

Diplomarbeit

**Untersuchungen zur Bindung keramischer
Schleifkörper**

verfasst von

Cigdem Akcay

eingereicht am

Lehrstuhl für Gesteinshüttenkunde
an der Montanuniversität Leoben

Leoben, 20 März 2010

Eidesstattliche Erklärung

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

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.Mont. Harald Harmuth, der diese Diplomarbeit möglich gemacht hat.

Dank gilt auch Diplom Ing. Nathalie Kölbl für das Korrekturlesen.

Größter Dank gilt meinen Eltern für die Ermöglichung dieses Studiums an der Montanuniversität und die finanzielle Unterstützung.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Festigkeiten, E-Modul und Porosität von keramisch gebundenen Schleifscheiben in Abhängigkeit der Lagerart und Lagerdauer untersucht. Die Lagerung fand jeweils im Behälter und im Sack statt, die Lagerzeiten waren unterschiedlich und wiesen folgende Werte auf: 0h, 2h, 6h, 12h, 24h und 48h. Anschließend wurden die Massen zu Zylindern verpresst, getrocknet und gebrannt. Von den jeweiligen Probekörpern wurden Grünfestigkeit, Druckfestigkeit nach dem Trocknen, Druckfestigkeit nach dem Brennen, Rohdichte, E-Modul aus Schalllaufzeit und Porosität und Dichte nach Pukall ermittelt.

Die Proben zeigten eine Rohdichte zwischen $2,07-2,11\text{g/cm}^3$ und eine Porosität von zwischen 39%-43,8%. Die niedrigste Porosität wurde bei Rezeptur 14 und die höchste bei Rezeptur 4 gemessen.

Die Proben wiesen E-Module zwischen 21-36% auf. Der niedrigste E-Modul wurde bei Rezeptur 14 und der höchste bei Rezeptur 4 und Rezeptur 5 gemessen.

Die Untersuchungen der Festigkeiten zeigen, dass Rezeptur 5 im Vergleich zu allen anderen Rezepturen bei jeder Lagerdauer immer sehr gute Festigkeiten aufweist. Rezeptur 5 enthält als Bindemittel eine Mischung aus Komponenten Harnstoff-Formaldehyd-Harz, Dextrin Pulver und Wasser.

Die höchste Grünfestigkeit von $1,66\text{MPa}$ konnte mit Variante R6 (Dextrinpulver, Pulverharz und Harnstoff-Formaldehyd-Harz) bei Behälterlagerung bei einer Lagerdauer von 48h, die höchste Festigkeit nach dem Trocknen von 15MPa mit Variante R5 bei Behälterlagerung mit einer Lagerdauer von 6h und die höchste Festigkeit nach dem Brennen von $107,3$ mit Variante R6 bei Sacklagerung bei einer Lagerzeit von 2h erreicht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	PROBLEMSTELLUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	2
2.1	ALLGEMEINES	2
2.2	AUFBAU KERAMISCHER SCHLEIFSCHEIBEN.....	2
2.2.1	<i>Körnung</i>	2
2.2.2	<i>Korngröße und Kornzusammensetzung</i>	2
2.2.3	<i>Härte</i>	3
2.2.4	<i>Gefüge und Struktur</i>	4
2.3	KERAMISCHE BINDEMITTEL FÜR SCHLEIFSCHEIBEN	4
2.3.1	<i>Eigenschaften und Aufgaben der keramischen Bindungen</i>	4
2.3.2	<i>Rohstoffe keramischer Bindungen</i>	5
2.3.3	<i>Arten von keramischen Bindungen</i>	5
2.4	SCHLEIFMITTEL	8
2.5	TEMPORÄRE BINDEMITTEL	10
2.5.1	<i>Arten von Temporäre Bindemitteln</i>	10
2.6	HERSTELLUNG VON SCHLEIFSCHEIBEN.....	14
2.6.1	<i>Rezeptur</i>	14
2.6.2	<i>Mischung und Verdichtung</i>	14
2.6.3	<i>Trocknung</i>	15
2.6.4	<i>Brand</i>	15
3	DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN	16
3.1	HERSTELLUNG UND PRÜFUNG.....	16
3.2	ERGEBNISSE	19
3.3	INTERPRETATION DER ERGEBNISSE.....	27
4	VERZEICHNISSE	29
4.1	LITERATUR.....	29
5	ANHANG	32

1 Problemstellung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Auswahl eines geeigneten Bindemittelregimes zur Herstellung von Schleifscheiben. Dafür werden Zylinderproben mit unterschiedlichen Rezepturen hergestellt, wobei sowohl die Art als auch die Menge der Bindemittel variiert wird. Da für den Herstellungsprozess auch die Lagerbarkeit der Mischung eine bedeutende Rolle spielt, wird jede Mischung zusätzlich für 2h, 6h, 12h, 24h und 48h gelagert und erst anschließend verpresst. An diesen Proben werden folgende physikalische Eigenschaften bestimmt: Druckfestigkeit (Grünfestigkeit, Druckfestigkeit nach dem Trocknen, Druckfestigkeit nach dem Brennen), Grünrohichte und E-Modul. Basierend auf diesen Ergebnissen soll schließlich das für den Produktionsprozess am besten geeignete Bindemittelregime ermittelt werden.

2 Stand der Technik

2.1 Allgemeines

Eine Schleifscheibe ist ein aus gekörnten Schleif- und Bindemitteln hergestellter rotationssymmetrischer Körper, der in eine Schleifmaschine eingespannt wird und bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten Metall, Holz, Glas und anderes Material durch feine Spanabhebung bearbeitet [1]. Keramische Schleifscheiben werden für Schleifprozesse benötigt, die hohe Präzision erfordern. Anwendungsgebiete sind das Schleifen von Getriebezahnrädern, Kurbelwellen und Nockenwellen in der Automobilindustrie sowie das Schleifen von Turbinenschaufeln für Flugzeugtriebwerke und Gas- und Dampfturbinen [2].

2.2 Aufbau keramischer Schleifscheiben

2.2.1 Körnung

Korund- und Siliziumkarbidkörnungen treten in folgenden verschiedenen Kornformen auf: Rhomboeder, Hexaeder (kubisch, blockig, würfelig), Oktaeder, Tetraeder, Pyramiden, Trapezoeder, Prismen. Die Winkel der Schneidkanten sind für Standfestigkeit und Leistung verantwortlich. Je spitzer ein Winkel ausgebildet ist, desto leichter bricht die Spitze und desto geringer ist die Schneidkraft. Je stumpfer der Winkel ist, desto beständiger ist die Spitze und umso größer ist die Schnittkraft und Stabilität [3].

2.2.2 Korngröße und Kornzusammensetzung

Die Korngrößen werden durch Siebung und Schlämmlung ermittelt und nach dem amerikanischen Standard ASTM in „Mesh“ (Siebmaschenzahl pro Zoll) angegeben. Schleifkörper werden nicht aus Einzelkörnungen, sondern aus Körnungsmischungen hergestellt. Es werden Mischungen von zwei, drei, vier und mehr Körnungen in den verschiedensten Verhältnissen verwendet. Auch die Zugaben von Überkörnungen und feinen Stützkörnungen sind üblich. Änderungen der Korngrößenverteilung in Schleifkörpern beeinflussen die Schleifeigenschaften maßgeblich [3].

Durch die Eigenschaftsänderung des Schleifkörpers und seiner Schleifwirkung wird die Verbesserung der Bindung, Sprengfestigkeit, Bruchfestigkeit, Kantenhaltigkeit, Standzeit, Zerspanungsleistung, Schnittkräfte und Oberflächenrauigkeit des Werkstücks erreicht. In Tabelle 1 ist eine abgestufte Einteilung der Korngrößen dargestellt:

Tabelle 1: Korngrößeneinteilung (aus [3])

Körnung	Siebbereich [Mesh]
sehr grob	6, 8, 10, 12
grob	14, 16, 20, 22, 24
mittel	30, 36, 40, 46, 50, 60
fein	70, 80, 90, 100
sehr fein	120, 150, 180, 220

2.2.3 Härte

Die Härte eines Schleifkörpers ist nach DIN ISO 525 ein vereinbarungsgemäß festgelegter Buchstabenkennwert von [A] sehr weich bis [Z] sehr hart (Tabelle 2). Klassische Definition für die Härte ist der Widerstand, den ein Schleifkorn dem Ausbrechen aus dem Bindungsverband entgegensetzt. Die Härte einer Schleifscheibe ist sehr komplex und wird nicht nur durch den Bindungsanteil bestimmt, sondern resultiert auch aus Kornverschnitt, Bindungsart, Pressverdichtung und Gefügestruktur. Die Prüfung der Härte kann durch Stichel-, Schlag-, Druck-, Gebläse- oder akustische Verfahren erfolgen [4].

Tabelle 2: Härtegradtabelle (Buchstabenhärte) nach DIN ISO 525

äußerst weich	A	B	C	D
sehr weich	E	F	G	
weich	H	I	J	K
mittel	L	M	N	O
hart	P	Q	R	S
sehr hart	T	U	V	W
äußerst hart	X	Y	Z	

2.2.4 Gefüge und Struktur

Die Struktur einer Schleifscheibe wird nach DIN ISO 525 als Zahlenwert definiert, wobei eine niedrige Zahl ein geschlossenes, dichtes Gefüge und eine hohe Zahl ein offenes, poröses Gefüge bedeuten (Tabelle 3):

Tabelle 3: Zahlenwerte zur Definition der Struktur nach DIN ISO 525

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
geschlossenes					dichtes					offenes					poröses Gefüge				

Das Gefüge einer Schleifscheibe ergibt sich aus seiner Rezeptur und den Herstellungsbedingungen. Die größten Veränderungen des Gefüges können durch Pressdruckveränderungen, höhere Verdichtung oder durch Zugabe von zusätzlichen Porenbildnern bewirkt werden. Als Porenbildner werden organische Ausbrennmaterialien (Kunststoffgranulate, körnige Naturprodukte, Wachse, Naphtalin u.ä) oder auch anorganische nicht ausbrennbare Stoffe (Hohlkugelkorund, Glaskugeln) verwendet. Die Zugabe der ausbrennbaren Porenbildner erfolgt meist zu Schleifscheiben mit keramischer Bindung, da diese beim Sintervorgang rückstandsfrei ausbrennen können [4].

2.3 Keramische Bindemittel für Schleifscheiben

Zu den keramischen Bindemitteln zählen Tone, Feldspate, Kaolin, Quarz und Porzellanmehl, Glasfritten und Kalkspat. Die Schleifmittelkörner sind durch angesinterte Bindungspartikel miteinander verklebt. Zur Erzielung ausreichender Schleifwerkstoffeigenschaften und Festigkeiten müssen relativ hohe Mengen an Bindemittel und hohe Brenntemperaturen angewendet werden. Durch die Zugabe von gemahlener Glasfritten erreicht man eine wesentliche Verbesserung des Schmelzverhaltens und somit eine bessere Einbindung der Schleifkörner mit höheren Basisfestigkeiten bei geringerem Bindungsanteil und ökonomisch günstigeren Brenntemperaturen [4].

2.3.1 Eigenschaften und Aufgaben der keramischen Bindungen

Keramische Bindemittel haben die Aufgabe, die Schleifmittelkörner aneinander zu binden und so die Form der Schleifscheibe zu gewährleisten. Darüber hinaus sind auch Eigenschaften der Schleifscheibe der Bindung zuzuordnen. Dazu zählt z.B. die Selbstschärfung. Darunter versteht man, dass verbrauchte und stumpfe Schleifmittelkörner aus der Bindungsmatrix ausbrechen können, um eine hohe Abtragsrate zu gewährleisten. Das ist eine wesentliche Eigenschaft der

Schleifscheibe. Auch die Festigkeit und die Sicherheit gegen Schleifscheibenbruch sind als Aufgaben der Bindung zu nennen. Das keramische Bindemittel trägt jedoch nicht zum Schleiferfolg bei, sondern kann sogar schädlich beim Schleifvorgang wirken, weshalb der Bindemittelgehalt in der Schleifscheibe so gering wie möglich gehalten werden sollte. Die schädigende Wirkung des Bindemittels entsteht durch eine erhöhte Reibung zwischen Schleifscheibe und Werkstoff [6].

2.3.2 Rohstoffe keramischer Bindungen

Zu den Hauptbestandteilen eines keramischen Bindemittels zählen Tone, Kaolin, Feldspat, Quarz und Porzellanmehl, Kalkspat, Eisenoxid und Glasfritten [5,6]. Tone und Kaoline verleihen durch ihre Plastizität der noch ungebrannten Schleifscheibe ein plastisches Verhalten und erhöhen damit die Rohbruchfestigkeit. Bei Brand wandeln sich Tonsubstanzen in Abhängigkeit der Brenntemperatur in Aluminiumsilikate um. Tone mit hohem Aluminiumoxidgehalt wirken sich vorteilhaft auf das Schwindverhalten während des Brands aus.

Feldspat und Glasfritten sind die glasphasenbildenden Bestandteile der Bindung. Die Mahlfeinheit des Feldspates sowie der Glasfritten beeinflusst die Bruch- und Kantenfestigkeit [3].

Quarz ist der Hauptbestandteil von keramischen Bindungen. Als Quarzminerale werden in der Keramik vorwiegend Quarzite und Sande verwendet [7] Quarz ist für die Zähigkeit der Schleifscheibe mitverantwortlich. Bei Brenntemperaturen über 1200° C kommt es zu Modifikationswechsel des Quarz [8].

2.3.3 Arten von keramischen Bindungen

Bei keramischen Bindungen können drei Arten unterschieden werden:

Amorphe Bindung: Schmelzbindungen mit hohem Glasphasenanteil

Die Herstellung von Schleifscheiben mit glasig-amorphen Bindungen erfolgt bei niedrigeren Temperaturen als bei jenen mit Sinterbindung. Die Bindekraft entsteht durch eine niedrig viskose Glasphase, welche das Schleifmittel umschließt [8]. Bei steigendem Glasphasenanteil sinken Zähigkeit, Viskosität und der E-Modul der reinen Bindung [10].

Keramische Schleifscheiben mit unterschiedlichen Glasphasenanteilen weisen ähnliche E-Module auf, während die Zeiss-Mackensen Härten variieren [5]. Bei der Bestimmung der Härte nach Zeiss-Mackensen wird der Prüfkörper mit einem Strahlmedium (z. B.: Quarzsand) pneumatisch bestrahlt. Durch den Aufprall des Strahlmediums auf die Schleifkörperoberfläche werden Korn- und Bindungspartikel aus dem Verbund herausgelöst und es entstehen Vertiefungen auf der Schleifkörperoberfläche. Je weicher der Schleifkörper ist, desto tiefer sind die

entstehenden Vertiefungen [11]. Mit steigendem Anteil der Glasphasen wird die Abrichtbarkeit, Nachbearbeitung der Maßhaltigkeit, verbessert und die Profilhaltigkeit steigt [9].

Bindungen mit mittlerem Glasphasenanteil

Durch die hohen Temperaturen bei der Sinterung kommt es zu Feststoffreaktionen und zur Neuordnung des Gefüges. Beide sind für die Bindekraft verantwortlich. Während des Sintervorgang kommt es zu Verdampfungs- und Kondensationsvorgängen der Bindungskörner, die dann zu Sinterhälsen zwischen den einzelnen Schleifmittelkörner anwachsen. Durch dieses Wachstum entsteht eine feste Bindung der Schleifmittelkörner untereinander [10].

Porzellanartig sinternde Bindungen: Sinterbindung mit geringem oder keinem Glasphasenanteil [3,5].

Porzellanartig sinternde Bindungen weisen einen höheren Anteil an Netzwerkbildnern und einen niedrigeren Anteil an Netzwerkwandlern als glasigamorph schmelzende keramische Bindemittel auf.

Die Beurteilung des keramischen Bindemittels erfolgt indirekt über die Prüfung der Schleifscheibe. Die Bindungskraft wird über die Bruchgeschwindigkeit, die Bindungsart über Erhitzungsmikroskopaufnahmen und die Qualität des keramischen Bindemittels über Differential-Thermoanalyse bestimmt. Als Qualität ist hier die Reinheit, also ein möglichst geringer Grad an organischen Verunreinigungen, zu verstehen.

Ob eine glasig schmelzende Bindung oder eine porzellanartig sinternde Bindung in einer Schleifscheibe verwendet wird, hängt von der Art des Schleifmittels ab [5]. Bestimmte Sinterkorunde werden zum Beispiel von Alkali-Silikaten angegriffen. Natrium und Silizium können in das Schleifmittelkorn diffundieren und durch die hohe Temperatur beim Brennen der Schleifscheibe ein Kornwachstum hervorrufen. Durch dieses Kornwachstum wird jedoch die selbstschärfende Eigenschaft des Schleifkorns negativ beeinflusst. Deswegen werden bei Sinterkorunden alkaliarme, bei niedrigen Temperaturen schmelzende, Schmelzbindungen verwendet [9].

Während des Brennprozesses kommt es bei diesen Keramiken zur Bildung von Schmelzphasen, die während der Abkühlung infolge ihrer hohen Viskosität nicht kristallisieren und daher noch im Endprodukt in Form von Glasphasen auftreten [7].

Über die Art und die chemische Zusammensetzung der Glasphasenbildner (Fritte) lässt sich das thermische Bindungsverhalten beeinflussen [9]. In Tabelle 4 sind verschiedene Zusammensetzungen keramischer Bindungen dargestellt, welche verschiedene Schmelz- und Sintertemperaturen aufweisen. Abbildung 1 zeigt die Schmelzkörperformen zu den in Tabelle 4 angeführten Bindungszusammensetzungen.

Tabelle 4: Zusammensetzung übliche keramischer Bindungen (aus [5])

Schleifmittel	KORUND				SILICIUMKARBID			
	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO₂	57,20	57,3	55,9	61,10	61,90	59,70	63,40	68,40
Al₂O₃- TiO₂	23,00	26,60	29,70	22,50	25,20	28,70	22,60	21,80
Fe₂O₃	0,77	0,36	0,39	0,33	2,30	0,64	0,56	0,46
BaO	1,25	1,06	1,08	0,5				
CaO	1,65	1,39	1,41	0,94	0,88	0,60	0,86	0,75
MgO	1							
K₂O	0,92	2,69	1,23	7,2	6,34	5,76	9,24	7,61
Na₂O	8,20	6,77	6,65	2,78	2,39	0,59	1,82	
Li₂O	2,33					2,05		
B₂O₃	3,36	2,84	2,90	1,28				
P₂O₅		0,14		0,56	0,43		0,73	0,29
ZnO				2,10				
Mn₂O₃		0,08		0,31	0,20	0,10	0,40	0,23
Rb₂O						1,41		
Gesamt- flussmittel	19,80	16,10	14,40	16,40	12,90	11,60	14,00	9,80

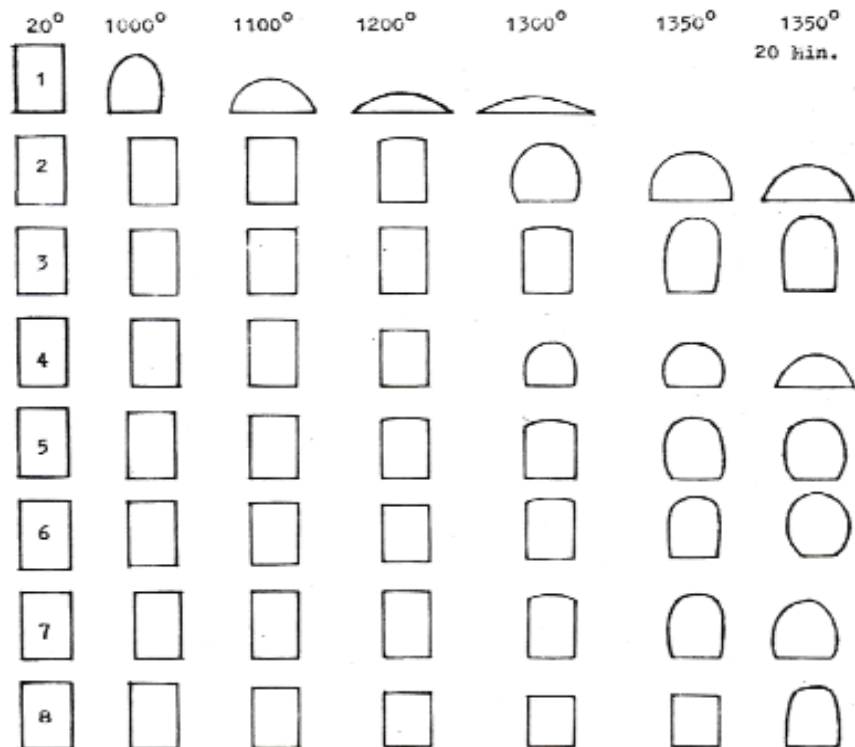


Abbildung 1: Darstellung der Schmelzkörperformen der in Tabelle 4 gegebenen Zusammensetzung üblicher keramische Bindungen [5]

2.4 Schleifmittel

Nachfolgende Schleifmittel werden für die Herstellung keramisch gebundener Schleifscheiben verwendet [9]:

Normalkorund

Normalkorund wird durch Schmelzen von Bauxit in Elektroöfen bei ca. 2000°C gewonnen. Das Korn ist sehr kompakt und porenfrei. Die Farbe wird durch Zusätze von TiO_2 und MgO beeinflusst, wobei grobe Körnungen bläulich bzw. tiefbraun bis fast schwarz sind. Die feineren Körnungen sind rosa, rotbraun und hellbraun. Normalkorund besitzt weniger Schneidkanten als Edelkorund und Siliziumkarbid und ist hart und sehr zäh.

Edelkorund

Edelkorund ist weiß und wird durch Schmelzen von reiner Tonerde in Elektroöfen bei ca. 2000° gewonnen. Edelkorund weist scharfe Spitzen und Kanten auf und ist z. T. mit feinsten Poren durchsetzt. Er ist hart und spröde. Die Kristalle sind farblos und durchsichtig. Als Verunreinigungen treten SiO_2 und Spuren von CaO und MgO auf.

Edelkorund hellrot und dunkelrot

Edelkorunde mit Cr_2O_3 -Zusätzen von 0,25% sind hellrot, bei Zusätzen von 2,1% Cr_2O_3 dunkelrot. Sie sind sehr hart und zäher als weißer Edelkorund. Als Verunreinigungen treten SiO_2 und Spuren von FeO , CaO und MgO auf.

Halbedelkorund, Bauxitkorund, Semirit

Halbedelkorund wird wie Normalkorund aus titanarmen Bauxitkorund. Hergestellt. Der Gehalt an TiO_2 ist um ca. 2% niedriger als bei Normalkorund und weist. SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO und TiO_2 als Verunreinigungen auf.

Einkristallkorunde

Einkristallkorunde werden aus Sulfidschmelzen gewonnen. Beim Zerreiben der Körnungen entsteht ein deutlicher Geruch nach Schwefelwasserstoff. Die Farben sind grau-weiß und die Eigenschaften dem weißen Edelkorund ähnlich [3].

Mischungen von Korunden

Edelkorunde (weiß, hellrot, dunkelrot), Normalkorunde und Einkristallkorunde sind in beliebigen Verhältnissen mischbar. Bei Mischungen von Korunden werden folgende Einflussgrößen in Scheiben verändert: spez. Gewichte, Kornformen, Kornzähigkeiten, Kornzusammensetzungen, Oberflächenbenetzbarkeiten, Kornhaftungen, Brennfärben, und Festigkeiten. Beim Schleifen ergibt sich hieraus ein unterschiedliches Verhalten

Siliziumkarbide

Siliziumkarbide werden im Widerstandsofen aus einem Gemisch aus Quarzsand, Kohle, Sägemehl und Kochsalz gewonnen. Das Sägemehl dient zur Auflockerung des Gemisches und der Abfuhr von CO . Das Kochsalz ist für den Reinigungsprozess nötig. Es führt Verunreinigungen wie Eisen oder Aluminium in ihre flüchtigen Chloride über. Durch unterschiedliche Prozessführungen können verschiedene Reinheiten, Festigkeiten und Farben entstehen. Es wird zwischen grünem und schwarzem Siliziumkarbid unterschieden. Die schwarze Färbung kommt von Aluminium- oder Aluminiumoxidverunreinigungen. Siliziumkarbid weist verglichen mit anderen konventionellen Schleifmitteln die größte Härte auf und ist außerdem chemisch sehr beständig. Ausnahmen bilden hierbei der Angriff durch Phosphorsäure bei Temperaturen von 200-300°C und Diffusionsvorgänge im Bereich von 1000 - 1600°C. Um eine Oxidationsbeständigkeit beim Brand von Schleifscheiben zu gewährleisten, müssen geeignete Bindemittel verwendet und die spezifische Oberfläche der Siliziumkarbidkörnung verringert werden [9].

Kubisches Bornitrid (cBN)

Kubisches Bornitrid ist ein extrem hartes, thermisch beständiges Schleifmittel, welches anders als die anderen nur in einem Schleifbelag auf einem Grundkörper

eingebunden ist. Bei Temperaturen über 1200°C werden die Schleifkörper mit Boroxid überzogen, welches eine verschleißmindernde Wirkung zeigt. Die Härte ist im Vergleich zu anderen Schleifmitteln um den Faktor 2 höher.

Bei feuchter Luft kommt es ab 1000°C zur Hydrolyse und die Körner werden rissig und narbig. Daher muss auch bei der Produktion von Schleifscheiben darauf geachtet werden, dass Bindungen entweder unter 1000°C schmelzen oder die Luft im Ofen trocken ist [9].

Synthetischer Diamant

Synthetische Diamanten werden unter großem Druck und hoher Temperatur aus Graphit unter Einsatz eines Katalysators hergestellt. Ihre Härte liegt etwa bei der doppelten Härte von Korund und Siliziumkarbid. Im Gegensatz zu diesen beiden Kristallen besteht eine Richtungsabhängigkeit der Härte bei Diamanten. Nachteil der synthetischen Diamanten ist die mögliche Umwandlung zu Graphit bei Temperaturen von über 900°C und niedrigen Drücken sowie ein Verglühen des Diamanten bei 800°C an der Luft. Deswegen ist für die Herstellung der Schleifscheibe mit synthetischen Diamanten als Schleifmittel eine geeignete keramische Bindung oder ein entsprechendes Brandverfahren unter Luftabschluss zu wählen [9].

2.5 Temporäre Bindemittel

Temporäre Bindemittel werden bei der Herstellung für die Formgebung von keramischen Produkten beigemischt. Sie werden während der Mischung der Rohstoffe in kleinen Mengen beigegeben. Das temporäre Bindemittel ist für die Formstabilität des Grünkörpers verantwortlich. Zu Beginn des Brennvorgangs wird das Grünbindemittel ab einer gewissen Temperatur, die je nach Bindemittel unterschiedlich ist, ausgebrannt. Die temporären Bindemittel sollten sich kontinuierlich verflüchtigen und nur geringe Ascherrückstände hinterlassen.

2.5.1 Arten von Temporäre Bindemitteln

Dextrin bzw. Stärkegummi

Dextrine sind Poly- und Oligosaccharidgemische und liegen üblicherweise in Form von weißem bzw. hellgelbem Pulver oder Granulat vor. Sie werden hauptsächlich aus Weizen- und Maisstärke durch trockene Erhitzung unter Säureeinwirkung gewonnen. In Abbildung 2 ist ein Beispiel für die Strukturformel von Dextrin dargestellt.

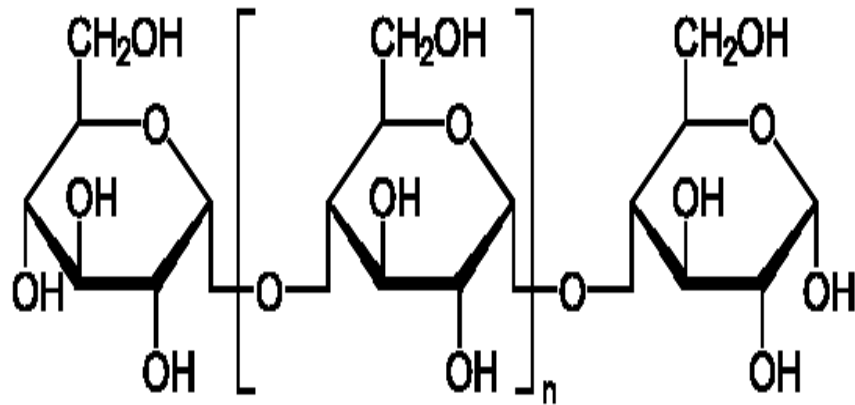


Abbildung 2: Beispiel für Dextrin: Poly-(1-4)-alpha-D-glucose, (aus [12])

Der Wassergehalt von Dextrin liegt je nach Lieferanten bei 12-14%. Es kann ohne speziellen Schutz oder Vorsichtsmaßnahmen verwendet werden. Ab einer Temperatur von über 250°C kommt es zur thermischen Zersetzung.

Dextrin wird bei der Herstellung von Siliziumcarbid-[13], bei hochporösen keramisch gebundenen Schleifscheiben [14], als Grünbindemittel [15], bei der Herstellung von keramisch gebundenen Schleifscheiben mit hoher Dichte [16] und bei der Herstellung imprägnierter Schleifscheiben [17] angewandt.

Stearinsäure

Stearinsäure (n-Octadecansäure) ist eine gesättigte Carbon- und Fettsäure. Sie bildet weiße Blättchen, die aufgrund der langen Kohlenstoffketten nicht mehr wasserlöslich sind. Die allgemeine Summenformel lautet $C_{18}H_{36}O_2$ bzw. $C_{17}H_{35}COOH$. Abbildung 3 zeigt die Strukturform der Stearinsäure.



Abbildung 3: Darstellung der Strukturformel von Stearinsäure (aus [21])

Bei der Verwendung von Stearinsäure werden bei der thermischen Zersetzung reizende Dämpfe freigesetzt. Daher wird bei der Handhabung mit Stearinsäure das Tragen von Schutzbrillen und Handschuhen empfohlen. Der Siedepunkt liegt zwischen 205 - 255°C. Es ist in vielen organischen Lösungen löslich, jedoch nicht in Wasser [28, 29].

Die einzige Anwendung von Stearinsäure wurde in einem Patent für keramisch gebundene Schleifscheiben aus 1990 beschrieben [23]. Es werden hierbei Annahmen getroffen, dass der Anteil des temporären Binders zwischen 5-50% liegen kann. Aufgrund des hohen Volumenanteils, der in den dort angeführten Rezepturen

verwendet wird, entsteht die Vermutung, dass die Stearinsäure hier zumindest auch als Luftporenbildner und nicht nur als Bindemittel eingesetzt wird.

Polycarbonsäure

Zu den wichtigsten Polycarbonsäuren zählen Polyacrylsäuren, Polymethacrylsäuren, Polymaleinsäuren und Mischpolymerisate.

Polycarbonsäure für keramische Schleifscheiben wird in Form einer gelblichen, hoch viskosen Flüssigkeit angewandt. Sie besteht aus 36% Aktivsubstanz und ist in Wasser löslich. [30]

Xanthan Gummilösung

Xantan wird mit Hilfe von Bakterien (Xanthomonas) aus zuckerhaltigen Substraten gewonnen. Dabei entsteht ein weißes Pulver Es ist ein natürliches Verdickungs- und Geliermittel, das in wässriger Lösung aufquillt und die Viskosität dadurch erhöht. Die chemische Summenformel von Xanthan lautet $(C_{35}H_{49}O_{29})_n$ [26]. Abbildung 4 zeigt die Strukturformel von Xanthan.

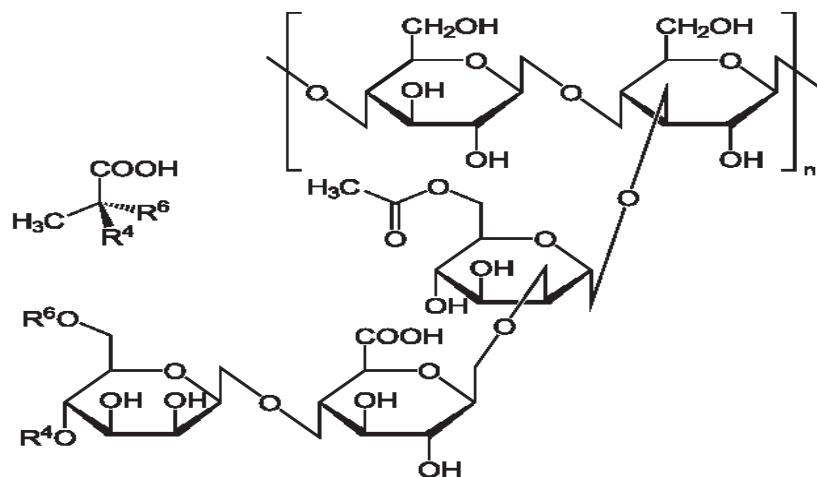


Abbildung 4: Darstellung der Strukturformel von Xanthan(aus [26])

Zur Herstellung einer Xanthan Gummilösung wird das Xanthanpulver mit Wasser vermengt. Dabei entsteht je nach Mischungsverhältnis ein Gummi bzw. gelartiger Konsistenz. Bei der Herstellung von keramisch gebundenen Schleifscheiben in [24] wurde Xanthan-Gummilösung zur Steigerung der Grünfestigkeit im folgenden Mischungsverhältnis verwendet. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für die Anwendung von Xanthan.

0,5% Xanthan gum solution	9,41 cc
Water	9,41 cc
Cubic Boron Nitride (180 grit size)	8,92 g
Fused White aluminium oxide (150 grit)	28,72 g
Fritted, powdered glass bond	13,59 g

Abbildung 5: Anwendung von Xanthan [24]

Kunstharz

Bei Kunstharz gibt es ein großes Spektrum an Materialien, da Kunstharz ein allgemeiner Begriff ist. Kunstharze werden als temporäre Bindemittel von keramisch gebundenen Schleifscheiben in Form von Kohlenwasserstoffharz, Phenolharze und Formaldehydkunstharze eingesetzt [3, 13, 16, 17, 25]. Kohlenwasserstoff-Harz-Lösungen werden aus Alkenen erzeugt. Sie besitzen einen Erweichungspunkt zwischen 5 und 110°C [27].

Bei keramisch gebundenen Schleifscheiben mit Korund wurde Kunstharz als temporäres Bindemittel eingesetzt [25].

Weitere temporäre Bindemittel

Wachsdispersion

Wachsdispersionen sind üblicherweise weiße oder beigefarbene Flüssigkeiten. Sie sind wasserlöslich und besitzen eine Aktivsubstanz von ca. 50% [18, 19, 20]. Bei der Herstellung werden 2,0 bis 8,0% der Wachsdispersion als Anmachflüssigkeit der Masse beigemischt. Diese wird homogen untergemischt und gemäß Herstellerangaben [18] wird im Anschluss daran eine Trocknung des Gemenges bei 70 bis 80° C vorgenommen. Hierbei bildet sich an der Oberfläche eine gleichmäßige Wachsschicht aus, die für die Formgebung Voraussetzung ist [18, 19, 20].

Ethylsilikat

Ethylsilikat $C_8H_{20}O_4Si$ ist eine milchig weiße Flüssigkeit. Der Flammpunkt liegt bei <21°C und es ist mit Ethanol mischbar. Der SiO_2 -Gehalt liegt bei 20% [31]. Abbildung 4 zeigt die Strukturformel von Ethylsilikat.

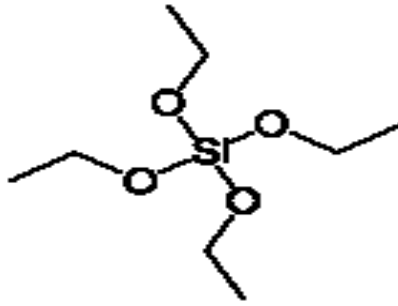


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Strukturformel von Ethylsilikat (Tetraethylorthosilicat) $C_8H_{20}O_4Si$ (aus [22])

2.6 Herstellung von Schleifscheiben

2.6.1 Rezeptur

In der Schleifscheibenindustrie werden meist nur synthetisch hergestellte Korund- oder Siliziumkarbidschleifmittel eingesetzt. Besonders bei den Korundschleifmitteln, stehen je nach Herstellungsverfahren oder Zugabe von Legierungsbestandteilen bzw. Aufbereitungs- und Nachbehandlungsverfahren eine Vielzahl an Schleifkornqualitäten mit modifizierten Eigenschaften zur Erfüllung der unterschiedlichsten Schleifaufgaben zur Verfügung. Korundschleifmittel werden vorzugsweise für die Bearbeitung der Stahlwerkstoffe, und Siliziumkarbid für die Bearbeitung von Sprödwerkstoffen Glas, Keramik, Guss und Nichteisenmetalle eingesetzt [4]. Bei den Rezepturen spielen Bindungsarten, Rohstoffeinsätze und die Mengenverhältnisse von Korn, Bindung, Rohverfestiger und Porenbildner eine wichtige Rolle. Als Porenbildner dienen Naphthalin, Plexiglas, Petrolkoks, Polystyrol u. a. Zusätze, deren Wahl von der Schleifkörperabmessung sowie von der Menge und Größe der gewünschten Poren in der Scheibe abhängt.

2.6.2 Mischung und Verdichtung

Die Mischungen können feuchte, halbfeuchte, und mehr oder weniger trockene rieselfähige Massen sein. Für Hand- und Automatenpressungen gibt es Wachsmischungen, Dextrinmischungen, Wachs - Dextrinmischungen u. a. Alle Mischungen werden gewichts- oder volumenmäßig von Hand oder Automaten in Formen eingefüllt und verteilt. Die Verdichtung der Scheibenmischung erfolgt durch Rütteln, Druck- oder Volumenpressung.

2.6.3 Trocknung

Die Trocknung ist abhängig von den Massen, Abmessungen, Trocknungsöfen, Trocknungstemperaturen, Trocknungszeiten, Luftfechtigkeiten sowie vom Schwindungs-Dehnungsverhalten der Bindungen. Zur Vermeidung ungleicher Trocknungen werden rissempfindliche Scheiben vor dem Trocknen und während des Trocknens gewendet und von Hand abgeschmirgelt, um ein Verstopfen von Porenkanälen zu vermeiden.

2.6.4 Brand

Der Brand keramischer Schleifscheiben erfolgt in Herdwagenöfen, Kammeröfen, Haubenöfen und Tunnelöfen, die mit Gas, Öl, Kohle oder elektrisch beheizt werden. Brand und Ofentyp richten sich nach den Abmessungen der Scheiben sowie nach Bindungszusammensetzungen, Rezepturen und Qualitäten. Farbveränderungen und Fleckenbildungen sind nicht erwünscht. Die beim Brand von Siliziumkarbidscheiben auftretenden schwarzen Kerne sind durch Brand-, Rezeptur- und Bindungsänderungen zu beheben. Das Verhalten von Kaolinen, Tonen, Feldspaten und Glasfritten beim Brand keramischer Bindungen ist in Verbindung mit der Rezeptur für die Qualität der Schleifscheibe von ausschlaggebender Bedeutung [3].

3 Durchführung der Untersuchungen

3.1 Herstellung und Prüfung

Die Probenmasse besteht aus Edelmetall im Korngrößenbereich von 218µm bis 310µm, keramischer Glasfritte und Bindemitteln. Die verwendeten Bindemittel sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die Mengen der zugegebenen temporären Binder für die einzelnen Versuche sind in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 5: Überblick über die Verwendeten Bindemitteln

Komponenten	Beschreibung
A	Maisstärke
B	Dextrin Pulver
C	Pulverharz
D	Harnstoff-Formaldehyd-Harz
E	Betriebs Interne Bindemittel
F	Dextrin Lösung 23°Be
G	Maisstärke Lösung 23°Be
H	Al ₂ (SO ₄) ₃ Lösung 23°Be
I	Na ₂ SO ₄ Lösung 23°Be
J	Wasser

Tabelle 6: Zusammensetzung des Bidemittelregimes

Komponenten [Gew.%]	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
A	+1,0						
B		+2,0	+2,0	+2,0	+2,0	+2,0	+1,5
C					+2,0	+1,0	+2,0
D					+2,8	+2,8	+2,8
E	+3,32						
J		+1,0	+1,5	+2,0			

Komponenten [Gew.%]	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15
A								
B	+2,0	+2,0	+2,0	+2,0	+2,0	+2,0		+2,0
C						+2,0		+2,0
D								
E								
F	+2,0	+1,0				+1,0	+2,0	+2,0
G					+2,0			
H			+2,0					
I				+2,0				
J		+1,0				+1,5		+1,5

3. Durchführung der Untersuchungen

Die Mischung der Komponenten erfolgt nach einer einheitlichen Mischfolgereihen: In einem Mörtelmischer (Abbildung 7) gemäß ÖNORM 196-1 werden zuerst die Körnungen des Edelmetalls miteinander vermischt. Nach einer Minute Mischzeit wird das Grünbindemittel hinzugefügt und weitere zwei Minuten gemischt. Zuletzt wird die Glasfritte beigemischt und weitere vier Minuten gemischt. Diese Mischfolge ist nur im Fall von Rezeptur 14 unterschiedlich, wo die Glasfritte nicht zuletzt, sondern bereits nach den Körnungen des Edelmetalls zugegeben wird. Die angegebenen Zeiten sind Richtwerte und können je nach Qualität (z.B.: Agglomeratbildung) des Mischgutes verändert werden. Nach dem Mischvorgang werden die Mischungen in Säcken und/oder Behältern für 0, 2, 6, 12, 24 und 48h gelagert.



Abbildung 7: Darstellung des Mörtelmischer nach ÖNORM 196-1

Anschließend werden je Mischung neun zylindrische Probenkörper mit einem Durchmesser von 50mm und einer Höhe von 50mm hergestellt. Die Prüfkörper werden mit Hilfe der hydraulischen Presse (Abbildung 8) und einer speziellen Form (Abbildung 9) hergestellt. Die Form wird bis 50mm Höhe mit der Mischung gefüllt und auf Maß verpresst. D.h. der Pressdruck ist nicht vorgegeben, wird aber protokolliert.

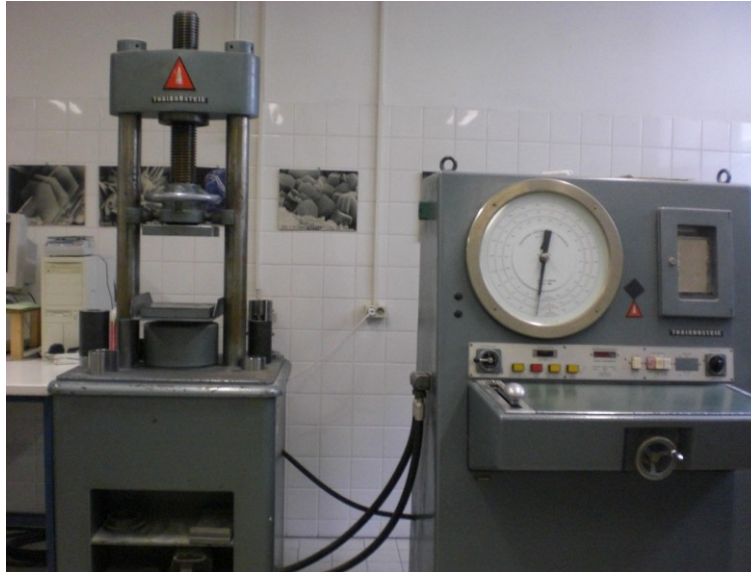


Abbildung 8: Hydraulische Prüfpresse

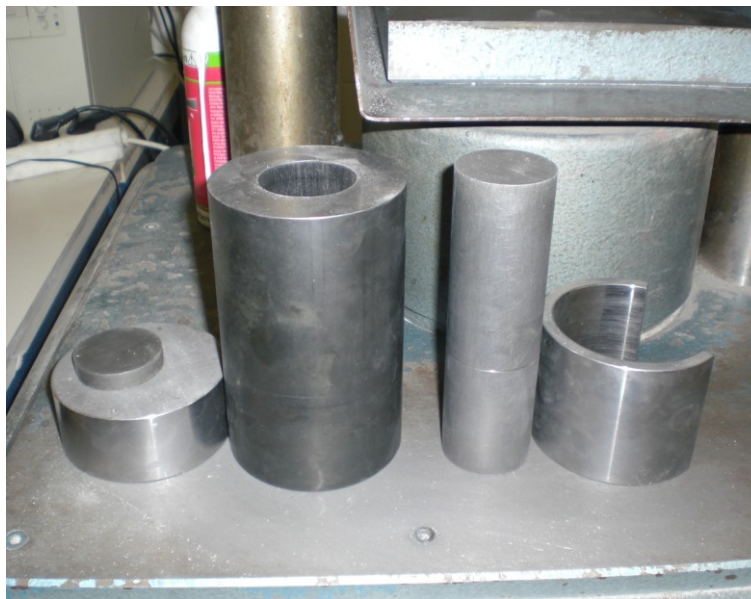


Abbildung 9: Pressform

Nach dem Pressen wird der Grünkörper gewogen und abgemessen. Basierend auf diesen Daten kann die Gründichte des Presslings berechnet werden. Drei der Zylinder werden anschließend herangezogen, um mittels spindelgetriebener Universalprüfmaschine (Abbildung 10) die Druckfestigkeit zu bestimmen. Die Grünfestigkeit ergibt sich als Mittelwert aus den drei Ergebnissen.

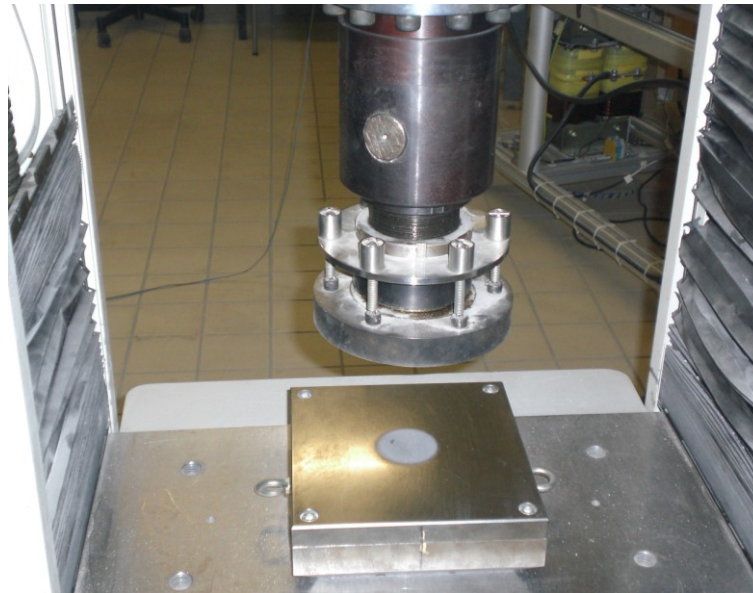


Abbildung 10: Universalprüfmaschine

Die restlichen sechs Zylinder werden für sechs Stunden bei 130°C im Trockenschrank getrocknet. Nach der Trocknung werden die Probekörper gewogen und abgemessen. Aus diesen Daten kann wiederum die Dichte berechnet werden. Wie zuvor wird die Festigkeit nach der Trocknung aus drei Werten ermittelt. Die verbleibenden drei Probekörper werden dann mit folgendem Temperaturprogramm gebrannt:

Raumtemperatur-	mit 300°C/Stunde
800°C	
800°C-900°C	in 3 Stunden
900°C	6 Stunden Haltezeit
900°C-800°C	in 4 Stunden

Von den gebrannten Körpern werden Rohdichte, Brennschwindung, E-Modul aus Schalllaufzeit, Druckfestigkeit, Porosität und die Dichte nach Pukall gemäß ÖNORM 993-1 ermittelt.

3.2 Ergebnisse

Rohdichte und Porosität

Bei der Bestimmung der Rohdichte und Porosität nach Pukall EN 993-1 wurden folgende Ergebnisse ermittelt. Die Proben weisen eine Rohdichte zwischen 2,07-2,11g/cm³ und eine Porosität von zwischen 39%-43,8% auf. Die niedrigste Porosität

wurde bei R14 und die höchste bei R4 gemessen. Eine Zusammenfassung aller Werte ist im Anhang gegeben.

E-Modul

Die Proben weisen E-Module zwischen 21-36% auf. Der niedrigste E-Modul wurde bei R14 und der höchste bei R4 und R5 gemessen.

Festigkeiten der Schleifkörper

Grünfestigkeiten

Bis R7 werden als Lagerung sowohl Behälter als auch Sack angewandt. Da bei der Sacklagerung bessere Ergebnisse erreicht werden, wird für die Proben zwischen R7 und R15 ausschließlich die Sacklagerung verwendet. Für die Rezepturen R3, R4, R11, R14 und R15 werden die höchsten Festigkeitswerte erzielt, wenn die Masse sofort nach dem Mischen verpresst wird.

R6 weist im Vergleich zu den anderen Rezepturen die höchste Grünfestigkeit auf. Der Maximalwert von 1,66MPa ist nach 48h Lagerdauer im Behälter erreicht. Dann folgt R5 mit 1,54MPa nach 48h Lagerdauer, R8 mit 1,45MPa nach 48h Lagerzeit, R7 mit 1,26MPa nach 48h Lagerzeit, R9 mit 1,14MPa nach 24h Lagerzeit und R12 von 1,00MPa nach 48h Lagerzeit. Daraus ist ersichtlich, dass bei 48 Stunden Lagerdauer oft ein Maximum der Grünfestigkeiten erreicht wird.

Die Varianten (R1- R4 und R10-R15) weisen Grünfestigkeiten unter 1.00MPa auf. Die geringste Grünfestigkeit haben R14 und R15 mit jeweils 0,06MPa.

Nachfolgend werden 2 Beispiele für den Verlauf der Kaltdruckfestigkeit (KDF) in Abhängigkeit der Lagerdauer angeführt. In Abbildung 11 sind die Grünfestigkeiten der Varianten R5, R6 und R7 nach Behälterlagerung in Abhängigkeit der Lagerdauer dargestellt. Diese Varianten enthalten Komponent D in unterschiedlichen Mengen (siehe Tabelle 7). Die Probe mit höherem Gehalt an Komponent B und geringerem Gehalt an Komponent C (R6) weist bei 6h, 24h und 48h im Vergleich zu den beiden anderen Varianten höhere Grünfestigkeiten auf. Generell steigen die Festigkeiten von allen drei Varianten mit zunehmender Lagerdauer an. Bei R5 und R6 werden von einer Lagerdauer von 48 Stunden die höchsten Werte erreicht.

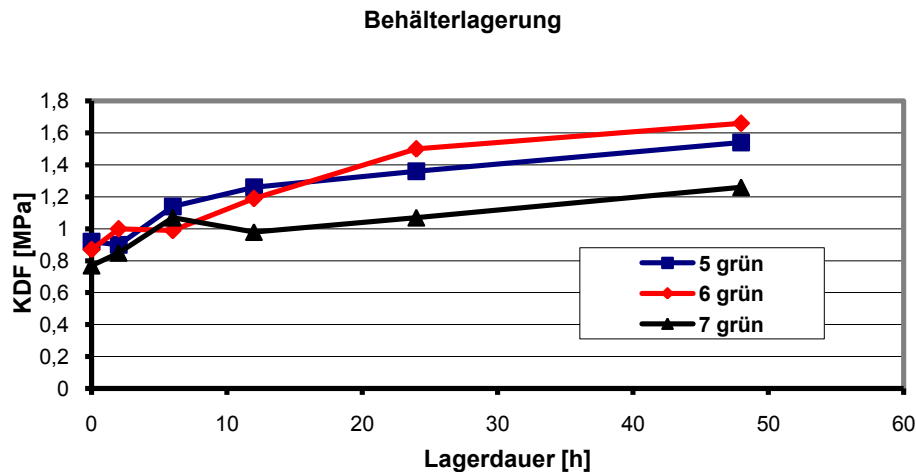


Abbildung 11: KDF grün der Varianten R5, R6, R7 nach Behälterlagerung in Abhängigkeit der Lagerdauer

In Abbildung 12 sind die Grünfestigkeiten dieser 3 Varianten in Abhängigkeit der Lagerdauer im Sack dargestellt. Bei allen Rezepturen kann eine ähnliche KDF bei 2h Lagerdauer beobachtet werden. Die Festigkeiten von R5 und R6 sinken bis 2h Lagerdauer geringfügig ab, dann zeigt R5 einen Anstieg der KDF bis 6h Lagerzeit und wieder eine Abnahme bis 24h Lagerdauer. Anschließend steigt die KDF bis zu 48h wieder auf 1,42MPa an. Die Grünfestigkeit von R6 steigt bis 12h Lagerdauer, dann zeigen sich bis 48h Lagerdauer ähnliche KDF-Werte. Die Festigkeiten von R7 steigen kontinuierlich bis zu einer Lagerzeit von 6h an. Ab 12h Lagerzeit tritt kaum noch eine Veränderung auf. Der Maximalwert liegt für diese Probe 1,10MPa und 48h Lagerzeit.

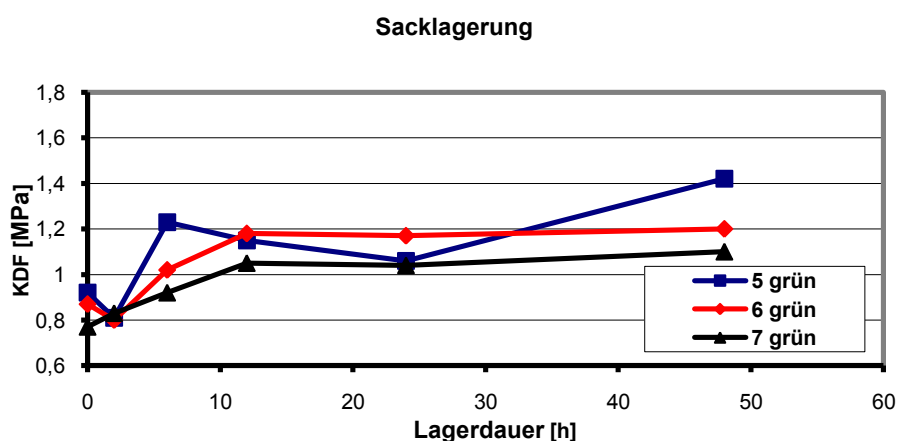


Abbildung 12: KDF grün der Varianten R5, R6, R7 nach Sacklagerung in Abhängigkeit der Lagerdauer

Festigkeit nach den Trocknen

R5 weist im Vergleich zu den anderen Rezepturen bei 6h Lagerdauer im Behälter die höchste Festigkeit von 15MPa auf. Dann folgt R15 mit 13,50MPa bei 6h nach Sacklagerung und R7 mit 11,88MPa bei 0h. R14 zeigt im Vergleich mit allen anderen Rezepturen die geringsten Festigkeiten von 0,49MPa bei 24 und 48h Lagerdauer. Außerdem kann hier nach dem Trocknen eine geringe Kantenfestigkeiten (siehe Abbildung 13) beobachtet werden. Die anderen Rezepturen zeigen KDF-Werte zwischen 1-10MPa. Detaillierte Ergebnisse sind im Anhang zusammengefasst.

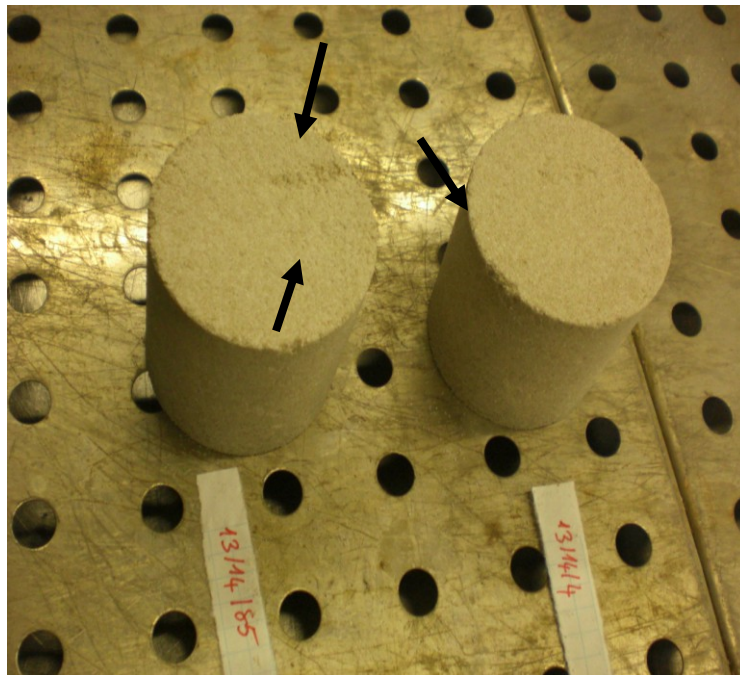


Abbildung 13: Darstellung der Prüfkörper der Versuche 14 nach den Trocknen

Nachfolgend sind einige ausgewählte Beispiele für den Verlauf der Festigkeiten nach dem Trocknen angeführt: In Abbildung 14 sind die KDF-Werte nach Lagerung im Behälter für die nach der Verpressung getrockneten Probekörper dargestellt. Die Varianten R5, R6 und R7 enthalten die gleichen Komponenten aber unterschiedliche Mengen an Dextrin und Pulverharz. R5 zeigt bis 6h Lagerzeit einen Anstieg der KDF auf 15MPa. Dieser Wert ist im Vergleich zu den anderen Rezepturen der höchste. Er sinkt bis 12h Lagerdauer auf 6MPa ab und steigt dann bis 24h auf 10,81MPa wieder an. Bei 48h Lagerzeit weist R7 einen KDF-Wert von 9,60MPa auf, bei R6 fällt der KDF-Werte auf 6,72MPa ab. Mit Ausnahme der 12h Stunden Lagerdauer weist R5 im Vergleich mit den beiden anderen Rezepturen immer die höchste Festigkeit.

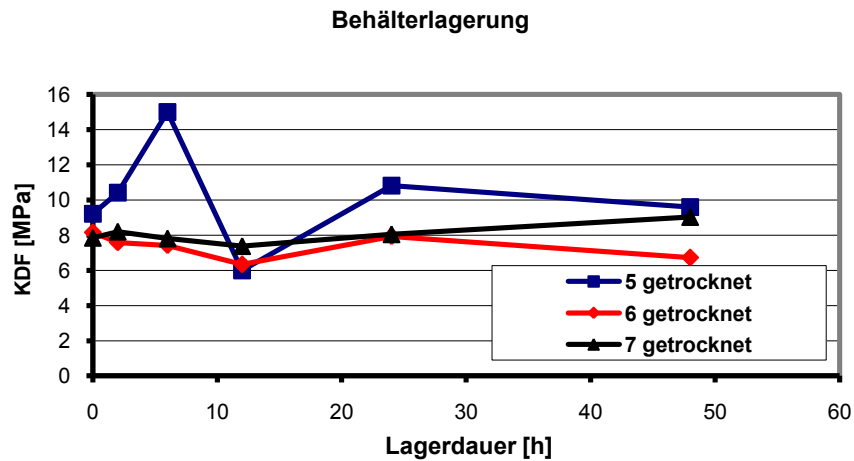


Abbildung 14: KDF getrocknet der Varianten R5,R6,R7 nach Behälterlagerung in Abhängigkeit der Lagerdauer

In Abbildung 15 sind Festigkeiten der Varianten R8 und R9 nach Sacklagerung in Abhängigkeit der Lagerdauer dargestellt. Diese beiden Varianten enthalten ähnliche Komponenten, zu R9 wurde jedoch auch Wasser als Mischungskomponente hinzugegeben (siehe Tabelle 7). R8 hat bei 2h Lagerdauer eine Festigkeit von 6,28MPa, dann sinkt die Festigkeit mit steigender Lagerdauer auf 4,17MPa bei 48h Lagerzeit ab. Variante 9 zeigt bei 0h Lagerdauer eine relativ gute Festigkeit von 6,07MPa, weist aber bei 48h Lagerdauer ein schlechteres Ergebnis auf.

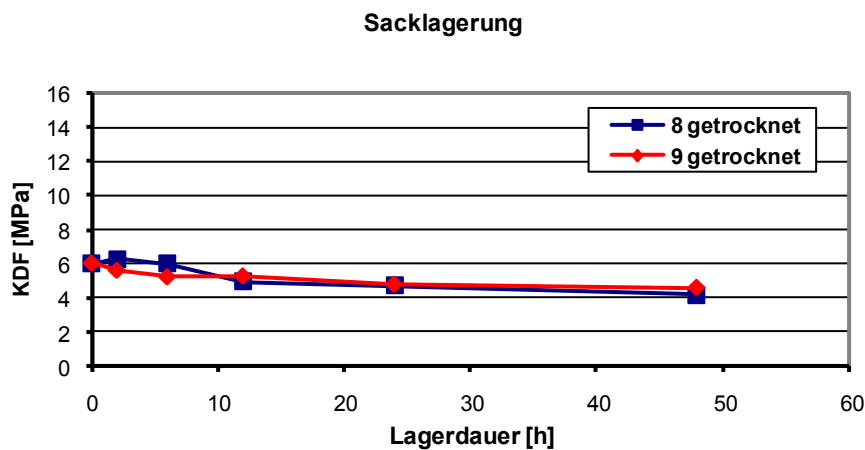


Abbildung 15: KDF getrocknet der Varianten R8, R9 nach Sacklagerung in Abhängigkeit der Lagerdauer

Festigkeit nach dem Brennen

Rezeptur R6 weist im Vergleich zu den anderen Rezepturen bei 2h Lagerdauer im Sack die höchste Festigkeit von 107,9MPa auf. Varianten R13, R14 und R15 zeigen im Vergleich mit allen anderen Rezepturen die geringsten Festigkeiten zwischen 36,08-59,6MPa. Bei diesen Proben konnten nach dem Brennen in den Proben schwarze Bereiche beobachtet werden (siehe Abbildung 18).

Nachfolgend sind einige ausgewählte Beispiele angeführt: In Abbildung 16 sind die KDF-Werte nach Lagerung im Sack für die gebrannten Probekörper der Rezepturen R13, R14 und R15 dargestellt. Bei der Prüfung der KDF nach dem Brennen wird ein annähernd gleiches Verhalten der Rezeptur 13 und 15 festgestellt. Bei diesen beiden Varianten kann ein Absinken der KDF bei Lagerzeit von 2h beobachtet werden. Bei 12h folgt ein Anstieg, dann fällt die KDF bei 24h. Anschließend steigt die KDF geringfügig bei 48h wieder an. Mit Ausnahme der Lagerdauer von 6 und 12 Stunden hat R14 verglichen mit den beiden anderen Rezepturen die höchsten Festigkeiten. Eine eindeutige Tendenz der Festigkeitswerte bei steigender Lagerzeit war hier nicht zu beobachten.

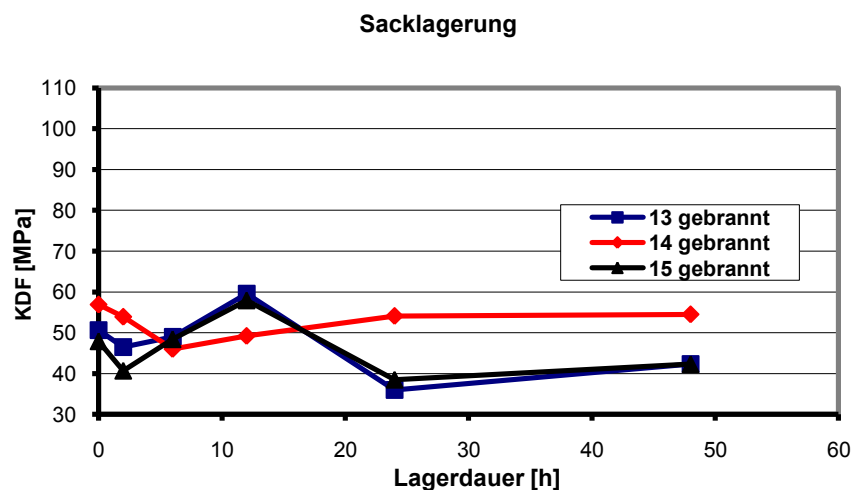


Abbildung 16: KDF gebrannt der Varianten R13, R14, R15 nach Sacklagerung in Abhängigkeit der Lagerdauer

In Abbildung 17 ist der Verlauf der KDF nach Lagerung im Sack für die gebrannten Probekörper R8 und R9 dargestellt. Bei 0h und 2h Lagerdauer zeigen die beiden Varianten ähnliche Ergebnisse. Ab 6h Lagerdauer zeigt die R8 bessere Ergebnisse als R9. Auffallend ist, dass die KDF Werte beider Varianten bei 12h und 48h Lagerdauer sinken und bei 24h Lagerdauer wieder zunehmen. Die Variante 8 zeigt bei 24h Lagerdauer die höchste Festigkeit von 104,5MPa, Variante 9 bei 2h Lagerdauer mit 100,8MPa.

3. Durchführung der Untersuchungen

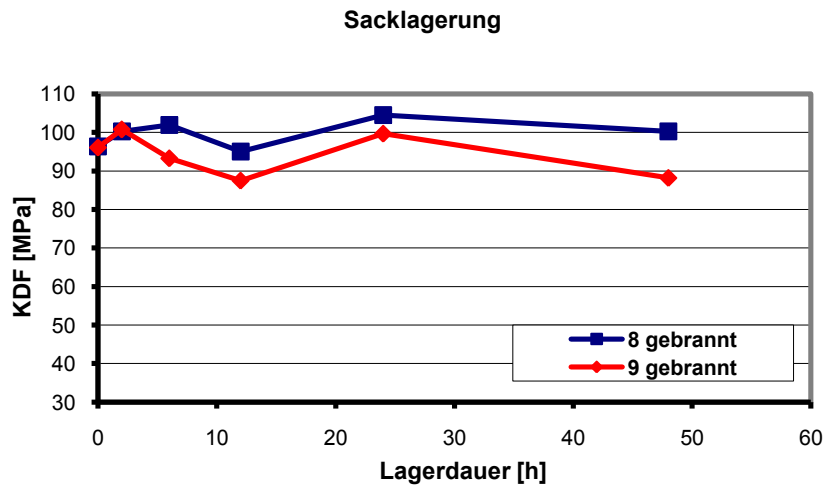


Abbildung 17: KDF gebrannt der Varianten R8, R9 nach Sacklagerung in Abhängigkeit der Lagerdauer

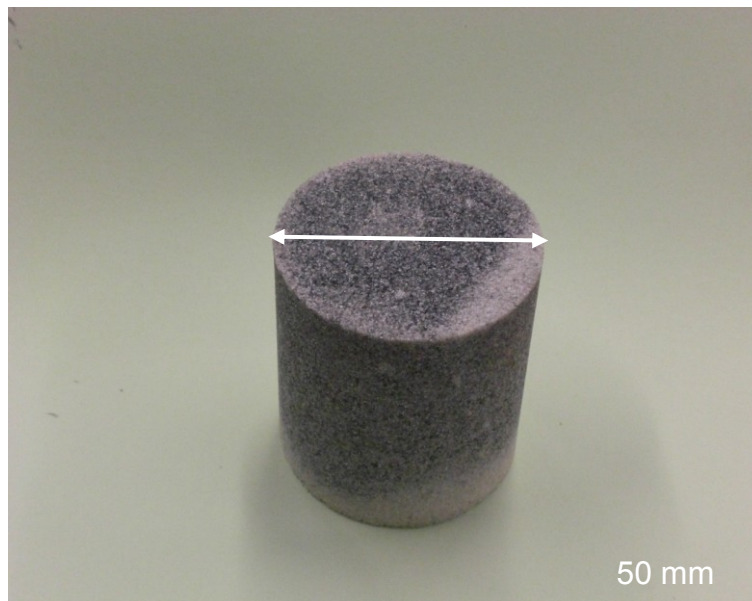


Abbildung 18: Prüfkörper der Versuche 15 nach dem Brand

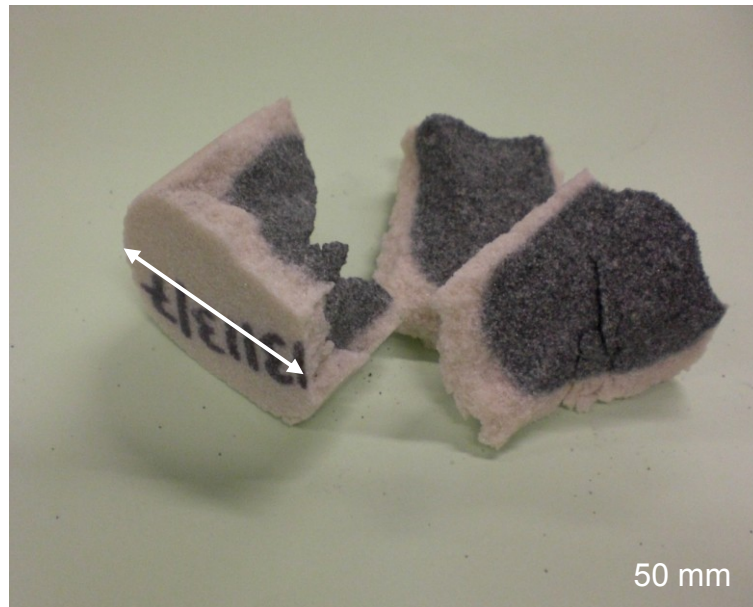


Abbildung 19: Prüfkörper der Versuche 13 im gebrochenen Zustand nach der Festigkeitsprüfung

3.3 Interpretation der Ergebnisse

Die Untersuchungen der Festigkeiten zeigen, dass Rezeptur 5 im Vergleich zu allen anderen Rezepturen bei jeder Lagerdauer immer sehr gute Festigkeiten aufweist. R5 enthält als Bindemittel eine Mischung aus Komponenten D, B und J. R6 und R7 unterscheiden sich von R5 nur durch die Mengen dieser 3 Bestandteile und weisen ebenfalls relativ gute Festigkeiten auf, jedoch zeigt sich hier eine Abhängigkeit von der Lagerdauer. R6 weist bei 48h Lagerdauer von allen Proben die höchste Grünfestigkeit (1,66MPa) auf. Nach dem Brennen kann die höchste Festigkeit bei einer Lagerdauer von 2h ebenfalls bei der Probe R6 beobachtet werden (107,9MPa). Werden die Festigkeitswerte nach dem Trocknen verglichen, ist festzustellen, dass R6 teilweise schlechtere Werte als R5 aufweist. Im Fall einer Lagerdauer von 6h zeigt R5 die höchste Trockenfestigkeit von 15MPa, R6 jedoch nur 7,5MPa. Daraus ist ersichtlich, dass die Kombination der Komponenten aus den Komponenten D, B und J als Bindemittel für Schleifscheiben geeignet ist.

Rezepturen 8 und 9 sind Kombinationen mit Komponente F. R8 enthält Komponenten B und F, R9 B, F und J. R8 und R9 zeigen im grünen Zustand und nach dem Brennen ebenfalls sehr gute Festigkeitswerte, aber nach dem Trocknen nur mittlere. Rezeptur 14 enthält nur Komponente F. Alle physikalischen Messwerte von R14 zeigen bei jeder Lagerdauer sehr schlechte Festigkeiten. R13 und R15 zeigen auch sehr schlechte Festigkeitswerte im grünen und gebrannten Zustand. Dennoch können bei beiden Rezepturen im Trockenzustand bei jeder Lagerdauer sehr gute Festigkeitswerte beobachtet werden. Beide Rezepturen enthalten die gleiche Kombination aus Komponenten B, F, C und J. Auch die Rezepturen mit Kombinationen aus B und unterschiedlichen Lösungen (H, I bzw. G) weisen geringe Grün- und Trockenfestigkeit auf, jedoch relativ gute Festigkeitswerte nach dem Brennen. Dennoch führen diese Bindemittelregime zu keinen brauchbaren Ergebnissen, da für die Produktion auch die Grünfestigkeit und die Festigkeit im getrockneten Zustand hoch sein sollen.

Die Abhängigkeit der Lagerdauer wird im Folgenden nur für die Bindemittelregime, die sich für die Herstellung von Schleifscheiben als geeignet herausgestellt haben, diskutiert: In Hinblick auf die Lagerdauer zeigt Rezeptur 5 mit steigender Lagerdauer steigende Festigkeitswerte (0,92MPa bei 0h, 1,54MPa bei 48h). Im getrockneten Zustand steigt die Festigkeit bis zu einer Lagerdauer von 6h, sinkt dann bis 12h ab und steigt anschließend wieder an. In gebrannten Zustand nehmen die Festigkeitswerte bis zur Lagerzeit von 6h zu. Dann kann eine geringfügige Abnahme mit steigender Lagerdauer beobachtet werden. R6 zeigt im Grünzustand steigende Festigkeitswerte bis zum Maximum bei der 48h-Lagerdauer mit 1,66MPa und im

gebrannten Zustand bei 2h-Lagerdauer mit 107MPa. Die Festigkeit von R7 steigt im Grünzustand mit steigender Lagerzeit, im getrockneten Zustand bleiben die Festigkeiten annähernd konstant. Nach dem Brennen ist eine relativ steile Abnahme der Festigkeit bis zur Lagerdauer von 2h und dann wieder ein relativ steiler Anstieg bis zur 12h-Lagerzeit mit erneuter Abnahme bis 48h Lagerzeit festzustellen. R8 zeigt einen Anstieg der Grünfestigkeit bis zum Maximum bei 48h-Lagerzeit (0,99MPa bei 0h, 1,45MPa bei 48h). R9 zeigt im Grünzustand steigende Festigkeitswerte bis zu einer Lagerdauer von 24h, die dann aber wieder absinkt. Nach dem Trocknen zeigt R9 sinkende Festigkeitswerte mit steigender Lagerdauer.

Diese Ergebnisse zeigen, dass es keine vorzuziehende Lagerdauer gibt, die sich immer positiv auf alle Festigkeiten auswirkt. Da für den Herstellungsprozess eine gewisse Lagerbarkeit der Mischung von Bedeutung ist, ist zu Prüfen, ob die geringeren Festigkeiten bei bestimmten Lagerzeiten dennoch ausreichend sind.

Bezüglich Porosität kann keine Aussage über das Bindemittel getroffen werden, weil die Werte sich kaum voneinander unterscheiden. Die Proben weisen alle eine Porosität zwischen 39% - 44% auf.

Jene Rezepturen mit guten Festigkeitswerten zeigen auch hohe Werte für den E-Modul und Rezepturen mit geringen Festigkeitswerten einen geringen E-Modul. Die Ausnahme bildet nur R7. Diese Probe zeigt bei 2h und 48h Lagerdauer trotz ihrer guten Festigkeitswerte niedrige E-Module.

4 Verzeichnisse

4.1 Literatur

- [1] *Wikipedia, Herstellung von Schleifscheiben;*
<http://de.wikipedia.org/wiki/schleifscheibe>
- [2] *WINTERTHUR TECHNOLOGY GROUP; Keramische Schleifscheiben;*
<http://www.winterthurtechnology.com>
- [3] *Schoppenhauer G.: Keramische Schleifscheiben. Handbuch der Keramik (1975)*
- [4] *Krebs&Riedel Schleifscheibenfabrik GmbH & Co KG: Keramische Bindung. KCD 101 (2006)*
- [5] *Padberg, H.J.: Entwicklung Anwendungsorientierter Bindungs-Systeme für Schleifwerkzeuge. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, Verfahren und Maschinen (57.Ausg.) *Band 57 (1993), S196 – 211, Vulkan Verlag*
- [6] *Graf, W.: Poröse, Keramische Schleifscheiben für hohe Abtragsarten. F+M, Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik, Band 107 Heft 5 (1999), S30, S33*
- [7] *Salmang H., Scholze H.: Keramik.7.Auflage, Springer-Verlag 2007*
- [8] *Kraack, K.E.; Trinks, V.: Entwicklung keramischer Schleifscheiben – Bindemittel mit niedrigeren Brenntemperaturen. Ceramic forum International 70 (1993), S399-403 (5)*
- [9] *Klocke, F.; König W.: Fertigungsverfahren 2- Schleifen, Honen, Läppen. Springer-Verlag, 4. Neu bearbeitete Auflage (2005)*
- [10] *Padberg, H. J.: Aufbau und Bindungsmatrix hochbeanspruchter keramisch gebundener Zerspannungswerkzeuge. Ceramic forum International 70 (1993) Heft 11/12, S598-602*
- [11] *ATLANTIC GmbH: Schleifscheiben und Segmente (2007);*
http://www.atlanticbonn.de/uploads/media/Grinding_wheels_German_07.pdf
- [12] <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Poly-%281-4%29-alpha-D-Glucose.svg>
Stand 06.02.2007

- [13] Sheldon A. D.: Silicon carbide abrasive wheel; US-Patent Nr.: 5.711.774; Okt 1996
- [14] Sheldon A. D., Markhoff-Matheny C.J., Terragni R.: High porosity bonded grinding wheels; US-Patant Nr. 5.203.886; Aug 1991
- [15] Markhoff-Matheny C.J., Rostoker D.: Vitrified bonded sol gel sintered aluminous abrasive bodies; US-Patent Nr. 5.131.923; Jun 1990
- [16] Wood P.W., Yoon C.S.: High density sol gel alumina based abrasives vitreous bondet grinding wheel; US-Patent Nr. 5.282.875; Apr 1993
- [17] Krueger K.M., Yoon C.S., Forney G.K., Turchin H., Smits A.C.: Impregnated grinding wheel; US-Patent Nr: 6.500.220; Feb 2002
- [18] Sicherheitsdatenblatt ZUSOPLAST WE 48; Zschimmer & Schwarz; D-56112 Lahnstein; www.zschimmer-schwarz.de; Stand 24.08.07
- [19] Sicherheitsdatenblatt ZUSOPLAST WE 48; Zschimmer & Schwarz; D-56112 Lahnstein; www.zschimmer-schwarz.de; Stand 24.08.07
- [20] Sicherheitsdatenblatt ZUSOPLAST WE 52; Zschimmer & Schwarz; D-56112 Lahnstein; www.zschimmer-schwarz.de; Stand 24.08.07
- [21] <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Poly-%281-4%29-alpha-D-Glucose.svg> Stand 06.02.2007
- [22] Ethylsilikat; <http://de.wikipedia.org/wiki/Tetraethylorthosilicat>; Stand 20.04.2008
- [23] Hall R., Dando P., Robertson J., Juma K.: Grinding tools; US-Patent Nr.: 5.094.671; jun 1990
- [24] Hay J., Smith I.L.Foster E.G.: Ceramic bondet grinding whell; US-Patent Nr.: 4.634.453; May 1985
- [25] Brüning K., Rehfeld G.: Ceramic-coated corundum abrasive grain; US-Patent Nr: 4.472.173; Nov 1982
- [26] Xantan; <http://de.wikipedia.org/wiki/Xanthan>; Stand 18.02.2008
- [27] Sicherheitsdatenblatt; Piccotac Hydrocarbon Resin; Eastman; www.eastman.com; Stand 19.02.2008
- [28] Stearinsäure; http://www.seilnacht.com/Chemie/ch_stear.htm
- [29] Sicherheitsdatenblatt Pristerene 4931 (Stearinsäure); Avokal GmbH; D-42279 Wuppertal ; www.avopal-heller.de; Ausgabe 05.08.2005

4. Verzeichnisse

- [30] *Sicherheitsdatenblatt OPTAPIX AC 15; Zschimmer & Schwarz; D-56112 Lahnstein; www.zschimmer-schwarz.de; Stand 24.08.07*
- [31] *Sicherheitsdatenblatt Silester; Wacker Chemie AG; D-81737 München; www.wacker.com; Ausgabe 21.08.2007*

5 Anhang

	R1										
Hauptkomponente	Korund										
Bindesystem	Keramische Glasfritte										
A	+1,0										
E	+3,32										
Lagerart	-	Behälter					Sack				
Lagerdauer [h]	0	2	6	12	24	48	2	6	12	24	48
Rohdichte [g/cm ³]	2,14	2,12	2,15	2,14	2,14	2,14	2,16	2,13	2,13	2,15	2,15
Dichte nach der Trocknung [g/cm ³]	2,09	2,08	2,10	2,09	2,08	2,07	2,09	2,09	2,09	2,09	2,09
Dichte nach dem Brennen [g/cm ³]	2,02	2,02	2,06	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,04	2,02	2,03
$\Delta\emptyset/\emptyset$ [%]	0,39	0,03	-0,21	0,29	0,32	0,19	0,66	-0,05	0,05	0,13	0,18
$\Delta h/h_0$ [%]	-0,27	-0,03	-0,73	-0,01	0,09	0,04	0,13	-0,09	-0,23	0,47	0,07
$\Delta V/V_0$ [%]	0,52	-0,27	-1,15	0,56	0,74	0,42	1,46	-0,20	-0,12	0,73	0,44
E-Modul [GPa]	26,8	28,9	32,0	33,8	30,0	28,7	29,8	28,4	32,6	31,4	32,1
E-Modul (diameter) [GPa]	30,2	31,4	33,3	37,5	31,9	31,4	32,1	30,7	35,8	32,9	33,2
Verhältnisse der E-Module []	1,13	1,09	1,04	1,11	1,06	1,09	1,08	1,08	1,10	1,05	1,03
Dichte (Pukall nach dem Brennen) [g/cm ³]	2,08	2,08	2,11	2,08	2,08	2,07	2,08	2,09	2,09	2,09	2,08
Porosität (Pukall) [%]	43,7	43,5	42,1	43,5	43,4	43,5	43,3	43,1	43,2	43,2	43,4
KDF grün [MPa]	0,09	0,08	0,15	0,09	0,11	0,10	0,11	0,19	0,09	0,11	0,13
KDF nach der Trocknung [MPa]	1,87	2,84	3,64	2,40	2,31	2,74	2,56	3,79	2,28	2,85	2,86
KDF nach dem Brennen [MPa]	86,6	89,6	102,6	95,6	89,4	84,1	88,8	89,9	95,1	90,1	92,2
Pressdruck [MPa]	6,1	6,0	6,0	6,0	6,0	6,3	6,2	6,0	6,0	6,0	6,0

5. Anhang

		R5										
Hauptkomponente	Korund											
Bindesystem	Keramische Glasfritte											
D	+2,8											
B	+2,0											
C	+2,0											
Lagerart	-	Behälter					Sack					
Lagerdauer [h]	0	2	6	12	24	48	2	6	12	24	48	
Rohdichte [g/cm ³]	2,18	2,19	2,18	2,18	2,17	2,19	2,19	2,18	2,18	2,18	2,18	
Dichte nach der Trocknung [g/cm ³]	2,16	2,16	2,15	2,16	2,15	2,17	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	
Dichte nach dem Brennen [g/cm ³]	2,06	2,05	2,05	2,05	2,05	2,07	2,06	2,06	2,05	2,05	2,06	
$\Delta\varnothing/\varnothing$ [%]	-0,11	-0,01	-0,02	-0,08	-0,05	-0,11-	-0,01	-0,15	-0,07	-0,17	-0,15	
$\Delta h/h_0$ [%]	-0,41	-0,32	-0,25	-0,15	-0,48	-0,55	-0,55	-0,41	-0,21	-0,24	-0,29	
$\Delta V/V_0$ [%]	-0,64	-0,33	-0,29	-0,31	-0,57	-0,76	-0,58	-0,70	-0,34	-0,59	-0,59	
E-Modul [GPa]	33,6	34,1	33,7	31,6	33,0	36,0	31,7	33,6	30,2	33,9	33,4	
E-Modul (diameter) [GPa]	36,3	35,8	35,4	32,9	35,6	36,5	34,5	36,0	31,1	34,1	34,1	
Verhältnisse der E-Module []	1,08	1,05	1,05	1,04	1,08	1,01	1,09	1,07	1,03	1,01	1,02	
Dichte (Pukall nach dem Brennen) [g/cm ³]	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,12	2,11	2,11	2,10	2,10	2,10	
Porosität (Pukall) [%]	41,6	42,2	42,4	42,2	42,2	41,8	41,4	41,1	41,6	41,3	41,5	
KDF grün [MPa]	0,92	0,90	1,14	1,26	1,36	1,54	0,81	1,23	1,15	1,06	1,42	
KDF nach der Trocknung [MPa]	9,21	10,42	15,00	5,99	10,81	9,60	10,63	11,66	8,62	10,09	9,64	
KDF nach dem Brennen [MPa]	94,5	105,5	98,8	88,0	93,1	94,4	95,2	104,5	98,1	99,4	93,0	
Pressdruck [MPa]	12,0	10,8	9,7	13,7	13,5	16,1	11,5	13,6	13,2	12,4	15,0	

5. Anhang

	R6										
Hauptkomponente	Korund										
Bindesystem	Keramische Glasfritte										
D	+2,8										
B	+2,0										
C	+1,0										
Lagerart	-	Behälter					Sack				
Lagerdauer [h]	0	2	6	12	24	48	2	6	12	24	48
Rohdichte [g/cm ³]	2,16	2,17	2,16	2,16	2,16	2,15	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
Dichte nach der Trocknung [g/cm ³]	2,14	2,13	2,13	2,13	2,14	2,14	2,14	2,13	2,14	2,13	2,13
Dichte nach dem Brennen [g/cm ³]	2,05	2,04	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,04	2,04
$\Delta\varnothing/\varnothing$ [%]	-0,10	0,01	-0,12	0,02	-0,03	-0,10	-0,03	-0,01	-0,03	0,01	-0,06
$\Delta h/h_0$ [%]	-0,15	-0,07	-0,14	-0,09	0,23	-0,35	-0,09	-0,28	-0,03	-0,09	0,13
$\Delta V/V_0$ [%]	-0,35	-0,05	-0,38	-0,05	0,18	-0,55	-0,16	-0,29	-0,09	-0,07	0,01
E-Modul [GPa]	26,7	31,9	27,6	28,0	31,1	29,9	30,0	32,1	31,4	31,9	29,3
E-Modul (diameter) [GPa]	27,8	31,6	29,3	31,1	32,0	30,9	30,8	33,0	33,9	32,0	29,7
Verhältnisse der E-Module []	1,04	0,99	1,06	1,11	1,03	1,04	1,03	1,03	1,08	1,00	1,02
Dichte (Pukall nach dem Brennen) [g/cm ³]	2,11	2,10	2,10	2,11	2,10	2,11	2,10	2,12	2,11	2,10	2,09
Porosität (Pukall) [%]	42,4	42,7	42,9	42,7	42,8	42,4	42,6	42,4	42,3	42,9	43,2
KDF grün [MPa]	0,87	1,00	0,99	1,19	1,50	1,66	0,80	1,02	1,18	1,17	1,20
KDF nach der Trocknung [MPa]	8,15	7,58	7,42	6,33	7,93	6,72	8,04	7,53	8,10	7,67	7,06
KDF nach dem Brennen [MPa]	98,9	102,4	99,9	95,0	101,0	97,2	107,3	99,7	96,9	99,7	95,9
Pressdruck [MPa]	9,5	9,7	9,5	13,5	13,0	15,8	9,5	9,5	12,0	10,5	11,0

5. Anhang

	R7										
Hauptkomponente	Korund										
Bindesystem	Keramische Glasfritte										
D	+2,8										
B	+1,5										
C	+2,0										
Lagerart	-	Behälter					Sack				
Lagerdauer [h]	0	2	6	12	24	48	2	6	12	24	48
Rohdichte [g/cm ³]	2,18	2,18	2,17	2,17	2,17	2,17	2,18	2,17	2,17	2,18	2,17
Dichte nach der Trocknung [g/cm ³]	2,15	2,15	2,13	2,14	2,15	2,15	2,15	2,14	2,15	2,15	2,14
Dichte nach dem Brennen [g/cm ³]	2,05	2,05	2,04	2,05	2,06	2,05	2,06	2,04	2,05	2,05	2,04
$\Delta\emptyset/\emptyset$ [%]	-0,03	-0,03	-0,03	-0,07	-0,05	-0,05	-0,11	-0,02	-0,05	-0,10	-0,01
$\Delta h/h_0$ [%]	-0,11	-0,06	0,17	0,05	-0,35	-0,02	-0,09	0,07	-0,33	0,06	-0,02
$\Delta V/V_0$ [%]	-0,17	-0,13	0,11	-0,08	-0,46	-0,13	-0,32	0,03	-0,43	-0,14	-0,03
E-Modul [GPa]	31,1	23,5	30,4	26,6	29,8	25,3	26,2	22,2	28,0	24,0	23,2
E-Modul (diameter) [GPa]	35,9	27,7	34,6	30,0	35,6	31,9	29,1	24,0	31,4	27,8	27,6
Verhältnisse der E-Module []	1,15	1,18	1,14	1,12	1,20	1,26	1,11	1,08	1,12	1,16	1,19
Dichte (Pukall nach dem Brennen) [g/cm ³]	2,11	2,11	2,10	2,10	2,10	2,11	2,11	2,09	2,11	2,11	2,10
Porosität (Pukall) [%]	42,3	42,3	42,4	42,9	41,6	42,5	42,3	43,0	42,6	42,4	42,9
KDF grün [MPa]	0,77	0,85	1,07	0,98	1,07	1,26	0,83	0,92	1,05	1,04	1,10
KDF nach der Trocknung [MPa]	7,85	8,20	7,81	7,38	8,05	9,03	7,94	7,89	8,33	9,59	7,61
KDF nach dem Brennen [MPa]	103,9	81,6	87,4	100,5	94,7	86,3	99,0	85,7	99,5	90,7	87,9
Pressdruck [MPa]	10,5	11,1	12,1	12,5	13,5	16,1	11,6	11,5	12,0	12,1	12,5

5. Anhang

	R8					
Hauptkomponente	Korund					
Bindesystem	Keramische Glasfritte					
B	+2,0					
F	+2,0					
Lagerart	-	Sack				
Lagerdauer [h]	0	2	6	12	24	48
Rohdichte [g/cm ³]	2,13	2,12	2,13	2,12	2,12	2,12
Dichte nach der Trocknung [g/cm ³]	2,10	2,12	2,10	2,09	2,09	2,10
Dichte nach dem Brennen [g/cm ³]	2,03	2,06	2,04	2,03	2,04	2,04
$\Delta\varnothing/\varnothing$ [%]	0,11	-0,04	-0,03	-0,03	-0,16	-0,09
$\Delta h/h_0$ [%]	0,38	-0,89	0,07	0,07	-0,19	-0,09
$\Delta V/V_0$ [%]	0,59	-0,97	0,00	0,00	-0,51	-0,28
E-Modul [GPa]	30,4	32,9	31,4	31,9	32,3	30,4
E-Modul (diameter) [GPa]	30,4	33,5	31,4	31,0	33,4	32,0
Verhältnisse der E-Module []	1,00	1,02	1,01	0,97	1,03	1,06
Dichte (Pukall nach dem Brennen) [g/cm ³]	2,10	2,13	2,10	2,10	2,10	2,10
Porosität (Pukall) [%]	42,9	42,1	42,6	42,4	42,7	42,8
KDF grün [MPa]	0,99	1,11	1,20	1,38	1,41	1,45
KDF nach der Trocknung [MPa]	6,00	6,28	5,95	4,95	4,71	4,17
KDF nach dem Brennen [MPa]	96,4	100,3	101,9	95,0	104,5	100,3
Pressdruck [MPa]	7,4	10,9	10,3	11,1	12,1	13,0

5. Anhang

	R9					
Hauptkomponente	Korund					
Bindesystem	Keramische Glasfritte					
B	+2,0					
F	+1,0					
J	+1,0					
Lagerart	-	Sack				
Lagerdauer [h]	0	2	6	12	24	48
Rohdichte [g/cm ³]	2,13	2,13	2,12	2,12	2,13	2,12
Dichte nach der Trocknung [g/cm ³]	2,09	2,09	2,08	2,09	2,09	2,09
Dichte nach dem Brennen [g/cm ³]	2,03	2,03	2,02	2,04	2,04	2,04
$\Delta\varnothing/\varnothing$ [%]	0,09	0,06	0,06	0,04	0,08	-0,04
$\Delta h/h_0$ [%]	0,40	0,35	0,57	0,00	0,03	-0,08
$\Delta V/V_0$ [%]	0,59	0,47	0,69	0,08	0,19	-0,16
E-Modul [GPa]	32,6	33,6	31,7	32,5	34,5	31,8
E-Modul (diameter) [GPa]	32,2	32,6	32,6	31,0	33,8	31,6
Verhältnisse der E-Module []	0,99	0,97	1,03	0,95	0,98	0,99
Dichte (Pukall nach dem Brennen) [g/cm ³]	2,09	2,10	2,09	2,10	2,10	2,10
Porosität (Pukall) [%]	42,8	42,6	43,0	43,1	42,8	42,7
KDF grün [MPa]	0,50	0,72	0,57	0,87	1,14	0,84
KDF nach der Trocknung [MPa]	6,07	5,63	5,24	5,29	4,79	4,60
KDF nach dem Brennen [MPa]	96,1	100,8	93,3	87,5	99,7	88,2
Pressdruck [MPa]	6,2	8,0	6,7	9,0	11,1	9,3

5. Anhang

	R13					
Hauptkomponente	Korund					
Bindesystem	Keramische Glasfritte					
B	+2,0					
F	+1,0					
C	+2,0					
J	+1,5					
Lagerart	-	Sack				
Lagerdauer [h]	0	2	6	12	24	48
Rohdichte [g/cm ³]	2,19	2,18	2,18	2,18	2,18	2,17
Dichte nach der Trocknung [g/cm ³]	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13	2,13
Dichte nach dem Brennen [g/cm ³]	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04
$\Delta\varnothing/\varnothing$ [%]	0,07	-0,07	-0,07	-0,09	-0,13	-0,20
$\Delta h/h_0$ [%]	0,09	0,01	0,19	0,12	0,23	-0,09
$\Delta V/V_0$ [%]	0,22	-0,12	0,06	-0,05	-0,04	-0,49
E-Modul [GPa]	26,8	26,4	25,9	27,2	23,7	26,5
E-Modul (diameter) [GPa]	28,1	26,5	26,0	27,3	23,9	26,1
Verhältnisse der E-Module []	1,05	1,01	1,00	1,00	1,01	0,98
Dichte (Pukall nach dem Brennen) [g/cm ³]	2,11	2,09	2,10	2,10	2,11	2,10
Porosität (Pukall) [%]	42,2	42,7	42,2	42,0	41,8	42,1
KDF grün [MPa]	0,22	0,20	0,20	0,26	0,35	0,36
KDF nach der Trocknung [MPa]	11,88	11,13	10,03	10,74	10,84	9,47
KDF nach dem Brennen [MPa]	50,6	46,5	49,0	59,6	36,0	42,3
Pressdruck [MPa]	5,5	5,0	4,4	5,0	4,0	7,0

5. Anhang

	R14					
Hauptkomponente	Korund					
Bindesystem	Keramische Glasfritte					
F	+2,0					
Lagerart	-	Sack				
Lagerdauer [h]	0	2	6	12	24	48
Rohdichte [g/cm ³]	2,09	2,08	2,08	2,07	2,08	2,08
Dichte nach der Trocknung [g/cm ³]	2,05	2,05	2,05	2,04	2,05	2,05
Dichte nach dem Brennen [g/cm ³]	2,03	2,02	2,02	2,02	2,02	2,01
$\Delta\varnothing/\varnothing$ [%]	0,10	-0,03	0,15	0,00	0,07	0,10
$\Delta h/h_0$ [%]	0,09	0,06	0,09	-0,05	-0,10	-0,01
$\Delta V/V_0$ [%]	0,29	-0,01	0,39	-0,05	0,05	0,19
E-Modul [GPa]	25,1	23,7	21,2	22,9	24,5	24,3
E-Modul (diameter) [GPa]	28,1	26,0	24,9	25,9	28,5	27,2
Verhältnisse der E-Module []	1,12	1,10	1,17	1,13	1,16	1,12
Dichte (Pukall nach dem Brennen) [g/cm ³]	2,10	2,09	2,09	2,07	2,09	2,08
Porosität (Pukall) [%]	39,0	39,2	42,4	39,4	39,0	39,1
KDF grün [MPa]	0,11	0,12	0,06	0,13	0,11	0,12
KDF nach der Trocknung [MPa]	0,82	0,65	0,59	0,55	0,49	0,49
KDF nach dem Brennen [MPa]	56,9	53,9	46,0	49,2	54,1	54,5
Pressdruck [MPa]	7,0	7,1	6,0	6,3	7,4	7,5

5. Anhang

	R15					
Hauptkomponente	Korund					
Bindesystem	Keramische Glasfritte					
B	+2,0					
F	+2,0					
C	+2,0					
J	+1,5					
Lagerart	-	Sack				
Lagerdauer [h]	0	2	6	12	24	48
Rohdichte [g/cm ³]	2,20	2,21	2,20	2,20	2,20	2,20
Dichte nach der Trocknung [g/cm ³]	2,14	2,14	2,13	2,12	2,14	2,14
Dichte nach dem Brennen [g/cm ³]	2,05	2,06	2,04	2,04	2,05	2,05
$\Delta\varnothing/\varnothing$ [%]	-0,33	-0,31	-0,29	-0,17	-0,27	-0,20
$\Delta h/h_0$ [%]	0,13	-0,01	0,31	0,14	-0,03	-0,11
$\Delta V/V_0$ [%]	-0,53	-0,63	-0,28	-0,19	-0,58	-0,51
E-Modul [GPa]	30,3	29,9	27,5	29,3	27,7	27,6
E-Modul (diameter) [GPa]	30,0	28,7	28,8	28,7	28,5	29,7
Verhältnisse der E-Module []	0,99	0,96	1,05	0,98	1,03	1,08
Dichte (Pukall nach dem Brennen) [g/cm ³]	2,12	2,11	2,10	2,11	2,11	2,11
Porosität (Pukall) [%]	41,4	41,6	42,1	41,8	42,0	41,9
KDF grün [MPa]	0,12	0,09	0,13	0,06	0,35	0,32
KDF nach der Trocknung [MPa]	13,46	10,27	13,50	8,97	13,08	12,47
KDF nach dem Brennen [MPa]	47,9	40,7	48,4	57,9	38,5	42,3
Pressdruck [MPa]	3,0	3,0	3,2	2,9	4,0	3,0

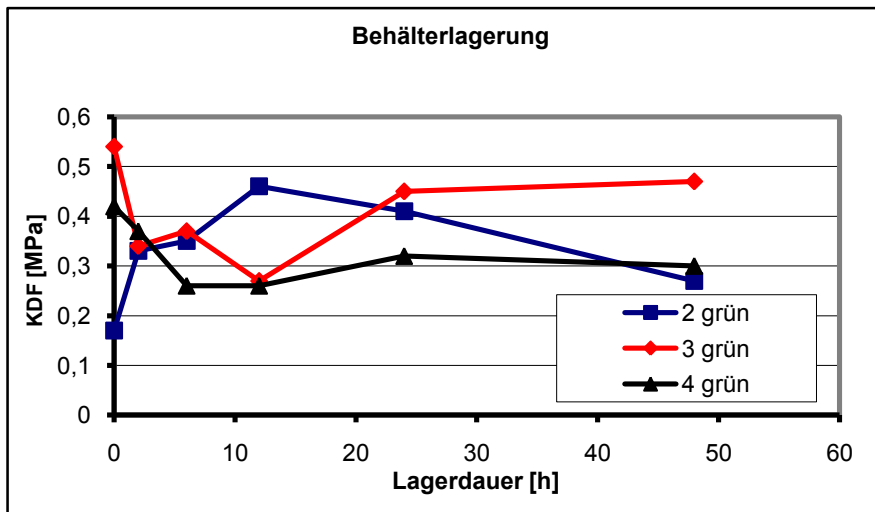


Abbildung 20: KDF grün für Varianten R2, R3, R4 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Behälter

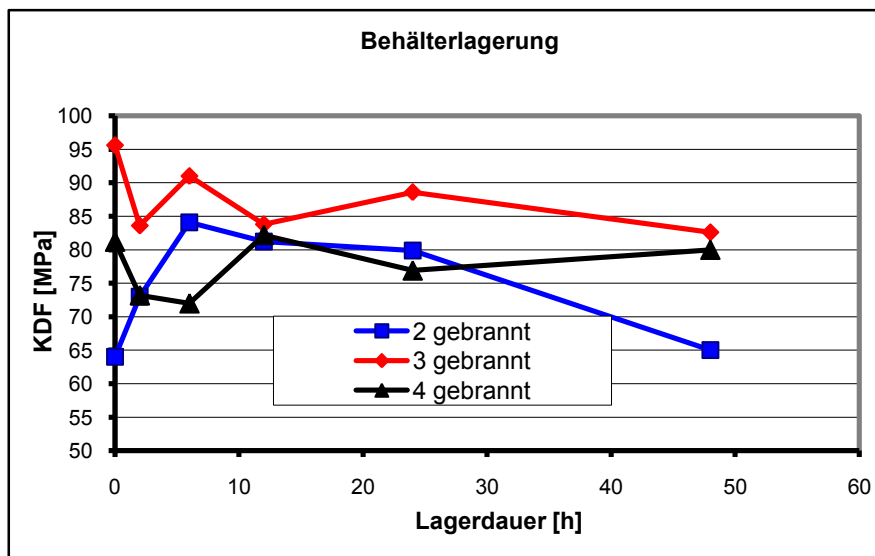


Abbildung 21: KDF gebrannt für Varianten R2, R3, R4 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Behälter

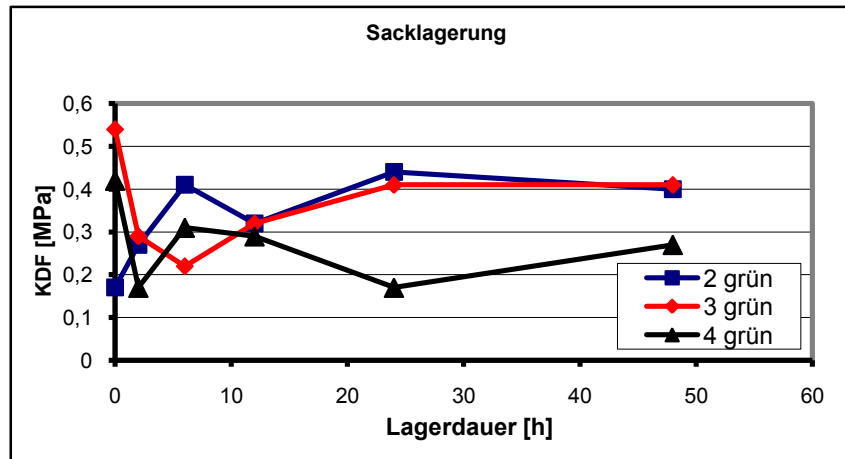


Abbildung 22: KDF grün für Varianten R2, R3, R4 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Sack

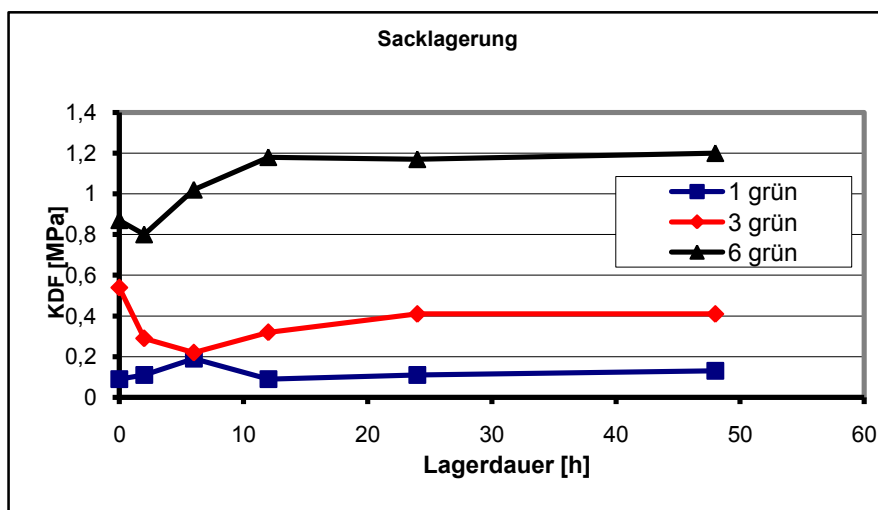


Abbildung 23: KDF grün für Varianten R1, R3, R6 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Sack

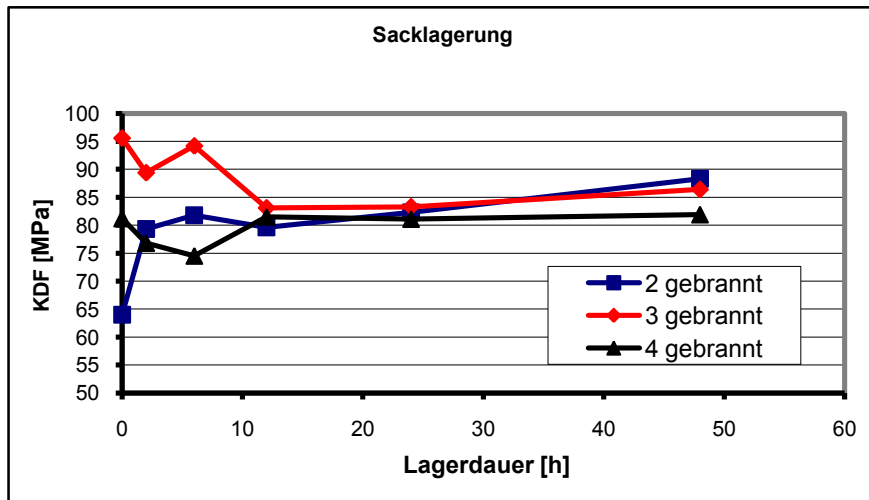


Abbildung 24: KDF gebrannt für Varianten R2, R3, R4 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Sack

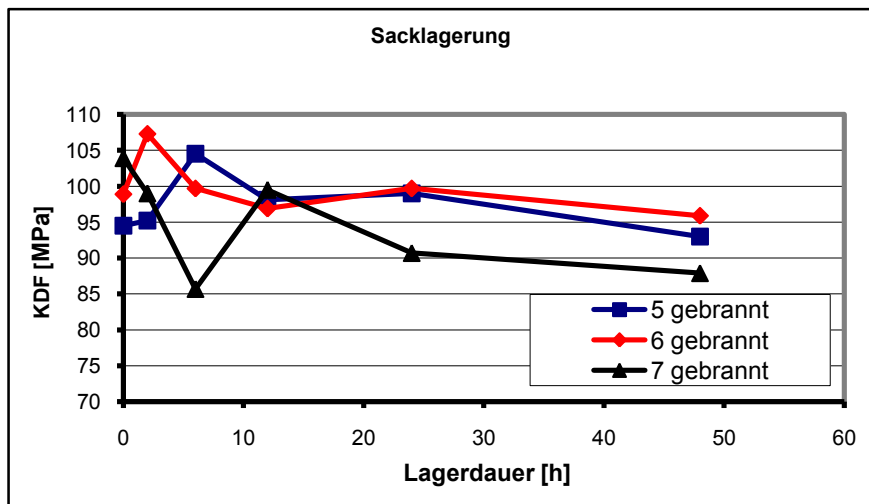


Abbildung 25: KDF gebrannt für Varianten R5, R6, R7 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Sack

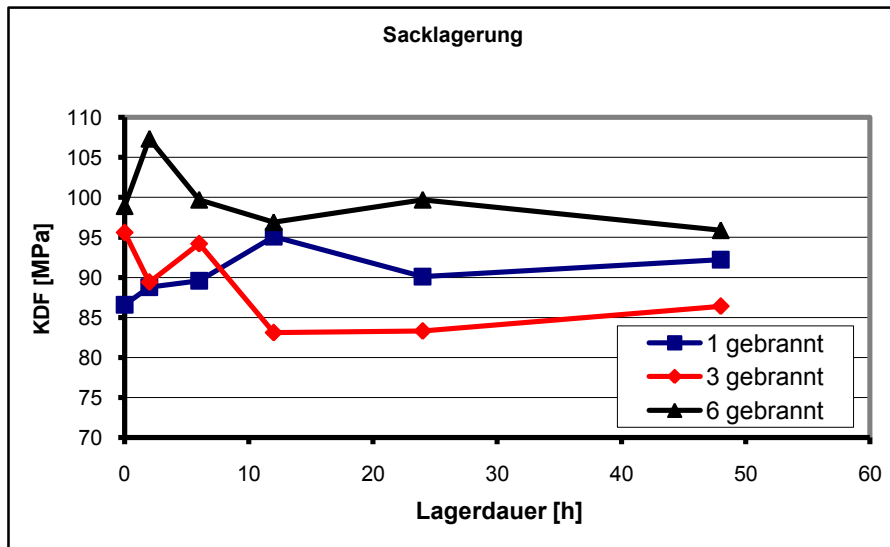


Abbildung 26: KDF gebrannt für Varianten R1, R3, R6 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Sack

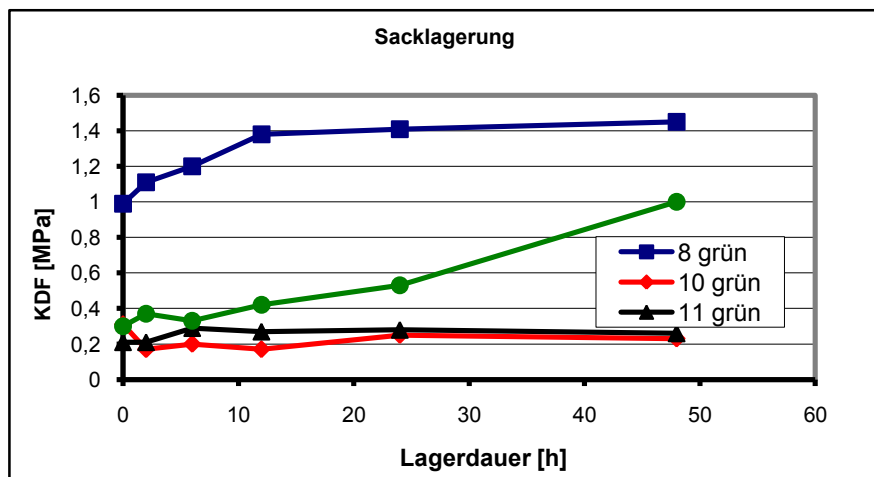


Abbildung 27: KDF grün für Varianten R8, R10, R11, R12 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Sack

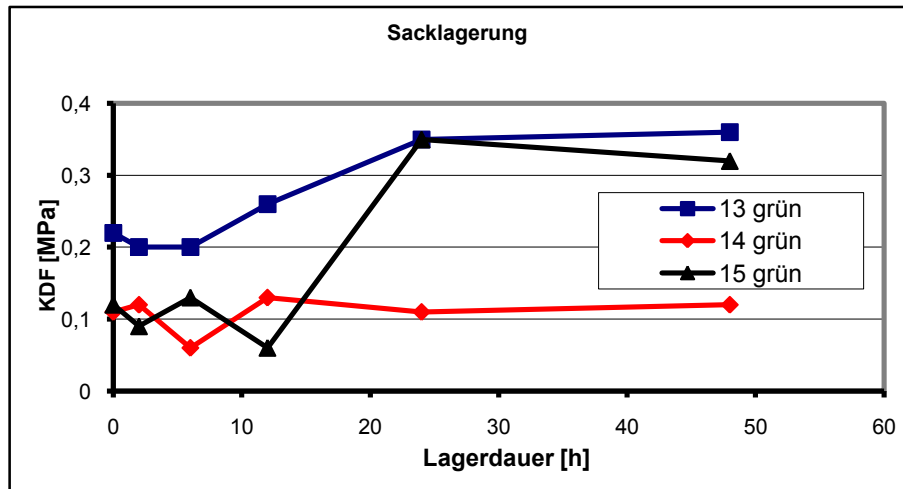


Abbildung 29: KDF grün für Varianten R13, R14, R15 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Sack

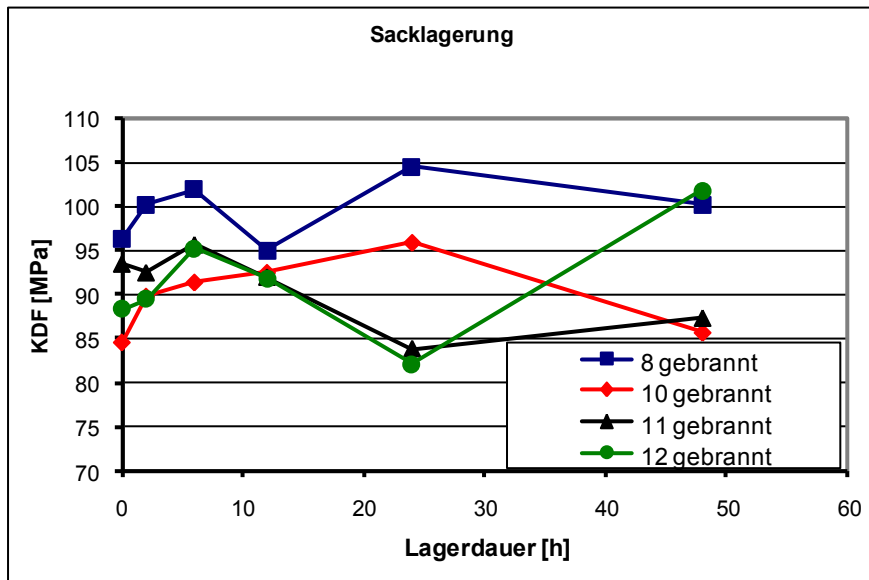


Abbildung 28: KDF gebrannt für Varianten R8, R10, R11, R12 in Abhängigkeit der Lagerdauer im Sack



Abbildung 30: Prüfkörper der Versuche 4 nach den Trocknen

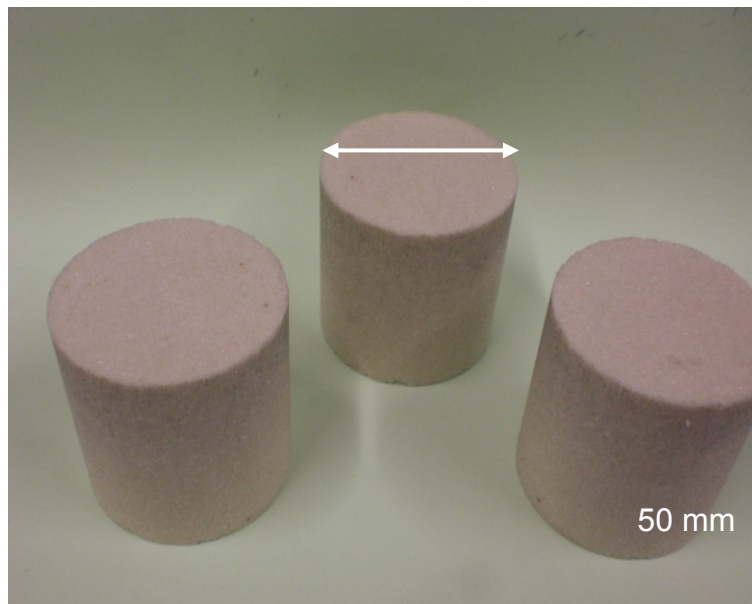


Abbildung 31: Prüfkörper der Versuche 10 nach den Brennen

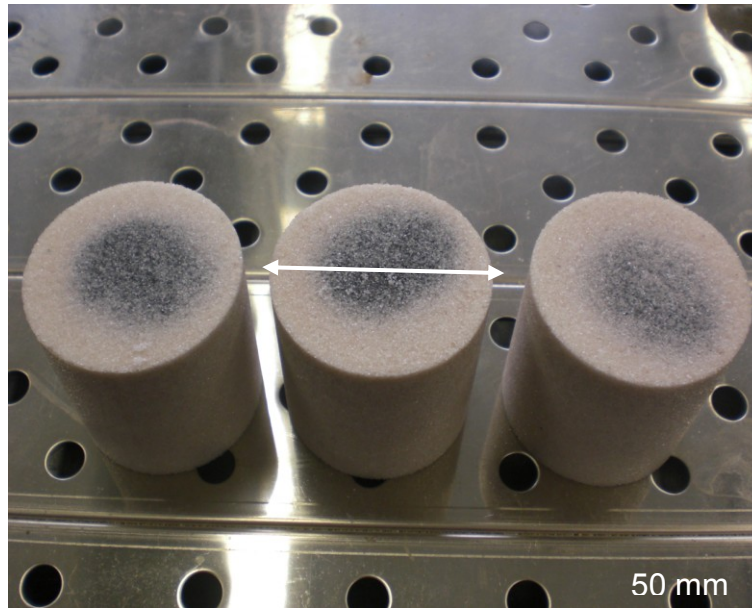


Abbildung 32: Prüfkörper der Versuche 13 nach den Brennen

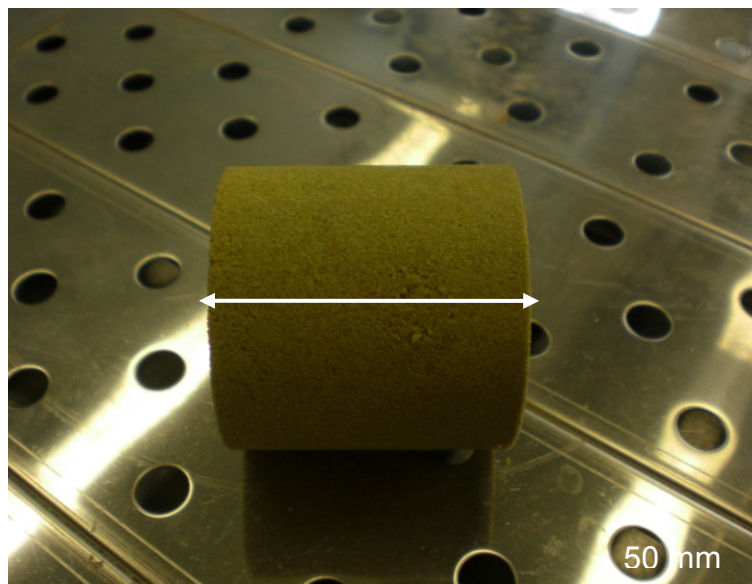


Abbildung 33: Prüfkörper der Versuche 15 nach den Brennen