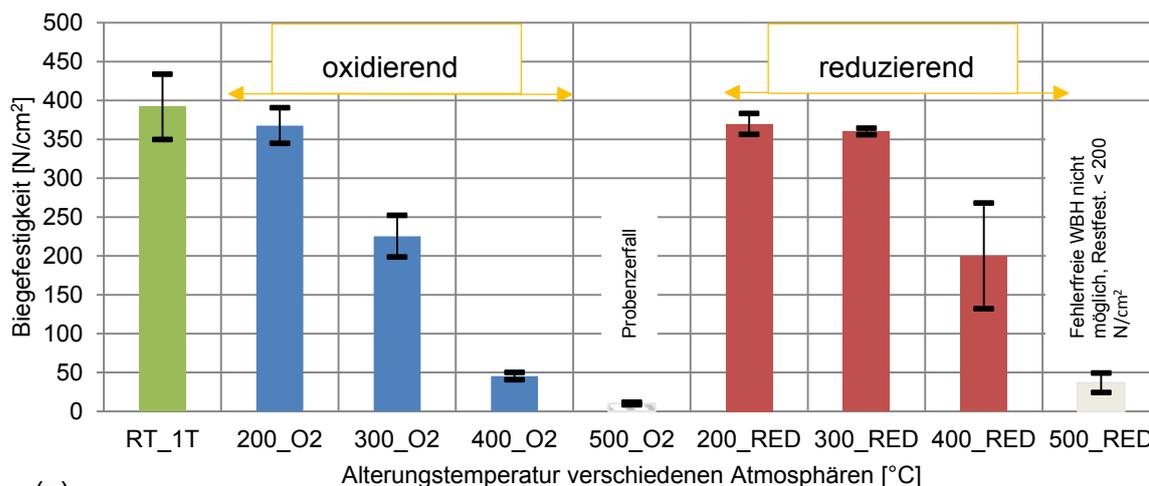
- Grün → Referenz
- Blau → Thermische Alterung an oxidierender Atmosphäre
- Rot → Thermische Alterung an reduzierender Atmosphäre
- Grau → Ermittlung der Festigkeit erschwert möglich (z.B. Proben Handling erschwert)
- Grau schraffiert → Probenzerfall

H32 Quarzsand mit Coldbox Mischung

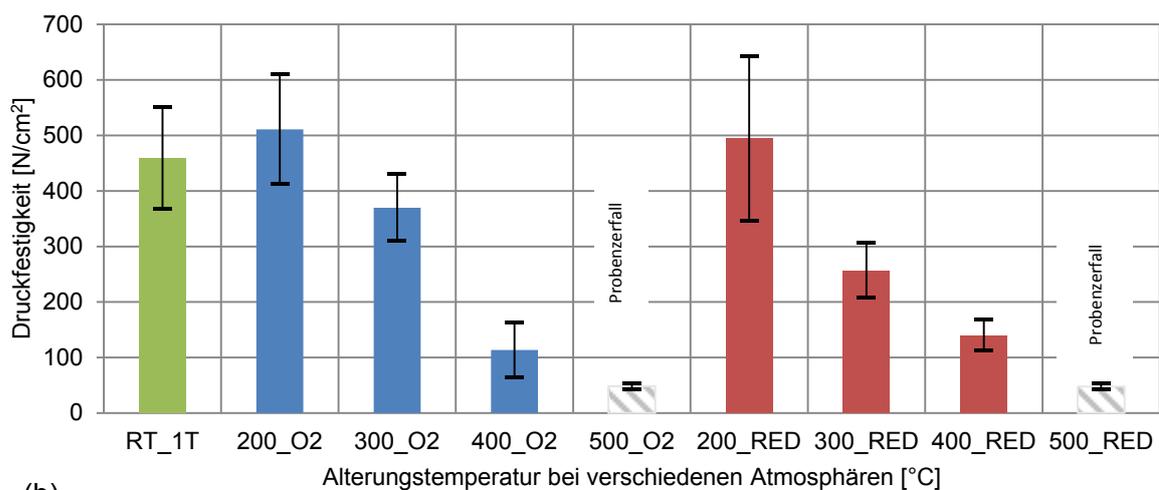
Die Festigkeitskennwerte für jene Proben die mit Coldbox gebunden sind in Abb. 4-22 angeführt. Bei einer Gegenüberstellung zur Referenz ist eine eindeutige Abnahme der Festigkeit mit steigender Temperatur erkennbar. Beim Temperaturniveau von 200°C liegen sowohl Biege- als auch Druckfestigkeit bei beiden Atmosphären auf einem relativ ähnlichen Niveau. Die ermittelte Scherfestigkeit bei 200°C liegt bei oxidierenden Bedingungen höher als jene bei reduzierenden. Es ist jedoch anzumerken, dass bei reduzierenden Bedingungen die statistische Abweichung vergleichsweise höher ist. Die ermittelte Spaltfestigkeit liegt bei 200°C und oxidierender Atmosphäre deutlich höher als die Referenz, bei reduzierenden Bedingungen ist jedoch eine Festigkeitsabnahme erkennbar.

Bei 300°C sind merkliche Unterschiede im Festigkeitsverhalten erkennbar. Bei Biege-, Scher- und Spaltfestigkeit liegen die ermittelten Werte bei oxidierenden Bedingungen niedriger als jene Festigkeiten bei reduzierenden Bedingungen. Lediglich bei der Ermittlung der Druckfestigkeit ist ein stetiger Abfall bei beiden Atmosphären erkennbar.

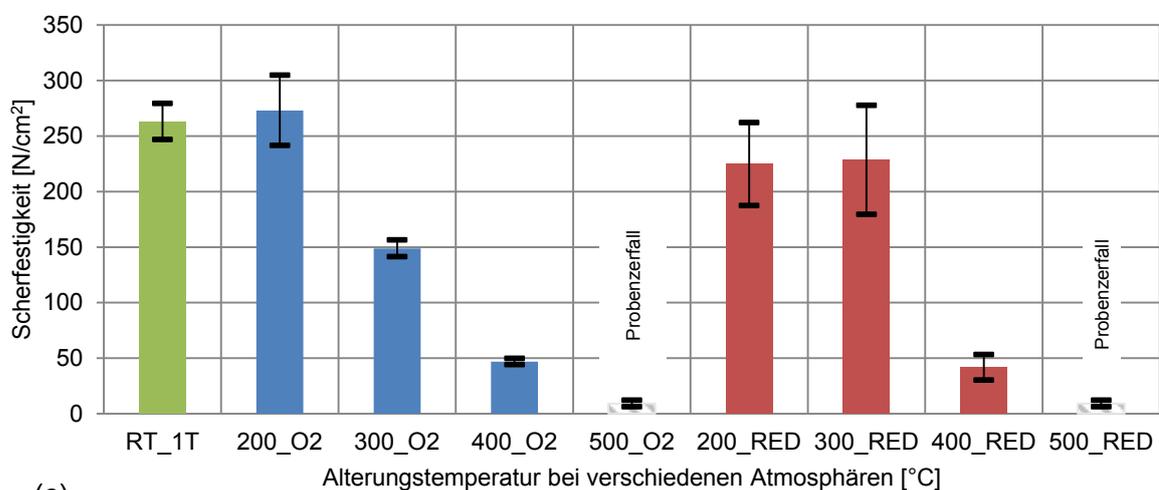
Die ermittelten Werte für Biege- und Spaltfestigkeit zeigen bei 400°C eine idente Tendenz bei reduzierenden Bedingungen. Die gemessenen Festigkeiten fallen hier wesentlich höher aus als jene bei oxidierenden Bedingungen. Bei den erfassten Druck- und Scherfestigkeiten ist ein stetiger Festigkeitsabfall auf einem identen Niveau erkennbar. Ab 500°C setzt zudem bei allen Untersuchungen der Probenzerfall ein.



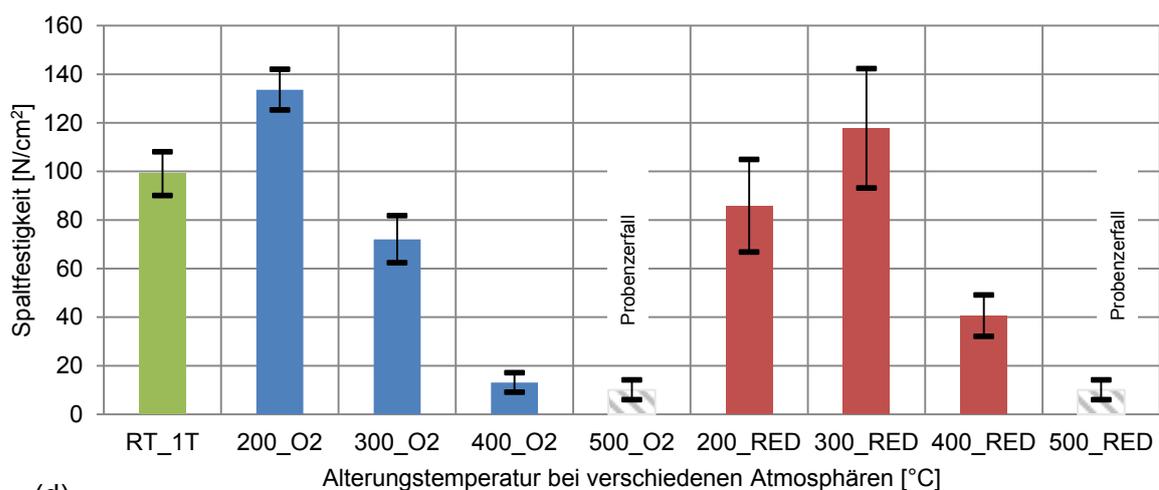
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 4-22: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Coldbox.

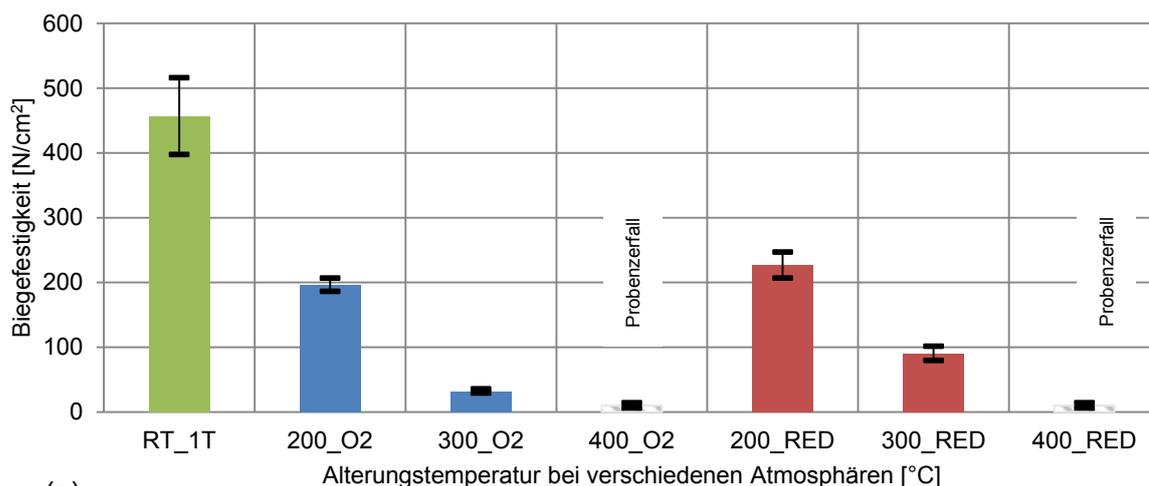
H32 Quarzsand mit Warmbox 1 Mischung

Die ermittelten Festigkeiten für Warmbox-Binder 1 Proben sind in Abb. 4-23 zusammengefasst.

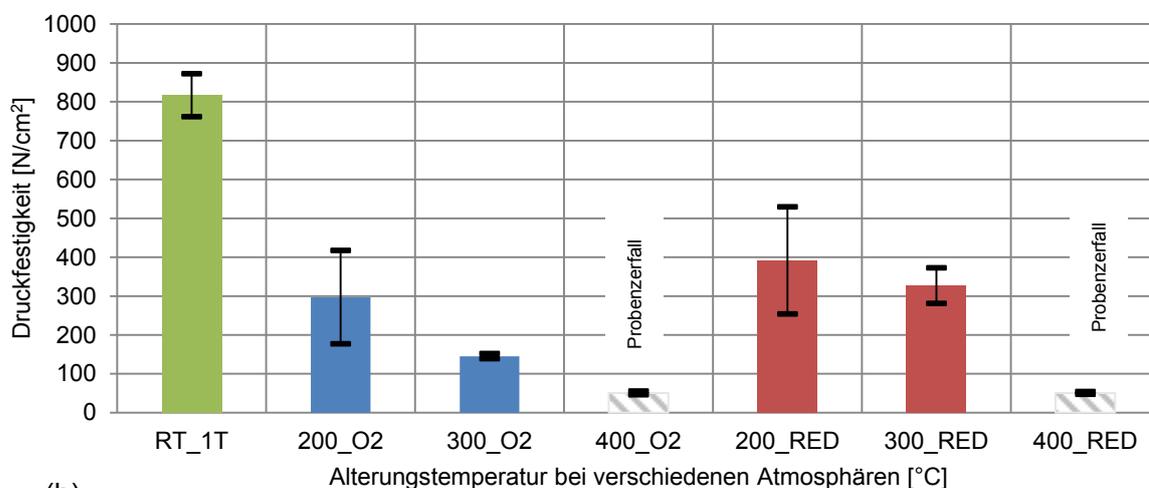
Sowohl bei oxidierenden Bedingungen als auch bei reduzierenden ist kein signifikanter Festigkeitsunterschied bei 200°C feststellbar. Der höher wirkende Festigkeitswert Druck- und Scherfestigkeitsmessungen, bei reduzierender Atmosphäre, kann auf statistische Abweichungen zurückgeführt werden.

Bei 300°C fallen die gemessenen Festigkeiten bei reduzierenden Bedingungen grundsätzlich höher aus.

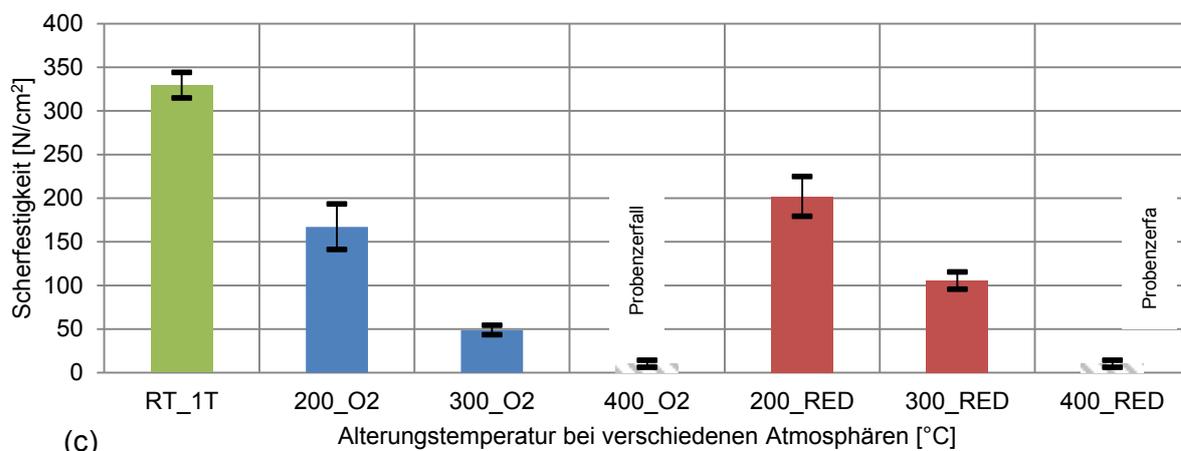
Der Probenzerfall für Warmbox 1 setzt ab dem Temperaturniveau von 400°C ein.



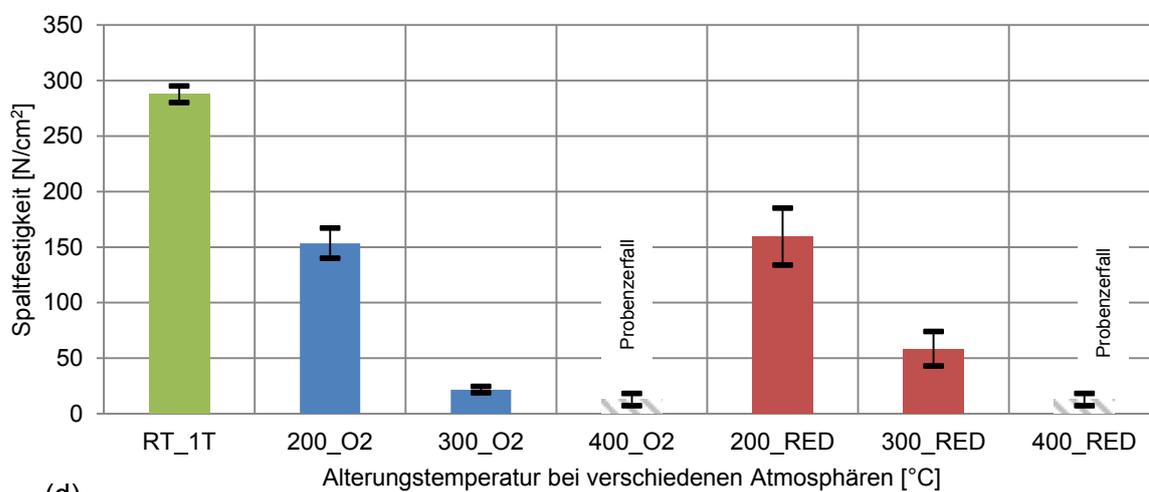
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 4-23: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Warmbox 1.

H32 Quarzsand mit Warmbox 2 Mischung

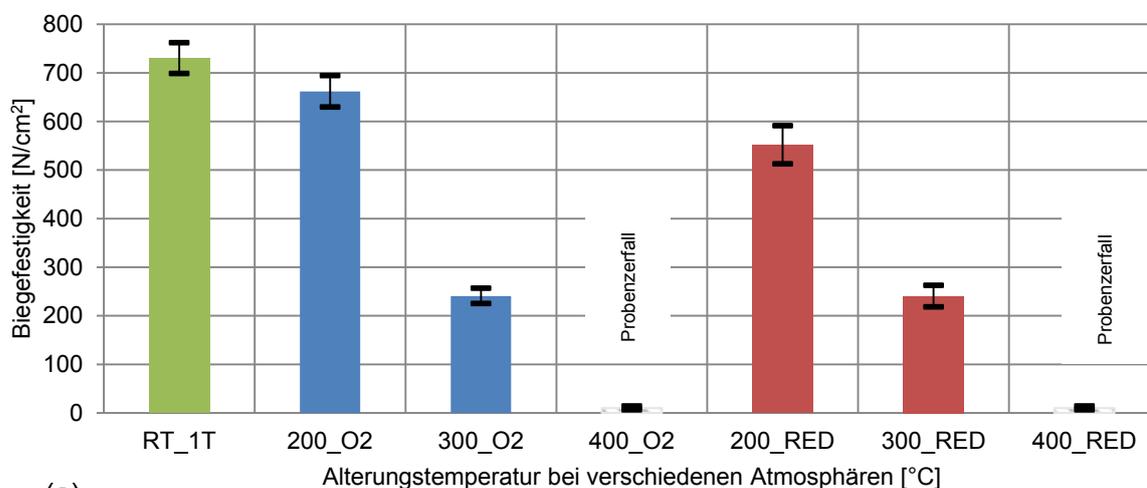
Eine Zusammenfassung der ermittelten Festigkeiten für die Versuchsreihe mit Warmbox-Binder 2 ist in Abb. 4-24 angeführt.

Die gemessene Biegefestigkeit zeigt bei beiden Atmosphären eine stetige Abnahme der Festigkeit, wobei die Biegefestigkeit bei reduzierenden Bedingungen niedriger bei 200°C bzw. auf dem gleichen Niveau bei 300°C ist.

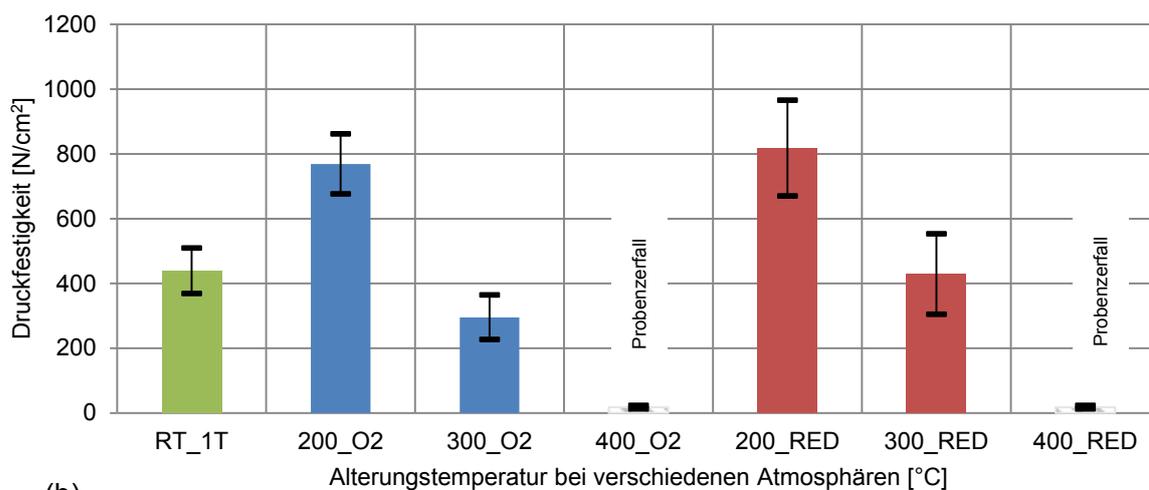
Druck-, Scher- und Spaltfestigkeitsmessungen zeigen eine gleichmäßige Tendenz im Festigkeitsverhalten. Die ermittelte Festigkeit der Referenzprobe ist hierbei niedriger als jene Festigkeit bei 200°C, wobei Scher- und Spaltfestigkeiten bei reduzierender Atmosphäre höher als bei oxidierender ausfallen. Bei der Druckfestigkeitsmessung liegen die erfassten Werte für beide Atmosphären auf dem gleichen Niveau.

Bei 300°C sind höhere Druck-, Scher- und Spaltfestigkeitswerte bei oxidierenden Bedingungen erkennbar.

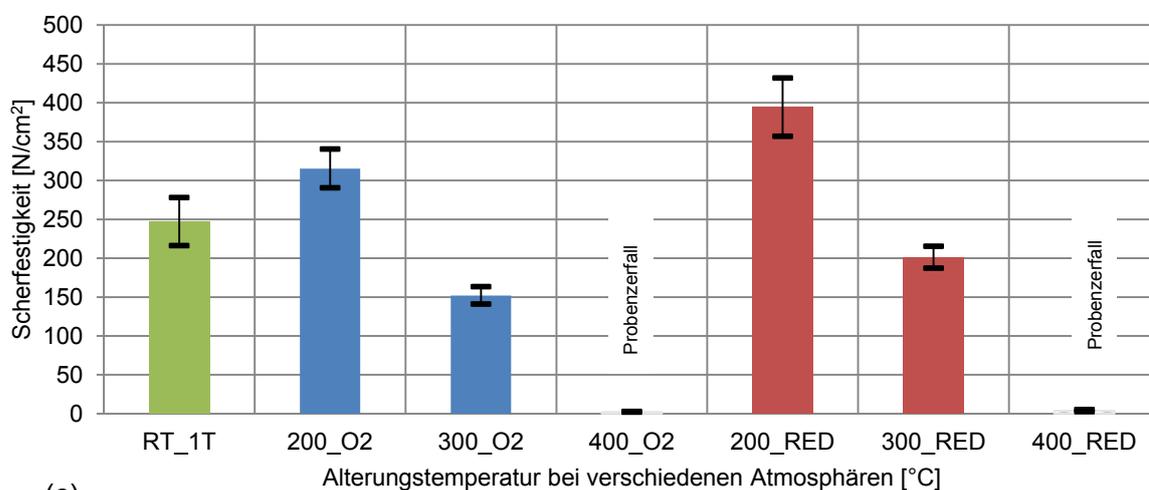
Der Probenzerfall setzt bei beiden Atmosphären ab 400°C ein.



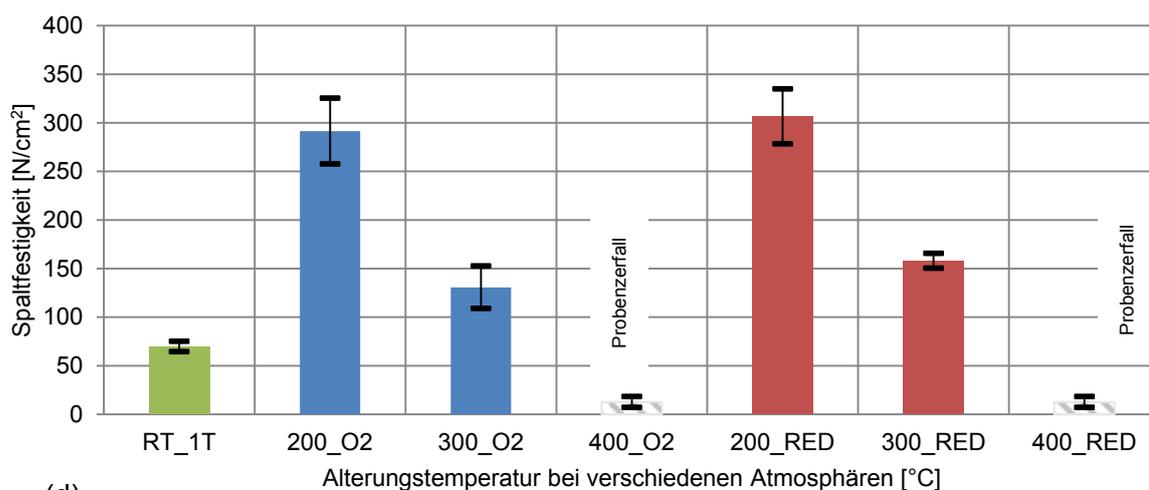
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 4-24: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Warmbox 2.

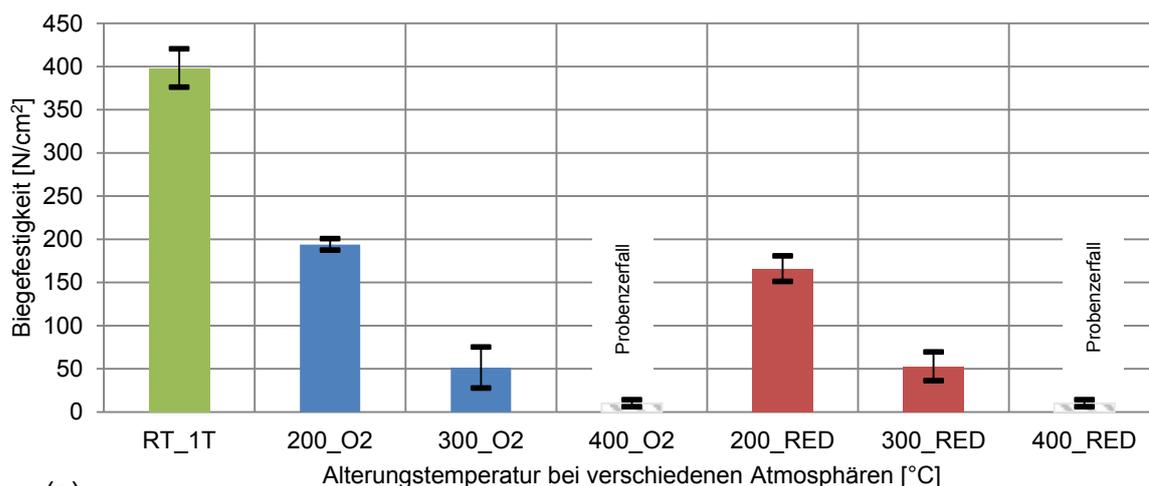
H32 Quarzsand mit Hotbox Mischung

Eine Übersicht der gemessenen Festigkeiten ist in Abb. 4-25 angeführt.

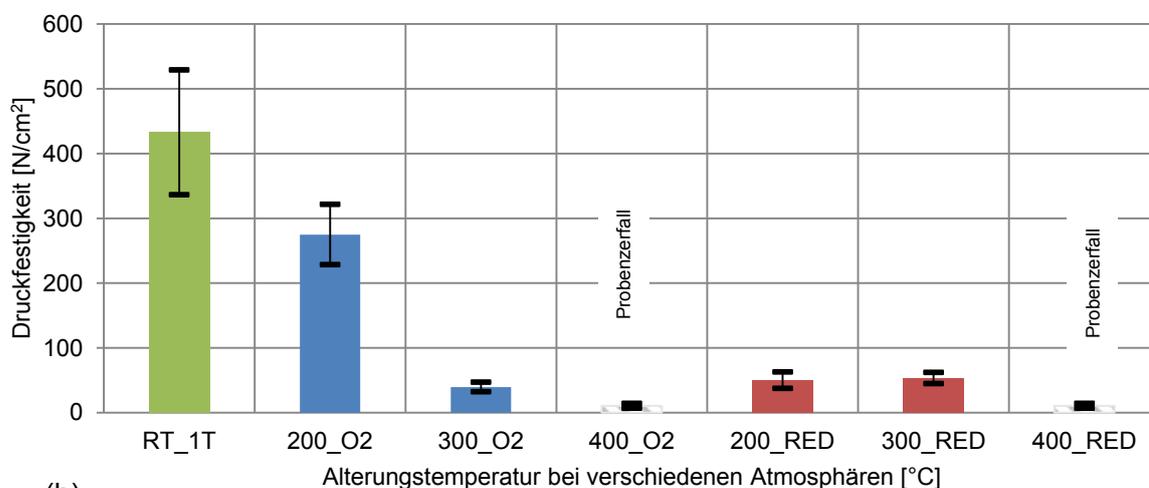
Die Biegefestigkeit nimmt mit zunehmender Temperatur stetig ab, wobei die erfassten Werte bei reduzierenden Bedingungen niedriger liegen als jene bei oxidierenden Bedingungen. Die Biegefestigkeit für 300°C ist bei beiden Atmosphären ident.

Druck-, Scher- und Spaltfestigkeitsmessungen zeigen, dass die Festigkeit bei reduzierender Atmosphäre für 200°C und 300°C auf dem gleichen Niveau liegt wie jene bei 300°C bei oxidierenden Bedingungen. Die Festigkeitswerte für oxidierende Bedingungen bei 200°C liegen auf einem wesentlich höheren Festigkeitsniveau.

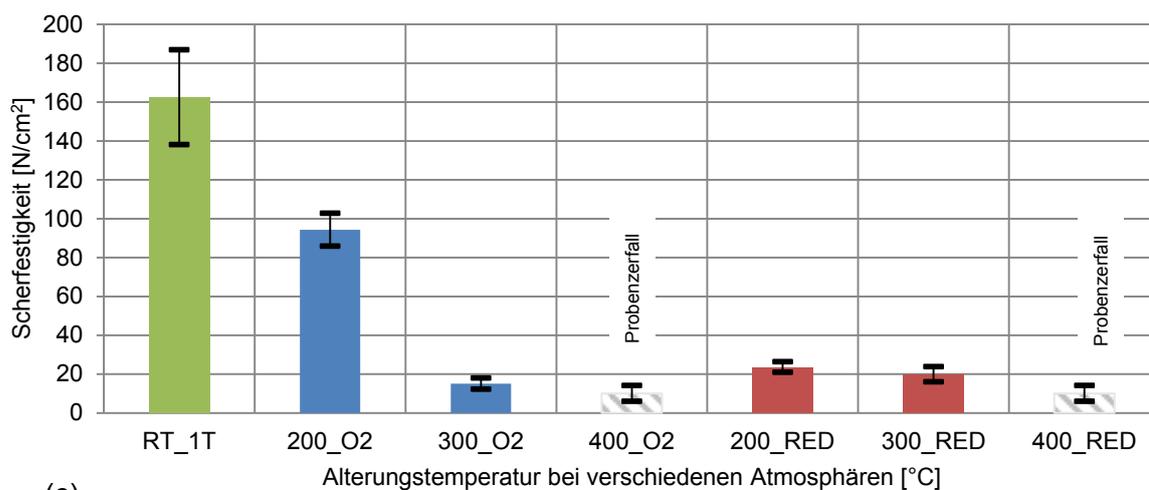
Der Probenzerfall ist nach 300°C feststellbar.



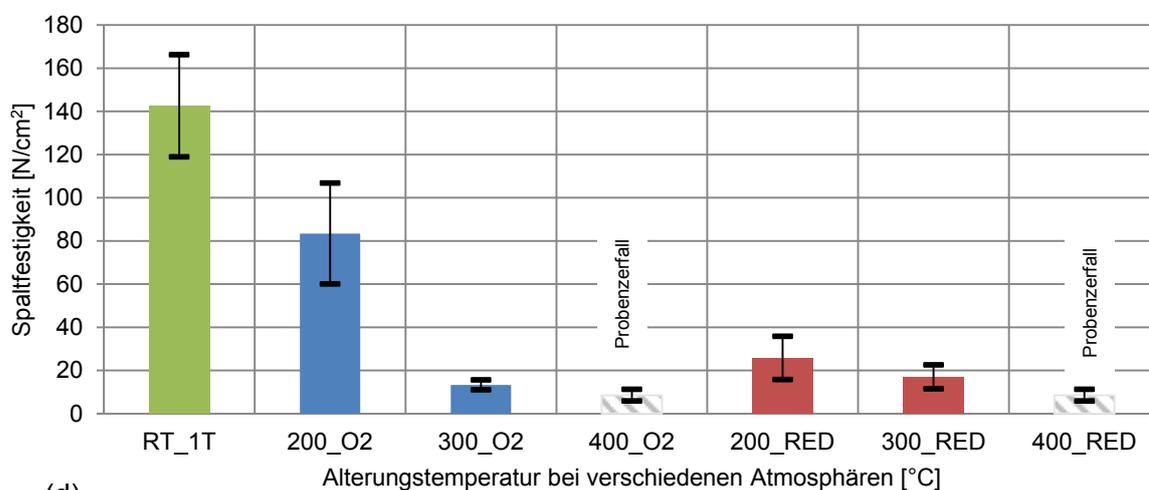
(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 4-25: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Hotbox.

H32 Quarzsand mit Wasserglas Binder ASK-Inotec Mischung

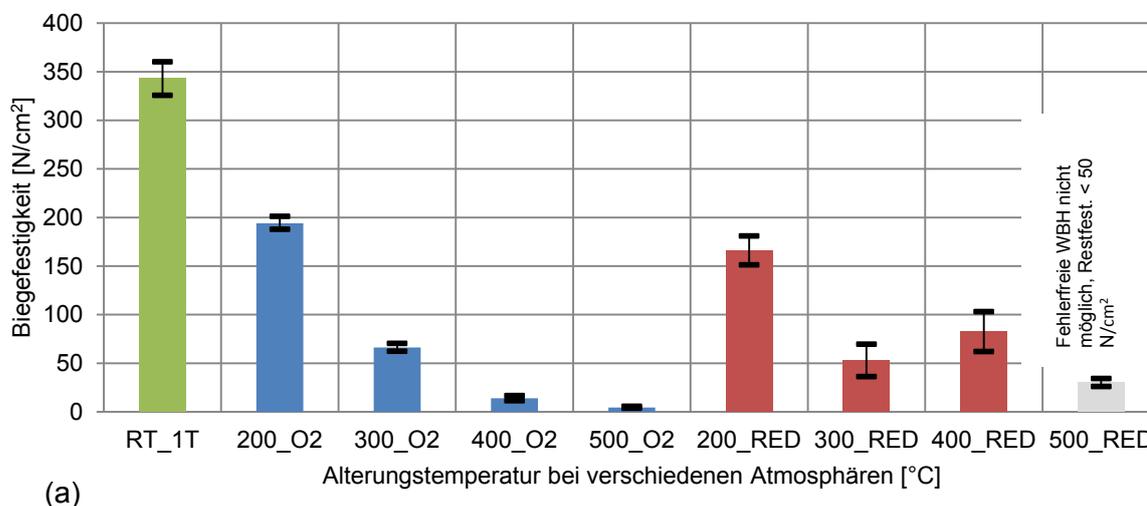
Die Festigkeitswerte nach der thermischen Auslagerung für anorganisch gebundene ASK-Inotec Proben sind in Abb. 4-26 ersichtlich.

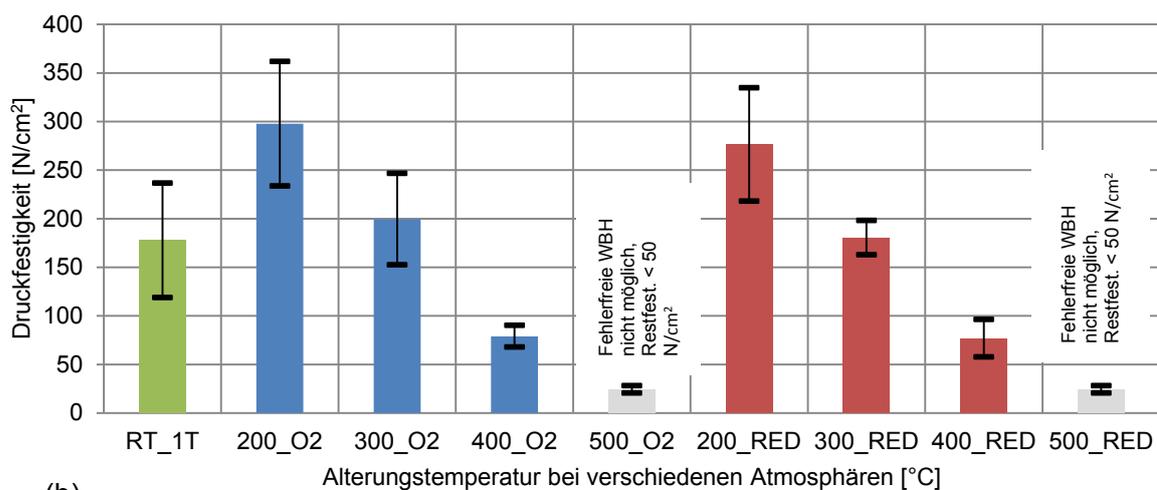
Die Biege- und Spaltfestigkeit verhält sich bei 200°C in beiden Fällen ident. Bei beiden Atmosphären ist eine deutliche Festigkeitsabnahme sichtbar, wobei beide Festigkeiten bei reduzierenden Bedingungen vergleichsweise niedriger ausfallen. Im Vergleich zur Referenz zeigen Druck- und Scherfestigkeit höhere Festigkeitswerte bei beiden atmosphärischen Bedingungen. Bei reduzierenden Bedingungen sind niedrigere Werte feststellbar, haben jedoch höhere statistische Abweichungen.

Bei 300°C nimmt die Biegefestigkeit der bei beiden Atmosphärenbedingungen gleichmäßig ab. Bei der Druck- und Spaltfestigkeit ist eine erneute Festigkeitsabnahme vorhanden, wobei die Festigkeit bei reduzierender Alterung niedriger ausfällt. Die Messung der Scherfestigkeitskennwerte bei reduzierenden Bedingungen waren auf Grund von Beschädigungen an den Proben fehlerhaft.

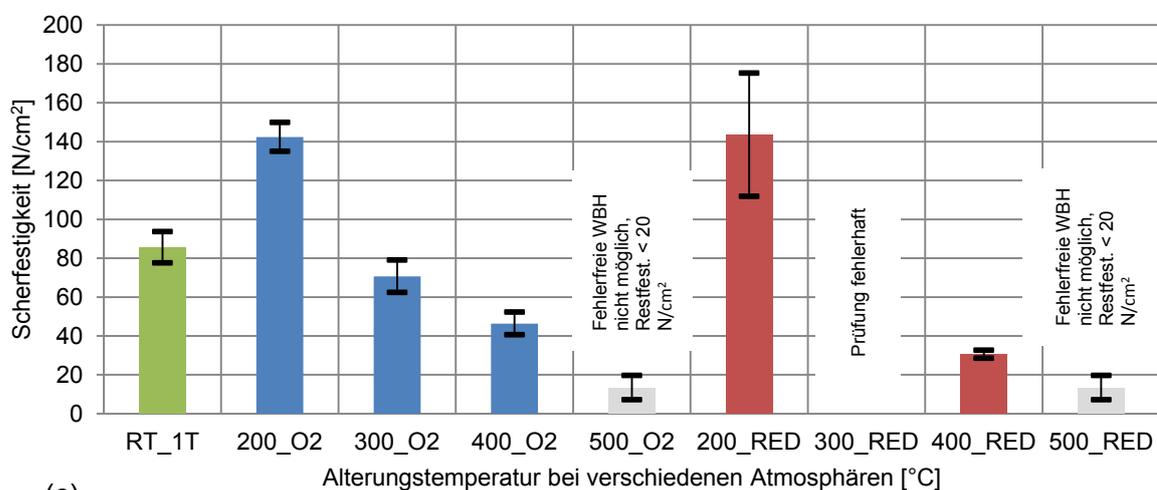
Ein merklicher Anstieg der Biegefestigkeit ist bei 400°C und reduzierenden Bedingungen ersichtlich, diese übersteigt zudem jene Festigkeit bei 300°C und oxidierenden Bedingungen. Die gemessenen Festigkeiten unter Druck-, Scher- und Spaltbelastung zeigen eine kontinuierliche Festigkeitsabnahme bzw. geringere Festigkeiten unter reduzierender Atmosphäre.

Da ein sicheres Handling der Proben nach einer Auslagerung bei 500°C erschwert war, konnten die Festigkeitswerte für diesen Temperaturbereich nicht ermittelt werden. Es war lediglich eine subjektive Abschätzung der Festigkeit möglich.

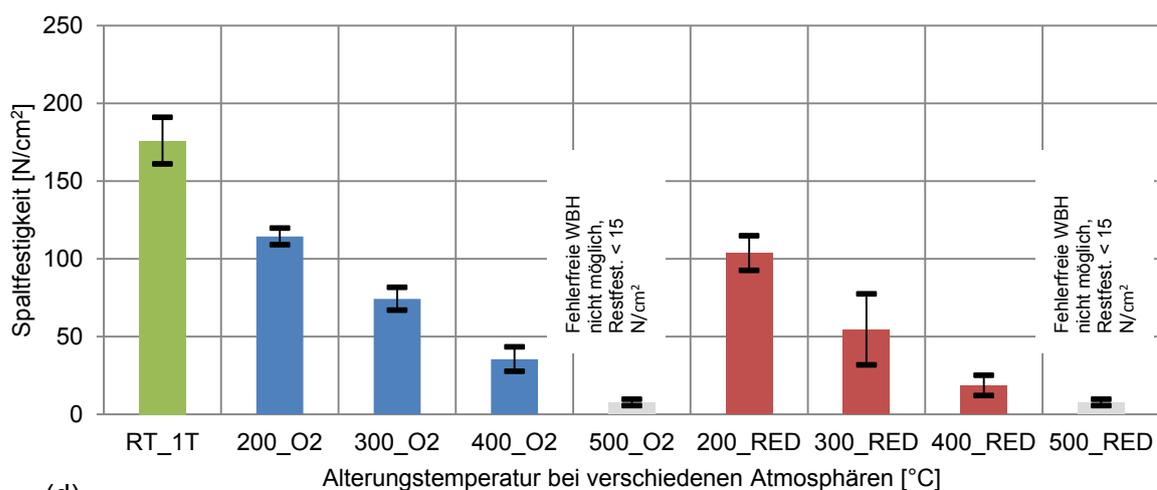




(b)



(c)



(d)

Abb. 4-26: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Wasserglasbinder ASK-Inotec.

4.4.4 Mohr'scher Spannungskreis

Im Gegensatz zu inhomogenem Gestein weisen keramische Werkstoffe sowohl Druck- als auch Zugfestigkeiten auf. Anhand der ermittelten Festigkeiten, bei unterschiedlichen Auslagerungen, konnte eine Übersicht der verschiedenen Festigkeitszustände in Form eines Spannungskreises generiert werden. Hierfür wurden einzelne Spannungskreise für Druck- und Spaltfestigkeit eingezeichnet. Der Fokus der Spannungskreisdarstellung liegt hierbei, wie für metallische Werkstoffe üblich, im positiven Abschnitt und somit auf der Zugbelastung. Die Druckfestigkeit wurde mittels einachsiger Druckprüfung ermittelt und als Kreis eingezeichnet. Zudem wurde die Zugfestigkeit teilweise über die einachsige Zugfestigkeitsmessung ebenfalls ermittelt und als Kreis eingezeichnet. Die Scherfestigkeit wurde entlang der Ordinate aufgetragen. Dadurch ergeben sich drei bzw. zwei Schnittpunkte innerhalb des Diagrammes, wodurch die Bruchgerade konstruiert werden kann.

Allgemein richtet sich der Verlauf der Bruchgerade nach den Materialbegebenheiten. Beispielsweise entspricht für keramische Werkstoffe die Bruchgerade einer einhüllenden Parabel, welche bei Überschreiten dieser Einhüllenden das Versagen des Prüfkörpers beschreibt. Bei Stoffen mit ähnlichen Zug- Druckfestigkeiten, beispielsweise Metalle, bildet sich hingegen eine parallele Gerade aus [66, 72].

Für die Auswertung wurden jeweils die Einzel-Spannungskreise der Referenzproben (RT_1T Probe), eine zusammenfassende Übersichtsdarstellung der Bruchgeraden sowie ein tabellarischer Vergleich der Bruchgeradenparameter herangezogen. Für die Übersichtsdarstellung der Bruchgeraden wird jene Bruchgerade für die Messung bei Raumtemperatur als Referenz herangezogen.

In Abb. 4-27 ist die Bruchgeradenübersicht sowie ein beispielhafter Auszug des Einzel-Spannungskreises bei Raumtemperatur angeführt. Im Einzel-Spannungskreis sind die Druck-, Zug- und Scherspannungsanteile sowie deren Standardabweichung angeführt. Die Bruchgerade wurde über die erfasste Scherfestigkeit und durch tangentialen Anpassen an den Druckkreis konstruiert. Der spezifische Reibwinkel und die Kohäsion τ_c wurden aus der konstruierten Bruchgerade (rot) ermittelt. Zusätzlich ist der Anteil der Spaltzugfestigkeitsmessung (in grau) angeführt, diese liegt bei den RT_1T Proben deutlich unter der konstruierten Bruchgerade. Dieses Verhalten ist ebenfalls bei höheren Temperaturen und bei beiden Auslagerungsbedingungen feststellbar.

Im Falle der Coldbox Proben wird die höchste Druckfestigkeit bei 200°C sowohl bei oxidierenden als auch reduzierenden Bedingungen erreicht. Dies führt zu einem Überschreiten der Referenz-Bruchgerade und deutet eine zusätzliche Verfestigung



hinsichtlich der Druckfestigkeit nach der Auslagerung an, wobei die ermittelten Scherfestigkeiten gleichauf bzw. unter der Bruchgerade liegen. Bis auf die erfasste Bruchgerade bei 300°C und reduzierenden Bedingungen, sind die restlichen Festigkeiten niedriger als die Referenz und liegen somit mit fortschreitender Auslagerung weiter unter der Referenzbruchgerade.

Eine Darstellung der ermittelten Kohäsion und des Reibwinkels φ sind in Tab. 4-6 ersichtlich. Wie in der Übersichtsdarstellung der Bruchgeraden ist eine deutliche Abnahme der Spannungskreise und somit der Kohäsion ersichtlich. Die höchste Kohäsion liegt bei 200°C und oxidierenden Bedingungen vor und gefolgt von der Referenzprobe. Es ist eine gleichmäßige Kohäsionsabnahme feststellbar, wobei die Reibungswinkel zwischen 7° und 58° variieren. Bei oxidierenden Bedingungen ist der Reibwinkel vergleichsweise gleichmäßiger als bei reduzierenden. Der ermittelte Reibwinkel von 7° bei 300°C und reduzierenden Bedingungen auf einen möglichen Messfehler zurückzuführen ist. Die höchsten Reibwinkel können bei 400°C und reduzierenden Bedingungen sowie bei oxidierenden Bedingungen festgestellt werden.

Tab. 4-6: Bruchgeradenparameter für H32 mit Coldbox.

Probenart	Kohäsion τ_c [N/cm ²]	Reibwinkel φ [°]
H32-CB-RT_1T	131,51	30
H32-CB-200_O2	136,50	34
H32-CB-300_O2	74,40	46
H32-CB-400_O2	23,44	46
H32-CB-200_RED	112,32	41
H32-CB-300_RED	114,22	7
H32-CB-400_RED	20,78	58

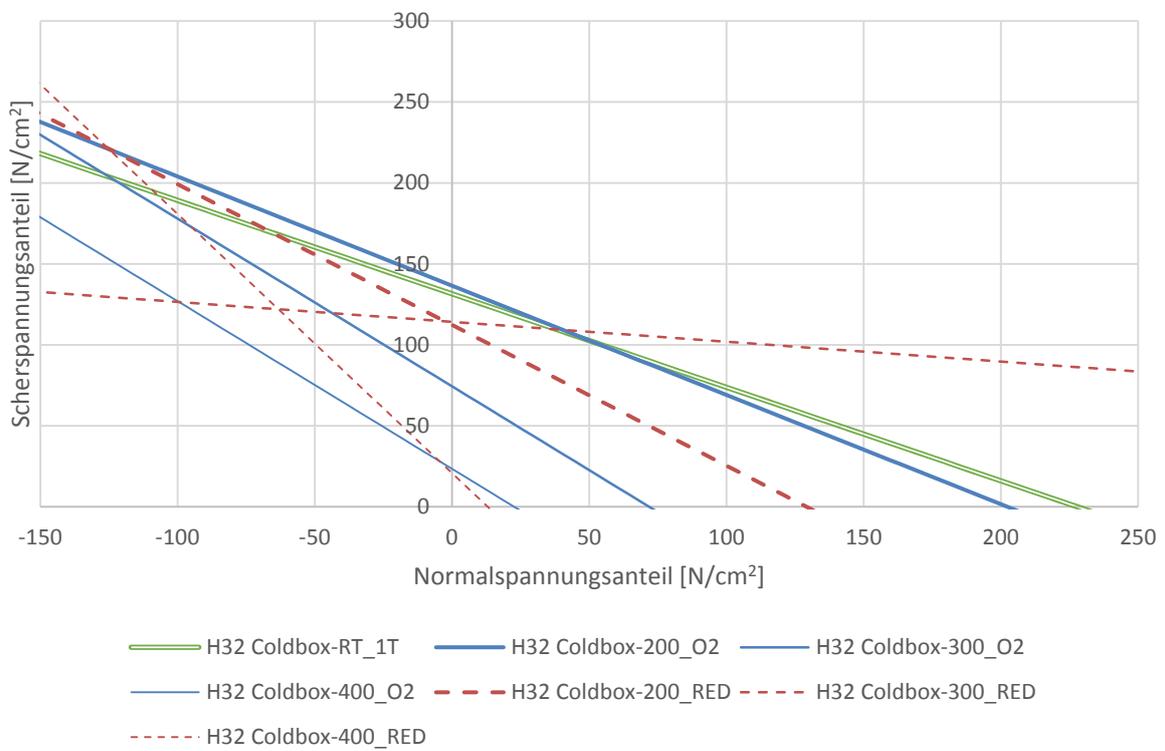
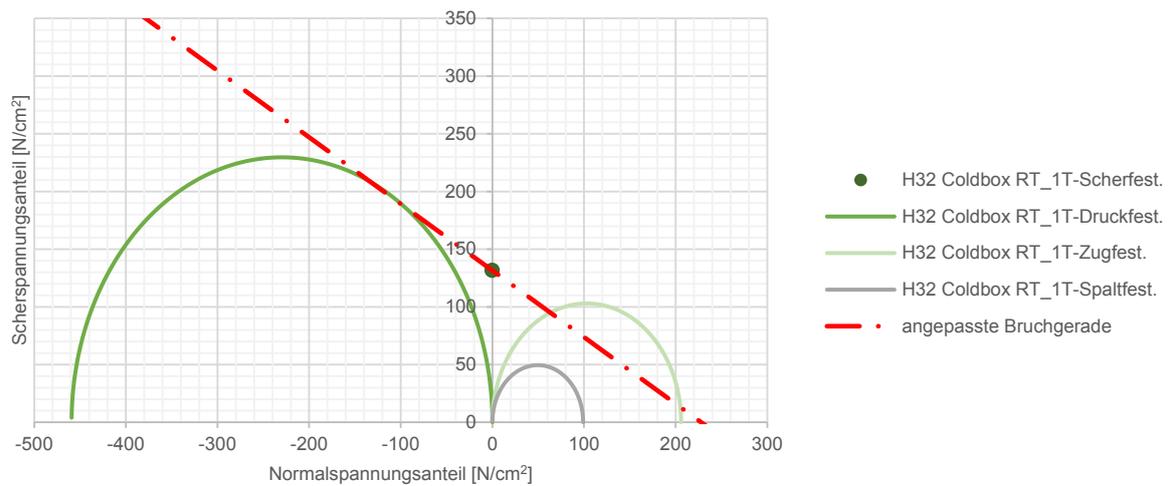


Abb. 4-27: Spannungskreis für H32 mit Coldbox bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.

Der repräsentative Spannungskreis sowie die Zusammenfassung der Bruchgeraden für Warmbox 1 Proben ist in Abb. 4-28 ersichtlich. Eine Konstruktion der Bruchgerade ist möglich, wobei die erfassten Spalt- und Zugfestigkeiten bei Raumtemperatur deutlich über der Bruchgerade liegen. Die ist ebenfalls bei den thermisch ausgelagerten Spaltfestigkeiten ersichtlich. Nach einer Auslagerung ist eine kontinuierliche und gleichmäßige Festigkeitsabnahme anhand der Bruchgeraden zu erkennen, wobei die gemessenen Festigkeiten und somit gebildeten Bruchgeraden unter der Referenz-Bruchgerade bei Raumtemperatur liegen.

In Tab. 4-7 sind die ermittelten Werte für die konstruierte Bruchgerade angeführt. Eine gleichmäßige Abnahme der Kohäsion ist feststellbar, wobei der höchste Wert bei der Referenz feststellbar ist. Der Reibwinkel streut zwischen 31° und 53° , wobei das Maximum bei 300°C sowie oxidierenden und reduzierenden Bedingungen vorliegt. Die Bruchgeraden weisen bei 200°C bzw. 300°C ein ähnliches Verhältnis hinsichtlich des Winkels auf. Wobei eine hohe Kohäsion in reduzierender Atmosphäre herrscht.

Tab. 4-7: Bruchgeradenparameter für H32 mit Warmbox 1.

Probenart	Kohäsion τ_c [N/cm ²]	Reibwinkel φ [°]
H32 Warmbox 1-RT_1T	164,59	46
H32 Warmbox 1-200_O2	83,52	31
H32 Warmbox 1-300_O2	24,35	51
H32 Warmbox 1-200_RED	100,87	35
H32 Warmbox 1-300_RED	52,64	53

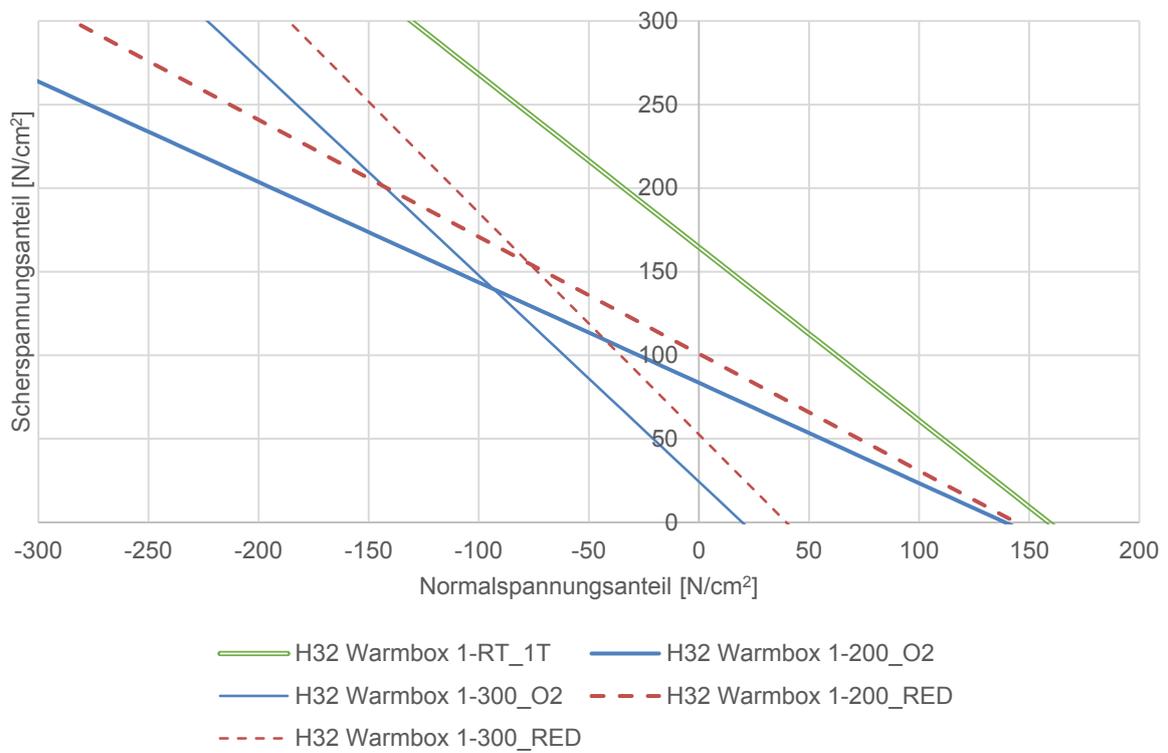
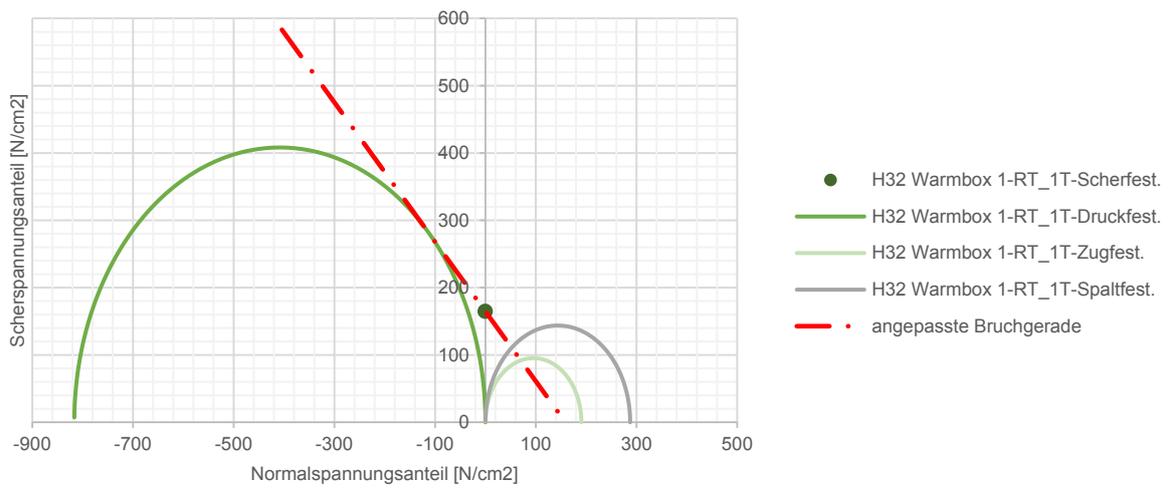


Abb. 4-28: Spannungskreis für H32 mit Warmbox 1 bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.



Ähnlich zu Coldbox ist bei Warmbox 2 eine Zunahme der Druckfestigkeit bei 200°C und bei oxidierenden bzw. reduzierenden Bedingungen feststellbar und somit eine Zunahme der Kohäsion. Die restlichen Spannungskreise weisen eine gleichmäßige Abnahme mit zunehmender Temperatur auf. Eine Übersicht der Bruchgeraden, sowie der Referenz-Spannungskreis ist in Abb. 4-29 ersichtlich. Die gemessene Spaltzugfestigkeit liegt deutlich unter der Referenzzugfestigkeit. Dies ist auch mit zunehmender Auslagerungstemperatur zu beobachten. Der erfasste Spannungskreis für die Zugfestigkeit liegt hingegen über der gebildeten Bruchgerade

In Tab. 4-8 sind die ermittelten Parameter der Bruchgerade angeführt. Ein ähnliches Verhalten hinsichtlich Kohäsion und Winkel bei 200°C und 300°C bei beiden atmosphärischen Bedingungen ist feststellbar. Das Maximum der Kohäsion liegt bei 200°C und reduzierenden bzw. oxidierenden Bedingungen und somit deutlich über der Referenzbruchgerade bei Raumtemperatur. Der Reibwinkel liegt zwischen 31° und 45°.

Tab. 4-8: Bruchgeradenparameter für H32 mit Warmbox 2.

Probenart	Kohäsion τ_c [N/cm²]	Reibwinkel φ [°]
H32 Warmbox 2-RT_1T	123,43	31
H32 Warmbox 2-200_O2	157,62	45
H32 Warmbox 2-300_O2	76,00	36
H32 Warmbox 2-200_RED	197,10	38
H32 Warmbox 2-300_RED	100,491	40

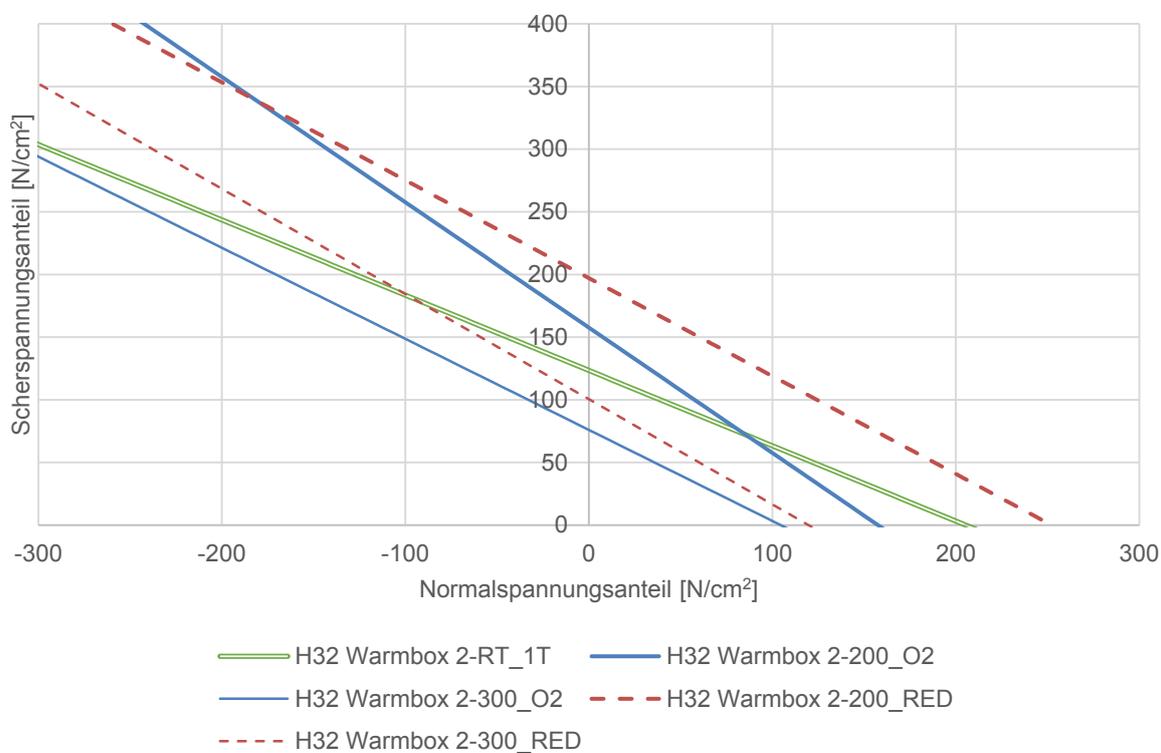
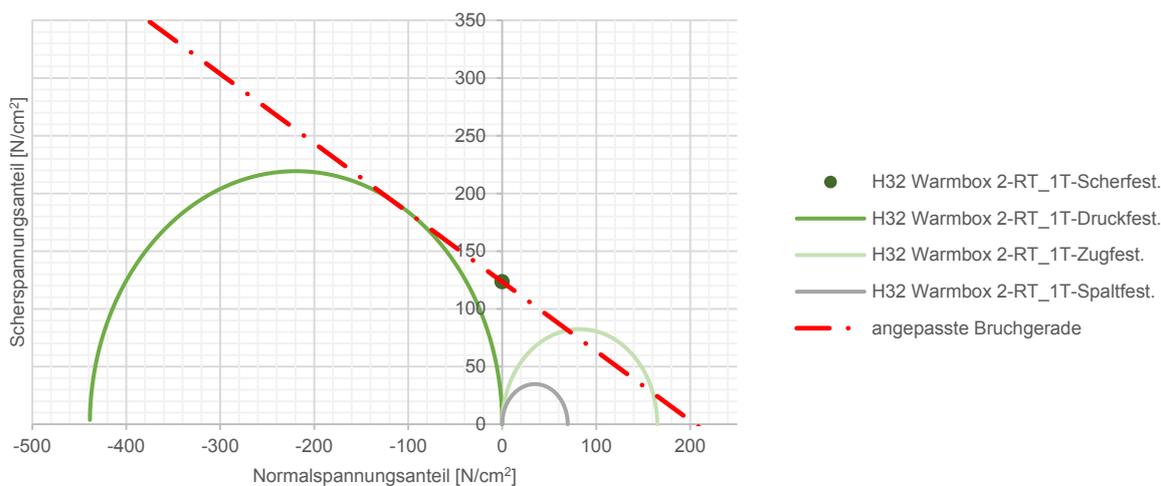


Abb. 4-29: Spannungskreis für H32 mit Warmbox 2 bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.

In Abb. 4-30 ist die Übersicht der Bruchgeraden sowie der repräsentative Spannungskreis für Hotbox ersichtlich. Eine Konstruktion der Bruchgerade ist möglich und schneidet wie gefordert den Punkt der maximalen Scherbelastung für die Referenzprobe RT_1T. Wobei der Spannungskreis für die Spaltfestigkeit über der gebildeten Bruchgerade liegt. Dies ist ebenfalls bei steigender Auslagerungstemperaturen zu beobachten. Anhand der Bruchgeradendarstellung ist eine gleichmäßige Festigkeitsabnahme mit zunehmender Auslagerungstemperatur ersichtlich, wobei die ermittelten Bruchgeraden und Festigkeiten unter der Referenz-Bruchgerade liegen und relativ parallel zueinander liegen.

In Tab. 4-9 sind die erfassten Bruchgeradenparameter ersichtlich. Die höchste Kohäsion kann bei der Referenz RT_1T festgestellt werden, wobei die erfassten Winkel eine geringe Streuung aufweisen und zwischen 40° und 51° variieren. Bei oxidierenden Bedingungen ist eine drastische Abnahme der Kohäsion mit steigender Temperatur feststellbar. Bei reduzierende Bedingungen hingegen sind die ermittelten Bruchgeradenparameter bei 200°C und 300°C annähernd gleich.

Tab. 4-9: Bruchgeradenparameter für H32 mit Hotbox.

Probenart	Kohäsion τ_c [N/cm²]	Reibwinkel φ [°]
H32 Hotbox-RT_1T	81,23	49
H32 Hotbox-200_O2	47,13	51
H32 Hotbox-300_O2	7,54	47
H32 Hotbox-200_RED	11,80	40
H32 Hotbox-300_RED	9,94	47

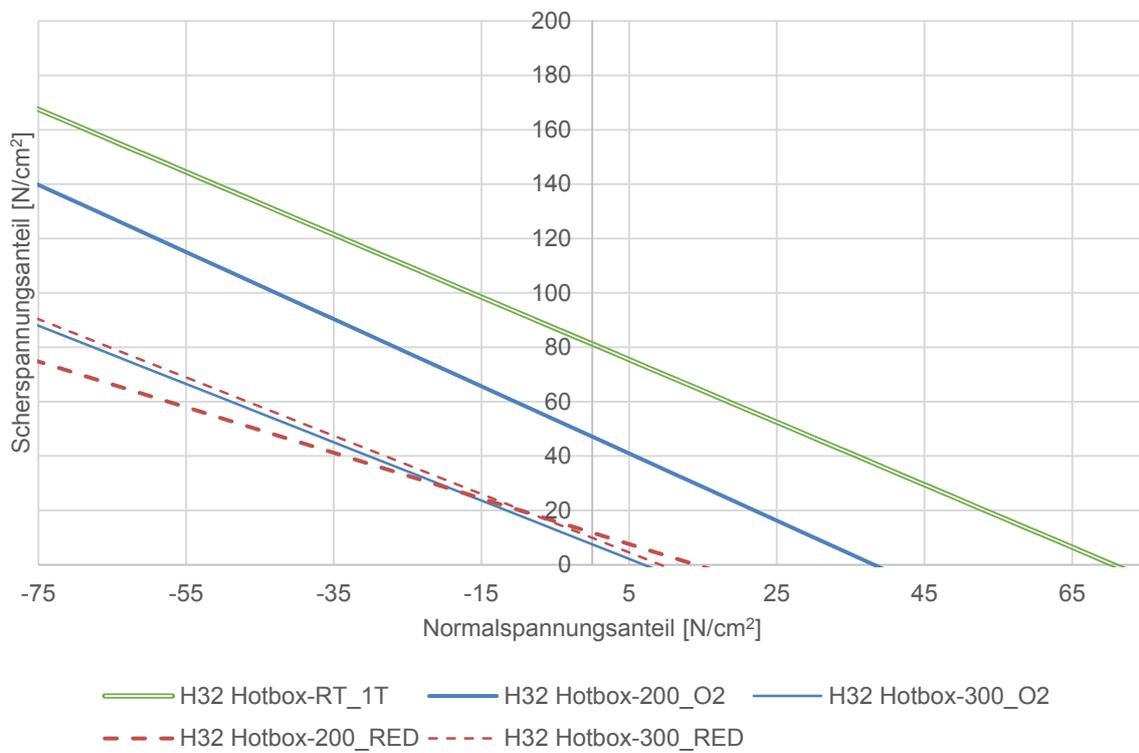
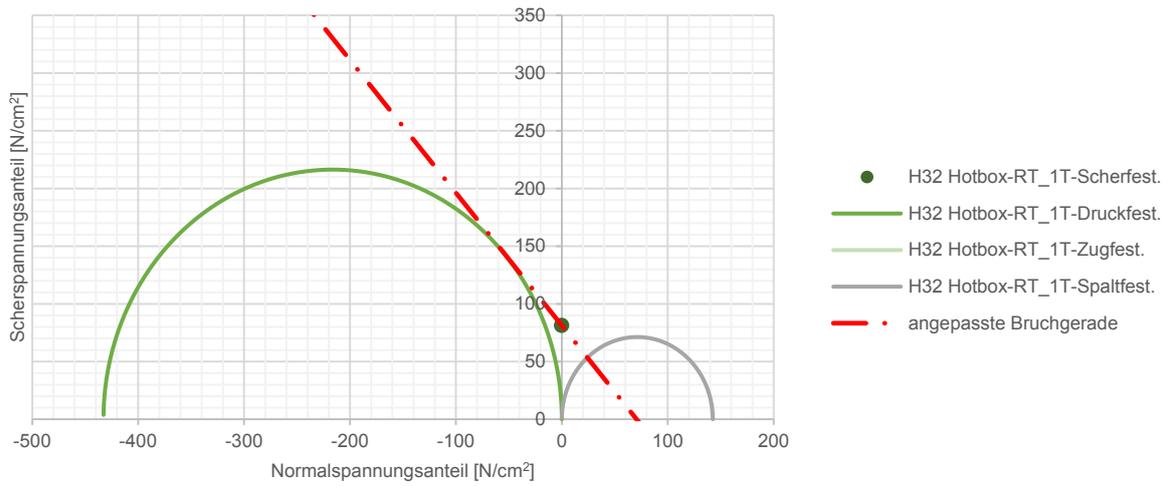


Abb. 4-30: Spannungskreis für H32 mit Hotbox bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.

Die Übersicht der Bruchgeraden sowie des Referenz-Spannungskreises ist in Abb. 4-31 dargestellt. Da die ermittelte Zugfest- und Spaltfestigkeit bei Raumtemperatur annähernd das gleiche Festigkeitsniveau wie die ermittelte Druckfestigkeit hat, kann von einem Messfehler ausgegangen werden. Die erfasste Spaltzugfestigkeit liegt ebenfalls bei Ausgelagerten Proben über der gebildeten Bruchgerade. An Hand der Bruchgeradenübersicht ist ein unterschiedliches Spannungsverhalten ersichtlich. Die Druckfestigkeiten sind bei 200°C bei oxidierenden und reduzierenden Bedingungen, höher als die Referenzfestigkeit, wobei die Messwerte sich annähernd gleichen. Bei höheren Temperaturbereichen nimmt die Kohäsion ab und die gebildeten Bruchgeraden liegen unter der Referenz.

Eine gleichmäßige Abnahme der Kohäsion ist in Tab. 4-10 feststellbar, wobei die Reibwinkel zwischen 29° und 51° streuen. Die höchste Kohäsion liegt bei 200°C bei beiden Auslagerungsbedingungen vor. Kohäsion und Winkel korrelieren bei 200°C bzw. 400°C bei beiden Auslagerungsbedingungen.

Tab. 4-10: Bruchgeradenparameter für H32 mit Wasserglas ASK-Inotec.

Probenart	Kohäsion τ_c [N/cm²]	Reibwinkel ϕ [°]
H32 mit ASK-Inotec-RT_1T	42,77	38
H32 mit ASK-Inotec-200_O2	71,17	39
H32 mit ASK-Inotec-300_O2	35,34	51
H32 mit ASK-Inotec-400_O2	23,18	29
H32 mit ASK-Inotec-200_RED	71,73	35
H32 mit ASK-Inotec-400_RED	15,25	46

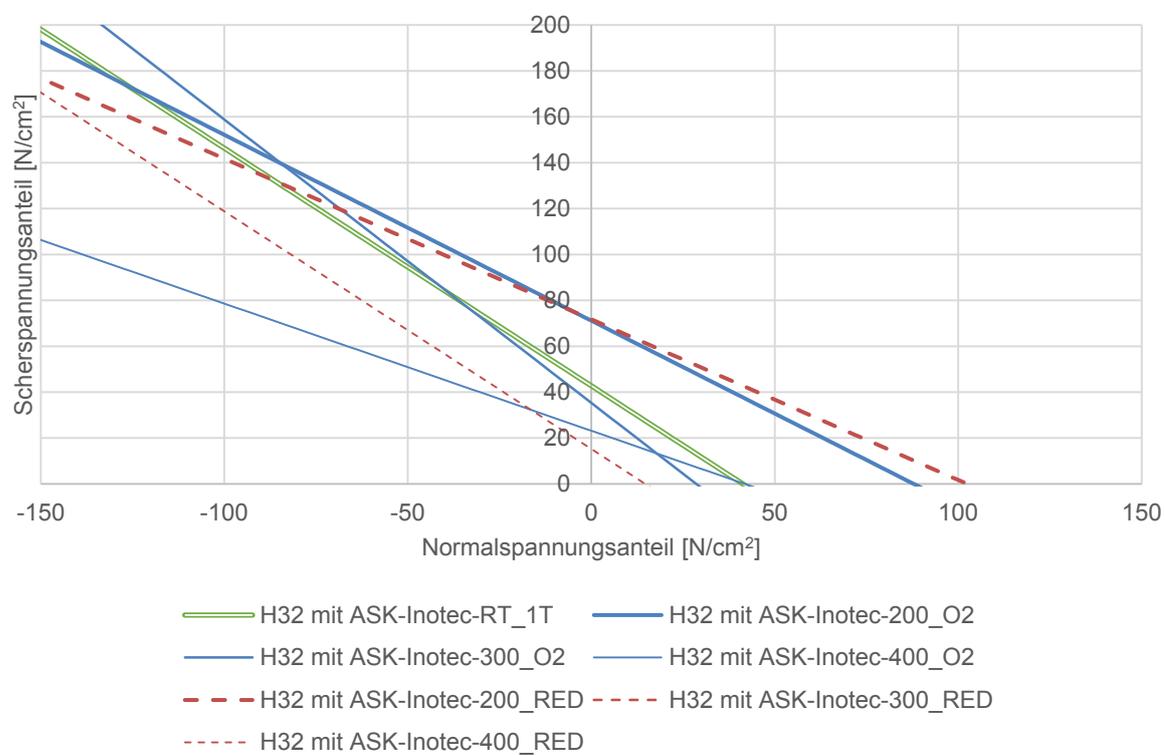
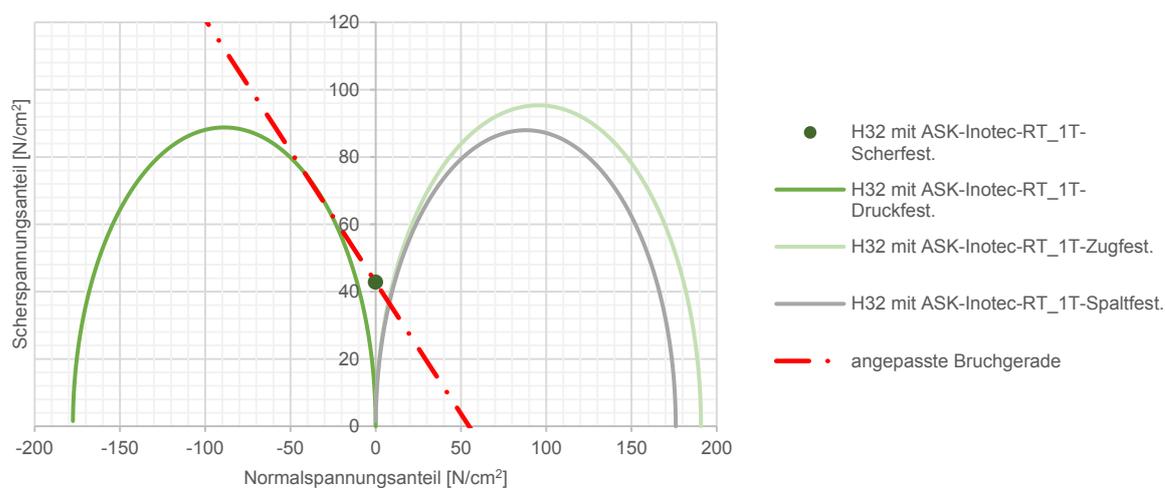


Abb. 4-31: Spannungskreis für H32 mit Wasserglas ASK-Inotec bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.

4.5 Einfluss von anorganischem Bindemittel Wasserglas Modul 3,2 auf unterschiedliche Formgrundstoffe

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Festigkeitsanalysen, der Einfluss der Mikrowellentrocknung sowie des Bindemittels Betol 39T auf verschiedene Formsande näher behandelt.

4.5.1 Auslagerungsversuche

Das Auslagerungsverhalten von Betol-Wasserglas gebundenem Quarzsand ist in Abb. 4-32 ersichtlich. In der Auswertung wurde der zeitliche Festigkeitsanstieg nach der Probenherstellung angeführt, wobei zwei unterschiedliche Herstellmethoden angeführt sind. Diese unterscheiden sich lediglich in der angewendeten Formstoff Füllmenge für die Probenherstellung. Diese beträgt bei der angepassten Methode ca. 2 kg und bei der regulären 5 kg. Allgemein ist ein sofortiger Festigkeitsanstieg nach der Mikrowellentrocknung ersichtlich. Nach 20 Minuten stellt sich bei beiden Herstellmethoden ein gleichbleibendes Festigkeitsniveau ein, wobei höhere Festigkeiten durch die angepasste Methode erreicht werden. Ein unproblematisches Handling der Proben ist so nach relativ kurzer Zeit möglich.

Bei der angepassten Herstellmethode (rote) ist zudem eine Festigkeitsabnahme, zwischen 20 Minuten und 4 Stunden zu beobachten, dies kann auf statistische Abweichungen zurückgeführt werden.

Nach einer Lagerung bei konstanten Bedingungen sinkt die Biegefestigkeit nach einem Monat um 50 %.

Um den Einfluss der Mikrowellentrocknung näher zu untersuchen wurden in Abb. 4-33 getrocknete und nicht getrocknete Proben gegenübergestellt. Obwohl in beiden Fällen die Herstellung nach der regulären Methode erfolgte, ist ein deutlicher Festigkeitsunterschied zu beobachten. Ein gleichbleibendes Festigkeitsniveau wird bei nicht getrockneten Proben nach 10 Minuten erreicht, verglichen zu 20 Minuten bei getrockneten Proben. Weiteres sind höhere Festigkeitswerte bei nicht getrockneten Proben zu beobachten, so wird der Maximalwert der getrockneten Proben nach 5 Minuten erreicht.

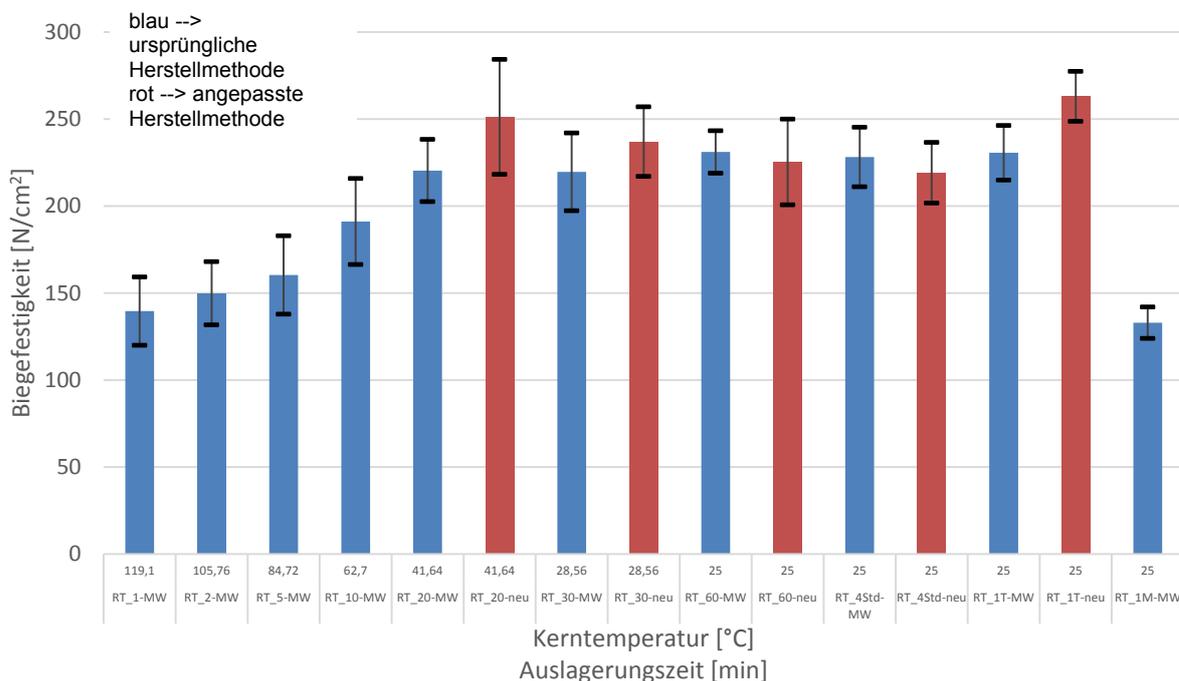


Abb. 4-32: Ermittelte Biegefest. bei RT für H32 mit 2% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen für zwei unter. Herstellmethoden.

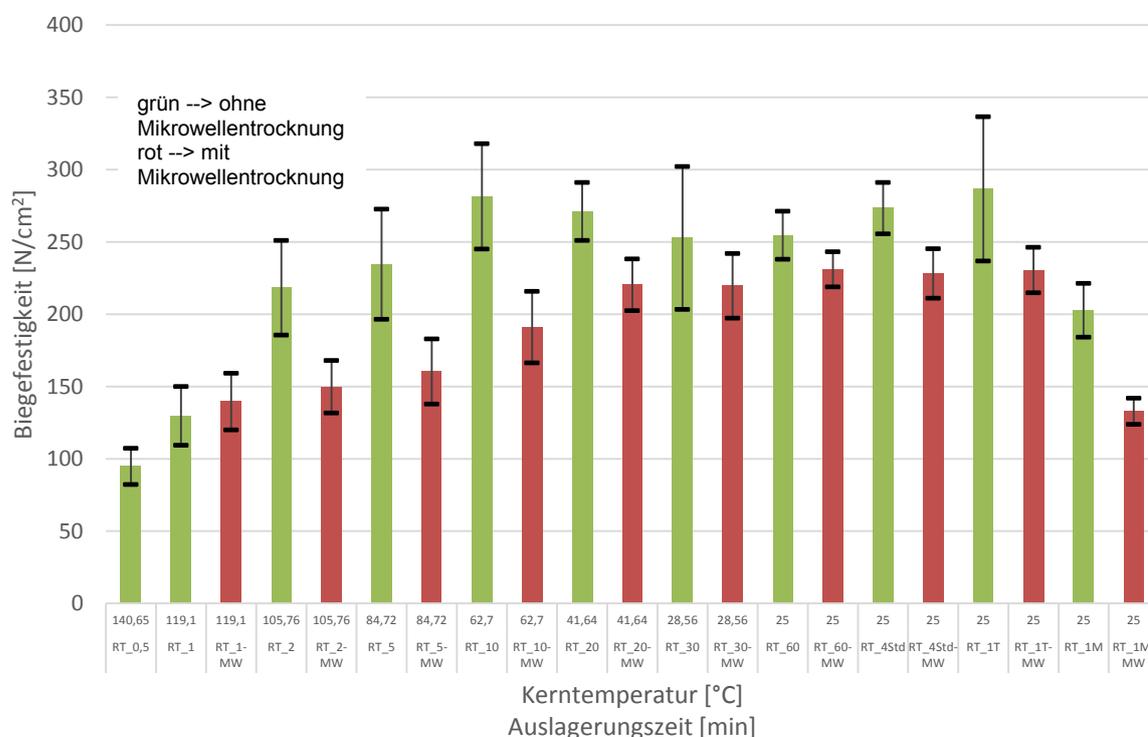


Abb. 4-33: Trocknungsvergleich mit und ohne Mikrowelle für ermittelte Biegefest. bei RT für H32 mit 2% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen.



In Abb. 4-34 sind die Biegefestigkeiten für 2,5 %ige Betol-Wasserglas Quarzproben ersichtlich, wobei eine erneute Gegenüberstellung zwischen zwei unterschiedlichen Herstellmethoden dargestellt ist. Ein gleichbleibendes Festigkeitsniveau wird nach 10 Minuten erreicht, wobei die gemessenen Biegefestigkeiten Schwankungen aufweisen. Auf Grund der geringen Probenzahl, für die angepasste Herstellmethode, kann ein Trend nur bedingt interpretiert werden. Es ist jedoch eine Festigkeitszunahme erkennbar und nach einem Tag eine höhere Biegefestigkeit im Vergleich zur ursprünglichen Herstellmethode.

Eine Auswertung des Trocknungsverhaltens wurde ebenfalls durchgeführt, siehe Abb. 4-35. Hierfür wurden erneut Proben nach der ursprünglichen Herstellmethode geschossen und gegeneinander verglichen. Nicht getrocknete Proben weisen einen schnelleren Festigkeitsanstieg zu Beginn auf, wobei die Festigkeit nach 30 Minuten ein maximales Niveau erreicht. Vergleichsweise liegen die ermittelten Festigkeiten bei beiden Methoden auf Grund von statistischen Abweichungen auf dem gleichen Niveau. Es liegt lediglich eine niedrigere Festigkeit bei getrockneten Proben nach einem Tag vor.

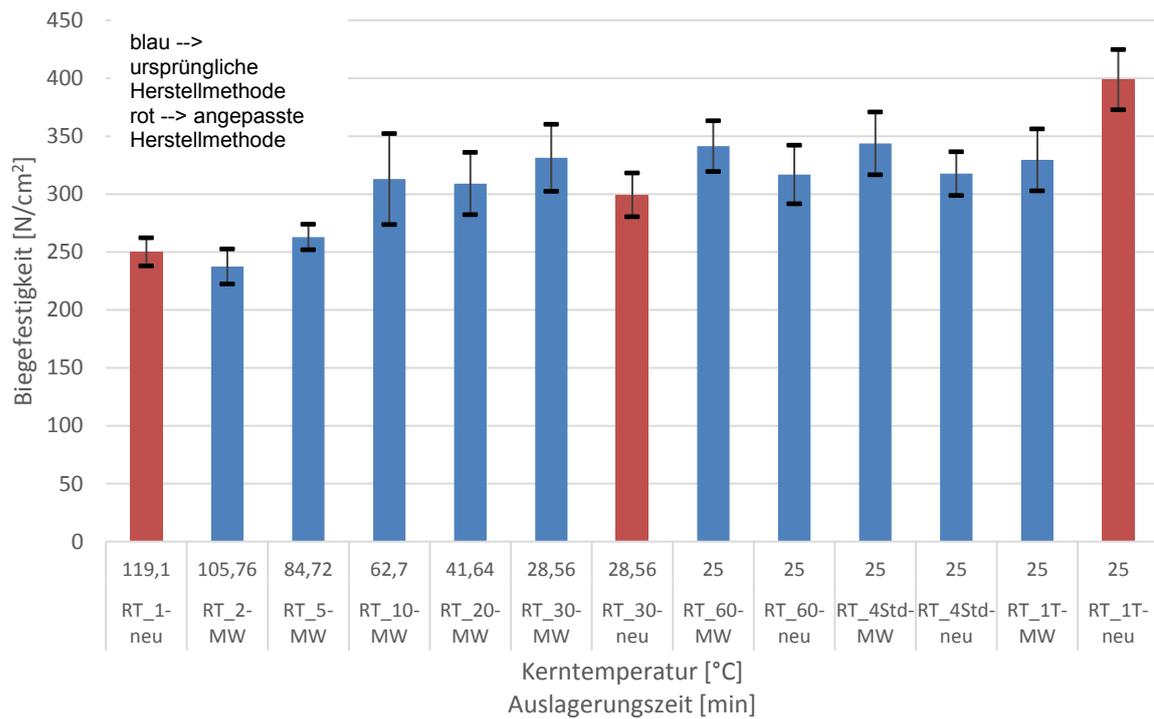


Abb. 4-34: Ermittelte Biegefest. bei RT für H32 mit 2,5% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen für zwei unter. Herstellmethoden.

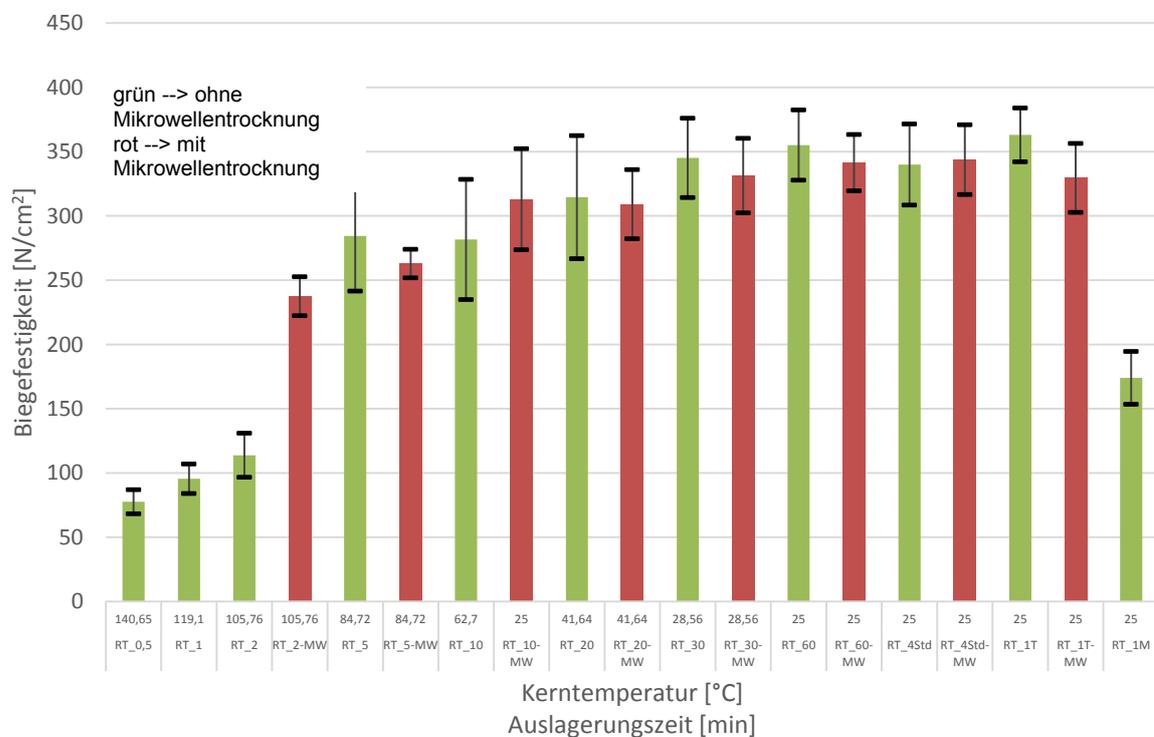


Abb. 4-35: Trocknungsvergleich mit und ohne Mikrowelle für ermittelte Biegefest. bei RT für H32 mit 2,5% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen.

Das Aushärteverhalten für Cerabeadsproben ist in Abb. 4-36 ersichtlich. Nach einer Mikrowellentrocknung ist eine Festigkeitszunahme zu erkennen, wobei das Maximum von 250 N/cm^2 nach einem Tag erreicht wird. Nach zwei Wochen Auslagerung unter konstanten Bedingungen ist eine beginnende Festigkeitsabnahme zu verzeichnen. Entsprechend der Biegefestigkeit wäre ein Handling der Proben nach 10 Minuten unproblematisch.

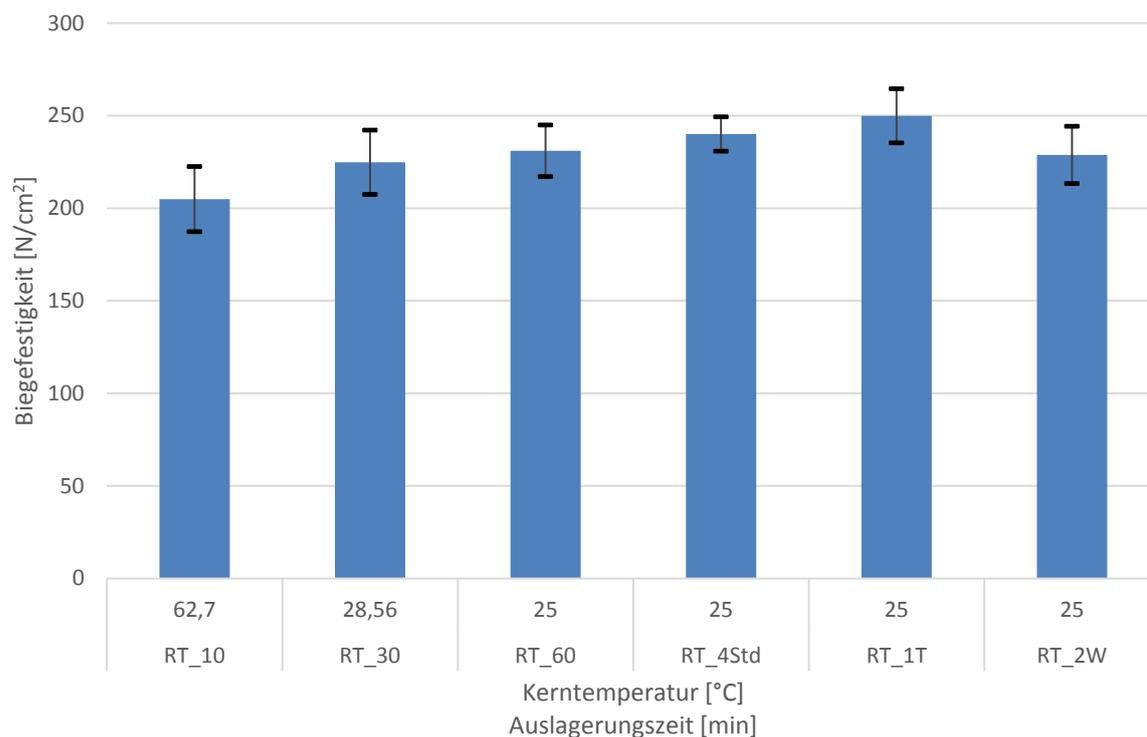


Abb. 4-36: Ermittelte Biegefestigkeiten bei RT für Cerabeads mit 2,5% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen.

Das Aushärteverhalten für Kerphalit Proben ist in Abb. 4-36 dargestellt. Nach 10 Minuten wäre ein unproblematisches Handling, entsprechend der Biegefestigkeit, möglich. Ein konstantes Festigkeitsniveau wird nach 30 Minuten erreicht. Eine vergleichsweise höhere Biegefestigkeit ist auf Grund von statistischen Schwankungen nach 4 Stunden feststellbar.

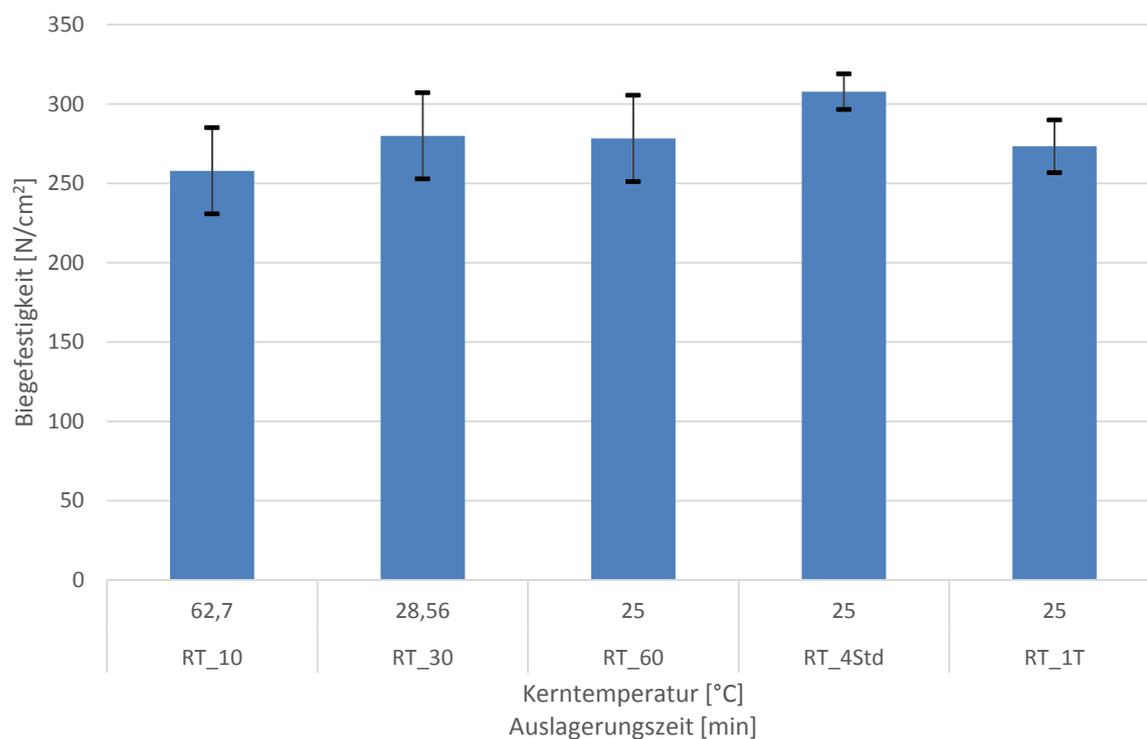


Abb. 4-37: Ermittelte Biegefestigkeiten bei RT für Kerphalit mit 3% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen.

4.5.2 Bruchwahrscheinlichkeit für Biegefestigkeit bei Raumtemperatur

Die Auflistung der Bruchwahrscheinlichkeit für Betol-Wasserglas gebundene Proben ist in Abb. 4-38 angeführt. Eine minimale Probenzahl von 10 wurde mittels Weibull-Analyse in ein entsprechendes Weibullnetz übergeführt. Anhand der ermittelten Verteilungen lassen sich mögliche Ausfallwahrscheinlichkeiten für spezifische Biegebelastungen der Prüfkörper ermitteln. So zeigt sich beispielsweise bei Cerabeads Betol-Wasserglas Proben bei einer Belastung von 270 N/cm^2 eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 90 %. Die ermittelte Streubreite der Bruchgerade weist einen relativ konstanten Wert auf und spiegelt eine gute Reproduzierbarkeit wieder, siehe Tab. 4-11.

Tab. 4-11: Ermittelte Steigung der Weibull-Regressionsgeraden für Betol-Wasserglas bei unterschiedlichen Formgrundstoffen.

Sand	Binder	Streubreite m
H32	WGM3_2	45,63
	WGM3_2,5	45,40
Cerabeads	WGM3_2,5	41,50
Kerphalit	WGM3_3	51,35

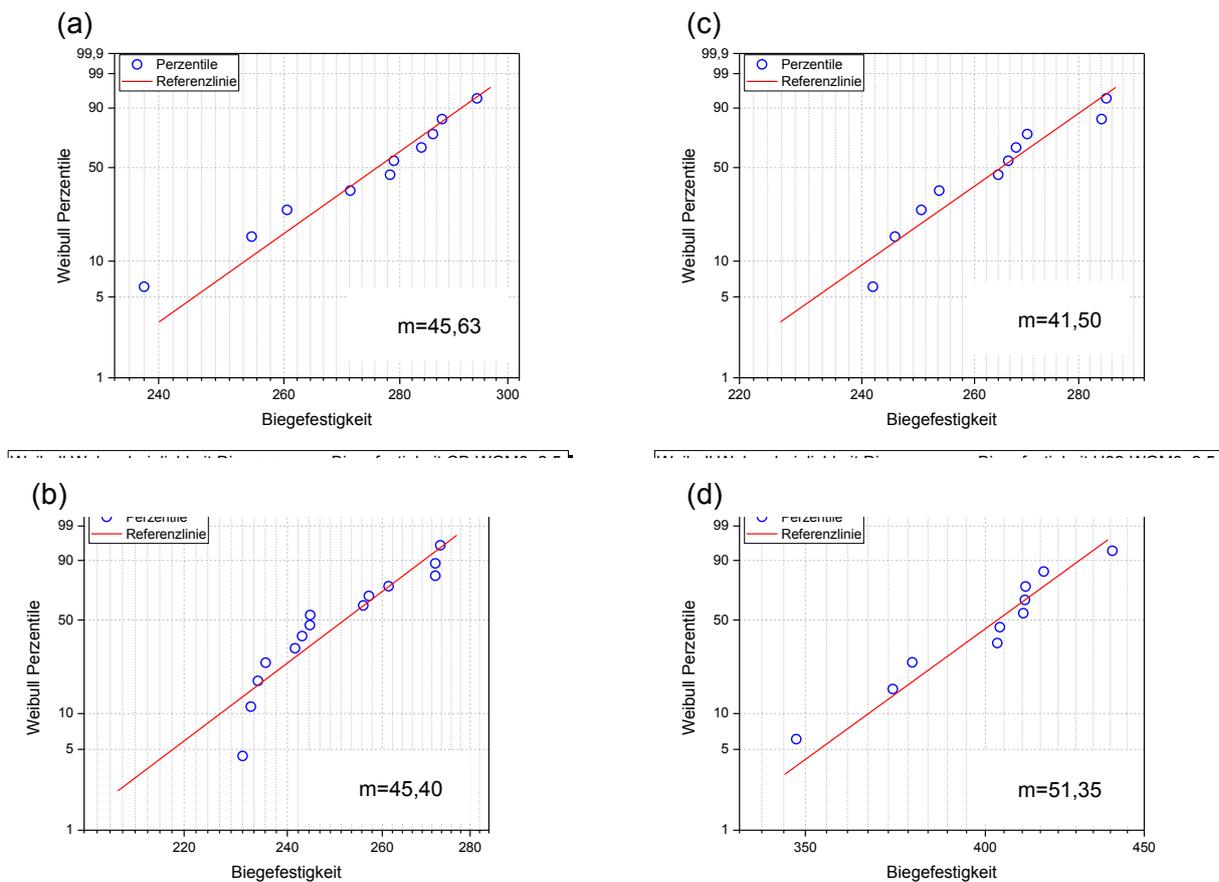


Abb. 4-38: Bruchwahrscheinlichkeit der Biegefestigkeit für (a) Kerphalit WGM3_3, (b) Cerabeads WGM3_2,5, (c) H32 Quarzsand WGM3_2 und (d) H32 Quarzsand WGM3_2,5.

4.5.3 Festigkeiten nach WBH

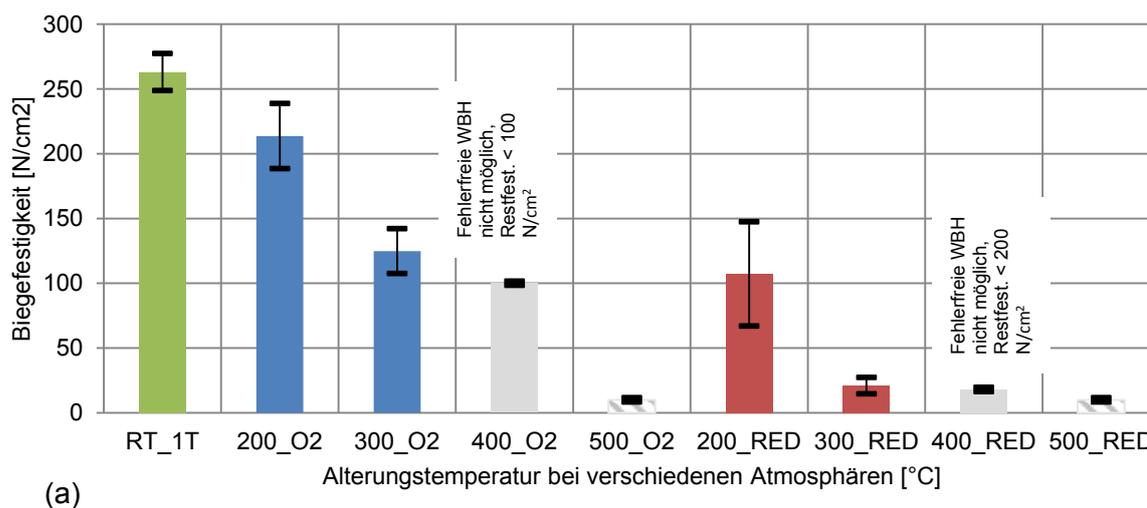
H32 Quarzsand mit 2% Betol-Wasserglas Mischung

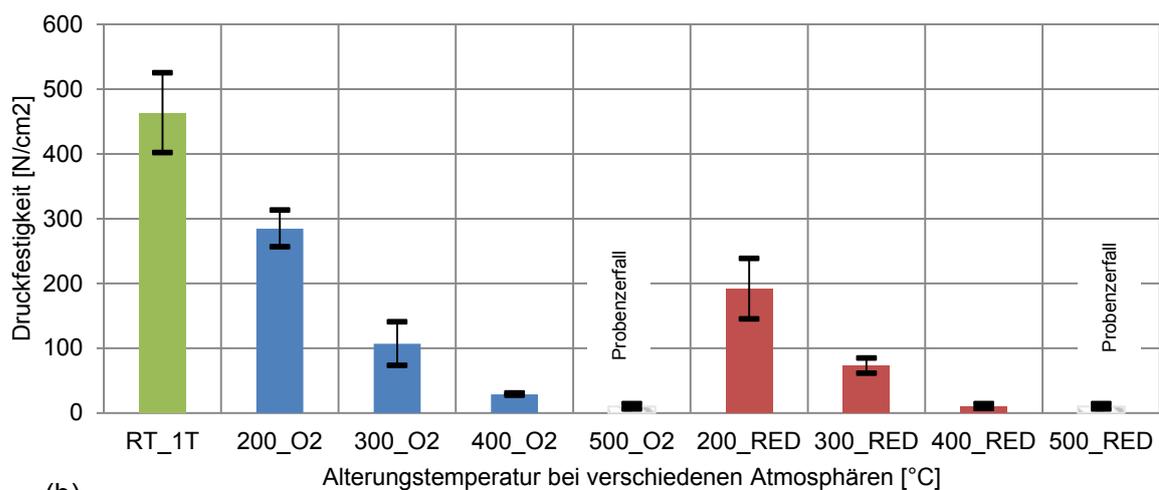
Eine Auflistung der Festigkeiten für jene Quarzsandproben mit 2 % Betol-Wasserglas sind in Abb. 4-39 angeführt. Allgemein ist eine Festigkeitsabnahme mit fortschreitender Temperatur zu beobachten, wobei die Referenzfestigkeit nicht überschritten wird.

Bei 200°C ist bei allen Messmethoden, sowohl bei reduzierenden als auch oxidierenden Bedingungen, eine Festigkeitsabnahme ersichtlich, wobei der Grad an Festigkeitsabnahme je nach Prüfmethode variiert.

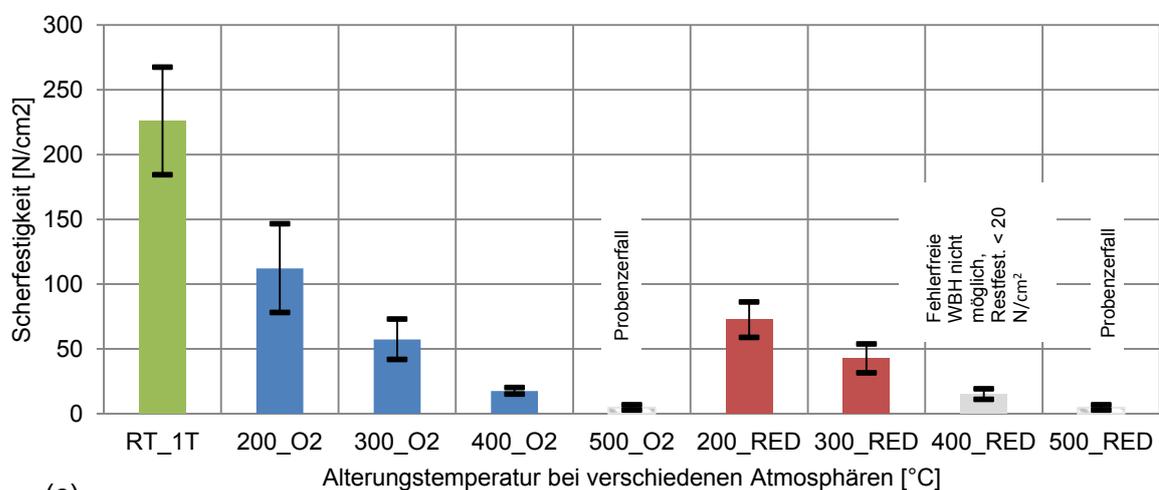
Eine idente Tendenz ist bei 300°C zu beobachten. Die gemessene Biegefestigkeit liegt in etwa bei einem 90 % geringeren Wert in reduzierender Atmosphäre als in oxidierender. Bei Druck- und Scherfestigkeitsmessungen liegen die Werte bei beiden Bedingungen auf einem ähnlich hohen Niveau. Bei reduzierenden Bedingungen liegt der ermittelte Spaltfestigkeitswert auf einem gleichen Festigkeitsniveau wie bei 200°C und somit höher als bei oxidierender Atmosphäre.

Das Handling der Proben ist ab 400°C erschwert, da sich ein merklicher Probenzerfall auf die Außenform der Probekörper auswirkt und somit die Prüfung erschwert. Ein vollkommener Probenzerfall setzt ab 500°C ein.

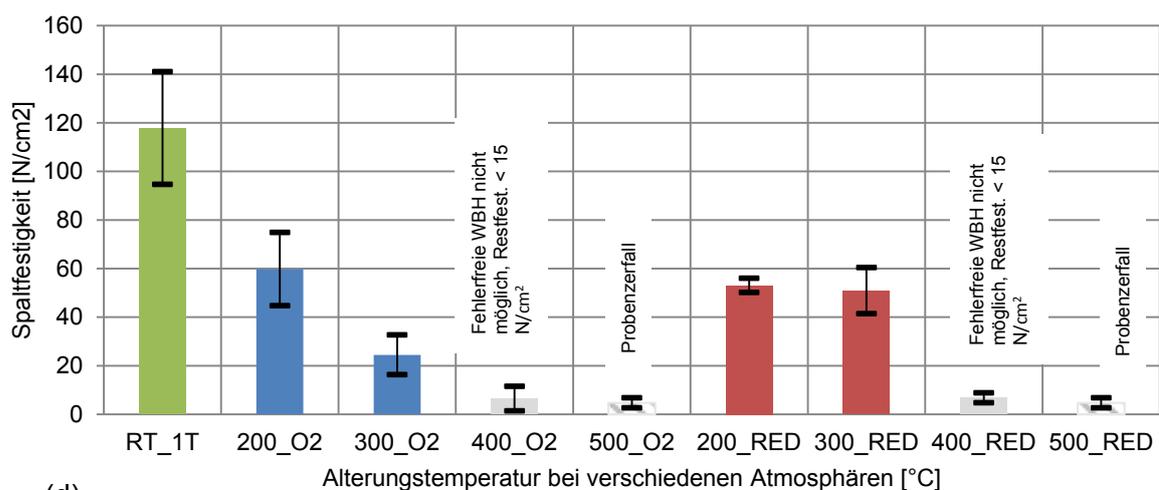




(b)



(c)



(d)

Abb. 4-39: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit 2% Betol-Wasserglas.

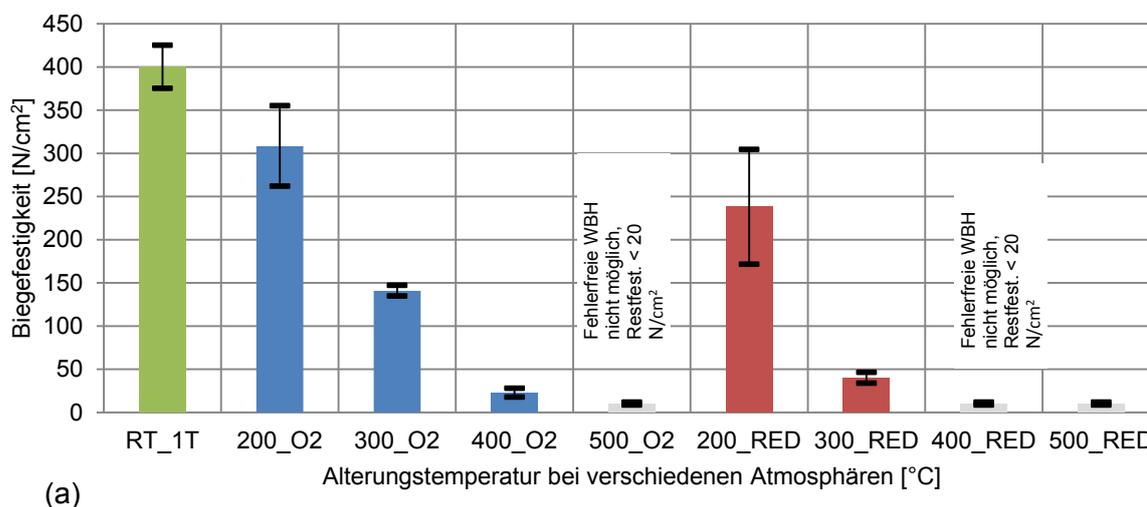
H32 Quarzsand mit 2,5% Betol-Wasserglas Mischung

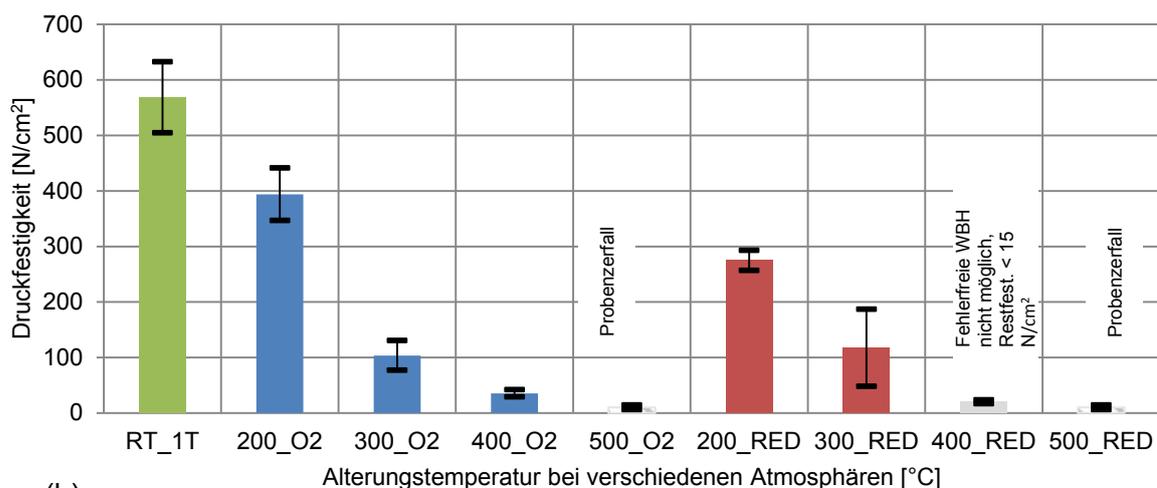
Das Festigkeitsverhalten von 2,5 %igem Betol-Wasserglas Quarzsandproben, siehe Abb. 4-40, weist eine ähnliche Festigkeitstendenz wie jene bei 2 % Betol-Wasserglas Proben. Über das gesamte Temperaturprofil ist eine Festigkeitsabnahme zu beobachten.

Bei 200°C ist die gemessene Biegefestigkeit in oxidierender Atmosphäre wesentlich höher als in reduzierender, wobei die reduzierenden Biegefestigkeiten eine höhere Streuung aufweisen. Das idente Festigkeitsverhalten ist auch bei Druck-, Scher- und Spaltfestigkeit zu beobachten, jedoch mit geringerer Streuung.

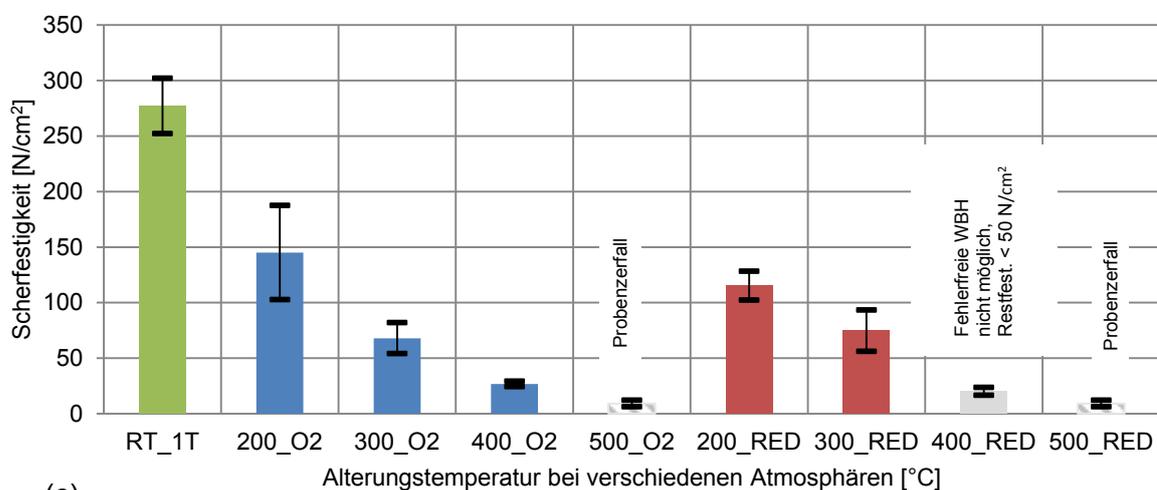
Ab 300°C ist eine signifikante Festigkeitsabnahme erkennbar. Beispielsweise ist die gemessene Biegefestigkeit bei reduzierenden Bedingungen bei 300°C 85 % geringer als jene bei 200°C, wobei diese bei oxidierenden Bedingungen vergleichsweise höher ist. Die Druck- und Scherfestigkeitswerte liegen in etwa auf demselben Niveau für beide atmosphärischen Bedingungen. Die gemessene Spaltfestigkeit unter reduzierender Atmosphäre ist vergleichsweise höher als unter oxidierenden Bedingungen, weist jedoch eine höhere Standardabweichung auf.

Ab 400°C setzt ein merklicher Probenzerfall ein der die Prüfung erschwert. Ab dem nächst höheren Temperaturniveau setzt ein totaler Probenzerfall ein.

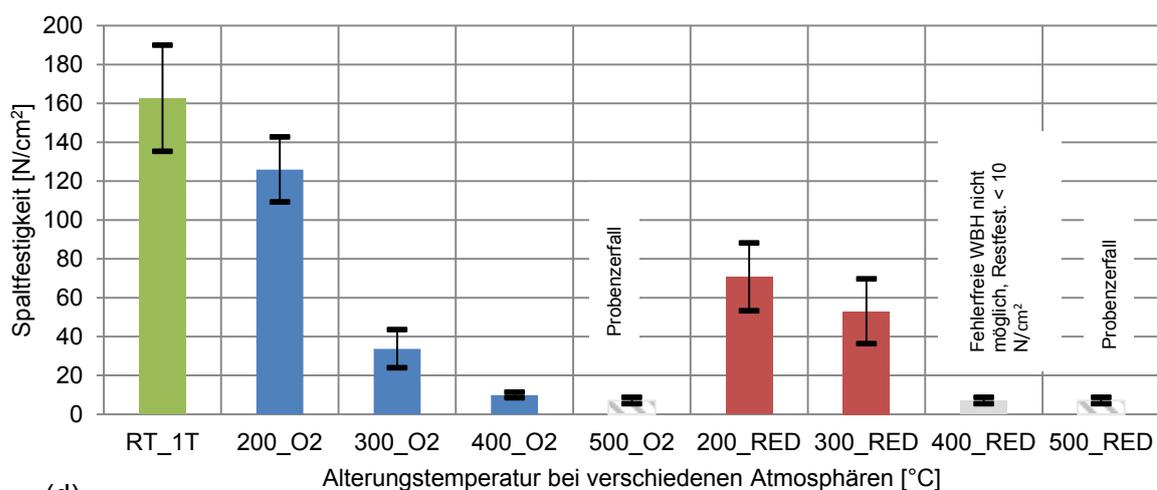




(b)



(c)



(d)

Abb. 4-40: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit 2,5% Betol Wassergls.

Cerabeads mit 2,5% Betol-Wasserglas Mischung

Das Festigkeitsverhalten von Cerabeads-Proben ist in Abb. 4-41 zusammengefasst.

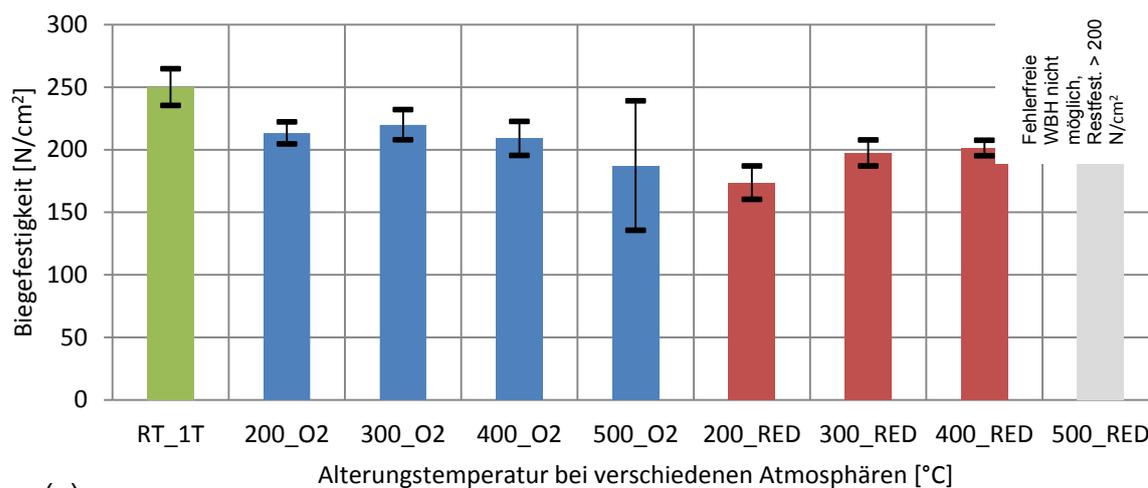
Cerabeads Proben weisen bei der Biegefestigkeit eine fast gleichbleibende Tendenz über ein Festigkeitsniveau. Die ausgelagerten Festigkeiten liegen unter der Referenzfestigkeit. Bei oxidierenden Bedingungen, ist bei einem Temperaturbereich von 200°C bis 400°C eine gleichbleibende Festigkeit ersichtlich. Erst ab 500°C ist ein merklicher Abfall in der Biegefestigkeit feststellbar, jedoch mit einer erhöhten Standardabweichung. Bei reduzierenden Bedingungen liegt bei 200°C eine vergleichsweise geringere Biegefestigkeit vor. Diese steigt bei weiterer Auslagerung auf das gleiche Niveau wie bei oxidierenden Bedingungen.

Die Druckfestigkeit der Cerabeads-Proben nimmt bei steigender Prüftemperatur und oxidierenden Bedingungen kontinuierlich ab. Bei reduzierenden Bedingungen und 200°C liegt vergleichsweise eine niedrigere Druckfestigkeit vor. Diese stellt sich bei höheren Temperaturen auf ein gleichbleibendes Niveau, welches auch bei 500°C und oxidierenden Bedingungen erfasst wurde.

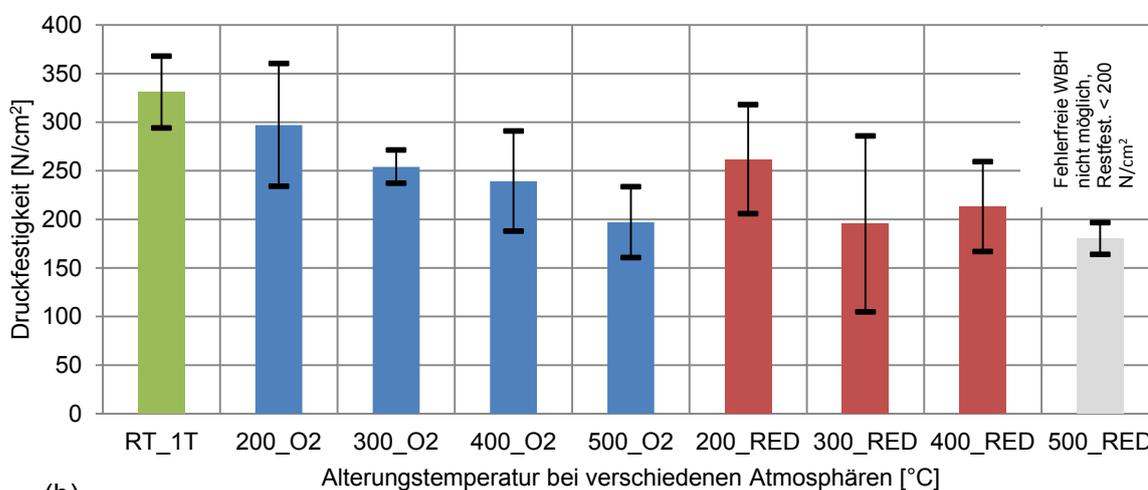
Eine ähnliche Tendenz ist auch bei der Scherprüfung feststellbar. Bei oxidierenden Bedingungen sind zwei Festigkeitsplateaus feststellbar. Zwischen 200°C und 300°C und anschließend ein niedrigeres bei 400°C und 500°C. Bei reduzierenden Bedingungen stellt sich hingegen ein gleichbleibendes Festigkeitsniveau ein, welches über jenem bei 400°C und oxidierenden Bedingungen liegt.

Bei 200°C und 300°C und oxidierenden Bedingungen liegt die gemessene Spaltfestigkeit auf einem gleichbleibenden Niveau, welches die Referenzfestigkeit überschreitet. Erst mit höherer Temperatur nimmt die Festigkeit wieder ab. Bei reduzierenden Bedingungen ist ein Festigkeitsabfall bei 200°C feststellbar, wobei diese erneut ansteigt und auf jenes Niveau von 200°C fällt.

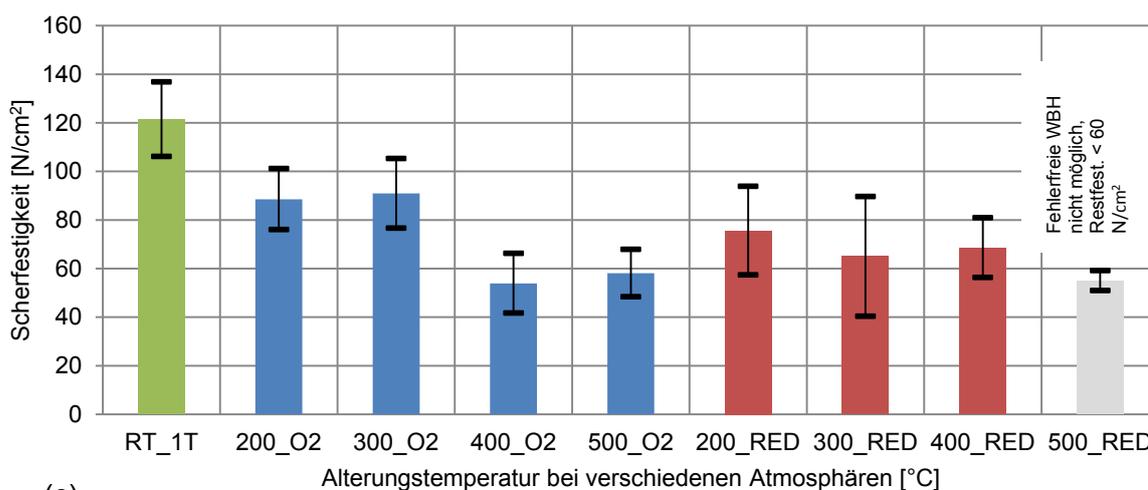
Eine Prüfung von bei 500°C und reduzierenden Bedingungen war auf Grund einer Handlingsproblematik nicht möglich.



(a)



(b)



(c)

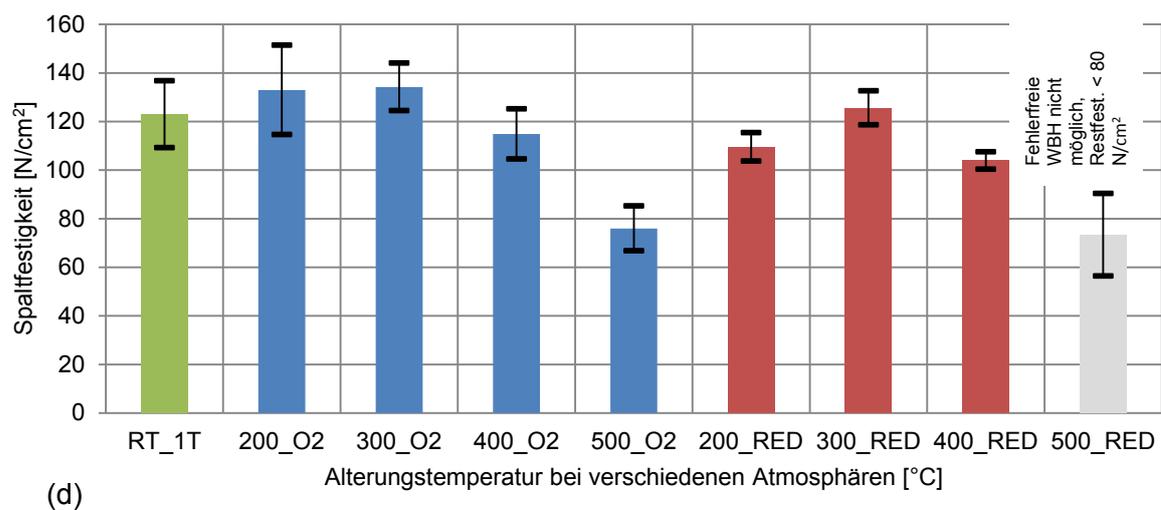


Abb. 4-41: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für Cerabeads mit 2,5% Betol-Wasserglas.

Kerphalit mit 3% Betol-Wasserglas Mischung

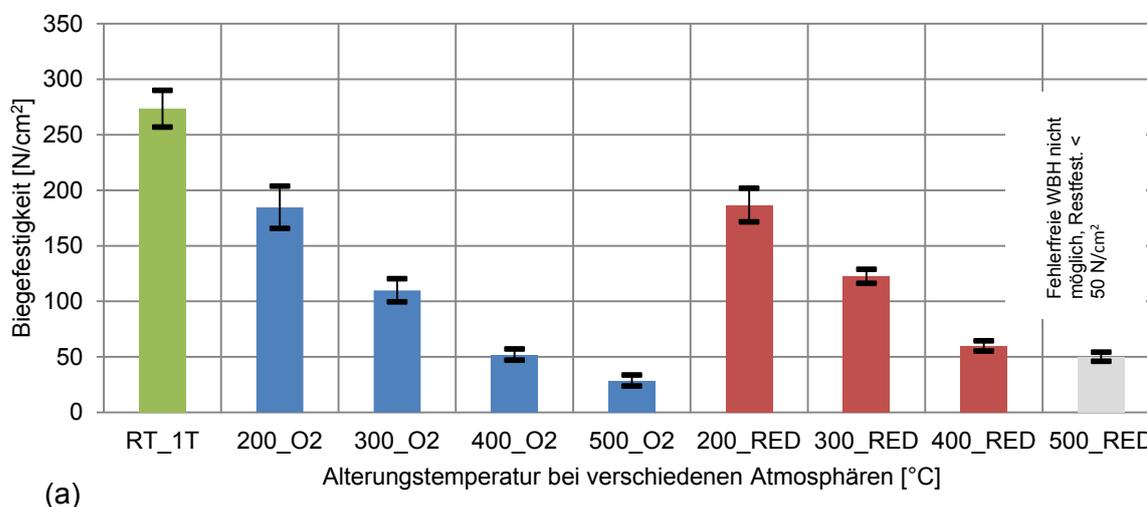
Eine Auflistung aller Festigkeitsversuche für Andalusit-Proben ist in Abb. 4-42 ersichtlich.

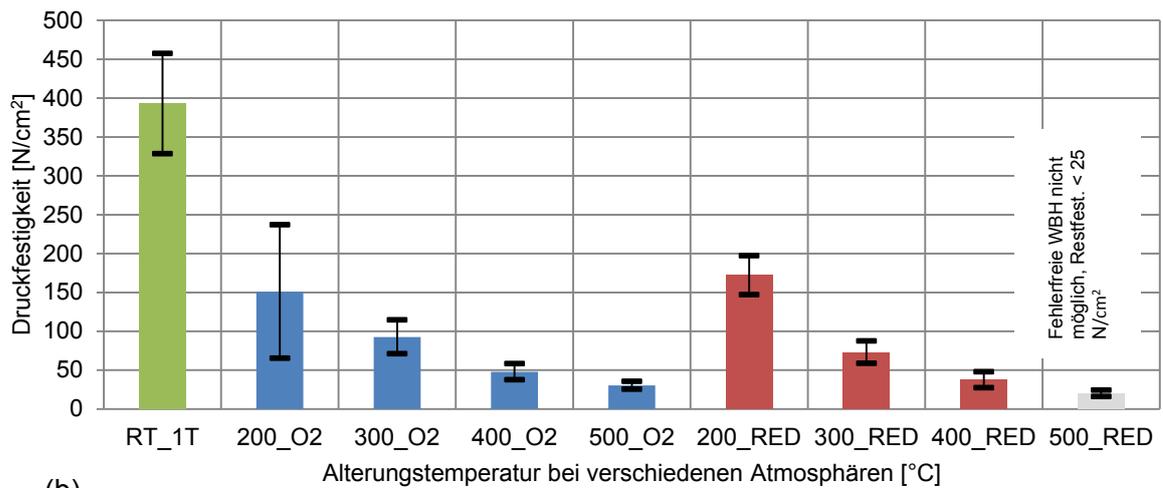
Anhand der Biegefestigkeit ist ein kontinuierlicher Festigkeitsabfall bei beiden Bedingungen feststellbar. Die gemessenen Festigkeiten befinden sich auf demselben Niveau und zeigen eine gleichbleibende Tendenz. Die gemessenen Unterschiede bei 300°C können auf statistische Abweichungen rückgeschlossen werden.

Der gleiche Trend ist ebenfalls bei der Druck- und Spaltfestigkeit zu beobachten. Nach einem merklichen Festigkeitsabfall bei 200°C nimmt die Festigkeit anschließend kontinuierlich mit zunehmender Temperatur ab.

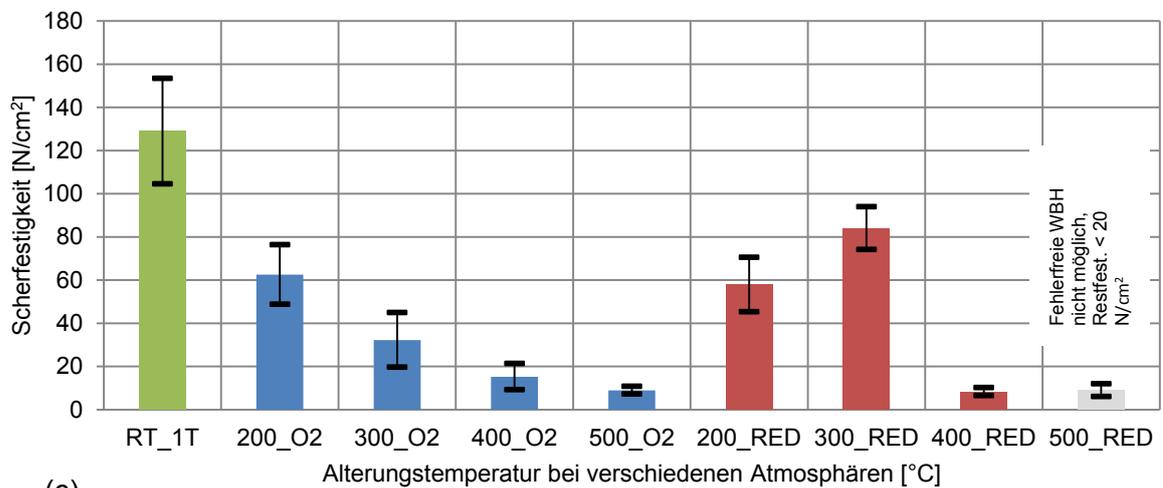
Bei oxidierenden Bedingungen weist die gemessene Scherfestigkeit einen identen Verlauf zur Druck- und Spaltfestigkeit. Bei reduzierenden Bedingungen ist jedoch ab 300°C ein erneuter Festigkeitsanstieg zu beobachten, gefolgt von einer erneuten Festigkeitsabnahme.

Ein vollständiger Probenzerfall bei 500°C liegt bei beiden Bedingungen nicht vor, es konnten lediglich erste Anzeichen vom Probenzerfall beobachtet werden. Diese spiegeln sich durch ein abweichen der Form und eine ablösende Randschale.

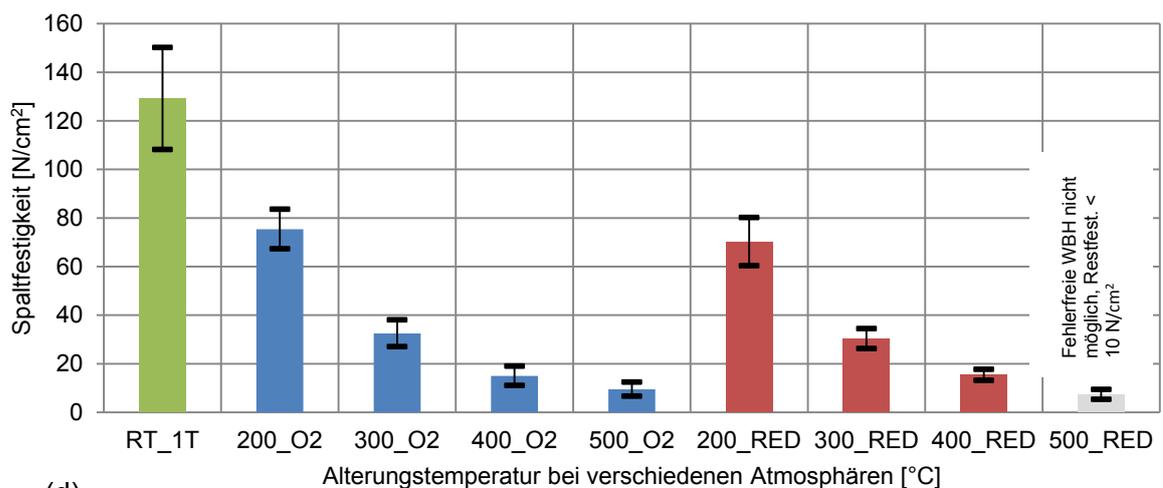




(b)



(c)



(d)

Abb. 4-42: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für Kerphalit mit 3% Betol-Wasserglas.

4.5.4 Mohr'scher Spannungskreis

In Abb. 4-43 ist der Mohr'sche Spannungskreis sowie die Bruchgeraden für verschiedene thermische Auslagerungen für H32 Quarzsand mit 2 % Betol-Wasserglas angeführt. Eine Konstruktion der Bruchgerade ist möglich, wobei diese mit zunehmender thermischer Auslagerung gleichmäßig abnehmen. Die erfassten Spannungskreise für die Spaltfestigkeit liegen über der konstruierten Bruchgerade.

Die entsprechenden Bruchgeradenparameter sind in Tab. 4-12 angeführt. Eine gleichmäßige Abnahme der Kohäsion ist mit steigender Temperatur feststellbar, wobei die Kohäsion bei reduzierenden Bedingungen vergleichsweise niedriger ausfällt als bei oxidierenden. Das Maximum wiederum kann bei der Referenz festgestellt werden. Der Reibwinkel liegt zwischen 29° und 49°, wobei eine Korrelation zwischen den 200°C bzw. 300°C Proben untereinander feststellbar ist.

Tab. 4-12: Bruchgeradenparameter für H32-WGM3_2.

Probenart	Kohäsion τ_c [N/cm ²]	Reibwinkel ϕ [°]
H32-WGM3_2-RT_1T	112,91	38
H32-WGM3_2-200_O2	56,07	47
H32-WGM3_2-300_O2	28,63	33
H32-WGM3_2-400_O2	8,77	29
H32-WGM3_2-200_RED	36,21	49
H32-WGM3_2-300_RED	21,24	29

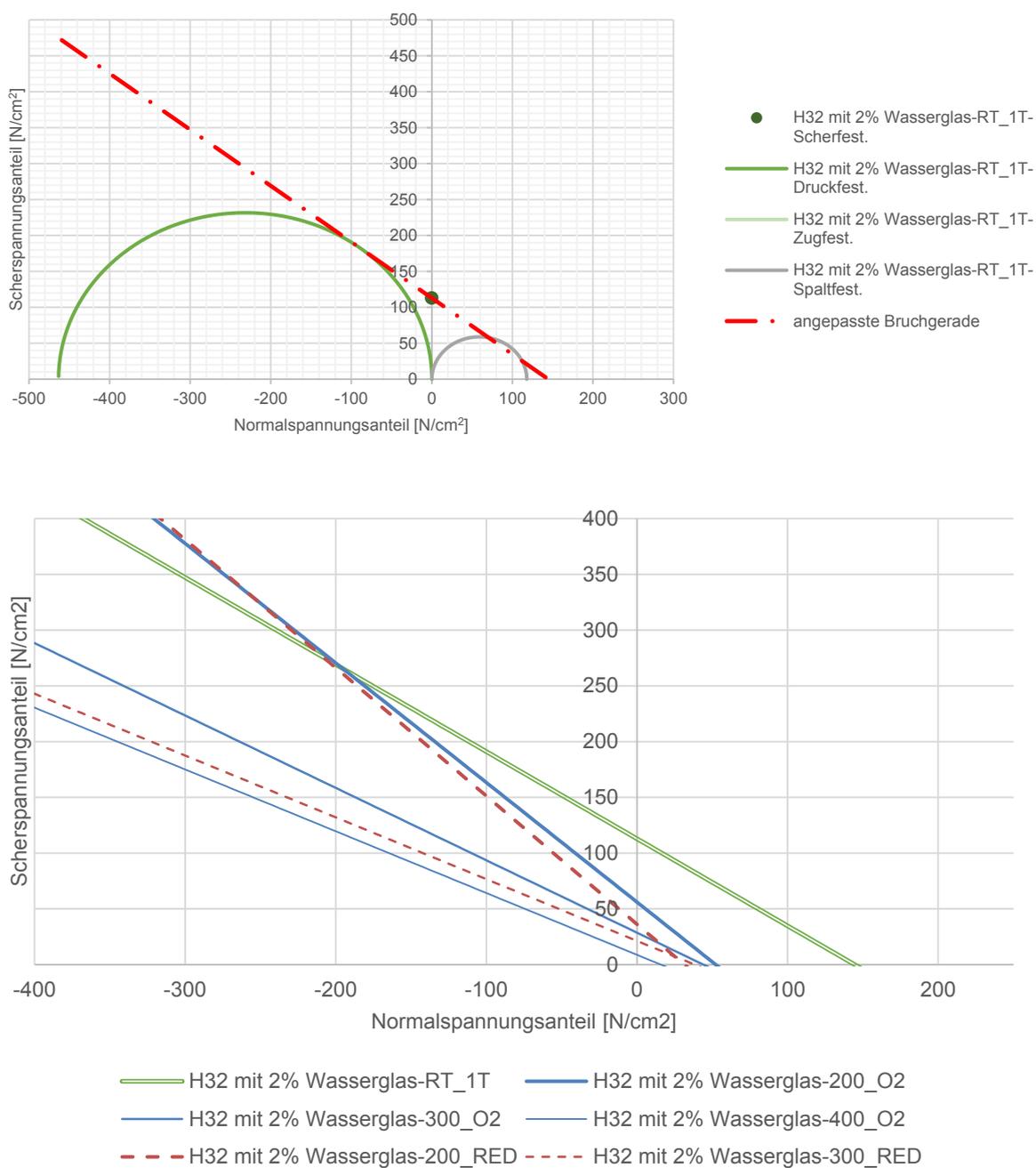


Abb. 4-43: Spannungskreis für H32 mit 2% Betol-Wasserglas bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.

In Abb. 4-44 ist die Bruchgeradenübersicht und der Referenz-Spannungskreis für 2,5 %ige Wasserglas gebundene Quarzproben dargestellt. Die gemessene Spaltfestigkeit bzw. Zugfestigkeit liegt über der Referenzbruchgerade bei Raumtemperatur sowie bei 200°C und oxidierenden Bedingungen. Mit höherer Auslagerungstemperatur fällt der Spaltfestigkeit-Spannungskreis unter die erfasste Bruchgerade. Bei reduzierenden Bedingungen liegen die erfassten Spaltfestigkeit-Spannungskreise im Bereich mit der Referenzbruchgerade. In der Übersichtsdarstellung ist eine gleichmäßige Abnahme der jeweiligen Bruchgeraden ersichtlich.

In Tab. 4-13 sind Bruchgeradenparameter für die H32 Quarzsand mit 2,5 % Betol-Wasserglas Proben angeführt. Ähnlich zu den 2%-igen Wasserglasproben kann eine Korrelation bei den 200°C bzw. 300°C Proben hinsichtlich des Reibwinkels festgestellt werden. Die Kohäsion bei den 200°C Proben ist bei oxidierenden Bedingungen vergleichsweise höher als bei reduzierenden. Bei 300°C ist die Kohäsion auf einem annähernd gleichmäßigem Niveau. Der höchste Wert kann bei der Referenzprobe festgestellt werden.

Tab. 4-13: Bruchgeradenparameter für H32-WGM3_2,5.

Probenart	Kohäsion τ_c [N/cm²]	Reibwinkel φ [°]
H32 mit 2,5% Wasserglas-RT_1T	138,51	38
H32 mit 2,5% Wasserglas-200_O2	72,49	49
H32 mit 2,5% Wasserglas-300_O2	33,95	24
H32 mit 2,5% Wasserglas-400_O2	13,36	16
H32 mit 2,5% Wasserglas-200_RED	57,58	44
H32 mit 2,5% Wasserglas-300_RED	37,30	25

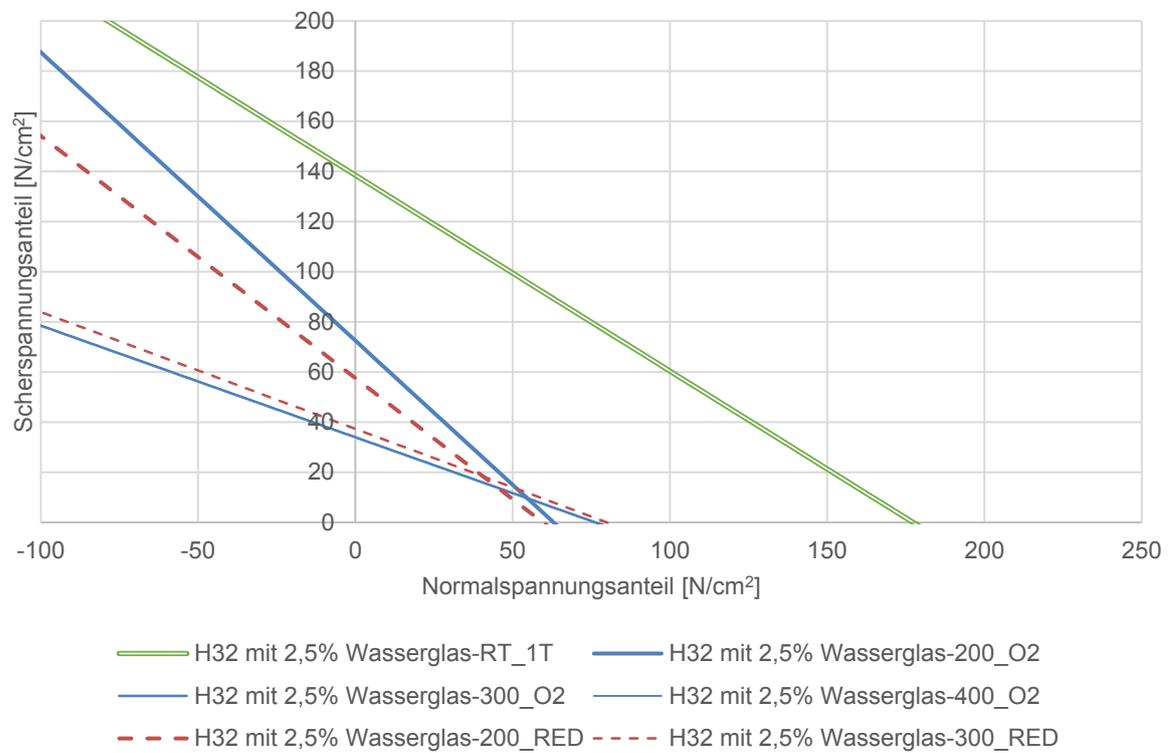
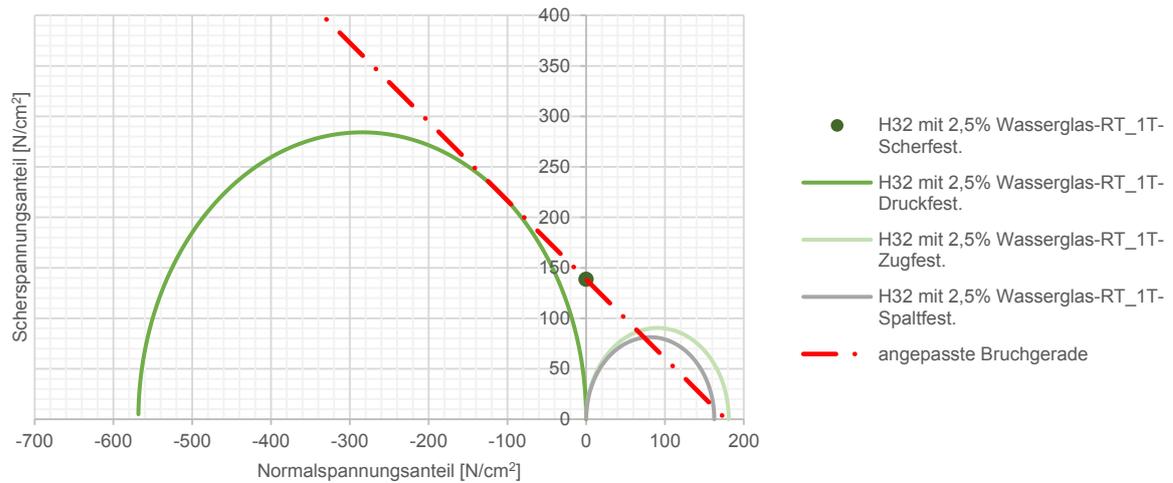


Abb. 4-44: Spannungskreis für H32 mit 2,5% Betol-Wasserglas bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.

In Abb. 4-45 ist die Bruchgeradenübersicht sowie der Referenzspannungskreis für die Cerabeads-Proben ersichtlich. In der Bruchgeradenübersicht liegen die erfassten Festigkeiten und somit deren Bruchgeraden unter der Referenz und weisen eine gleichmäßige Abnahme auf. Die ermittelten Spaltfestigkeiten liegen deutlich über den jeweils gebildeten Bruchgeraden.

Eine Übersicht der Bruchgeradenparameter ist in Tab. 4-14 angeführt. Die erfasste Kohäsion weist keine Korrelation zwischen den unterschiedlichen thermischen Auslagerungen untereinander auf, wobei die erfassten Winkel und Kohäsion gleichmäßig verteilt sind. Der erfasste Reibwinkel liegt zwischen 51° und 63°, wobei der niedrigste Reibwinkel als Ausreisen angesehen werden kann.

Tab. 4-14: Bruchgeradenparameter für CB-WGM3_2,5.

Probenart	Kohäsion τ_c [N/cm²]	Reibwinkel φ [°]
Cerb. mit 2,5% Wasserglas-RT_1T	61,0	50
Cerb. mit 2,5% Wasserglas-200_O2	59,0	56
Cerb. mit 2,5% Wasserglas-300_O2	41,0	51
Cerb. mit 2,5% Wasserglas-400_O2	42,0	63
Cerb. mit 2,5% Wasserglas-500_O2	54,0	58
Cerb. mit 2,5% Wasserglas-200_RED	43,0	58
Cerb. mit 2,5% Wasserglas-300_RED	79,0	53
Cerb. mit 2,5% Wasserglas-400_RED	47,0	53

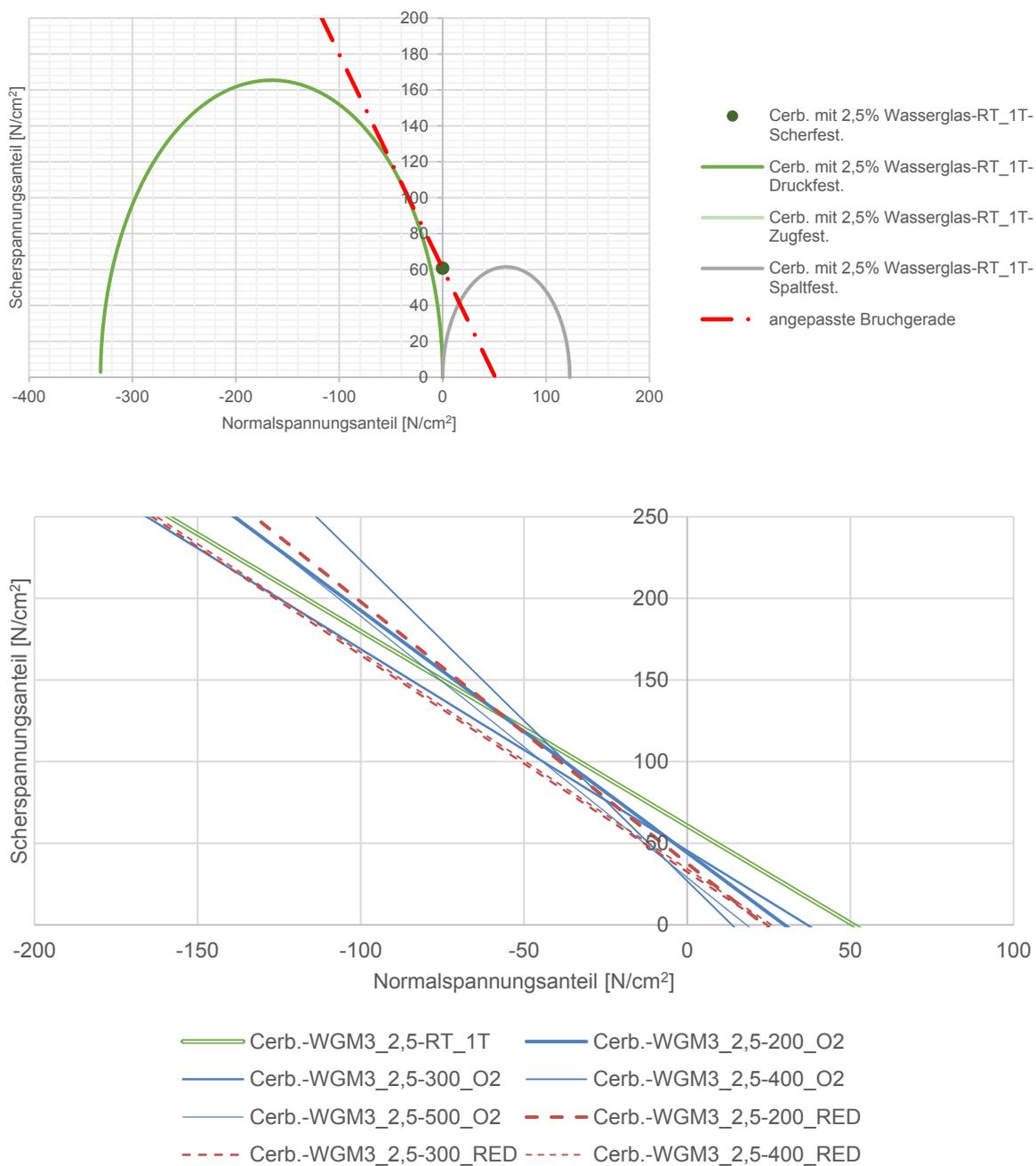


Abb. 4-45: Spannungskreis für Cerabeads mit 2,5% Betol-Wasserglas bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.

In Abb. 4-46 ist die Übersichtsdarstellung sowie der Referenz-Spannungskreis für die Kerphalit Proben ersichtlich. Wie in der Gesamtübersicht der Bruchgeraden ersichtlich, liegen die erfassten Bruchgeraden unter der Referenzbruchgerade und nehmen gleichmäßig mit steigender Temperatur ab. Die ermittelten Spannungskreise für die Spaltfestigkeit liegen für alle Bedingungen unter der jeweiligen Bruchgerade.

In Tab. 4-15 sind die Bruchparameter für die Kerphalit Proben angeführt. Die höchste Kohäsion liegt bei der Referenz vor wobei die Kohäsion mit steigender Temperatur gleichmäßig abnimmt, außer bei 300°C und reduzierenden Bedingungen. Eine Korrelation zwischen den einzelnen Messdaten untereinander liegt hinsichtlich der Kohäsion bzw. Reibwinkel vor. Die erfassten Parameter bei 300°C und reduzierenden Bedingungen könnten auf Grund der Kohäsion auf einen Messfehler hindeuten. Der Winkel liegt, mit Ausnahme von jenen Proben bei 200°C oxidierenden Bedingungen sowie 400°C reduzierenden Bedingungen bei etwa 22°.

Tab. 4-15: Bruchgeradenparameter für AN-WGM3_2,5.

Probenart	Kohäsion τ_c [N/cm²]	Reibwinkel φ [°]
AN mit 3% Wasserglas-RT_1T	128,93	24
AN mit 3% Wasserglas-200_O2	62,55	11
AN mit 3% Wasserglas-300_O2	32,25	21
AN mit 3% Wasserglas-400_O2	15,24	23
AN mit 3% Wasserglas-500_O2	8,95	26
AN mit 3% Wasserglas-200_RED	57,87	22
AN mit 3% Wasserglas-300_RED	84,02	22
AN mit 3% Wasserglas-400_RED	8,29	38

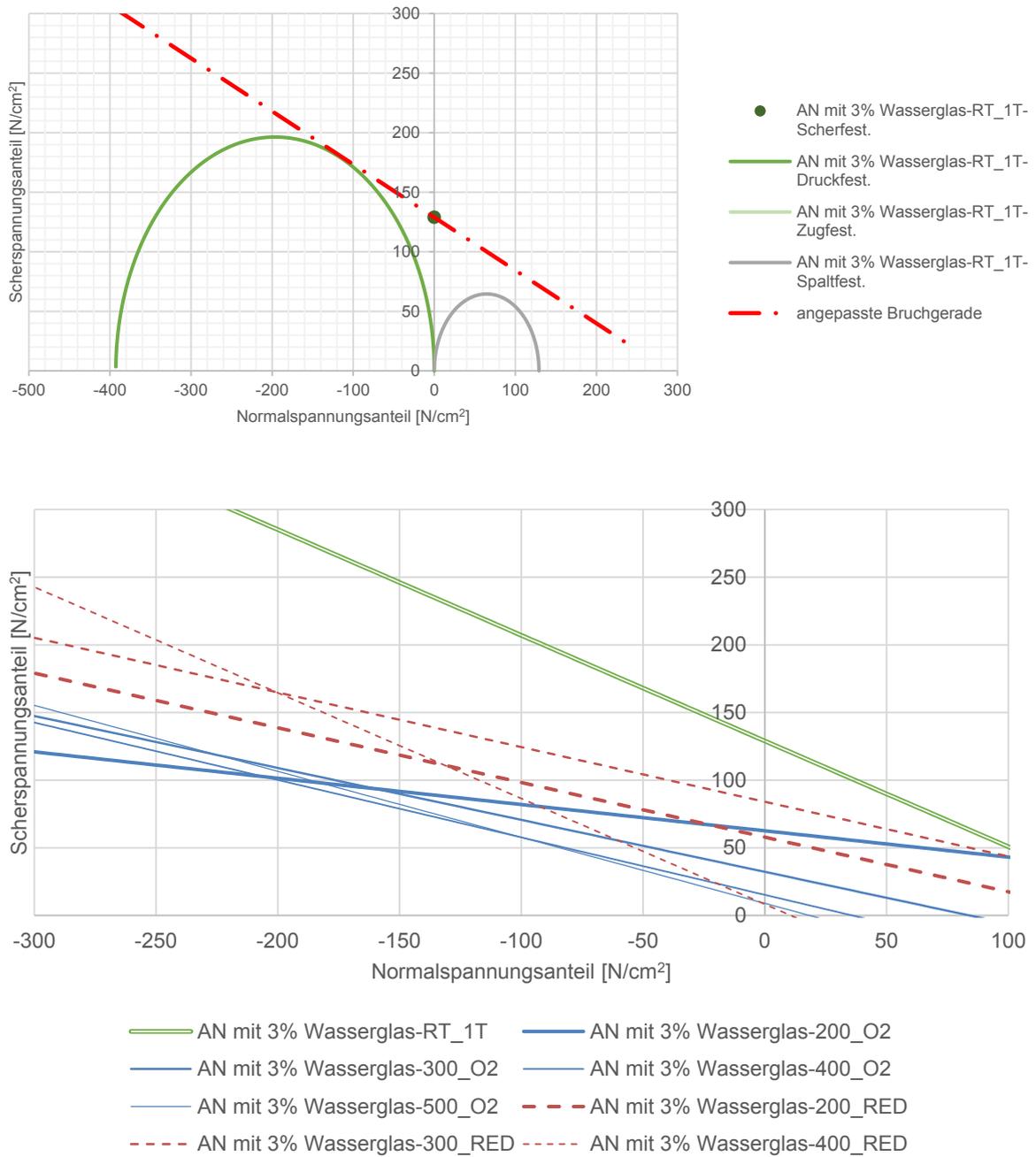


Abb. 4-46: Spannungskreis für Kerphalit mit 3% Betol-Wasserglas bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.

4.6 Abhängigkeit Spalt- zu Zugfestigkeit bei Raumtemperatur

Über unterschiedliche Auswertungsserien sollte das Korrelationsverhalten verschiedener Versuchstypen und Probenarten nachgewiesen werden und somit eine gesammelte Analyse der Messwerte im Spannungskreis.

In der ersten Analyse wurden mittels Weibull-Analyse Zugfestigkeit und Spaltfestigkeit verschiedener Probenarten gegenübergestellt, siehe Abb. 4-47, um somit eine mögliche Korrelation zwischen den beiden Messmethoden zu finden. Anhand von Coldbox und Warmbox 2 Proben ist eine vergleichbare Steigung der Bruchwahrscheinlichkeiten, bei unterschiedlichen Festigkeiten, ersichtlich. Eine Überschneidung bzw. Überlappung und somit eine Korrelation zwischen den Werteserien ist nicht erkennbar. Des Weiteren ist bei den untersuchten Warmbox 1 Proben, bei einer 90 %igen Bruchwahrscheinlichkeit, eine annähernde Überschneidung der Ergebnisse feststellbar. Die untersuchten ASK-Inotec Proben weisen eine Parallelität auf, zeigen jedoch auf Grund von statistischen Abweichungen keine Überlappung bzw. Überschneidung der Trendlinien. Eine direkte Überschneidung der Messwerte von H32-WGM3_2,5 Proben, bei einer 90 %igen Bruchwahrscheinlichkeit, lässt auf eine direkte Korrelation zwischen beiden Versuchstypen schließen. Die entsprechenden Streubreite für die Bruchwahrscheinlichkeit der einzelnen Prüfmethode ist in Tab. 4-16 angeführt, wobei die entsprechenden Auswertungen im Anhang D und E hinterlegt sind. Es sind stark von einander abweichende Streubreiten zwischen 7 und 84 feststellbar. Wobei diese Streuung von der Binderart (organisch oder anorganisch) und der durchgeführten Messmethode abhängt. Die zweite Korrelationsauswertung, ersichtlich in Abb. 4-48, erfolgte nach Malárics [68]. Da die Probenkörper unter ähnlichen Randbedingungen hergestellt und geprüft wurden war eine Gegenüberstellung der Messwerte in Verhältnisse, zwischen Zug- und Spaltfestigkeit, möglich. Hierfür wurde deren Verhältnis, mit A bezeichnet und der ermittelten Druckfestigkeit gegenübergestellt. Im mittleren Abschnitt ist eine Korrelation zwischen den gemessenen Coldbox- und Warmbox 2-Kernen ersichtlich, wobei deren Verhältnis A zwischen 1,5 und 2,5 liegt. Die restlichen Versuchsreihen liegen näherungsweise auf demselben Niveau von kleiner 1,5 und weisen eine deutliche Aufteilung in separierte Cluster auf, wodurch eine Korrelation dieser Versuchsserien untereinander auszuschließen ist. Das Verhältnis der ASK-Inotec Messwerte liegt auf Grund einer geringen Streuung um eins. Abhängig von der Binderart (organische und anorganische Binder) kann zwischen einem spröden und duktilen Bruch unterschieden werden. Eine Diskrepanz ist lediglich bei Warmbox 1 feststellbar.

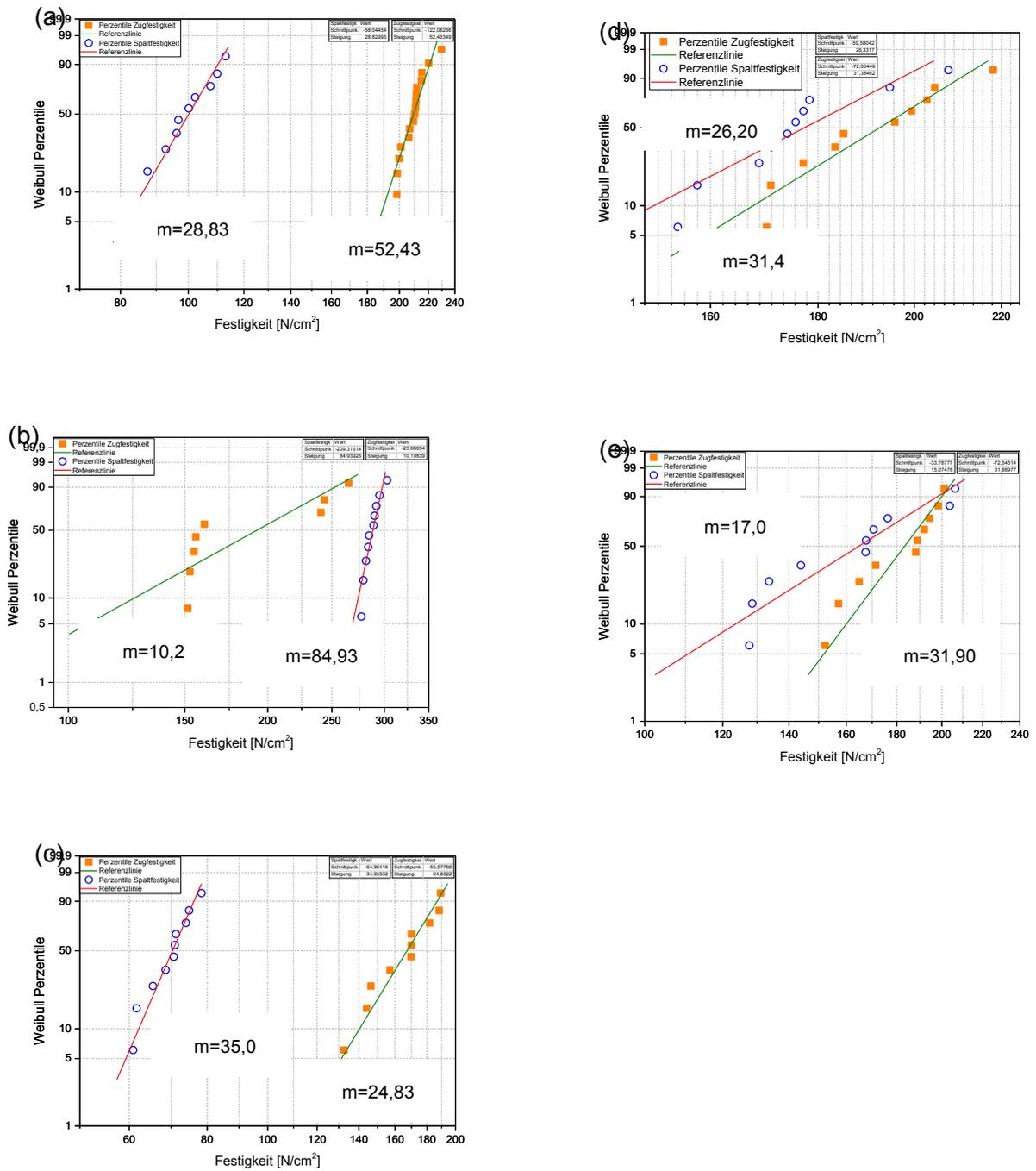


Abb. 4-47: Gegenüberstellung verschiedener Bruchwahrscheinlichkeiten für Zugfestigkeit zu Spaltfestigkeit (a) H32 mit Coldbox, (b) H32 mit Warmbox 1, (c) H32 mit Warmbox 2, (d) H32 mit Wasserglasbinder ASK-Inotec und (e) H32 mit 2% Betol-Wasserglas.

Tab. 4-16: Ermittelte Steigung der Weibull-Regressionsgeraden für unterschiedliche Formstoffe und Binder bei Raumtemperatur.

Sand	Binder	Steigung Spaltfest.	Steigung Zugfest.	Steigung Druckfest.	Steigung Scherfest.
H32	CB	28,83	52,43	13,53	38,22
	WB1	84,93	10,20	36,30	54,40
	WB2	35,0	24,83	16,70	27,87
	HB	15,10		10,90	19,20
	ASK_INO	26,33	31,40	7,53	26,51
	WGM3_2	17,0	31,90	22,40	14,45
	WGM3_2,5	15,10		21,26	29,60
Cerabeads	WGM3_2,5	26,20		22,31	19,60
Kerphalit	WGM3_3	19,0		18,40	12,15

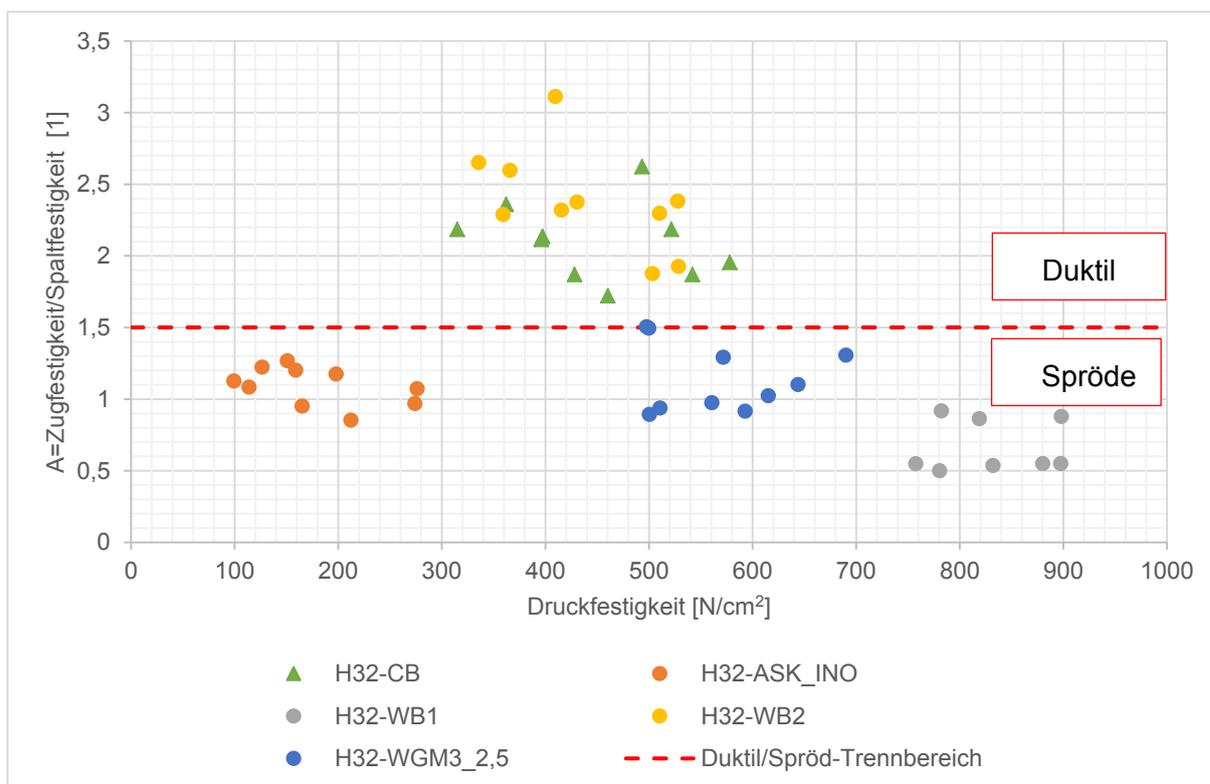


Abb. 4-48: Gegenüberstellung der Abhängigkeit Spalt- & Zugfestigkeit zu Druckfestigkeit.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Allgemein

Das untersuchte Festigkeitsverhalten bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen war erfolgreich und die zielbedingte Annahme, dass je nach Positionierung der Kernpakete unterschiedliche Degradationsprozesse wirken konnte somit bestätigt werden. Zudem konnte eine Darstellung mittels Mohr'schen Spannungskreis bewerkstelligt werden.

5.2 Konklusion

Organisch gebundene Proben weisen eine deutliche Abhängigkeit der Atmosphäre und dem Bruchverhalten auf. Ein deutlicher Probenzerfall ist nach 300°C feststellbar. Der Einfluss von Temperatur bzw. Auslagerungsbedingung ist bei allen Probenarten und Festigkeitsmessungen deutlich erkennbar. Die Untersuchungen nach Grochalski [17] konnten somit teilweise bestätigt werden. Es wurde beobachtet, dass bei identer Auslagerung die Biegefestigkeit einen stärkeren Abfall, verglichen zur Druckfestigkeit, aufweist. Dies gilt jedoch nur für Coldbox, Warmbox 2 und Hotbox. Anhand der erfassten Weibull-Messwerte kann bei Warmbox 1 auf eine herstellungsbedingte Messunsicherheit zurückgeschlossen werden.

ASK-Inotec Proben zeigen eine konstante Festigkeitsabnahme über alle Messmethoden. Atmosphärisch bedingte Unterschiede konnten teilweise festgestellt werden, diese liegen jedoch nicht repräsentativ vor. Im Vergleich zu organisch gebundenen Proben sind



deutlichen Tendenzen hinsichtlich der auslagerungsbedingten Begebenheiten erkennbar, wobei eher der Bindereinfluss statt dem Formstoffeinfluss überwiegt.

Bei Betol-Wasserglas gebundenen Quarzsandproben ist eine eindeutige Festigkeitsabnahme mit steigender Temperatur erkennbar, wobei vergleichsweise höhere Festigkeiten bei oxidierenden Bedingungen messbar sind. Ausnahmen sind bei Scher- bzw. Spaltfestigkeitsmessungen erkennbar. Ein Unterschied im Festigkeitsverhalten ist beim Erhöhen des Wasserglasgehaltes von 2 % auf 2,5 % nicht feststellbar.

Neben dem konstanten Aushärteverhalten weisen Atmosphärische Unterschiede bei Cerabeads-Proben keine merklichen Einflüsse auf. Über das gesamte Spektrum stellt sich sowohl bei oxidierenden als auch reduzierenden Bedingungen ein gleichbleibendes Festigkeitsniveau ein. Vereinzelt Abweichungen können auf statistische Unterschiede auf Grund der Probenzahl zurückgeschlossen werden. Beispielsweise ist dies auch beim gleichbleibenden Druckfestigkeitsniveau feststellbar. In Folgeversuchen müsste dies erneut überprüft werden, da die Versuche eine hohe Standardabweichung aufweisen und somit die Interpretation dieser Ergebnisse teilweise verfälschen. Allgemein ist jedoch eine Abhängigkeit von der Atmosphäre bei Druck-, Scher- und Spaltfestigkeitsmessungen feststellbar.

Neben einem konstanten Aushärteverhalten liegt bei Kerphalit mit 3% Wasserglas Binder ebenfalls ein konstanter thermischer Einfluss bei beiden Atmosphären vor. Die höhere Spaltfestigkeit bei 300°C und reduzierenden Bedingungen muss in weiteren Versuchen verifiziert werden, um mögliche Ausreiser ausschließen zu können.

Anhand der Weibull-Streubreite m konnte die Reproduzierbarkeit verwendeten Messmethoden ermittelt werden. Die Streubreite und somit die Reproduzierbarkeit variiert je nach Prüfmethode (Biege-, Druck-, Scher-, Zug und Spaltprüfung). Messungen mittels Biegeprüfung weisen im Allgemeinen eine gute Reproduzierbarkeit auf. So zeigen anorganisch gebundene Proben eine vergleichsweise geringe Abweichung in der Streubreite. Bei organisch gebundenen Formstoffen liegt die ermittelte Streubreite auf einem ähnlichen Niveau wie bei anorganischen Bindern. Die geringste Reproduzierbarkeit, geringste Streubreite, hinsichtlich Biegefestigkeit konnte lediglich bei Warmbox 1 Binder festgestellt werden. Die ermittelte Streubreite der Werte ist bei den restlichen Prüfungen, mit vereinzelt Ausnahmen, vergleichsweise geringer. Eine Überprüfung der Prüfparameter und Versuchsvergleiche sollte angestrebt werden. Zudem sollte der generelle Prüfaufbau der verwendeten Universalmessmaschine erneut überprüft werden, da es beispielsweise bei der Zugprüfung zu einem möglichen Einschneiden der Probenaufnahmen kommen kann.



Weitere Faktoren wie die Aushärtung der Prüfkörper hat ebenfalls Auswirkungen auf die Messung und somit die Reproduzierbarkeit.



Bei Quarzsand Proben welche mit 2 % und 2,5 % Betol-Wasserglas versehen waren, konnte ein Unterschied im Aushärteverhalten mit und ohne Mikrowelle beobachtet werden. Dies lässt darauf schließen, dass die Probenkörper durch die Mikrowellentrocknung übertrocknet werden und somit eine Anpassung des Bindergehaltes bzw. der Trocknungszeit notwendig wären. Bei einem Gehalt von 2,5 % ist eine Übertrocknung der Proben bedingt zu beobachten. Nach Stachowicz [87] hat sich das Hinzufügen von 0,5 % Wasser zum trockenen Sand vor dem eigentlichen Mischvorgang bewährt. Neben einer besseren Binderverteilung und eine geringere Staubentwicklung während dem Mischvorgang wird auch die Biegefestigkeiten nach der Mikrowellentrocknung positiv begünstigt.

Weitere Unterschiede zu den Auswertungen nach Stauder [57] hinsichtlich Festigkeiten können auf abweichende Herstellbedingungen und anlagentechnische Begebenheiten zurückgeführt werden, obwohl die idente Binder- und Formstoffarten verwendet wurden. Als weitere Fehlerquellen können eine ungenügende Reinigung des Mixers (welche zu unerwünschten Agglomerationen führt), eine Kontamination des Binders oder eine unsachgemäße Lagerung der verschiedenen Binder angeführt werden.

Festigkeitsunterschiede bei Betol-Wasserglas Proben können auf getrocknete Inhomogenitäten zurückgeführt werden, wobei diese während dem Herstellprozess in die Proben miteingebracht werden. Der Ursprung dieser Inhomogenitäten kann auf mehrere Faktoren zurückgeführt werden. Zu diesen Faktoren zählt ein Erhitzen der Schießplatte durch das Kernwerkzeug, fehlerhafte Reinigung des Sandmischers bzw. der Kernschießmaschine oder ein Ausbilden einer getrockneten Randschale im Schießzylinder, die sich durch den Schießprozess löst.

Zusammenfassend ist ein direkter Zusammenhang zwischen den atmosphärischen und thermischen Bedingungen und dem Degradationsverhalten, über unterschiedliche Prüfmethode, feststellbar. Dieses Verhalten ist jedoch bei organisch gebundenen Formstoffen ausgeprägter als vergleichsweise bei Betol-Wasserglas gebundenen Formstoffen. Eine Abbildung der gemessenen Festigkeiten mittels Spannungskreis ist möglich, sollte jedoch weiter untersucht werden um die spannungstechnischen Unterschiede und Zusammenhänge zu verifizieren und den Einfluss der Streuung zu verringern.

Bei den abgebildeten Spannungskreisen konnte festgestellt werden, dass die ermittelte Spaltfestigkeit von der Zugfestigkeit und somit der Bruchgerade abweichen, wodurch eine Anpassung der Prüfmethode notwendig wäre. Eine mögliche Ursache für diese Unterschiede könnte spannungsbedingte Unterschiede zwischen Zug- und Spaltfestigkeit sein. Laut Untersuchungen von Bika [66] liegt ein Verhältnis von 0,75 zwischen Zug- und Spaltfestigkeit für Beton vor. Zudem ist zu beachten, dass laut ÖNORM 3124-4 Beton-Prüfkörper für den



Spaltzugversuch mit den Abmaßen Durchmesser 50 mm und einem Verhältnis d/l von 0,5 ($\pm 10\%$) verwendet werden müssen [53, 88]. Da die gewählten Kernformstoff-Prüfkörper einen Durchmesser von 30 mm hatten, müssten Vergleichsversuche durchgeführt werden.

Um mögliche statistische Abweichungen zu mindern und die Reproduzierbarkeit der Druck- bzw. Scherprüfung zu verbessern, wären weitere Untersuchungen notwendig. Einen möglichen Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit und Druckfestigkeit würde beispielsweise der Druckscher-Versuch liefern, wodurch eine Verifizierung der erfassten Werte möglich wäre.

Es gilt in weiteren Versuchen abzuklären ob ein möglicher Zusammenhang mit dem Verlauf der Bruchgerade (gekrümmt oder linear) und dem Degradationsverhalten vorliegt [66].

Um für zukünftige Auswertungen vom Spannungskreis eine Basis in Bezug auf Spalt- und Zugfestigkeit zu ermöglichen, wurden Korrelationen zwischen beiden Untersuchungsmethoden durchgeführt. Es konnte lediglich eine direkte Korrelation bei H32 Quarzsand mit 2% Betol-Wasserglas ermittelt werden. Bei Wasserglas ASK-Inotec Proben wurde eine Parallelität der Messwerte ermittelt, zudem bewegen sich die Verhältnisse der Messmethoden im gleichen Verhältnis zueinander. Es ist somit eine Korrelation erkennbar, welche auf Grund von statistischen Abweichungen von einander streut. Eine Abhängigkeit vom Bruchverhalten (spröde bzw. duktil) ist anhand der erfassten Werte erkennbar.

5.3 Ausblick

Bei der Untersuchung des Bruchverhaltens unter dem REM konnte kein Zusammenhang hinsichtlich der Flächenbelastung und dem Bruchverhalten festgestellt werden. Die Ergebnisse entsprechen den REM-Untersuchungen an anorganischen Formstoffen, sowie dem Vergleich zu konventionellen Formstoffen, nach Polzin [32] in welchen ebenfalls keine eindeutigen Ergebnisse gefunden werden konnte. Die unterschiedlichen Bruchflächen bei H32 Quarzsand mit 2,5 % Betol-Wasserglas können auf die geringe Probenanzahl zurückgeführt werden. Um jedoch mehr Erkenntnisse hinsichtlich dem Bruchverhalten im granularen Bereich zu analysieren wären weitere Untersuchungen von Interesse. Um das gebunden Wasserglas bei der REM-Analyse zu umgehen und somit das Korn zu vermessen, kann Sandregenerat mittels Kohlenstoff präpariert werden [89]. Für eine genauere Messung des Wasserglas-Binders im REM, wäre eine Anpassung des Binders notwendig. Hierfür



wären Elemente bzw. Verbindungen mit einer höheren Ordnungszahl, verglichen zum Formstoff, empfehlenswert.

Glühverluste von lose gebundenem Quarzsand und mit 2% Wasserglas müssten erneut überprüft werden bzw. eine erneute Verifizierung der Ergebnisse ist notwendig um die eine Fehlmessung auszuschließen

Allgemeine Einflüsse auf die Festigkeit kann auf die Herstellbedingungen zurückgeführt werde. Zu diesen Einflüssen zählt die Sauberkeit der Mischer bzw. der Kernschießmaschine.

Über eine FT-IT Analyse wäre eine genauere Feststellung der beginnenden thermische Degradation von organischen Bindern möglich [46].

Triaxial-Versuche um den genauen Zusammenhang der effektiven Scherparameter (Kohäsion und Reibwinkel) näher untersuchen zu können und eine mögliche Überprüfung der ermittelten Spannungskreise und Parameter-Zusammenhänge, wären zudem von Interesse. Hierbei würde eine Belastung der Probenkörper von allen Seiten erfolgen, wobei eine freie Ausbildung der Scherflächen möglich ist. Der minimale Probenquerschnitt beträgt jedoch

10 cm² (Durchmesser= 3,57 cm), wodurch notwendige Schritte hinsichtlich einer Adaption unternommen werden müssten [63].

Vorrangegangene Versuchsserien in Stickstoffatmosphäre scheiterten an den technischen Begebenheiten und sollten in weiteren Versuchen näher in Betracht gezogen werden um mögliche Vergleiche und Parallelen hinsichtlich des Sauerstoffeinflusses auf den Kernzerfall zu ziehen.

Ein möglicher Gegenvergleich zwischen den genormten Prüfkörpern laut ÖNORM für die Spaltzugfestigkeit und den verwendeten Kernen um den Größeneinfluss näher zu begutachten und einen möglichen Vergleich für die ermittelten Ergebnisse zu finden.

Bei der Trocknung mit bzw. ohne Mikrowelle weisen Betol-Wasserglas gebundene Kerne bei Auslagerungsversuchen vergleichsweise unterschiedliche Biegefestigkeiten auf. So liegen die Festigkeiten ohne Mikrowellentrocknung weit über jenen mit Trocknung. Grund hierfür könnte, auf Grund des relativ geringen Wasserglasanteils, eine Überanregung der Wasserglasmatrix infolge der zwischengeschalteten Mikrowellenbehandlung sein. Zudem könnte die Trocknung von Biegeriegeln in vertikaler Position bzw. einer allgemeinen Trocknung in einer erhöhten Position in der Mikrowelle überdacht werden.

In weiterführenden Versuchen wäre eine Anpassung des Kernwerkzeugs zu überdenken. Es konnten durch mehrere Versuche Unstimmigkeiten zwischen gemessener Temperatur und realer Temperatur festgestellt werden.



6 Literaturverzeichnis

- [1] VDG Merkblatt (R093): Regenerierte Sande als Formgrundstoff - Anforderungen, Beurteilungskriterien, Düsseldorf: VDG - Verein deutscher Gießereifachleute, abgerufen am: 09.11.2016.
- [2] Riegler, M.: Formstoffprüfung: Vergleich der klassischen Handprüfgeräte mit elektronisch gesteuerten Prüfmaschinen, Bachelorarbeit, Montanuniversität Leoben, 2015.
- [3] Bika, D. G., Gentzler, M. und Michaels, J. N.: Mechanical properties of agglomerates, Powder Technology 117 (1/2), 2001, S. 98–112.
- [4] Bindernagel, I.: Formstoffe, Formverfahren und Formstoffprüfung, E. Leitfaden für Formermeisterlehrgänge, Verein Dt. Gießereifachleute, Düsseldorf, 1968, S. 2-54, S. 55-71, S. 84-118.
- [5] Roller, R. u. Pröm, M. (Hrsg.): Grund- und Fachkenntnisse gießereitechnischer Berufe, Technologie des Formens und Giessens, 2. Aufl., Verl. Handwerk und Technik, Hamburg, 1990, S. 199-217.
- [6] Roller, R. (Hrsg.): Fachkunde für gießereitechnische Berufe, Technologie des Formens und Gießens, Europa Lehrmittel, 5. Aufl., Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, Haan-Gruiten, 2007, S. 240-261.
- [7] Stachowicz, M., Opyd, B. und Granat, K.: Comprehensive Assessment of Polymeric Materials for Foundry Tooling Used in Microwave Field, Archives of Metallurgy and Materials 60 (1), 2015, S. 335–339.
- [8] Flemming, E. und Tilch, W.: Formstoffe und Formverfahren, 1. Auflage, Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1993, S. 29-36, S. 150-194.



- [9] Krukowski, S. T.: Foundry Sands, Industrial Minerals and Rocks, S. 1433–1440.
- [10] Recknagel, U. und Dahlmann, M.: Spezialsande – Formgrundstoffe für die moderne Kern- und Formherstellung, Special Sands – Base Materials for modern Core and Mould Making, Giesserei Rundschau 56 (1/2), 2009, S. 6–17.
- [11] Thiel, J., Ziegler, M., Dziekonski, P. und Joyce, S.: Investigation into the Technical Limitations of Silica Sand Due to Thermal Expansion, American Foundry Society 145 (4), 2007, S. 1–18.
- [12] Quarzwerk: Quarzsand H32 bis H35, Stoffdaten, 2009.
- [13] Salmang, H., Scholze, H. und Telle, R.: Keramik, 7. Aufl., Springer, Berlin, 2007, S. 313-370, S. 390-424.
- [14] Brown, J.: Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook, 1. Aufl., Elsevier professional, Oxford, 1999, S. 18, S. 146-166, S. 167-203, S. 204-214.
- [15] Damrec: Kerphalite KF, Stoffdatenblatt, 2007.
- [16] Wang, X.: Thermische, physikalische und mechanische Eigenschaften von Rohsanden und Sandkernen für den Aluminiumguss, Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, 2014.
- [17] Grochalski, R.: Giessereiformstoffe, Vorkommen, Eigenschaften, Prüfung u. Anwendungsmöglichkeiten, Verl. Technik, Berlin, 1955, S. 16-18, S. 49-60, S. 140-144, S. 158, S. 272-278.
- [18] Deore, D. S., Chaudhari, G. B., Chaturvedi, A. G. und Gunjal, S. U.: A study of core and its types for casting process, International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science 3 (1), 2015, S. 1571–1580.
- [19] Beeley, P. R.: Foundry technology, 2. Band, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001, S. 178-238.
- [20] Stauder, B., Kerber, H. und Schumacher, P.: Deformation analysis of foundry sand cores by enhanced 3-point-bending-tests, Enhanced Three-Point-Bending-Test evaluation of foundry sand cores, In Bearbeitung, 2015, S. 1–18.
- [21] Czerwinski, F., Mir, M. und Kasprzak, W.: Application of cores and binders in metalcasting, International Journal of Cast Metals Research 28 (3), 2015, S. 129–139.
- [22] Ramakrishnan, R.: 3-D-Drucken mit einem anorganischen Formstoffsystem
- [23] Görke, H., Zilles, J. und Frechen, M.: Einfluss der Kornverteilung auf Formstoffparameter, Giesserei 103 (06), 2016



- [24] Schreyer, G. W., Erbs, H.-D. und Hoefler, H.: Herstellung von Gießeriekernen, VEB Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1964, S. 147–213, S. 236-270.
- [25] ASM International Handbook Committee (Hrsg.): ASM Handbook, Casting, ASM handbook, Volume 15, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988, S. 214-221, S. 226-228, S. 502-506.
- [26] Appelt, C. und Hilden, S.: Einfluss der Temperaturleitfähigkeit organisch und anorganisch gebundener Formkerne auf die Gefügeeigenschaften von Aluminiumlegierungen, *Giesserei* 103 (8), 2016, S. 22–27.
- [27] Łucarz, M.: Setting temperature for thermal reclamation of used moulding sands on the basis of thermal analysis, *Metalurgija* 54 (2), 2015, S. 319–322.
- [28] Wang, J., Fan, Z., Zan, X. und Di Pan: Properties of sodium silicate bonded sand hardened by microwave heating, *China Foundry* 6 (3), 2009, S. 191–196.
- [29] Brümmer G., D. R.: Trocken statt Begasen mit CO₂ beim Wasserglassverfahren- neue Ansätze bei alten Bindermitteln, *Giesserei* 84 (13), 1997, S. 12–14.
- [30] Polzin, H.: Anorganische Binder, Zur Form- und Kernherstellung in der Gießerei, Schiele & Schön, Berlin, 2013, S. 14-41, S. 42-154.
- [31] Bild aus: *Giesserei - Lexikon*, www.giessereilexikon.com, abgerufen am: 13.09.2017.
- [32] Polzin, H.: Untersuchungen zur Mikrowellenverfestigung von wasserglasgebundenen Gießereiformstoffen, *Freiberger Forschungshefte B Werkstoffwissenschaft, Werkstofffertigungstechnologie*, Bd. 302, TU Bergakad, Freiberg, 2000, S. 7-29, S. 52-55, S. 64-67.
- [33] Opyd, B. und Granat, K.: The Influence of Sand Grains Properties on Electrical Properties of Moulding Sand with Inorganic Binder, *Archives of Foundry Engineering* 15 (3), 2015, S. 43–46.
- [34] Li, H. und Xie, W.: Study on the materials used for making models of sodium silicate bonded sand core heating by microwave energy, *Journal of Chongqing University* 25 (1), 2002, S. 116–119.
- [35] Opyd, B., Nowak, D. und Granat, K.: Dielectric Properties of High-Silica Sand at 2.45 GHz, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15 (1), 2015, S. 136–139.
- [36] Stachowicz, M., Granat, K., Nowak, D. und Haimann, K.: Effect of hardening methods of moulding sands with water glass on structure of bonding bridges, *Archives of Foundry Engineering* 10 (3), 2010, S. 123–128.



- [37] Choo, J., Kim, Y. J., Lee, J. H. und Yun, T. S., et al.: Stress-induced evolution of anisotropic thermal conductivity of dry granular materials, *Acta Geotechnica* 8 (1), 2013, S. 91–106.
- [38] Hofmann, F.: Tongebundene Formsande, VDG-Taschenbuch, Bd. 12, Giesserei-Verl., Düsseldorf, 1975, S. 26-32, S. 68-78.
- [39] Levelink, H. G.: Das Verhalten von Formstoffen während einer plötzlichen Erhitzung und das Entstehen von Schülpen, *Giesserei* (47), 1960, S. 339–346.
- [40] Bild aus: Schülpen: Fehlerbild & Ursachen, <http://www.ask-chemicals.com>, abgerufen am: 24.11.2016.
- [41] Boenisch, D.: Die Bedeutung der Festigkeit feuchter, tongebundener Formsande, insbesondere der Nassfestigkeit, *Giesserei Techn.-Wiss. Beihefte* 13 (3), 1961, S. 157–193.
- [42] Schumacher, P.: Technologie der Gießverfahren, Vorlesungsskript, Montanuniversität Leoben, 2015.
- [43] Ammen, C. W.: The complete handbook of sand casting, 1st ed., Tab Books, Blue Ridge Summit, Pa., 1979, S. 80-97.
- [44] Major-Gabrys, K. und St. Dobosz, M.: High-temperature expansion and knock-out properties of moulding sands with water glass, *Archives of Foundry Engineering* 7 (1), 2007, S. 127–130.
- [45] Jakubski, J. und Dobosz S.M.: The Thermal Deformation Of Core and Moulding Sands According To The Hot Distortion Parameter Investigations, *Archives of Metallurgy and Materials* 52 (Nr. 3), 2007, S. 421–427.
- [46] Grabowska, B.: Thermal degradation of biopolymer binders: the example of starch-poly (acrylic acid), *Archives of Foundry Engineering* 10 (1), 2010, S. 221–224.
- [47] Knechten, J.: Anorganische Kernfertigung: fremd beziehen oder selbst investieren? Herausforderungen in der Fertigung, Kernherstellung in der Gießereitechnologie, Freiberg, 29.09.-30.09.16
- [48] Kleinheyer, U.: Jahresübersicht Formstoffe (22. Folge), Teil 2: Formverfahren mit nicht tongebundenen Formstoffen; Zusatzstoffe; Übergangsstoffe, *Giesserei* 72 (22), 1985, S. 635–641.



- [49] Izdebska-Szanda, I., Baliński, A., Angrecki, M. und Palma, A.: The Effect of Nanostructure Modification on the Silicate Binder on Its Binding Characteristics and Functional Properties, *Archives of Metallurgy and Materials* 59 (3), 2014, S. 1033–1036.
- [50] Izdebska-Szanda, I. und Balinski, A.: New generation of ecological silicate binders, *Procedia Engineering* 10, 2011, S. 887–893.
- [51] Döpp, R., Deike, R. und Gettwert, G.: Beitrag zum Wasserglas-CO₂-Verfahren, *Giesserei* 72 (22), 1985, S. 626–635.
- [52] Döpp, R., *Giesserei* 75 (Nr. 4), 1988, S. 79–84.
- [53] Kluckner, A.: Aspekte der Gebirgscharakterisierung im Tunnelbau, Masterarbeit, TU Graz, 2012.
- [54] Mutschler, T.: Neufassung der Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreises ?, *Versuchstechnik Fels?* der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern, *Bautechnik* 81 (10), 2004, S. 825–834.
- [55] Wawersik, W. R. und Fairhurst, C.: A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 7 (5), 1970, S. 561–575.
- [56] Kirsten, U.: Beitrag zur energetischen und tribologischen Untersuchung von Gesteinsbohrprozessen, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2014.
- [57] Stauder, B.: Degradationsverhalten anorganisch gebundener Kerne im Aluminiumguss - Einfluss von Formstoffparametern auf das mechanische Verhalten von Gießkernen, Dissertation, Montanuniversität Leoben, nicht veröffentlicht.
- [58] Major-Gabryś, K., Dobosz, S. M., Jelínek, P., Jakubski, J. und Beňo, J.: The Measurement of High-Temperature Expansion as the Standard of Estimation the Knock-Out Properties of Moulding Sands with Hydrated Sodium Silicate, *Archives of Metallurgy and Materials* 59 (2), 2014, S. 739–742.
- [59] Major-Gabryś, K.: Masy ze szkłem wodnym o zwiększonej wybijałości, Dissertation, 2006.
- [60] Zein, M.: Studie über das Bruchverhalten des Betons unter Zug- und Druckbeanspruchungen, Dissertation, ETH Zürich, 1974.
- [61] Eichler, H. J., Kronfeldt, H.-D. und Sahn, J.: Das Neue Physikalische Grundpraktikum, Springer-Lehrbuch, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 2006, S. 93-104, S. 448-454.



- [62] Schubert, W.: Felsmechanik und Tunnelbau, Skriptum, TU Graz, 2007.
- [63] Simmer, K.: Grundbau, 19. Aufl., Teubner, Stuttgart, 1994, S. 129-146.
- [64] Rummelin, A.: Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Betonen, Masterarbeit, Fachhochschule Stuttgart, 2005.
- [65] Eberhardt, E.: The Hoek–Brown Failure Criterion, *Rock Mechanics and Rock Engineering* 45 (6), 2012, S. 981–988.
- [66] Justus Bonzel: Biegezug- und Spaltzugfestigkeit des Betons, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1965, S. 59-96.
- [67] Thienel, C.: Werkstoffe des Bauwesens Festbeton, Skript, Universität München, 2008.
- [68] Malárics, V.: Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben, Dissertation, 2010.
- [69] Sebastian, U.: Gesteinskunde, Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender, 2., erweiterte und verbesserte Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2012, S. 86-97.
- [70] Klein, J.: Der Einfluss einer Gasdurchströmung auf die Fließeigenschaften leicht verdichteter Schüttgüter, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2003.
- [71] Müllerschön, H.: Spannungs-Verformungsverhalten granularer Materialien am Beispiel von Berliner Sand, Dissertation, Universität Stuttgart, 2000.
- [72] Krüger, S.: Ein Beitrag zur praxismgerechten Dimensionierung keramischer Bauteile bei mehrachsigen Beanspruchungen, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1999.
- [73] Bild aus: Versuch 5: Mechanisches Verhalten von Keramik, www.nonmet.mat.ethz.ch, abgerufen am: 26.11.2015.
- [74] VDG Merkblatt (P071): Bindemittelprüfung, Biegefestigkeit von warmhärtenden kunstharzgebundenen feuchten Formstoffen, 1999, Düsseldorf: VDG - Verein deutscher Gießereifachleute.
- [75] VDG Merkblatt (P038): Prüfung von tongebundenen Formstoffen - Bestimmung der Festigkeiten, Düsseldorf: VDG - Verein deutscher Gießereifachleute, abgerufen am: 09.11.2016.
- [76] Hasse, S. (Hrsg.): Giesserei-Lexikon, 19. Auflage, Schiele & Schön, Berlin, 2007, S. 637-676, S. 762-764.



- [77] Granat, K., Nowak, D., Pigieli, M., Stachowicz, M. und Wikiera, R.: Microwaves energy in curing process of water glass molding sands, Archives of Foundry Engineering 7 (1), 2007, S. 183–188.
- [78] VDG Merkblatt (P036): Prüfung von Formgrundstoffen, Bestimmung der Zusammensetzung des Schlammstoffanteils, 1996, Düsseldorf: VDG - Verein deutscher Gießereifachleute, abgerufen am: 05.11.2015.
- [79] VDG Merkblatt (P037): Prüfung von Formgrundstoffen, Bestimmung der Formbarkeit, 1997, Düsseldorf: VDG - Verein deutscher Gießereifachleute, abgerufen am: 05.11.2015.
- [80] VDG Merkblatt (R 202): Eigenschaften der Gießereiformstoffe, Düsseldorf: VDG - Verein deutscher Gießereifachleute, abgerufen am: 15.11.2016.
- [81] Łucarza, L.: Influence of the Thermal Reclamation of the Spent Core Sand Matrix on Its Reuse, Archives of Foundry Engineering 14 (1), 2014, S. 27–30.
- [82] Schindelbache, G. und Kerber, H.: Umfassende Charakterisierung von Formstoffen mit einer neuen Prüfmethode, Giesserei Rundschau 60 (3/4), 2013, S. 58–66.
- [83] VDG Merkblatt (P073): Bindemittelprüfung, Prüfung von kalthärtenden, kunstharzgebundenen feuchten Formstoffen mit Aerosol- und Gashärtung, 1996, Düsseldorf: VDG - Verein deutscher Gießereifachleute.
- [84] Zwiég, T.: Praktische Metallographie, Universelle Methodik für die randscharfe mechanische Präparation und das Farbätzen von Aluminiumlegierungen, Aarhus, 2001, S. 3-6.
- [85] Bargel, H.-J. und Schulze, G.: Werkstoffkunde, Mit 85 Tabellen, VDI-Buch, 9. Aufl., Springer, Berlin, 2005, S. 137-139.
- [86] Egelhardt, T.: Formstoffadditivesystem zur Reduktion der Emissionen, Giesserei 103 (06), 2016
- [87] Stachowicz, M., Granat, K. und Nowak, D.: Application of microwaves for innovative hardening of environment-friendly water-glass moulding sands used in manufacture of cast-steel castings, Archives of Civil and Mechanical Engineering 11 (1), 2011, S. 209–219.
- [88] ÖNORM B 3124-4): Prüfung von Naturstein; mechanische Gesteinseigenschaften; einaxiale Zugfestigkeit (Spaltzugfestigkeit), 1981.



- [89] Stachowicz, M., Granat, K. und Nowak, D.: Influence of water-glass grade and quantity on residual strength of microwave-hardened moulding sands. Part 2, Archives of Foundry Engineering 11 (2), 2011, S. 143–148.
- [90] ASK-Chemicals: Askocure 355 Hydro Teil 1, Sicherheitsdatenblatt, 2006.
- [91] ASK-Chemicals: Askocure 655 Hydro Teil 2, Sicherheitsdatenblatt, 2006.
- [92] ASK-Chemicals: Katalysator 706, Sicherheitsdatenblatt, 2008.
- [93] Hüttenes-Albertus: Warmbox Härter: Furedur 8154, Sicherheitsdatenblatt, 2006.
- [94] Dipl.-Ing. Dr. mont Josef Schrank: Arbeitsplatzkonzentrationsmessungen an den Warm-Box Kernschießmaschinen Röper 512 und 514 bei Nematik Linz GmbH, Bericht, 2010.
- [95] Furtenbach GmbH: Hotbox Harz: Thermophen 2143, Sicherheitsdatenblatt, 2001.
- [96] Furtenbach GmbH: Hotbox Härter: MBT, Sicherheitsdatenblatt, 2002.
- [97] Hüttenes-Albertus: Warmbox Härter: Furedur 8099, Sicherheitsdatenblatt, 2005.
- [98] Hüttenes-Albertus: Warmbox Harz: Furesan 8885, Sicherheitsdatenblatt, 2012.
- [99] Woellner: Betol 39T, Sicherheitsdatenblatt, 2011.
- [100] ASK-Chemicals: Inotec Promotor EP 4044, Sicherheitsdatenblatt, 2005.
- [101] ASK-Chemicals: Inotec 4158, Sicherheitsdatenblatt, 2009.



Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Auftrieb von Kernen in verschiedenen Schmelzen, nach [14].	8
Tab. 2-2: Einfluss des Moduls auf die mechanischen Eigenschaften nach einer Mikrowellentrocknung, nach [32].	19
Tab. 3-1: Probenplan Organik.	39
Tab. 3-2: Probenplan Anorganik.	39
Tab. 3-3: Vorgaben für thermische Degradation.	44
Tab. 3-4: Gewählte Ofenparameter für Degradationsversuche.	50
Tab. 3-5: Gewählte Ofenparameter für reduzierende Degradationsversuche.	54
Tab. 3-6: Zeitintervalle für Auslagerungsversuche.	60
Tab. 3-7: Einstellparameter an Zwick Universalprüfmaschinen.	60
Tab. 4-1: Anteil gebundener Formstoff und Schüttdichte.	66
Tab. 4-2: Glühverluste der verwendeten Sande und Binder.	66
Tab. 4-3: Anteil an Schlammstoff für die gebundenen und ungebundenen Sande.	67
Tab. 4-4: Oberflächenbeschaffenheit der Proben nach WBH.	69
Tab. 4-5: Ermittelte Steigung der Weibull-Regressionsgeraden für H32 bei unterschiedlichen Bindersystemen.	84
Tab. 4-6: Bruchgeradenparameter für H32 mit Coldbox.	98
Tab. 4-7: Bruchgeradenparameter für H32 mit Warmbox 1.	100



Tab. 4-8: Bruchgeradenparameter für H32 mit Warmbox 2.	102
Tab. 4-9: Bruchgeradenparameter für H32 mit Hotbox.	104
Tab. 4-10: Bruchgeradenparameter für H32 mit Wasserglas ASK-Inotec.....	106
Tab. 4-11: Ermittelte Steigung der Weibull-Regressionsgeraden für Betol-Wasserglas bei unterschiedlichen Formgrundstoffen.	114
Tab. 4-12: Bruchgeradenparameter für H32-WGM3_2.	125
Tab. 4-13: Bruchgeradenparameter für H32-WGM3_2,5.	127
Tab. 4-14: Bruchgeradenparameter für CB-WGM3_2,5.....	129
Tab. 4-15: Bruchgeradenparameter für AN-WGM3_2,5.....	131
Tab. 4-16: Ermittelte Steigung der Weibull-Regressionsgeraden für unterschiedliche Formstoffe und Binder bei Raumtemperatur.	135
Tab. A-1: Gesamtübersicht über Anzahl aller Proben und Versuche.	1
Tab. B-1: Auflistung aller Bestandteile für die verwendeten organischen Binder, basierend auf Sicherheitsdatenblättern [90 bis 98].	1
Tab. C-1: Auflistung aller Bestandteile für die verwendeten anorganischen Binder, basierend auf Sicherheitsdatenblättern [99 bis 101].	1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Schematische Darstellung vom Formstoffaufbau, nach [5].....	3
Abb. 2-2: Wärmeausdehnung bei unterschiedlichen Formstoffen, nach [9].	5
Abb. 2-3: lineare Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Formgrundstoffe [10].	5
Abb. 2-4: Korngrößenverteilung, nach [16].....	6
Abb. 2-5: Einteilung der Kornstrukturklassen, nach [14].....	7
Abb. 2-6: Theoretische Betrachtung des Aufheizverhaltens von Sandkernen, nach [14].....	9
Abb. 2-7: Übersicht der verschiedenen Bindersysteme die zur Form- und Kernherstellung dienen [22].....	10
Abb. 2-8:Verfestigungsvarianten von Wasserglasformstoff, nach [30].	17
Abb. 2-9: Kieselsäurereaktion, nach [31].	17
Abb. 2-10: Restdruckfestigkeit bei ver. Auslagerungen für Wasserglas Modul 2,5, nach [32].	19
Abb. 2-11: Mechanisch-thermisches Verhalten von Formstoffen beim Guss, nach [42]. ...	22
Abb. 2-12: Arten und Einflüsse von Degradation von organischen Bindern, nach [46].	24
Abb. 2-13: Festigkeitsverlauf über Temperatur, nach [49].	25
Abb. 2-14: Bruchbereiche im Spannungs-Dehnung-Diagramm [53].	26
Abb. 2-15: Kernzerfall-Versuchsaufbau (a) Herstellform, (b) Versuchsaufbau nach PN-85/H-11005 und (c) Ausschlagstift, nach [59].	27



Abb. 2-16: Übersicht der verschiedenen Prüfmethoden ohne Spaltfestigkeitsprüfung zur Bestimmung der Formsandfestigkeit [19]. 28

Abb. 2-17: Gegenüberstellung von linearem Mohr-Coulomb und nicht linearem Hoek-Brown Kriterium, nach [65]. 30

Abb. 2-18: Spannungsverteilung für Spaltfestigkeit, nach [60]. 31

Abb. 2-19: Prüfanordnung und Spannungszustände bei verschiedenen Zugbeanspruchungen [67]. 31

Abb. 2-20: Brucharten bei Spaltfestigkeit (a) Druck-, (b) Zug- und (c) Schubbruch, nach [68]. 32

Abb. 2-21: Schematische Veranschaulichung von Einflüssen auf den Spannungskreis von keramischen Werkstoffen, nach [69]. 34

Abb. 2-22: (oben) Festigkeitsverteilung von Keramik und (unten) Ausfallwahrscheinlichkeit bei unterschiedlichen Festigkeiten für Keramik und Metall, nach [72, 73] 37

Abb. 3-1: Probenbezeichnung. 38

Abb. 3-2: (a) Formkasten für Zylinderproben, (b) Formkasten für Biegeriegel [75], (c) Heizplatte für Zylinderproben und (d) Flügelmischer mit Fassungsvermögen 5 l. 40

Abb. 3-3: (l) Biegeriegel, (r) zylindrische Probenkörper. 41

Abb. 3-4: Hasco Temperaturregelung (a), Kernschießmaschine Röperwerk (b) und (c) WLB Lüber Begasungsgerät. 42

Abb. 3-5: (l) Labormikrowelle, (r) Probenanordnung. 43

Abb. 3-6: (l) Hoffmann Trockenofen am ÖGI, (r) Hoffmann Versuchsofen bei Nemak Linz. 44

Abb. 3-7: Digitales Mehrkanaliges - Temperaturmessgerät PCE-T 390, für K-Typ, J-Typ und Pt100 Temperaturfühler. 45

Abb. 3-8: (l) schematische Darstellung von Kernkasten mit positioniertem Thermoelement, (r) gebohrter Biegeriegel für Kerntemperaturmessungen. 46

Abb. 3-9: Abkühlverhalten von geschossenen Biegeriegeln bei den Herstellparametern 180°C (l) und 220°C (r). 46

Abb. 3-10: Aufheizprofile für Biegeriegel bei oxidierender Atmosphäre (l) und Zylinderproben (r). 47



Abb. 3-11: (a) & (b) Biegeriegelpositionierung im WBH-Korb, (c) & (d) Zylinderpositionierung im WBH-Korb.49

Abb. 3-12: Einstellparameter für oxidierende Auslagerungsversuche bei 200°C von Biegeriegeln bei ÖGI (l) und Nematik (r).50

Abb. 3-13: (a) ummantelte Biegeriegel, (b) vorbereitete Biegerigel in Versuchsvorrichtung, (c) Positionierung der Zylinderproben in Versuchsvorrichtung, (d) ummantelte Zylinderproben in Versuchsvorrichtung.52

Abb. 3-14: (a) Nabertherm N41/13 am ÖGI, (b) Nabatherm N30/85HA bei Nematik Linz, (c) Proberohr und H32 Quarzsand als red. Medium.53

Abb. 3-15: Einstellparameter für reduzierende Auslagerungsversuche von Biegeriegeln bei 200°C am ÖGI (l) und 300°C bei Nematik Linz (r).54

Abb. 3-16: Verdichtbarkeitsmessung durch statisches Pressen nach volumetrischer Dosierung bei konstanter Ausgangshöhe [79].58

Abb. 3-17: Universalprüfmaschine (l) Zwick/Roell-Z005 und (r) Zwick/Roell-Z050.60

Abb. 3-18: (a) Biegefestigkeit, (b) Druckfestigkeit, (c) Doppelscherfestigkeit und (d) Spaltfestigkeit.61

Abb. 3-19: Zug-Prüfkörper für Georg Fischer Zugprüfung mit einem Prüfquerschnitt von 22,3 mm x 22,3 mm.61

Abb. 3-20: Exsikkator für Lagerung anorganischer Proben.62

Abb. 3-21: Verlauf der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit sowie der Temperatur in Sandlabor (ÖGI).62

Abb. 3-22: Bewegungsbahnen der senkrecht einfallenden Primärelektronen der Streubirne63

Abb. 3-23: Schematischer Aufbau eines REM [85]63

Abb. 4-1: Verdichtbarkeit gebundener und nicht gebundener Formstoffe.65

Abb. 4-2: Durchbiegung von Hotbox Proben nach 400°C bei oxidierenden Bedingungen.68

Abb. 4-3: Vergleich mit H32 Coldbox Referenzprobe (jeweils im rechten Bildabschnitt) mit (l) Kerphalit Proben bei 400°C und oxidierenden Bedingungen sowie (r) H32 Betol-Wasserglas Proben bei 400°C und oxidierenden Bedingungen.70

Abb. 4-4: (a) H32 Coldbox Proben bei 400°C und reduzierenden Bedingungen sowie Kondensatablagerungen, (b) Gegenüberstellung behandelte zu unbehandelte Probe.71



Abb. 4-5: Randschalenausbildung Hotbox-Probe sofort nach dem Schuss entnommen und gebrochen.71

Abb. 4-6: Cerabeads Prüfkörper nach WBH, (a) 200_O2, (b) 200_RED, (c) 300_RED und (d) 400_RED.72

Abb. 4-7: (l) Cerabeads Proben bei 500°C und oxidierenden Bedingungen oben glatte Oberfläche und unten raue Oberfläche mit Druckstellen, (r) H32 Betol-Wasserglas Proben haben Druckstellen nach Biegeprüfung.73

Abb. 4-8: Ausgeprägter Spannungsverlauf bei Cerabeads Betol-Wasserglas Proben ohne Zwischenscheibe.73

Abb. 4-9: (l) Zwischenplatte für höhere Flächenlast, (r) Bruchverlauf von verschiedenen Cerabeads Prüfriegen.74

Abb. 4-10: Spannungsverlauf für Prüfung mit Zwischenscheibe für Cerabeads Betol-Wasserglas Proben.74

Abb. 4-11: (l) Spaltzugfestigkeit mit Lastverteilungsstreifen und (r) ohne Lastverteilungsstreifen für verschiedene Coldbox Proben vor und nach der thermischen Auslagerung75

Abb. 4-12: (a) Kerphalit, (b) Cerabeads, (c) Quarz H3276

Abb. 4-13: (a) Cerabeads Betol-Wasserglas Proben mit ausgeprägtem Bruchverlauf und (b) einem regulären Bruchverlauf.77

Abb. 4-14: (a) H32-WGM3_2,5 Proben mit ausgepr. Bruchverlauf und (b) reg. Bruchverlauf.78

Abb. 4-15: (a) H32-WGM3_2 Proben mit ausgepr. Bruchverlauf und (b) reg. Bruchverlauf.78

Abb. 4-16: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Coldbox in definierten Zeitintervallen.....80

Abb. 4-17: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Warmbox 1 in definierten Zeitintervallen. 81

Abb. 4-18: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Warmbox 2 in definierten Zeitintervallen. 82

Abb. 4-19: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Hotbox in definierten Zeitintervallen.82

Abb. 4-20: Ermittelte Biegefestigkeiten für H32 Wasserglas ASK-Inotec in definierten Zeitintervallen.83

Abb. 4-21: Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Coldbox, (b) H32 Warmbox 1, (c) H32 Warmbox 2 und (d) H32 Hotbox und (e) H32 Wasserglasbinder ASK-Inotec.85



Abb. 4-22: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Coldbox. .88	
Abb. 4-23: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Warmbox 1.	90
Abb. 4-24: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Warmbox 2.	92
Abb. 4-25: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Hotbox.	94
Abb. 4-26: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit Wasserglasbinder ASK-Inotec.	96
Abb. 4-27: Spannungskreis für H32 mit Coldbox bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.	99
Abb. 4-28: Spannungskreis für H32 mit Warmbox 1 bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.....	101
Abb. 4-29: Spannungskreis für H32 mit Warmbox 2 bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.....	103
Abb. 4-30: Spannungskreis für H32 mit Hotbox bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.	105
Abb. 4-31: Spannungskreis für H32 mit Wasserglas ASK-Inotec bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH.....	107
Abb. 4-32: Ermittelte Biegefest. bei RT für H32 mit 2% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen für zwei unter. Herstellmethoden.	109
Abb. 4-33: Trocknungsvergleich mit und ohne Mikrowelle für ermittelte Biegefest. bei RT für H32 mit 2% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen.	109
Abb. 4-34: Ermittelte Biegefest. bei RT für H32 mit 2,5% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen für zwei unter. Herstellmethoden.	111
Abb. 4-35: Trocknungsvergleich mit und ohne Mikrowelle für ermittelte Biegefest. bei RT für H32 mit 2,5% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen.	111
Abb. 4-36: Ermittelte Biegefestigkeiten bei RT für Cerabeads mit 2,5% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen.	112
Abb. 4-37: Ermittelte Biegefestigkeiten bei RT für Kerphalit mit 3% Betol-Wasserglas in definierten Zeitintervallen.	113



Abb. 4-38: Bruchwahrscheinlichkeit für (a) Kerphalit WGM3_3, (b) Cerabeads WGM3_2,5, (c) H32 Quarzsand WGM3_2 und (d) H32 Quarzsand WGM3_2,5. 115

Abb. 4-39: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit 2% Betol-Wasserglas..... 117

Abb. 4-40: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für H32 mit 2,5% Betol Wassergls..... 119

Abb. 4-41: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für Cerabeads mit 2,5% Betol-Wasserglas. 122

Abb. 4-42: (a) Biege-, (b) Druck-, (c) Scher- und (d) Spaltfestigkeit für Kerphalit mit 3% Betol-Wasserglas. 124

Abb. 4-43: Spannungskreis für H32 mit 2% Betol-Wasserglas bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH..... 126

Abb. 4-44: Spannungskreis für H32 mit 2,5% Betol-Wasserglas bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH..... 128

Abb. 4-45: Spannungskreis für Cerabeads mit 2,5% Betol-Wasserglas bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH..... 130

Abb. 4-46: Spannungskreis für Kerphalit mit 3% Betol-Wasserglas bei RT und entsprechende Bruchgeraden nach WBH..... 132

Abb. 4-47: Gegenüberstellung verschiedener Bruchwahrscheinlichkeiten für Zugfestigkeit zu Spaltfestigkeit (a) H32 mit Coldbox, (b) H32 mit Warmbox 1, (c) H32 mit Warmbox 2, (d) H32 mit Wasserglasbinder ASK-Inotec und (e) H32 mit 2% Betol-Wasserglas. 134

Abb. 4-48: Gegenüberstellung der Abhängigkeit Spalt- & Zugfestigkeit zu Druckfestigkeit. 135

Abb. D-1: Druckfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Coldbox, (b) H32 Warmbox 2, (c) H32 Warmbox 1 und (d) H32 Hotbox. 2

Abb. D-2: Scherfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Coldbox, (b) H32 Warmbox 2, (c) H32 Warmbox 1 und (d) H32 Hotbox. 3

Abb. D-3: Spaltfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Coldbox, (b) H32 Warmbox 2, (c) H32 Warmbox 1 und (d) H32 Hotbox. 4

Abb. E-1: Druckfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Wasserglasbinder ASK-Inotec, (b) H32 Quarzsand WGM3_2, (c) Kerphalit WGM3_3, (d) H32 Quarzsand WGM3_2,5 und (e) Cerabeads WGM3_2,5. 2



Abb. E-2: Scherfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Wasserglasbinder ASK-Inotec, (b) H32 Quarzsand WGM3_2, (c) H32 Quarzsand WGM3_2,5, (d) Cerabeads WGM3_2,5 und (e) Kerphalit WGM3_3.3

Abb. E-3 Spaltfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Wasserglasbinder ASK-Inotec, (b) H32 Quarzsand WGM3_2, (c) H32 Quarzsand WGM3_2,5, (d) Cerabeads WGM3_2,5 und (e) Kerphalit WGM3_3.4



A Anhang: Gesamter Probenplan

Tab. A-1: Gesamtübersicht über Anzahl aller Proben und Versuche.

Prüfbedingung	Bindertyp								
	H32						Cerb	AN	
	CB	HB	WB1	WB2	WG	WGM3		WGM3	WGM3
						2	2,5	2,5	3
BF									
200-O2	5	5	5	5	5	20	5	10	5
200-Red	5	5	20	15	10	5	5	10	5
300-O2	5	7	15	5	5	15	5	5	5
300-Red	5	5	10	10	10	5		10	5
400-O2	10	5	5	5	6	10	5	10	5
400-Red	5	5	5	5	5	5		5	4
500-O2	5	5	5	5	5	10		10	5
500-Red	5	5	5	5	5	5			
RT_0,5	6	7	4	5	4	12	13		
RT_1	5	9	9	6	5	18	15		
RT_2	9	6	13	9	8	18	16		
RT_5	9	6	9	8	7	18	15		
RT_10	8	4	11	10	5	19	15	11	5
RT_1J	5	10	5	6					
RT_20	6	7	6	13	11	19	16		
RT_30	5	18	4	12	12	20	19	10	5
RT_60	6	13	34	10	5	22	19	16	6
RT_4Std	14	7	34	6	8	16	18	11	3
RT_1T	35	10	46	42	40	50	27	23	10
RT0_45				2					
RT_1M	15	6	15	11	6	16	10		
RT_2M		5	8						
DF									



200-O2	10	5	5	5	5	5	5	5	5
200-Red	10	5	5	10	5	5	5	5	5
300-O2	10	5		5	5	5	5	5	5
300-Red	10	5	5	5	5	5	5	5	5
400-O2	10			5	5	5	5	5	5
400-Red	10				6			5	5
500-O2	5							5	5
500-Red	5								
RT_1T	25	10	12	13	13	24	22	10	10
DS									
200-O2	10	5	5	5	5	5	5	5	5
200-Red	5	5	5	10	5	5	5	5	5
300-O2	5	5	5	5	5	5	5	5	5
300-Red	5	5	5	5		5	5	5	5
400-O2	5			5	5	5	5	5	5
400-Red	5				5			5	5
500-O2	5							5	5
RT_1J	11								
RT_1T	12	11	10	17	12	18	20	12	11
RT_1M	4								
SF									
200-O2	5	10	5	5	5	5	5	5	5
200-Red	5	5	10	5	5	5	5	5	5
300-O2	5	5	5	5	5	5	5	5	5
300-Red	5	5	5	5	5	5	5	5	10
400-O2	10				5	5	5	5	5
400-Red	5				5			5	5
500-O2								5	5
RT_1T	11	10	10	11	12	16	16	10	10
ZF									
RT_1J	12								



B Anhang: Bestandteile der verwendeten organischen Binder

Tab. B-1: Auflistung aller Bestandteile für die verwendeten organischen Binder, basierend auf Sicherheitsdatenblättern [90 bis 98].

Binder	Komponenten	Bestandteile	Anteile
WB 1	Harz Furesan 7022	Modifiziertes Furanharz	Furfurylalkohol > 50 % Formaldehyd < 0,3 % Glyoxal ca. 2 %
	Härter Furedur 8154	Wässrige Lösung von Phenolsulfonsäure, deren Aluminiumsalzen, Schwefelsäure und organischen Bestandteilen	Aluminiumnitris < 40 % Phenolsulfonsäure < 20 % Schwefelsäure 5-8 %
WB2	Harz Furesan 8885	Modifiziertes Harnstoff-Furan- Phenolharz	Furfurylalkohol < 25,5 % Ethanol < 6 % Formaldehyd < 0,3 % Ethandiol < 1,5 %
	Härter Furedur 8099	Wässrige Lösung von Phenolsulfonsäure und deren Aluminiumsalzen	Phenolsulfonsäure > 10 % Phenol < 1 %



HB	Härter MBT	-	Ammoniumnitrat 10-25 %
	Thermophen 2143	-	Phenol < 2,5 % Formaldehyd < 2,5 %
CB	Askocure 355 Hydro Teil 1	Phenolharzlösung	Phenol 5-8% Formaldehyd < 0,7 % Naphtha 10-25 % Trimethyl-2-cyclohexan 5-10 %
	Askocure 655 Hydro Teil 2	Isocyanatzubereitung	Diiphenylmethan 75-90% Naphtha 10-25 %
	Katalysator 706	tertiäres Amin	-Dimethylpropylamin 95-99 %



C Anhang: Bestandteile der verwendeten anorganischen Binder

Tab. C-1: Auflistung aller Bestandteile für die verwendeten anorganischen Binder, basierend auf Sicherheitsdatenblättern [99 bis 101].

Binder	Komponenten	Bestandteile	Anteile
ASK Inotec	Inotec Promotor EP 4044	Additiv	Zubereitung auf Basis natürlicher und mineralischer Feststoffe
	Inotec 4158	Modifiziertes Silikatbindergemisch	Kieselsäure 25-50 % Natriumhydroxid 1-2 %
WG	Betol 39T	Modul 3,2	Kieselsäure, Natriumsalz < 40 %



D Anhang: Bruchwahrscheinlichkeit Organik

D.1 Druckfestigkeit

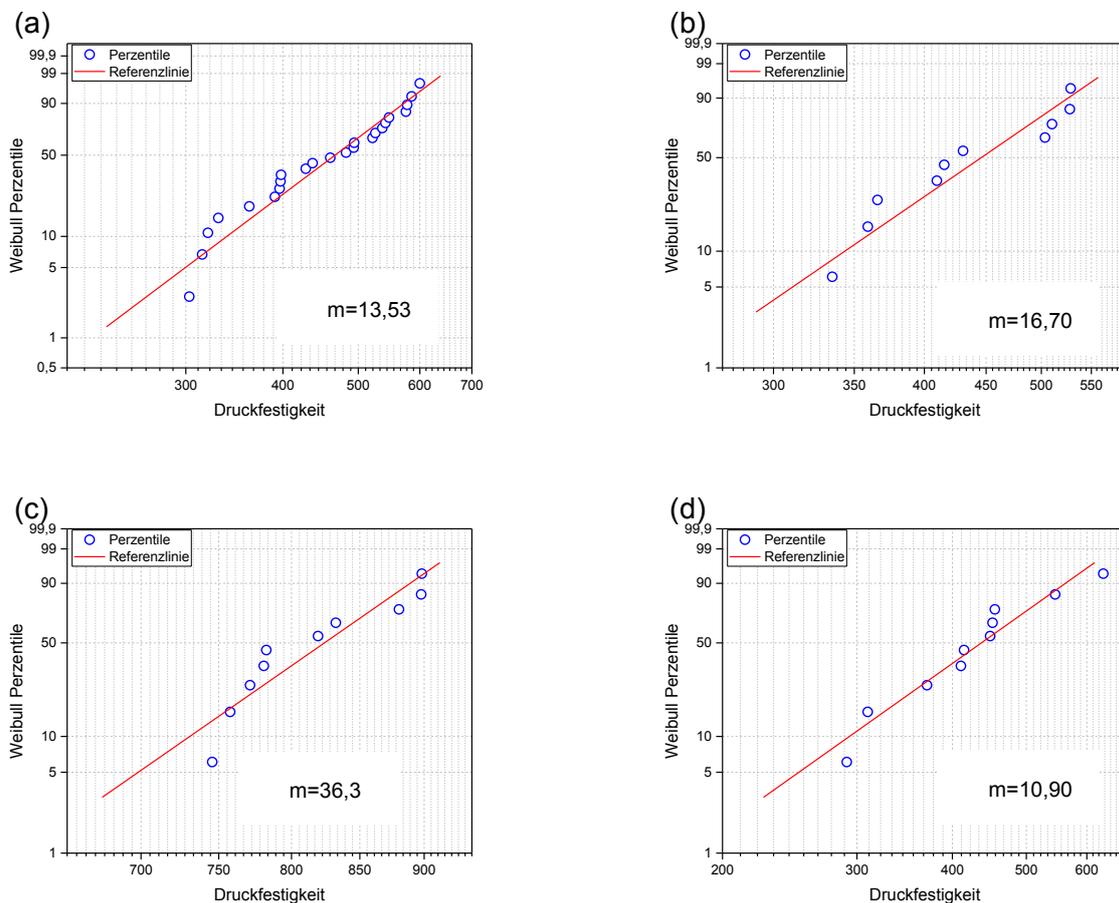


Abb. D-1: Druckfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Coldbox, (b) H32 Warmbox 2, (c) H32 Warmbox 1 und (d) H32 Hotbox.

D.2 Scherfestigkeit

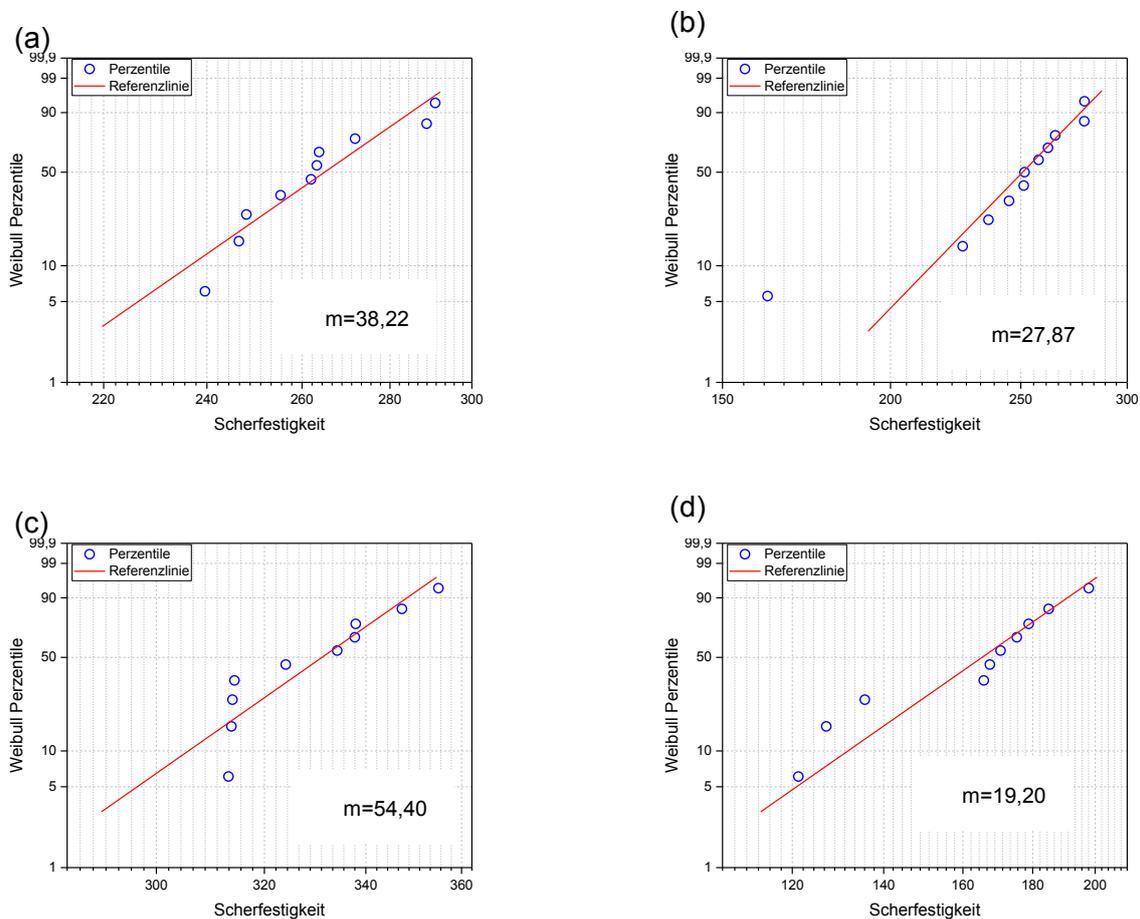


Abb. D-2: Scherfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Coldbox, (b) H32 Warmbox 2, (c) H32 Warmbox 1 und (d) H32 Hotbox.

D.3 Spaltfestigkeit

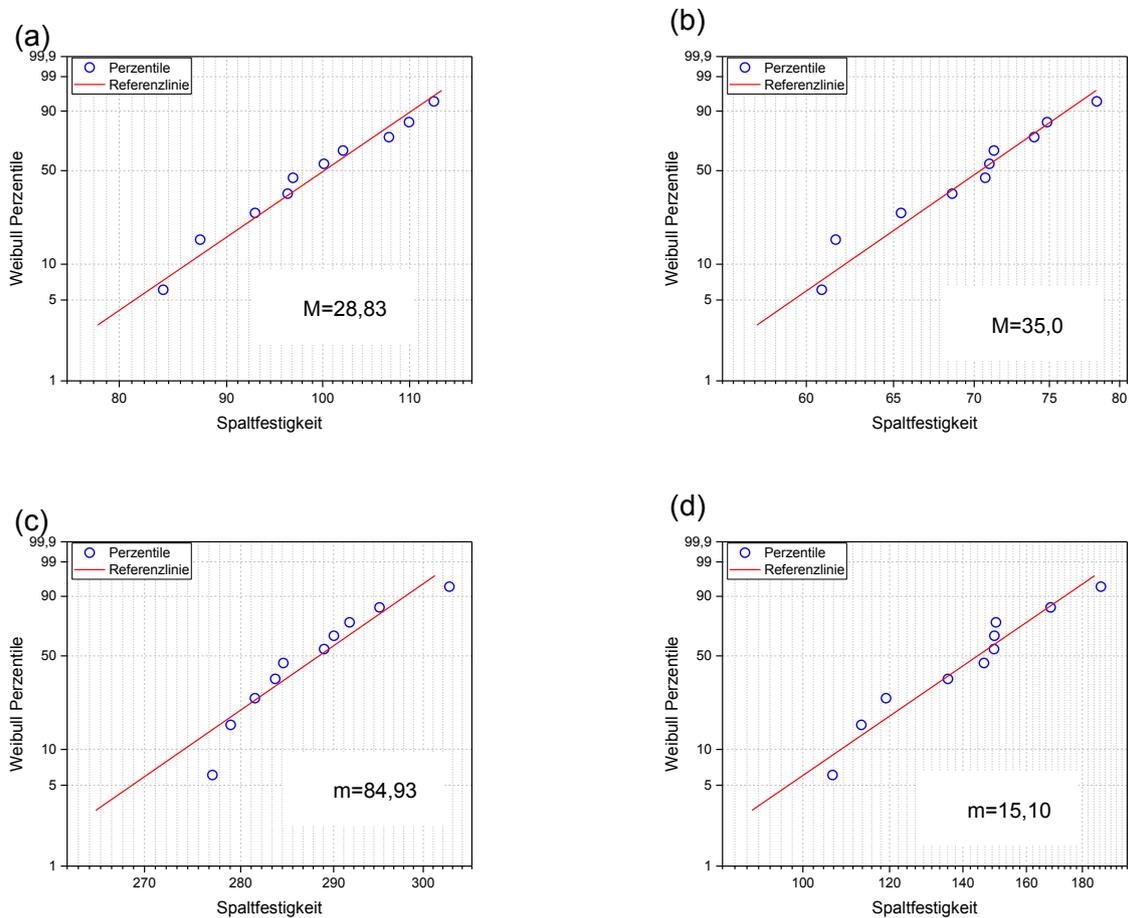
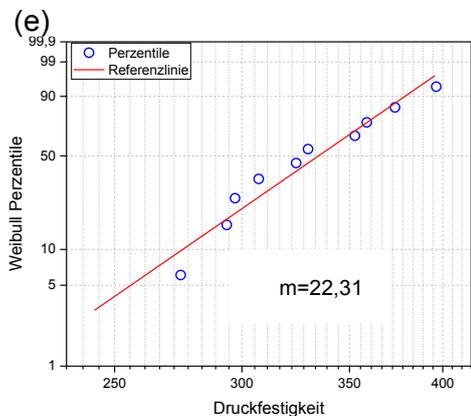
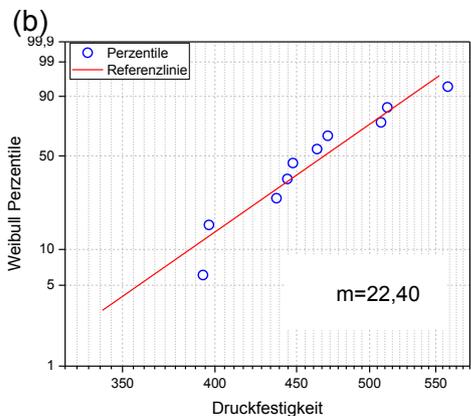
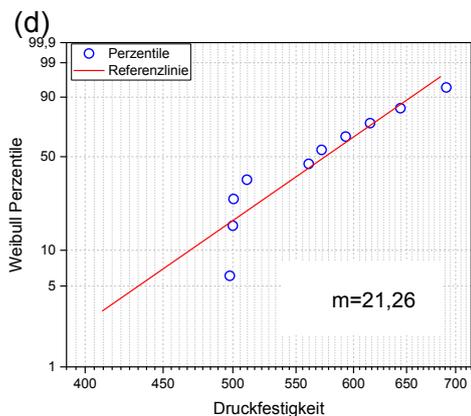
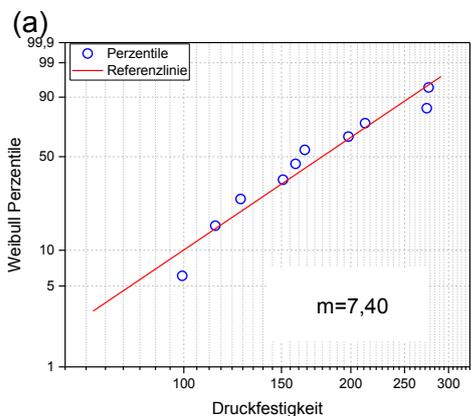


Abb. D-3: Spaltfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Coldbox, (b) H32 Warmbox 2, (c) H32 Warmbox 1 und (d) H32 Hotbox.



E Anhang: Bruchwahrscheinlichkeit Anorganik

E.1 Druckfestigkeit



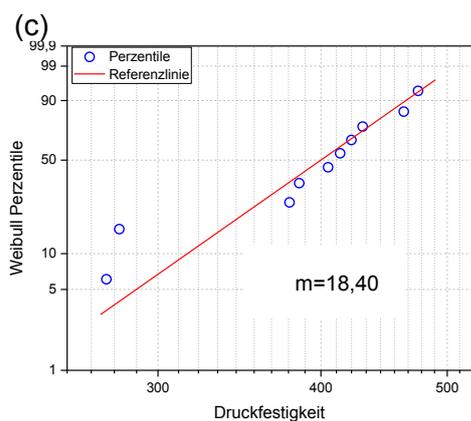


Abb. E-1: Druckfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Wasserglasbinder ASK-Inotec, (b) H32 Quarzsand WGM3_2, (c) Kerphalit WGM3_3, (d) H32 Quarzsand WGM3_2,5 und (e) Cerabeads WGM3_2,5.

E.2 Scherfestigkeit

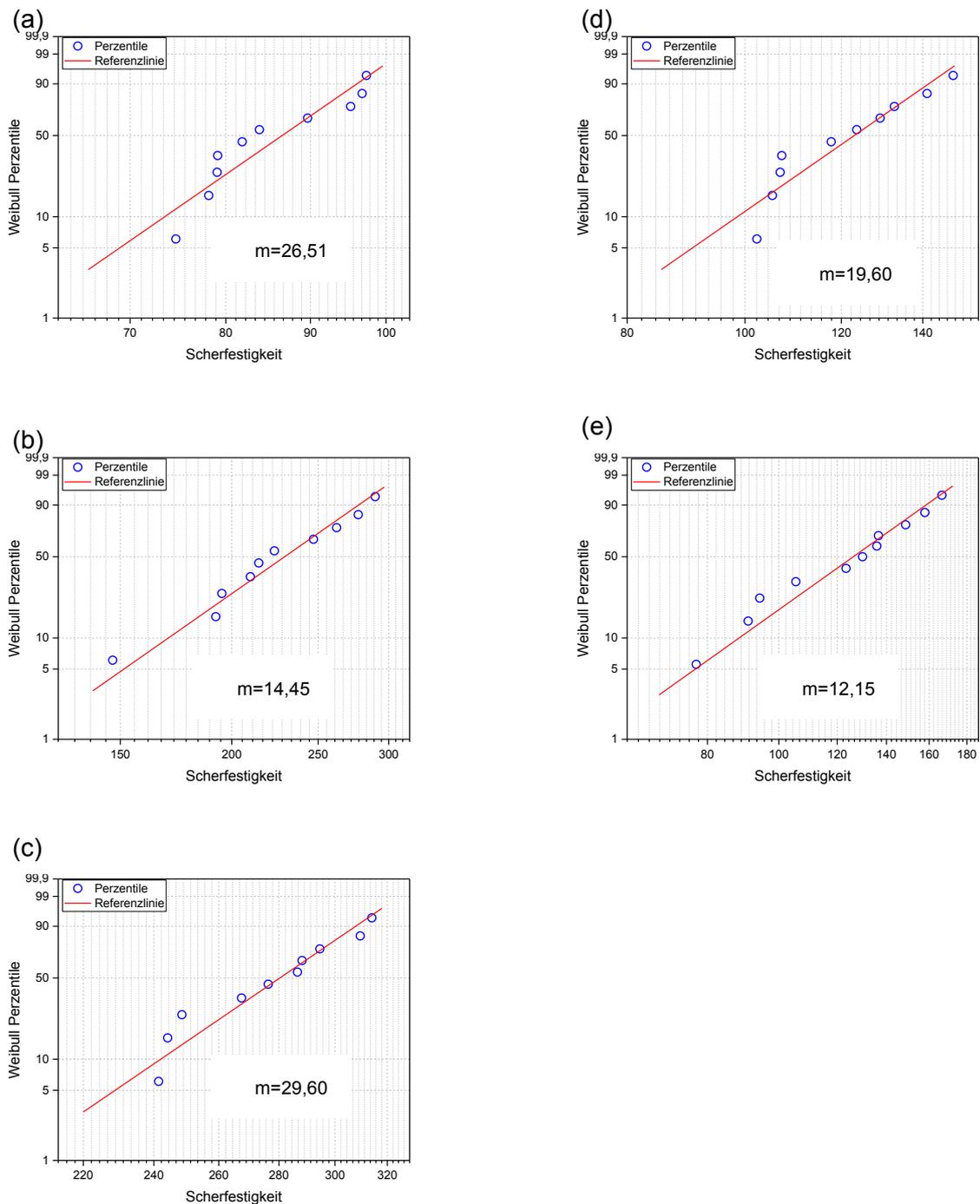


Abb. E-2: Scherfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Wasserglasbinder ASK-Inotec, (b) H32 Quarzsand WGM3_2, (c) H32 Quarzsand WGM3_2,5, (d) Cerabeads WGM3_2,5 und (e) Kerphalit WGM3_3.

E.3 Spaltfestigkeit

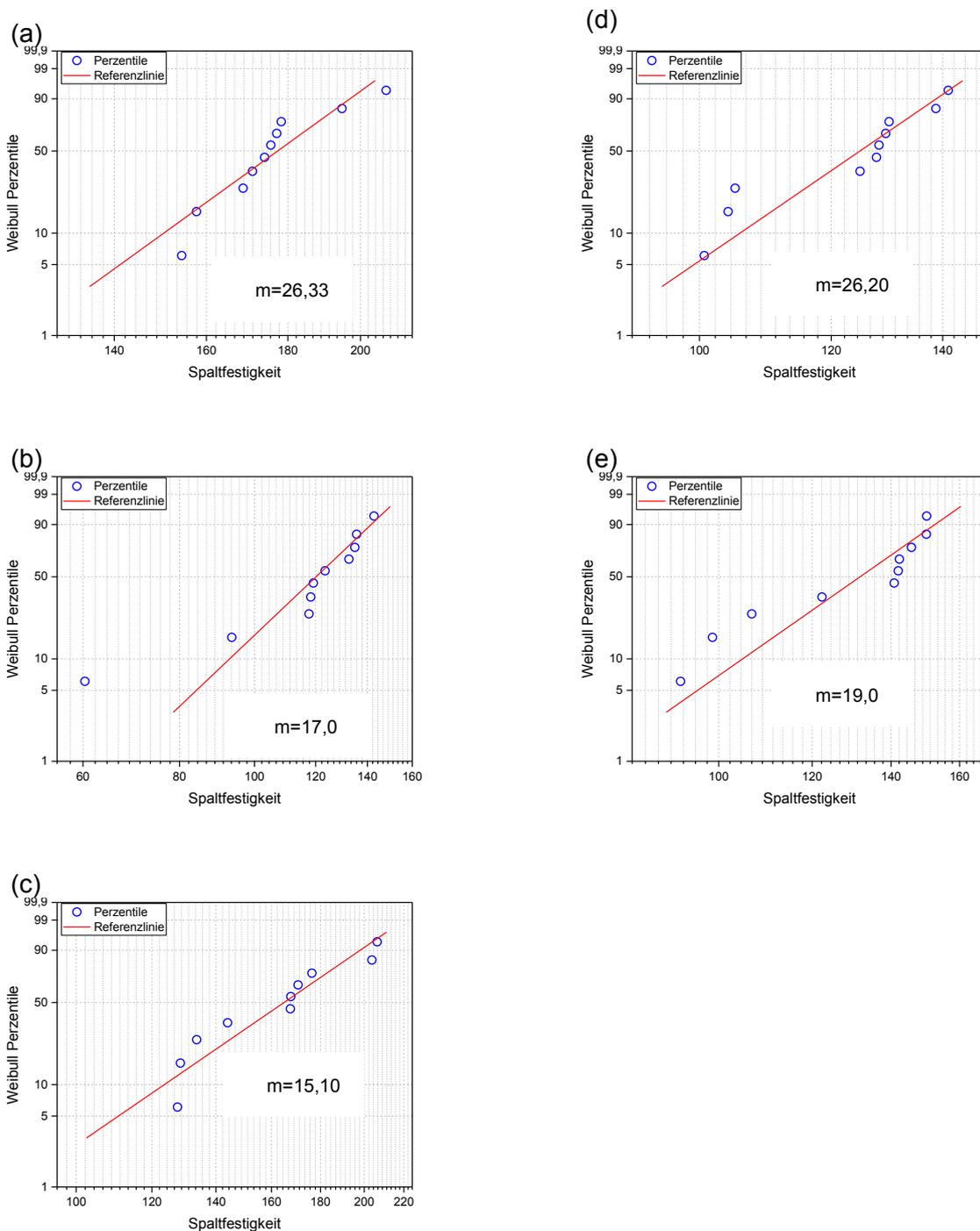


Abb. E-3 Spaltfestigkeit- Bruchwahrscheinlichkeit für (a) H32 Wasserglasbinder ASK-Inotec, (b) H32 Quarzsand WGM3_2, (c) H32 Quarzsand WGM3_2,5, (d) Cerabeads WGM3_2,5 und (e) Kerphalit WGM3_3.



Akronyme

BF	Biegefestigkeit
DF	Druckfestigkeit
BSD	Back-Scattered-Detektor
DS	Doppelscherfestigkeit
E-Modul	Elastizitätsmodul
ggf.	Gegebenenfalls
SF	Spaltfestigkeit
Hrsg.	Herausgeber
CB	Coldbox
WB1	Warmbox 1
WB2	Warmbox 2
Cerb.	Cerabeads
MPa	Einheit der Zugfestigkeit
WG	ASK Inotec
WG.	Wasserglas
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
u.	und
Ver.	Version
WBH	Wärmebehandlung
z.B.	Zum Beispiel