



## DIPLOMARBEIT Master Thesis

### **Das Abplatzverhalten von Ultrahochleistungsbeton mit modifizierter Mikrostruktur unter Brandbelastung**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Ao. Univ.-Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Dr.h.c. Elemer Bölcskey**  
**Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Johannes Kirnbauer**  
**Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Heinrich Bruckner**

Institut für Hochbau und Technologie E206  
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie  
Und Brandsicherheit

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Martin Salomon**  
Matrikelnummer 0426105  
Leobendorfer Straße 28/5,  
A-2105 Unterrohrbach

Wien, Dezember.2016

---



# Danksagung

Diese Arbeit entstand während meines Studiums am Institut für Hochbau und Technologie – Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit der TU Wien. An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir bei der Absolvierung meines Studiums geholfen und zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt Ao.Univ.Prof.i.R. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Elmer Bölskey für die Möglichkeit die Diplomarbeit am Institut durchzuführen und für die Bereitstellung der Laboreinrichtung und der Baustoffe zur Durchführung der Versuche. Ein besonderer Dank gebührt Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Heinrich Bruckner für die vielen Stunden der Unterstützung bei dieser Arbeit und den hilfreichen Anregungen.

Darüber hinaus gebührt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer und Herrn Amtsdirektor Ing. Hubert Mayerhofer für die Hilfe bei der Anwendung der Laboreinrichtung und ihre Unterstützung.

Ein großer Dank gebührt auch allen meinen Freunden, die mich während meiner Studienzeit begleitet haben und auch in Zukunft begleiten werden. Besonders möchte ich Lisi, Peter und Christian hervorheben, die mit ihrem Know-how wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie (vor allem Marlies, Maria, Gebhard, Sonja) bedanken. Sie brachten unendlich viel Geduld und Verständnis auf, um mir den erfolgreichen Abschluss meines Studiums und dieser Arbeit zu ermöglichen



# Kurzfassung

Ultrahochleistungsbeton ist ein Beton dessen Druckfestigkeit über der in der ÖNORM EN 206-1 genormten Druckfestigkeitsklasse ( $> 115 \text{ N/mm}^2$ ) liegt. Durch seine sehr dichte und homogene Mikrostruktur werden aktuell Festigkeiten unter Normalbedingungen von bis zu  $250 \text{ N/mm}^2$  erreicht. Darüber hinaus weist er auch eine sehr hohe Dauerhaftigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber äußere Einflüsse auf. Aus UHPC lassen sich Bauwerke mit schlanken und dünnwandigen Bauteilen realisieren, die sehr hohen Belastungen standhalten können.

Bei Beton kann es infolge von Brandeinwirkungen zu Gefügeschädigungen bis hin zu Betonabsprengungen kommen. Im Vergleich zum Normalbeton sind diese Absprengungen bei UHPC aufgrund seiner viel dichteren Gefügestruktur deutlich intensiver. Ursache dafür ist der durch die Brandeinwirkung entstehende Wasserdampf, der durch das dichte Betongefüge am Entweichen gehindert wird. Die Zugabe von geeigneten PP-Fasern minimiert die Betonabsprengungen beziehungsweise verhindert sie vollständig.

Neben den Untersuchungen des Abplatzverhaltens war ein zusätzliches Ziel dieser Arbeit, einen kompakten Versuchsbrandofen zu konstruieren, mit dem das abgeplatzte Material schnellst möglich aus dem Ofen transportiert wird, um es in weiterer Folge analysieren zu können.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde in umfangreichen Versuchsreihen verschiedene UHPC-Rezepturen hergestellt, die unterschiedlichen Nachbehandlungs- und Lagerungsbedingungen unterzogen wurden, um die Auswirkung der Veränderung der Mikrostruktur auf das Abplatzverhalten von UHPC unter Brandeinwirkung zu untersuchen. Darüber hinaus wurden ebenfalls die Festigkeitseigenschaften der unterschiedlichen Betonrezepturen untersucht.

# Abstract

Ultra High Performance Concrete is concrete which has a higher compressive strength than the ÖNORM EN206-1 standardized compressive strength class ( $> 115 \text{ N/mm}^2$ ). Currently strengths of up to  $250 \text{ N/mm}^2$  under standard conditions are achieved through a very dense and homogenous microstructure. Therefore, this concrete displays a very good longevity and resistance against external impact. Buildings with slender and thin-walled components, which withstand great stress, can be realized through the use of UHPC.

Dealing with concrete after fire exposure, damages to the structure or even spalling of concrete can occur. In comparison to standard concrete, this spalling in UHPC is more intensive due to its denser structure. The reason for this is the developed water vapor, which is caused by fire exposure and which cannot exhaust through the dense concrete structure. The addition of adequate polypropene-fiber minimizes the spalling of concrete or, respectively, prevents it completely.

Apart from the examination of spalling, it was another objective of this thesis to construct a compact furnace, which facilitates the fast transport of spalled material quickly out of the oven to enable further analysis.

In the scope of this thesis, various UHPC formulas were produced in extensive, experimental series, which were treated with different subsequent-treatment procedures and stored under different conditions. This was done to analysis the effects on the microstructure and on the spalling of UHPC after fire exposure. Furthermore, the strength properties of various UHPC formulas were evaluated.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Allgemeines .....	1
1.2	Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit .....	1
1.3	Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen Ultra High Performance Concrete (UHPC)</b> .....	<b>3</b>
2.1	Allgemeines .....	3
2.2	Ausgangsstoffe und Zusammensetzung.....	5
2.2.1	Zement.....	6
2.2.2	Gesteinskörnung (Zuschläge).....	11
2.2.3	Zusatzstoffe.....	13
2.2.4	Wasser .....	17
2.2.5	Zusatzmittel .....	18
2.2.6	Fasern .....	21
2.3	Mischen von UHPC.....	27
2.3.1	Mischwerkzeuge .....	28
2.4	Betonstruktur.....	30
2.5	Nachbehandlung.....	34
2.6	Betontechnologische Kennwerte.....	37
2.6.1	Wasser/Zement-Wert (W/Z-Wert) .....	37
2.6.2	Wasser/Bindemittel-Wert (W/B-Wert).....	38
2.6.3	Wasser/Feinstoff-Wert (W/Fv-Wert).....	39
2.7	Mechanische Eigenschaften .....	39
2.7.1	Biegezugfestigkeit .....	39

2.7.2	Druckfestigkeit .....	40
2.7.3	Elastizitätsmodul .....	41
2.8	Brandverhalten von UHPC.....	42
2.8.1	Temperatureinfluss auf die Druckfestigkeit .....	42
2.8.2	Temperatureinfluss auf die Biegezugfestigkeit .....	43
2.8.3	Temperatureinfluss auf den E-Modul .....	43
2.8.4	Abplatzverhalten von UHPC .....	44
2.8.5	Polypropylenfasern bei Temperatureinwirkung.....	50
<b>3</b>	<b>Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung.....</b>	<b>52</b>
3.1	Frischbetonherstellung .....	52
3.2	Herstellung der Probekörper.....	53
3.2.1	Verwendete Ausgangsstoffe.....	53
3.2.2	Grundlegende Mischreihenfolge .....	55
3.2.3	Schalung der Probekörper .....	56
3.3	Frischbetonprüfungen.....	58
3.3.1	Bestimmung des Luftgehaltes .....	59
3.3.2	Ausbreitfließmaß.....	60
3.3.3	Bestimmung der Frischbetonrohichte .....	60
3.4	Festbetonprüfungen .....	61
3.4.1	Bestimmung der Biegezugfestigkeit.....	62
3.4.2	Bestimmung der Druckfestigkeit .....	63
3.4.3	Bestimmung der Festbetonrohichte .....	64
3.4.4	Wassergehalt .....	65
3.4.5	Mikrostrukturuntersuchung mittels Quecksilber-Pososimetrie.....	65
3.5	Brandversuche .....	71

3.5.1	Brandofen .....	72
3.5.2	Versuchsaufbau und -durchführung .....	75
3.6	Sieblinie .....	79
<b>4</b>	<b>Vorversuche und Versuchsplanung .....</b>	<b>80</b>
4.1	Mischungsentwürfe .....	80
4.1.1	Mischungsentwürfe mit Mikro-Hohlglaskugeln .....	80
4.1.2	Mischungsentwürfe mit Luftporenbildner .....	88
4.2	Versuchsplanung.....	95
<b>5</b>	<b>Hauptversuche .....</b>	<b>99</b>
5.1	Biegezugfestigkeit.....	100
5.2	Druckfestigkeit.....	102
5.3	Wassergehalt .....	104
5.4	Brandversuche .....	106
5.4.1	Abplatzungsbeginn und Abplatzungsdauer.....	108
5.4.2	Gewichtsverläufe während der Brandprüfung.....	110
5.4.3	Abplatzmenge .....	121
5.4.4	Sieblinie des abgeplatzten Materials .....	123
5.5	Porositätsmessungen.....	126
5.6	Zusammenhänge und Interpretationen.....	131
5.6.1	Abplatzbeginn und Wassergehalt .....	131
5.6.2	Abplatzdauer und Wassergehalt.....	134
5.6.3	Abplatzintensität und Wassergehalt.....	135
5.6.4	Abplatztemperatur und Wassergehalt.....	136
5.6.5	Abplatztemperatur und Abplatzintensität .....	138
5.6.6	Sieblinie abgeplatztes Material und Wassergehalt.....	140

<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>142</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>146</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>153</b>
8.1	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_K_1 .....	153
8.2	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_K_2 .....	155
8.3	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_W_1 .....	157
8.4	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_W_2 .....	159
8.5	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_L105_1 .....	161
8.6	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_L105_2 .....	163
8.7	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_L250_K_1 .....	165
8.8	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_L250_K_2 .....	167
8.9	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_L250_W_1.....	169
8.10	Brandversuchsprotokoll Platte BAS_L250_W_2.....	171
8.11	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_K_1 .....	173
8.12	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_K_2 .....	175
8.13	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_W_1 .....	177
8.14	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_W_2 .....	179
8.15	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_L105_1 .....	181
8.16	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_L105_2 .....	183
8.17	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_L250_K_1 .....	185
8.18	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_L250_K_2 .....	187
8.19	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_L250_W_1.....	189
8.20	Brandversuchsprotokoll Platte MHG_L250_W_2.....	191
8.21	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_K_1.....	193

8.22	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_K_2.....	195
8.23	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_W_1 .....	197
8.24	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_W_2 .....	199
8.25	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_L105_1 .....	201
8.26	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_L105_2 .....	203
8.27	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_L250_K_1 .....	205
8.28	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_L250_K_2 .....	207
8.29	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_L250_W_1 .....	209
8.30	Brandversuchsprotokoll Platte LPB_L250_W_2 .....	211
8.31	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_K_1.....	213
8.32	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_K_2.....	215
8.33	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_W_1 .....	217
8.34	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_W_2 .....	219
8.35	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_L105_1 .....	221
8.36	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_L105_2 .....	223
8.37	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_L250_K_1 .....	225
8.38	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_L250_K_2 .....	227
8.39	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_L250_W_1 .....	229
8.40	Brandversuchsprotokoll Platte FAS_L250_W_2 .....	231



# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Beton ist ein sehr alter Baustoff, der schon in der Römerzeit verwendet wurde. Als Ausgangsstoffe für den so genannten „opus caementitium“ wurden gebrannter Kalk und Ton verwendet. Die Römer stellten damit druckfeste Bauteile und Gebäude her. Das wohl eindrucksvollste und berühmteste Bauwerk dieser Zeit aus opus caementitium ist das Pantheon in Rom. Die beeindruckende Kuppel hat eine Spannweite von 43,3 (Kollegger, 2009, S. 1-1). Auch in der heutigen Zeit ist das Bestreben vieler Planer, Architekten und auch Bauherren immer schlankere Bauteile und höhere, anspruchsvollere Bauwerke zu entwerfen und zu realisieren. Deshalb muss auch der Beton in seinen zahlreichen Eigenschaften und Leistungsmerkmalen verbessert und weiterentwickelt werden (Rossbacher, Schneider, Kirnbauer, 2010, S. 1).

In den 70er Jahren begann man mit der Entwicklung von Betonen mit einer Druckfestigkeit über 60 N/mm<sup>2</sup>. Diese Werkstoffe werden heute als hochfeste Betone oder Hochleistungsbetone bezeichnet. Auf Basis des Hochleistungsbetons wurde Anfang der 90er Jahre von *Bouygues S.A. Scientific Division* der Reactive Powder Concrete (RPC) entwickelt. Der Name leitet sich von der Reaktivität und Feinheit der Bestandteile dieses Betons ab. Die internationale Bezeichnung für diese Betonart ist Ultra High Performance Concrete (UHPC). Im deutschsprachigen Bereich wird er auch als ultrahochfester Beton (UHFB) oder Ultrahochleistungsbeton bezeichnet. Um das Potential dieses neuen Betons auszuschöpfen und die Eigenschaften zu verbessern wird an vielen Universitäten dazu geforscht (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 5) (Kirnbauer, 2013, S. 2).

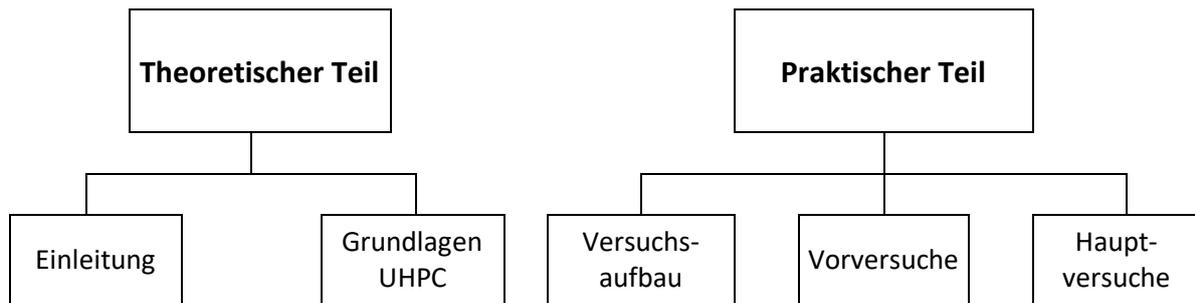
## 1.2 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Bei Beton kann es infolge von Brandeinwirkungen zu Gefügeschädigungen bis hin zu Betonabsprengungen kommen. Im Vergleich zum Normalbeton sind diese Absprengungen bei UHPC viel intensiver. Deshalb ist es die Aufgabenstellung dieser Arbeit das Abplatzverhalten von Ultra High Performance Concrete zu analysieren und mittels Modifikation der

Mikrostruktur zu verändern. Ziel dieser Arbeit ist es das Abplatzverhalten besser zu verstehen und die unterschiedlichen UHPC Mischungen diesbezüglich miteinander zu vergleichen.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit unterteilt sich in einen theoretischen und einen experimentellen Teil (Abbildung 1.1).



**Abbildung 1.1:** Aufbau der Masterarbeit

Im theoretischen Teil werden zuerst die grundlegende Herstellung und die Ausgangsstoffe von UHPC beschrieben. Darüber hinaus werden die generellen Eigenschaften dargestellt und die Unterschiede zu Normalbeton erläutert. Ein weiterer Abschnitt des theoretischen Teils ist das Brandverhalten von UHPC.

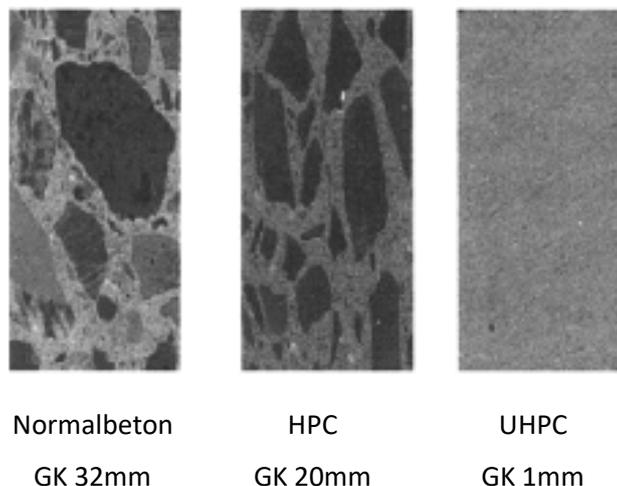
Im praktischen Teil dieser Arbeit werden die durchgeführten Versuche und die dafür verwendeten Gerätschaften beschrieben. Des Weiteren werden die Vor- und Hauptversuche ausgewertet und diskutiert.

## 2 Grundlagen Ultra High Performance Concrete (UHPC)

### 2.1 Allgemeines

In Österreich werden Betone nach ÖNORM EN 206-1 oder ÖNORM B 4710-1 in Druckfestigkeitsklassen bis 115 N/mm<sup>2</sup> eingeteilt. Beton mit einer Druckfestigkeit bis 60 N/mm<sup>2</sup> wird als Normalbeton bezeichnet. Ab der Druckfestigkeitsklasse C55/67 spricht man von Hochfestem Beton (HPC). Als Ultra High Performance Concrete (UHPC) wird Beton mit einer Würfeldruckfestigkeit über 115 N/mm<sup>2</sup> bezeichnet. Der Einsatz dieses Betontyps in der Praxis ist noch mit verwaltungstechnischem Aufwand verbunden, da er normativ noch nicht erfasst ist (*Schneider, Horvath, 2003, S. 1-2*).

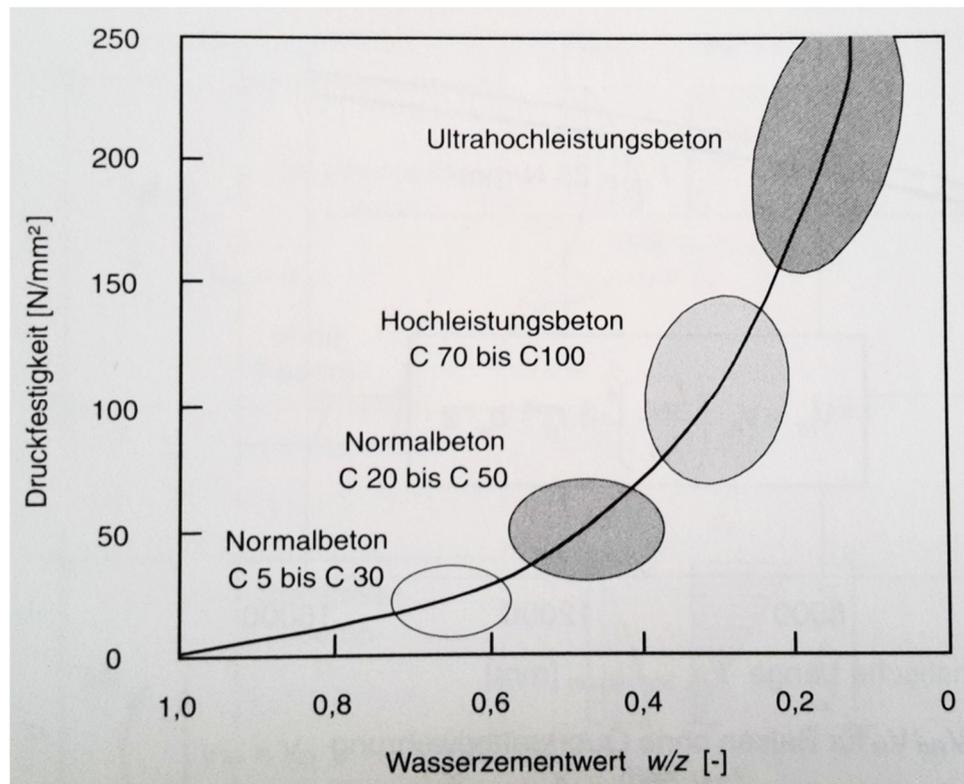
UHPC erreicht seine Festigkeit u.a. durch eine sehr dichte und homogene Mikrostruktur, die durch die Abstimmung des Korngefüges der verschiedenen Komponenten entsteht. Die Korngröße der einzelnen Zuschläge ist kleiner als 1 mm (Abbildung 2.1), daher wird UHPC auch oft als Feinkornbeton bezeichnet (*Schneider, Horvath, 2003, S. 2-3*).



**Abbildung 2.1:** Vergleich der Mikrostruktur von Normalbeton, HPC und UHPC (*Lins, 2004, S. 6*)

Aktuell erreicht man mit UHPC unter Normalbedingungen Druckfestigkeiten zwischen 150 und 250 N/mm<sup>2</sup>. Mit speziellen Nachbehandlungsverfahren und optimierten Mischungskomponenten können weit höhere Druckfestigkeiten erreicht werden. Die Ursache der hohen Festigkeiten liegt an der Reduzierung der Porosität des Zementsteins und an der Erhöhung des Feinkornanteils. Machbar wird dies auch durch die Zugabe hochleistungsfähiger

Fließmittel damit der Wasser/Bindemittelwert, unter den zur vollständigen Hydratation notwendigen Wert von 0,4 auf 0,23 bis 0,25 vermindert werden kann und der Beton trotzdem noch eine verarbeitungsfähige Konsistenz aufweist (Abbildung 2.2). Diese Maßnahme bewirkt im Mikrogefüge des Zementsteins, dass die Kapillarporen und die Gefügaporen verringert werden. Die Optimierung des Kornanteils erfolgt größtenteils im Mehlkornbereich, also bis zu einer Korngröße von 0,125 mm (Fehling, et al., 2005, S. 1,4).



**Abbildung 2.2:** Spektrum der Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit der W/Z-Wertes (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 308)

Ultra High Performance Concrete steht in der Fachwelt nicht nur für extrem hohe Druckfestigkeiten, sondern auch für weitere Eigenschaften, die gegenüber Normalbeton verbessert wurden. Darunter fallen die Abriebfestigkeit, die Korrosionsbeständigkeit, die Frost- Taubeständigkeit, der hohe E-Modul, die Beständigkeit gegen Chloridangriff, ein hoher Verschleißwiderstand und die längere Dauerhaftigkeit (Tang, 2004, S. 5-6) (Ductal, 2016).

Die sehr guten Eigenschaften und die hohe Leistungsfähigkeit von UHPC beruhen im Wesentlichen auf folgende Maßnahmen (Kirnbauer, 2013, S. 13):

- Verbesserung der Packungsdichte durch Optimierung der Sieblinie der Ausgangsstoffe
- Ergänzung der Mischungszusammensetzung durch reaktive Zusatzstoffe wie Mikrosilika oder Nanosilika und/oder Beimengung von inerten Zusatzstoffen
- Verminderung des Wasser-Zementwerts auf  $< 0,3$  durch Zugabe von Hochleistungsfließmitteln
- Zugabe von Fasern
- Verminderung des Größtkorns der Zuschläge auf  $GK < 1\text{mm}$
- Begrenzung der Zuschlagsmenge
- Verwendung von geeigneten Zementsorten
- Erhöhung der Homogenität durch Verbesserung des Mischprozesses.

## 2.2 Ausgangsstoffe und Zusammensetzung

Normalbeton ist ein klassisches 3-Stoff-System (Zement, Zuschläge und Wasser), bei Hochleistungsbeton spricht man wegen der Ergänzung des klassischen Systems mit Zusatzstoffen (z.B. Silikastaub) und Zusatzmittel (Hochleistungsfließmittel) von einem 5-Stoff-System (Abbildung 2.3) (Holschemacher, Dehn, 2003, S. 2) (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 7).

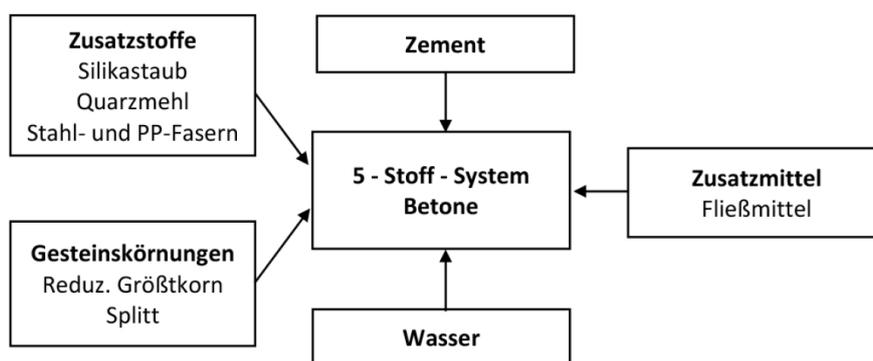


Abbildung 2.3: Ultrahochfester Beton als 5-Stoff-System (Peneder, 2016, S. 4)

### 2.2.1 Zement

Zement wird in der ÖNORM EN 197-1 in sechs Hauptarten unterteilt (ÖNORM EN 197-1 (Entwurf), 2014, S. 14):

- „CEM I Portlandzement
- CEM II Portlandkompositzement
- CEM III Hochofenzement
- CEM IV Puzzolanzement
- CEM V Hüttensand-Puzzolan-Zement
- CEM VI Kompositzement“

Zement ist ein fein gemahlener, anorganischer, nichtmetallischer Stoff. Es ist ein elementarer Bestandteil von Beton und zählt zu den hydraulischen Bindemitteln. Der Zement erhärtet, sowohl an der Luft als auch unter Wasser, durch chemische Reaktion mit dem Anmachwasser. Es bilden sich dabei wasserunlösliche, chemisch stabile Verbindungen, die Calciumhydrate. Sie kristallisieren nadelförmig aus und sind für die hohen Festigkeiten des Betons oder Zementmörtels verantwortlich (Rümmelin, 2005, S. 7) (Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 35,52).

Rohstoffe für die Zementherstellung sind grundlegend Kalk, Sand, Ton bzw. Mergel, die in Steinbrüchen abgebaut werden. Sie werden getrocknet und fein zum sogenannten Rohmehl vermahlen. Durch das Brennen des Rohmehls bei etwa 1450°C entsteht Zementklinker, der unter Zugabe von Gips und weiteren hydraulisch wirksamen Stoffen zu Zement vermahlen wird. Besonders Hüttensand und Flugasche beeinflussen den Zementstein wesentlich und durch deren Zugabe können die Eigenschaften des Zements verändert werden (Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 36) (Schneider, Horvath, 2003, S. 5).

Beim Brennen treten grundsätzlich vier Klinkerphasen auf, die alle unterschiedlich bei der Zementerhärtung mitwirken (Schneider, Horvath, 2003, S. 5).

- C<sub>3</sub>S            Tricalciumsilicat
- C<sub>2</sub>S            Dicalciumsilicat
- C<sub>3</sub>A            Tricalciumaluminat
- C<sub>4</sub>AF          Tetracalciumaluminatferrit.

Abgesehen von den vier Klinkerphasen kommen auch unerwünschte Nebenbestandteile im Portlandzementklinker vor. Freikalk (CaO) und Periklas (MgO) führen zum Treiben des Betons und sind deswegen auf Anteile von maximal 3-5% der gesamten Masse begrenzt (Schneider, Horvath, 2003, S. 7). Die Tabelle 2.1 zeigt die Eigenschaften und die Massenanteile der verschiedenen Portlandzementklinkerphasen.

**Tabelle 2.1:** Portlandzement-Klinkerphasen, ihre Eigenschaften und Massenanteile (Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 45)

Klinkerphasen	Chemische Formel	Kurzbezeichnung	Eigenschaften	Massenanteile im Klinker %
Tricalciumsilicat	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	schnelle Erhärtung, hohe Hydratationswärme, hohe Festigkeit	45 - 80
Dicalciumsilicat	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	langsame, stetige Erhärtung, niedrige Hydratationswärme, hohe Festigkeit	0 - 32
Tricalciumaluminat	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	schnelle Reaktion mit $\text{H}_2\text{O}$ , hohe Hydratationswärme, geringe Festigkeit, anfällig gegen Sulfatwasser	7 - 15
Tetracalciumaluminatferrit	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4(\text{A},\text{F})$	langsame und geringe Erhärtung, widerstandsfähig gegen Sulfatwasser	4 - 14
freies CaO (Freikalk)	CaO	C	in geringen Mengen unschädlich, sonst Kalktreiben	0,1 - 3
freies MgO (Periklas)	MgO	M	in größeren Mengen Treiben	0,5 - 4,5

Die Erhärtung des Zementleims knüpft direkt an dessen Erstarren bzw. Versteifen an. Gemäß ihrer chemischen Reaktionsfähigkeit bilden sich die Hydratationsprodukte nicht zeitlich synchron. Erste Reaktionen entstehen schon nach einer Stunde, andere erst nach einigen Monaten oder Jahren. In Gleichung 2.1 sind die chemischen Reaktionsabläufe der unterschiedlichen Klinkerphasen mit dem Anmachwasser dargestellt (Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 54).

Tricalciumsilicat C<sub>3</sub>S:



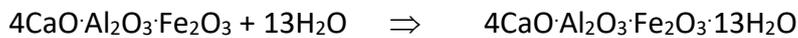
Dicalciumsilicat C<sub>2</sub>S:



Tricalcium-aluminat C<sub>3</sub>A:



Tetracalcium-aluminatferrit C<sub>4</sub>AF:



**Gleichung 2.1:** Hydratationsreaktionen der unterschiedlichen Klinkerphasen (*Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 54*)

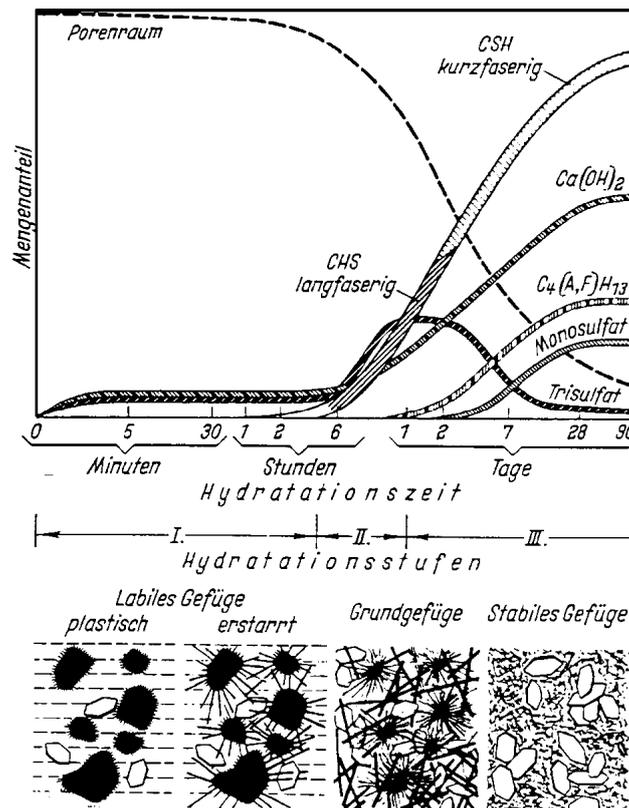
Die Zementhydratation umfasst insgesamt drei Stufen. Bei den Reaktionsprozessen kurz nach dem Anmischen spricht man von der Hydratationsstufe eins. Dabei führt die Entstehung des sehr feinen nadelförmigen Calciumhydroxids Ca(OH)<sub>2</sub> und Trisulfats zu einer minimalen Versteifung des noch plastischen Zementleims. Nach zirka ein bis drei Stunden wird der Zementleim steif. Die Hohlräume zwischen den einzelnen Zementteilchen werden durch die sich ausprägenden längeren Trisulfatnadeln überbrückt (*Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 55*).

Der Reaktionsverlauf der zweiten Hydratationsstufe beginnt nach vier Stunden und endet nach acht Stunden. In dieser Zeit werden abgesehen von den Trisulfatkristallen auch langfaserige CSH-Kristalle gebildet. Mit der Entstehung der CSH-Phase tritt eine Erstarrung des Zementleims ein, da die langen CSH-Fasern die Zwischenräume der Zementpartikel überspannen. Im Zementleim bildet sich ein poriges Grundgefüge aus (*Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 56*).

In der dritten Hydratationsstufe werden die Hohlräume zwischen den tafelförmigen Ca(OH)<sub>2</sub> Kristallen weiter verfüllt. Durch die Entstehung feiner, kurzer CSH-Kristalle verdichtet sich das Grundgefüge und die Festigkeit nimmt stetig zu. Durch die zunehmende Abnahme der Zwischenräume spricht man vom Erhärten des Zements. Die Reaktionsprozesse sind nach 28

Tagen größtenteils abgeschlossen wobei der gesamte Erhärtungsvorgang, wie schon oben erwähnt, mehrere Monate bis Jahre dauert (Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 56).

In Abbildung 2.4 werden die einzelnen Hydratationsstufen mit den jeweiligen Vorgängen bildlich dargestellt.



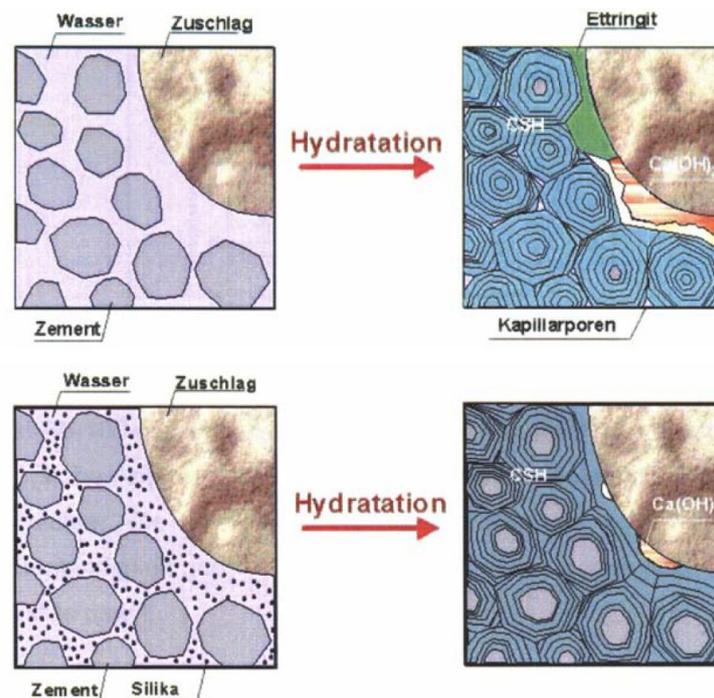
**Abbildung 2.4:** Einteilung der Hydratation in drei Stufen (Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 55)

Der Erhärtungsvorgang und die Erhärtungsgeschwindigkeit werden durch die verwendete Zementart und die Partikelgröße bestimmt. Je feiner der Zement aufgemahlen ist, desto größer ist seine Reaktionsoberfläche und desto schneller seine Aushärtezeit. Die oben angegebenen Hydratationsreaktionen laufen dabei für alle Zementarten gleich ab (Kirchberger, Bruckner, Schneider, Oswald, 2014, S. 56).

Für Ultra High Performance Concrete spielt die Zementart eine besonders große Rolle. Die einzelnen Zementarten weisen bedeutende Unterschiede hinsichtlich der Dauerhaftigkeit, der Festigkeitsentwicklung und der Endfestigkeit auf (Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008, S. 28). Durch den niedrigen Wasser-Zement-Wert von UHPC eignen sich hauptsächlich

Zementarten mit einem geringen Wasserbedarf. Weitere wichtige Punkte bei der Zementwahl sind, dass es eine gute Verträglichkeit zwischen Fließmittel und Zement gibt und dass er eine geringe Erstarrungsgeschwindigkeit aufweist. In der Literatur werden vorwiegend  $C_3A$ -arme bzw.  $C_3A$ -freie Portlandzemente empfohlen und eingesetzt (Kirnbauer, 2013, S. 32).

Zemente mit fehlender  $C_3A$ -Klinkerphase weisen durch einen niedrigen Anteil an Sulfatträgern einen niedrigen Wasserbedarf auf. Die  $C_3A$ -Klinkerphase hat im Vergleich zu den anderen Klinkerphasen ein sehr hohes Fließmittelaufnahmevermögen. Durch Entfernung dieser Klinkerphase kann auch der Fließmittelanteil wesentlich reduziert werden. Des Weiteren bilden sich durch die Verwendung von  $C_3A$ -freiem Zement nur geringe Mengen an Ettringit. Ettringit bewirkt einen Festigkeitsverlust, da es nur geringe Festigkeit aufweist und dadurch die Grenzfläche zwischen Zuschlag und Zementstein schwächt. Eine Verringerung der Ettringitbildung führt zu einer homogenen, verdichteten Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementstein und stabilisiert somit das Betongefüge (Kirnbauer, 2013, S. 32) (Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008, S. 28-29).



**Abbildung 2.5:** Schematische Darstellung der Zementhydratation- oberes Bild: Normalbeton;  
unteres Bild: Hochleistungsbeton (Peneder, 2016, S. 8)

Abbildung 2.5 zeigt die Hydratation von Normalbeton und Hochleistungsbeton. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei der Hydratation von Hochleistungsbeton durch die Verwendung von

C<sub>3</sub>A-freiem Zement kein Ettringit entsteht und die Berührungsfläche zwischen Zementstein und Zuschlag homogener ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Zement zur Herstellung von UHPC folgenden grundlegenden Anforderungen genügen muss (*Siebel, Müller, 2003, S. 18*):

- „Geringer C3A-Gehalt,
- Niedriger Alkaligehalt,
- Geringe bis mittlere Feinheit,
- Geringer Wasseranspruch,
- Geringe Hydratationswärmeentwicklung.“

### 2.2.2 Gesteinskörnung (Zuschläge)

Bei Ultra High Performance Concrete sind die Art und die Eigenschaften der Zuschläge von großer Bedeutung. Da die Zementmatrix von UHPC eine sehr hohe Festigkeit aufweist, muss die Gesteinskörnung eine ähnlich hohe Festigkeit aufweisen, da sonst die Leistungsgrenze des Betons durch Versagen der Zuschläge erreicht wird (*Rosbacher, Schneider, Kirnbauer, 2010, S. 7*).

Bei UHPC-Mischungen werden vorwiegend feine Sande mit Korngrößen zwischen 150 und 1000 µm in Verbindung mit Gesteismehl verwendet. Die porösen heterogenen Kontaktzonen zwischen dem Zementleim und der Gesteinskörnung werden durch den feinen Zuschlag nahezu vollständig entfernt. Es ist äußerst wichtig, dass bei der Herstellung von UHPC mit einer stetigen Kornverteilungskurve gearbeitet wird. Eine optimale Sieblinie wird erreicht, wenn die Korngrößenverteilung der Zuschläge annähernd der Fullerparabel entspricht (*Schneider, Horvath, 2003, S. 28-30*).

$$A(d) = \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^q$$

A(d)      Massenanteil von Korndurchmesser kleiner d, bezogen auf die Gesamtmasse [%]

d<sub>max</sub>      Größtkorndurchmesser des Korngemisches [mm]

d          Korndurchmesser (0 ≤ d ≤ d<sub>max</sub>) [mm]

q          Körnungsexponent [-]

**Gleichung 2.2:** Fullerkurve (*Rosbacher, Schneider, Kirnbauer, 2010, S. 9*)

Der Exponent  $q$  der Fullerkurve beträgt bei der idealen Sieblinie 0,5. Der Durchmesser des Größtkorns und die Sieblinie beeinflussen die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, die Packungsdichte der Zuschläge und der damit verbundene Zementleimbedarf und die erreichbaren Festigkeiten (*Berger, Schneider, Kirnbauer, 2009, S. 29*).

Die Auswahl der Zuschläge ist von einigen verschiedenen Punkten abhängig (*Schneider, Horvath, 2003, S. 29*):

- „Mineralische Zusammensetzung des Zuschlags und daraus folgende chemische Wechselbeziehungen hinsichtlich des Verbundes mit dem Zementstein.
- Korngrößenverteilung („Sieblinie“)
- mechanische Eigenschaften
- Kornform
- Wasseranspruch
- Oberflächenrauigkeit“

Quarzsand besitzt eine Druckfestigkeit von bis zu 300 N/mm<sup>2</sup> und ist deshalb als Zuschlag für die Erzeugung von UHPC hervorragend geeignet. Es wird hauptsächlich Quarzsand mit einer Korngröße von maximal 1 mm verwendet. Aufgrund der sehr kleinen Korndurchmesser muss für die Kornverteilung des Zuschlags die Fullerkurve modifiziert werden (*Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008*).

$$A = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,1}{D}\right)^{0,5}} \times \left[ \left(\frac{d}{D}\right)^{0,125} - \left(\frac{0,1}{D}\right)^{0,125} \right]$$

D Siebweite [mm]

A prozentueller Feststoffdurchgang, der durch das Sieb mit der Nennweite  $d$  hindurchgeht [%]

D Größtkorndurchmesser des Zuschlags [mm]

**Gleichung 2.3:** Modifizierte Fullerkurve (*Berger, Schneider, Kirnbauer, 2009, S. 30*)

### 2.2.3 Zusatzstoffe

Ein weiterer Teil des Fünf-Stoff-Systems sind die Zusatzstoffe. Sie werden analog ihrem Reaktionsvermögen eingeteilt. Die ÖNORM B4710-1 unterscheidet zwischen (ÖNORM B 4710-1, 2002, S. 17, 30):

- Nahezu inaktive Zusatzstoffe (Typ I)
  - Gesteinsmehl
  - Pigmente
- puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe (Typ II)
  - Flugasche
  - Silikastaub
  - Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe.

Bei der Herstellung von Hochleistungsbetonen kommen vorwiegend Silikastaub, Metakaolin und Flugasche zur Anwendung. Silikastaub kann entweder als Suspension oder auch als Feststoff verwendet werden. Neben den reaktiven Zusätzen kommen auch inerte Stoffe wie Kalsteinmehl und Quarzmehl zum Einsatz um die Kornzusammensetzung zu optimieren (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 12).

Zusatzstoffe haben gemäß ihrer Reaktionsfähigkeit, Korngrößenverteilung und chemischen Zusammensetzung unterschiedliche Einflüsse auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Durch gezielte Zumischung können unterschiedliche Effekte erreicht werden und verschiedene Eigenschaften des Betons verbessert werden. Durch den hohen Feinstkornanteil optimieren die Zuschläge das Porensystem im Zementstein indem sie die Hohlräume füllen. Dadurch kommt es zum sogenannten Füller- und Kugellagereffekt und somit auch zu einer weit höheren Packungsdichte. Weiters bewirkt die puzzolanische Reaktion eine Festigkeitssteigerung durch zusätzlich entstandene Calciumsilikathydrat-Phasen (CSH-Phasen). Zusatzstoffe verbessern auch die Kontaktzone zwischen den Zuschlägen und dem Zementstein (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 12-13).

In der anschließenden Tabelle 2.2 sind einige Zusatzstoffe, deren Eigenschaften sowie der Einfluss auf die Betoneigenschaften aufgelistet.

**Tabelle 2.2:** Eigenschaften einiger Puzzolane und deren Wirkung auf die Betoneigenschaften  
(Peneder, 2016, S. 15)

Chemische Bestandteile		Silikastaub (Mikrosilika)	Nanosilika	Metakaolin	Steinkohleflugasche
SiO <sub>2</sub>	[M.-%]	91 - 97	100	51 - 55	40 - 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[M.-%]	1 - 1,4	-	40 - 42	23 - 24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[M.-%]	0,2 - 1,2	-	0,5 - 4,6	2 - 16
CaO	[M.-%]	0,2 - 0,4	-	0,1 - 0,34	0,6 - 8,5
Mittlere Partikelgröße	[µm]	~ 0,1	~ 0,015	~ 1,3	~ 10 - 20
Spezifische Oberfläche	[m <sup>2</sup> /g]	18 - 22	180 - 230	10 - 16,8	0,3 - 0,8
Zustandsform		Pulver, Suspension	Kolloidale Lösung, Pulver	Pulver	Pulver
Druckfestigkeit		(++)	(++)	(++)	(+)
Zugfestigkeit		(+)	(+)	(+)	(+)
Biegezugfestigkeit		(+)	(+)	(+)	(+)
E-Modul		(+), (0)	(+), (0)	(+)	(+)
Verschleißwiderstand		(++)	(++)		
Sulfatwiderstand		(+), (++)	(+), (++)	(+)	(+)
Frost-Tausalz-Widerstand		(++)	(++)	(+)	(0), (-)
Chloriddiffusion		(++)	(++)	(++)	(+)

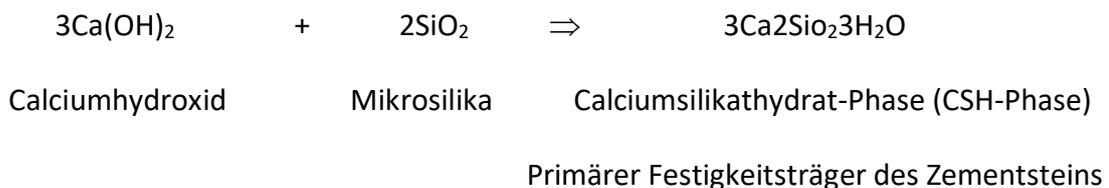
Am häufigsten wird bei der Herstellung von UHPC Silikastaub und Gesteinsmehl verwendet. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit Mikrosilika und Quarzmehl vorgestellt.

### Mikrosilika

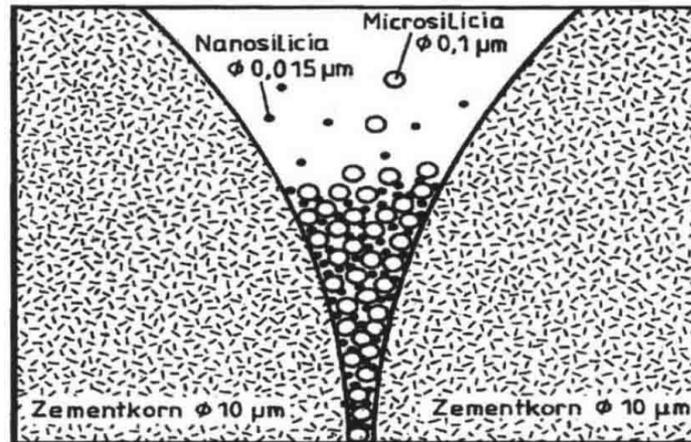
Mikrosilika ist der verbreitetste und bekannteste Zuschlagstoff mit sehr hohen puzzolanischen Eigenschaften. Aus chemisch mineralogischer Sicht ist der Hauptbestandteil von Mikrosilika glasig erstarrtes, amorphes Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>). Mikrosilika entsteht als Nebenprodukt bei der Herstellung von Ferrosilicium- bzw. Siliciummetallen. Das im Rauchgas enthaltene Siliciumoxid (SiO) oxidiert mit Sauerstoff. Beim Abkühlen kondensiert das Siliciumoxid zu amorphem Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>) und wird durch Filtrieren der Abluft gewonnen. Im Rauchabzug bilden sich die Silikateilchen zu einer fast perfekten Kugelform mit einer Partikelgröße zwischen 0,10 und 0,15 µm. Im Vergleich zu Zement hat Mikrosilika eine 10-fach höhere spezifische Oberfläche mit circa 16 bis 22 m<sup>2</sup>/g. Die Partikelgröße ist im Vergleich zum Zement 100-fach kleiner. Neben der chemischen Zusammensetzung bestimmt auch die Verteilung der Korngrößen die Qualität von Silikastaub (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 13) (Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008, S. 33).

Mikrosilika hat Auswirkungen auf die Betoneigenschaften und verbessert sie maßgebend:

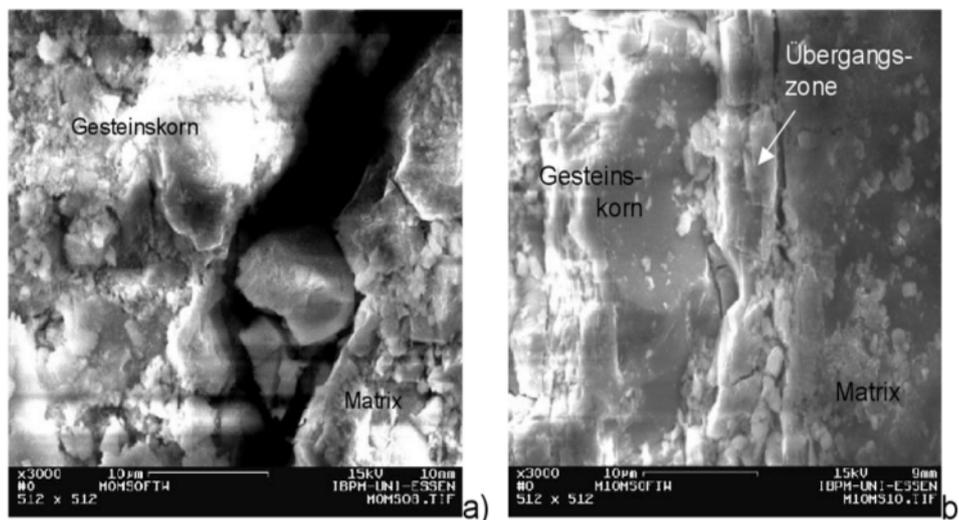
- Die hohe Feinheit der Partikel verbessert durch den Kugellager- und Füllereffekt das Zementsteingefüge, wodurch es deutlich homogener und dichter wird (Abbildung 2.6). Die kleinen Teilchen füllen dabei die Zwischenräume in mitten der teilweise unhydratisierten Zementkörner, wodurch die Packungsdichte der Zementsteinmatrix wesentlich gesteigert wird (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 13).
- Durch die puzzolanische Reaktion entstehen zusätzliche Calciumsilikathydrat-Phasen (CSH-Phasen), die eine Festigkeitssteigerung des Betons bewirken. Der Anteil an reaktiven silikatischen Bestandteilen bestimmt maßgebend die puzzolanische Reaktionsfähigkeit. Das bei der Hydratation entstandene Calciumhydroxid  $\text{Ca(OH)}_2$  (CH-Phase) reagiert mit dem Mikrosilika und es entsteht Calciumsilikathydrat (CSH-Phasen) (Gleichung 2.4). Da es sich um eine Kontaktflächenreaktion handelt, hat die zur Verfügung stehende Oberfläche einen wesentlichen Einfluss (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 13) (Schneider, Horvath, 2003, S. 14-15).
- Durch die Bildung zusätzlicher CSH-Phasen und die Verringerung des Porenvolumens wird die Kontaktzone zwischen dem Zuschlagstoff und dem Zementstein wesentlich verbessert (Abbildung 2.7) (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 13).



**Gleichung 2.4:** Puzzolanische Reaktion von Silikazusätzen (Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008, S. 35)



**Abbildung 2.6:** Füllereffekt von Mikrosilika und Nanosilika (Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008, S. 35)



**Abbildung 2.7:** Übergangszone eines Betons a) ohne Silikazugabe (links) und b) mit 10% Silikazugabe (rechts) unter dem Rasterelektronenmikroskop (Palecki, 2006, S. 15).

## Quarzmehl

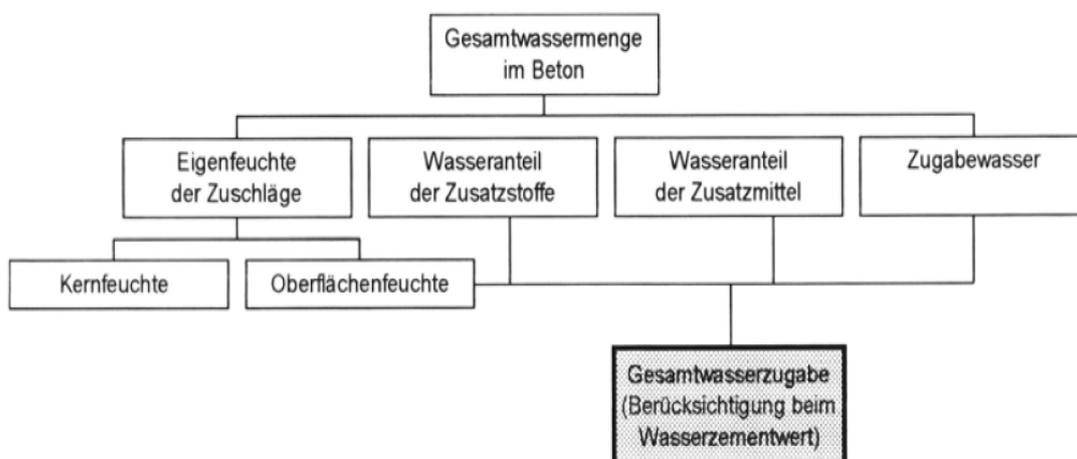
Gesteinsmehl ist ein essentieller Bestandteil bei der Herstellung von UHPC. Es kommen vorwiegend feingemahlene, kristalline Quarze zur Anwendung. Quarzmehl zählt zu den inerten anorganischen Zusatzstoffen. Unter normalen Bedingungen, ohne spezielle Wärmebehandlung, reagiert es nicht mit dem Zement oder dem Wasser und hat nur physikalische Füllwirkung, um die Kornzusammensetzung zu optimieren. Andererseits kann Quarzmehl neben der Erhöhung der Packungsdichte bei Wärmebehandlungen eine wesentliche Festigkeitssteigerung bewirken. Die besten Ergebnisse werden bei

Wärmbehandlungen mit Quarzmehl mit einer Korndurchmesser zwischen 5 und 25  $\mu\text{m}$ . Die mittlere Partikeldurchmesser liegt bei 10  $\mu\text{m}$  und liegt damit in derselben Kornklasse wie der Zement (*Holschemacher, Dehn, 2003, S. 7*) (*Richard, Cheyrezy, 1995, S. 1507*).

Ein weiterer Grund für die Festigkeitssteigerung ist die Verringerung der Zementleimschichtdicke, die aus der großen Oberfläche des Quarzmehls resultiert. Generell hat eine Reduzierung der Zementleimschichtdicke eine Druckfestigkeitserhöhung zur Folge. Grundvoraussetzung dafür ist, dass der Wasser/Bindemittelwert bei Ersatz von Zement durch Quarzmehl nicht erheblich verändert wird. Dieser Effekt kann einerseits an der Verbesserung der Sieblinie und der damit verbundenen Verdrängung des Wassers aus dem Porensystem liegen. Andererseits könnte auch das niedrige Wasseraufnahmevermögen dafür verantwortlich sein (*König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 313*)

## 2.2.4 Wasser

Um die Hydratation des Betons zu initiieren wird Wasser benötigt. Dieses Wasser wird nach ÖNORM B 4710-1 auch als Anmachwasser bezeichnet. Die ÖNORM EN 206 unterscheidet zwischen dem Gesamtwassergehalt und dem wirksamen Wassergehalt. Dabei setzt sich definitionsgemäß der Gesamtwassergehalt aus der Summe der Feuchtigkeit der Gesteinskörnung, dem Wasseranteil in den Betonzusatzstoffen und den Zusatzmitteln, dem Zugabewasser, sowie dem Wasser von gegebenenfalls zugeführtem Eis oder einer Dampfheizung zusammen (Abbildung 2.8) (ÖNORM EN 206, 2014, S. 16).



**Abbildung 2.8:** Gesamtwassermenge (Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008, S. 31)

Den wirksamen Wassergehalt definiert die ÖNORM EN 206 (Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, 2014, S. 15) als „*Differenz zwischen der Gesamtwassermenge im Frischbeton und der Wassermenge, die von der Gesteinskörnung aufgenommen wird.*“

Sofern Naturwässer keine betonschädigenden Verunreinigungen aufweisen, sind sie als Zugabewasser geeignet. Besonders ist auf Stoffe zu achten, die sich auf Erhärtung negativ auswirken oder die den Korrosionsschutz beeinträchtigen. Bei Bedenken ist eine Eignungsprüfung des Wassers erforderlich. Restwasser ist als Zugabewasser bei der Herstellung von (ultra) hochfesten Beton nicht erlaubt (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 12). Trinkwasser ist immer als Zugabewasser geeignet und kann ohne Prüfung verwendet werden. Für UHPC-Mischungen wird laut Literatur zwischen 140 bis 220 l/m<sup>3</sup> Wasser verwendet. Der Gesamtwassergehalt liegt häufig in einem Bereich von 180 bis 200 l/m<sup>3</sup> (Kirnbauer, 2013, S. 39).

Der Wasseranspruch der Zuschläge ist neben der Art des verwendeten Bindemittels der wichtigste Faktor für die Bestimmung der notwendigen Anmachwassermenge. Die Verarbeitbarkeit und Konsistenz wird im Gegensatz zu Normalbeton bei UHPC-Mischungen durch die Zugabe von Fließmitteln geregelt (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 12).

### **2.2.5 Zusatzmittel**

Betonzusatzmittel sind meist pulverförmige oder flüssige Stoffe, die die Frisch- oder Festbetoneigenschaften wesentlich verändern. Durch ihre chemische oder physikalische Wirkung können zum Beispiel die Verarbeitbarkeit, der Frost-Tauwiderstand oder das Erstarren und Erhärten gesteuert werden. Neben den gewünschten Verbesserungen können auch unerwünschte Änderungen anderer Betoneigenschaften auftreten (Kampen, Richter, 2014, S. 1).

Bei Normalbeton werden Zusatzmittel nur in geringen Mengen zugegeben (<5 M.-% des Zementanteils), deshalb haben sie für den Raumanteil im Beton keinen Einfluss. Bei UHPC kann die zugegebene Menge deutlich über dieses Maß hinausgehen. Werden in einer Betonmischung mehr als 3 l/m<sup>3</sup> Frischbeton an Zusatzmittel verwendet, müssen die flüssigen Anteile beim Wasser/Zement-Wert berücksichtigt werden (Kampen, Richter, 2014, S. 1) (Gay, Kleen, Niepmann, 2003, S. 45).

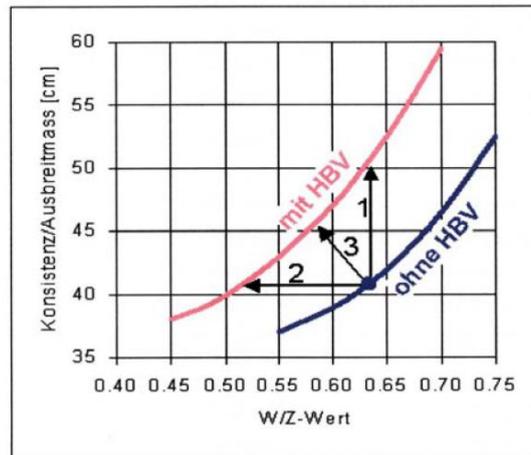
In der ÖNORM EN 934-2 wird die Verwendung von Zusatzmittel geregelt und die unterschiedlichen Arten werden aufgelistet. Es wird zwischen folgenden Wirkungsgruppen unterschieden (ÖNORM EN 934-2, 2014, S. 5-6):

- Fließmittel (FM)
- Luftporenbildner (LP)
- Betonverflüssiger (BV)
- Verzögerer (VZ)
- Dichtungsmittel (DM)
- Erhärtungsbeschleuniger (BE)
- Erstarrungsbeschleuniger (BE)
- Schaumbildner (SB)
- Stabilisierer (ST)
- Viskositätsmodifizierer (VMA)
- Recyclinghilfen (RH)
- Chromatreduzierer (CR)
- Schwindreduzierer.

Zusatzmittel spielen für die Herstellung von UHPC eine große Rolle, da sich bei Wasser/Bindemittel-Werten von 0,20-0,35 kein verarbeitbarer Beton entstehen würde. Grundsätzlich werden bei der Mischung von UHPC am häufigsten Fließmittel, Betonverflüssiger, Luftporenbildner und Verzögerer eingesetzt. Die anderen Wirkungsgruppen der Zusatzmittel spielen nur eine untergeordnete Rolle (*Gay, Kleen, Niepmann, 2003, S. 45*)

### **Fließmittel**

Die Herstellung von UHPC mit niedrigen Wasser/Bindemittel-Werten ist erst durch die Entwicklung von Hochleistungsfließmittel möglich. Im Gegensatz zu Verflüssigern ist die Wirksamkeit bei Fließmittel viel höher. Sie bewirken eine beträchtliche Reduktion des Wassergehalts bei gleichbleibender Konsistenz oder steigern das Setz- und Ausbreitmaß bei gleichbleibendem Wasseranteil (Abbildung 2.9) (*Gay, Kleen, Niepmann, 2003, S. 46*).



**Abbildung 2.9:** Anwendungsmöglichkeiten Fließmittel (Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008, S. 37)

Fließmittel werden aus Polykondensaten und Polycarboxylaten erzeugt. Die bekanntesten chemischen Stoffe sind:

- Sulfonierte Naphtalinformaldehydkondensate (NFS)
- Sulfonierte Melaminformaldehydkondensate (MFS)
- Polycarboxylatether (PCE).

NFS und MFS sind nur bei sehr hohen Dosierungen in der Lage die gewünschten Wassereinsparungen und Konsistenzen zu erreichen. Der negative Effekt war eine Verzögerung des Erstarrungsverhaltens. Im Gegensatz dazu hat Polycarboxylatether schon bei geringer Zugabe die gewünschte Wirkung. Ein weiterer Vorteil bei der Mischung von UHPC ist, dass bei PCEs im Gegensatz zu NFS und MFS keine Sättigungserscheinung eintritt (Gay, Kleen, Niepmann, 2003, S. 47-49, 51) (Kirnbauer, 2013, S. 36).

Der Wirkungsmechanismus von Fließmitteln ist darin begründet, dass es von den Zementpartikeln adsorbiert wird und dadurch die Oberflächenladung der Partikel negativ wird. Die agglomerierten Zementteilchen werden aufgetrennt und das in den Zwischenräumen enthaltene Wasser freigesetzt. Dieses Wasser verbessert die Viskosität und kann bei brauchbarer Konsistenz eingespart werden (Kirnbauer, 2013, S. 36) (Gay, Kleen, Niepmann, 2003, S. 49-50).

### **Luftporenbildner**

Luftporenbildner erzeugen eine bestimmte Menge an gleichmäßig verteilten, kugelförmigen Mikroluftporen. Sie werden während des Mischens eingebracht und verbleiben nach dem Erhärten im Beton. Die Luftporen verbessern den Frost-Tausalz widerstand des Betons und verringern das kapillare Ansaugvermögen. Weiters verbessern sie die Konsistenz des Betons bei gleichem Wassergehalt und führen dadurch zu einer Reduktion des Wasserbedarfs. Negativ zu bewerten ist, dass durch den Eintrag von Luftporen die Betonfestigkeit sinkt (*Gay, Kleen, Niepmann, 2003, S. 46*) (*Kampen, Richter, 2014, S. 2*).

Die Rohstoffe für die Herstellung von Luftporenbildner sind Tenside. Die häufigsten Grundstoffe sind Balsamharze und Wurzelharze. Es kommen aber auch Alkylarylsulfonate, Alkylsulfate und Fettsäuren zum Einsatz. Tenside sind bifunktional. Ihre Wirkungsweise besteht darin, dass sich der polare Teil am Zementteilchen anlagert und das unpolare Ende sich an der Micellenbildung beteiligt, die dann als Mikroluftporen im Beton bestehen bleiben (*Gay, Kleen, Niepmann, 2003, S. 51-52*).

Durch das Einmischen von Mikrohohlkugeln können ebenfalls Hohlräume eingebracht werden (*Kampen, Richter, 2014, S. 2*).

### **2.2.6 Fasern**

Durch die Zugabe von Fasern werden einige Eigenschaften von Beton deutlich verbessert. Das betrifft bei UHPC vor allem die im Vergleich zur Druckfestigkeit geringe Zugfestigkeit, das Verformungsvermögen, das Brandverhalten und die Schwindverformung bzw. Schwindrisse (*Dehn, Holschemacher, 2002, S. 1*).

Fasern für Beton können generell aus jedem Material hergestellt werden, wenn die nachfolgenden Anforderungen eingehalten werden (*Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 23*):

- Der Faserwerkstoff muss eine ausreichende alkalische Beständigkeit besitzen.
- Die Zugabe der Fasern darf sich nicht negativ auf die Materialeigenschaften des Frisch- und Festbetons auswirken.
- Die Anforderungen zur Umweltverträglichkeit und physiologischen Unbedenklichkeit sind vom Faserwerkstoff zwingend einzuhalten.

- Der Faserwerkstoff muss eine ausreichend hohe Zugfestigkeit und Bruchdehnung aufweisen, um eine rissüberbrückende Wirkung zu erzielen.
- Damit die Fasern beim Mischen nicht zerbrechen oder verbiegen, ist eine ausreichende Zugfestigkeit und Bruchdehnung des Faserwerkstoffes notwendig.

Am häufigsten werden Stahlfasern, Glasfasern und Polypropylenfasern für einen faserbewehrten Beton verwendet. Um mehrere Betoneigenschaften zu verbessern können die einzelnen Fasermaterialien miteinander kombiniert werden und als sogenannten „Fasercocktails“ dem Beton zugegeben werden. Naturfasern werden zurzeit bei der Betonherstellung nur selten verwendet (Dehn, Holschemacher, 2002, S. 3).

In Tabelle 2.3 sind die am häufigsten verwendeten Faserarten und deren Werkstoffeigenschaften aufgelistet.

**Tabelle 2.3:** Ausgewählte Faserarten und ihre Werkstoffe (Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 24)

Faserarten	Faser- durchmesser* [µm]	Faser- länge* [mm]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruch- dehnung [%]
Metallische Fasern						
-Stahldratfasern	150-1200	12-70	7,85	160-210	1000-2600	1-10
-Spannfasern	400	30	7,85	210	900	
-Blechfasern	400-650	12-50	7,85	210	270-1000	10
AR-Glas	3-30	3-25	2,68-2,70	72-75	1500-3700	1,5-2,4
Polypropylenfasern						
-monofil	18-22	6-18	0,91	4-18	320-560	8-20
-fibrilliert	50-100	6-19	0,91	3,5-10	320-400	5-15
Polyacrylnitritfasern	18-104	4-24	1,18	15-20	330-530	6-10
Polyethylenfasern	38	12-38	0,97	87-170	2500-3100	2,7-3,5
Kohlenstofffasern	5-10	6-12	1,75-2,0	200-450	2000-5000	0,4-2,0
Aramidfasern	10	12-20	1,38-1,45	70-130	2700-3600	2,1-4
Zellulosefasern	15-400	2,5-350	1,05-1,50	5-100	120-1000	3-25
Asbestfasern	0,02-30	< 40	2,6-3,4	160-200	1000-4500	2-3

\* Typische Faserabmessungen hinsichtlich der Anwendung von Kurzfasern im Faserbeton

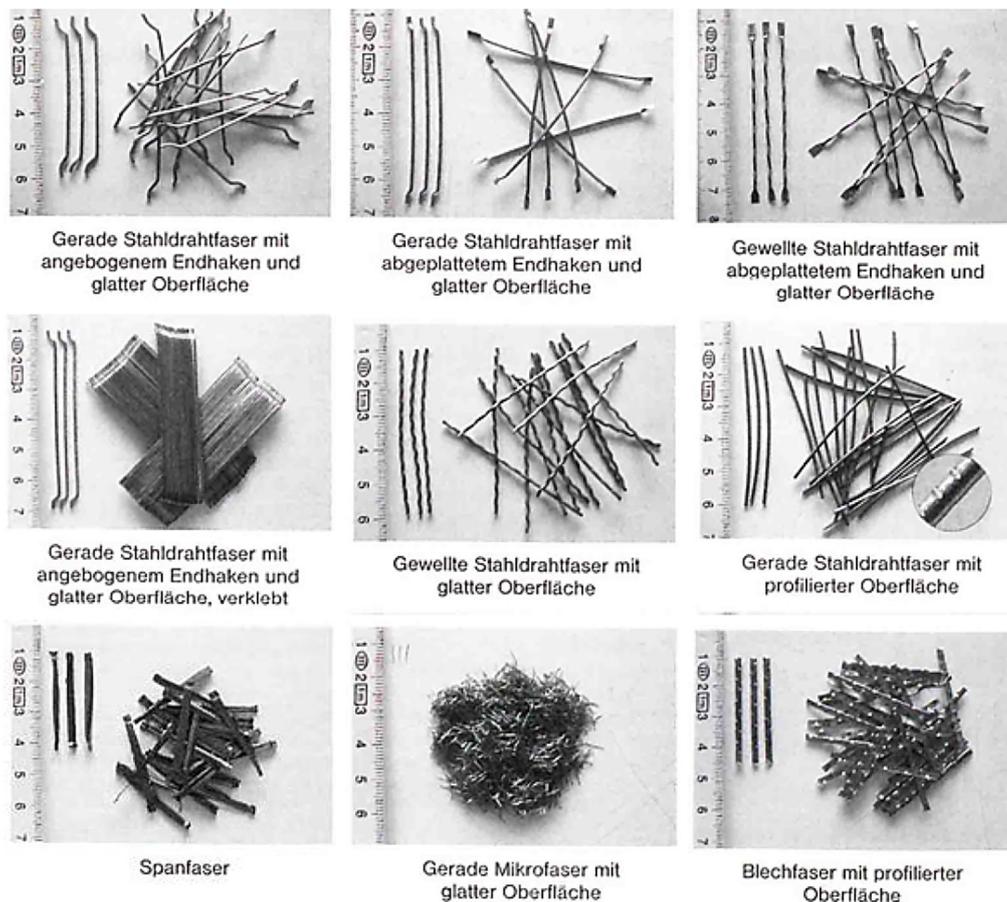
Die Gründe für das Versagen von faserbewehrtem Beton sind entweder das Herausziehen der Faser oder der Faserbruch. Den größten Einfluss haben dabei der Faserwerkstoff, der Verbund zwischen Faser und Zementmatrix und die Fasermenge. Auch die Ausrichtung und die Verteilung der Fasern spielen eine wesentliche Rolle (Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 32).

## Stahlfasern

Die Einteilung von Stahlfasern wird analog zu den Ausgangsmaterialien und den Herstellungsverfahren vorgenommen. Man unterscheidet zwischen (Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 26):

- Stahldrahtfasern
- Spanfasern
- Blechfasern.

Die einzelnen Stahlfaserarten haben unterschiedliche Werkstoffeigenschaften und werden in unterschiedlichen Formen hergestellt, um den Verbund zwischen Faser und Zementmatrix zu erhöhen (Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 26). Typische Formgebungen sind in Abbildung 2.10 dargestellt.



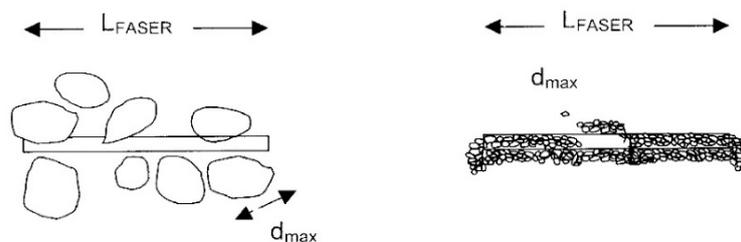
**Abbildung 2.10:** Typische Formgebung von Metallfasern (Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 25)

Für die Herstellung von Stahldrahtfasern werden Edelstahldrähte durch Walzen geführt und danach abgelängt. Es können neben geraden Fasern auch gewellte Formen hergestellt werden. Weiters ist es auch möglich die Oberfläche zu profilieren oder Endhaken zu erzeugen (Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 26).

Spanfasern werden durch Fräsen von Stahlblöcken gewonnen. Die Querschnittsform ist sichelförmig und sie sind um die Längsachse verdreht (Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 26).

Durch das Zerschneiden von Blechstreifen werden Blechfasern hergestellt. Durch aufgebrachtem Druck werden sie profiliert und/oder mit Endhaken bestückt (Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 26).

Im Gegensatz zu Normalbeton tritt bei UHPC durch Zugabe von Stahlfasern keine Verschlechterung der Verarbeitbarkeit ein. Die einzelnen Fasern werden durch die Verwendung feiner Zuschläge besser in die Matrix eingebettet, da das Verhältnis zwischen Faserlänge und Größtkorn höher ist als bei herkömmlichem Beton (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 36). Abbildung 2.11 zeigt den Unterschied der Fasereinbindung und das Verhältnis von Faserlänge zu Größtkorn zwischen Normalbeton und Ultrahochleistungsbeton.



**Abbildung 2.11:** Darstellung der Einbindung einer Faser gleicher Länge im gewöhnlichen Beton (links) und im UHPC (rechts) (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 36)

### Kunststofffasern

Kunststofffasern verbessern das Bruch- und Nachbruchverhalten von Hochleistungsbeton. Besonders das Brandverhalten wird positiv beeinflusst (siehe Kapitel 2.8.5). Für den Einsatz als Fasern im Beton sind nur Kunststoffe geeignet, die die notwendige Steifigkeit besitzen und die benötigte alkalische Beständigkeit aufweisen. Zurzeit eignen sich hierfür am besten

Polyacrylnitritfasern, Polypropylenfaser und Polyvinylalkoholfasern (*Wörner, 2002, S. 153*) (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 37*).

Kunststofffasern werden unterschieden in (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 37*):

- Spleißfasern
- Fibrillierte Polypropylenfasern
- Monofilamente Polypropylenfasern.

Die Angaben der Eigenschaften von handelsüblichen Polypropylenfasern sind der Tabelle 2.4 zu entnehmen.

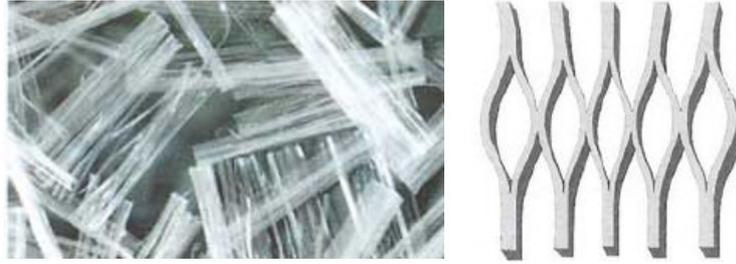
**Tabelle 2.4:** Angaben über handelsübliche Polypropylenfasern (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 37*)

Herstellungsart	Art	Zugfestigkeit der Faser [N/mm <sup>2</sup> ]	Form in Längsrichtung	Länge [mm]	Querschnitt	Breite, Durchm. [µm]	Oberflächenbeschaffenheit
gesponnen	monofil	300-700	gerade, gewellt	6-36	rund	10-35	glatt, rauh
geschnitten	fibrilliert	300-700	gerade	6-36	eckig	200-500	glatt, rauh
gespleißt	-	300-700	gerade	1-35	eckig	-	rauh

Spleißfasern werden nicht näher beschrieben, da sie durch ihren undefinierten Querschnitt für die Betonanwendung nicht empfohlen werden (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 38*).

Fibrillierte Fasern werden durch Herausstanzen aus einer Kunststoffolie hergestellt. Es entsteht ein Folienstreifen mit einem rechteckigen Querschnitt, der an mehreren Stellen eingeschnitten ist. Durch ihre netzartige Struktur sind die einzelnen Fasern noch gemeinsam zu Faserbündel verbunden (Abbildung 2.12). Durch die mechanischen Einwirkungen beim Mischvorgang (Scherkräfte) werden die Faserbündel in einzelne Fasern zerteilt (*Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 29*) (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 39*).

Fibrillierte Fasern haben einen Durchmesser von 300 bis 500 µm, wobei ihre Länge unterschiedlich sein kann. Sie sind Polypropylenfasern der ersten Generation. Ein Kilogramm enthält zirka sechs bis sieben Millionen Fasern (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 39*).



**Abbildung 2.12:** Fibrillierte Fasern (links) (*BBT Trading Consulting GmbH, 2009*); Schematische Darstellung der netzartigen Struktur (rechts) (*Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 29*)

Monofilamente Polypropylenfasern werden im Spinnverfahren hergestellt. Nach dem Spinnen werden ihre Oberflächen behandelt und die Fasern auf die gewünschten Längen zugeschnitten. Für einen besseren Verbund zwischen Faser und Matrix können die einzelnen Fasern durch weitere Bearbeitungsschritte in Wellenform gebracht werden. Weil Monofilamente Polypropylenfasern keine Verbindung untereinander haben, werden sie in der Fachsprache auch als „Einzelhaarfasern“ bezeichnet (Abbildung 2.13) (*Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 29*) (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 41*).



**Abbildung 2.13:** Monofilamente Fasern (*BBT Trading Consulting GmbH, 2009*)

Die Zugfestigkeit und der Elastizitätsmodul der Fasern kann durch besondere Bearbeitungsschritte, wie das Recken und/oder eine Wärmebehandlung, erhöht werden. Monofilamente Fasern sind in Längen zwischen sechs und zwölf Millimeter erhältlich. Bei einer Faserlänge von 12 mm befinden sich in einem Kilogramm Fasern rund 170 bis 300 Millionen Stück (*Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 29*) (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 41*).

### 2.3 Mischen von UHPC

Bei der Herstellung von UHPC hat vor allem das Mischen große Auswirkungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Wichtige Faktoren beim Mischprozess sind die Mischdauer, die Mischreihenfolge, die Mischtechnik und die Mischwerkzeuge. Des Weiteren wirken sich auch schon kleine Abweichungen von der Betonrezeptur auf die Eigenschaften aus. Damit sich nach der Herstellung eine hohe und gleichmäßige Qualität einstellt, müssen einzelne Ausgangsstoffe äußerst exakt dosiert werden. Störungen im Mikrogefüge werden schon durch kleine Dosierungsfehler verursacht und wirken sich am auffälligsten auf die Festbetoneigenschaften aus (Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008, S. 42) (Schneider Horvath, 2003, S. 69).

Ausgangsstoffe für UHPC Mischungen sind hochsulfatbeständiger Portlandzement, feiner Sand, Hochleistungsverflüssiger, sehr feine Zusatzstoffe (Mikrosilika, Gesteinsmehl) und Wasser. Um die Eigenschaften zu verbessern, können auch noch verschiedene Fasermaterialien zugemischt werden. Die einzelnen Komponenten werden nach vorgegebenem Mischungsentwurf eingewogen. In Tabelle 2.5 sind typische Betonrezepturen von Ultra High Performance Concrete (Schneider, Horvath, 2003).

**Tabelle 2.5:** Mischungsentwürfe für industriell hergestellte UHPC (Schneider, Horvath, 2003, S. 69)

Material	Menge	Menge
CEM I 42,5 R HS	705 kg/m <sup>3</sup>	705 kg/m <sup>3</sup>
feiner Sand (150 - 200 µm)	1010 kg/m <sup>3</sup>	1010 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinsmehl (< 150 µm)	210 kg/m <sup>3</sup>	210 kg/m <sup>3</sup>
Mikrosilika	230 kg/m <sup>3</sup>	230 kg/m <sup>3</sup>
Verflüssiger	38 l/m <sup>3</sup>	34,5 l/m <sup>3</sup>
Stahlfasern	-	140 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	195 l/m <sup>3</sup>	185 l/m <sup>3</sup>

Nach Kirnbauer (Kirnbauer, 2013, S. 49) wird Mischen als „eine Stoffvereinigung aus unterschiedlichen Stoffkomponenten“ definiert. Nach dem Mischen müssen die Ausgangsstoffe gleichmäßig verteilt sein. Das heißt, dass eine Probe aus der Mischung dieselbe Zusammensetzung wie die Gesamtmischung aufweist.

Wie schon oben erwähnt, kommt der Mischreihenfolge eine wesentliche Bedeutung zu. In der Regel werden alle trockenen Komponenten vermischt bis sie ein homogenes Gefüge aufweisen. Nach der sogenannten Trockenmischzeit werden die flüssigen Bestandteile der Rezeptur (Wasser und Fließmittel) zugegeben. Beinhaltet die Mischungsrezeptur auch Fasern, sind diese erst nach dem Einsetzen der Wirkung des Fließmittels zuzugeben (*Safranek, Schneider, Harand, Bruckner, 2008, S. 43*).

Ultra High Performance Concrete weist nach dem Mischen eine klebrige und plastische Konsistenz auf. Das ist auf die niedrigen betontechnologischen Kennwerte (niedriger W/Z-Wert, niedriger W/B-Wert) zurückzuführen. Für die Herstellung von UHPC gibt es in der Literatur einige Mischungsabläufe. Sie unterscheiden sich in der Mischreihenfolge und in der Zugabemenge. Für einen problemlosen Mischvorgang sollte man laut *Schneider und Horvath* folgende Punkte und Regeln beachten (*Schneider, Horvath, 2003, S. 70*):

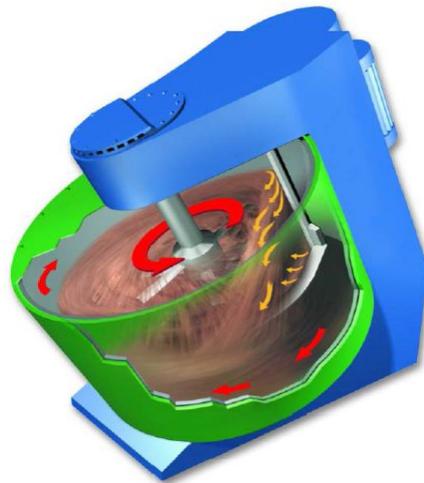
- *„Vermischen aller pulverförmigen Bestandteile, bis sich eine homogene Masse einstellt. Die Homogenität wird durch die Gleichmäßigkeit der Farbe der Mischung beurteilt (ca. 3 min).*
- *ist schließlich eine entsprechende Homogenität erreicht, muss die halbe Menge der Superverflüssigers in Wasser verdünnt und in die bisher trockene Mischung – während des Mischvorgangs – eingebracht werden.*
- *die zweite Hälfte des Verflüssigers wird mit der restlichen Anmachwassermenge verdünnt und etwa 2 Minuten später beigemischt.*
- *ca. 4 Minuten später, kurz vor Beendigung des Mischvorgangs, werden die Stahlfasern eingebracht.*
- *die ganze Mischung wird nochmals ca. 9 Minuten lang durchgemischt.“*

### **2.3.1 Mischwerkzeuge**

Für die Herstellung von Normalbeton werden vorwiegend Zwangsmischer und Freifallmischer verwendet. Generell können dieser Mischer auch bei der UHPC Herstellung verwendet werden. Ein Nachteil der herkömmlichen Mischer ist, dass sie keine hohen Schergeschwindigkeiten erreichen und dadurch keine optimale Homogenisierung der Gefügestruktur erreicht wird. Bei UHPC steht die Mischgüte im Zusammenhang mit der Werkzeuggeschwindigkeit des Mixers. Mit zunehmender Mischgeschwindigkeit verbessert

sich die Mischungsbeschaffenheit. Deshalb ist es vorteilhaft für die Herstellung von UHPC Intensivmischer zu verwenden (*Kirnbauer, 2013, S. 49*).

In Forschungseinrichtungen, die sich mit Ultra High Performance Concrete beschäftigen, wird häufig ein Intensivmischer der Firma *Eireich* verwendet. Abbildung 2.14 veranschaulicht das Mischprinzip des Eireichmischers das in weiterer Folge noch kurz erklärt wird (*Kirnbauer, 2013, S. 49*).



**Abbildung 2.14:** Mischprinzip des Eireich-Intensivmischers (*Kirnbauer, 2013, S. 50*)

Im Gegensatz zu herkömmlichen Mixchern, bei denen sich ausschließlich die Mischwerkzeuge bewegen, arbeitet der Eireich-Intensivmischer nach folgendem Prinzip. Ein auf einem schräg stehenden, rotierenden Mischsteller platzierter Behälter transportiert das gesamte Mischgut innerhalb einer Umdrehung zu dem Mischwerkzeug (Wirbler). Ein statischer Wandabstreifer, der zugleich als Strömunglenker dient, garantiert dass sich das Mischgut durch Fliehkräfte nicht an der Behälterwand anlagert und es auf den Wirbler geworfen wird. Eireich-Mischer haben keine Totzonen und verhindern das Entmischen bei hohen Werkzeuggeschwindigkeiten und längeren Mischzeiten (*Nold, 2012, S. 40*).

Für den Eireich-Mischer stehen unterschiedliche Wirblertypen zur Verfügung. Die Werkzeuggeschwindigkeiten des Mischbehälters und Wirblers können voneinander unabhängig eingestellt werden (*Kirnbauer, 2013, S. 50*).

### 2.4 Betonstruktur

Wie schon eingangs erwähnt, weist Ultra High Performance Concrete eine sehr dichte Gefügestruktur auf. *Schneider* und *Horvath* geben einige Maßnahmen zur Verbesserung der Dichte der Betonstruktur an (*Schneider, Horvath, 2003, S. 83*):

- Innerhalb der einzelnen Korngruppen erlaubt eine sehr dichte Korngrößenverteilung eine Mischung, die einige Korngruppen beinhaltet
- Um die Packungsdichte zu erhöhen, müssen die Zuschläge der Fullerparabel entsprechen
- Wegen der Verträglichkeit mit einzelnen Nachbehandlungsmethoden sollte nur C<sub>3</sub>A freier Zement verwendet werden.
- Verwendung von Ausgangsstoffen, die kaum Tendenzen zur Klumpenbildung aufweisen
- Für eine homogene Masse muss der Mischungsablauf optimiert werden
- Anpassung des Wasserbedarfs zur Verbesserung der verarbeitungstechnischen Eigenschaften und der Relativedichte.
- Positiv auf die Dichte wirkt sich die Aufbringung einer Druckkraft während der Abbindezeit aus.

Die Gesamtporosität ist im Gegensatz zu Normalbeton (15 Vol.-%) mit zirka 6 Vol.-% sehr gering. Die Gesamtporosität beinhaltet verschiedene Arten von Poren, die entsprechend ihrer Porengröße voneinander abweichen. Man unterscheidet zwischen Luft- oder Grobporen, Kapillarporen und Gelporen (*Schmidt, 2003, S. 9*) (*Kirnbauer, 2013, S. 58*). In Tabelle 2.6 sind die unterschiedlichen Poren mit ihren Porenradien aufgelistet.

**Tabelle 2.5:** Unterscheidung der unterschiedlichen Poren im Zementstein (Stangl, 2011, S. 33)

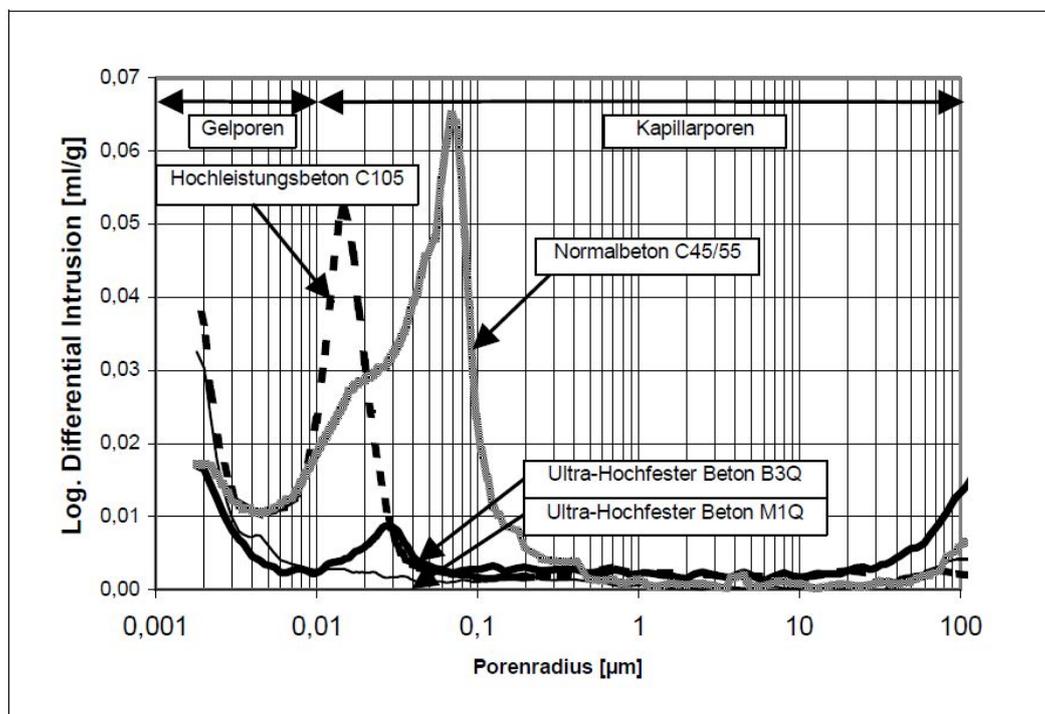
hydr. Radius $R_H$	Porenart	Merkmale
< 1 nm	Mikrogelporen	Oberflächenphysik stark gestört, unter normalen Bedingungen nicht gefrierbar
< 30 nm	Mesogelporen	Übergang von makroskopischen zu oberflächenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten, Gefrierbarkeit unter $-23^{\circ}\text{C}$ , Verdunstung in 50% rel. Feuchte
< 1 $\mu\text{m}$	Mikrokapillaren	Kapillares Saugen nur über kurze Distanz möglich, großer Kapillardruck, gefrierbar
< 30 $\mu\text{m}$	Mesokapillaren	durch Reibung verzögertes Saugen über Tage, große Steighöhe in wenigen Tagen, gefrierbar
< 1 mm	Makrokapillaren	sofortiges kapillares Saugen in Sekunden, hohe Beweglichkeit, geringe Steighöhe, gefrierbar
> 1 mm	Grobporen	Poren sind leer

Grobporen (Luftporen oder Verdichtungsporen) entstehen beim Anmischen des Betons. Sie haben Porenradien zwischen 1 und 10 mm und sind selbst bei sorgfältigem Verdichten nicht vollständig zu entfernen (Kustermann, 2005, S. 16).

Kapillarporen sind abhängig vom W/Z-Wert der Betonmischung. Sie haben einen Porendurchmesser zwischen 0,01 und 0,1  $\mu\text{m}$  und entstehen durch das überschüssige Wasser im Zementstein. Überschusswasser ist Wasser, das nicht für die Hydratation gebraucht wird, also weder chemisch noch physikalisch gebunden ist. Kapillarporen sind vorwiegend für die im Zementstein vor sich gehenden Transportvorgänge verantwortlich (Kustermann, 2005, S. 16) (Schneider, Horvath, 2003, S. 85).

Als Gelporen werden die Räume zwischen den mikrokristallinen Hydratationsprodukten des Betons bezeichnet. Sie sind Bestandteil des Zementgels und kommen in Größen zwischen 1 nm und 0,01  $\mu\text{m}$  vor. Unter Normalbedingungen sind Gelporen mit Wasser gefüllt und für Gase weitestgehend undurchlässig. Die Bildung der Poren ist vom W/Z-Wert größtenteils unabhängig. Für eine feinere Einteilung werden die Gelporen in Mikro- und Mesoporen unterteilt (Kustermann, 2005, S. 15).

Normalbeton hat größere Porenradien als UHPC. Abbildung 2.15 vergleicht die Porenradienverteilung zweier UHPCs mit einem Hochleistungsbeton und mit einem Normalbeton. Wie auf der Abbildung gut zu erkennen ist, weist der UHPC B3Q eine starke Reduktion der, für den Transport verantwortlichen, Kapillarporen auf. Bei der UHPC-Mischung M1Q fehlen sie praktisch ganz. Das ist eine der Hauptursachen für die sehr gute Dauerhaftigkeit von UHPC. Ordnungsgemäß hergestellter UHPC zeigt einen hohen Widerstand gegen das Eindringen von Gasen und Flüssigkeiten, das zugleich den Widerstand gegen das Eindringen von Chloridionen, gegen Carbonatisierung und gegen Frost-Tausalz-Angriffe erhöht (Schmidt, 2003, S. 9).



**Abbildung 2.15:** Vergleich der Porenradienverteilung von Normalbeton, Hochleistungsbeton und UHPC (Schmidt, 2003, S. 10)

Grundsätzlich kann die Untersuchung der Mikrostruktur von UHPC mittels drei Methoden erfolgen (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 326):

- Optische Spektroskopie (Millimeterbereich)
- Rasterelektronenmikroskopie (Mikrometerbereich)
- Transmissionselektronenmikroskopie (Nanometerbereich).

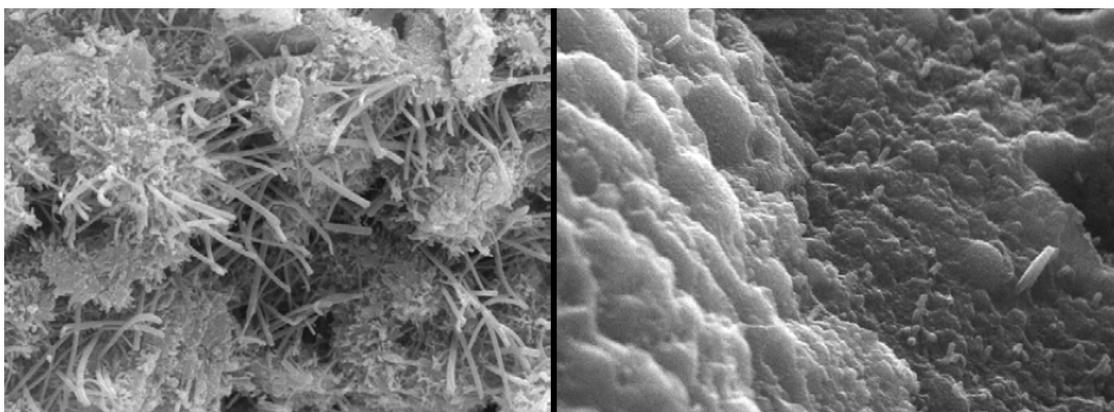
*Duget et al.* teilt die Gefügestruktur von UHPC in drei Bereiche ein (*König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 327*):

*„Bereich a) Sehr homogene Verteilung der einzelnen Betonbestandteile (CSH-Phasen, Sandkörner und unreaktierte Klinkerbestandteile) in der Betonmatrix im Vergleich zum konventionellen Beton.*

*Bereich b) Extrem dichte Matrix; sehr dichter Verbund zwischen Matrix und Quarzkörnern; nur wenige CSF-Bestandteile eingebettet in der Matrix; die Kontaktzone zwischen Sand und Matrix fehlt beim UHPC. Die dafür vorhandene Verbundzone zeigt stellenweise Risse, was darauf zurückgeführt werden kann, dass diese Übergangszone weniger dicht als die Matrix ist. Die Hydrattextur ist homogen und viel dichter als im konventionellen Beton.*

*Bereich c) ein faserartiges Netzwerk von CSH-Phasen; einige CSF-Bestandteile, die mit Zement in unterschiedlichem Maße reagiert haben; unreaktive Quarzbestandteile.“*

Abbildung 2.16 zeigt, dass sich bei der Hydratation von konventionellem Beton langnadelige CSH-Phasen bilden die sich nur wenig untereinander vernetzen. Beim Ultra High Performance Concrete dagegen wirkt das Gefüge sehr dicht. Durch Verfüllen der Hohlräume mit feinem Gesteinsmehl und Mikrosilika wird die Packungsdichte erhöht und es bleibt kaum Raum für die Erstellung langnadeliger kristalliner Phasen (*Stephan, Schmidt, 2007, S. 105*)



**Abbildung 2.16:** REM-Bilder der Mikrostruktur eines Normalbetons C 30/37 (links, Bildbreite 23  $\mu\text{m}$ ) und eines partikeloptimierten UHPC (rechts, Bildbreite 7  $\mu\text{m}$ ) (*Stephan, Schmidt, 2007, S. 105*)

Die Nachbehandlung von UHPC hat einen wesentlichen Einfluss auf die Mikrostruktur. Eine Wärmebehandlung ab 90°C bewirkt eine Zunahme der puzzolanischen Reaktion des Mikrosilikas, eine Verbesserung der Hydratation und die Porosität wird verringert. Im Gegensatz dazu zeigt UHPC mit einer Wärmebehandlung von 250°C erhöhte Porositätswerte. Auch eine Nachbehandlung mit Druck verbessert die Mikrostruktur, wobei diese Nachbehandlungsmethode eine geringere Auswirkung auf die Porosität hat wie die Wärmebehandlung (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 320, 325).

### 2.5 Nachbehandlung

Bei konventionellem Beton bildet sich durch das Verdichten an der Oberfläche ein Wasserfilm aus. Im Gegensatz dazu entsteht bei UHPC durch seine klebrige Beschaffenheit eine zähe Schicht, die sogenannte „Elefantenhaut“. Um das zu verhindern muss man den Beton einer gründlichen Nachbehandlung unterziehen. Unmittelbar nach dem Einbau sollte begonnen werden ihn vor zu schneller Austrocknung oder Verdunstung zu schützen. Abhängig von den klimatischen Bedingungen kann das durch andauernde Feuchtezufuhr, Abdecken mit Folien oder Aufbringen von dafür brauchbaren Nachbehandlungsmittel erfolgen (Kirnbauer, 2013, S. 57).

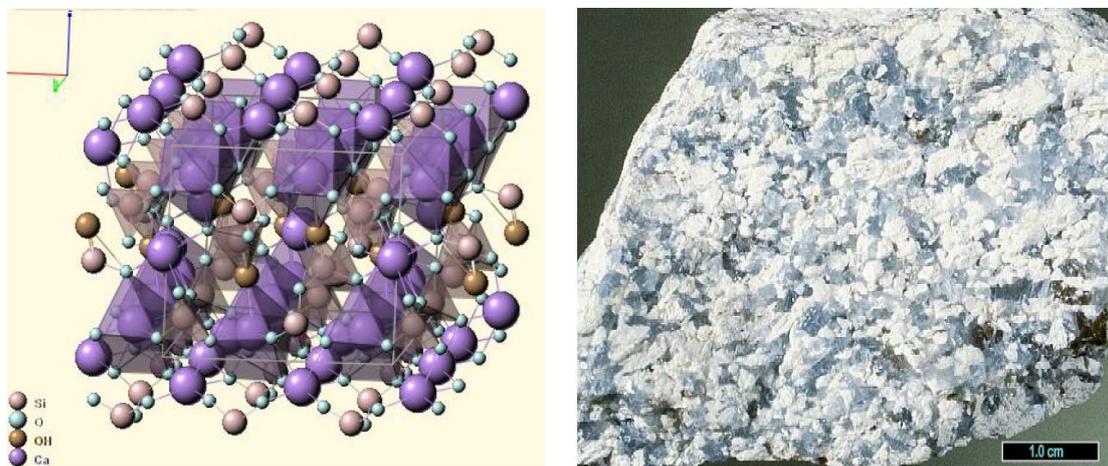
Es gibt auch Nachbehandlungsmethoden die die Betoneigenschaften wie zum Beispiel die Festigkeit verbessern. Es wird dabei zwischen einer Wärmebehandlung und einer Druckbehandlung unterschieden. Der Erhärtungsverlauf wird fast ausschließlich von den angegebenen Parametern festgelegt (Schneider, Horvath, 2003, S. 72):

- *W/B – Wert*
- *Chemische Zusammensetzung des Zements*
- *Mahlfeinheit des Zements*
- *Hydratationsgrad des Zements*
- *Zuschlagstoff und Sieblinie*
- *Verwendete Zusatzmittel und –menge*
- *Art und Menge der Zusatzstoffe*
- *Umgebungstemperatur*
- *Wärmebehandlung und/oder Druckbehandlung.“*

Die Drucknachbehandlung am Frischbeton bewirkt hauptsächlich eine Erhöhung der Dichte und das Auspressen von zugegebenem Wasser. Diese Methode verringert auch die Anzahl der eingeschlossenen Luftporen (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 318).

Bei der thermalen Nachbehandlung von UHPC muss zwischen feuchter und trockener Wärmebehandlung differenziert werden. Der Beton wird entweder mittels trockener Luft, feuchter Luft oder unter Wasser erwärmt. Laut Literatur (König, Viet Tue, Zink) wird bei Wärmebehandlungen der erstarrte UHPC auf eine Temperatur angefangen bei 50 bis 70°C bis höchstens 400°C aufgeheizt. Abhängig von der aufgebrauchten Temperatur laufen unterschiedliche chemische und physikalische Reaktionen ab, die die Mikrostruktur des Betons beeinflussen (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 319).

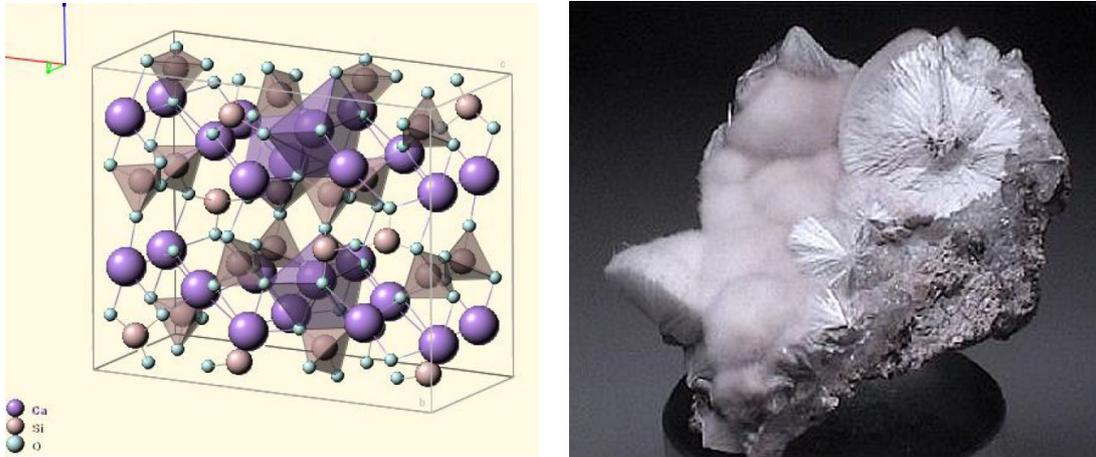
Bei Temperaturen ab 90°C wird die puzzolanische Reaktion der zugegebenen Zusatzstoffen (Mikrosilika) beschleunigt. Es bilden sich längere CSH-Ketten, was auf einen gesteigerten Hydrationsfortschritt, oder auf eine gesteigerte puzzolanische Aktivität hindeutet. Bei diesen Temperaturen entstehen Hydratphasen, die die Mikrostruktur verändern. Ein Beispiel dafür ist der bei 150°C entstehende feste und dichte Tobermorit  $C_5S_6H_5$ . Abbildung 2.17 zeigt die Kristallstruktur von Tobermorit (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 319, 322).



**Abbildung 2.17:** Kristallstruktur Tobermorit (links) (Rossbacher, Schneider, Kirnbauer, 2010, S. 50);  
Foto Tobermorit (rechts) (Tobermorite Mineral Data)

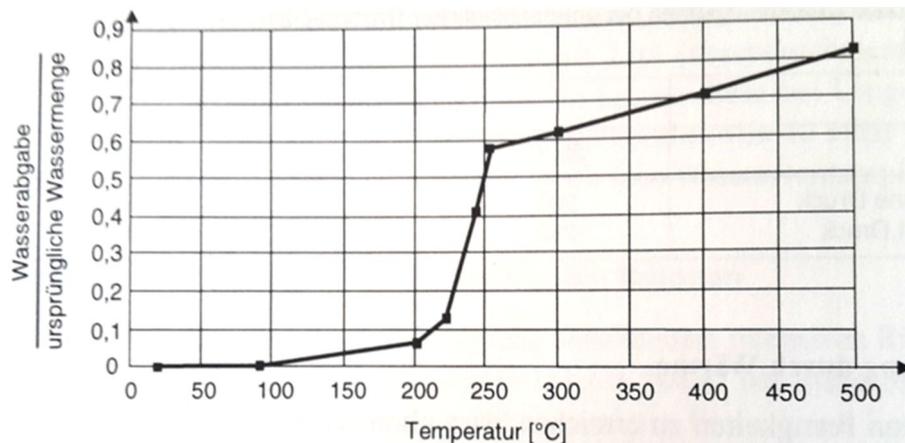
Xonotlit ( $C_6S_6H$ ) ist ein kristallines Hydrat, das bei Wärmebehandlungen zwischen 200 und 400°C entsteht (Abbildung 2.18). Bei diesen Temperaturen werden die CSH-Phasen des aushärtenden Betons dehydratisiert. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Xonotlit nur im Inneren der Zementsteinmatrix bildet. Das ist darauf zurückzuführen, dass für die Bildung

dieser kristallinen Phasen bestimmte hygrothermale Bedingungen vorhanden sein müssen. In UHPC, mit seinen abgeschlossenen Poren, sind diese Bedingungen vorhanden und es tritt eine Art „Selbstaoklavierungseffekt“ ein (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 319-320).



**Abbildung 2.18:** Kristallstruktur Xonotlit (links) (Rossbacher, Schneider, Kirnbauer, 2010, S. 50);  
Foto Xonotlit (rechts) (Xonotlite Mineral Data, kein Datum)

Bei der Wärmebehandlung ist besonders darauf zu achten, dass die Aufheizgeschwindigkeit und die Abkühlgeschwindigkeit äußerst gering gewählt werden. Zu hohe Geschwindigkeiten können zu Mikrorissen führen, die die Verbesserung der Mikrostruktur wieder aufheben. In der Literatur (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 319) sind Aufheizgeschwindigkeiten von 0,1K/min und Abkühlgeschwindigkeiten von 0,2K/min zu finden.



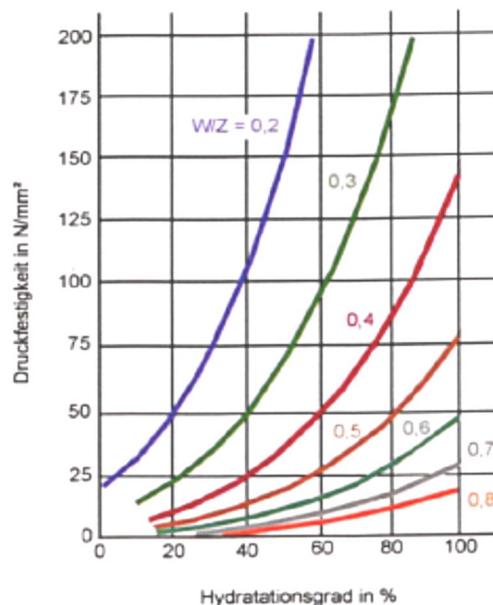
**Abbildung 2.19:** Wasserabgabe von UHPC in Abhängigkeit der Temperatur (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 320)

Bei Wärmenachbehandlungen mit höheren Temperaturen wird aufgrund der Phasenumwandlungen chemisch gebundenes Wasser freigesetzt, das aufgrund der geringen Porosität nicht ausströmen kann. Die Wasserabgabe ist dabei von der Temperatur abhängig. Aus Abbildung 2.19 ist ersichtlich, dass zwischen 230 und 250°C die Wasserabgabe sprunghaft ansteigt. Laut Literatur (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 320) ist dafür die Umwandlung der amorphen Hydrate in die kristallinen Xonotlite verantwortlich.

## 2.6 Betontechnologische Kennwerte

### 2.6.1 Wasser/Zement-Wert (W/Z-Wert)

Ein elementarer Kennwert des Frisch- und Festbetons ist der W/Z-Wert. Der W/Z ist definiert als das Massenverhältnis des wirksamen Wassergehaltes zum Zementgehalt im Frischbeton (ÖNORM B 4710-1, 2002, S. 17). Mit zunehmendem W/Z-Wert verbessern sich maßgebend die Frischbetoneigenschaften wie die Plastizität, die Verdichtbarkeit und die Verarbeitbarkeit. Bei der Festbetonqualität verhält es sich umgekehrt. Je niedriger der W/Z-Wert, desto höher ist die Betonqualität (Schneider, Horvath, 2003, S. 37).



**Abbildung 2.20:** Einfluss des W/Z-Wertes und des Hydratationsgrades auf die Druckfestigkeit von Zementstein (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 46)

Für eine vollständige Hydratation benötigt der Zement zirka 40% seiner Masse an Wasser (W/Z-Wert=0,4). Es wird davon ausgegangen, dass davon etwa 25% des Zementgewichts

chemisch und weitere 15% physikalisch gebunden (Gelwasser) werden. Demzufolge ist eine vollständige Hydratation bei niedrigeren W/Z-Werten nicht möglich. Für eine maximal erreichbare Betondruckfestigkeit ist eine vollständige Hydratation nicht erforderlich (Abbildung 2.20). *D. Abrams* formulierte 1919 das Wasserzementgesetz. Es besagt, dass sich die Betonfestigkeit zum Wasserzementwert umgekehrt proportional verhält. Bei Ultra High Performance Concrete liegen die W/Z- Werte zwischen 0,15 und 0,35 (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 43-45*).

### 2.6.2 Wasser/Bindemittel-Wert (W/B-Wert)

Da bei der Herstellung von UHPC und Hochleistungsbeton neben dem Zement auch andere hydraulische Zusatzstoffe eingesetzt werden, wird seit einigen Jahren der Wasser-Bindemittelwert immer wichtiger. Wie der W/Z-Wert ist auch er ein massebezogener Wert. Er ist definiert als das Masseverhältnis zwischen dem wirksamen Wassergehalt und dem anrechenbaren Bindemittelgehalt. Als Bindemittel werden auch andere reaktive Stoffe verstanden, die dem Beton beigemischt werden. Mikrosilica und Flugasche sind die am häufigsten verwendeten Zusatzstoffe. Sie werden mittels k-Wert Ansatz dem Zement als Bindemittel angerechnet (*Roszbacher, Schneider, Kirnbauer, 2010, S. 19*) (ÖNORM B 4710-1, 2002, S. 38).

$$W/B - \text{Wert} = \frac{\text{Wasser}}{\text{Bindemittel}} = \frac{W}{Z + k_f \times f + k_s \times s}$$

W	Wassermenge
Z	Zementmenge
K <sub>f</sub>	Korrekturfaktor Flugasche
f	Flugaschenmenge
k <sub>s</sub>	Korrekturfaktor für Silicastaub
s	Silicastaubmenge

**Gleichung 2.5:** Wasser/Bindemittel-Wert (*Roszbacher, Schneider, Kirnbauer, 2010, S. 19*)

UHPC wird mit Wasser/Bindemittelwerten von bis zu 0,14 hergestellt. Im Vergleich dazu liegt er bei Normalbeton bei ungefähr 0,45. Prinzipiell kann auch hier gesagt werden, dass die Festigkeiten mit kleiner werdendem W/B-Wert zunimmt (*Schneider, Horvath, 2003, S. 40*).

### 2.6.3 Wasser/Feinstoff-Wert (W/Fv-Wert)

Im Gegensatz zum oben genannten W/Z-Wert und W/B-Wert ist der Wasser/Feinstoff-Wert eine volumenbezogene Größe. Bei dieser Kenngröße werden auch die inerten Zusatzstoffe (Gesteinsmehl) berücksichtigt. Bei der Herstellung von UHPC wird über den W/Fv-Wert die Mischung optimiert (*Geisenhanslüke, Schmidt, Teichmann, 2007, S. 167*)

$$\frac{W}{F_v} = \frac{W}{\sum(z + \text{Feinstoffe})_{vol}}$$

W Wassermenge

z Zementmenge

vol Volumen

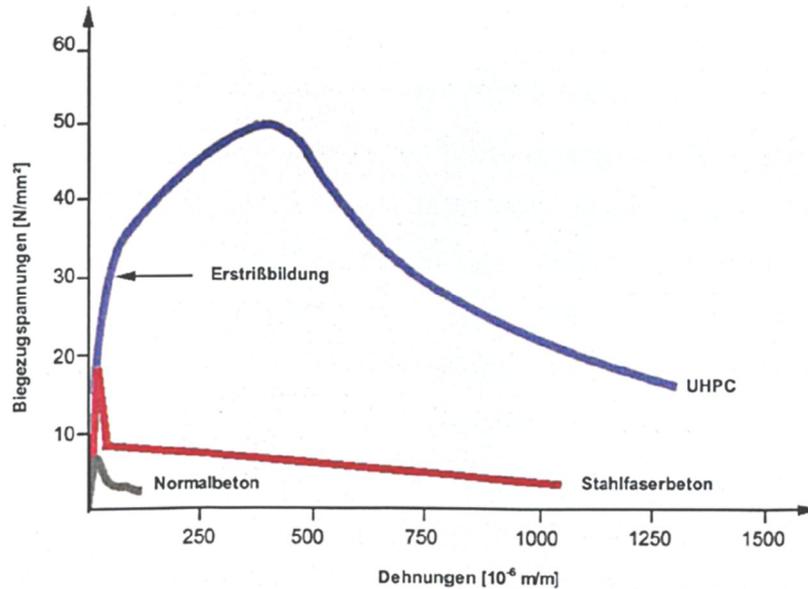
**Gleichung 2.6:** Wasser/Feststoff-Wert (*Geisenhanslüke, Schmidt, Teichmann, 2007, S. 167*)

Der W/Fv-Wert ist eine indirekte Kenngröße für die Kornzusammensetzung im Feinstoffbereich (Korngrößen < 125µm) und dem Resthohlraum, der mit Wasser verfüllt werden muss. Es lässt sich indirekt die Packungsdichte ableiten (*Geisenhanslüke, Schmidt, Teichmann, 2007, S. 167*).

## 2.7 Mechanische Eigenschaften

### 2.7.1 Biegezugfestigkeit

Die Eigenschaften des Zementsteins und die Eigenschaften des Zuschlags haben einen großen Einfluss auf die Biegezugfestigkeit. Eine große Rolle spielt dabei auch die Haftung zwischen Zuschlag und Zementstein. Durch Zumischen von Fasern kann die Biegezugfestigkeit verbessert und gezielt gesteuert werden. Die Fasern beeinträchtigen die innere Rissausbreitung. Der optimale Effekt der Fasern wird nur erreicht, wenn sie in Richtung der Zugspannungen liegen. Wird ein Riss senkrecht gekreuzt, ist die Wirkung größer als wenn die Faser den Riss schräg kreuzt (*Bruckner, Schneider, Kirnbauer, 2015, S. 45*) (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 56*).

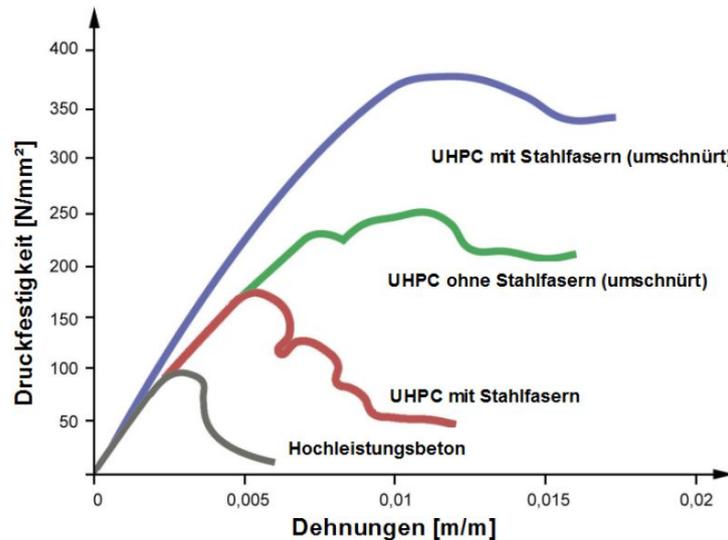


**Abbildung 2.21:** Kraft-Dehnungsdiagramm UHPC (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 56)

Abbildung 2.21 zeigt die Biegezugfestigkeit von UHPC im Vergleich zu Normalbeton und Stahlfaserbeton. Nach dem Auftreten erster Risse kann bei UHPC die Biegezugspannung ungefähr noch um das Doppelte gesteigert werden. Durch die Beimengung von Stahlfasern werden dabei Werte von 30 N/mm<sup>2</sup> bis 60 N/mm<sup>2</sup> erzielt. Im Vergleich zu Normalbeton entspricht das dem 5 bis 10 fachen Wert (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 56).

### 2.7.2 Druckfestigkeit

Wie bereits eingangs erwähnt, ist die 28 Tage Betondruckfestigkeit die am häufigsten verwendete Eigenschaft um Beton zu beschreiben und einzuteilen. Die Druckfestigkeit ist bei Ultra High Performans Concrete, wie schon in den voran gegangenen Kapitel erwähnt, von einigen Faktoren (Porosität, Dichte, W/Z-Wert, Nachbehandlungsart usw.) abhängig. Man erreicht bei einer gründlichen Verarbeitung und einer idealen Nachbehandlung Druckfestigkeiten, die bei zirka 200 N/mm<sup>2</sup> und darüber liegen. Bei Hochtemperatur-Nachbehandlungen von bis zu 400°C und einer zusätzlichen Druckbeaufschlagung werden Festigkeiten von bis zu 500 N/mm<sup>2</sup> erzielt. Die höchsten Druckfestigkeiten werden erzielt, wenn man die UHPC-Probe mit einem Stahlrohr ummantelt und sie einer Nachbehandlung unterzieht (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 55) (Schneider, Horvath, 2003, S. 90-91).



**Abbildung 2.22:** Spannungs-Dehnungslinie von Hochleistungsbeton (HPC) und Ultrahochleistungs-Beton (UHPC) (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 55)

In Abbildung 2.22 ist die Veränderung der Druckfestigkeit durch die Zugabe von Stahlfasern und einer Ummantelung der Probekörper ersichtlich. Vergleicht man den roten und blauen Graphen, ist zu erkennen, dass sich die Umhüllung auch positiv auf das Arbeitsvermögen und die Duktilität auswirkt (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 55-56) (Schneider, Horvath, 2003, S. 91).

Aufgrund der hohen Druckfestigkeiten sind bei UHPC die genormten Betonprüfungen an Würfeln mit einer Kantenlänge von 200 mm bzw. 150 mm an den meisten Prüfmaschinen nicht möglich. Durch die Homogenität von UHPC können kleinere Probekörper hergestellt werden die trotzdem vertretbare Ergebnisse liefern (Schneider, Horvath, 2003, S. 90) (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 55).

### 2.7.3 Elastizitätsmodul

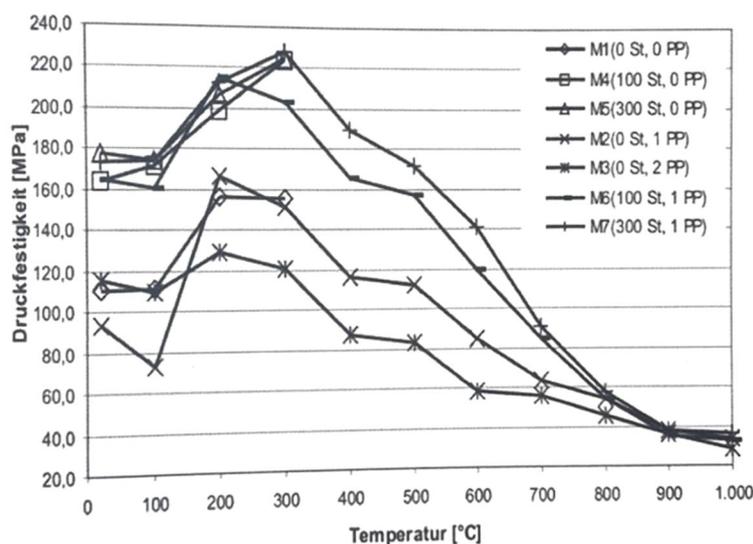
Der Tangens der Spannungs-Dehnungslinie wird als statischer E-Modul bezeichnet. Durch die Abhängigkeit der Spannungs-Dehnungskurve von der Art der Zuschläge und der Zementsteinqualität und –menge spielen diese Faktoren auch für den Elastizitätsmodul eine Rolle. In den Normen wird der E-Modul als Funktion der Druckfestigkeit angegeben. Bei steigender Betonfestigkeit nimmt der E-Modul nur unterproportional zu. Der Grund dafür ist, dass die Druckfestigkeit durch den Verbund zwischen Zuschlag und Zementstein bzw. der Zementsteinfestigkeit limitiert ist. Im Gegensatz dazu ist der E-Modul von der Zementmatrix

abhängig. Faktoren wie die Art der Zuschläge und die Beimischung von Fasern spielen eine große Rolle. Eine Erhöhung der Zementsteinfestigkeit bzw. eine Optimierung des Verbundes wirkt sich mehr auf die Druckfestigkeit aus als auf den E-Modul. Deshalb muss gerade für UHPC dieser Zusammenhang neu bestimmt werden (König, Viet Tue, Zink, 2001, S. 51) (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 57). Abhängig von der Nachbehandlungsart und -temperatur erreicht UHPC für den E-Modul mit  $50.000 \text{ N/mm}^2$  bis  $75.000 \text{ N/mm}^2$  zirka doppelt so hohe Werte als konventioneller Beton (Schneider, Horvath, 2003, S. 97).

### 2.8 Brandverhalten von UHPC

#### 2.8.1 Temperatureinfluss auf die Druckfestigkeit

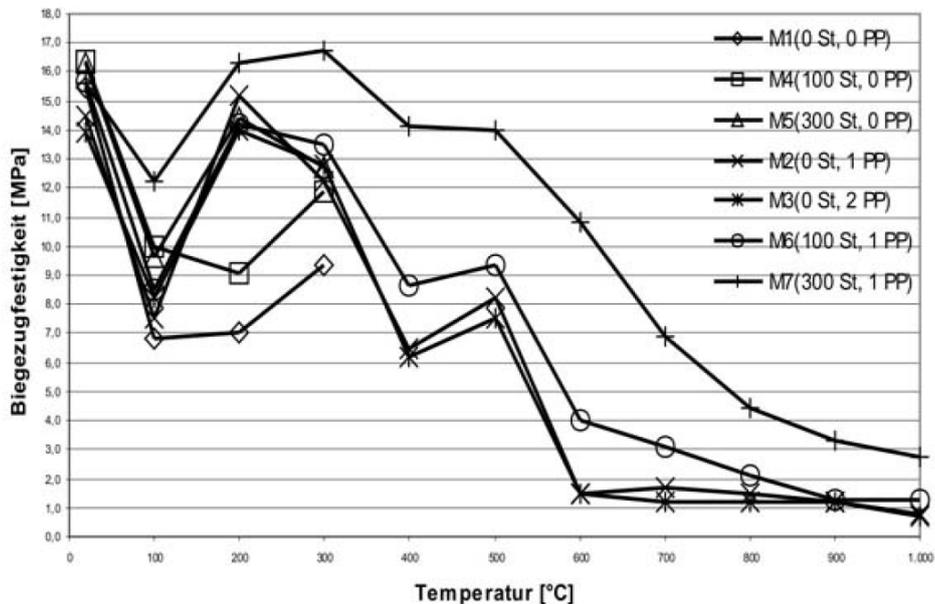
Das unterschiedliche Brandverhalten von HPC und UHPC gegenüber traditionellem Beton ist hauptsächlich auf die unterschiedliche Mikrostruktur der Zementsteinmatrix zurückzuführen (Richter, 1999, S. 71). Abbildung 2.23 zeigt den Verlauf der Druckfestigkeit von UHPC abhängig von der Prüftemperatur. Es ist eine deutlich Festigkeitszunahme bei Temperaturen bis  $300^\circ\text{C}$  zu erkennen. Diese Festigkeitssteigerung kann auf eine Nachhydratation infolge der Temperatureinwirkung zurückgeführt werden. Wird die Temperatur weiter gesteigert sinkt die Druckfestigkeit eklatant ab (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 62-63).



**Abbildung 2.23:** Verlauf der Druckfestigkeit von UHPC-Mischungen unter Temperaturbelastung (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 62)

## 2.8.2 Temperatureinfluss auf die Biegezugfestigkeit

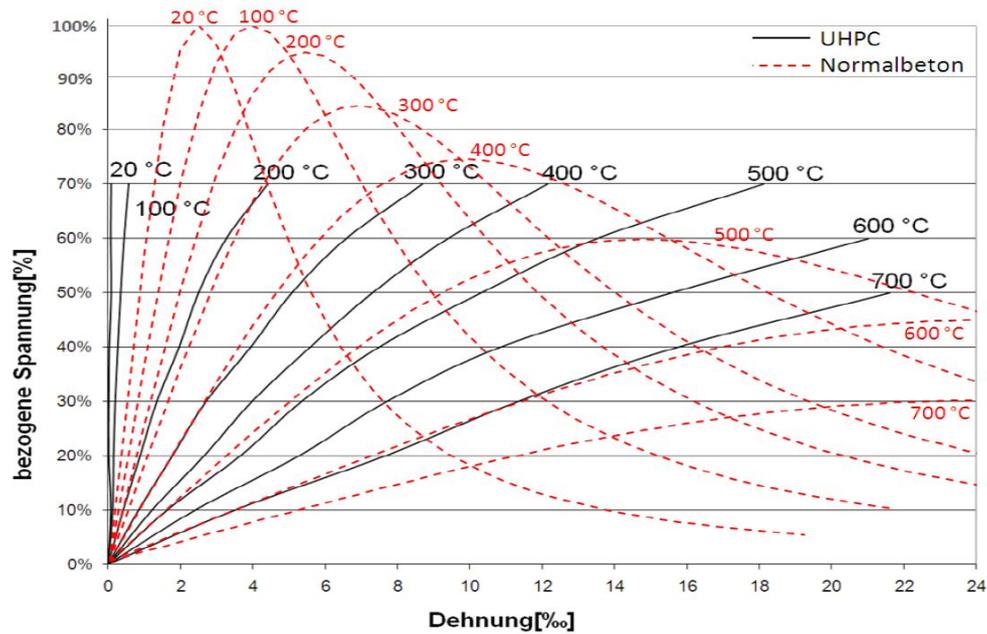
Abbildung 2.24 zeigt den Zugfestigkeitsverlauf von Ultra High Performance Concrete in Abhängigkeit der Prüftemperatur. Im Temperaturbereich von 100°C kommt es zu einem Abfall der Biegezugfestigkeit, der bis zu einer Temperatur von 300°C wieder kompensiert wird. Im Temperaturbereich von 500°C beträgt die Biegezugfestigkeit nur mehr 50 % der Anfangsfestigkeit. Zu einem gravierenden Rückgang der Festigkeit kommt es zwischen 500°C und 600°C. Das ist auf den sogenannten „Quarzsprung“ (573°C), der eine Volumenvergrößerung bewirkt zurückzuführen (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 61).



**Abbildung 2.24:** Verlauf der Biegezugfestigkeit von UHPC-Mischungen unter Temperaturbelastung (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 62)

## 2.8.3 Temperatureinfluss auf den E-Modul

Abbildung 2.25 zeigt die Spannungs-Dehnungslinie von UHPC und konventionellem Beton in Abhängigkeit der Temperatur. Es zeigt sich, dass der UHPC bis 100°C deutlich „steifer“ ist als Normalbeton. Mit steigender Temperatur verliert die Spannungs-Dehnungslinie rapide ihre „Steifigkeit“. Bis 400°C sind sie weicher als konventioneller Beton. Bei 500°C sind sie quasi deckungsgleich. Bei Temperaturen ab 600°C weist UHPC wieder eine höhere „Steifigkeit“ als Normalbeton auf (Kampmeier, Hollmann, 2011, S. 63).



**Abbildung 2.25:** Vergleich der temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien von UHPC mit den Rechenwerten von Normalbeton nach EC 2-1-2 (Kampmeier, Hollmann, 2011, S. 62)

### 2.8.4 Abplatzverhalten von UHPC

Werden Betonbauteile Brandeinwirkungen ausgesetzt, kann es infolge thermischer Prozesse zu Gefügeschädigungen bis hin zu Betonabsprengungen kommen, die im schlimmsten Fall zum Bauteilversagen führen. Folgende Faktoren beeinflussen das Abplatzverhalten wesentlich (Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 68) (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 31):

- Temperaturanstieg
- Porosität des Betons (Porenvolumen und mittlere Größe)
- Feuchtegehalt des Betons
- Zementart
- Geometrie des Bauteils
- Betonfestigkeit
- Fasergehalt der Betonmischung
- Maximale Brandtemperatur
- Zusammensetzung des Zuschlages (mineralisch und petrographisch)
- Anordnung der Bewehrung.

In der Literatur werden drei Arten von Betonabplatzungen unterschieden (*Kordina, Meyer-Ottens, Richter, 1999, S. 81-83*):

- Abfallen von Betonschichten (Sloughing off)
- Zuschlagstoff-Abplatzungen (Aggregate Spelling)
- Explosionsartige Abplatzungen (Explosive Spelling).

### **Abfallen von Betonschichten (Sloughing off)**

Das Abfallen von Betonschichten (Sloughing off) wird besonders durch die infolge einer Brandbeanspruchung auftretenden Zermürbung und Rissbildung beeinflusst. Es ist gekennzeichnet durch das Abfallen größerer oder kleinerer Betonschollen und tritt erst nach längerer Brandeinwirkung und wachsender Verformung auf. Gründe für das Abfallen von Betonschichten sind u.a. (*Diederichs, Schneider, Horvath, 2001, S. 69*):

- Betonermürbung aufgrund chemischer und physikalischer Veränderungen
- Bauteilverformungen
- Über dem Querschnitt auftretende Eigenspannungen aufgrund ungleichmäßiger Temperaturverteilung
- Zwängungsspannungen zwischen Beton und Bewehrung (unterschiedliche Dehnung).

### **Zuschlagsstoff-Abplatzungen (Aggregate Spelling)**

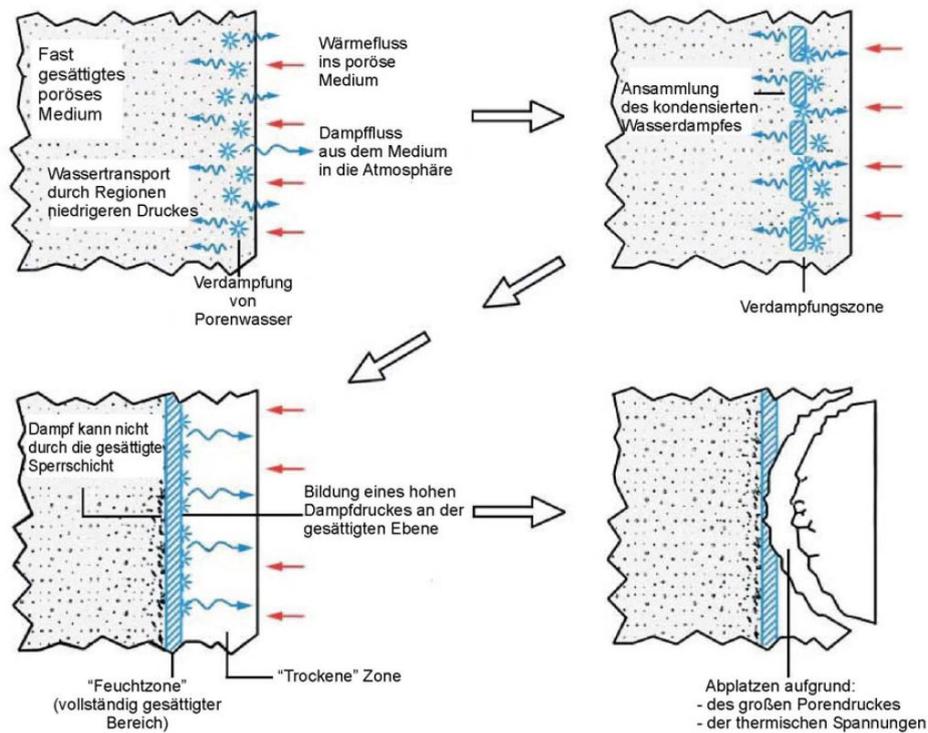
Zuschlagsstoff Abplatzungen werden durch chemische und/oder physikalische Vorgänge hervorgerufen, die die Zuschläge zersplittern oder zerplatzen lassen. Bei chemischen Vorgängen unter hohen Temperaturen wird häufig Wasser abgespalten, das aus dem Bauteil ausströmen muss. Eine plötzlich auftretende Volumenveränderung bei Phasenübergängen (Kristallbildung) zählt zu den physikalischen Vorgängen. Diese Veränderungen können bei dichten Zuschlagsstoffen zu Gefügauflockerungen führen und damit Zuschlagsstoff-Abplatzungen auslösen. Die Zermürbung des Zementsteins und der Zuschläge durch die entstehenden Kräfte kann auch ohne feststellbare, oberflächliche Abplatzungen auftreten (*Kordina, Meyer-Ottens, Richter, 1999, S. 83*) (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 28*).

### **Explosionsartige Abplatzungen (Explosive Spelling)**

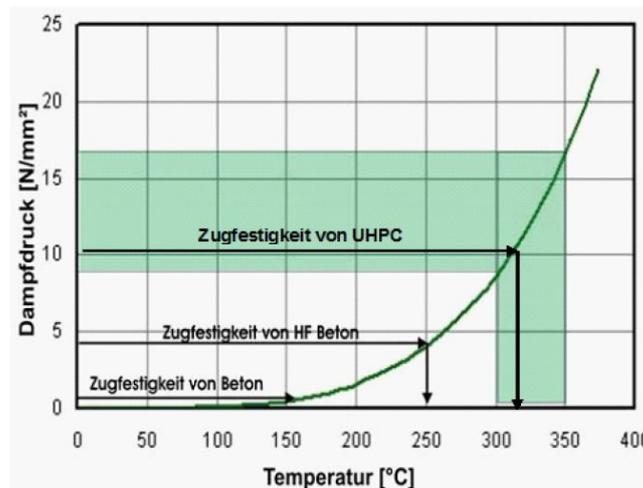
Schlagartig auftretende Betonabsprengungen im temperaturbeanspruchten Beton werden als explosionsartige Abplatzungen bezeichnet. Mit Explosionsgeräuschen werden größere und kleinere Teile von der Betonoberfläche explosionsartig wegkatapultiert. Ursachen dafür sind Zugspannungen, die beim Entweichen von Wasserdampf durch die Reibung an den Porenwänden und hydrostatische Wasserdampfdrücke auftreten. In Kombination kann die Betonzugfestigkeit überschritten werden und es kommt zu massiven Abplatzungen. Durch hohe Temperaturen, die unter Brandeinwirkung immer entstehen, wirken sich ausgelöste Eigen- und Zwängungsspannungen noch zusätzlich negativ auf das Abplatzverhalten aus. Die enorme Schwächung des Querschnittes hat erhebliche Auswirkungen auf die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen und kann in Ausnahmefällen zum schlagartigen Versagen von Bauteilen führen (*Kordina, Meyer-Ottens, Richter, 1999, S. 82-83*).

Diese Art der Abplatzung tritt bei Brandeinwirkung am häufigsten auf und ist vor allem bei Betonen mit homogenem und dichtem Gefüge (UHPC) anzutreffen. Die Vorgänge im Beton, die zu explosiven Abplatzungen führen, werden in thermohydraulische und thermomechanische Prozesse unterteilt (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 30-33*) (*Huismann, 2010, S. 28*).

Bei **thermohydraulischen Prozessen** steht der Feuchtetransport im Vordergrund. Bei hohen Temperatureinwirkungen wird zuerst das physikalisch gebundene Wasser und in weiterer Folge zum Teil das Gelporenwasser und das Kristallwasser aus den Zuschlägen desorbiert. Der Wasserdampf strömt sowohl durch das Porensystem aus dem Bauteil als auch in das Bauteilinnere. Die weiter innen liegenden kälteren Zonen lassen den Wasserdampf kondensieren und es stellt sich nach und nach eine Sättigung der Poren ein. Durch diese Sperrschicht kann der Bauteil nicht weiter nach innen durchströmt werden und der Wasserdampf kann nur mehr über die unter Brandeinwirkung stehende Bauteilseite entweichen. Ist der in der Sättigungszone vorhandene Druck unterhalb der Zugfestigkeit, findet eine laminare Wasserdampfströmung statt. Übersteigt er die Betonzugfestigkeit, kommt es zu explosionsartigen Abplatzung. In Abbildung 2.26 wird der oben beschriebene Prozess illustriert (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 35,36*) (*Huismann, 2010, S. 28,29*).



**Abbildung 2.26:** Schematische Darstellung der thermohydraulischen Prozesse in Betonbauteilen  
(Huismann, 2010, S. 29)



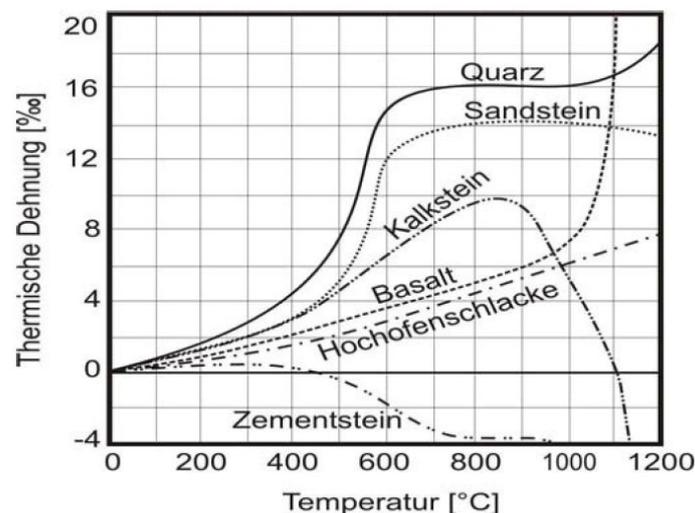
**Abbildung 2.27:** Dampfdruck – Kurve (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 37)

Der in einer Pore auftretende Druck setzt sich aus den Partialdrücken von Wasser, Luft und eventuell der Faserschmelze zusammen. In Abbildung 2.27 ist der Dampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur ersichtlich. Es ist zu sehen, dass schon bei einer Temperatur von 150°C der Dampfdruck den Zugfestigkeiten von konventionellem Beton nahe kommt. Ab 300°C kommt man mit einem Dampfdruck von 8 N/mm<sup>2</sup> in den Zugfestigkeitsbereich von UHPC. Bei weiterer

Erhöhung der Temperatur um 50°C verdoppeln sich die durch den Dampfdruck entstehenden Zugspannungen (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 36).

Im Gegensatz zu Normalbeton verschieb sich durch das dichtere Gefüge von UHPC und HPC die gesättigte Zone näher an die thermisch belastete Bauteiloberfläche. Es kommt zu einem schnelleren Aufbau des Dampfdruckes, da diese Zone schneller erhitzt werden kann. Darum kommt es trotz der höheren Zugfestigkeiten bei UHPC und HPC häufiger und früher zum Auftreten explosionsartiger Abplatzungen. Es ist also auch neben dem Wassergehalt die Dichtigkeit des Betons von großer Bedeutung (Huismann, 2010, S. 29) (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 37).

**Thermomechanische Prozesse** werden hauptsächlich durch Eigenspannungen ausgelöst. Sie entstehen einerseits durch thermische Dehnungen infolge ungleichmäßiger Temperaturverteilung und andererseits durch Dehnungsunverträglichkeiten zwischen Zementstein und Zuschlägen. Durch die thermischen Dehnungen entstehen Druckspannungen parallel zur erwärmten Oberfläche und den senkrecht dazu verlaufende Zugspannungen. Werden die Betonzugfestigkeiten überschritten, entstehen Risse in den Bauteilen (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 33) (Huismann, 2010, S. 29).



**Abbildung 2.28:** Thermische Dehnung in Abhängigkeit der Temperatur (Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 34)

Zur Veranschaulichung der Dehnungsunverträglichkeiten sind in Abbildung 2.28 die unterschiedlichen, thermischen Dehnungsverhalten infolge von Temperatureinwirkung dargestellt. Im Gegensatz zur Ausdehnung des Zuschlages bei Erhöhung der Temperatur, schrumpft der Zementstein. Dehnungsunverträglichkeiten führen zu Gefügespannungen in der Übergangszone der Betonmatrix (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 34*).

Ein weiterer Faktor für Abplatzererscheinungen sind Zuschlagsumwandlungen infolge höherer Temperatureinwirkungen. Es entstehen Entwässerungsreaktionen und es kommt zu Mineralumwandlungen und Zersetzungsreaktionen. Tabelle 2.6 listet die wesentlichsten Vorgänge in Abhängigkeit der Temperatur auf. Im Temperaturbereich bis 500 °C stehen die Entwässerungsvorgänge im Vordergrund. Dabei wird zuerst das freie und physikalisch gebundene Wasser verdampft. In weiterer Folge beginnt die Dehydratation und das chemisch gebundene Wasser wird frei gesetzt. Durch die temperaturabhängigen Anomalien von quarzitischer Gesteinskörnung ist die Temperatur von 573°C ein wesentlicher Punkt in diesem Zusammenhang. Bei dieser Temperatur kommt es zum „Quarzsprung“, der zu einer abrupten Volumenssteigerung führt. Diese Umwandlungen führen zu Spannungen im Betongefüge und können folglich auch zu Rissen führen (*Toms, 2013, S. 30*) (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 34*).

**Tabelle 2.6:** Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von quarzitischem und kalzitischem Beton (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 35*)

Temperaturbereich [°C]	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktion
30 - 120	Verdunstung bzw. Verdampfung von freiem und physikalische (verdampfbarem) gebundenem Wasser
100 - 300	Gelabbau, Dehydratisierungsbeginn
250 - 600	Abgabe des chemisch (nicht verdampfbarem) gebundenen Wassers
450 - 550	Zersetzung von Portlandit: $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
573	Nur bei Quarz: Quarzumwandlung (Quarzsprung), $\alpha \rightarrow \beta \text{SiO}_2$
600 - 700	Beginn der Zersetzung der CSH-Phasen
600 - 900	Nur bei Kalkstein: Entsäuerung: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
1200 - 1300	Beginn des Schmelzens von Zementstein
≥ 1400	Zementstein liegt als Schmelze vor

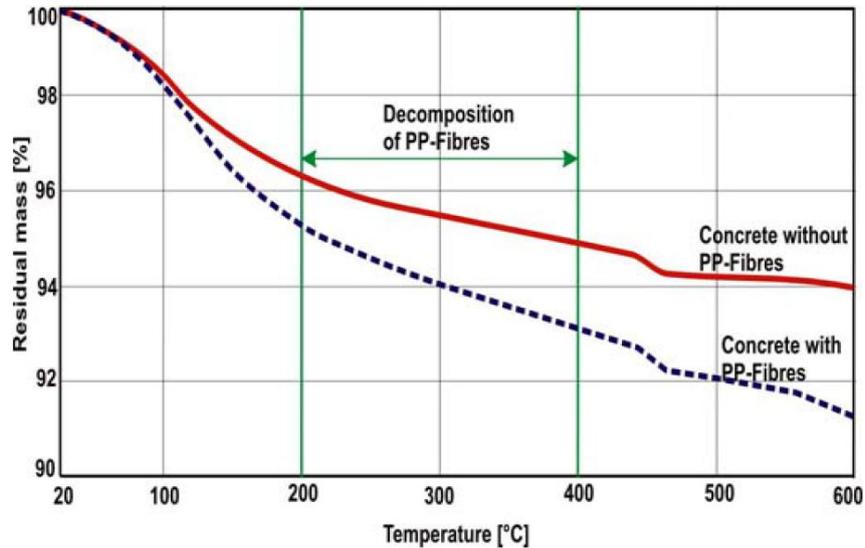
### 2.8.5 Polypropylenfasern bei Temperatureinwirkung

Durch die Zugabe von Polypropylenfasern können explosionsartige Abplatzungen wirksam reduziert werden. Durch das Schmelzen und Zersetzen der Fasern wird ein Porensystem frei und die Permeabilität des Betons nimmt zu. Der entstandene Wasserdampf kann schneller abgeleitet und so der hohe Dampfdruck reduziert werden (*Klug, Holschemacher, Dehn, 2011, S. 47*).

Die gute Wirkung von PP-Fasern kann laut Literatur auf drei Faktoren zurückgeführt werden (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 43*) (*Saravanja, Anders, Klingsch, 2013, S. 48*):

- Beim Einmischen der Fasern werden zusätzlich Mikroporen gebildet, die die Permeabilität verbessern.
- Durch das Abschmelzen und Verbrennen der Fasern bilden sich Kapillarporen, die die Permeabilität des Betons erhöhen.
- Die Bildung von diffusionsoffenen, porösen Übergangszonen zwischen Zementmatrix und Gesteinskörnung. Durch die Zugabe von PP-Fasern werden diese Übergangszonen miteinander verbunden und ermöglichen so einen höheren Stofftransport. Das System wird insgesamt permeabler.

Bevor die Faserschmelze eintritt, ist schon ein großer Teil des freien und physikalisch gebundenen Wassers verdampft. In konventionellem Beton wird der Dampfdruck über freie Mikroporen, oder über Permetation durch die porösen Übergangszonen zwischen der Zementsteinmatrix und der Gesteinskörnung entspannt. Bei UHPC sind die Übergangszonen aufgrund des geringen W/Z-Wertes und des hohen Anteils an Mikrosilika sehr dünn. In Folge dessen ist anzunehmen, dass PP-Fasern noch andere zusätzliche Effekte bewirken außer die oben genannten. Dies ist auch aus Abbildung 2.29 ersichtlich. Man erkennt im Vergleich zum Beton ohne Fasern den deutlich schnelleren Masseverlust als bei dem mit Fasern (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 42*). *Pistol* hat bei Untersuchungen gezeigt, dass die Behinderung der thermisch induzierten Volumenausdehnung von PP-Fasern ein Druck bis zu 200 MPA erzeugen kann. Dies führt zur Mikrorissbildung, die zur besseren Ableitung des Wasserdampfes beiträgt (*Pistol, 2016, S. 78,79*).



**Abbildung 2.29:** Vergleich des Masseverlustes von Normalbeton mit und ohne PP-Fasern (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 42*)

Aus Versuchen geht hervor, dass nur monofilamentare Fasern eine positive Wirkung auf das Abplatzverhalten haben. Spleißfaser (plattige PP-Fasern) können sogar negative Auswirkungen haben (*Horvath, Schneider, Diederichs, Brandverhalten von Hochleistungsbetonen, 2004, S. 41*). Neben der Fasermenge ist auch die homogene Faserdistribution in der Betonmatrix für eine bestmögliche Wirkung der PP-Fasern verantwortlich. Dabei spielen auch die Anzahl, der Durchmesser und die Länge der Fasern eine Rolle. Das Schmelzverhalten von Fasern, oft auch als melting flow ratio (MFR) bezeichnet, charakterisiert die Viskosität der Faserschmelze in Abhängigkeit der Temperatur. Dieser Parameter gibt Aufschluss über das Wirkungspotential der Fasern. Vergleicht man Fasern mit identem Durchmesser, ist die Faserschmelze bei denen mit hohem MFR-Wert „dünnflüssiger“. Durch das schnellere Eindringen in die Betonmatrix werden größere Porenräume frei und der Fasergehalt kann gegenüber Fasern mit niedrigem MFR-Wert reduziert werden (*Saravanja, Anders, Klingsch, 2013, S. 470,471*).

### 3 Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit verwendeten Geräte und Maschinen näher beschrieben. Darüber hinaus wird die Versuchsdurchführung dargestellt und die benutzten Messapparaturen und Prüfeinrichtungen erklärt.

#### 3.1 Frischbetonherstellung

Für die Herstellung des Ultra High Performance Concretes wurde der laboreigene Mischer verwendet. Es handelt sich dabei um den Intensivmischer R02 Vac der Firma Eirich, Baujahr 2008, mit einer angeschlossenen Vakuumpumpe, die jedoch in dieser Arbeit nicht verwendet wurde (Abbildung 3.1). Der Mischbehälter des Eirich Intensivmischers besitzt ein Fassungsvermögen von maximal fünf Liter bzw. maximal acht Kilogramm. Die unterschiedlichen Maschinenparameter wie die Drehzahl des Mischwerkzeugs und des Mischbehälters sowie die Drehrichtung von Werkzeug und Behälter können manuell eingestellt werden.



**Abbildung 3.1:** Eirich Intensivmischer R02 Vac (rechts) mit angeschlossener Vakuumanlage (links)

Die in dieser Arbeit verwendeten Versuchsmischungen wurden alle im Gleichstromprinzip hergestellt. Das bedeutet, dass sich der Mischbehälter und das Mischwerkzeug in dieselbe Richtung drehen. Die Mischbehälterdrehzahl betrug 42 U/min (Stufe 1). Als Mischwerkzeug wurde ein Stiftenwirbler mit einem Durchmesser von 125mm eingesetzt (Abbildung 3.2). Die Werkzeuggeschwindigkeit wurde bei den unterschiedlichen Mischungen auf 1200 U/min (7,9 m/s) eingestellt.

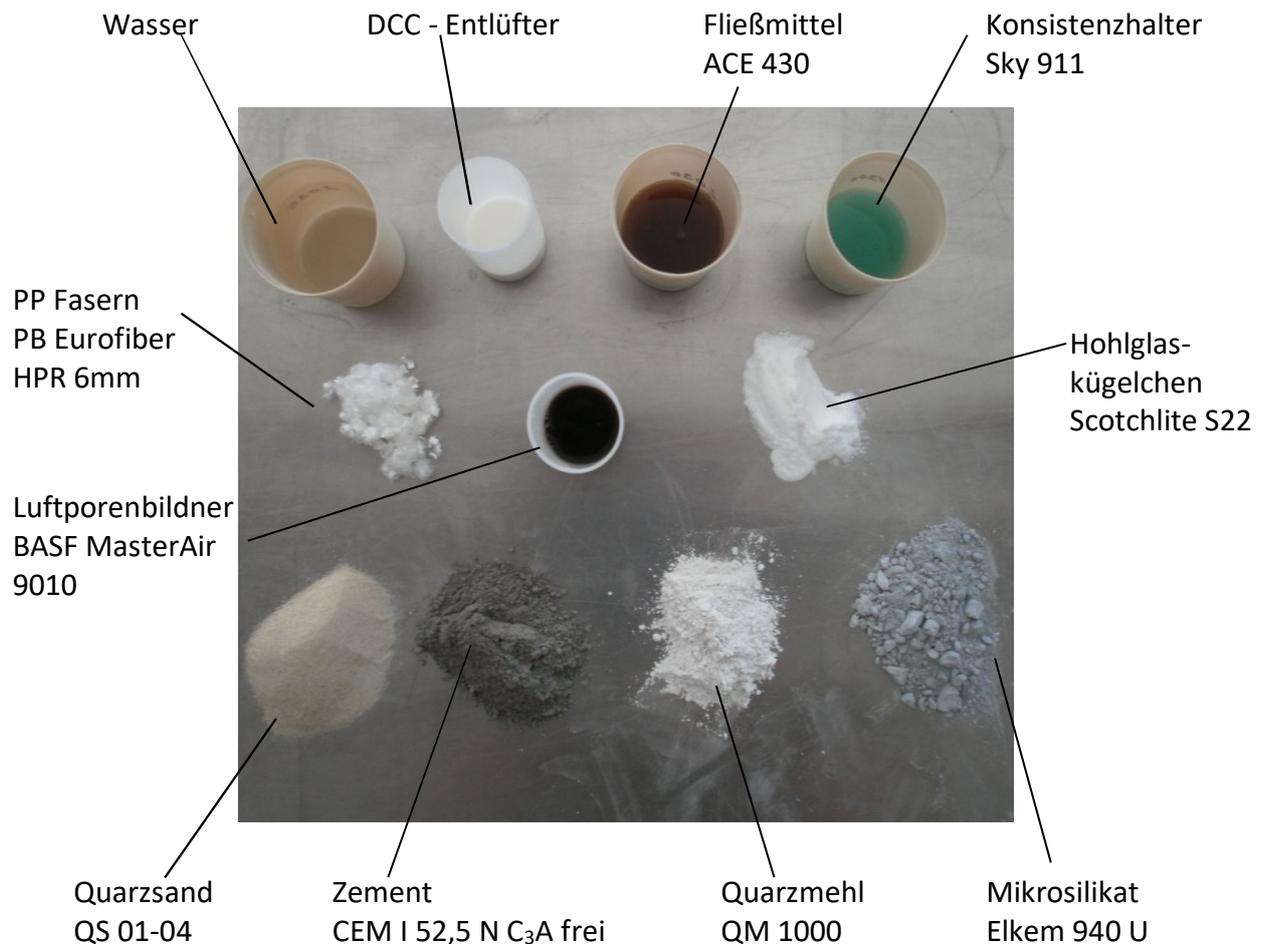


**Abbildung 3.2:** Stiftenwirbler für Eirich Intensivmischer R02 Vac (Rossbacher, Schneider, Kirnbauer, 2010, S. 39)

## 3.2 Herstellung der Probekörper

### 3.2.1 Verwendete Ausgangsstoffe

In den für die experimentellen Untersuchungen verwendeten UHPC Mischungen bilden Quarzsand und Quarzmehl den Zuschlag. Der Mikrosilika-Anteil beträgt ca. 20 % bzw. 25 % der Zementmasse. Die Wasser/Bindemittelwerte bewegen sich zwischen 0,22 und 0,23. Die genauen Werte der einzelnen Komponenten für jede Mischung sind den Mischungstabellen in den Vor- und Hauptversuchen zu entnehmen. Die Abbildung 3.3 gibt einen Überblick der verwendeten Bestandteile für die verschiedenen Mischungsentwürfe.



**Abbildung 3.3:** Bestandteile der verschiedenen Mischungsentwürfe

Der Zement CEM I 52,5 N C<sub>3</sub>A-frei verbindet die guten Eigenschaften von C<sub>3</sub>A-freiem Zement (chemische Widerstandsfähigkeit) mit denen eines Portlandzementes (Erhärtungsverhalten). Ein weiterer Vorteil dieses Zements ist vor allem der geringe Wasserbedarf, die gute Verarbeitbarkeit, die geringe Wärmeentwicklung und die sehr gute Nacherhärtung. Außerdem kommt es zu einer deutlich geringeren Ettringitbildung (*Lafarge, 2016*).

Mikrosilika Grade 940-U der Firma *Elkem* wird in den Mischungen als Zusatzstoff verwendet. Die Partikelgröße dieses Mikrosilikas ist im Durchschnitt 1 µm und ist deshalb ein sehr guter Füller. Es kommt größtenteils in Kugelform vor und hat eine glatte, glasige Oberfläche. *Elkem 940 U* weist eine Rohdichte von zirka 2300 kg/m<sup>3</sup> auf. Durch die große spezifische Oberfläche von 15.000 bis 30.000 m<sup>2</sup>/kg ist es in zementgebunden Systemen hoch reaktiv. Die Schüttdichte beträgt 500-700 kg/m<sup>3</sup> (*BASF, 2014, S. 1*) (*Rosbacher, Schneider, Kirnbauer, 2010, S. 51-52*).

MasterGlenium ACE 430 ist ein Fließmittel auf Basis eines Polycarboxylethers. Es besitzt sehr gute Verflüssigungseigenschaften und steigert damit die Verarbeitbarkeit des Betons. Des Weiteren bewirkt es eine höhere Frühfestigkeit, verkürzte Aushärtezeiten und Ausschalfristen und verbessert die Betoneigenschaften (BASF, 2015, S. 1).

Als weiteren Zusatzstoff werden einigen UHPC Mischungen Mikro-Hohlglaskugeln *Scotchlite S22* beigemischt. Sie sind aus alkaliarmen Borosilikat hergestellt und können durch ihre Alkaliresistenz mit Zement eingesetzt werden. Die durchschnittliche Teilchengröße beträgt zirka 29  $\mu\text{m}$ . Die Rohdichte der Hohlglaskugeln ist mit 220  $\text{kg}/\text{m}^3$  angegeben (Kremer Pigmente, 2013, S. 1).

*MasterAir 9010* ist ein Luftporenbildner auf Basis von Tensiden. Er besitzt eine sehr hohe Wirkstoffkonzentration und ist für Betone geeignet. Durch die kugelförmigen Poren wird die Verarbeitbarkeit des Betons verbessert, weil sie die Gleitfähigkeit des Frischbetons erhöhen. Die Dichte des Luftporenbildners beträgt 1015  $\text{kg}/\text{m}^3$  und weist einen pH-Wert von zirka 9,0 auf. Vorteile von *MasterAir 9010* sind ein präziser Lufteintrag, feine Luftporen und eine gute Kompatibilität mit anderen Betonzusatzmitteln (BASF, 2013, S. 1-2).

Als PP-Fasern werden PB Eurofiber HPR-Fasern mit einer Länge von 6 mm verwendet. HPR-Fasern haben eine deutlich höhere Fließfähigkeit der Faser-Schmelze. Im Gegensatz zu konventionellen PP-Fasern ist die Schmelze der HPR-Fasern dünnflüssiger und weist eine ölige Konsistenz auf. Dadurch kann die Schmelze wesentlich früher in die Betonmatrix eindringen und der Dampfdruck rascher abgeleitet werden. Im Gegensatz zu Standardfasern weisen PB Eurofiber HPR-Fasern einen 40- bis 50-fachen höheren Schmelzindex (Melt Flow Rate) auf. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich durch den Einsatz dieser Fasern die Dosiermengen der zugegebenen Fasern verringern, die Einsatzmenge von Fließmittel verringert und die Betonqualität verbessert (Baumhüter, 2010, S. 2,3,7).

#### **3.2.2 Grundlegende Mischreihenfolge**

Der Mischvorgang der Ultra High Performance Proben kann grundsätzlich in drei Mischphasen eingeteilt werden.

In der ersten Phase werden alle trockenen Bestandteile der Mischung (Quarzsand, Mikrosilika, Quarzmehl, Zement) in den Mischbehälter geleert und drei Minuten lang homogenisiert.

Enthält die Mischung PP-Fasern werden diese mit den trockenen Bestandteilen in den Mischer gegeben. Die Länge dieser Mischphase wird auch als Trockenmischdauer bezeichnet.

Die zweite Phase beinhaltet die Zugabe der flüssigen Bestandteile der Mischung. Zuerst werden das Fließmittel, der Konsistenzhalter und der Entlüfter mit dem Anmachwasser vermengt und innerhalb von 30 Sekunden der Mischung bei laufenden Mischwerkzeugen zugegeben. Bei den Mischungen, die den Luftporenbildner enthalten, wird der Entlüfter durch diesen ersetzt und mit dem Anmachwasser vermengt.

Als nächstes erfolgt die Nassmischphase. In dieser Arbeit ist sie mit zwei Minuten angesetzt. Diese Zeit ist ausreichend um eine homogene Mischung zu erhalten, die eine gute Verarbeitbarkeit aufweist.

Eine genaue Zusammenfassung der Mischreihenfolge sowie der Dauer und Geschwindigkeiten der Werkzeuge ist der Tabelle 3.1 zu entnehmen.

**Tabelle 3.1:** Mischreihenfolge, Mischdauer und Werkzeuggeschwindigkeit

<b>Mischreihenfolge</b>	<b>Dauer [s]</b>	<b>Wirblerdrehzahl [U/min]</b>	<b>Wirblergeschw. [m/s]</b>
Trockenmischen (CEM, QM, MS, QS, Fasern)	180	1200	7,9
Zugabe Flüssiger Bestandteile (Wasser, FM, DCC)	30	1200	7,9
Nassmischen	120	1200	7,9
Gesamte Mischdauer	330	-	

Nach dem Mischen werden die Frischbetonprüfungen (Kapitel 3.3) durchgeführt und anschließend die Probekörper hergestellt.

### 3.2.3 Schalung der Probekörper

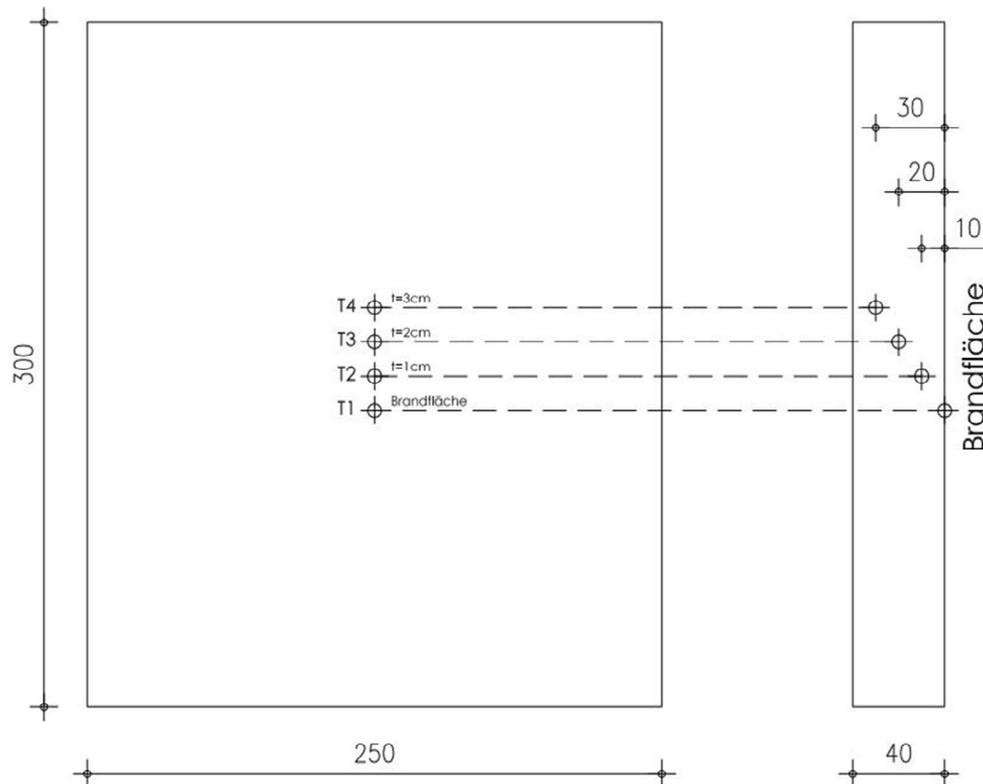
Nach dem Ermitteln der Frischbetoneigenschaften werden die Schalungsformen mit dem Frischbeton befüllt. Um das Ausschalen zu erleichtern, werden die Schalkörper vor dem Einfüllen des Frischbetons mit Schalöl dünn bestrichen. Die Abbildung 3.4 zeigt die zwei unterschiedlichen Schalungsformen.



**Abbildung 3.4:** Prismen-Schalungsform für Festbetonprüfungen (links), Schalungsform für Brandversuche (rechts)

Für die Ermittlung der Festbetoneigenschaften werden Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm hergestellt. Die befüllten Prismenschalungen werden mit einer Kelle abgezogen und auf einem Rütteltisch zirka 30 Sekunden verdichtet. Um die Proben vor einem vorzeitigen Austrocknen zu schützen, werden sie mit einer Polyethylen-Folie abgedeckt.

Die Abmessungen der Probekörper für die Brandversuche betragen 250 x 300 x 40 mm. In den Probekörpern werden in unterschiedlichen Höhen Thermokabel vom Typ K eingebaut, um die Temperaturverläufe durch die Probekörper aufzeichnen zu können (Abbildung 3.5). Die Thermoelemente sind unmittelbar an der Brandfläche, in 1 cm, 2 cm und 3 cm Tiefe angeordnet. Die Abbildung 3.5 verdeutlicht die Abmessungen der Brandplatten und die Lage der Thermoelemente.



**Abbildung 3.5:** Anordnung der Thermoelemente in der Brandplatte

Nach etwa 24 Stunden wurden die Probekörper ausgeschalt und bis zur weiteren Nachbehandlung oder den vorgesehenen Lagerungsbedingungen bei Raumtemperatur gelagert.

### 3.3 Frischbetonprüfungen

Die Frischbetonprüfungen erfolgen unmittelbar nach dem Entleeren des Mixers. Es wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Bestimmung des Luftgehaltes
- Ausbreitfließmaß
- Bestimmung der Frischbetonrohichte.

### 3.3.1 Bestimmung des Luftgehaltes

Der Luftgehalt des Frischbetons wird in Anlehnung an die ÖNORM EN 12350-7 ermittelt. Die Prüfung erfolgt dabei durch das Druckausgleichsverfahren. Der Frischbeton wird in einem kurz zuvor leicht angefeuchteten Behälter gefüllt und mit einer Kelle nach dem Verdichten am Rütteltisch plan abgezogen. Danach wird auf dem sogenannten Luftporentopf das Verschlussaggregat montiert und mittels der Klemmvorrichtungen druckdicht verschlossen. Es ist darauf zu achten, dass beim Verschließen des Luftporentopfes die Ränder sauber und leicht angefeuchtet sind, damit es zwischen dem Behälter und dem Verschluss nicht zu Undichtigkeiten kommt. Als nächsten Schritt wird über die beiden seitlich am Verschlussaggregat angebrachten Ventile Wasser in den Luftporentopf eingebracht, um den im Topf verbleibenden Hohlraum auszufüllen. Das Wasser wird dabei solange in eines der beiden Ventile gefüllt, bis es an dem gegenüberliegenden Ventil wieder austritt. Als nächstes werden die beiden Ventile geschlossen und mittels der auf der Oberseite des Gerätes befindlichen Pumpe Luft eingepumpt. Es muss solange gepumpt werden bis der Zeiger des Manometers unter die Nullmarkierung zeigt. Durch Betätigung des Feinregulierungsventils (schwarzer Knopf) wird die Luft abgelassen und damit der Zeiger auf die rote Eichmarkierung gestellt. Als nächstes kann durch Öffnen des Hauptluftventils (Betätigung des grünen Knopfes) der prozentuelle Luftgehalt durch leichtes Klopfen auf das Manometer abgelesen werden. Die Abbildung 3.6 zeigt das für die Versuche verwendete Gerät und soll die oben angegebene Erklärung verdeutlichen.



**Abbildung 3.6:** Messgerät zur Ermittlung des Luftgehaltes von Frischbeton (Luftporentopf)

#### 3.3.2 Ausbreitfließmaß

Eine grundlegende Kenngröße für die Verarbeitbarkeit und Konsistenz des Frischbetons ist das Ausbreitfließmaß. Es wird auch als Setzfließmaß bezeichnet. Das Ausbreitfließmaß ist jener mittlere Durchmesser eines Frischbetonkuchens, der sich nach dem vertikalen Abheben eines kegelförmigen Trichters ohne Störung des Betons einstellt.

Für diese Arbeit ist die Ermittlung des Ausbreitfließmaßes auf einem Labortisch mit einer matten Edelstahloberfläche durchgeführt worden. Die Oberfläche des Tisches wurde vor der Prüfungsdurchführung leicht angefeuchtet. Der Trichter wird auf die Oberfläche aufgesetzt und bis zum Rand mit Beton gefüllt und mit der Kelle abgezogen. Als nächstes hebt man den Setztrichter vertikal an und der Beton beginnt sich zu verteilen. Nachdem sich der Frischbetonkuchen stabilisiert hat werden die Durchmesser mit einem Maßband in zueinander senkrechten Richtungen gemessen.

Der Mittelwert aus den beiden Messungen ergibt das Ausbreitfließmaß. Die Abbildung 3.7 zeigt den Setztrichter und veranschaulicht die Versuchsdurchführung.



**Abbildung 3.7:** Bestimmung des Ausbreitfließmaßes: Setztrichter (links); Versuchsdurchführung (rechts) (Kirnbauer, 2013, S. 74)

#### 3.3.3 Bestimmung der Frischbetonrohichte

Die Ermittlung der Frischbetonrohichte erfolgt mittels Luftporentopf und wird vor der Messung des Luftporengehalts durchgeführt. Der Luftporentopf (Abbildung 3.8) hat ein Volumen von einem Liter. Am Anfang misst man das Gewicht des leeren Behälters. Danach befüllt man den Luftporentopf mit Frischbeton, verdichtet ihn am Rütteltisch und zieht den

Behälter mit einer Kelle eben ab. Als nächster Schritt wird der gefüllte Luftporenbehälter abgewogen und mit der nachstehenden Formel die Frischbetonrohddichte errechnet (Gleichung 3.1).

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

D	Rohddichte des Frischbetons [kg/m <sup>3</sup> ]
m <sub>2</sub>	Masser des gefüllten Luftporenbehälters [kg]
m <sub>1</sub>	Masse des leeren Luftporenbehälters [kg]
V	Volumen des Luftporenbehälters [m <sup>3</sup> ]

**Gleichung 3.1:** Frischbetonrohddichte (ÖNORM EN 12350-6, 2009, S. 8)



**Abbildung 3.8:** Luftporenbehälter leer

### 3.4 Festbetonprüfungen

Die Druckfestigkeit ist einer der wichtigsten Kenngrößen des Betons, da sie verwendet wird, um die Betone zu klassifizieren. Für diese Arbeit wurden Druckfestigkeitsprüfungen mit den verschiedenen Betonmischungen durchgeführt. Als weitere Festigkeitsprüfung wurde die Biegezugfestigkeit an prismatischen Probekörpern ermittelt.

Die Druck- und die Biegezugfestigkeit wurden jeweils am selben Tag an dem der Brandversuch der jeweiligen Mischung und Lagerungsbedingung durchgeführt wurden geprüft. Deshalb variierte das Betonalter und wird nun bei den jeweiligen Prüfungsergebnissen angegeben.

Die Porositätsmessungen mit dem Quecksilberporosimeter liefern Angaben über die Porenverteilung, die Porenradien und die Gesamtporosität. Die Durchführung erlaubt es Aussagen über die Struktur der einzelne Mischungen treffen zu können.

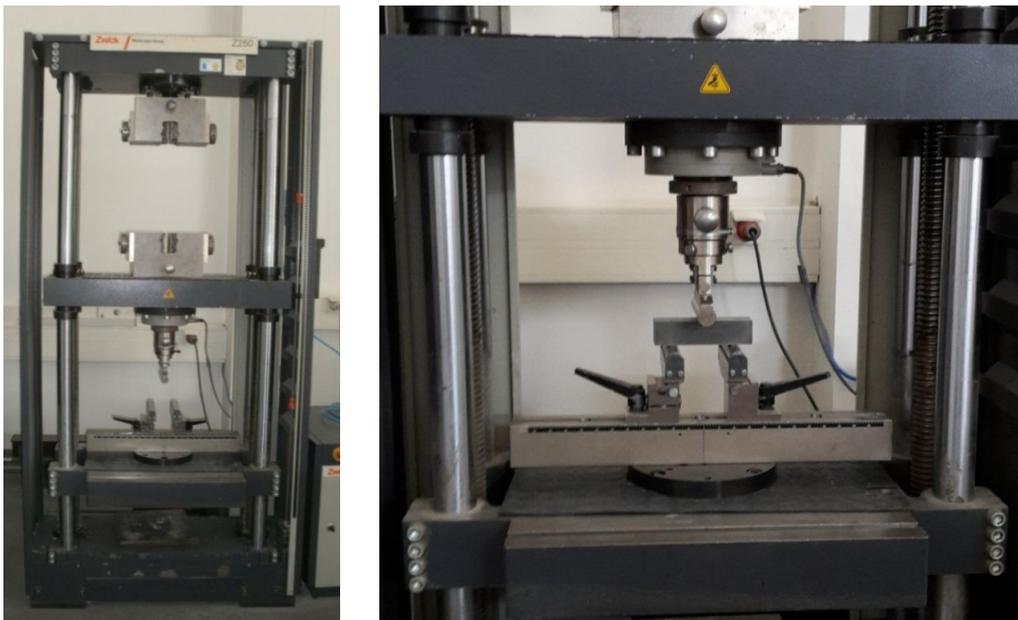
#### 3.4.1 Bestimmung der Biegezugfestigkeit

In der Untersuchung wurde die Biegezugfestigkeit in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1 in einem 3-Punkt-Biegeversuch durchgeführt. Die prismatischen Probekörper mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm werden bei diesem Versuch so auf die Rollenlager der Maschine platziert, dass die Längsachse der Prismen normal auf die Achsen der Auflager stehen (Abbildung 3.9). Die Stützweite der Rollenaufleger beträgt 100 mm. Mit einem Stahlzylinder wird von oben mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 50 N/s bzw. 100 N/s mittig auf die Prismen eine Kraft eingeleitet bis der Probekörper versagt. Die Belastungsgeschwindigkeit richtete sich dabei nach dem Betonalter. Mit der angegebenen Formel kann unter Verwendung der Bruchlast die Biegezugfestigkeit ermittelt werden (Gleichung 3.2).

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

- R<sub>f</sub> Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]
- b Seitenlänge des Prismenquerschnitts [mm]
- F<sub>f</sub> Bruchlast [N]
- l Auflagerabstand [mm]

**Gleichung 3.2:** Biegezugfestigkeit (ÖNORM EN 196-1, 2006, S. 19)



**Abbildung 3.9:** Prüfmaschine Fa. Zwick Z250 (links); 3-Punkt-Biegeversuch (rechts)

Wie schon eingangs erwähnt sind die Biegezugfestigkeitsprüfungen unmittelbar nach den jeweiligen Brandversuchen durchgeführt worden. Das damit variierende Betonalter wird in den jeweiligen Ergebnissen angegeben.

Die Biegezugprüfung wurde auf der institutseigenen Prüfmaschine der Firma Zwick Typ Z250 durchgeführt. Die wichtigsten technischen Daten und Eigenschaften sind der Tabelle 3.2 zu entnehmen.

**Tabelle 3.2:** Eigenschaften der Standprüfmaschine Zwick Z250 (Zwick GmbH & Co. KG, 2016)

Technische Daten der Standprüfmaschine Zwick Z250	
Max. Prüfkraft [kN]	250
Max. Traversengeschwindigkeit [mm/min]	600
Wegauflösung des Antriebs [nm]	0,19227
Prüfraumhöhe [mm]	1715
Prüfraumbreite [mm]	630
Prüfraumtiefe [mm]	∞

### 3.4.2 Bestimmung der Druckfestigkeit

Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM EN 196-1. Als Probekörper wurden die Prismenhälften aus dem Biegezugversuch verwendet. Die Platzierung der Proben in der Prüfmaschine erfolgte über zwei Druckplatten mit den Abmessungen 40 x 40 mm. Die Prüfung erfolgte kraftgesteuert, wobei die Belastungsgeschwindigkeit variiert. Bei den Vorversuchen wurden die Prüfungen mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 N/mm<sup>2</sup>s bzw. 1,5 N/mm<sup>2</sup>s durchgeführt. Bei den Hauptversuchen wurde die Belastungsgeschwindigkeit auf 3 N/mm<sup>2</sup>s erhöht. Die Probekörper wurden bis zum Materialversagen belastet. Mit der angegebenen Bruchlast kann aus der nachstehenden Formel die Druckfestigkeit ermittelt werden (Gleichung 3.3).

$$R_c = \frac{F_c}{A_0}$$

R<sub>c</sub> Druckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

F<sub>c</sub> Bruchlast [N]

A<sub>0</sub> Belastungsfläche [mm]

**Gleichung 3.3:** Druckfestigkeit (ÖNORM EN 196-1, 2006, S. 20)

Für die Durchführung der Versuche wurde die vom Institut zur Verfügung gestellte Prüfmaschine der Firma TONI Technik Modell 2040, Baujahr 1997, verwendet (Abbildung 3.10). Mit dieser Maschine können Prüfkräfte von bis zu 3000 kN aufgebracht werden.



**Abbildung 3.10:** Prüfmaschine der Firma TONI Technik Modell 2040

#### 3.4.3 Bestimmung der Festbetonrohddichte

Die Ermittlung der Festbetonrohddichte erfolgte an den prismatischen Probekörpern mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm kurz vor den jeweiligen Festigkeitsprüfungen. Als Grundlage für diese Prüfung diente die ÖNORM EN 12390-7.

Die Prismen wurden mittels Schiebelehre vermessen und aus den Istmaßen das Volumen bestimmt. Die Bestimmung der Masse erfolgte durch das Abwiegen der Probekörper. Mit den beiden ermittelten Werten kann aus der nachstehenden Formel die Festbetonrohddichte bestimmt werden (Gleichung 3.4).

$$D = \frac{m}{V}$$

D	Rohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]
m	Masse des Prüfkörpers [kg]
V	Volumen des Prüfkörpers [m <sup>3</sup> ]

**Gleichung 3.4:** Festbetonrohddichte (ÖNORM EN 12390-7, 2009, S. 8)

#### 3.4.4 Wassergehalt

Als Probekörper zur Bestimmung des Wassergehaltes dienten jeweils 2 Brandplatten jeder Mischung. Mittels einer Waage wurden vor Versuchsbeginn die feuchte Masse ermittelt. Danach kamen die Proben in den Darrschrank und wurden dort bei 105°C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Nach der Trocknung wurde abermals das Gewicht der Probekörper bestimmt. Mit den ermittelten Werten kann mittels Gleichung 3.5 der Wassergehalt errechnet werden.

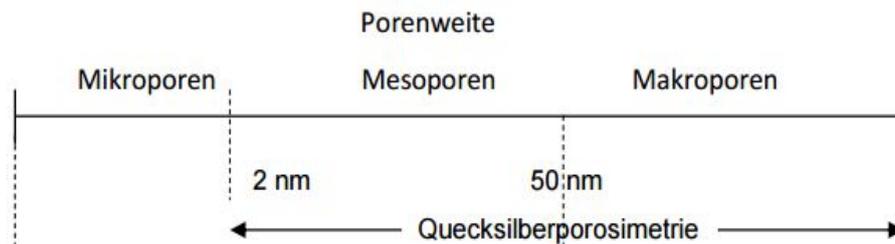
$$w = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}} \times 100$$

w	Wassergehalt des Festbetons [%]
m <sub>f</sub>	Masse feucht des Prüfkörpers [kg]
m <sub>tr</sub>	Trockenmasse des Prüfkörpers [kg]

**Gleichung 3.5:** Bestimmung des Wassergehalts

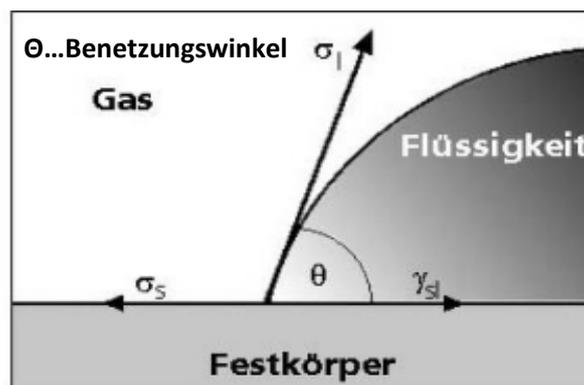
#### 3.4.5 Mikrostrukturuntersuchung mittels Quecksilber- porosimetrie

Die Quecksilberporosimetrie ist 1945 von *Ritter* und *Drake* entwickelt worden. Diese Technik wird am häufigsten angewendet, um die Porenverteilung von Festkörpern zu analysieren. Mit dieser Methode können Porengrößen im Bereich von Mikro- und Mesoporen gemessen werden (Abbildung 3.11). Unabhängig von der Art und Form der Probekörper liefert diese Methode verlässliche Aussagen über die scheinbare und wahre Dichte, die Porengrößenverteilung und das Porenvolumen fast aller porösen Werkstoffe (*POROTEC GmbH*, kein Datum) (*POROTEC GmbH*, 2001, S. 5-6).



**Abbildung 3.11:** Einsatzbereich der Quecksilberporosimetrie (POROTEC GmbH, 2001, S. 5)

Die Grundlage der Messmethode beruht auf dem Eindringen einer nicht benetzenden Flüssigkeit wie Quecksilber (Randwinkel  $\theta > 90^\circ$ ) in ein poröses System unter Aufbringung eines angelegten Druckes. Der aufgewendete Druck ist vom Benetzungswinkel und vom Porendurchmesser abhängig. Der Benetzungswinkel oder auch Randwinkel ist jener Winkel, den ein Flüssigkeitstropfen auf der Oberfläche eines Feststoffes bildet (Abbildung 3.12) (POROTEC GmbH, 2001, S. 5-6).



**Abbildung 3.12:** Benetzungswinkel auf einer Festkörperoberfläche (Kesten-Kühne, 2015)

Der Zusammenhang zwischen Porenweite und aufgewendetem Druck kann durch die Washburn-Gleichung ausgedrückt werden, wobei folgende Annahmen zugrunde gelegt werden (POROTEC GmbH, 2001, S. 5):

- „Die Oberflächenspannung des Quecksilbers und sein Benetzungswinkel gegenüber dem Feststoff sind während der Analyse konstant.“
- Das System ist im Gleichgewicht.
- Es werden zylinderförmige Poren angenommen.
- Die Feststoffe werden durch den Druck nicht deformiert.“

Mit den getroffenen Annahmen kann mittels der Washburn-Gleichung aus dem angewendeten Druck der Porenradius bestimmt werden.

$$p = \frac{2 \times \gamma \times \cos \theta}{r}$$

r	Porenradius
$\gamma$	Oberflächenspannung des Quecksilbers
$\theta$	Benetzungswinkel
p	Druck

**Gleichung 3.6:** Washburn-Gleichung (POROTEC GmbH, kein Datum)

#### Probenvorbereitung

Für die Quecksilber-Pososimetrie muss die Probe an die Größe des Dilatometers angepasst werden. Optimale Messergebnisse werden erzielt, wenn die Probe ein Gewicht von zirka 1 bis 1,5 g hat und eine etwas längliche Form besitzt. Vor der Versuchsdurchführung muss die Probe getrocknet werden. Es wird das Porenwasser aus dem Probestück entfernt, damit das Quecksilber beim Eindringen nicht behindert wird.

Für diese Arbeit wurden die Probekörper für die Porositätsmessungen aus den Bruchstücken der prismatischen Probekörper der Festigkeitsprüfung hergestellt. Mittels Kernbohrer wurden für jede Mischung, Nachbehandlungs- und Lagerungsart drei Bohrkerne entnommen. Die für die Messung verwendeten Proben hatten einen Durchmesser von 6-7 mm und einen Länge von 7-10 mm. Die Abbildung 3.13 zeigt die Kernbohrmaschine und einen Bohrkernteil.



**Abbildung 3.13:** Kernbohrer für die Probekörperherstellung (links); Bohrkernteil für die Porositätsmessung (rechts)

Nach dem Herstellen aller Probekörper wurden die Bohrkern für die Messungsdurchführung weiter behandelt. Bei Raumtemperatur (zirka 20°C) und einem Unterdruck von 30 mbar wurden sie in einem Exsikkator bis zum Erreichen der Massenkonstanz getrocknet.

#### Versuchsdurchführung

Die in dieser Untersuchung durchgeführten Porositätsmessungen wurden mittels Quecksilber-Porosimetrie durchgeführt. Zum Einsatz kamen dabei das Niederdruck-Porosimeter PASCAL 140 und die Hochdruckmessstation PASCAL 440 der Firma POROTEC (Abbildung 3.14).



**Abbildung 3.14:** Hochdruckstation PASCAL 440 (links); Niederdruck-Porosimeter PASCAL 140 (rechts)

Mit dem Niederdruck-Porosimeter PASCAL 140 können Porengrößen im Bereich zwischen 58 und 1,9  $\mu\text{m}$  bestimmt werden. Mit einem zusätzlichen Spezial-Dilatometer kann der Messbereich auf 300  $\mu\text{m}$  ausgedehnt werden und somit können auch Ultramakroporen bestimmt werden. Das Gerät arbeitet dabei mit Drücken bis 400 kPa (4 bar). Des Weiteren kann es in Verbindung mit der Hochdruckstation PASCAL 440 angewendet werden. Es dient dabei zur Probenaufbereitung und zum Füllen der Dilatometer mit Quecksilber unter Vakuum (Datenblatt Quecksilberporosimetrie, S. 1-3).

Die Hochdruckstation PASCAL 440 kann Drücke bis zu 400 MPa (4000 bar) aufbringen. Damit können Porengrößen bis zu 1,8 nm bestimmt werden. Die Messung mit dem PASCAL 440 kann anschließend an die Niederdruckmessung erfolgen. Dabei wird der Dilatometer nach der Messung mit dem PASCAL 140 Gerät in die Hochdruckstation umgesetzt und die Messung mit den entsprechend höheren Drücken fortgeführt (Datenblatt Quecksilberporosimetrie, S. 1-3).

Für die Durchführung der Prüfung wurde ein vorbereiteter Probekörper zuerst abgewogen und in ein Dilatometer platziert. Nach dem Verschließen und dem Positionieren des Dilatometers im Porosimeter PASCAL 140 wurde mit der Evakuierung begonnen. Ab einem Unterdruck von 2 mbar startete die Quecksilberbefüllung und die Analyse wurde begonnen. Während des 40 minütigen Versuches wurden Drücke bis zu 400 kPa aufgebaut und wieder abgebaut. Nach Beendigung des Vorgangs wurde der Dilatometer ausgebaut, abgewogen (Dilatometer mit Probe und Quecksilber) und in den Porosimeter PASCAL 440 eingesetzt. Die Platzierung des Dilatometers erfolgte in einem Öl gefülltem Zylinder. Anschließend wurde das Dilatometer vollständig mit Öl aufgefüllt, um die Luft aus der Kapillare zu entfernen. Nach dem Verschließen des Gefäßes wurde mit der Analyse begonnen. Während des Vorgangs baute das Porosimeter Drücke bis zu 400 MPa auf und wieder ab. Nach dem Versuchsende wurde das Dilatometer ausgebaut und die Probe entsorgt. Die Datenauswertung erfolgte über die PASCAL Software. Durch die Kombination der beiden Porosimeter erhielt man eine komplette Porenverteilung im Meso- und Makroporenbereich. Es können die folgende Eigenschaften und Ergebnisse erhalten werden.

#### **Volumenmessung**

Vom Volumen des bei der Messung in die Probe eingedrungenen Quecksilbers kann direkt auf das Gesamtporenvolumen der Probe geschlossen werden. Durch seine nicht benetzenden Eigenschaften dringt das Quecksilber nämlich beim Befüllen des Dilatometers nicht in den Probekörper ein. Durch Aufwendung eines Druckes intrudiert es in die Probe. Über die Verkürzung der Quecksilbersäule im Glasröhrchen des Dilatometers, kann die Menge des eingepressten Quecksilbers gemessen werden. Das gemessene Gesamtporenvolumen des Probekörpers wird in  $\text{mm}^3/\text{g}$  angegeben (POROTEC GmbH, 2001, S. 10).

#### Gesamtporosität

Die Porosität errechnet sich aus dem Verhältnis zwischen Porenvolumen (Hohlraumvolumen) und dem Gesamtvolumen (externen Volumen) des Probekörpers. Das Ergebnis wird in Prozent angegeben (*POROTEC GmbH, 2001, S. 19*).

$$\text{Porosität} = \frac{100 \times V_{\text{Poren}} \times m_{\text{Probe}}}{V_{\text{Probe}}}$$

$V_{\text{Poren}}$  gemessene Porenvolumen

$V_{\text{Probe}}$  Gesamtvolumen des Probekörpers

$m_{\text{Probe}}$  Masse des Probekörpers

**Gleichung 3.7:** Berechnung der Gesamtporosität (*POROTEC GmbH, 2001, S. 19*)

#### Mittlerer Porenradius

Der mittlere Porenradius wird über Berechnungen ermittelt. Aus dem ermittelten gesamten, kumulativen Porenvolumen werden 50% berechnet. Aus der Verteilungskurve Porenvolumen zu Porenradius wird der Radius bestimmt, der 50% des kumulativen Volumens entspricht (*POROTEC GmbH, 2001, S. 20-21*).

#### Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche lässt sich auf Basis des Porenmodells der Zylinderporen berechnen. Die Mantelfläche für jede Porenklasse der Zylinderporen kann mittels der Gleichung 3.8 ermittelt werden (*POROTEC GmbH, 2001, S. 16*).

$$A_i = \frac{2 \times V_i}{r_i}$$

$A_i$  Spezifische Porenoberfläche einer Porenklasse

$V_i$  Porenvolumen einer Porenklasse

$r_i$  mittlerer Porenradius einer Porenklasse

**Gleichung 3.8:** Spezifische Porenoberfläche einer Porenklasse (*POROTEC GmbH, 2001, S. 16*)

Die gesamte Porenoberfläche errechnet sich aus der Summe der Oberflächen der einzelnen Porenklassen (*POROTEC GmbH, 2001, S. 16*).

**Bulk-Density (Rohdichte)**

Die Bulk-Density wird auch scheinbare Dichte genannt. Darunter versteht man die Dichte eines Feststoffes bezogen auf sein Volumen einschließlich der Porenräume. Das externe Volumen lässt sich leicht im Quecksilberporosimeter bestimmen, da es unter Vakuum nicht in die Poren eindringt und sich um die externe Oberfläche legt (POROTEC GmbH, 2001, S. 18). Mittels der Gleichung 3.9 kann die Rohdichte berechnet werden.

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{Probe}}{V_{Probe}} = \rho_{Probe}$$

$V_{Probe}$  Gesamtvolumen des Probekörpers

$m_{Probe}$  Masse des Probekörpers

**Gleichung 3.9:** Bulk-Density (POROTEC GmbH, 2001, S. 18)

**Apparent-Density (scheinbare Reindichte)**

Im Gegensatz zur Bulk-Density wird die Apparent-Density unter Druck ermittelt. Das bedeutet, dass das Porenvolumen des Probekörpers bei der Dichtebestimmung berücksichtigt wird. Weist das geprüfte Material keine Poren unterhalb der Minimalgrenze der Prüfung und keinen Kompressionseffekt auf, entspricht die Apparent-Density der Reindichte oder absoluten Dichte. Andernfalls spricht man deshalb nur von der scheinbaren Reindichte (POROTEC GmbH, 2001, S. 19). Die Berechnung der Apparent-Density ist in der Gleichung 3.10 angegeben.

$$\rho_{App} = \frac{m_{Probe}}{V_{Probe} - V_{Poren} \times m_{Probe}}$$

$V_{Poren}$  gemessene Porenvolumen

$V_{Probe}$  Gesamtvolumen des Probekörpers

$m_{Probe}$  Masse des Probekörpers

**Gleichung 3.10:** Apparent-Density (POROTEC GmbH, 2001, S. 19)

**3.5 Brandversuche**

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, das Abplatzverhalten von Ultra High Performance Concrete mit unterschiedlicher Mikrostruktur zu bestimmen. Dafür wurden im Institutslabor für Hochbau und Technologie der Technischen Universität Wien Brandversuche durchgeführt. Im Zuge dieser Arbeit wurde ein für diese Brandversuche kompakter Versuchsofen entworfen

und gebaut. Nachfolgend wird die Konstruktion des neuen Brandofens, der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung im Detail beschrieben.

#### **3.5.1 Brandofen**

Ziel ist es, einen kompakten und eher leicht transportablen Brandversuchsofen zu konstruieren und zu bauen, der für die Versuche für diese Arbeit und für etwaige andere Brandversuche des Instituts eingesetzt werden kann. Es sollen Temperaturanstiege und Höchsttemperaturen der genormten Brandkurven (ETK, HC) erreicht werden können. Des Weiteren soll speziell für diese Arbeit das abgeplatzte Material schnellst möglich aus dem Versuchsofen transportiert werden damit es nicht durch die im Ofen auftretende Hitze bis zum Versuchsende verändert wird.

Für den Bau des Versuchsbrandofens wurden Feuerleichtsteine der Firma Rath (Porrath FL28-09, Abmessungen: 230 x 114 x 64 mm) trocken gemauert. Im unteren Teil des Ofens wurde ein Stahlblech in einem Winkel von zirka 43° eingebaut. Diese „Rutsche“ soll den schnellen Abtransport des abgeplatzten Materials aus dem Versuchsofen gewährleisten. Um die Dichtheit zu erhöhen und den Wärmeverlust zu minimieren, wurde der Ofen nach dem Trockenmauern mit einer Aluminiumsilikatmatte der Firma Rath ummantelt. Im Anschluss daran wurden Porenbetonsteine (Abmessungen: 625 x 100 x 250mm) der Firma Xella um den Versuchsofen geschichtet. Für eine bessere Stabilität der Konstruktion wurde der gesamte Brandofen mittels Lochbändern verspannt. Zum Abschluss wurde der seitliche Materialausgang des Ofens mittels einer Blechklappe verschlossen, um unerwünschtes Ansaugen von Fremdluft weitestgehend zu vermeiden. Um den Ofen transportabel zu gestalten, wurde er auf einer Europalette platziert. Die Abbildungen 3.15 und 3.16 zeigen einzelne Baufortschritte und den generellen Aufbau des Versuchsbrandofens.



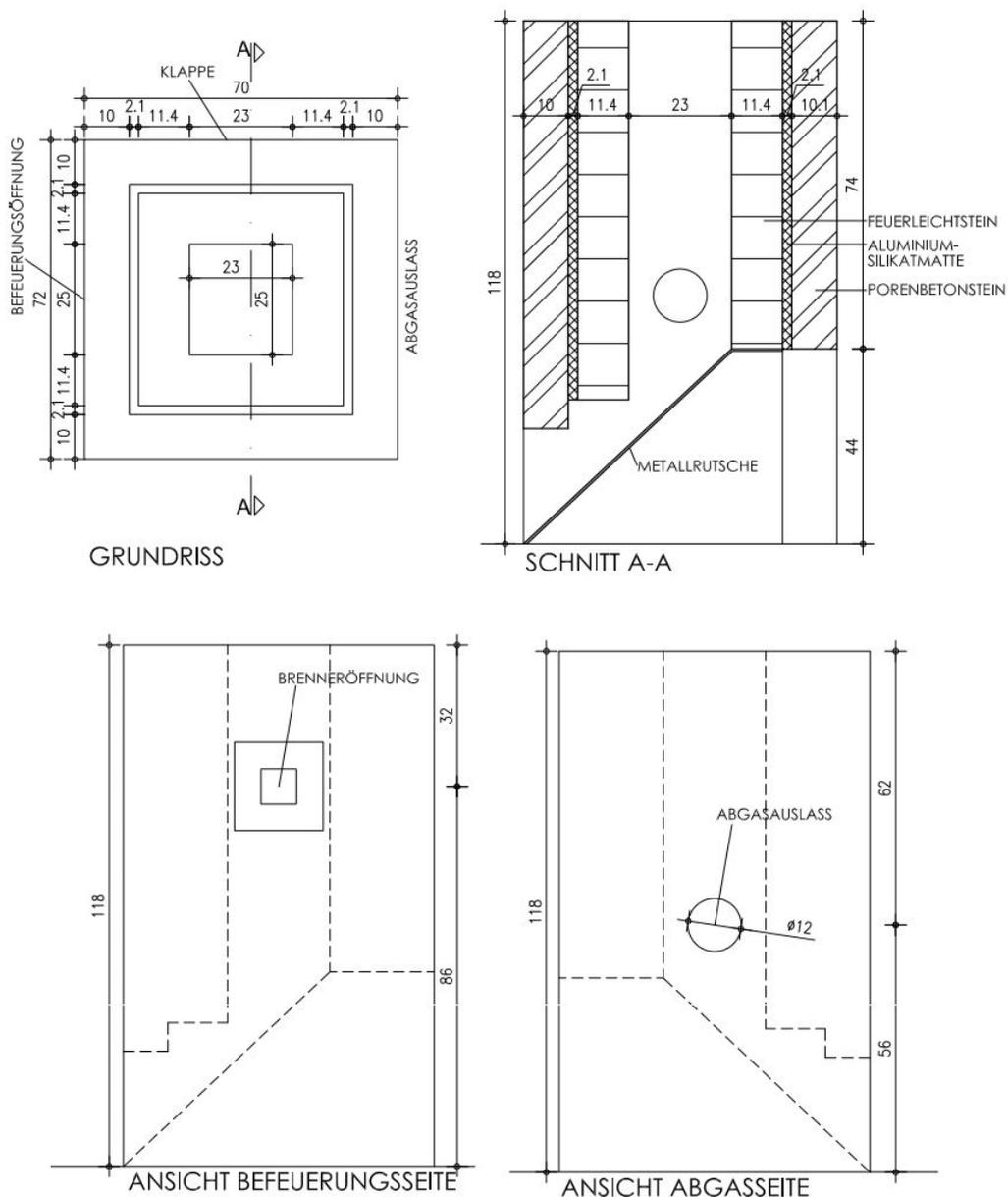
**Abbildung 3.15:** Bau des Versuchsbrandofens (Rutschenkonstruktion)



**Abbildung 3.16:** Bau des Versuchsbrandofens

### 3 Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung

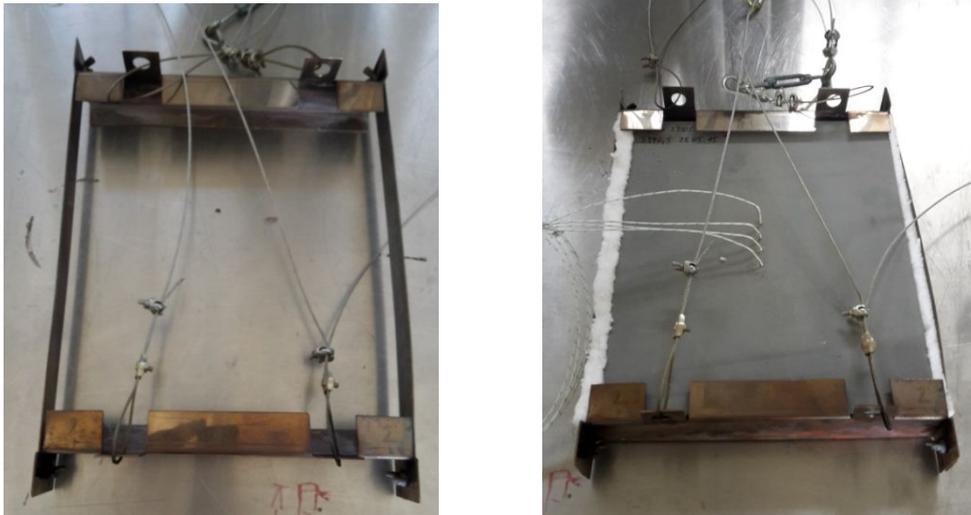
Die Abmessungen der Brandfläche des Versuchsofens sind  $L \times B = 25 \times 23$  cm. Die Brandkammer weist eine Höhe, gemessen bis zum Rutschenanfang, von 74 cm auf. Das Abgasrohr, mit einem Durchmesser von 12 cm, ist an der Rückseite in einer Höhe von zirka 56 cm angebracht. An der Stirnseite befindet sich die Befeu­rungsöffnung. Sie ist  $8 \times 8$  cm groß und in einer Höhe von 86 cm situiert. An den Seiten des Ofens ist 4 cm unterhalb der Brandfläche jeweils eine Öffnung für die Einführung eines Thermo­elementes vorgesehen. Wie schon eingangs erwähnt, wird die seitliche Öffnung des Ofens mittels einer Klappe verschlossen. Die Skizze in der Abbildung 3.17 zeigt die oben beschriebenen Elemente und Abmessungen des Versuchsbrandofens.



**Abbildung 3.17:** Skizze des Versuchsbrandofens

### 3.5.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Es wurde pro Versuch ein Probekörper mittels Hängevorrichtung (Abbildung 3.18) unmittelbar über der Brandkammer platziert. Um den Wärmeverlust zu minimieren und die Fugen abzudichten, wurden um den Betonprobekörper Dämmstreifen aus Aluminiumsilikat aufgelegt. Zur Steuerung des Brandversuches wurden zwei Thermoelemente vom Typ K der Firma OMEGA für die Kontrolle der Brandraumtemperatur verwendet. Die Brandkammer wurde mittels eines Propangasbrenners befeuert.



**Abbildung 3.18:** Hängevorrichtung (links); Hängevorrichtung mit eingebauter Probe (rechts)

Die Probekörper wurden vor dem Einbau und nach der Versuchsdurchführung gewogen. Des Weiteren wurde das mittels Rutsche aus dem Brandofen abgeführte Material in einem Metallbehälter aufgefangen und gewogen.

Während der Versuchsdurchführung wurden mittels einer an der Hängevorrichtung angebrachten Kraftmessdose die Gewichtsveränderungen gemessen. Die Tabelle 3.3 listet die Eigenschaften der Kraftmessdose auf. Die Daten wurden dabei vom Datenerfassungssystem Quantum X der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH auf den Computer übertragen und mittels der firmeneigenen Software Catman Easy AP (Version 3.4.1.35) visualisiert und in Excel exportiert.

**Tabelle 3.3:** Eigenschaften der Kraftmessdose (*Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, S. 1-4*)

Technische Daten der Kraftmessdose	
Bezeichnung	Zug-/Druckkraftaufnehmer
Hersteller	HBM Messtechnik
Typ	S9M/5kN
Nennkraft	5 kN
Nennkennwert	2 mV/V
Linearitätsabweichung (max. Abweichung zwischen Anfangs- und Endpunkt)	0,02%

Des Weiteren wurden bei laufendem Versuch, durch die im Probekörper eingebauten Thermodrahnte, die Temperaturen in den unterschiedlichen Probenhohlen gemessen (Abschnitt 3.2.3). Zusätzlich wurde ein Thermokabel an der unbeflammten Oberfläche der Betonprobe platziert. Mittels dem Keithley Multimeter konnten die Temperaturverläufe der Probekörper und die Temperaturen in der Brandkammer erfasst, auf einen Computer übertragen und aufgezeichnet werden.

Im Laufe der Versuchsdurchfuhung wurden alle Vorkommnisse und Ereignisse protokolliert. Die Versuchsdauer wurde mit maximal 70 Minuten angesetzt. Je nach Zerstorungsgrad der Probe wurden die Versuche auch früher abgebrochen.

Die Abbildung 3.19 erläutert den oben beschriebenen Versuchsaufbau und zeigt die wichtigsten Elemente für die Durchfuhung der Brandversuche.



**Abbildung 3.19:** Versuchsaufbau der Brandversuche

Die Durchführung der Brandversuche erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM EN 1363-1. Dabei musste die mittlere Aufheizgeschwindigkeit des Brennräume gemäß der Einheitstemperaturkurve (ETK) erfolgen.

Die ETK ist eine „offene Brandkurve“, das heißt, es ist keine Abkühlphase vorgesehen. Die Einheitstemperaturkurve wurde vor allem für Brandsimulationen im Hochbau entworfen. Sie simuliert einen Feststoffbrand ohne Berücksichtigung der Entzündungs- und Schwellbrandphase. Der Verlauf der Einheitstemperaturkurve wird durch einen logarithmischen Temperaturanstieg bestimmt und ist in der Gleichung 3.11 dargestellt (Horvath, Schneider, Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten, 2006, S. 246).

$$T = 345 \times \log_{10} \times (8 \times t + 1) + 20$$

T die mittlere Ofentemperatur [°C]

t die Zeit [min]

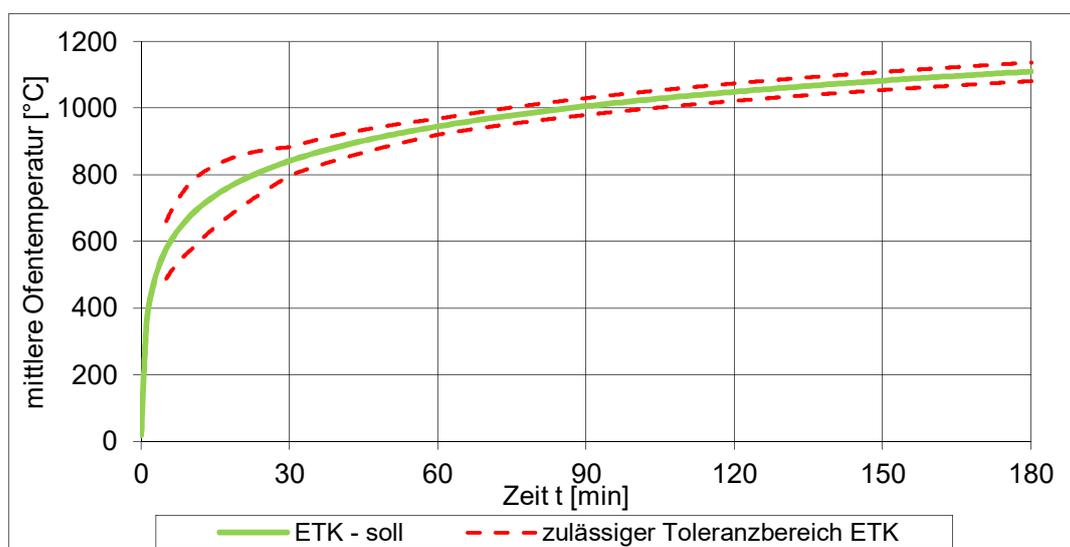
**Gleichung 3.11.:** Einheitstemperaturkurve (ÖNORM EN 1363-1, 2012, S. 14)

Neben der Anwendung im Hochbau wird die ETK auch im baulichen Objektbrandschutz von unterirdischen Infrastrukturanlagen verwendet. Des Weiteren kommt sie bei PKW-Bränden in Straßentunneln zur Anwendung (*Horvath, Schneider, Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten, 2006, S. 247*).

Die Ofentemperaturen wurden, wie bereits erwähnt, mittels Thermoelementen aufgezeichnet. Die ÖNORM EN 1363-1 fordert, dass während der Versuchsdurchführung die prozentuelle Abweichung der Fläche unter der aufgezeichneten mittleren Temperaturkurve von der Kurvenfläche der Einheitstemperaturkurve nachfolgende Werte nicht überschreitet (ÖNORM EN 1363-1, 2012, S. 15).

- 15% für  $5 < t \leq 10$  min
- $(15 - 0,05 \times (t - 10))\%$  für  $10 < t \leq 30$  min
- $(5 - 0,083 \times (t - 30))\%$  für  $30 < t \leq 60$  min
- 2,5% für  $t > 60$  min

Die Abbildung 3.20 zeigt den Verlauf der Einheitstemperaturkurve mit den von der Norm geforderten maximalen Abweichungen.



**Abbildung 3.20:** Maximale Abweichung der Einheitstemperaturkurve laut ÖNORM EN 1363-1

### 3.6 Sieblinie

Das während des Brandversuches abgeplatzte Material wurde mittels Sieblinie analysiert. Der Versuch wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 933-1 durchgeführt.

Der Siebturm bestand aus 13 Sieben mit Öffnungsweiten zwischen 0,063 und 45 mm. Für die Versuchsdurchführung wurde das gesamte abgeplatzte Material einer Brandprobe gewogen und auf das oberste Analysesieb geleert. Danach wurde der Siebturm mit einem Deckel auf dem mechanischen Rüttelgerät verspannt (Abbildung 3.21). Als nächstes wurden die Siebe 3:45 Minuten mechanisch gerüttelt. Im Anschluss wurde der Siebturm zerlegt und die Rückstände der einzelnen Analysesiebe abgewogen. Aus den einzelnen Siebrückständen konnten dann die Siebdurchgänge ermittelt werden.



**Abbildung 3.21:** Siebturm mit mechanischem Rüttelgerät

## 4 Vorversuche und Versuchsplanung

Wie bereits erwähnt ist es das Ziel dieser Arbeit die Mikrostruktur von UHPC zu verändern und das somit geänderte Abplatzverhalten zu bestimmen. Wie schon in Kapitel 2.8.4 dargestellt sind explosive Abplatzungen besonders vom Wasserdampfdruck und vom Entweichen von Wasserdampf abhängig. Besonders das dichte Gefüge von Ultra High Performance Concrete behindert das Austreten von Wasserdampf und es kommt früher zu explosiven Abplatzungen als bei konventionellen Beton.

Eine grundsätzliche Überlegung ist es, die Mikrostruktur dahingehend zu verändern, so dass die Porosität von UHPC erhöht wird. Damit müsste es zu einem Abbau des Dampfdruckes kommen und das Abplatzverhalten würde sich somit positiv verändern. Dazu wurden Mischungen konstruiert in denen die Rohdichte einerseits mit dem Einbringen von Mikro-Hohlglasskugeln und andererseits mittels Luftporenbildner herabgesetzt wurde.

### 4.1 Mischungsentwürfe

Im folgenden Unterkapitel werden die einzelnen Mischungsentwürfe erörtert und abgebildet. Des Weiteren wird die Herstellung erklärt und die Frisch- und Festbetoneigenschaften dargestellt.

#### 4.1.1 Mischungsentwürfe mit Mikro-Hohlglasskugeln

Die ersten Mischungsentwürfe wurden mit Mikro-Hohlglasskugeln erstellt. Für die verschiedenen Mischungen wurden die Hohlglasskugeln *Scotchlite S 22* der Firma *Kremer Pigmente* verwendet. Das Einsatzgebiet der Hohlglasskugeln ist in der Praxis vor allem die Herstellung wärmeisolierender Wandfarben und Mörtel. Des Weiteren wird es angewendet, um die Rohdichte von Putze, Spachtelmassen, Füllmassen und Mörtel herabzusetzen (*Kremer Pigmente*, 2013, S. 1). Weitere Eigenschaften sind in Kapitel 3.2.1 kurz erläutert.

Da es sehr wenig Literatur für die Verwendung von Mikro-Hohlglasskugeln in UHPC-Mischungen gibt, war es schwierig die Mischungen zu entwerfen und die richtige Menge an Hohlglasskugeln zu finden. Ein weiterer noch zu klärender Faktor war die richtige Einmischung dieses Zusatzstoffes in den Beton. Es wurden verschiedene Varianten versucht,

die in weiterer Folge noch erklärt werden. In der Tabelle 4.1 sind die verschiedenen Mischungsvarianten mit Mikro-Hohlglaskugeln aufgelistet.

**Tabelle 4.1:** Zusammensetzungen der Mikrohohlglaskugel-Vorversuchsmischungen für 1 m<sup>3</sup> Beton

<b>Ausgangsstoffe</b>	<b>MHG V1</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>MHG V2</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>MHG V3</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>MHG V4</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>MHG V5</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I 52,5 N C <sub>3</sub> A frei	600,27	600,54	599,91	599,49	-
CEM I 52,5 N C <sub>3</sub> A frei "white"	-	-	-	-	690,85
Mikrosilika Elkem 940 U	150,07	150,13	149,98	149,87	-
Mikrosilika Elkem MicroWhite	-	-	-	-	172,71
Quarzmehl 10000	114,05	-	89,99	-	-
Mikrohohlglaskugeln Scotchlite S 22	33,62	79,87	30,00	74,94	28,67
Quarzsand 0,1-0,5	927,50	477,00	927,50	477,00	927,50
Fließmittel ACE 430	24,01	30,44	30,00	29,97	27,63
Konsistenzhalter Sky 911	12,01	12,01	15,00	14,99	13,82
Wasser inkl. flüssiger Anteile	168,08	174,41	191,97	191,84	193,44
DCC-Entlüfter	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Wasserzementwert w/z	0,28	0,29	0,32	0,32	0,28
Wasserbindemittelwert w/b	0,22	0,22	0,26	0,26	0,22
Volumenverh. Wasser/Feinteilen	0,37	0,27	0,45	0,32	0,45
Rechnerische Frischbetonrohddichte	2003,23	1488,92	2001,39	1505,18	2024,28

Als Ausgangspunkt für die Erstellung der Mirko-Hohlglaskugelmischungen wurde die vom Institut entwickelte UHPC-Basismischung herangezogen. Die Hauptunterschiede der einzelnen Mischungen bestehen einerseits in der Zugabemenge der Mikro-Hohlglaskugeln, wodurch anderen Mischungsbestandteile reduziert wurden und andererseits im Mischungsablauf.

Bei der Mischung MHG V1 wurden zirka zwei Drittel des Massenanteils des Quarzmehls durch die Mirko-Hohlglaskugeln ersetzt. Durch das im Vergleich zum Quarzmehl größere Volumen der Mikro-Hohlglaskugeln reduzierte sich auch die Zement- und Mikrosilikamenge.

In der Mischung MHG V2 wurden das gesamte Quarzmehl und fast 50 % des Quarzsandes durch die Mikro-Hohlglaskugeln ersetzt. Durch den hohen Anteil an Mirko-Hohlglaskugeln

musste die Fließmittelzugabe und damit der Wasserzementwert erhöht werden, um die Mischung verarbeitbar zu machen. Die rechnerische Frischbetonrohddichte ist im Gegensatz zur Basis-Mischung um fast 40 % reduziert.

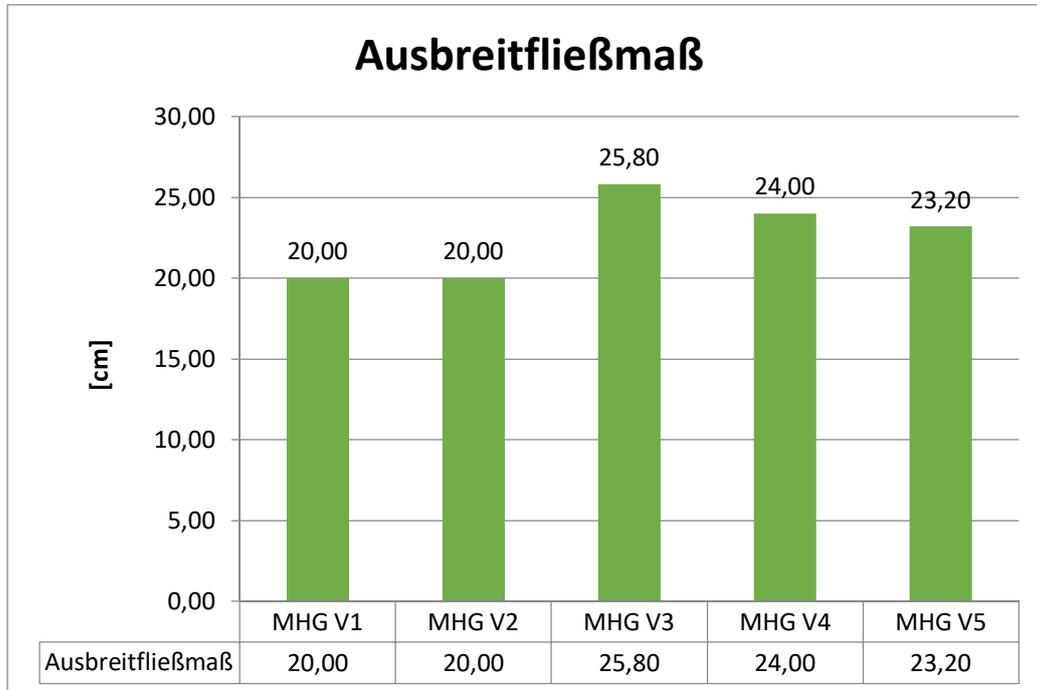
Für das Anmischen von MHG V1 und MHG V2 wurde der grundlegenden Mischreihenfolge (Kapitel 3.2.2) eine vierte Phase angefügt. Für die Zugabe der Mikro-Hohlgaskugeln und der nachfolgenden Homogenisierung der Mischung wurden alle Bestandteile zusätzlich 180 Sekunden bei einer Wirblerdrehzahl von 1200 U/min gemischt.

Die UHPC-Rezepte MHG V3 und MHG V4 sind an die Mischungen MHG V1 und MHG V2 angelehnt. Es wurde hauptsächlich der W/Z-Wert verändert, um die Verarbeitbarkeit zu verbessern. Im Gegensatz zu den ersten beiden Vorversuchen erfolgte die vierte Mischphase, das Einmischung der Mikro-Hohlgaskugeln nach der grundlegenden Mischreihenfolge, nicht mit dem Eireichmischer sondern mit einem Mörtelmischer. Die Mischdauer von 180 Sekunden blieb gleich.

Bei der Mischung MHG V5 wurde das gesamt Quarzmehl durch die Mikro-Hohlgaskugeln ersetzt. Im Gegensatz zu den anderen Vorversuchs-Mischungen war die Zement und die Mikrosilikamenge gleich der Basismischung. Bei dieser UHPC-Rezeptur wurde die vierte Mischphase wieder im Eireichmischer durchgeführt. Dieses Mal erfolgte die Zugabe der Mikro-Hohlgaskugeln und die Homogenisierung innerhalb von 150 Sekunden bei einer Wirblerdrehzahl von 58 U/min. Bei dieser Mischung wurden eine andere Zementart und ein anderes Mikrosilika verwendet. Für die Untersuchungen war dies nicht sonderlich ausschlaggebend, da bei den Voruntersuchungen das Augenmerk auf dem Mischungsablauf und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons lagen.

## Ausbreitfließmaß

Das Ausbreitfließmaß wurde direkt nach dem Mischen mit einem Setztrichter ermittelt (Abschnitt 3.3.2).

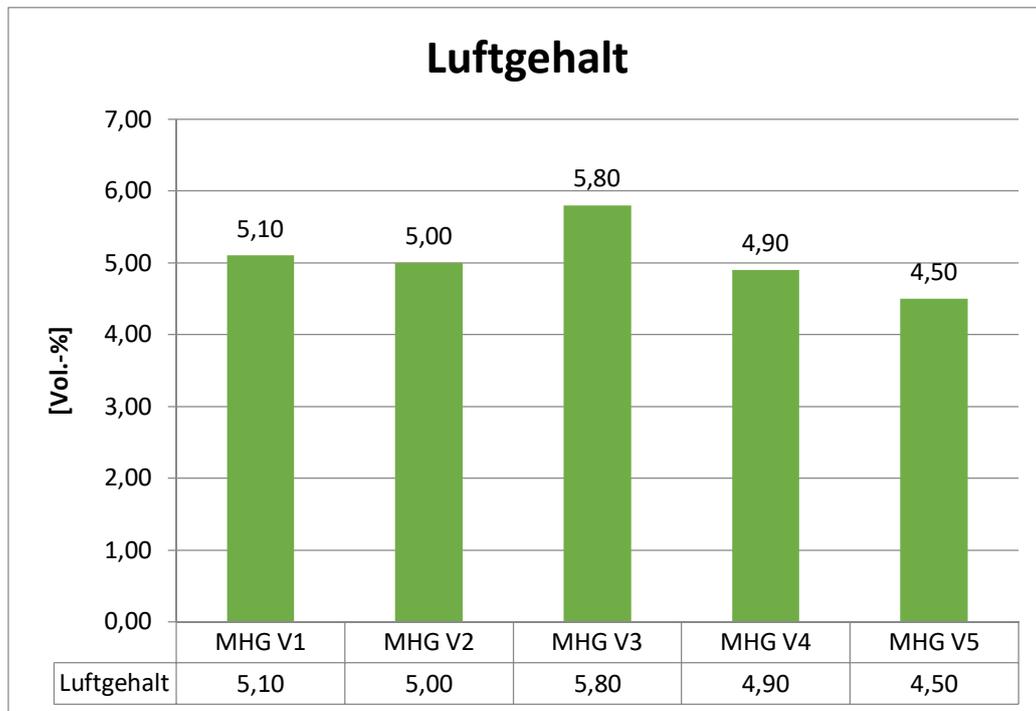


**Abbildung 4.1:** Ergebnisse des Ausbreitfließmaßes der Mikrohohlglaskugel-Mischungen

Die Ergebnisse in Abbildung 4.1 zeigen, dass die Mischungen MHG V3 und MHG V4 im Vergleich zu den Mischungen MHG V1 und MHG V2 eine geringere Konsistenz besitzen und damit eine wesentlich bessere Verarbeitbarkeit aufweisen. Dieser Umstand ist auf den wesentlich höheren Wasser/Zement-Wert der beiden Mischungen zurückzuführen. Die Mischung MHG V5 liegt im Vergleich zu den vier anderen Mischungen im mittleren Bereich. Trotz des niedrigen Wasser/Zement-Wertes von 0,28 ist die Verarbeitbarkeit besser als bei den UHPC-Rezepturen MHG V1 und V2. Dieser Umstand ist wohl auf den kompletten Ersatz des Quarzmehls durch die Mikrohohlglaskugeln zurückzuführen.

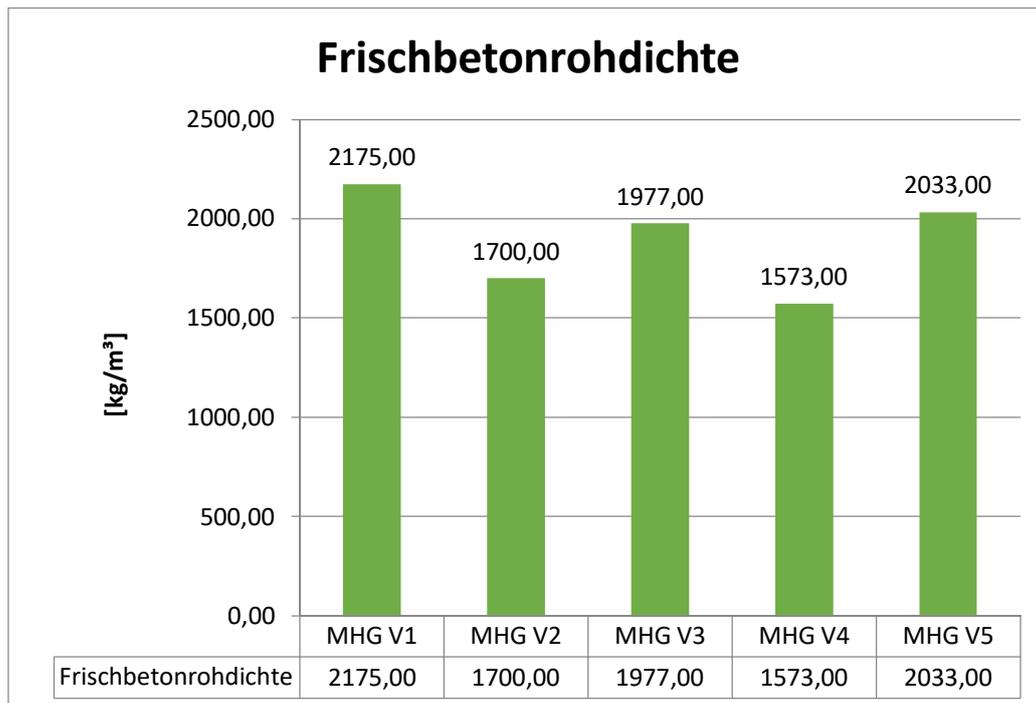
### Luftgehalt und Frischbetonrohddichte

Der Frischbetonluftgehalt und die Frischbetonrohddichte der Vorversuchsmischungen wurden mit einem Luftporentopf mit ein Liter Inhalt ermittelt. In den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.3 sind der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung beider Prüfungen genau beschrieben.



**Abbildung 4.2:** Ergebnisse des Luftgehaltes der Mikrohohlglaskugel-Mischungen

Aus der Abbildung 4.2 ist ersichtlich, dass die Luftgehalte der einzelnen Vorversuchsmischungen mit Mikrohohlglaskugeln weitestgehend sehr ähnlich sind und kaum nennenswerte Unterschiede aufweisen. Den höchsten Wert erreicht die Mischung MHG V3 mit 5,8 Vol.-%, wohingegen der niedrigste Wert von der UHPC-Rezeptur MHG V5 mit 4,5 Vol.-% erreicht wird. Das heißt, dass die Art der Zugabe der Mikrohohlglaskugeln (vierte Mischphase) auf den Luftgehalt keinen wesentlichen Einfluss hat.



**Abbildung 4.3:** Ergebnisse der Frischbetonrohddichte der Mikrohohlglaskugel-Mischungen

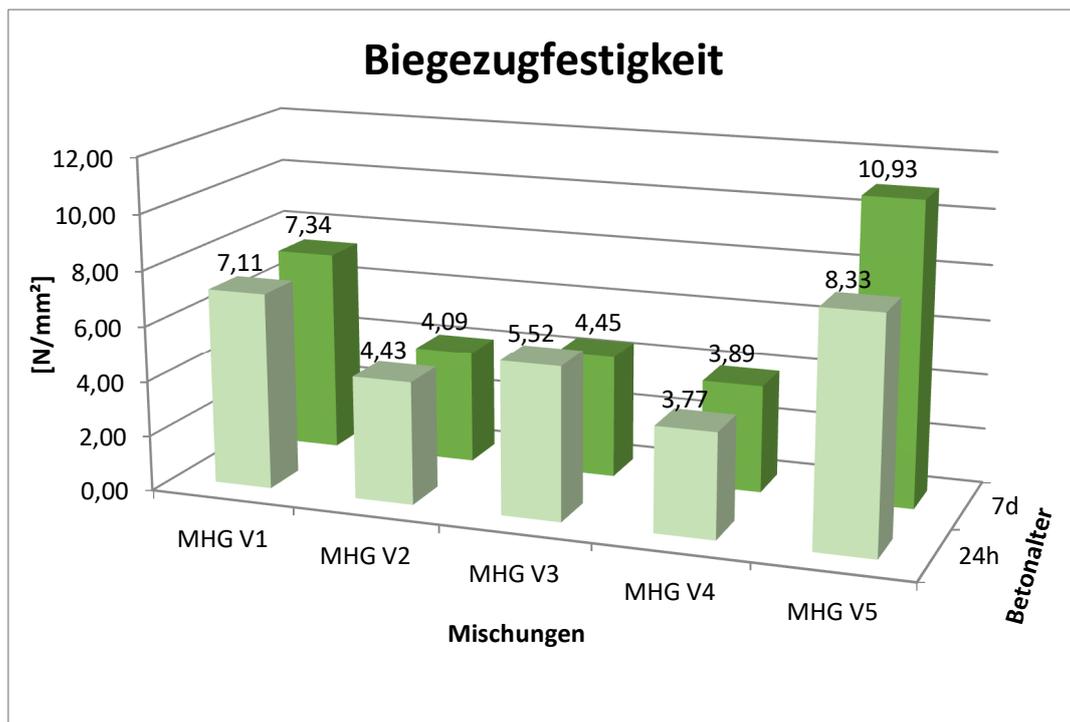
Vergleicht man die Ergebnisse aus der Abbildung 4.3 mit der rechnerischen Frischbetonrohddichte aus der Tabelle 4.1 sind klare Unterschiede zu erkennen. Bei den Mischungen MHG V1 und MHG V2 liegen die Ergebnisse weit über den errechneten Werten. Diese eklatante Abweichung ist auf die Zumischung der Mikrohohlglaskugeln (vierte Mischphase) zurückzuführen. Durch die hohen Scherkräfte im Eireichmischer wird ein erheblicher Anteil der Glaskugeln zerstört. Bei der Vorversuchsmischung MHG V1 beträgt der errechnete Hohlglaskugelbruch 73,01% und bei der MHG V2 Mischung 36,25%.

Bei den Betonrezepturen MHG V3 und MHG V4 ist zu erkennen, dass der Hohlglaskugelbruch weit geringer ausfällt und die Ergebnisse nahe den rechnerischen Frischbetonrohddichten aus der Tabelle 4.1 sind. Das lässt darauf schließen, dass mit dieser Zumischvariante die Mikrohohlglaskugeln weitaus schonender in den Frischbeton eingebracht werden können.

Die Mischung MHG V5 zeigt im Vergleich zu der errechneten Frischbetonrohddichte auch passable Ergebnisse. Der Mikrohohlglaskugelbruch ist höher als bei der Zumischvariante von MHG V3 und MHG V4, liegt aber noch im akzeptablen Bereich.

## Biegezugfestigkeit

Die Versuche zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit wurden, wie im Kapitel 3.4.1 beschrieben, durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit der Proben betrug für beide Prüfungen (24 Stunden, 7 Tage) 50 N/s. Die Ergebnisse in der Abbildung 4.4 sind die Mittelwerte aus jeweils drei Probeprismen.

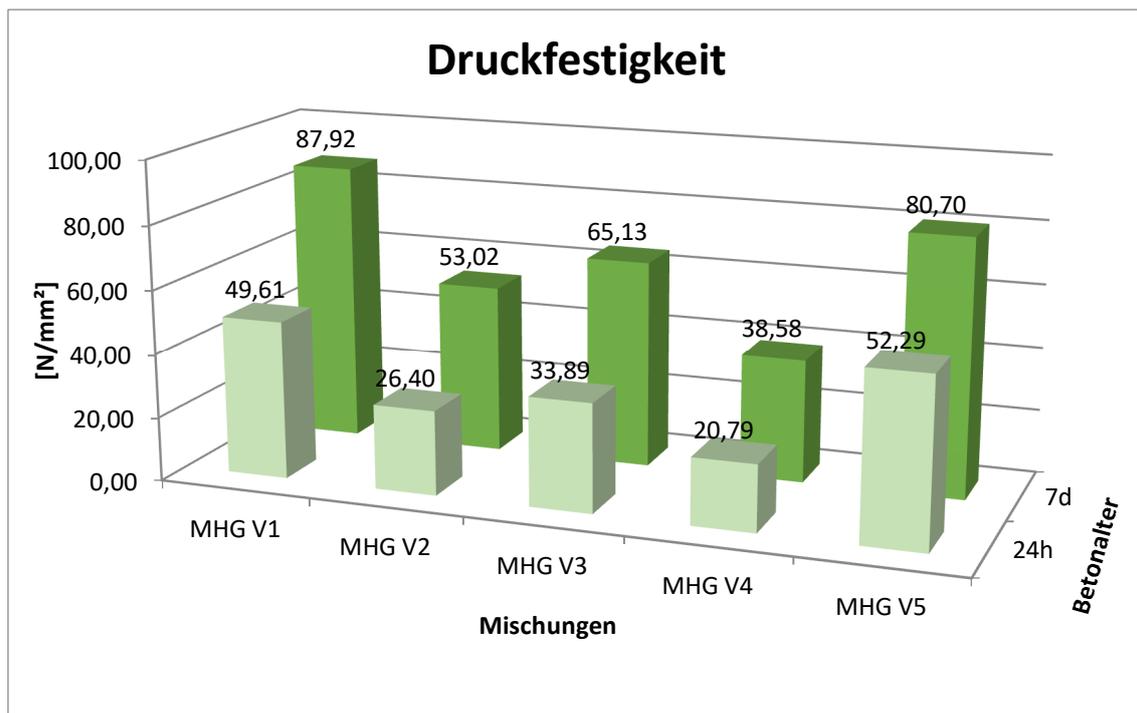


**Abbildung 4.4:** Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsversuche der Mikrohohlglaskugel-Mischungen

Allgemein kann gesagt werden, dass die Ergebnisse der einzelnen Biegezugprüfungen stark streuen. Aus der Abbildung 4.4 ist zu erkennen, dass die Biegezugfestigkeiten bei den Mischungen MHG V1, MHG V2, MHG V3 und MHG V4 zwischen der Prüfung nach 24 Stunden und der Prüfung nach sieben Tagen fast nicht steigen und teilweise sogar rückläufig sind. Bei der Rezeptur MHG V5 ist die Biegezugfestigkeitssteigerung deutlich zu erkennen. Allgemein weist diese Mischung die höchsten Werte auf, was auf den anderen Zement und das andere Mikrosilika zurückgeführt werden kann.

## Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitsprüfungen wurden, wie im Abschnitt 3.4.2 beschrieben, durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit der Proben betrug für die 24 Stunden Prüfung 1 N/mm<sup>2</sup>s und für die Prüfung nach sieben Tagen 1,5 N/mm<sup>2</sup>s. Die in der Abbildung 4.5 dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte aus jeweils drei Probeprismen.



**Abbildung 4.5:** Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche der Mikrohohlglaskugel-Mischungen

Aus der Abbildung 4.5 erkennt man, dass die Druckfestigkeiten von der Rohdichte der UHPC-Mischung abhängig sind. Die Betonrezeptur MHG V4 weist die geringsten Druckfestigkeiten auf, hat aber auch die geringste Frischbetonrohddichte. Des Weiteren weist die Mischung MHG V5 wie auch schon bei der Biegezugfestigkeit höhere Werte auf, die wiederum auf die schnellere Reaktionsfähigkeit des Weißzements und des Mikrosilikas Elkem MicroWhite gegenüber des Zements und Mikrosilikas in anderen Mischungen zurückzuführen ist.

### 4.1.2 Mischungsentwürfe mit Luftporenbildner

Eine zweite Vorversuchsreihe wurde mit den Mischungsentwürfen mit einem Luftporenbildner durchgeführt. Vorrangig war es bei dieser Voruntersuchung wie der Luftporenbildner reagiert, das heißt, in welcher Dosis muss er beigemischt werden, um die gewünschte Frischbetonrohddichte zu erreichen.

Als Luftporen-Mittel wurde *MasterAir 9010* verwendet. Wie bereits im Kapitel 3.2.1 erwähnt, wird der Luftporenbildner auf Basis von Tensiden hergestellt. *MasterAir 9010* ist ein Zusatzmittel mit einer äußerst hohen Wirkstoffkonzentration. Es kommt bei der Herstellung von Luftporen-Beton zur Anwendung und wird auch zur Verbesserung der Beständigkeit gegen Frost und Frosttausalzangriffe eingesetzt. Die Vorteile von *MasterAir 9010* sind ein präziser Lufteintrag, feine Luftporen und eine gute Kompatibilität mit anderen Betonzusatzmitteln. Die Menge der gebildeten Luftporen ist vor allem von der Mischdauer, der Temperatur des Frischbetons und von der Zugabemenge des LP-Mittels abhängig. Des Weiteren spielen noch die Zementsorte und die Zusammensetzung der Betonmischung eine große Rolle (BASF, 2013, S. 1).

**Tabelle 4.2:** Zusammensetzungen der Luftporenbildner-Vorversuchsmischungen für 1 m<sup>3</sup> Beton 2% Luftgehalt

Ausgangsstoffe	LPB V1	LPB V2	LPB V3
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I 52,5 N C <sub>3</sub> A frei	689,99	689,99	689,99
Mikrosilika Elkem 940 U	172,50	172,50	172,50
Quarzmehl 10000	345,00	345,00	345,00
Quarzsand 0,1-0,5	927,50	927,50	927,50
Fließmittel ACE 430	31,05	31,05	31,05
Konsistenzhalter Sky 911	13,80	13,80	13,80
Luftporenbildner Master Air 9010	3,79	3,10	2,41
Wasser inkl. flüssiger Anteile	193,20	193,20	193,20
Wasserzementwert w/z	0,28	0,28	0,28
Wasserbindemittelwert w/b	0,22	0,22	0,22
Volumenverh. Wasser/Feinteilen	0,45	0,45	0,45

Die Tabelle 4.2 zeigt die verschiedenen UHPC-Rezepturen mit dem Luftporenbildner *MasterAir 9010*. Die Tabelle präsentiert die Betonzusammensetzungen für 1 m<sup>3</sup> Beton unter Berücksichtigung von einem Luftgehalt von 2%, so wie sie bei den Voruntersuchungen entwickelt und eingewogen wurden. Die Betonrezepturen unter Berücksichtigung der tatsächlich gemessenen Luftgehalte werden nachfolgend in der Tabelle 4.3 dargestellt.

Als Ausgangsbasis für die UHPC-Rezepturen mit Luftporenbildner diente wieder die UHPC-Basismischung des Instituts. Der Unterschied zur Basismischung besteht im Prinzip nur in der Zugabe des Luftporenbildners *MasterAir 9010*, der zugleich die Wasserzugabe reduziert. Des Weiteren wurde auch der DCC-Entlüfter nicht zugegeben, da der Eintrag von Luftporen erwünscht ist.

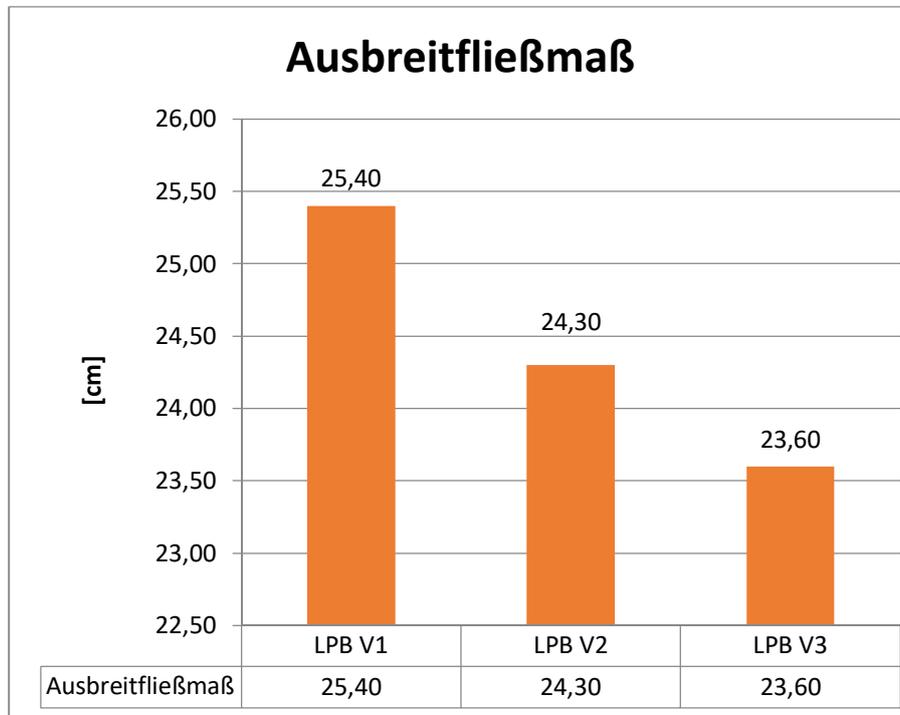
Der Unterschied der Vorversuchsmischungen untereinander besteht in der Zugabemenge des Luftporenbildners. LPB V1 wurde 0,55%, LPB V2 0,45% und LPB V3 0,35% des Zementgewichts an *MasterAir 9010* zugesetzt.

**Tabelle 4.3:** Zusammensetzungen der Luftporenbildner-Vorversuchsmischungen für 1 m<sup>3</sup> Beton unter Berücksichtigung der gemessenen Luftgehalte

Ausgangsstoffe	LPB V1 [kg/m <sup>3</sup> ]	LPB V2 [kg/m <sup>3</sup> ]	LPB V3 [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I 52,5 N C <sub>3</sub> A frei	549,15	563,28	570,29
Mikrosilika Elkem 940 U	137,29	140,82	142,57
Quarzmehl 10000	274,57	281,64	285,14
Quarzsand 0,1-0,5	738,29	757,11	766,65
Fließmittel ACE 430	24,71	25,35	25,66
Konsistenzhalter Sky 911	10,98	11,27	11,41
Luftporenbildner Master Air 9010	3,02	2,53	2,00
Wasser inkl. flüssiger Anteile	153,76	157,72	159,68
Wasserzementwert w/z	0,28	0,28	0,28
Wasserbindemittelwert w/b	0,22	0,22	0,22
Volumenverh. Wasser/Feinteilen	0,45	0,45	0,45
Luftgehalt [%]	22,00	20,00	18,50

### Ausbreitfließmaß

Das Ausbreitfließmaß wurde direkt nach dem Mischen mit einem Setztrichter ermittelt (Abschnitt 3.3.2).

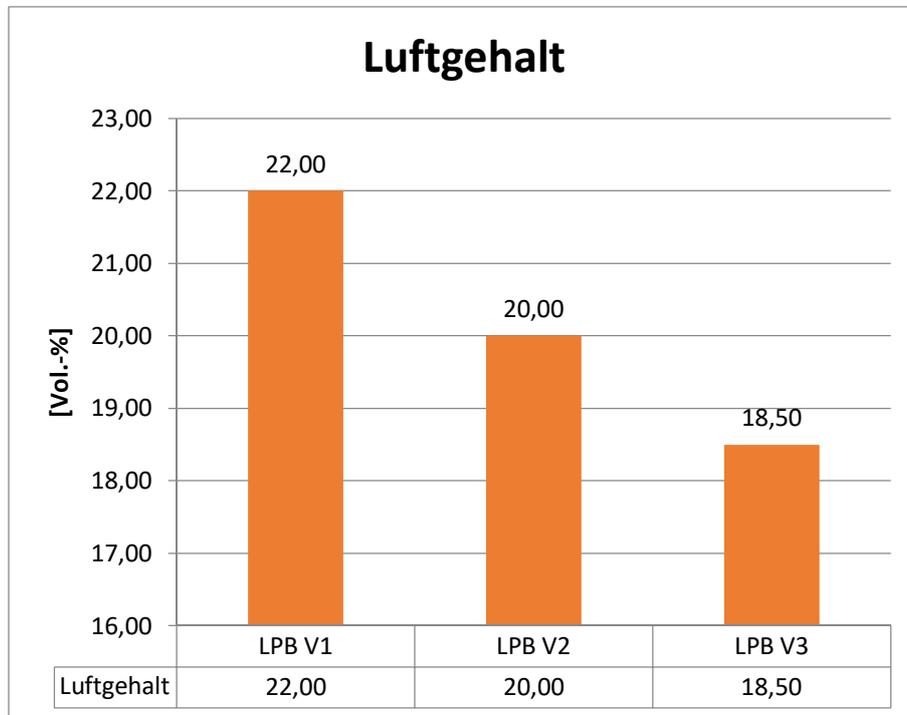


**Abbildung 4.6:** Ergebnisse des Ausbreitfließmaßes der Mischungen mit Luftporenbildner

Aus der Abbildung 4.6 ist ersichtlich, dass das Ausbreitfließmaß mit steigender Dosierung des Luftporenmittels ebenfalls ansteigt. Die Mischung LPB V1 hat mit 0,55% des Zementgewichtes die größte Menge an Luftporenbildner und weist auch das höchste Ausbreitfließmaß auf. Das ist auf die durch die höhere Dosierung steigende Anzahl an Mikroluftporen zurückzuführen. Die Mikroluftporen wirken wie kleine Kugellager und verbessern so die Konsistenz.

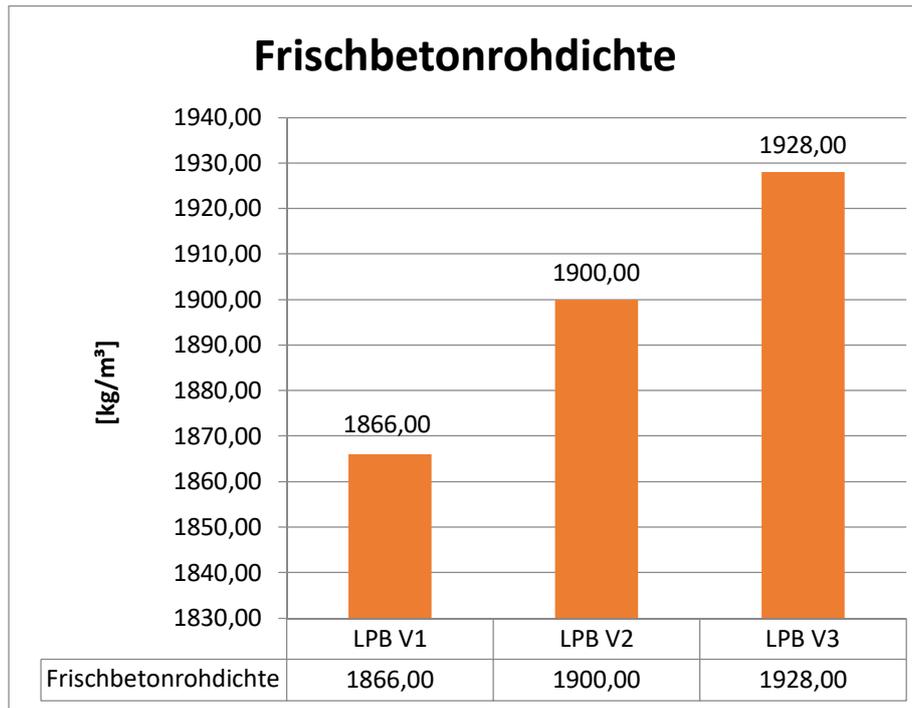
## Luftgehalt und Frischbetonrohddichte

Die Bestimmung des Frischbetonluftgehaltes und der Frischbetonrohddichte erfolgte mittels Luftporentopf mit einem Liter Inhalt (vgl. Kapitel 3.3.1 und 3.3.3).



**Abbildung 4.7:** Ergebnisse des Luftgehaltes der Mischungen mit Luftporenbildner

Die Ergebnisse aus der Abbildung 4.7 zeigen das erwartete Bild. Die Mischung LPB V1 mit der höchsten Zugabemenge an Luftporenbildner weist auch den höchsten Luftgehalt auf. In der UHPC-Rezeptur LPB V3 mit einem Luftporenbildnergehalt von 0,35 % des Zementgewichtes befinden sich mit 18,50 Vol.-% die geringste Menge an Luftporen von allen drei Mischungen. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich mit abnehmender Zugabemenge des Luftporenbildners naturgemäß die Anzahl der Luftporen verringern.

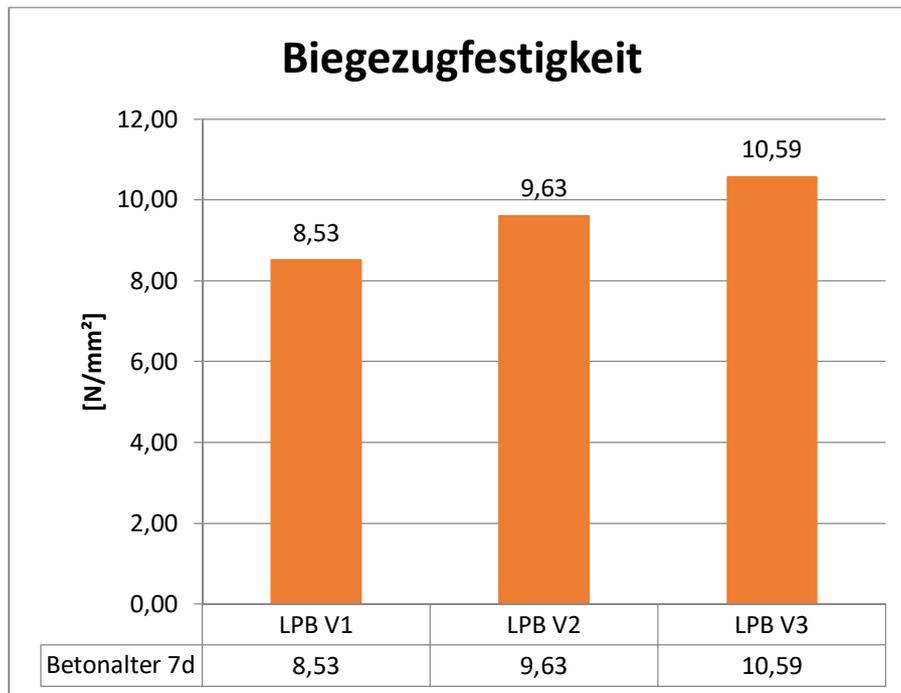


**Abbildung 4.8:** Ergebnisse der Frischbetonrohddichte der Mischungen mit Luftporenbildner

Aus Abbildung 4.8 kann man entnehmen, dass sich die Frischbetonrohddichte erwartungsgemäß genau entgegen dem Frischbetonluftgehalt verhält. Demnach hat die Mischung LPB V3 mit der geringsten Zugabemenge an Luftporenbildner mit  $1928 \text{ kg/m}^3$  die höchste Frischbetonrohddichte. LPB V1 weist mit  $1866 \text{ kg/m}^3$  die geringste Dichte der drei Proben auf.

## Biegezugfestigkeit

Die Versuche zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit wurden wie im Kapitel 3.4.1 beschrieben durchgeführt. Die Belastungsgeschwindigkeit der Proben betrug 50 N/s. Die Ergebnisse in der Abbildung 4.9 sind die Mittelwerte aus jeweils drei Probepismen.

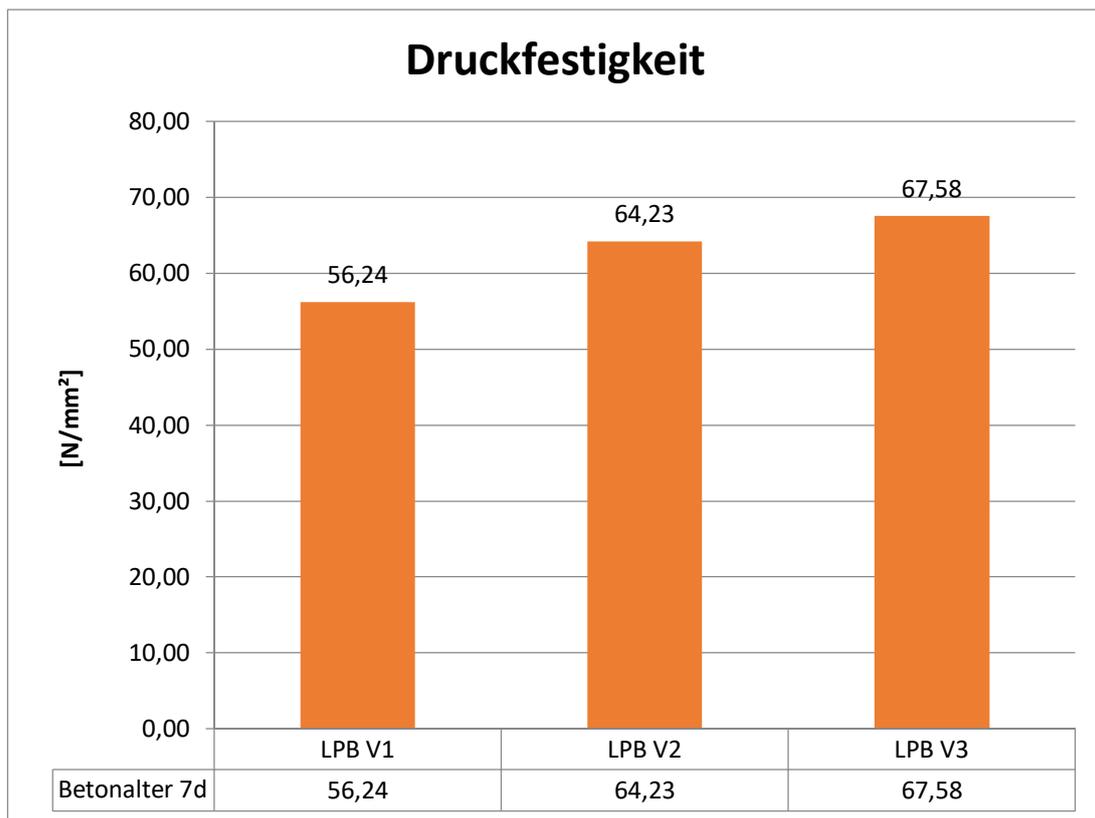


**Abbildung 4.9:** Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsversuche der Mischungen mit Luftporenbildner

Wie schon bei den Vorversuchen mit den Mikrohohlglaskugeln erwähnt, streuen die einzelnen Biegezugprüfungen relativ stark. Aus der Abbildung 4.9 ist ersichtlich, dass die Mischung LPB V1 mit 8,53 N/mm<sup>2</sup> die niedrigste Biegezugfestigkeit aufweist. Bei der Betonrezeptur LPB V3 wurde mit 10,59 N/mm<sup>2</sup> der höchste Wert ermittelt.

### Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitsprüfungen wurden nach sieben Tagen durchgeführt. Der Prüfungsaufbau und -ablauf sind im Abschnitt 3.4.2 näher beschrieben. Die Belastungsgeschwindigkeit der Proben betrug 1,5 N/mm<sup>2</sup>s. Die in der Abbildung 4.10 dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte aus jeweils drei Probeprismen.



**Abbildung 4.10:** Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche der Mischungen mit Luftporenbildner

Die Abbildung 4.10 zeigt ganz deutlich den Zusammenhang zwischen Rohdichte und Betondruckfestigkeit. Die UHPC-Rezepturen LPB V1 und LPB V2 erreichen Druckfestigkeiten von 56,24 N/mm<sup>2</sup> bzw. 64,23 N/mm<sup>2</sup>. Die Mischung LPB V3 mit der höchsten Frischbetonrohichte weist auch mit 67,58 N/mm<sup>2</sup> die höchsten Druckfestigkeiten der drei Vorversuchsmischungen auf.

## 4.2 Versuchsplanung

Für die Versuchsdurchführung der Hauptversuche wurden vier unterschiedliche UHPC Mischungen vorbereitet. Es wurden Probekörper mit der Basismischung des Instituts, mit Mikrohohlglaskugeln, mit Luftporenbildner und mit PP-Fasern hergestellt. Aus den Vorversuchen geht hervor, dass sich für die Hohlglaskugelmischung am besten die Mischung MHG V5 eignet. Die Verarbeitbarkeit liegt im mittleren Bereich und der Bruch der Mikrohohlglaskugeln ist bei dieser Zumischvariante akzeptabel. Für die Hauptversuche wird der Mikrohohlglaskugelanteil leicht erhöht, damit eine rechnerische Frischbetonrohddichte von  $2000 \text{ kg/m}^3$  erreicht wird. Darüber hinaus werden derselbe Zement und dasselbe Mikrosilika der Basis-Mischung verwendet. Aus den Vorversuchen der Luftporenbildermischungen wird die Rezeptur LPB V3 gewählt. Die Frischbetonrohddichte ist im Bereich der MHG-Mischung und die Festigkeitswerte sind die höchsten in dieser Vorversuchsreihe. Die Auflistung der Mischungsrezepturen ist dem Abschnitt 5 Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Für die Bezeichnung der Probekörper und Mischungen werden Abkürzungen verwendet, die im nachfolgenden Text und in den Diagrammen immer wieder angewendet werden. Eine Übersicht der vorkommenden Abkürzungen und deren Bedeutung sind in Tabelle 4.4 angegeben.

**Tabelle 4.4:** Bedeutung der Abkürzungen für Mischungs- und Probekörperbezeichnungen

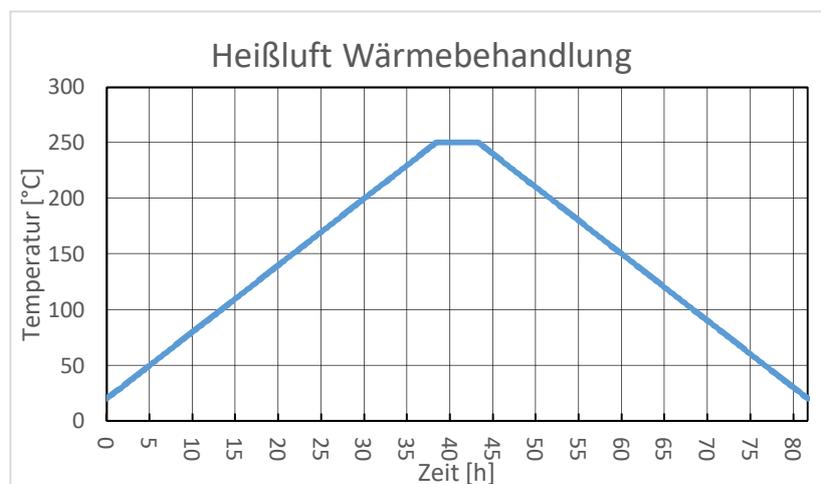
Abkürzung	Bedeutung
BAS	Basis-Mischung des Instituts
FAS	Basis-Mischung des Instituts mit PP-Fasern
MHG	UHPC-Mischung mit Mikrohohlglaskugeln
LPB	UHPC-Mischung mit Luftporenbildner
L250	Nachbehandlung mit 250°C Heißluft
L105	Heißluftlagerung bei 105°C
K	Klimaschranklagerung bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit
W	Wasserlagerung bei 20°C

Jeder Probekörper ist mit einer eindeutigen unverwechselbaren Beschriftung ausgestattet, die alle wichtigen Informationen über die Nachbehandlungs- und Lagerungsart enthält. So kann jede Brandplatte und jedes Prüfprisma eindeutig einer Mischung und

Lagerungsbedingung zugeordnet werden. Zum besseren Verständnis wird anhand zweier Beispiele die Probenbezeichnung erläutert. In MHG\_L250\_W\_1 bedeutet MHG UHPC-Mischung mit Mikrohohlglaskugeln, L250 Nachbehandlung mit 250°C Heißluft, W Wasserlagerung bis Prüfungsbeginn, 1 bedeutet Versuchsreihe eins aus zwei Versuchsreihen (zwei Brandplatten pro Lagerungsart). LPB\_K\_2 bedeutet demzufolge, dass der Probekörper aus der UHPC-Mischung mit Luftporenbildner besteht, im Klimaschrank bis zum Prüfungsbeginn gelagert wurde und der zweiten Versuchsreihe angehört.

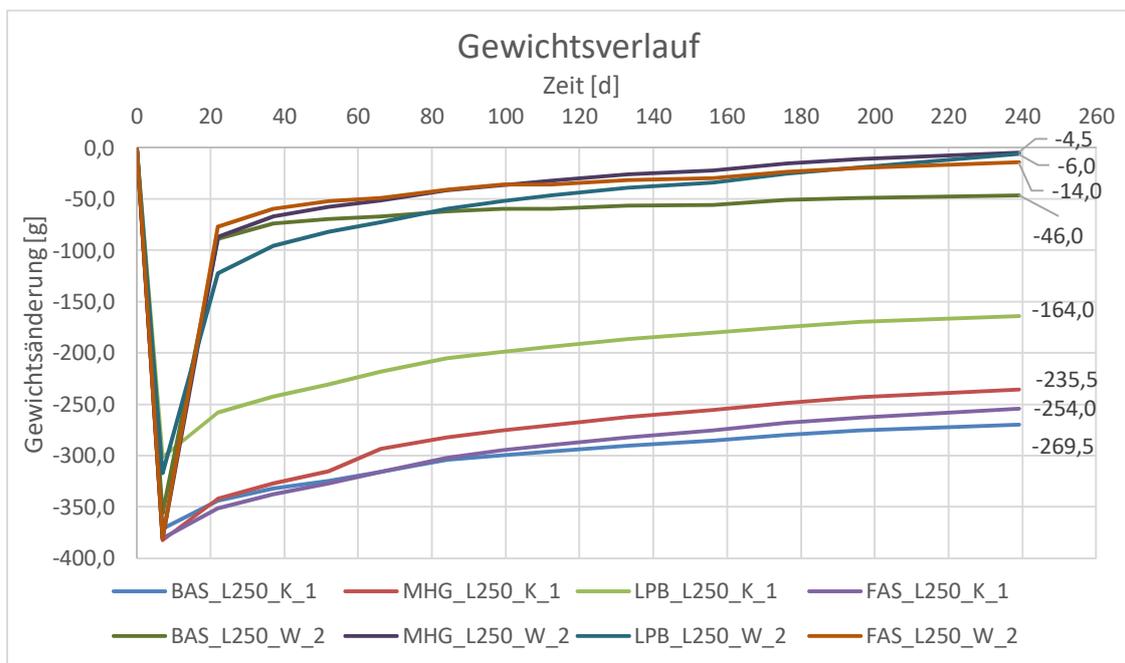
Für die Brandversuche wurden für jede Mischungsvariante 10 Probekörper hergestellt. Damit standen für jede Nachbehandlungs- und Lagerungsart zwei Brandplatten zur Verfügung. Darüber hinaus wurden zur Ermittlung der Druck- und Biegezugfestigkeiten für jede Brandplatte drei Prismen hergestellt, die denselben Nachbehandlungs- und Lagerungsbedingungen unterzogen wurden. Die Ermittlung der Festbetoneigenschaften erfolgte nach dem Brandversuch der jeweiligen Brandplatte.

Die Herstellung der Probekörper ist in Kapitel 3.2.3 detailliert beschrieben. Das Ausschalen der Proben erfolgte nach ein bis drei Tagen. Die weitere Lagerung bis zu den nächsten Nachbehandlungs- und Lagerungsschritten erfolgte bei Raumluft. Zehn Tage nach der Herstellung wurden vier Brandplatten jeder Mischung und die dazugehörigen Prismen mit 250°C Heißluft wärmebehandelt. Dabei wurden die Proben mit einer Aufheizrate von 0,1 K/min aufgewärmt. Nach Erreichen der Zieltemperatur von 250°C wurde diese für fünf Stunden gehalten. Die Abkühlphase der Probe erfolgte gleich wie die Aufheizrate in 0,1 K/min Schritten. Abbildung 4.11 zeigt den Temperaturverlauf der Wärmebehandlung.



**Abbildung 4.11:** Temperaturverlauf der Wärmebehandlung

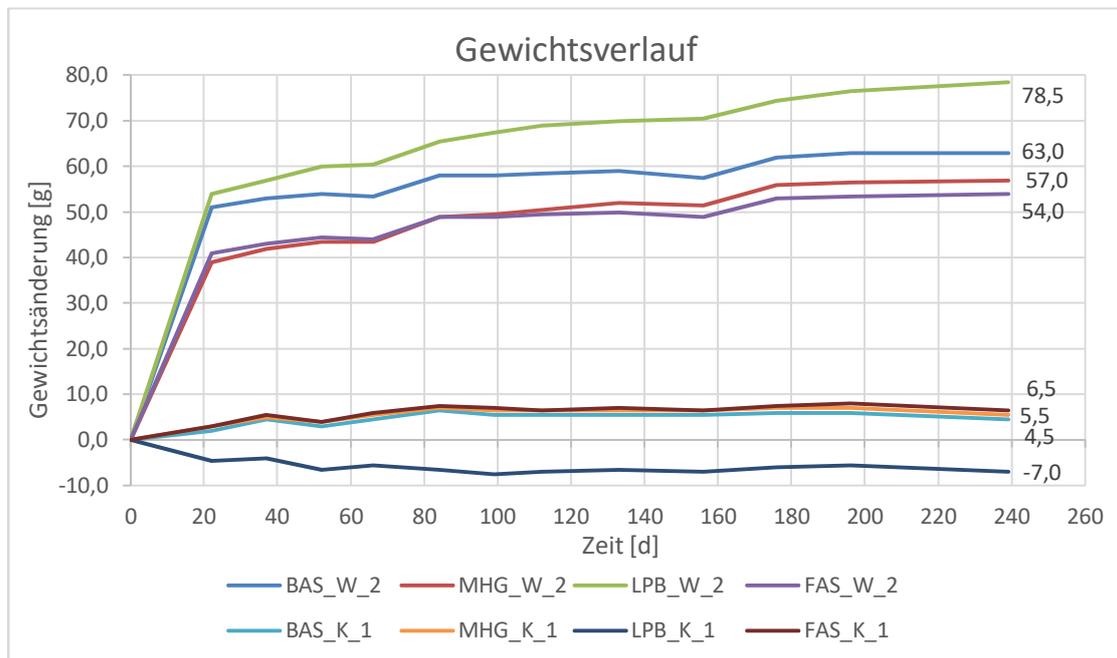
Nach der Wärmebehandlung erfolgte die unterschiedliche Lagerung der Probekörper bis zur Prüfung. Zwei Brandplatten jeder Mischung wurden unter Wasser gelagert und die restlichen zwei im Klimaschrank des Labors. Dort wurden sie dem Normklima von 20°C und 65% rel. Luftfeuchtigkeit ausgesetzt. Abbildung 4.12 zeigt den Gewichtsverlauf der Probekörper. Es ist deutlich zu sehen, dass die UHPC-Mischungen unter Normklimabedingungen nur sehr langsam Wasser aufnehmen. Trotz der langen Lagerung von 232 Tagen wurde keine Ausgleichsfeuchte erreicht. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den unter Wasser gelagerten Probekörpern. Zwar nehmen sie in den ersten 15 Tagen sehr viel Wasser auf, jedoch verlangsamt sich die Gewichtszunahme immer mehr, sodass bei Versuchsbeginn nicht einmal das Ausgangsgewicht vor der Wärmebehandlung erreicht wurde.



**Abbildung 4.12:** Gewichtsverlauf der 250°C Heißluft behandelten Proben mit nachträglicher Klimaschrank- oder Wasserlagerung

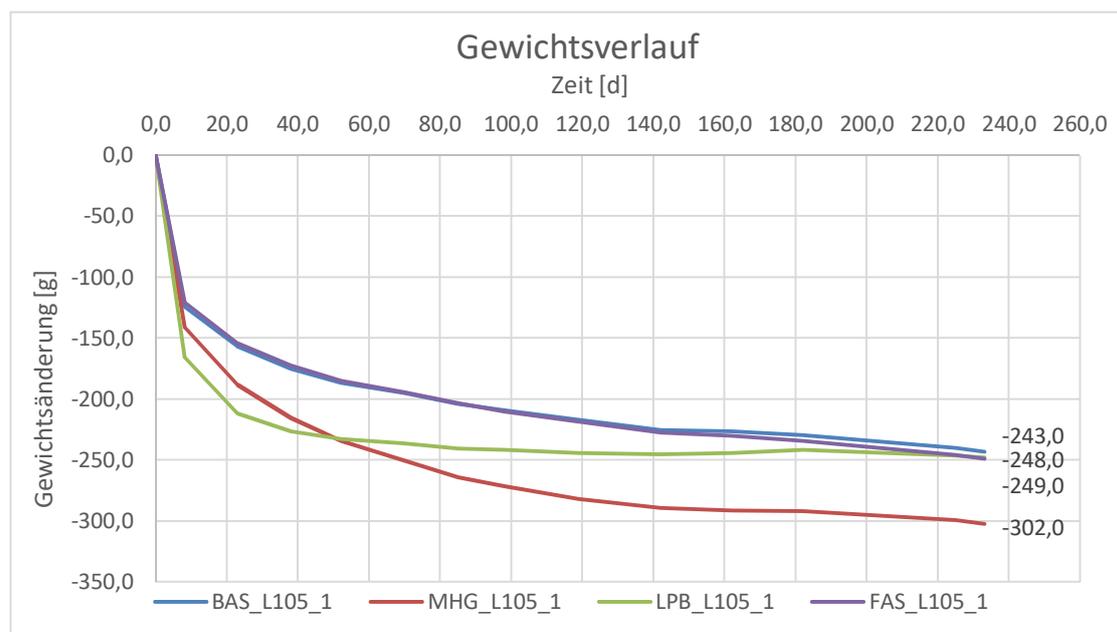
Von den sechs unbehandelten Brandplatten wurden ebenfalls jeweils zwei unter Wasser und zwei unter Normbedingungen im Klimaschrank gelagert. Die restlichen zwei Brandplatten wurden mittels Heißluft bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Diese Proben wurden auch zur Ermittlung des Wassergehalts herangezogen. Der Gewichtsverlauf der Probekörper ist in Abbildung 4.13 und 4.14 dargestellt. Aus der Abbildung 4.13 ist zu entnehmen, dass die im Klimaschrank gelagerten Probekörper die Ausgleichsfeuchte erreicht haben. An den

flachen Kurven der wassergelagerten Proben sieht man, dass sie nach 239 Tagen kaum noch an Gewicht zugenommen haben.



**Abbildung 4.13:** Gewichtsverlauf der unbehandelten Proben mit Klimaschrank- oder Wasserlagerung

Die Abbildung 4.14 zeigt, dass selbst nach 233 Tagen Lagerung bei 105°C Heißluft die Brandplatten noch immer nicht Gewichtskonstanz erreicht haben. Die sehr langsame Abgabe des freien Wassers, ist auf das dichte Gefüge von UHPC zurückzuführen.



**Abbildung 4.14:** Gewichtsverlauf der 105°C Heißluft gelagerten Proben

## 5 Hauptversuche

Wie schon in der Einleitung erwähnt, ist es das Ziel dieser Arbeit das Abplatzverhalten von Ultra High Performance Concrete zu analysieren und durch Modifizieren der Mikrostruktur zu ändern. Darüber hinaus soll diese Arbeit dazu dienen das Abplatzverhalten besser zu verstehen und dafür die unterschiedlichen UHPC Mischungen diesbezüglich miteinander zu vergleichen. Die detaillierte Beschreibung der durchgeführten Prüfungen beziehungsweise der Versuchsaufbau ist den Abschnitten 3.4 bis 3.6 zu entnehmen.

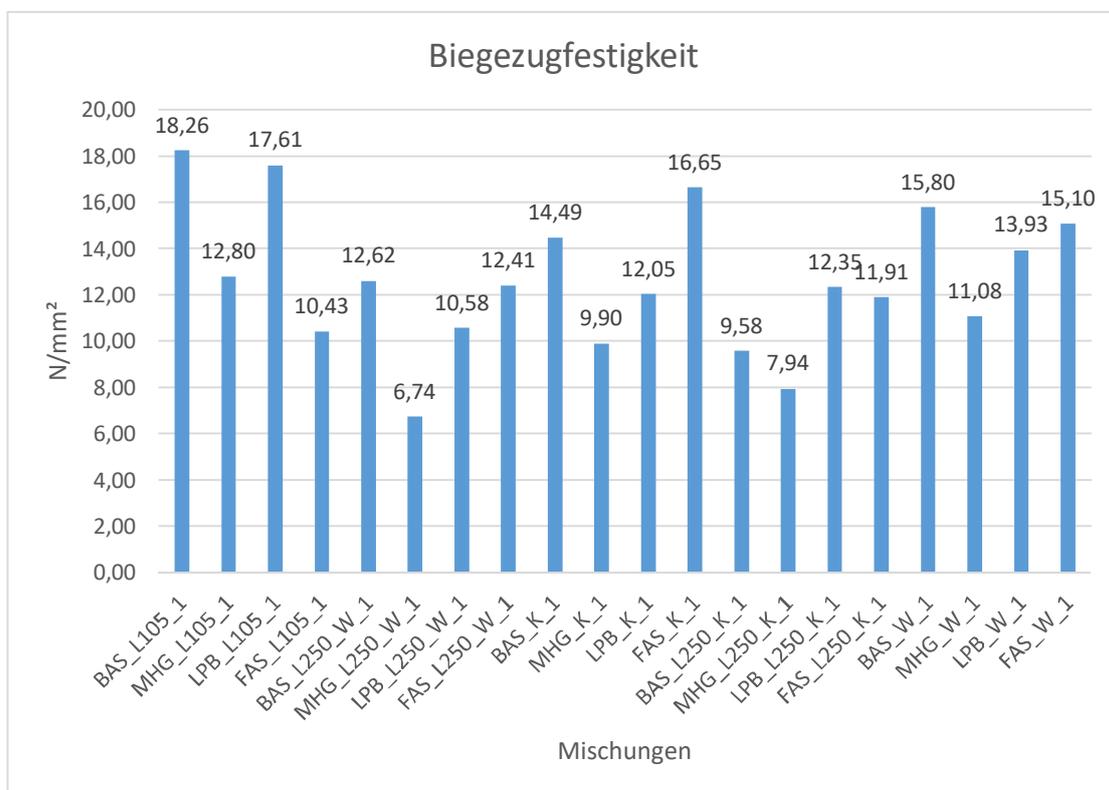
Die für den Hauptversuch verwendeten Mischungsrezepturen sind in der Tabelle 5.1 angegeben. Die unterschiedlichen Nachbehandlungs- und Lagerungsarten der Probekörper sind im Kapitel 4.2 beschrieben.

**Tabelle 5.1:** Zusammensetzungen der Hauptversuchsmischungen für 1 m<sup>3</sup> Beton

<b>Ausgangsstoffe</b>	<b>BAS</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>FAS</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>MHG</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>LPB</b> [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I 52,5 N C <sub>3</sub> A frei	689,99	690,00	678,28	570,29
Mikrosilika Elkem 940 U	172,50	172,50	135,66	142,57
Quarzmehl 10000	345,00	345,00	-	285,14
Mikrohohlglaskugeln Scotchlite S 22	-	-	33,91	-
PB Eurofiber HPR Fasern	-	3,00	-	-
Quarzsand 0,1-0,5	927,50	918,76	927,50	766,65
Fließmittel ACE 430	31,05	31,05	27,13	25,66
Konsistenzhalter Sky 911	13,80	13,80	13,57	11,41
Luftporenbildner Master Air 9010	-	-	-	2,00
Wasser inkl. flüssiger Anteile	193,20	193,20	189,92	159,68
DCC-Entlüfter	1,00	1,00	1,00	-
Wasserzementwert w/z	0,28	0,28	0,28	0,28
Wasserbindemittelwert w/b	0,22	0,22	0,23	0,22
Volumenverh. Wasser/Feinteilen	0,45	0,45	0,44	0,45
Rechnerische Frischbetonrohddichte	2340,32	2334,58	1976,18	-

## 5.1 Biegezugfestigkeit

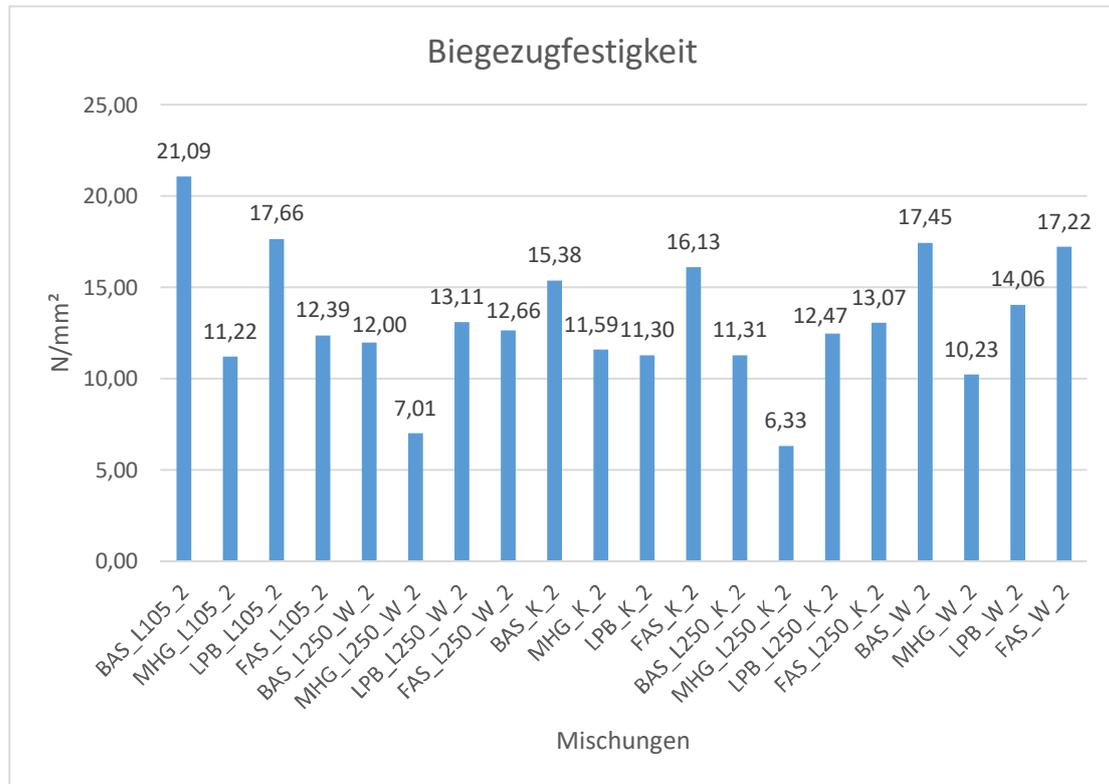
Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit ist im Abschnitt 3.4.1 näher beschrieben. Die Ergebnisse dieser Festbetonprüfung sind in den folgenden zwei Diagrammen nach den Versuchsreihen gegliedert. Die Probekörper wurden mit einer Geschwindigkeit von 100 N/s belastet. Das Betonalter für die erste Versuchsreihe (Abbildung 5.1) betrug im Durchschnitt 245 Tage und das der zweiten Versuchsreihe (Abbildung 5.2) 273 Tage. Die Ergebnisse in den Abbildungen ergeben sich aus den Mittelwerten von jeweils drei Probeprismen.



**Abbildung 5.1:** Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsversuche der ersten Hauptversuchsreihe

Allgemein muss gesagt werden, dass die Biegezugfestigkeiten sehr stark streuen. Die in Abbildung 5.1 dargestellten Biegezugfestigkeiten zeigen, dass die Mischungen mit Mikrohohlglaskugeln und mit Luftporenbildner generell eine geringere Biegezugfestigkeit aufweisen als die Basis- und PP Faser-Mischung. Dieser Umstand ist auf die geringere Festbetonrohddichte der MHG- und der LPB-Mischung zurückzuführen. Vergleicht man die Lagerungsbedingungen und die Nachbehandlungsarten untereinander erkennt man, dass die 105°C Lagerung, außer bei der PP-Faser-Mischung, die höchsten Werte erzielt. Des Weiteren

ist zu erkennen, dass sich die Nachbehandlung mit 250°C Heißluft leicht negativ auf die Biegezugfestigkeit auswirkt. Die Prismen ohne Nachbehandlungen weisen durchgehend höhere Werte auf. Besonders eklatant zeigt sich der Abfall der Biegezugfestigkeit bei den mit 250°C Heißluft behandelten Mikrohohlglasskugel-Mischungen.

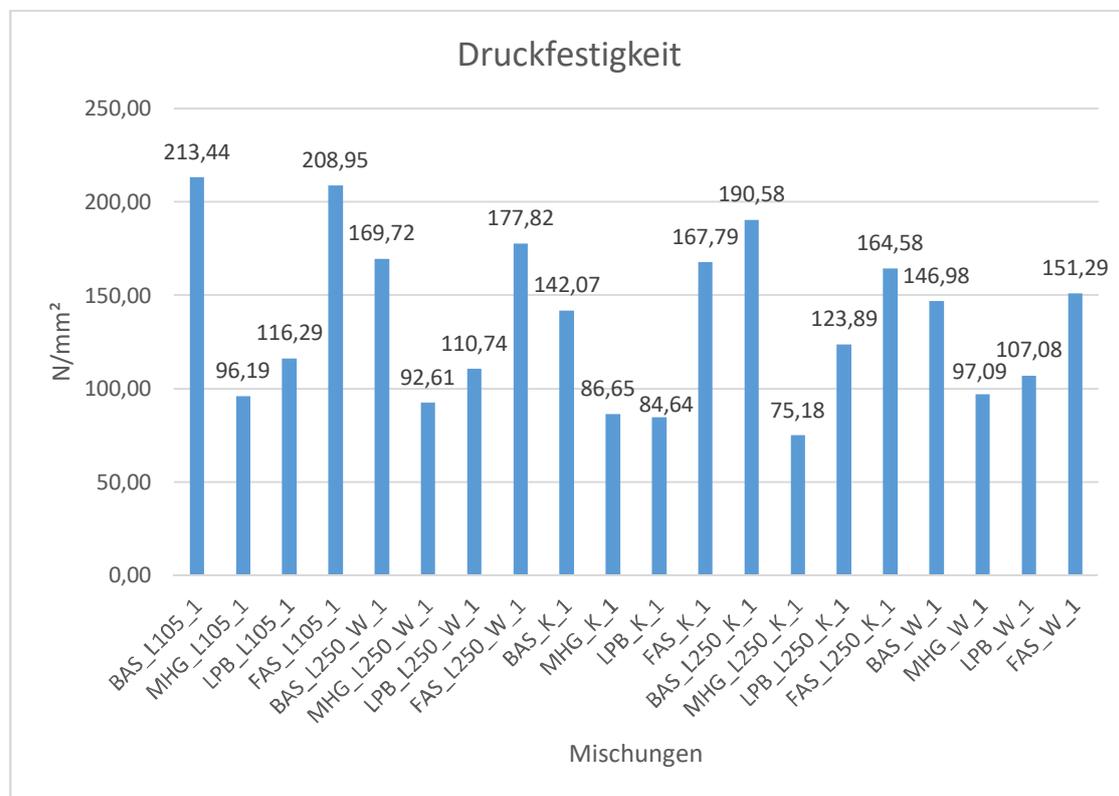


**Abbildung 5.2:** Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsversuche der zweiten Hauptversuchsreihe

Die in der Abbildung 5.2 dargestellte zweite Hauptversuchsreihe zeigt ähnliche Tendenzen wie die erste. Die teilweise höheren Werte sind dabei eher auf die Streuung der Prüfungsergebnisse zurückzuführen als auf das höhere Betonalter.

## 5.2 Druckfestigkeit

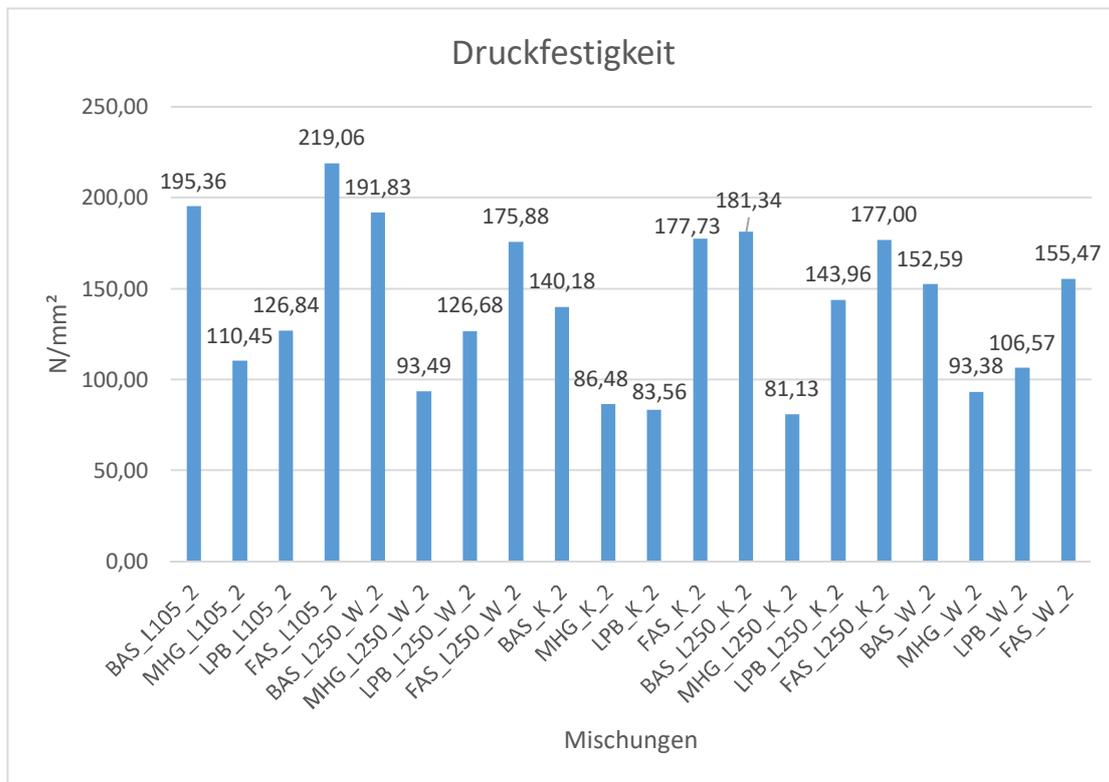
Die Druckfestigkeitsprüfung wurde wie in dem Kapitel 3.4.2 beschrieben durchgeführt. Die Ergebnisse der verschiedenen Mischungen und der unterschiedlichen Nachbehandlungs- und Lagerungsbedingungen sind in den nachfolgenden zwei Diagrammen (Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4) nach den Hauptversuchsreihen gegliedert. Die Belastung der Probekörper erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 3 N/mm<sup>2</sup>s. Wie bei der Bestimmung der Biegezugfestigkeit wurden die Ergebnisse der Druckfestigkeit aus den Mittelwerten aus jeweils drei Probekörpern ermittelt. Das durchschnittliche Betonalter der ersten Hauptversuchsreihe betrug ebenso 245 Tage und das der zweiten Hauptversuchsreihe 273 Tage.



**Abbildung 5.3:** Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche der ersten Hauptversuchsreihe

In der Abbildung 5.3 ist zu sehen, dass die Druckfestigkeiten der MHG- und der LPB-Mischungen deutlich unter denen der BAS- und FAS-Mischungen liegen. Das ist auf die weitaus geringere Festbetonrohndichte der MHG- und LPB-Proben zurückzuführen. Der Zusammenhang zwischen Rohndichte und Druckfestigkeit ist in der Abbildung 5.5 dargestellt.

Auffallend ist, dass sich die 250°C Heißluftbehandlung auf die MHG-Mischung negativ auswirkt. Die höchsten Druckfestigkeiten werden mit den Proben der 105°C Lagerung erzielt.



**Abbildung 5.4:** Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche der zweiten Hauptversuchsreihe

Die in der Abbildung 5.4 dargestellten Druckfestigkeiten der zweiten Versuchsreihe zeigen ein ähnliches Bild wie die erste Versuchsreihe. Es werden ebenfalls die höchsten Druckfestigkeiten mit den bei 105°C getrockneten Prismen erzielt. Der äußerst hohe Anstieg der Druckfestigkeit der LPB\_L250\_K\_2 Proben im Gegensatz zur anderen Versuchsreihe ist auf eine höhere Festbetonrohddichte zurückzuführen. Anscheinend sind bei der Mischung für dieses Prismenset weniger Luftporen entstanden oder sind aus unbekanntem Gründen wieder ausgetrieben worden. Generell weisen die Festbetonrohddichten der LPB-Prismen einer Lagerungsart dennoch hohe Streuungen auf.

Die Abbildung 5.5 zeigt den Zusammenhang zwischen Festbetonrohddichte und Druckfestigkeit. Es ist deutlich zu sehen, dass die Druckfestigkeit mit einer geringeren Festbetonrohddichte abnimmt. Es ist zu erkennen, dass die niedrigeren Druckfestigkeiten der LPB- und MHG-Mischungen auf die weitaus niedrigeren Festbetonrohddichten zurückzuführen sind.

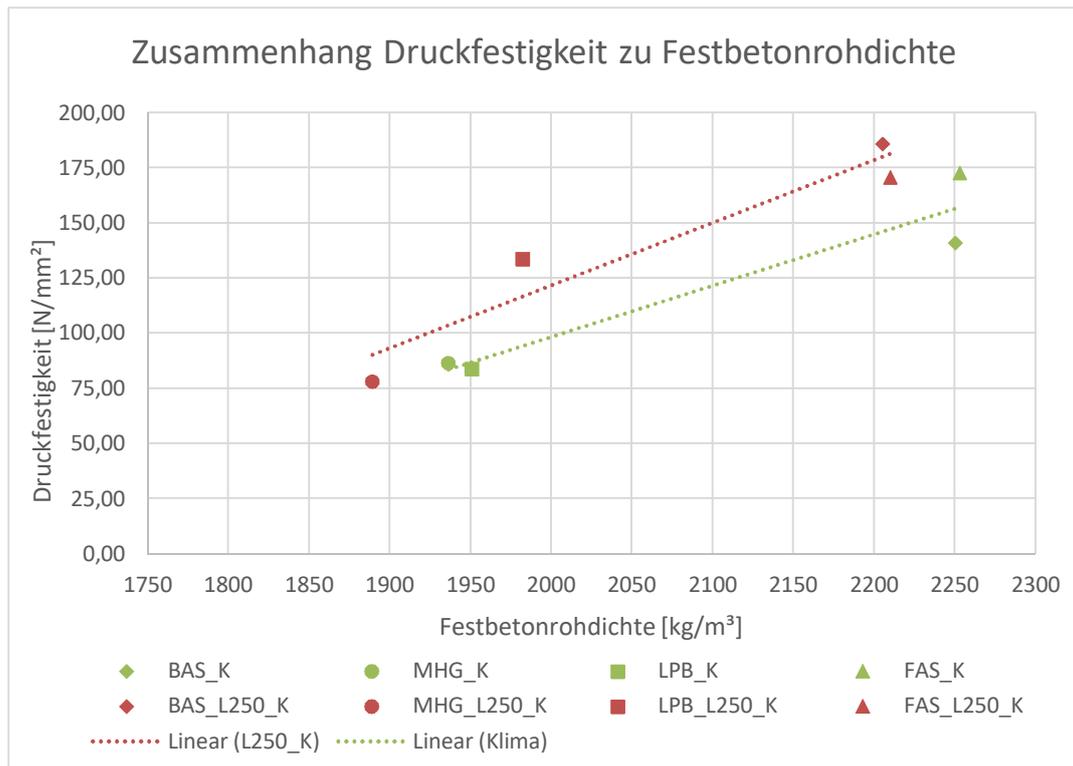
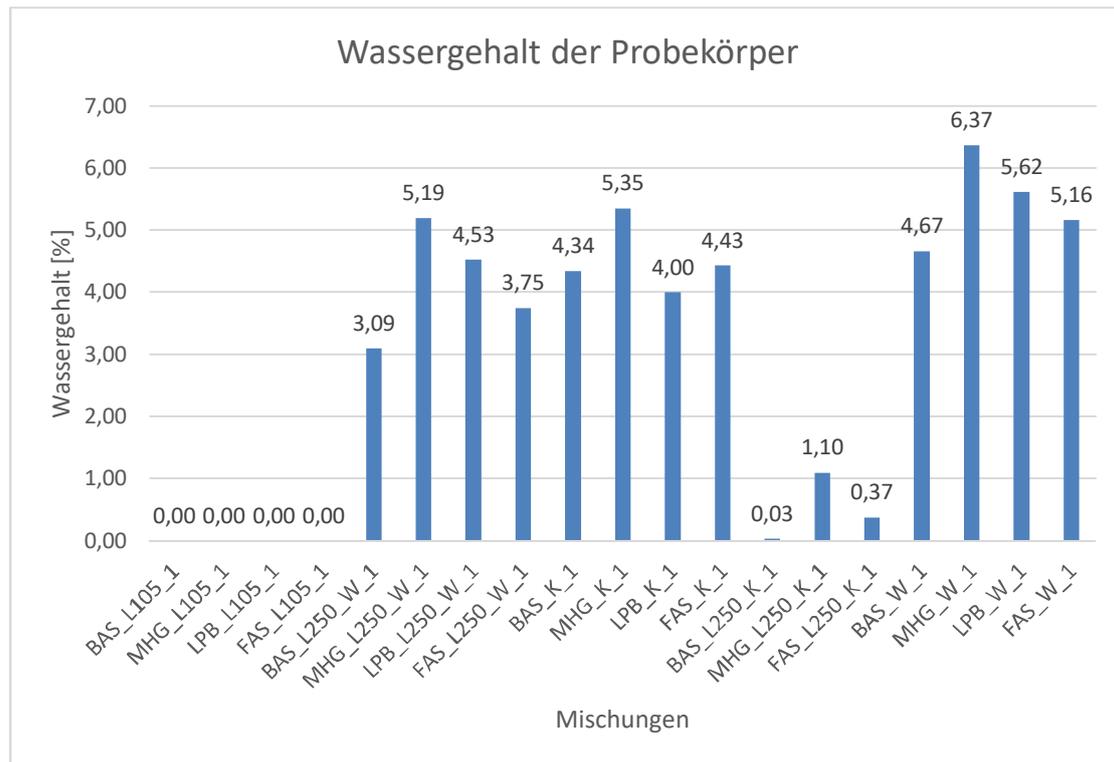


Abbildung 5.5: Zusammenhang Druckfestigkeit zu Festbetonrohddichte

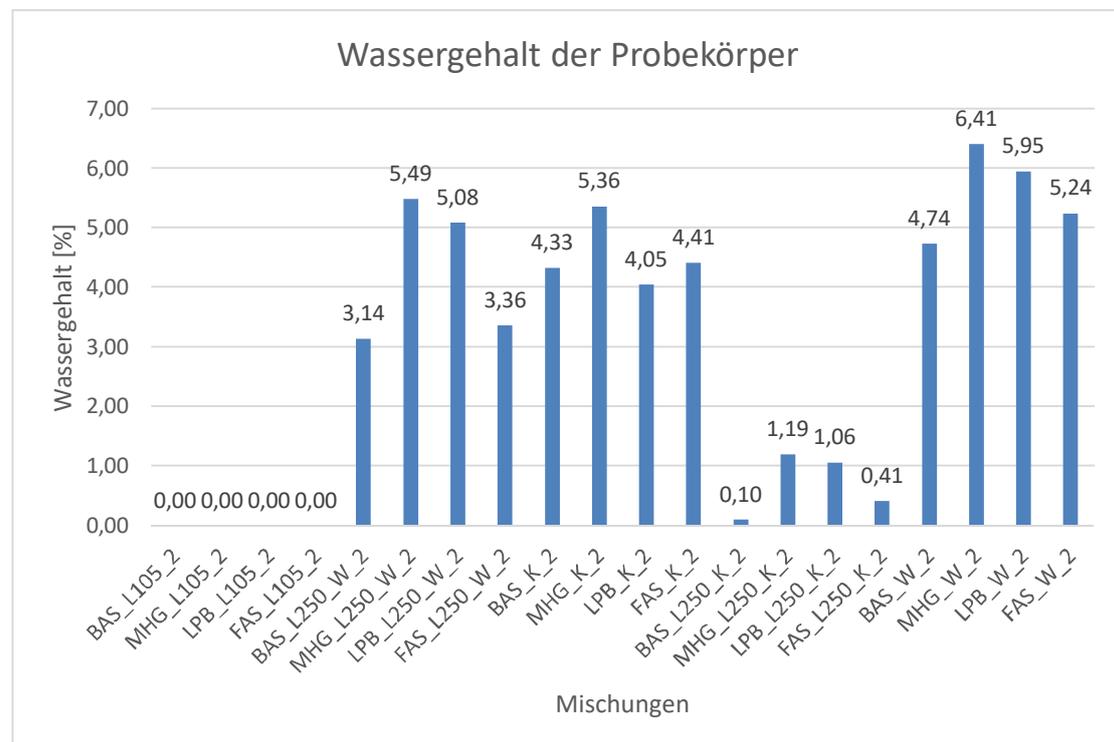
### 5.3 Wassergehalt

Der Wassergehalt wurde wie im Abschnitt 3.4.4 beschrieben ermittelt. Da nach 33 Wochen noch immer keine Massenkonstanz auftrat (Abbildung 4.14), wurde dieser Wert als Trockenmasse angenommen. In den Abbildungen 5.6 und Abbildung 5.7 ist der Wassergehalt der Probekörper beider Versuchsreihen dargestellt.

Aus der Abbildung 5.6 ist der Wassergehalt der Proben der ersten Versuchsreihe ersichtlich. Naturgemäß weisen die wassergelagerten Proben den höchsten Wassergehalt auf. Es zeigt sich, dass durch das sehr dichte Gefüge der Basis und Faser UHPC-Mischungen nur sehr langsam Wasser aufgenommen wird. Das ist auch der Grund, weshalb die Probekörper BAS\_L250\_W\_1 und FAS\_L250\_W\_1 einen geringeren Wassergehalt aufweisen als die im Klimaschrank gelagerten Probekörper derselben Mischung. Die modifizierten UHPC-Mischungen mit Mikrohohlglaskugeln und Luftporenbildner nehmen im Gegensatz dazu schneller Wasser auf. Dieser Umstand ist sehr gut bei allen Lagerungsbedingungen zu erkennen, da die MHG- und die LPB-Mischungen immer die höchsten Werte aufweisen.



**Abbildung 5.6:** Wassergehalt der Brandplatten der ersten Hauptversuchsreihe



**Abbildung 5.7:** Wassergehalt der Brandplatten der zweiten Hauptversuchsreihe

Die Abbildung 5.7 der zweiten Hauptversuchsreihe zeigt ein ähnliches Bild wie das der ersten Versuchsreihe. Durch die langsame Wasseraufnahme sind die meisten Werte der

mischungsidenten Proben annähernd gleich obwohl die zweite Versuchsreihe durchschnittlich länger den unterschiedlichen Lagerungsbedingungen ausgesetzt war.

## 5.4 Brandversuche

Die Brandversuche wurden, wie im Abschnitt 3.5.2 erläutert, durchgeführt. Die Probekörper wurden zum Prüfungszeitpunkt der jeweiligen Lagerung entnommen und für die Prüfung vorbereitet. Das Betonalter der ersten Versuchsreihe betrug im Durchschnitt 245 Tage. Die zweite Versuchsreihe kam durchschnittlich auf ein Betonalter von 273 Tage. Wie schon erwähnt, wurde während der Brandversuche der Temperaturverlauf im Probekörper aufgezeichnet und die Gewichtsveränderung gemessen. Des Weiteren wurde das abgeplatzte Material aus dem Ofen ausgeleitet und für weitere Untersuchungen aufgefangen und aufbewahrt. Exemplarisch für alle Brandversuche ist eine Temperaturverlaufsaufzeichnung eines Brandversuches in der Abbildung 5.8 dargestellt.

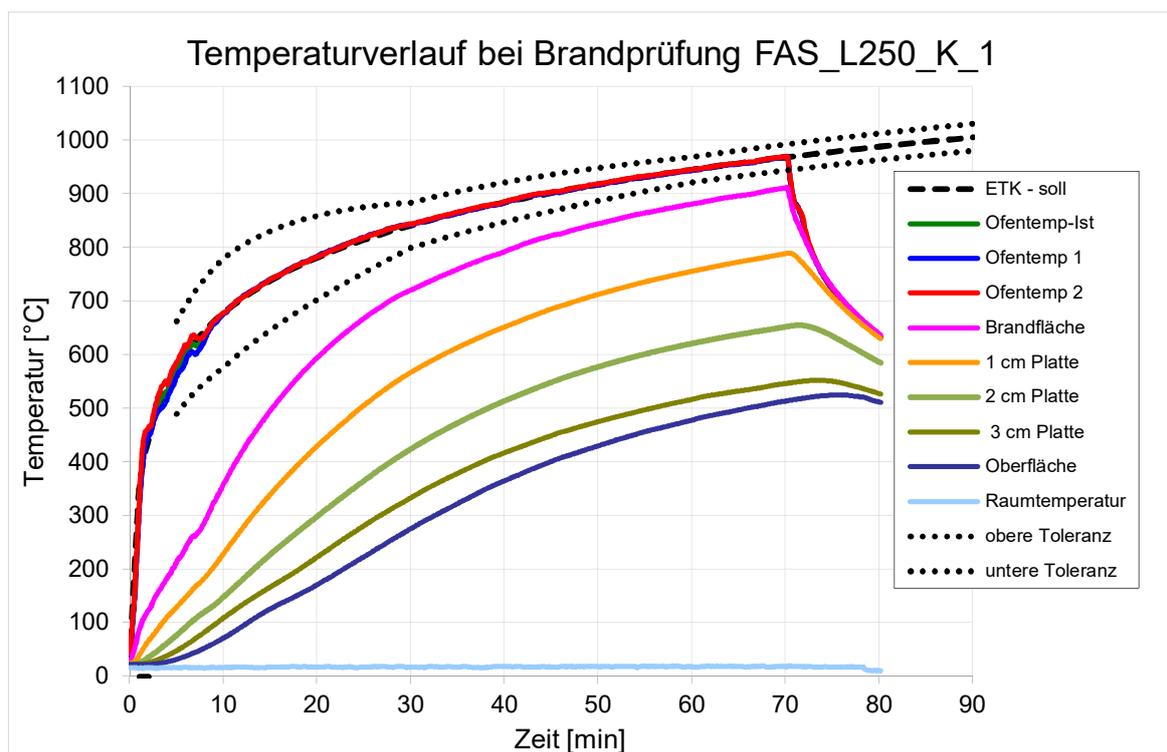


Abbildung 5.8: Tempuraufzeichnung während des Brandversuches der Probe FAS\_L250\_K\_1

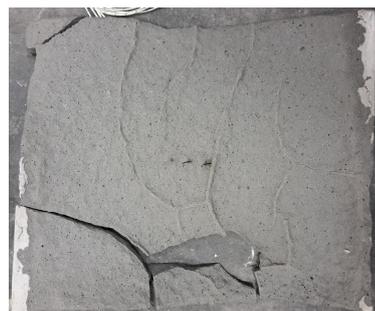
Die Abbildung 5.9 zeigt einen kleinen Auszug der Fotos der Probekörper nach der Brandeinwirkung.



FAS\_W\_1



FAS\_L250\_W\_1



BAS\_W\_1



BAS\_K\_1



MHG\_W\_1



MHG\_K\_1



LPB\_W\_1



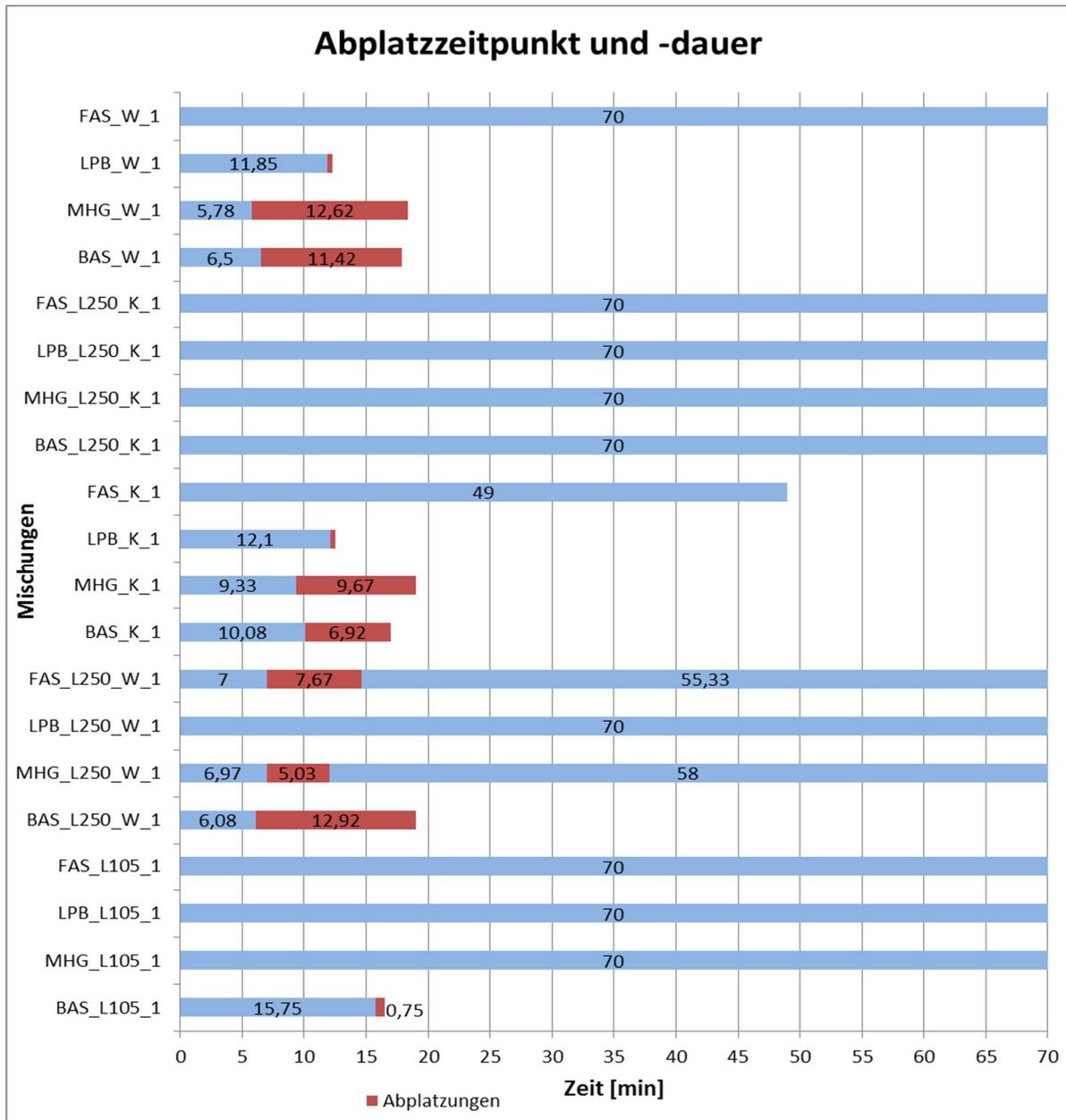
LPB\_K\_1

**Abbildung 5.9:** Fotos der Probekörper nach der Brandeinwirkung

Alle durchgeführten Brandversuche mit ihren protokollierten Vorkommnissen und Ereignissen sowie aller relevanten Daten und Bilder sind im Anhang dargestellt.

### 5.4.1 Abplatzungsbeginn und Abplatzungsdauer

Die Abbildungen 5.10 und 5.11 geben den Abplatzungsbeginn und die Abplatzungsdauer der einzelnen Brandversuche beider Versuchsreihen wieder.

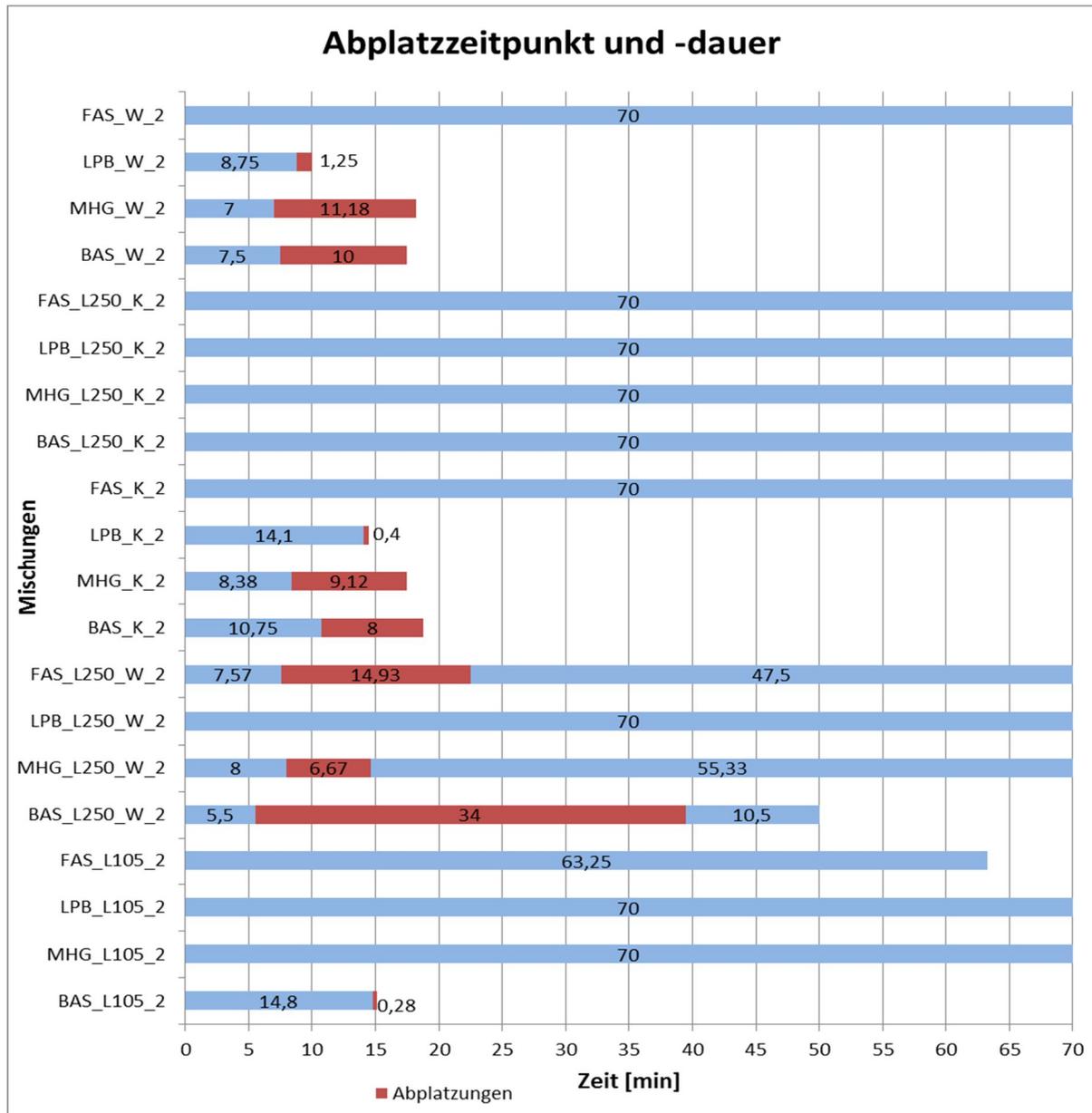


**Abbildung 5.10:** Abplatzungszeitpunkt und Abplatzungsdauer der Brandversuche der ersten Hauptversuchsreihe

In der Abbildung 5.10 ist zu sehen, dass der Abplatzungsbeginn der Wasser gelagerten Proben deutlich früher erfolgt als bei den Proben, die im Klimaschrank gelagert wurden. Vergleicht man die Versuche derselben Lagerung untereinander erkennt man, dass sowohl bei den

wassergelagerten Proben als auch bei denen aus dem Klimaschrank, die LPB-Mischung den spätesten Abplatzungszeitpunkt von allen abgeplatzten Proben zeigt. Es muss aber dabei festgehalten werden, dass der Abplatzungsbeginn so kräftig erfolgte, dass es zu einer sofortigen Zerstörung der Brandprobe kam. Ein ähnliches Phänomen ist beim Probekörper BAS\_L105\_1 zu beobachten. Zwar war der Abplatzungsbeginn viel später als bei den anderen Lagerungsbedingungen dieser Mischung, jedoch war er so enorm, dass er binnen kürzester Zeit zur Zerstörung und folglich zum Versuchsabbruch führte. Die Proben mit der 250°C Heißluftbehandlung und der nachträglichen Lagerung im Klimaschrank wiesen keine Abplatzungen auf. Mit Ausnahmen der bereits erwähnten BAS\_L105\_1 kam es bei den darrgetrockneten (L105) Brandproben ebenfalls zu keinen Abplatzungen. Generell erwiesen sich die mit PP-Fasern versetzten Proben am besten bei der Brandbeständigkeit, da es außer bei der Brandplatte FAS\_L250\_W bei keiner Nachbehandlungs- und Lagerungsvariante zu Abplatzungen kam. Diese Abplatzungen sind nur feine, oberflächliche Schädigungen wie auch die Abplatzmenge in der Abbildung 5.22 bestätigt. Der Versuch mit der Probe FAS\_K\_1 musste früher abgebrochen werden, da das Gas für den Brenner ausgegangen war. Wie jedoch aus der zweiten Versuchsreihe ersichtlich ist, wäre es bis zum gesetzten Versuchsende zu keinen Abplatzungen gekommen.

Grundlegend sind in der Abbildung 5.11 der zweiten Brandversuchsreihe ähnliche Tendenzen wie in der ersten Versuchsreihe zu erkennen. Die Probekörper LPB\_W\_2, LPB\_K\_2 und BAS\_L105\_2 weisen, wie auch von der ersten Versuchsreihe bekannt, eine sehr kurze Abplatzungsdauer auf. Vergleicht man die Abplatzungsdauer der BAS- und MHG-Mischungen mit Wasserlagerung mit denen der Klimalagerung so sieht man, dass die wassergelagerten Proben eine längere Abplatzungsdauer aufweisen als die Brandplatten aus dem Klimaschrank. Einen wesentlichen Unterschied zwischen den Versuchsreihen zeigen nur die Proben BAS\_L250\_W\_1 und BAS\_L250\_W\_2. Bei der Brandplatte der zweiten Versuchsreihe kam es zu keiner Zerstörung des Probekörpers. Der Versuch musste wieder wegen Gasmangels abgebrochen werden. Der Unterschied erklärt sich daraus, dass es bei der Brandplatte BAS\_L250\_W\_1 zu einer seitlichen Zerstörung kam und der Versuch früh abgebrochen werden musste.

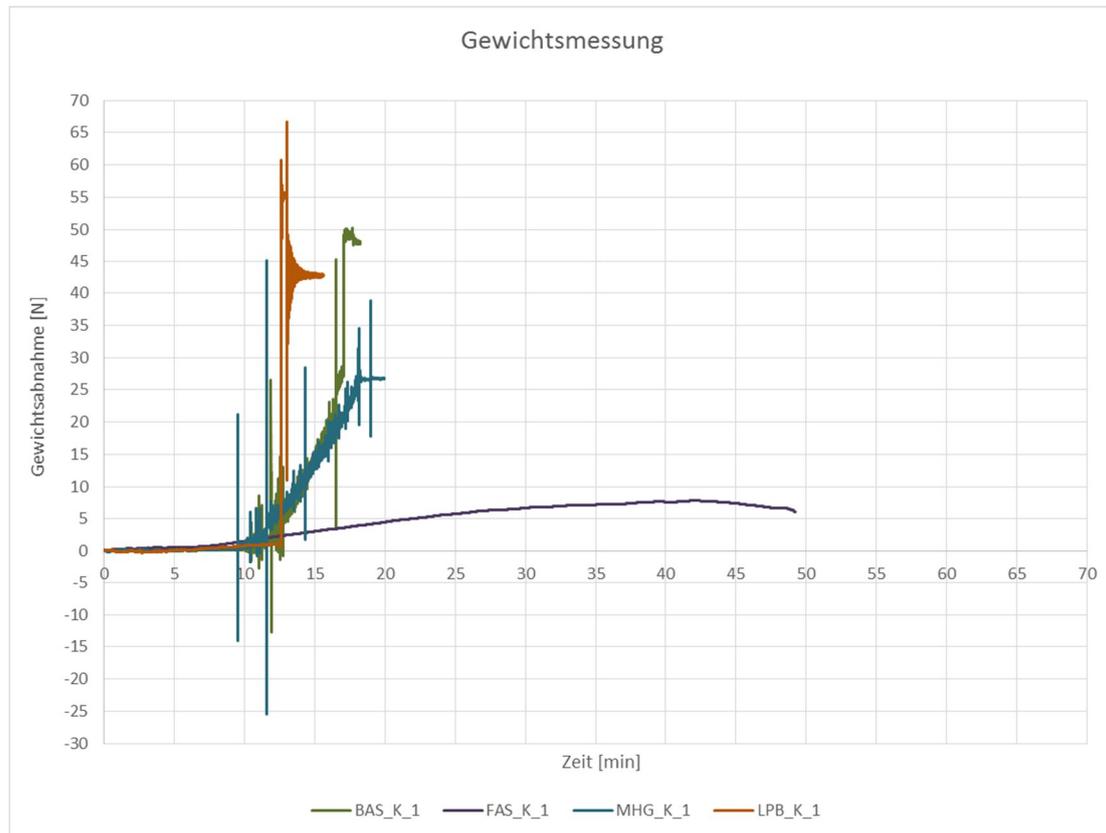


**Abbildung 5.11:** Abplatzzeitpunkt und Abplatzdauer der Brandversuche der zweiten Hauptversuchsreihe

#### 5.4.2 Gewichtsverläufe während der Brandprüfung

Wie schon im Abschnitt 3.5.2 erwähnt, wurden während der Brandversuche die Gewichtsveränderungen der einzelnen Probekörper aufgezeichnet. In den nachfolgenden Abbildungen 5.12 bis 5.21 sind die aufgezeichneten Gewichtsverläufe beider Versuchsreihen aufbereitet und nach den Lagerungsbedingungen geordnet dargestellt. Die Gewichtsverläufe, vor allem die der nicht abgeplatzten Probekörper, sind nur qualitative Aufzeichnungen, das heißt, die aufgezeichneten Werte können nicht mit den Gewichtsmessungen nach dem

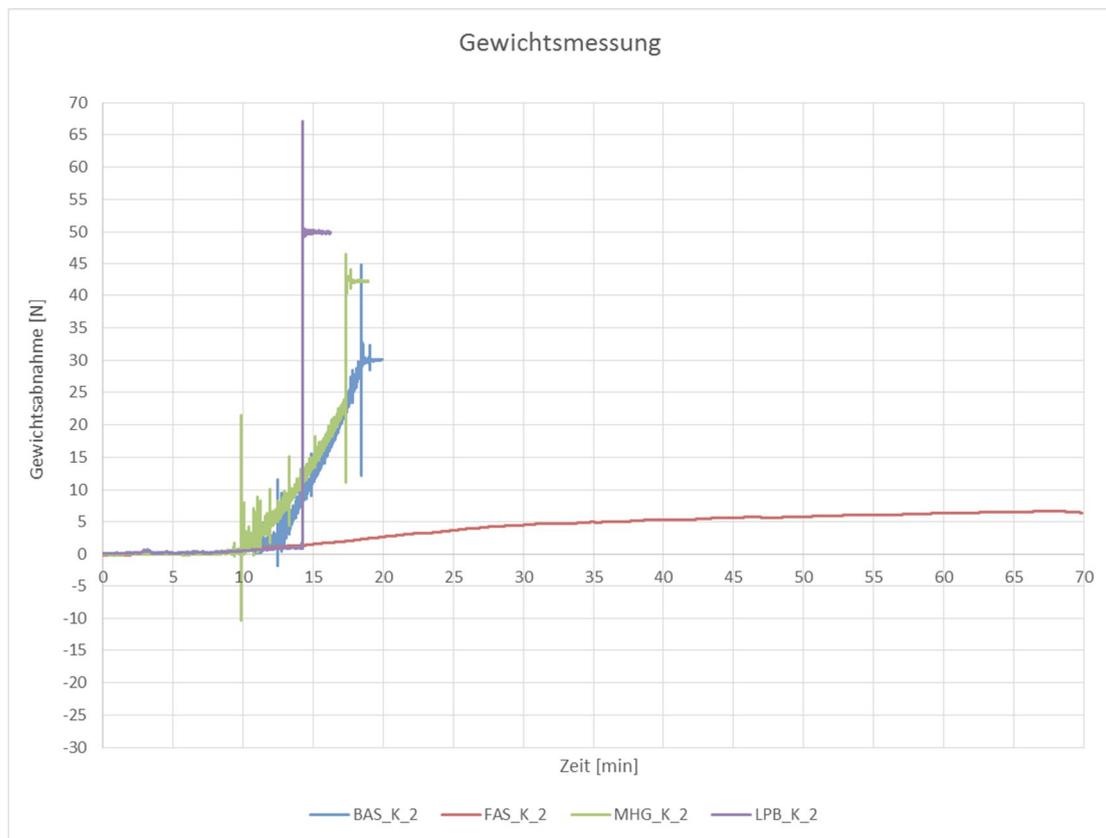
Versuch verglichen werden. Grund dafür ist der im Ofen herrschende, von der Temperatur abhängige Auftrieb, der die Werte verfälscht. Auf eine Glättung der Kurven der Abgeplatzten Proben wurde bewusst verzichtet, da man aus den Aufzeichnungen sehr gut den Abplatzbeginn und einzelne intensivere Abplatzungen erkennen kann.



**Abbildung 5.12:** Gewichtsverläufe der im Klimaraum gelagerten Brandplatten der ersten Versuchsreihe

Die Abbildung 5.12 zeigt die aufgezeichneten Gewichtsmessungen der ersten Versuchsreihe der im Klimaraum gelagerten Probekörper. Es sind deutlich die unterschiedlichen Abplatzzeitpunkte der verschiedenen Mischungen zu erkennen. Die Basis- und die Mikrohohlglaskugel-Mischung platzten wesentlich früher ab als die Mischung mit Luftporenbildner. Der UHPC mit PP-Fasern platzte im Gegensatz dazu gar nicht ab. Die genauen Abplatzzeitpunkte sind in der Abbildung 5.10 nochmals herausgearbeitet. Neben dem Abplatzzeitpunkt veranschaulicht die Abbildung 5.12 die Intensität der Abplatzungen. Die Proben MHG\_K\_1 und BAS\_K\_1 platzten mit ähnlicher Intensität ab. Neben einem kontinuierlichen Abplatzen gab es immer wieder lautere und intensivere einzelne Abplatzungen, die in der Abbildung als einzelne Spitzen erkennbar sind. Im Gegensatz dazu

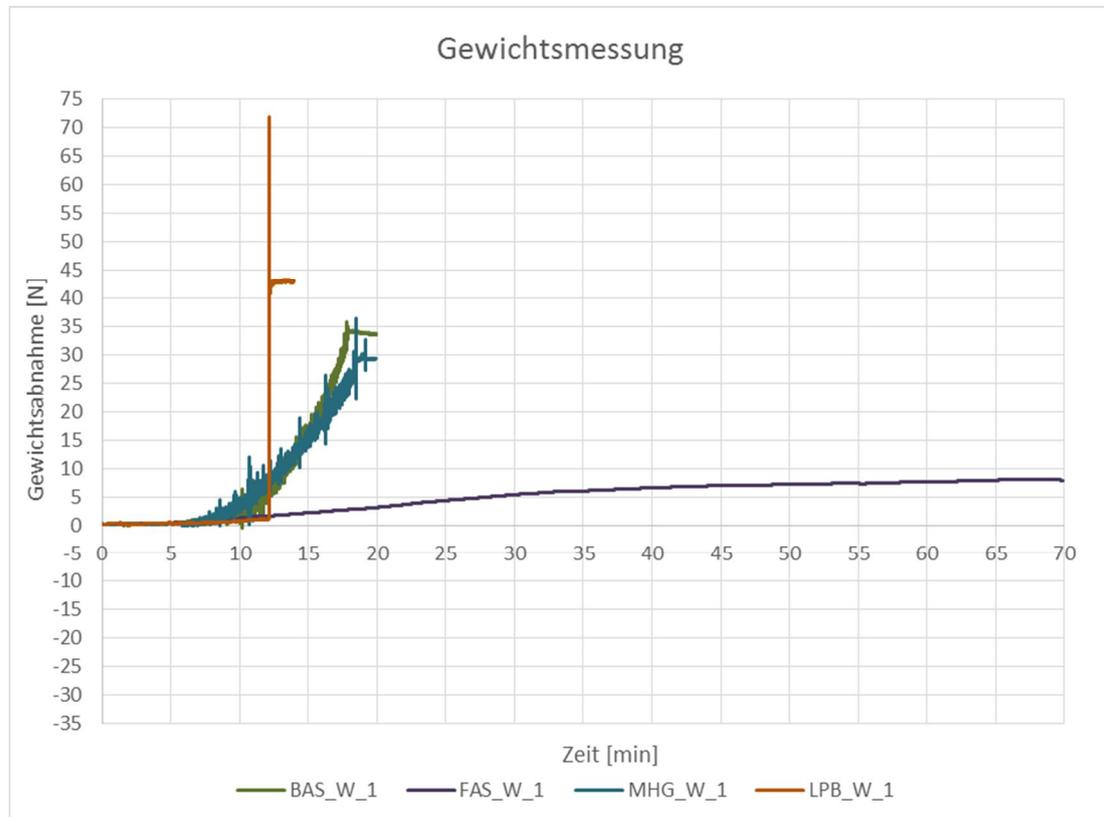
kam es bei dem Probekörper LPB\_K\_1 zu einer plötzlichen sehr intensiven Explosion, die zur sofortigen Zerstörung der Brandplatte und damit zu einem Versuchsabbruch führte.



**Abbildung 5.13:** Gewichtsverläufe der im Klimaraum gelagerten Brandplatten der zweiten Versuchsreihe

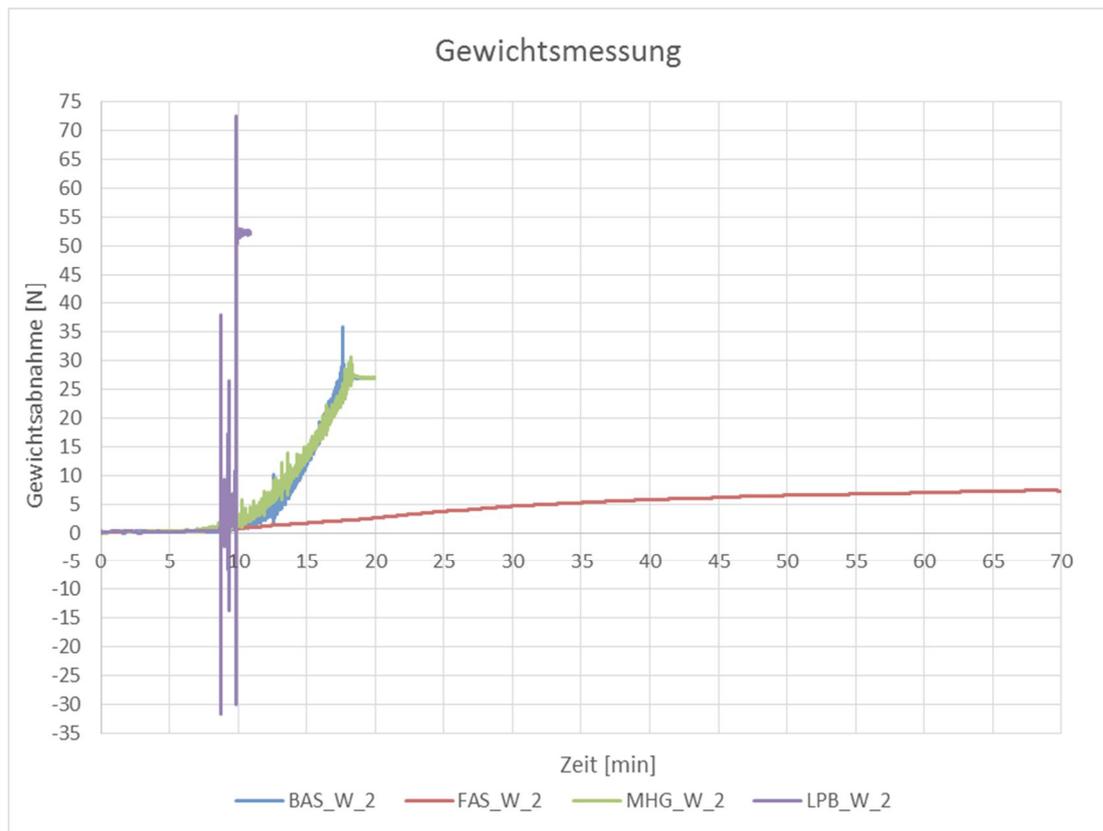
Die zweite Versuchsreihe der im Klimaschrank gelagerten Brandplatten (Abbildung 5.13) zeigt ein identisches Bild wie die erste Versuchsreihe und bestätigt damit die Ergebnisse. Die Mischung mit PP-Fasern platzte bis zum geplanten Versuchsende nicht ab. Die MHG\_K- und die BAS\_K-Probekörper platzten deutlich früher ab als die LPB\_K-Brandplatten. Wie auch schon in der ersten Versuchsreihe kam es beim Probekörper mit Luftporenbildner zu einer plötzlichen intensiven Abplatzung, die zur Zerstörung der Brandplatte führte.

In den Abbildungen 5.14 und 5.15 sind die Gewichtsverläufe der unter Wasser gelagerten Brandplatten beider Versuchsreihen dargestellt. Bei dieser Lagerungsart sind wie auch schon bei der Klimaschranklagerung sämtliche UHPC-Mischungen mit Ausnahme der Mischung mit PP-Fasern abgeplatzt.



**Abbildung 5.14:** Gewichtsverläufe der unter Wasser gelagerten Brandplatten der ersten Versuchsreihe

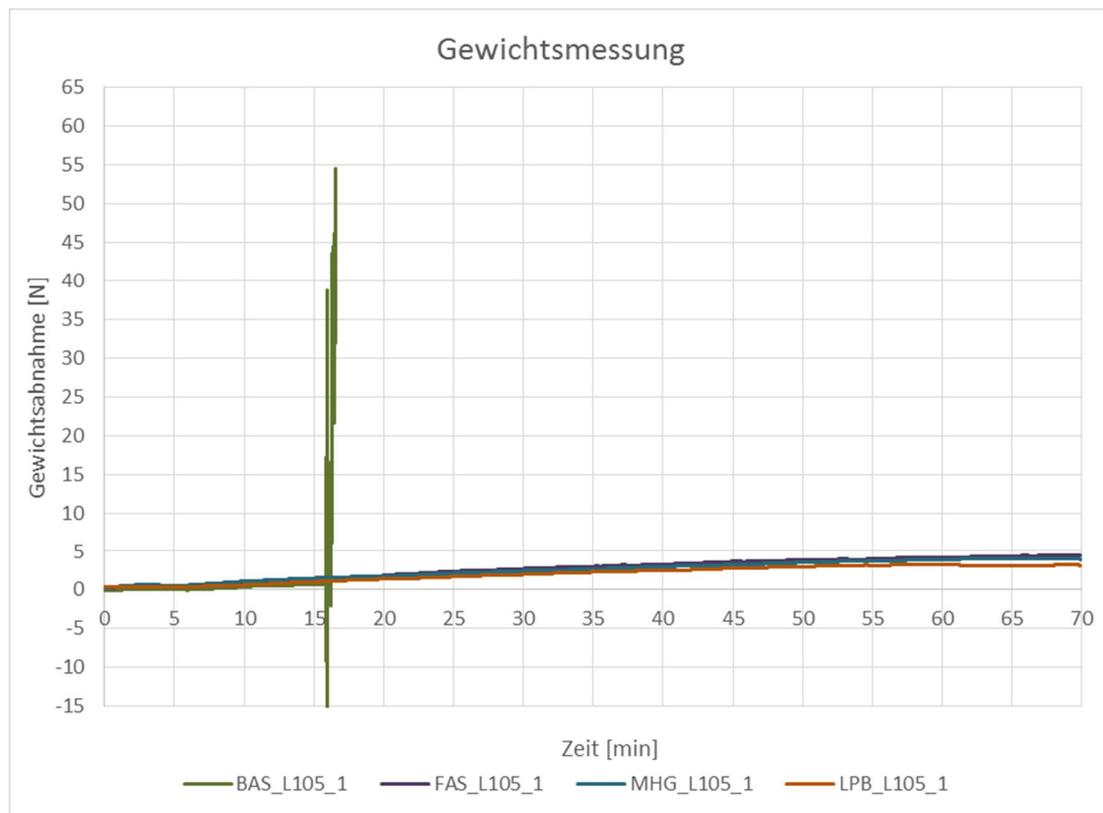
Der Gewichtsmessung der Abbildung 5.14 ist zu entnehmen, dass die Probekörper MHG\_W\_1 und BAS\_W\_1 bedeutend früher begannen abzuplatzen als die Brandplatte LPB\_W\_1. Bei dieser Probe kam es wieder zu einer sehr großen Explosion, die die sofortige Zerstörung des Probekörpers nach sich zog. Im Gegensatz dazu begannen die anderen beiden Mischungen mit geringerer Intensität, die sich mit fortlaufender Versuchsdauer steigerte, abzuplatzen. Im Vergleich zu den im Klimaschrank gelagerten Proben war die Intensität jedoch geringer (vgl. Abbildung 5.12). Auffallend ist, dass die Kurve der Gewichtsmessung der Probe BAS\_W\_1 gegen Ende des Versuchs steiler verläuft als die der Mikrohohlglaskugel-Mischung. Das heißt die Abplatzungen trugen bei diesem Probekörper mehr Material ab, da die Probe schneller leichter wurde.



**Abbildung 5.15:** Gewichtsverläufe der unter Wasser gelagerten Brandplatten der zweiten Versuchsreihe

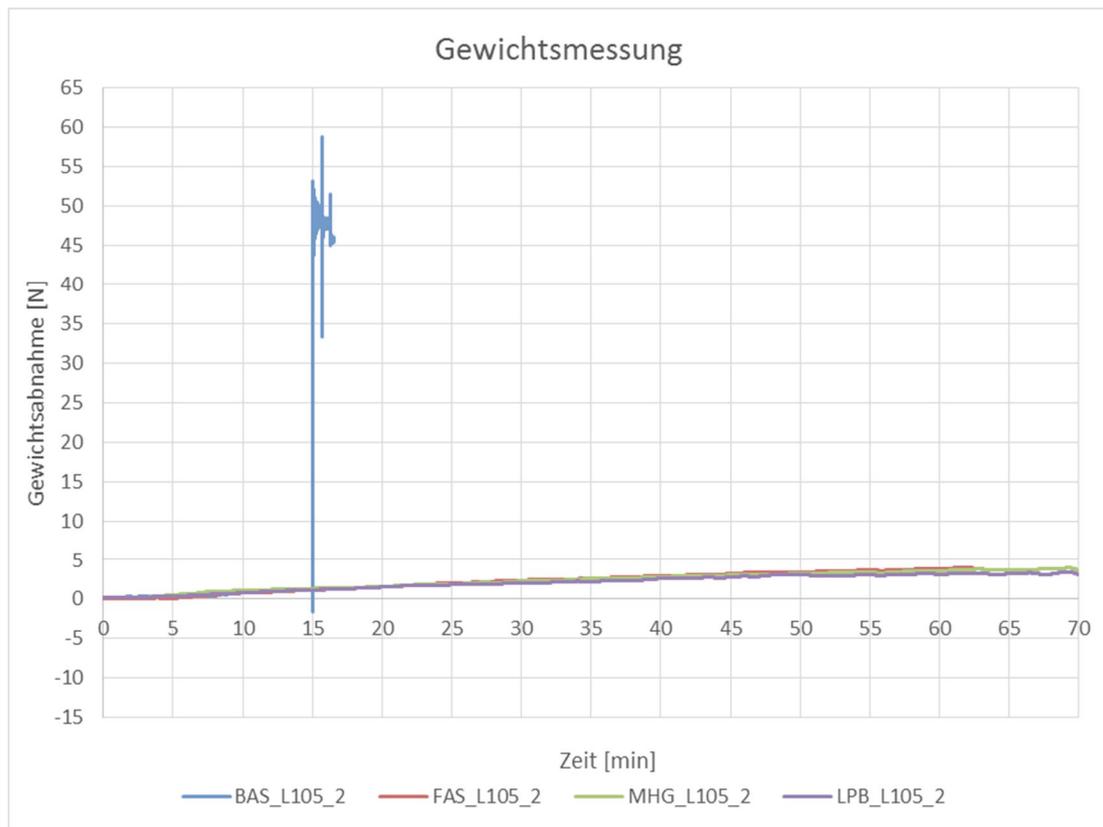
Die Abbildung 5.15 der zweiten Versuchsreihe der unter Wasser gelagerten Probekörper zeigt eine identische Darstellung zu der Abbildung 5.14. Die Ausnahme stellt die Brandplatte LPB\_W\_2 dar. Im Unterschied zur ersten Versuchsreihe, erfolgte die Zerstörung des Probekörpers nicht schlagartig mit einer großen Explosion. Diese Probe begann sehr intensiv mit hoher Intensität abzuplatzen, bevor der Probekörper zerstört wurde. Darüber hinaus fingen die Abplatzungen bei dieser Probe deutlich früher an als bei der ersten Versuchsreihe.

Die Abbildung 5.16 und die Abbildung 5.17 zeigen von beiden Versuchsreihen die Gewichtsmessungen der bei 105°C Heißluft gelagerten Proben.



**Abbildung 5.16:** Gewichtsverläufe der bei 105°C gelagerten Brandplatten der ersten Versuchsreihe

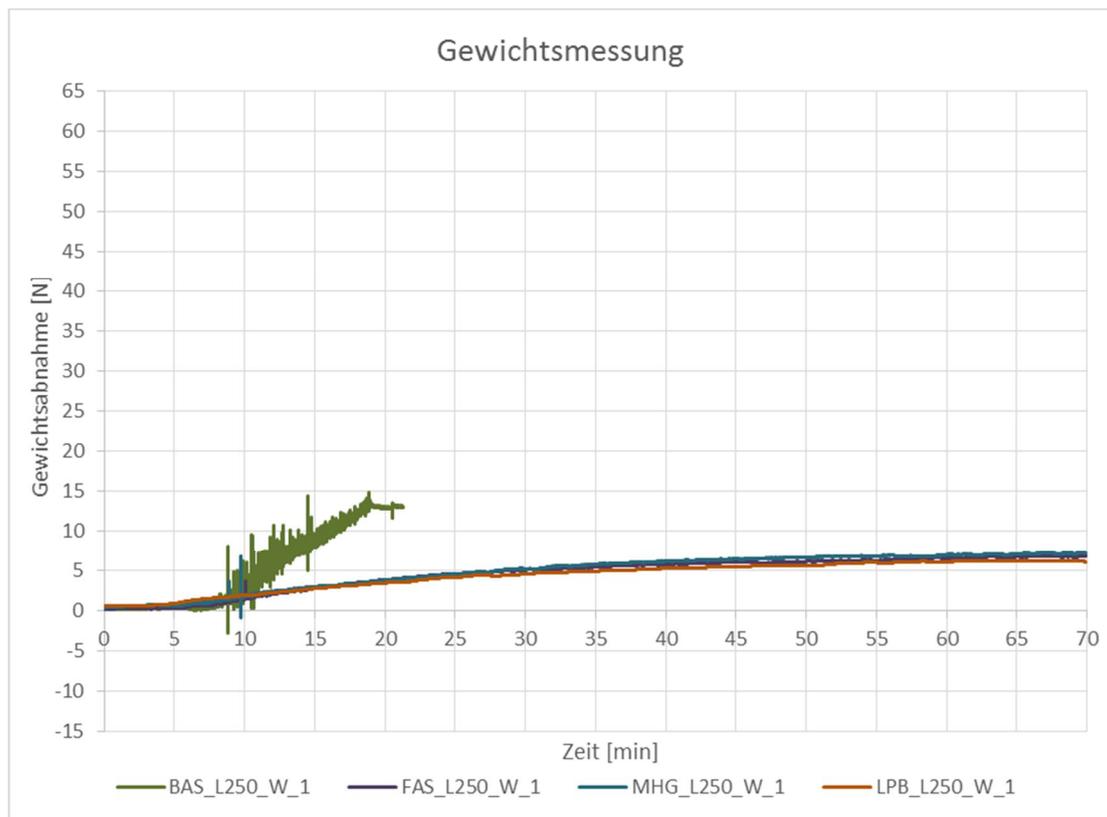
Aus der Abbildung 5.16 ist ersichtlich, dass bei dieser Lagerungsbedingung nur der Probekörper BAS\_L105\_1 abplatzte. Vergleicht man diese Mischung mit den anderen Lagerungsbedingungen ist ersichtlich, dass die Abplatzungen deutlich später begannen (vgl. Abbildung 5.10). Des Weiteren traten die Abplatzungen mit hoher Intensität auf und führten, im Unterschied zu den anderen Lagerungsbedingungen dieser Mischung, sehr schnell zum Versagen des Probekörpers. Vergleicht man die Messkurven der drei restlichen Mischungen mit den Kurven der nicht abgeplatzten Probekörper der anderen Lagerungsbedingungen erkennt man, dass die Messkurven der 105°C Lagerung flacher verlaufen und der Maximalwert bei Versuchsende niedriger ist. Das liegt daran, dass sich durch die 105°C Lagerung quasi kein freies Wasser im Probekörper befindet (Wassergehalt= 0%).



**Abbildung 5.17:** Gewichtsverläufe der bei 105°C gelagerten Brandplatten der zweiten Versuchsreihe

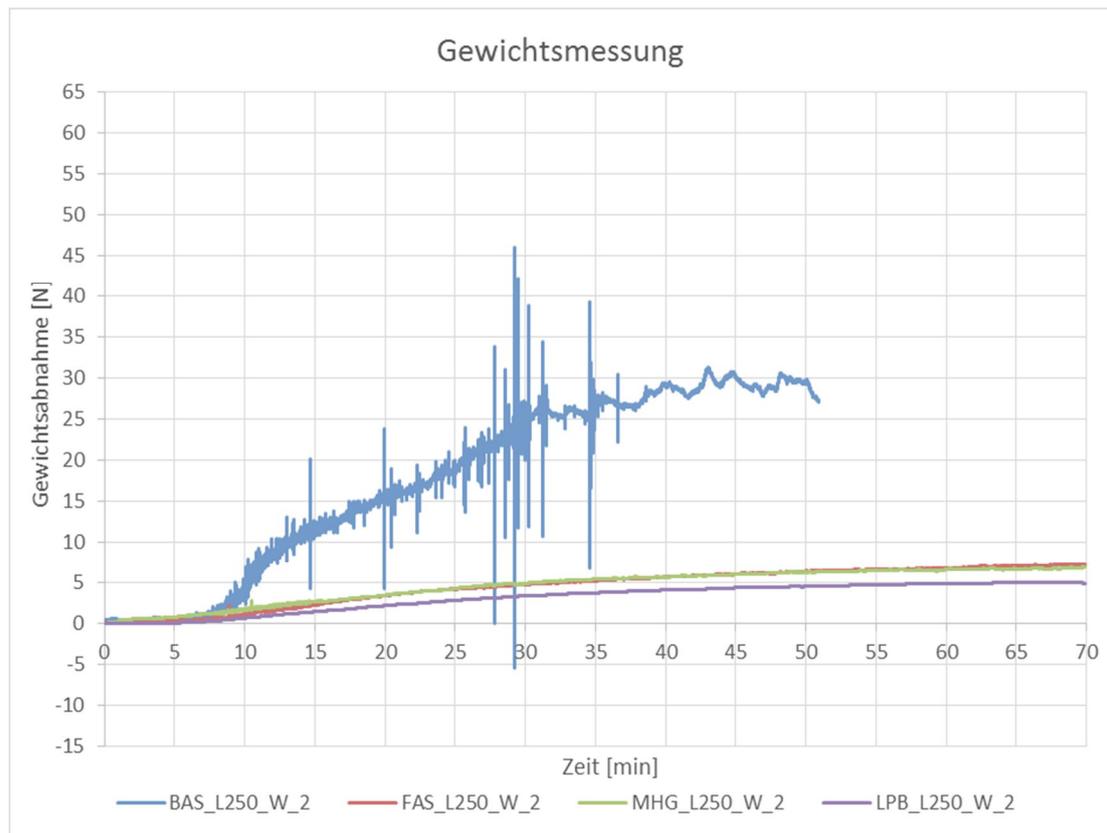
Die zweite Versuchsreihe der 105°C Heißluft gelagerten Proben zeigte ein beinahe identisches Bild. Der Abbildung 5.17 ist zu entnehmen, dass auch bei dieser Versuchsreihe nur die Basis-Mischung abplatzte. Wie auch schon zuvor, war auch hier der Abplatzzeitpunkt gegenüber den anderen Lagerungsbedingungen nach hinten verschoben und die Abplatzintensität sehr hoch. Die Zerstörung des Probekörpers erfolgte fast schlagartig. Auch die Messkurven der drei nicht abgeplatzten Porbekörper verhielten sich gleich wie bei der ersten Prüfungsreihe.

In den Abbildungen 5.18 und 5.19 sind die Gewichtsverläufe der Brandplatten, die einer 250°C Heißluftbehandlung mit nachträglicher Unterwasserlagerung unterzogen wurden dargestellt.



**Abbildung 5.18:** Gewichtsverläufe der 250°C heißluftbehandelten und nachträglich unter Wasser gelagerten Brandplatten der ersten Versuchsreihe

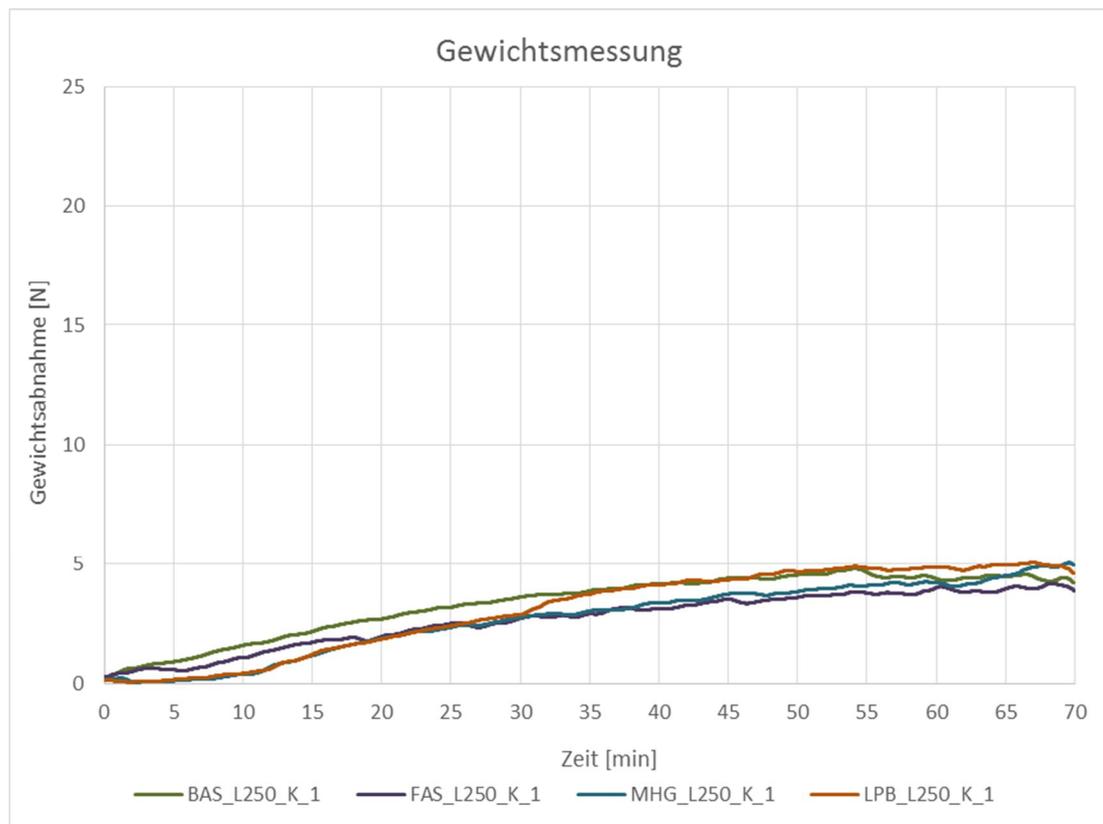
Der Gewichtsmessung der 250°C heißluftbehandelten, wassergelagerten Probekörper (Abbildung 5.18) ist zu entnehmen, dass die Brandplatten BAS\_L250\_W\_1, FAS\_L250\_W\_1 und MHG\_L250\_W\_1 zum Abplatzen neigten. Die Intensität der Abplatzungen war bei der Basis-Mischung gegenüber den anderen beiden Mischungen weit höher. Im Unterschied zum Basisprobekörper, bei dem der Versuch vorzeitig abgebrochen werden musste, hörten die Abplatzungen bei der Mikrohohlkugelmischung und bei der Mischung mit PP-Fasern wieder auf und der Versuch konnte ohne größere Vorkommnisse zu Ende gebracht werden. Wie aus Abbildung 5.22 ersichtlich sind es nur feine oberflächliche Abplatzungen in sehr geringem Ausmaß.



**Abbildung 5.19:** Gewichtsverläufe der 250°C heißluftbehandelten und nachträglich unter Wasser gelagerten Brandplatten der zweiten Versuchsreihe

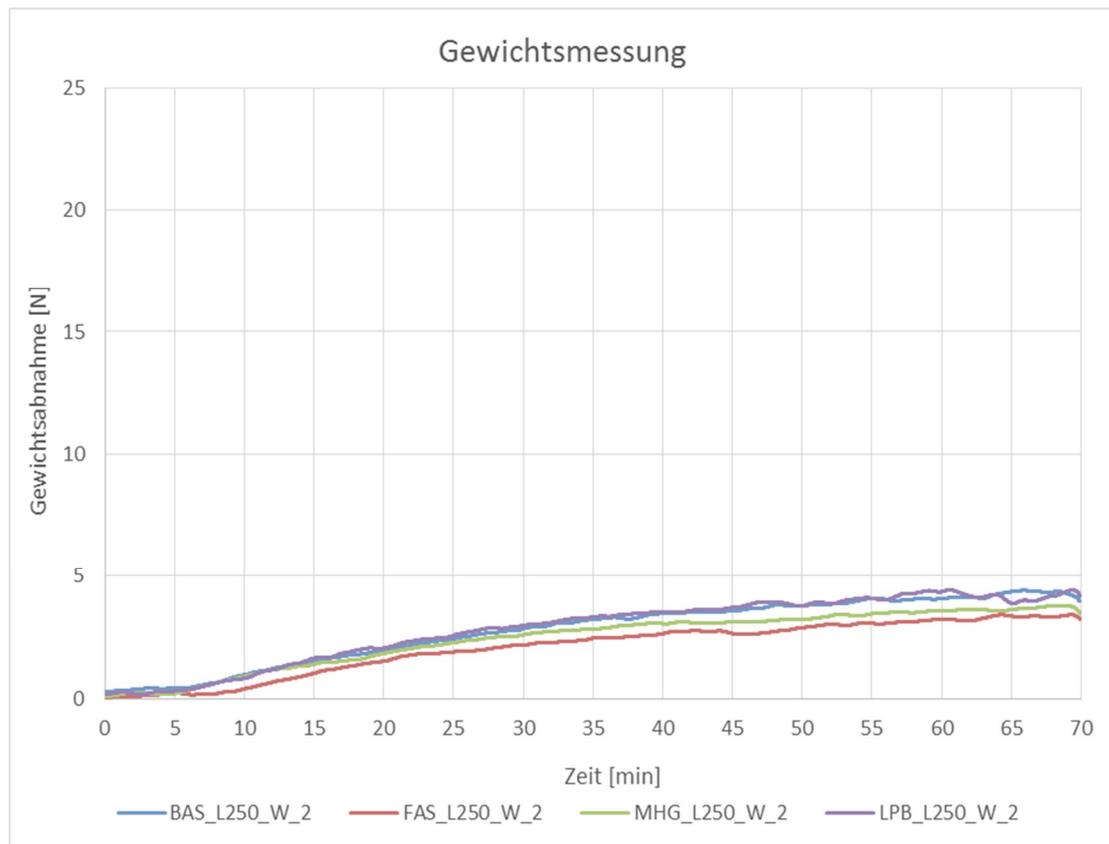
Die Abbildung 5.19 zeigt ein ähnliches Bild wie die gemessenen Verläufe der ersten Versuchsreihe. Auch hier gab es keine Abplatzungen bei der mit Luftporen versetzten UHPC-Mischung. Die Abplatzungen der mit PP-Fasern versetzten Mischung und der Mikrohohlglaskugelmischung verliefen mit ähnlicher Intensität und hörten nach einer Zeit auch wieder auf. Große Unterschiede gab es bei der Gewichtsauzeichnung der Basismischung zu der ersten Prüfungsreihe. Die Abplatzungen waren von der Intensität her ähnlich, jedoch führten sie nicht, wie beim ersten Versuch, zum Versagen der Probe und damit zum Versuchsabbruch, sondern hörten nach zirka 34 Minuten auf und der Versuch konnte ohne weitere Vorkommnisse fortgesetzt werden. Dass der Versuch aus Gründen von Gasmangel nicht über die volle Zeit durchgeführt werden konnte, wurde schon eingangs erwähnt.

Die Abbildungen 5.20 und 5.21 zeigen von beiden Versuchsreihen die Gewichtsmessungen der bei 250°C heißluftbehandelten Probekörper mit darauffolgender Lagerung im Klimaschrank.



**Abbildung 5.20:** Gewichtsverläufe der 250°C Heißluftbehandelten und nachträglich im Klimaschrank gelagerten Brandplatten der ersten Versuchsreihe

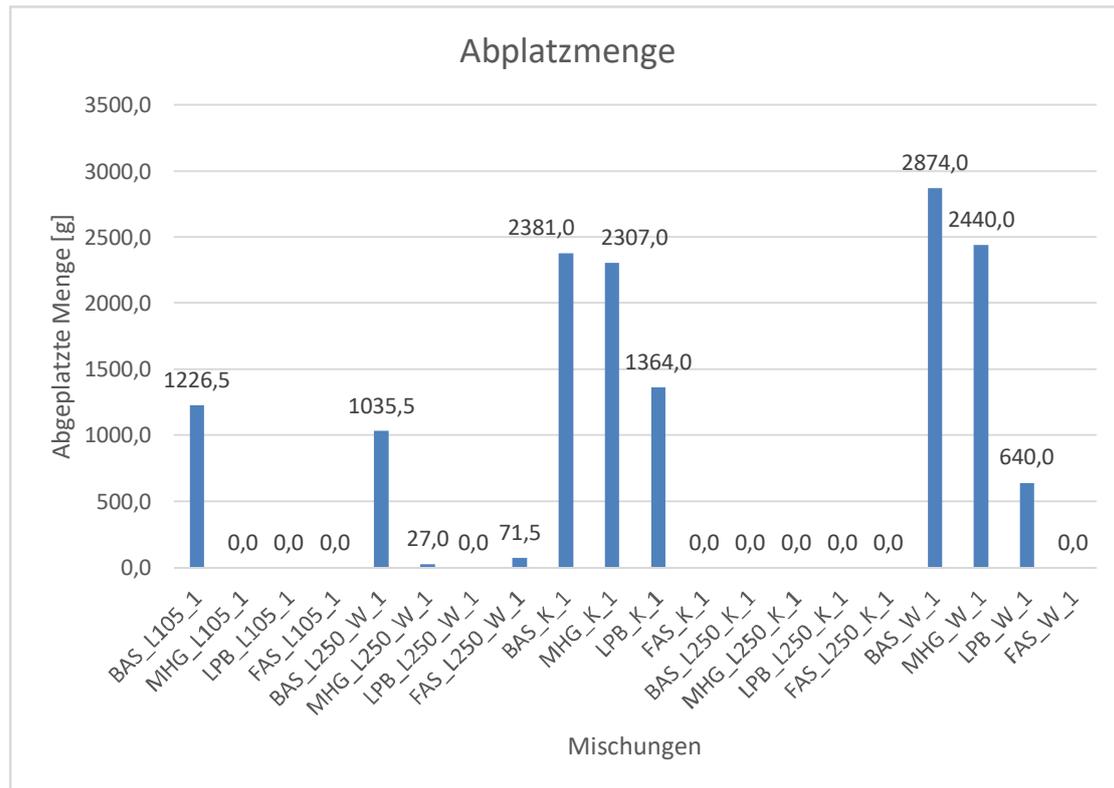
Beide Diagramme (Abbildung 5.20 und Abbildung 5.21) zeigen einen identischen Messverlauf der unterschiedlichen UHPC Mischungen. Die Kurven der Gewichtsmessungen verlaufen relativ flach. Sie sind ähnlich denen der nicht abgeplatzten Mischungen der 105°C Lagerung. Das ist unter anderem auf den niedrigen Wassergehalt dieser Proben zurückzuführen. Vergleicht man den Wassergehalt der Proben der 105°C Lagerung mit den Brandplatten der 250°C Heißluftbehandlung mit nachträglicher Lagerung im Klimaschrank erkennt man, dass es nur geringe Unterschiede gab. Der Wassergehalt der L250\_K Proben lag zwischen 0,3 % und 1,10 %. Die der 105°C Lagerung lag naturgemäß bei 0 %.



**Abbildung 5.21:** Gewichtsverläufe der 250°C heißluftbehandelten und nachträglich im Klimaschrank gelagerten Brandplatten der zweiten Versuchsreihe

### 5.4.3 Abplatzmenge

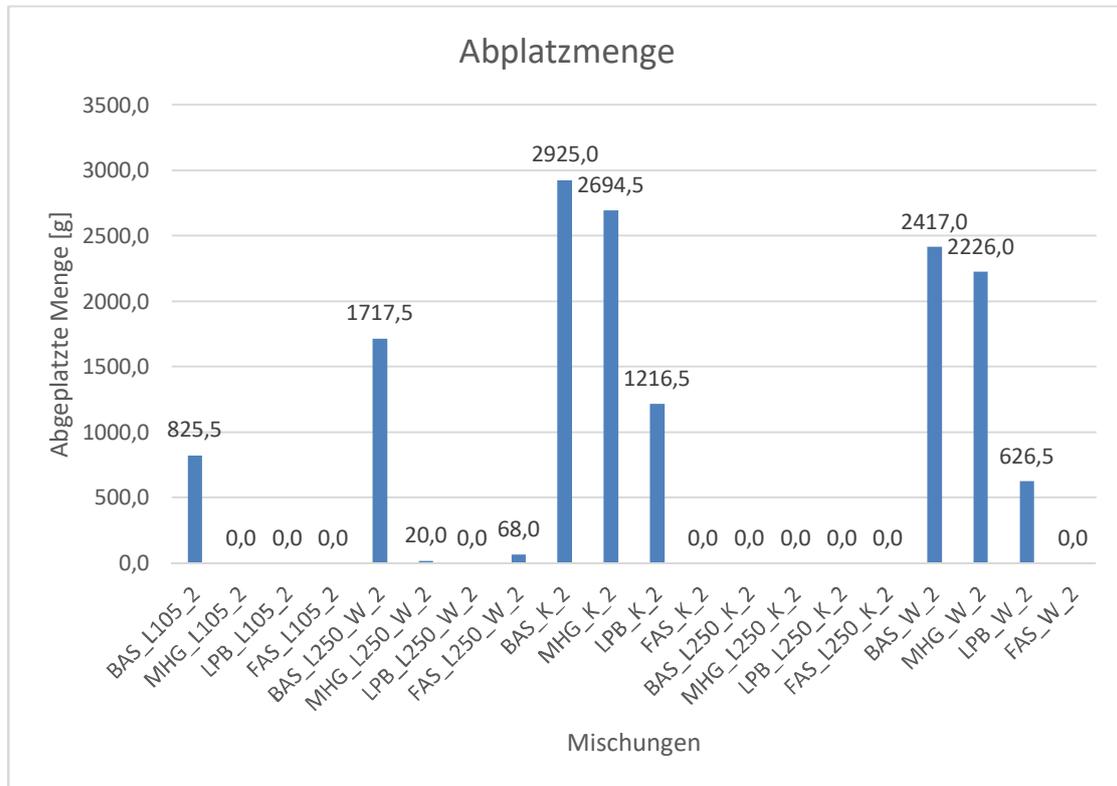
Die Abbildung 5.22 und die Abbildung 5.23 stellen die abgeplatzte Menge für beide Versuchsreihen dar. Bei dieser Massenangabe handelt es sich rein um das Gewicht des Materials das während des Brandversuchs abgeplatzt ist. Große Bruchstücke, wie sie bei der vollständigen Zerstörung des Probekörpers vorkamen, sind bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt worden.



**Abbildung 5.22:** Abgeplatzte Menge der ersten Hauptversuchsreihe

Die Abbildung 5.22 zeigt das Gewicht der Betonabplatzungen jedes Probekörpers der ersten Hauptversuchsreihe. Es zeigt sich deutlich, dass bei der Basis-Mischung bei allen Lagerungsbedingungen die höchsten Abplatzmengen auftreten. Ebenfalls hohe Abplatzmengen wurden von der MHG-Mischung produziert. Auffällig ist, dass sich bei den unbehandelten Brandplatten, sei es die Normklimalagerung oder die Wasserlagerung, die höchsten Mengen an Betonabplatzungen messen lassen. Das ist auf die ausgeprägte Abplatzungsdauer zurückzuführen (vgl. Abbildung 5.10). Im Gegensatz dazu weisen die Brandplatten BAS\_L105\_1, LPB\_K\_1 und LPB\_W\_1 eine sehr kurze Abplatzungszeit auf. Der Probekörper BAS\_L250\_W\_1 weist zwar eine längere Dauer der Abplatzungen auf jedoch mit

geringerer Intensität als die unbehandelten Brandplatten. Die Probekörper MHG\_L250\_W\_1 und FAS\_L250\_W\_1 weisen nur äußerst geringe Abplatzmengen auf. An diesen Brandplatten waren nach dem Versuch nur kleine oberflächliche Abplatzungen zu erkennen. Die Bilder aller Brandproben sind dem Anhang beigefügt.

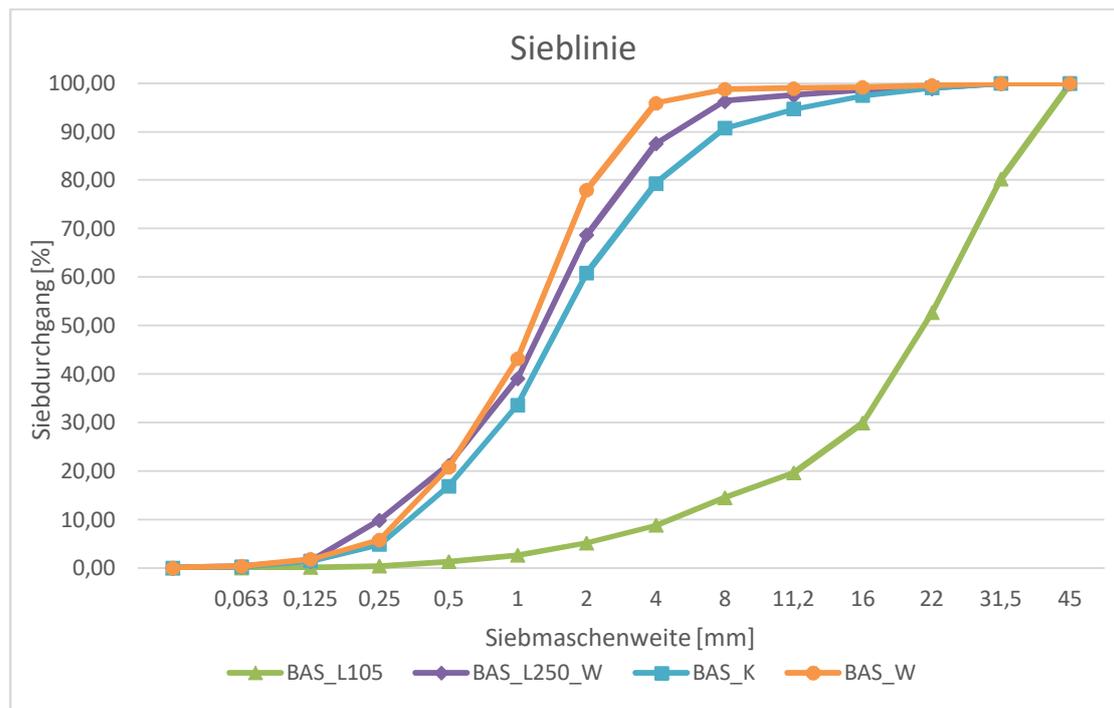


**Abbildung 5.23:** Abplatzte Menge der zweiten Hauptversuchsreihe

Die Abbildung 5.23 der zweiten Versuchsreihe zeigt ähnliche Tendenzen wie die erste. Es zeigen sich wieder die größten Abplatzmengen jeder Mischung bei den unbehandelten Proben der Klima- und Wasserlagerung. Im Unterschied zur ersten Versuchsreihe weisen dieses Mal die im Klimaschrank gelagerten Brandplatten die größten Mengen an Betonabplatzungen auf. Vergleicht man die Proben BAS\_L250\_W beider Versuchsreihen miteinander fällt auf, dass der Probekörper der zweiten Hauptversuchsreihe eine signifikant höhere Abplatzmenge aufweist. Das ist auf die längere Versuchsdauer zurückzuführen. Wie schon erwähnt, wurde der Versuch bei der ersten Versuchsreihe vorzeitig abgebrochen (Abschnitt 5.4.1).

#### 5.4.4 Sieblinie des abgeplatzten Materials

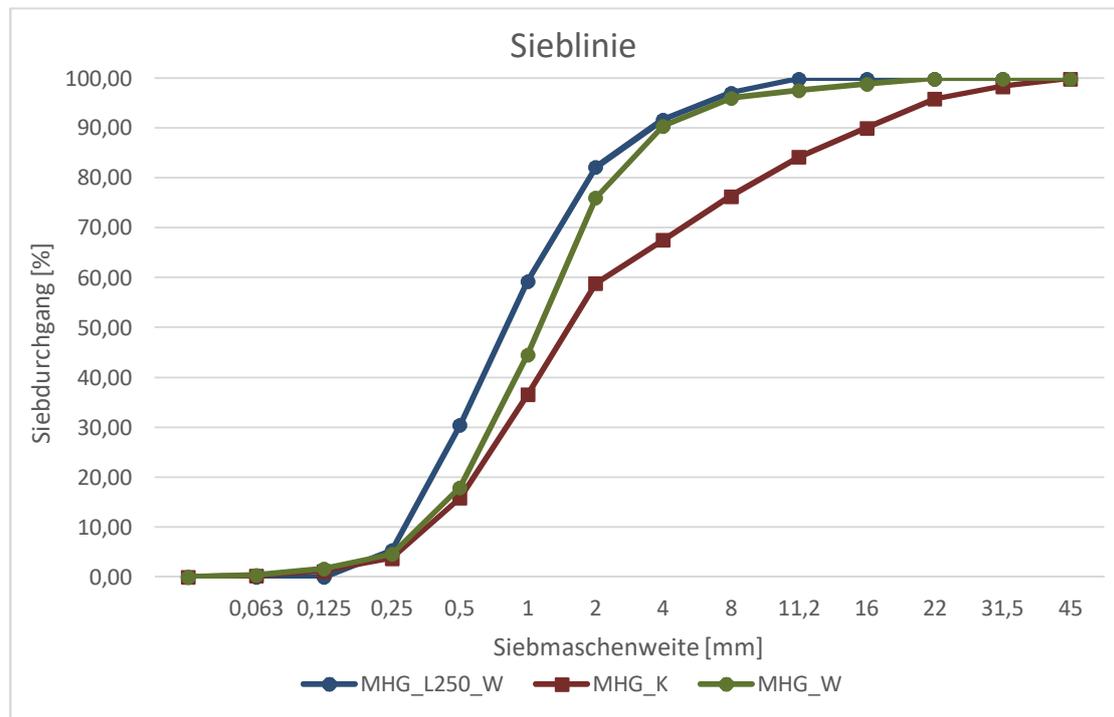
Die detaillierte Beschreibung des Versuchaufbaus und der -durchführung ist dem Abschnitt 3.6 zu entnehmen. Wie schon erwähnt, diente dieser Versuch um das Abgeplatzte Material zu analysieren. Die in den Abbildungen 5.24 bis Abbildung 5.27 dargestellten Ergebnisse sind aus dem Mittelwert der zwei Versuche gewonnen worden.



**Abbildung 5.24:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Basis-Mischungen

Die Abbildung 5.24 zeigt die Sieblinien der Materialabplatzungen aller Brandplatten der Basis-Mischung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Sieblinie der unter Wasser gelagerten Proben ohne Nachbehandlung zwischen den Siebmaschenweiten 0,25 mm und 4 mm steiler anstieg als die der Probekörper aus dem Klimaschrank. Darüber hinaus weisen die Proben BAS\_W bei der Siebmaschenweite einen Siebdurchgang von 96 % auf im Gegensatz zu den 80 % von BAS\_K. Das heißt, die unter Wasser gelagerten Brandplatten ohne Nachbehandlung platzten feiner ab als die unter Normklima gelagerten. Die Sieblinie der unter Wasser gelagerten Proben mit 250°C Heißluftbehandlung liegt zwischen den Sieblinien von BAS\_W und BAS\_K. Besonders deutlich ist der Unterschied zu den bei 105°C getrockneten Proben zu sehen. Der Siebdurchgang beim 4 mm Sieb ist gerade einmal 9 %. 70 % des abgeplatzten Materials ist größer als 16 mm. Das heißt, im Gegensatz zu den anderen Nachbehandlungs- und

Lagerungsbedingungen bewirkt die Brandeinwirkung bei den Probekörpern der 105°C Lagerung viel größere Betonabplatzungen.

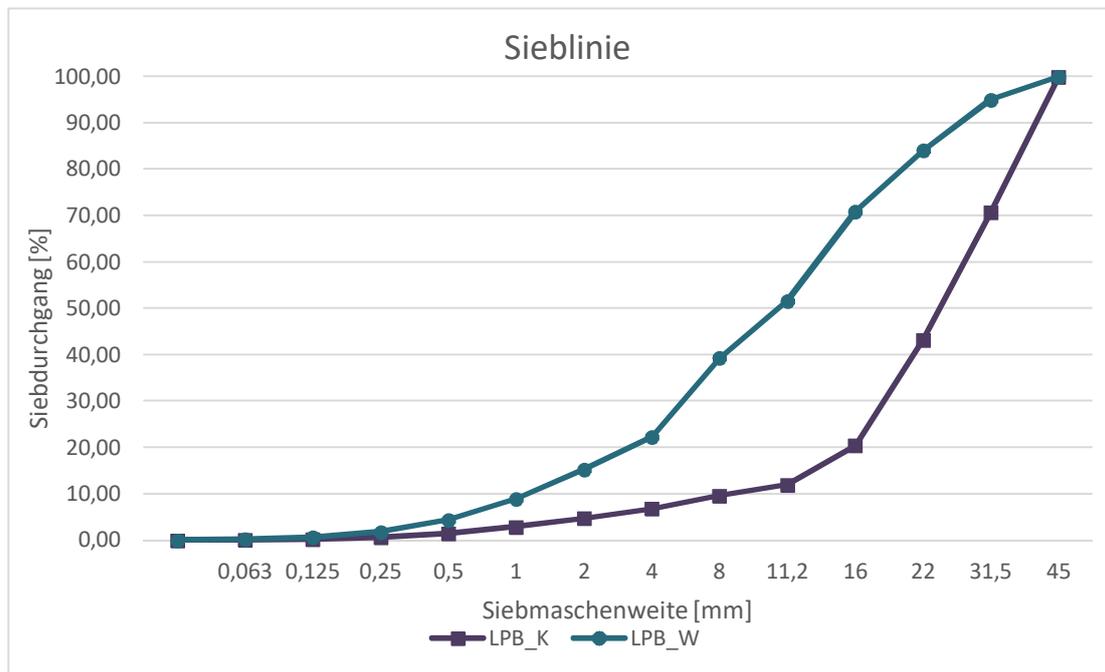


**Abbildung 5.25:** Sieblinie des Abgeplatzten Materials der Mikrohohlglaskugel-Mischungen

Die in der Abbildung 5.25 dargestellten Sieblinien der MHG-Mischungen zeigen ein ähnliches Bild wie die der Basis-Mischungen. Auch bei dieser Mischung ist das abgeplatzte Material der unter Wasser gelagerten Probekörper ohne Nachbehandlung deutlich feiner als das der unter Normklima gelagerten Brandplatten. Das ist deutlich am Siebdurchgang des 4 mm Siebes zu erkennen, der bei den MHG\_W Proben bei über 90 % liegt. Im Gegensatz dazu sind über 30 % des abgeplatzten Materials der im Klimaschrank gelagerten Proben größer als 4 mm. Die Sieblinie MHG\_L250 ist nicht sehr aussagekräftig, da wie in den Abbildungen 5.22 und 5.23 gezeigt wird die abgeplatzte Menge der Proben äußerst gering war. Sie ist nur vollständigheitshalber angeführt.

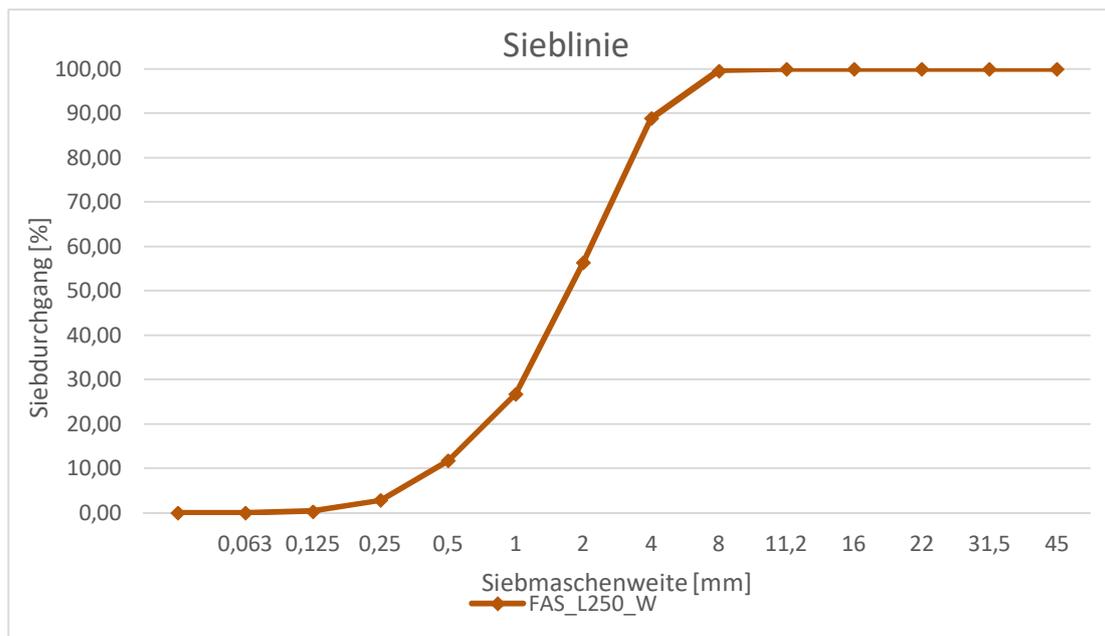
Auch an den Sieblinien der LBP-Mischung (Abbildung 5.26) ist zu erkennen, dass die unter Wasser gelagerten Proben weitaus feiner abplatzen als die Proben aus dem Klimaschrank. Vergleicht man die verschiedenen Mischungen untereinander erkennt man, dass im Gegensatz zu den anderen Mischungen das abgeplatzte Material der LPB-Mischungen

hauptsächlich aus Körnungen größer als 4 mm besteht. Die Abplatzungen sind damit deutlich größer als die der anderen Mischungen.



**Abbildung 5.26:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Mischungen mit Luftporenbildner

Die Abbildung 5.27 zeigt die Sieblinie der FAS\_L250\_W Probekörper. Durch die geringe Abplatzmengen (vgl. Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23) ist auch diese Linie nur aus Vollständigkeitsgründen abgebildet.



**Abbildung 5.27:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Mischungen mit PP-Fasern

## 5.5 Porositätsmessungen

In den Abbildungen 5.28 bis 5.31 sind die Porenvolumina und die Porengrößenverteilung von allen Nachbehandlungs- und Lagerungsbedingungen sämtlicher Mischungen dargestellt.

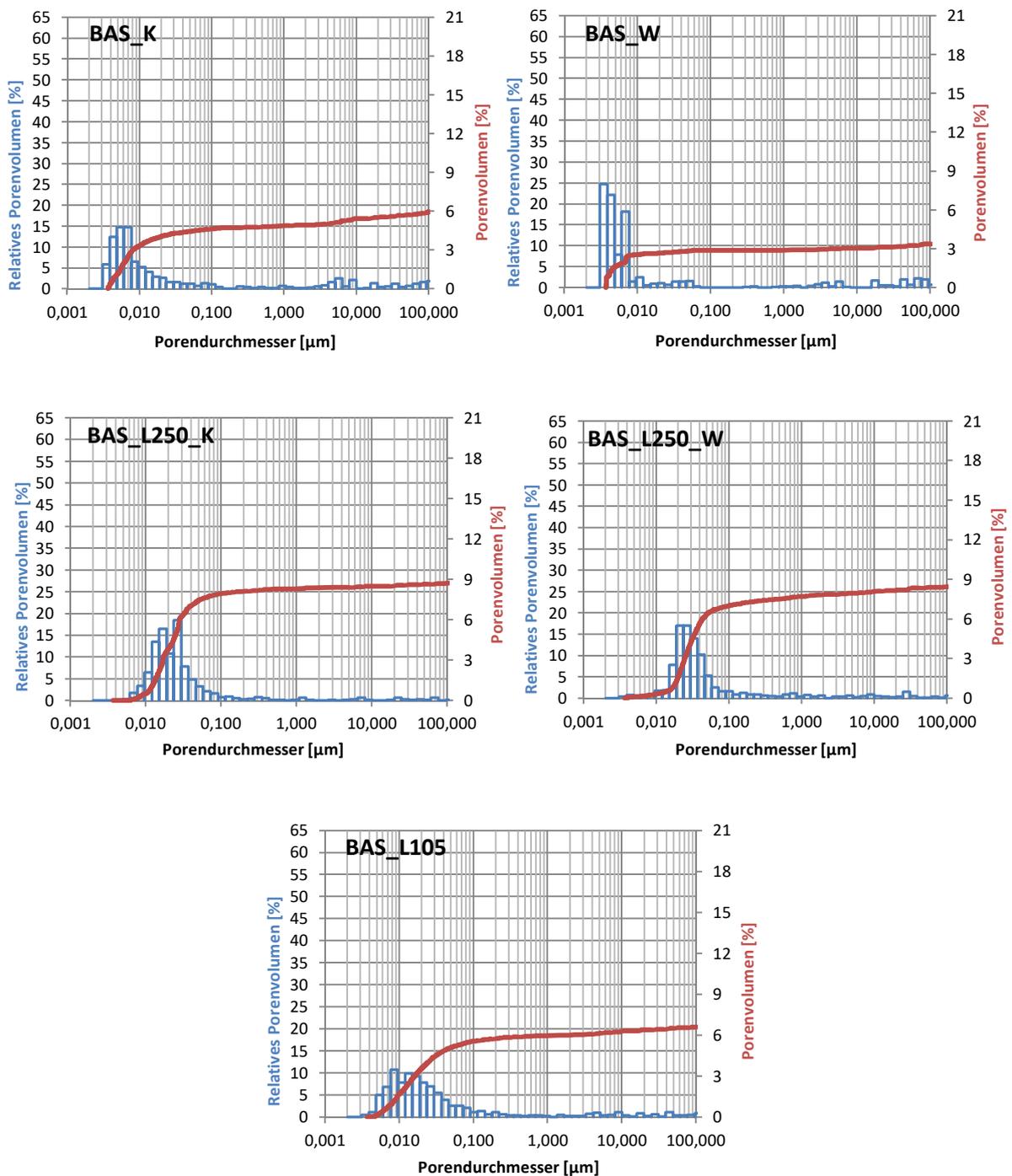


Abbildung 5.28: Porenvolumen und Porengrößenverteilung der Basis-Mischung

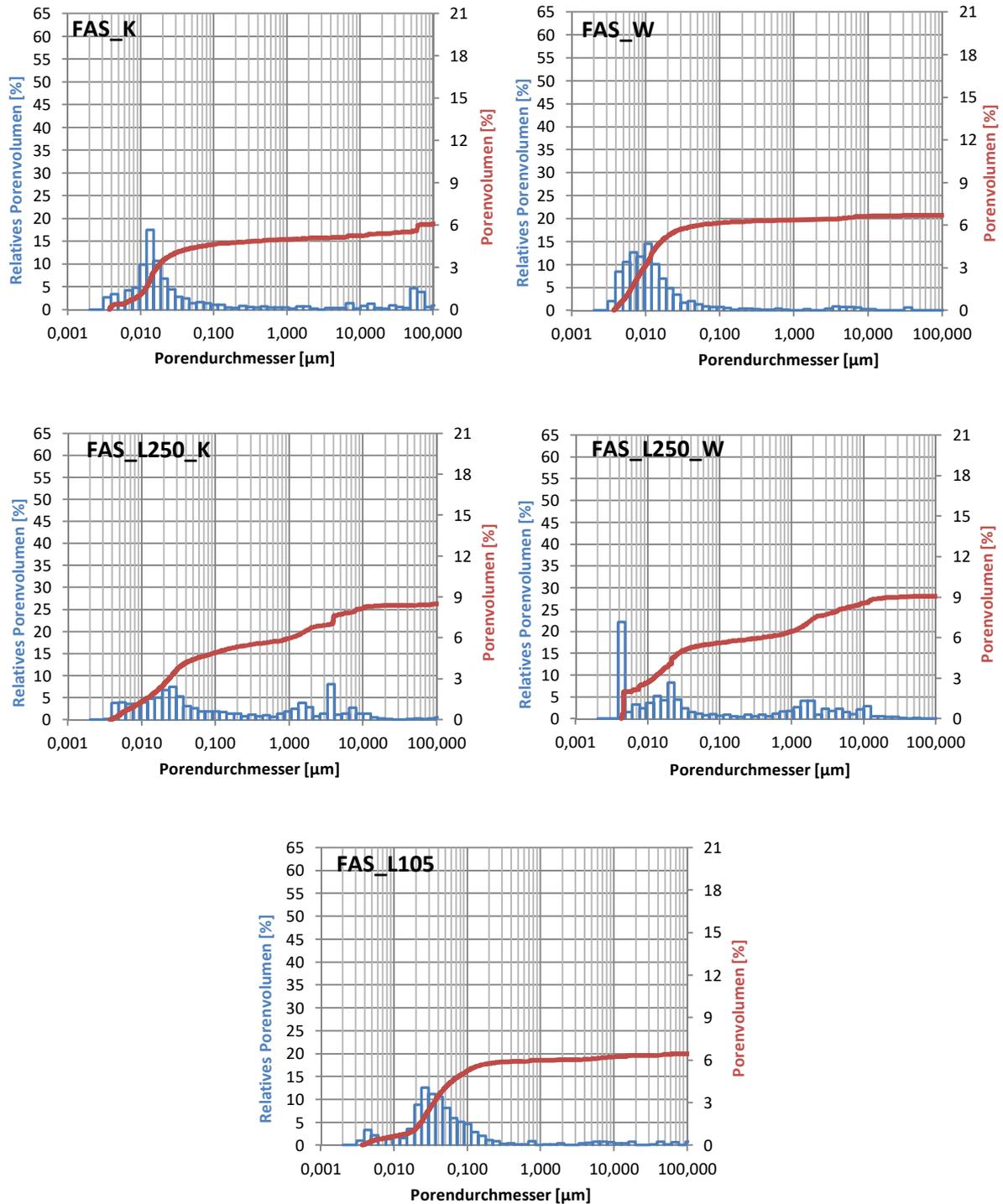


Abbildung 5.29: Porenvolumen und Porengrößenverteilung der Mischung mit PP-Fasern

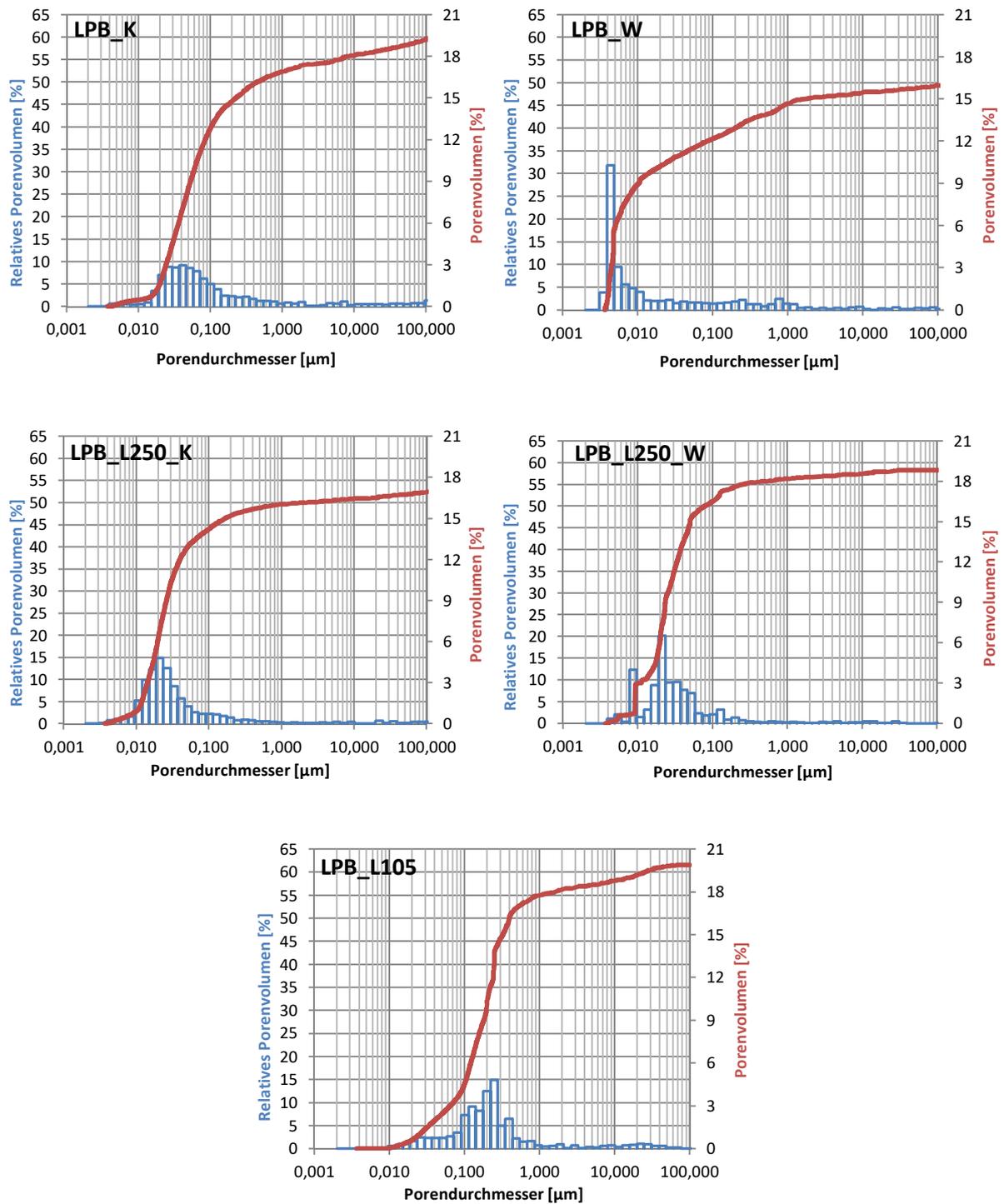
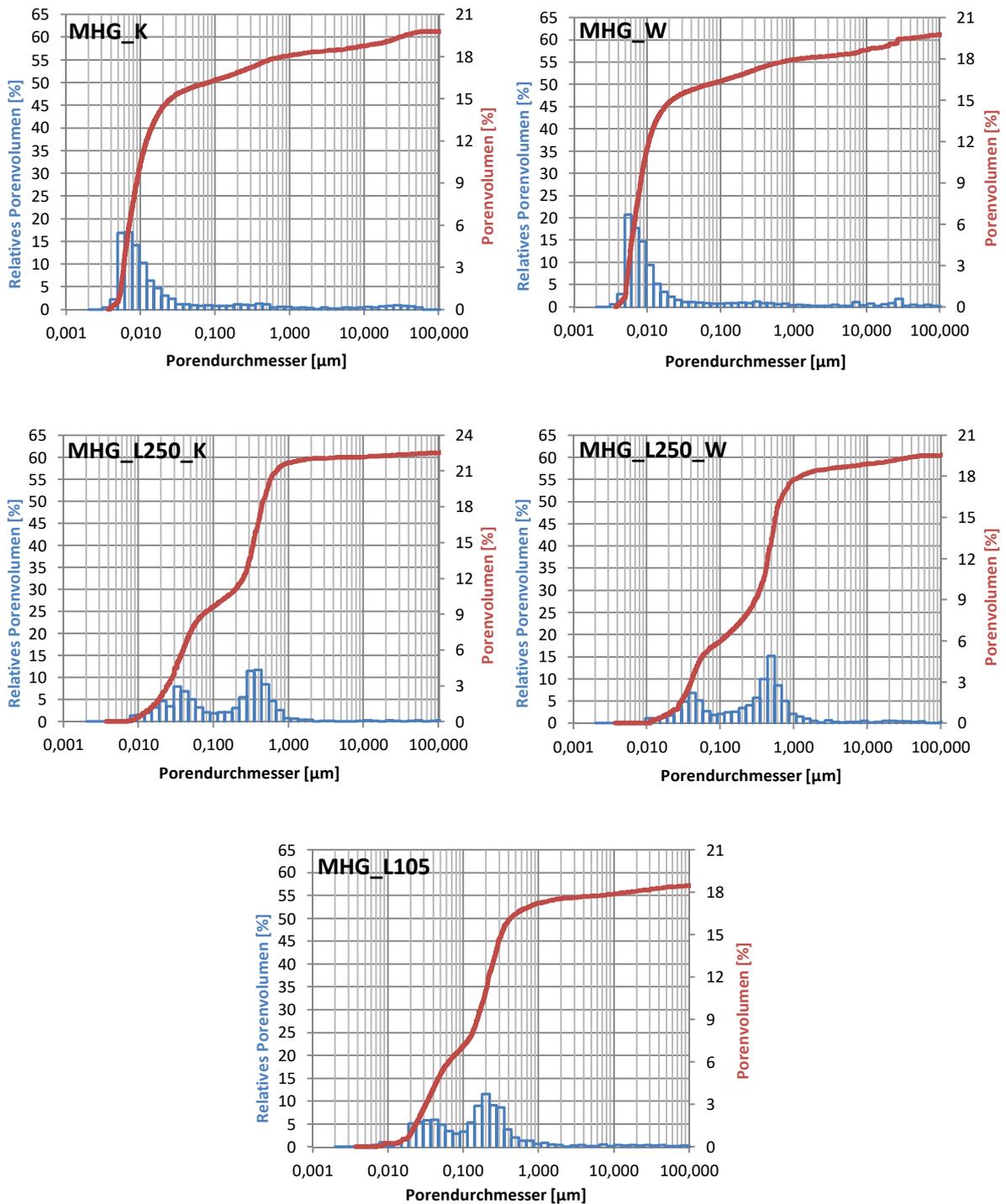


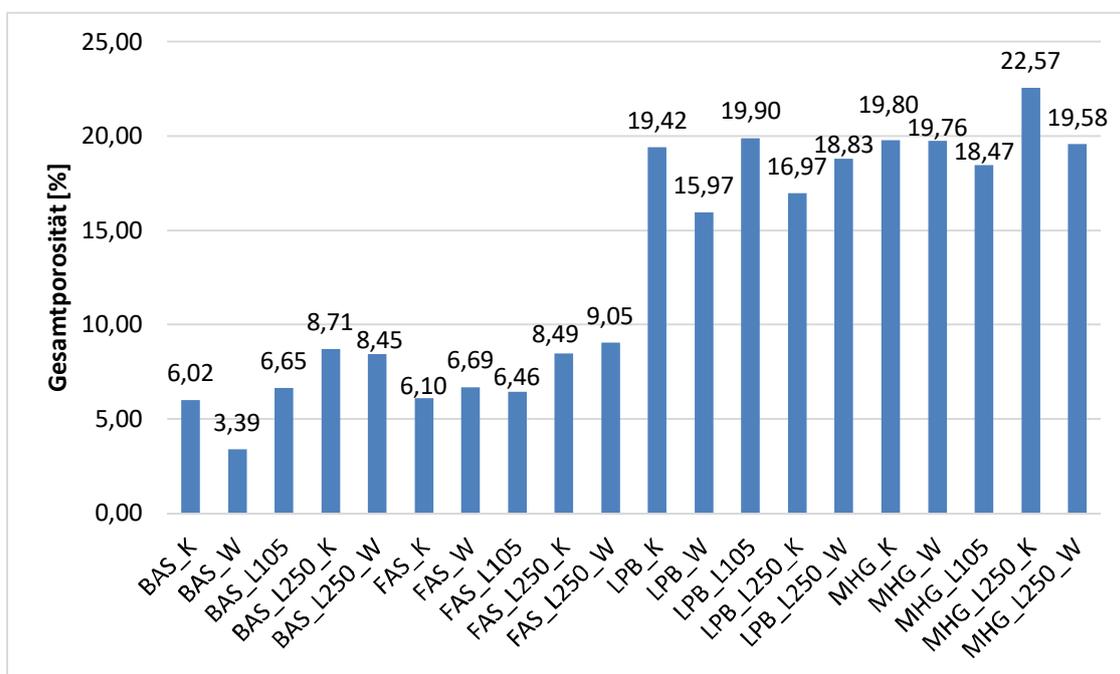
Abbildung 5.30: Porenvolumen und Porengrößenverteilung der Mischung mit Luftporenbildner



**Abbildung 5.31:** Porenvolumen und Porengrößenverteilung der Mischung mit Mikrohohlglaskugeln

Aus den Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass die Porengrößenverteilung bei den Proben, die mit 250°C Heißluft nachbehandelt wurden, deutlich von den der anderen abweicht. Die Porengrößenverteilung verschiebt sich hin zu größeren Poren. Das ist auf die hohen Temperaturen von über 200°C zurückzuführen. Bei den Proben mit PP-Fasern schmelzen in diesem Temperaturbereich noch zusätzlich die Fasern und geben Porenräume

frei. Vergleicht man die LPB-Mischung mit den anderen ist zu erkennen, dass die Mischung mit Luftporenbildner generell größere Poren enthält. Die Porengrößenverteilung der Messergebnisse der Mischungen mit Mikro-Hohlglaskugeln entspricht nicht den tatsächlichen Porengrößen in den Probekörpern. Laut Herstellerangaben haben die Kügelchen eine durchschnittliche Größe von ca. 29 µm. Diese Porengrößen sind in den Messergebnissen praktisch nicht vorhanden. Grund dafür könnte sein, dass die Dichte Betonmatrix, die die Kügelchen umschließt, viel kleinere Poren aufweist und dadurch die Ergebnisse beeinflusst werden. Darüber hinaus weisen die Kügelchen eine Druckfestigkeit von durchschnittlich 2,8 N/mm<sup>2</sup> auf, was die Werte noch zusätzlich verfälscht.



**Abbildung 5.32:** Gesamtporosität sämtlicher Lagerungen und Nachbehandlungen aller Mischungen

Die Abbildung 5.32 zeigt die Gesamtporosität sämtlicher Nachbehandlungs- und Lagerungsarten aller Mischungen. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die Porosität bei der Basis-Mischung und der Mischung mit Fasern durch die 250°C Heißluftbehandlung deutlich erhöht. Dieser Effekt ist bei den Mischungen mit Luftporenbildner und Mikrohohlglaskugeln generell nicht zu erkennen. Das liegt daran, dass es größere Schwankungen bei der Frischbetonrohddichte bei beiden Mischungen gab, die diesen Effekt wieder aufheben. Bei den LPB-Mischungen ist die variierende Frischbetonrohddichte auf einen schwankenden Luftporeneintrag bei den Mischungen zurückzuführen. Bei den MHG-Mischungen schwankt

ebenfalls der Glasbruch der Kügelchen bei den Mischungen, das zu den variierenden Frischbetonrohddichten führt. Generell sieht man die weitaus höhere Gesamtporosität der LBP- und der MHG-Mischung gegenüber den Proben mit PP-Fasern und der Basis-Mischung.

## **5.6 Zusammenhänge und Interpretationen**

### **5.6.1 Abplatzbeginn und Wassergehalt**

In den Abbildungen 5.33 bis 5.36 ist der Zusammenhang des Abplatzbeginns mit dem Wassergehalt der Probekörper zum Zeitpunkt der Brandversuche dargestellt. Dabei sind die einzelnen Diagramme nach den untersuchten Mischungen sortiert. Vergleicht man die unbehandelten Proben miteinander erkennt man, dass der Abplatzbeginn sich gegengleich zum Wassergehalt verhält. Das heißt mit höherem Wassergehalt platzen die Brandplatten früher ab als bei niedrigerem Wassergehalt. Das ist darauf zurückzuführen, dass während der Brandeinwirkung durch den höheren Wassergehalt mehr Wasser in der gleichen Zeit in Dampf umgewandelt wird und der Wasserdampfdruck in der Probe dadurch schneller steigt. Vergleicht man die Mischungen untereinander sieht man, dass die unbehandelten Klima- und wassergelagerten Proben der Mikrohohlglaskugel-Mischung und der Basis-Mischung ähnliche Abplatzzeitpunkte aufweisen. Im Gegensatz dazu platzen die Brandplatten der Mischungen mit Luftporenbildner bei gleichen Lagerungsbedingungen deutlich später ab. Die Erklärung dafür liegt in den eingebrachten Luftporen der LPB-Mischung. In diesen Hohlräumen kann sich der Wasserdampf ausbreiten und der Druck steigt nicht so schnell an wie bei den anderen Mischungen. Zwar wurden durch die Mikrohohlglaskugeln ebenfalls Hohlräume eingebracht, jedoch sind diese in sich geschlossen, sodass der Raum vom Wasserdampf nicht genutzt werden kann und sich ein ähnlich dichtes Gefüge wie bei der Basis-Mischung einstellt.

Analysiert man die einzelnen Diagramme bezüglich der Abplatzungsneigung untereinander zeigt sich, dass die Zumischung von PP-Fasern sich am besten eignet um Betonabplatzungen zu verhindern oder zu verringern. Bei der Faser-Mischung platzen nur die mit Heißluft nachbehandelten im Wasser gelagerten Brandplatten ab und das mit einer so geringen Menge, so dass es nur zu kleinen oberflächlichen Abplatzungen kommt (Abbildung 5.22 und 5.23). Die Wirkungsweise der Fasern ist im Abschnitt 2.8.5 beschrieben. Darüber hinaus sieht man, dass die Nachbehandlung mit 250°C Heißluft das Abplatzverhalten ebenfalls positiv

beeinflusst. Dies ist durch die Erhöhung der Porosität und die Veränderung der Porenradienverteilung zu erklären (vgl. Abschnitt 5.5).

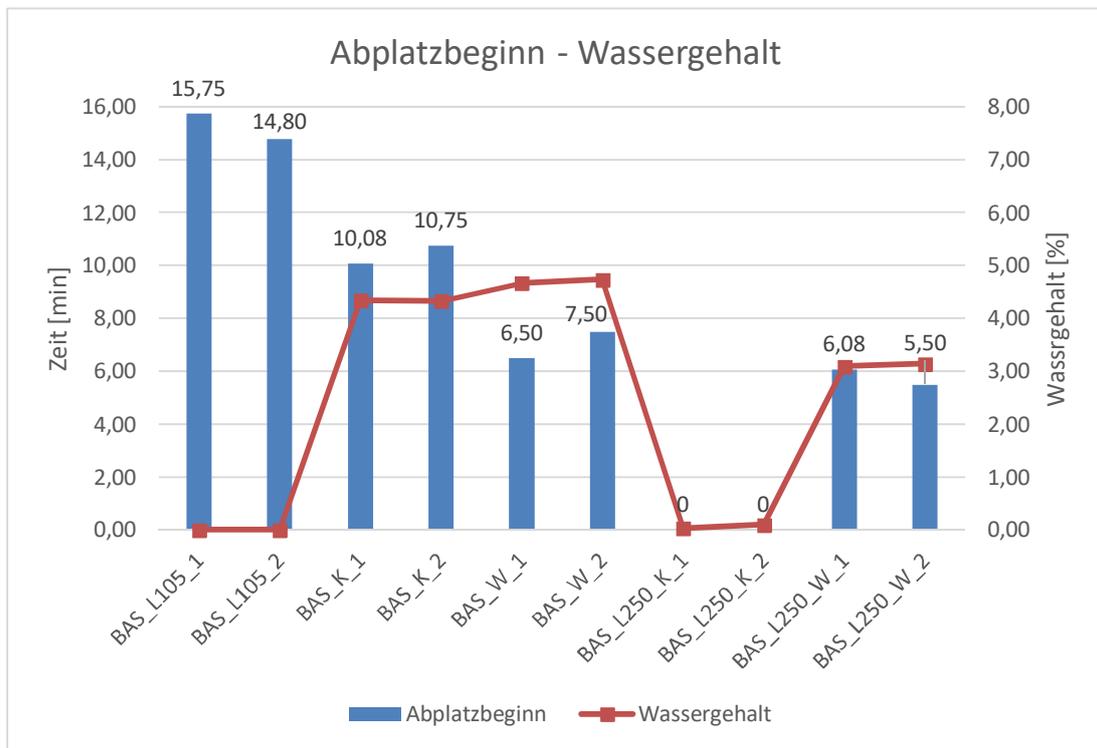


Abbildung 5.33: Zusammenhang Abplatzbeginn und Wassergehalt der Basis-Mischungen

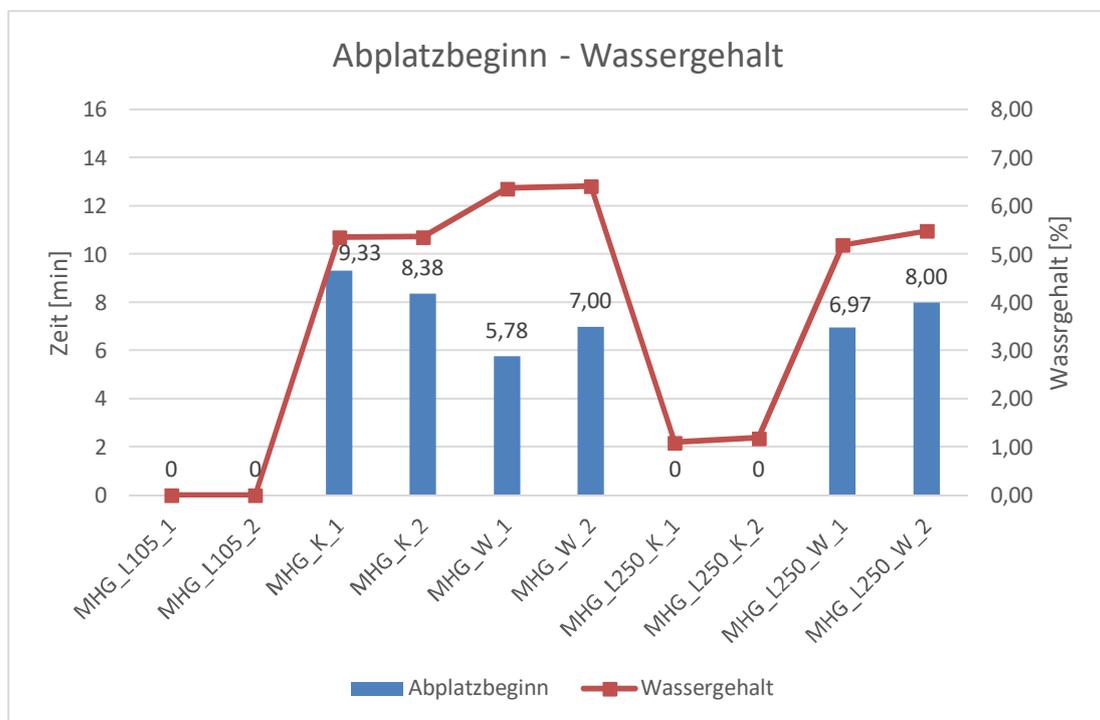
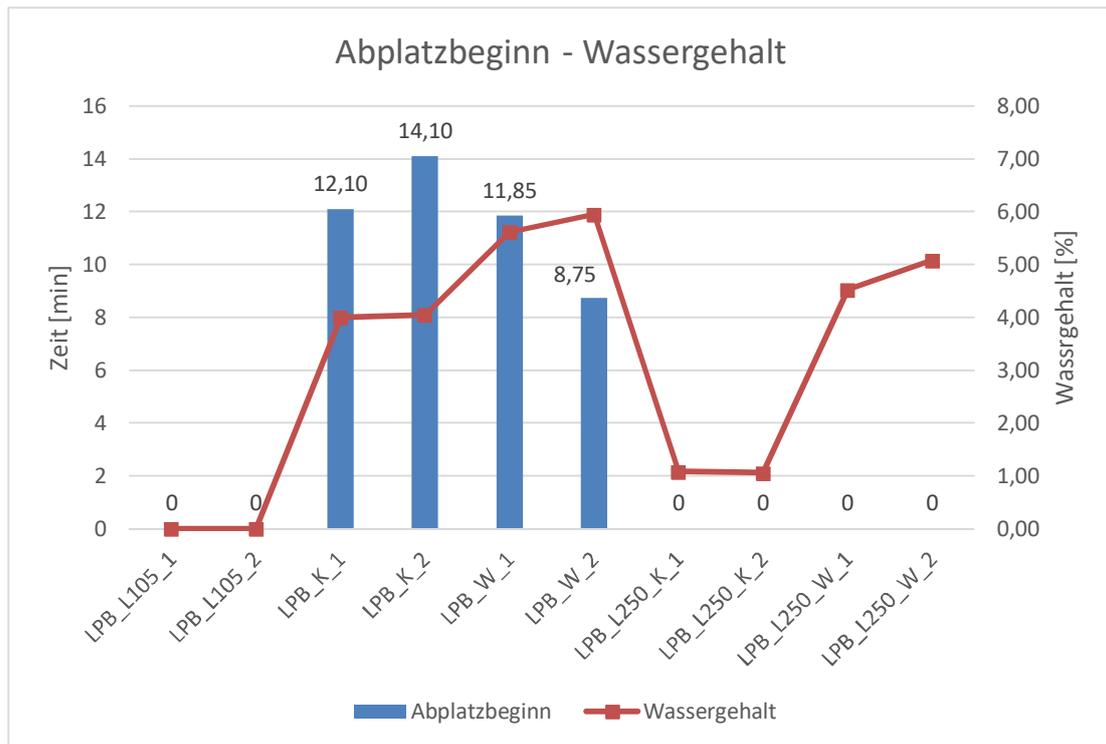
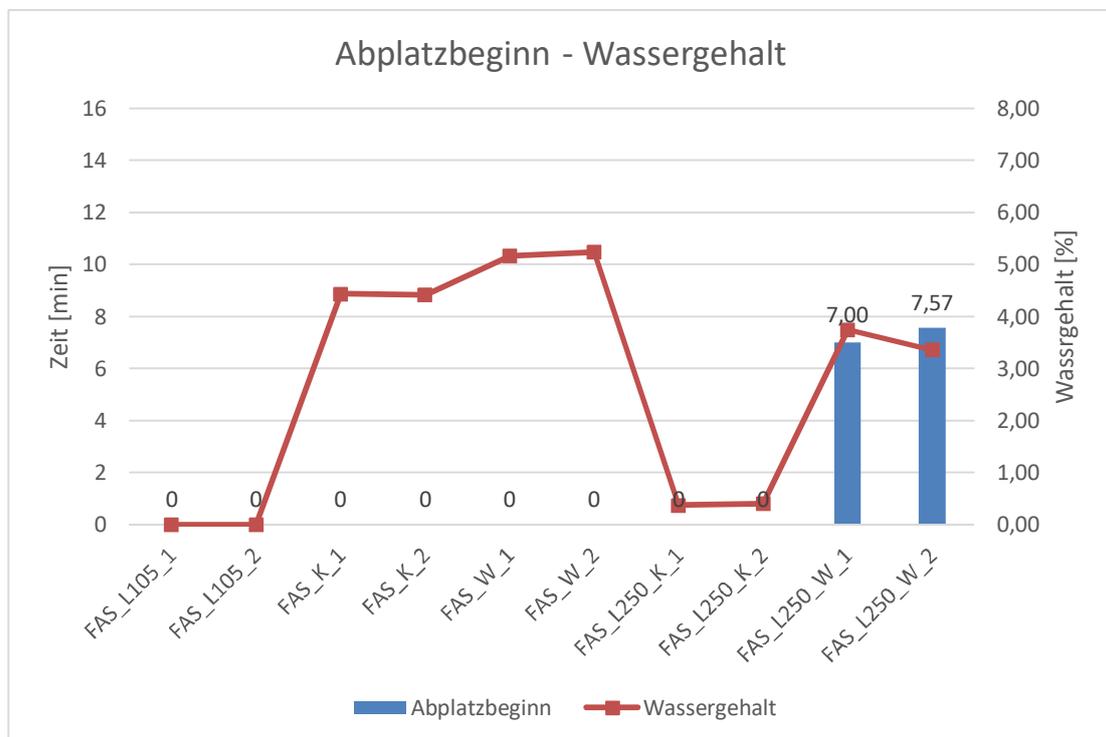


Abbildung 5.34: Zusammenhang Abplatzbeginn und Wassergehalt der Mikrohohlglaskugel-Mischungen



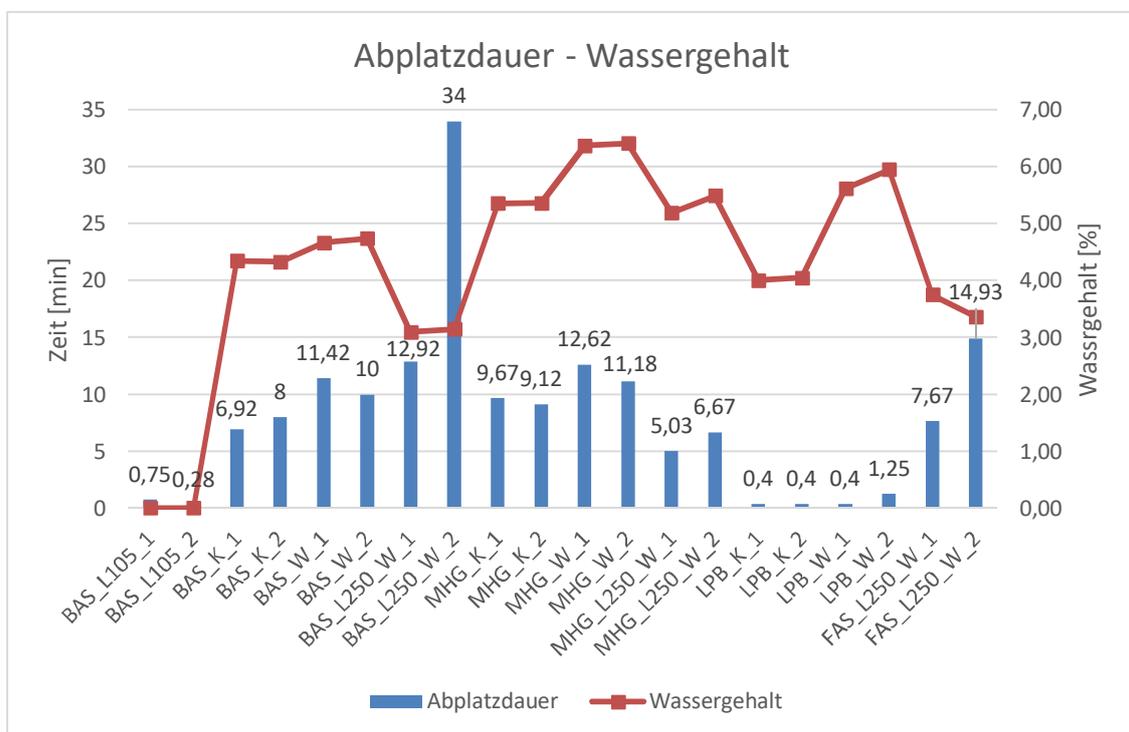
**Abbildung 5.35:** Zusammenhang Abplatzbeginn und Wassergehalt der Mischungen mit Luftporenbildner



**Abbildung 5.36:** Zusammenhang Abplatzbeginn und Wassergehalt der Mischungen mit PP-Fasern

## 5.6.2 Abplatzdauer und Wassergehalt

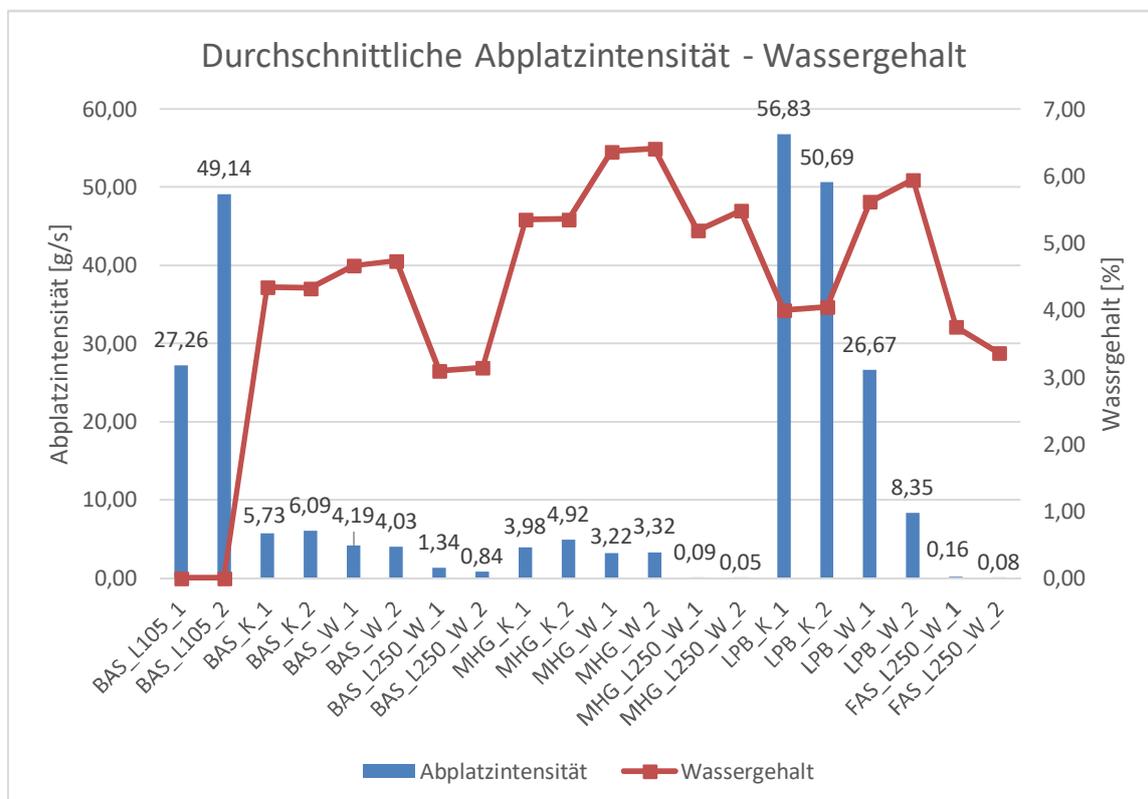
Die Abbildung 5.37 zeigt den Zusammenhang zwischen der Abplatzdauer und dem Wassergehalt der Brandplatten zu Versuchsbeginn. Vergleicht man die verschiedenen Lagerungsbedingungen der unbehandelten Proben einer Mischungsrezeptur untereinander, kommt man zu dem Schluss, dass mit steigendem Wassergehalt auch die Abplatzdauer ansteigt. Das heißt, dass die Brandplatten mit höherem Wassergehalt mit einer geringeren Intensität abplatzen. Bei den Mischungen mit Luftporenbildner ist das nur sehr schwer zu erkennen, da die Probekörper fast schlagartig durch Abplatzungen zerstört werden.



**Abbildung 5.37:** Zusammenhang Abplatzdauer und Wassergehalt

### 5.6.3 Abplatzintensität und Wassergehalt

In der Abbildung 5.38 ist die Abplatzintensität in Abhängigkeit, zum Wassergehalt dargestellt. Dabei wird die Abplatzintensität als eine durchschnittliche Abplatzintensität über die Abplatzdauer ermittelt. Sie errechnet sich als Verhältnis von Abplatzmenge zu Abplatzdauer. Es ist deutlich zu sehen, dass bei den Probekörpern ohne Nachbehandlung jeder Mischung die durchschnittliche Abplatzintensität mit steigenden Wassergehalt abnimmt. Während die Brandplatten der Basis-Mischung nach der 105°C Trocknung mit einer geringen Abplatzzeit fast schlagartig zerstört wurden (sehr hohe Abplatzintensität), ist die Abplatzintensität der Probekörper der Klima- und Wasserlagerung deutlich geringer. Auffallend ist ebenfalls, dass die Proben der Mischungen mit Luftporenbildner mit einer sehr hohen Intensität abplatzen. Wie bereits im Vorhinein erwähnt, verbessert die 250°C Heißluftbehandlung das Abplatzverhalten. Das ist auch in der Abbildung 5.37 zu erkennen. Die Abplatzintensität der nachbehandelten Brandplatten aller Mischungen ist sehr gering. Das ist auf die durch die Wärmebehandlung hervorgerufene Erhöhung der Porosität und Veränderung der Porenradialverteilung der Probekörper zurückzuführen.



**Abbildung 5.38:** Zusammenhang durchschnittliche Abplatzintensität und Wassergehalt

### 5.6.4 Abplatztemperatur und Wassergehalt

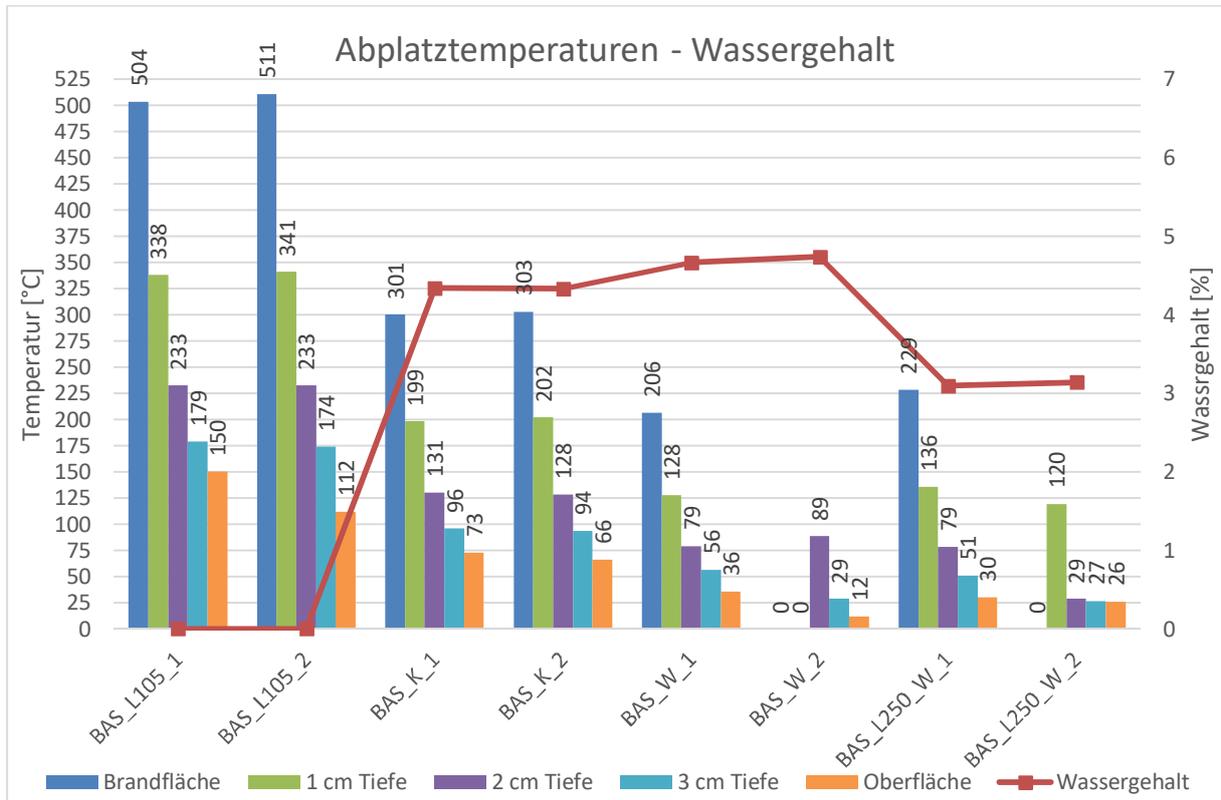


Abbildung 5.39: Vergleich Abplatztemperatur und Wassergehalt der Basis-Mischung

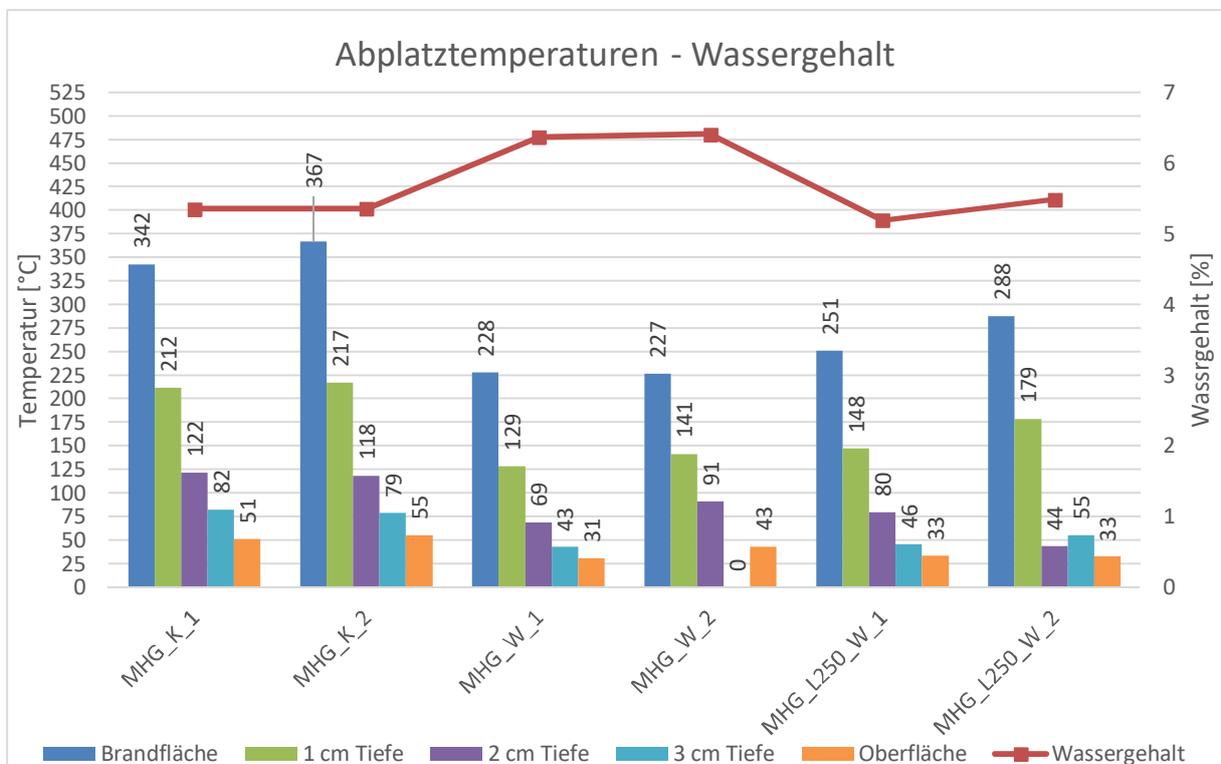
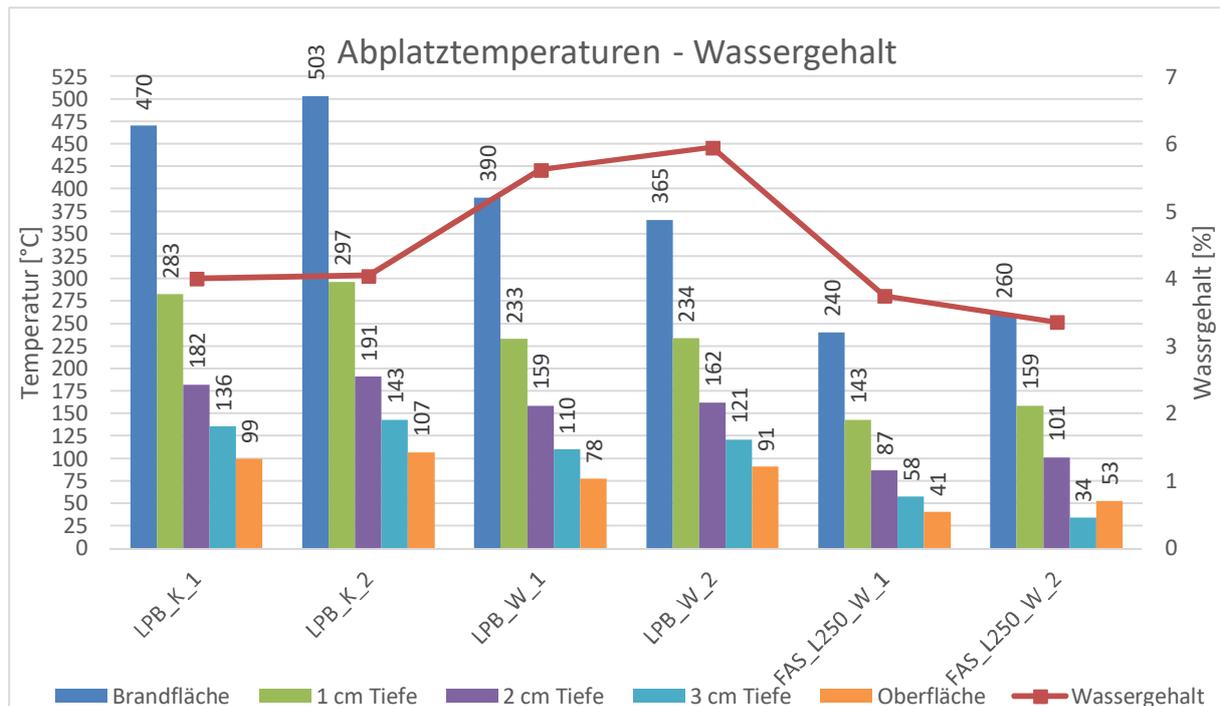


Abbildung 5.40: Vergleich Abplatztemperatur und Wassergehalt der Mikrohohlglaskugel-Mischungen



**Abbildung 5.41:** Vergleich Abplatztemperatur und Wassergehalt der Mischung mit Luftporenbildner und der Mischung mit PP-Fasern

Die Abbildungen 5.39 bis 5.41 zeigen den Zusammenhang zwischen Abplatztemperatur und Wassergehalt. Der Temperaturverlauf im Probekörper steht im direkten Zusammenhang mit dem Abplatzungsbeginn. Das heißt, je später der Abplatzungsbeginn, desto höher die Temperaturen in der Brandplatte. Daher ergeben sich ähnliche Schlussfolgerungen wie im Abschnitt 5.6.1. Betrachtet man die unbehandelten, Probekörper erkennt man, dass die Temperaturen zum Zeitpunkt der ersten Abplatzungen mit steigendem Wassergehalt sinken. Das ist darauf zurückzuführen, dass während der Brandeinwirkung durch den höheren Wassergehalt schon bei geringeren Temperaturen viel Wasserdampf produziert wird und der Wasserdampfdruck in der Probe dadurch schneller steigt. Bei der 105°C Lagerung sieht man deutlich wie hoch die Temperaturen im Probekörper bei den ersten Abplatzungen sind. Da quasi kein freies Wasser in der Probe vorhanden ist, bildet sich der Wasserdampf erst bei höheren Temperaturen in der Brandplatte durch die Abgabe des chemisch gebundenen Wassers. Vergleicht man die Mischungen untereinander, erkennt man, dass die Mischungen mit Luftporenbildner bei gleichen Lagerungsbedingungen bei deutlich höheren Temperaturen abplatzen. Die Erklärung dafür liegt in den eingebrachten Luftporen der LPB-Mischung, in denen sich der Wasserdampf ausbreiten kann und dadurch der Druck nicht so schnell steigt.

### 5.6.5 Abplatztemperatur und Abplatzintensität

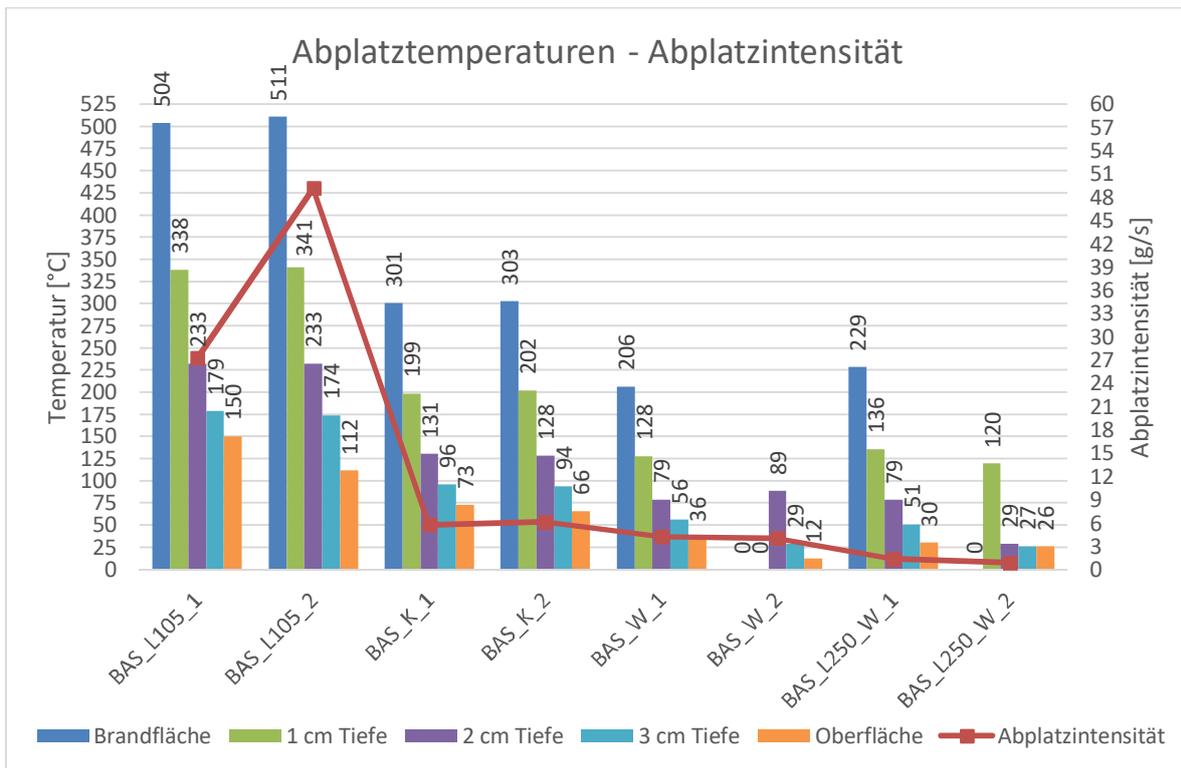


Abbildung 5.42: Zusammenhang Abplatztemperatur und Abplatzintensität der Basis-Mischung

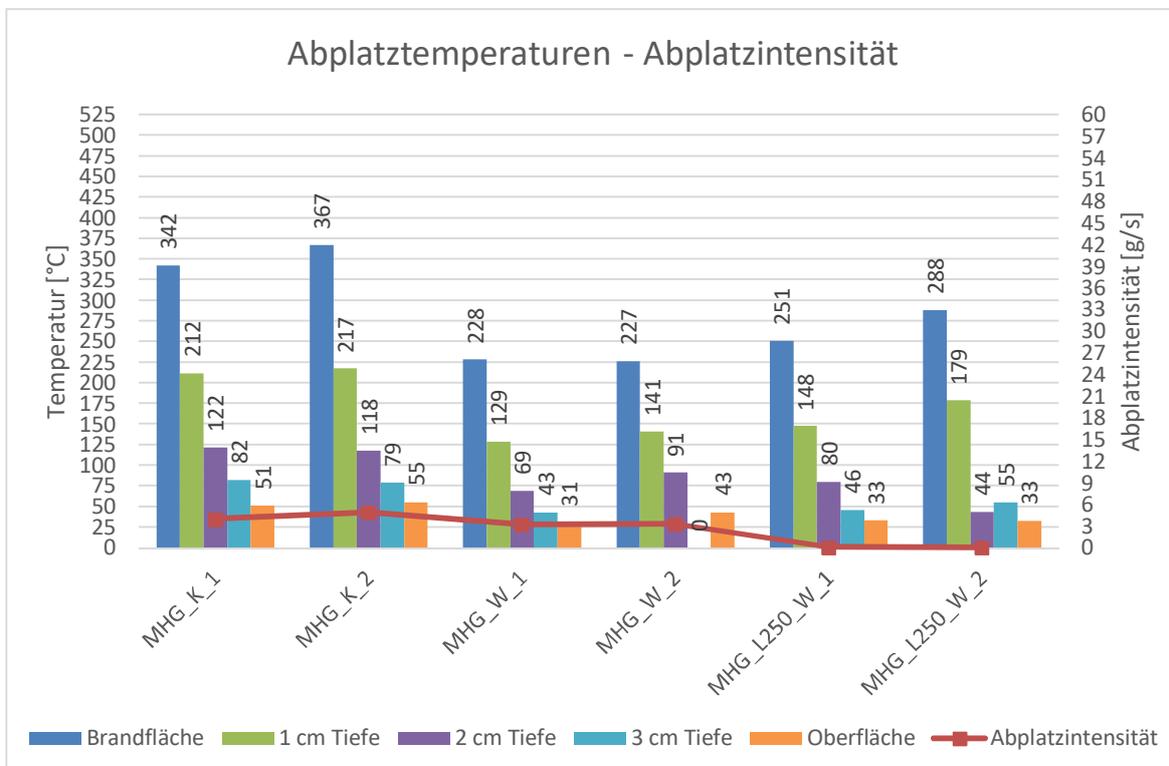
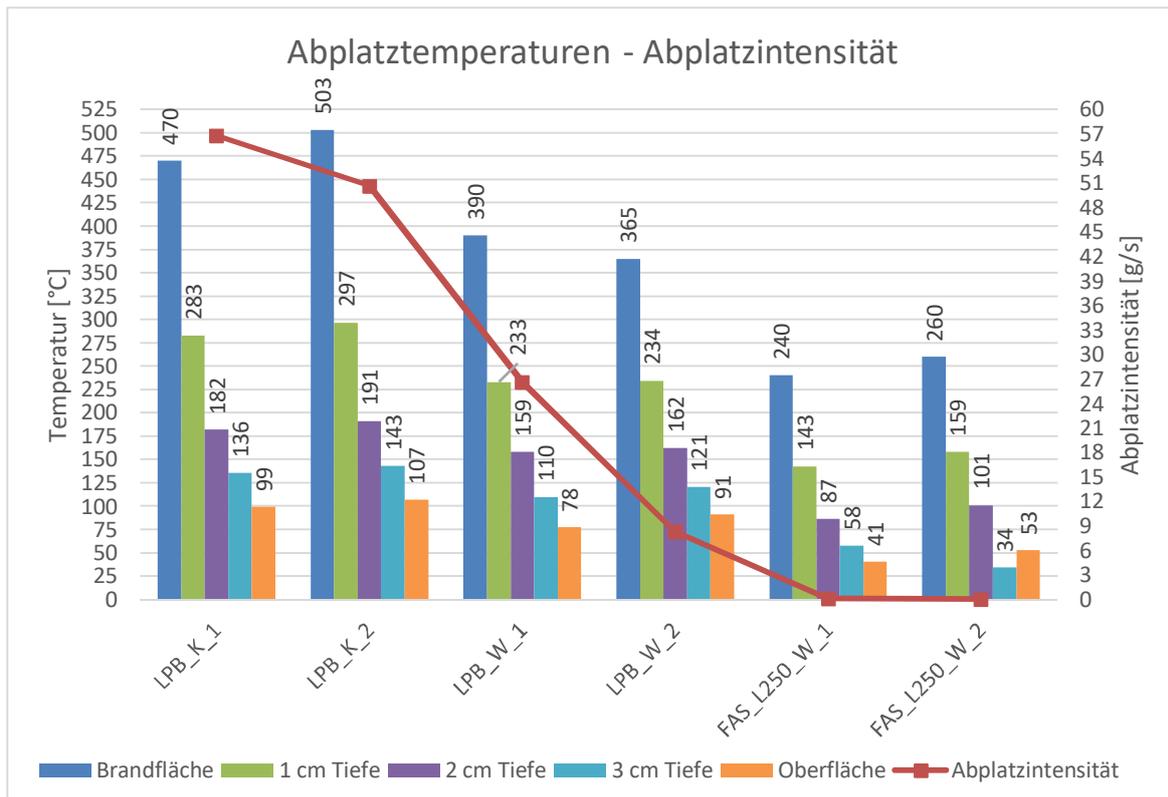


Abbildung 5.43: Zusammenhang Abplatztemperatur und Abplatzintensität der Mikrohohlglaskugel-Mischungen



**Abbildung 5.44:** Zusammenhang Abplatztemperatur und Abplatzintensität der Mischung mit Luftporenbildner und der Mischung mit PP-Fasern

In den Abbildungen 5.42 bis 5.44 werden die Temperaturen zum Zeitpunkt des Abplatzbeginns mit der durchschnittlichen Abplatzintensität verglichen. Grundlegend erkennt man, dass die Brandplatten mit höherer Intensität abplatzen, je höher die Temperaturen im Probekörper zum Zeitpunkt des Abplatzens sind. Der Grund dafür ist, dass durch die höheren Temperaturen und die dadurch auftretenden höheren Temperaturdifferenzen über dem gesamten Querschnitt der Brandplatte die Wärmespannungen eine immer größere Rolle spielen. Vergleicht man die Mischungen derselben Lagerungsbedingungen untereinander ist zu sehen, dass bei der LPB-Mischung die Abplatzintensität weitaus höher ist als bei den anderen Mischungen. Der Grund dafür liegt an dem späten Abplatzzeitpunkt und den damit verbundenen hohen Temperaturen und Temperaturunterschieden in den Probekörpern. Die eingebrachten Luftporen verzögern den Abplatzzeitpunkt, da sich der Wasserdampfdruck entspannen kann. Dadurch wird der Probekörper fast vollständig über 100°C erhitzt. Das heißt, in der Brandplatte bildet sich über den gesamten Querschnitt Wasserdampf, der sich in den Luftporen sammelt. Der Probekörper steht vollständig unter Druck, da der Wasserdampf durch das dichte Gefüge nur schwer entweichen kann. Zusätzlich treten durch die hohen

Temperaturdifferenzen über den Querschnitt zusätzlich Spannungen auf. Überschreiten die auftretenden Spannungen die Zugspannungen kommt es nur zu geringen Abplatzungen und danach zu einer fast schlagartigen Zerstörung der Probekörper.

### 5.6.6 Sieblinie abgeplatzt Material und Wassergehalt

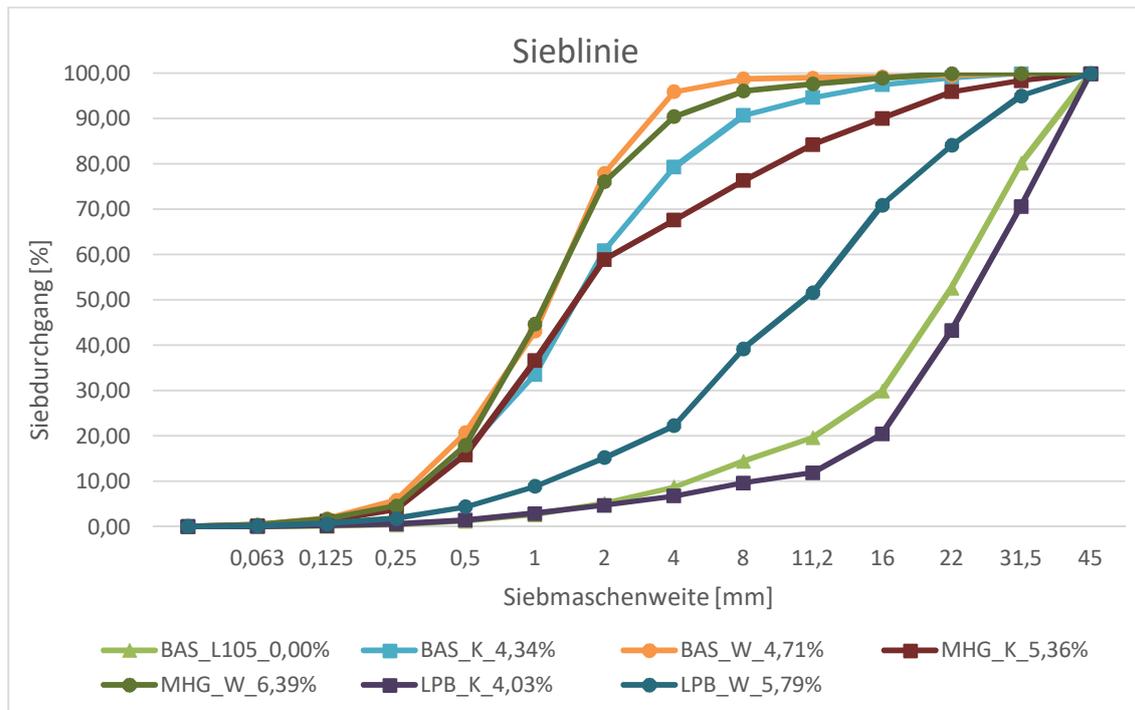
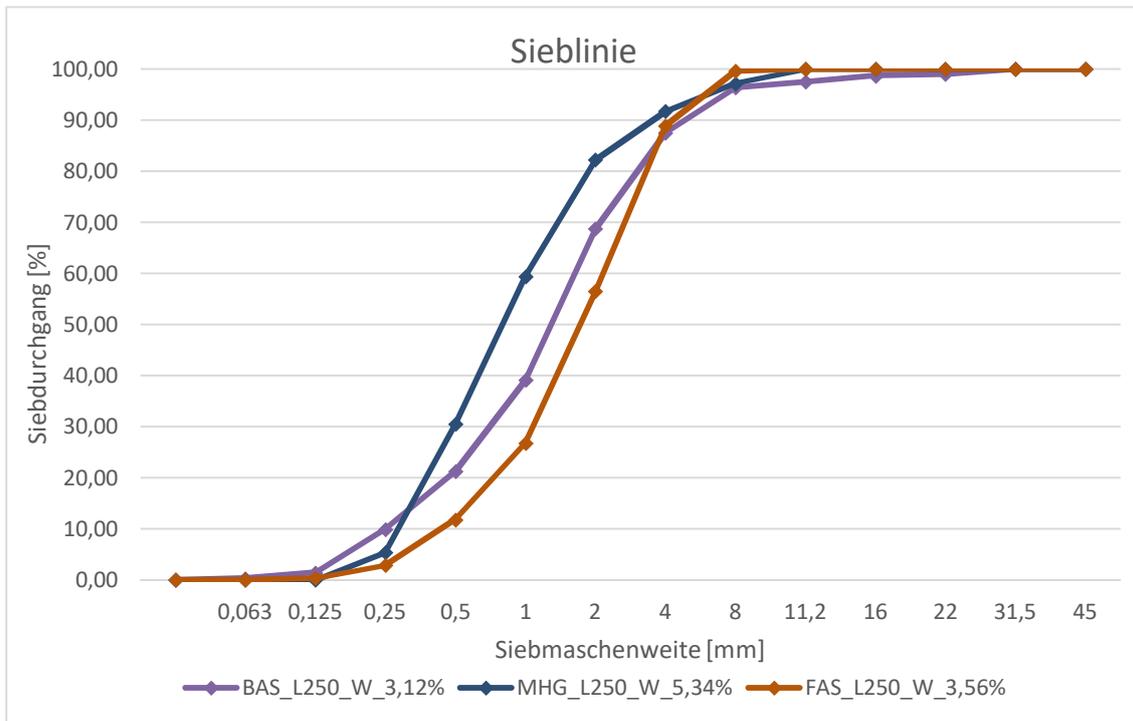


Abbildung 5.45: Sieblinie des Abgeplatzt Material der unbehandelten Probekörper

In den Abbildungen 5.45 und 5.46 sind die Zusammenhänge zwischen der Sieblinie des abgeplatzt Material und dem Wassergehalt dargestellt. Betrachtet man die unbehandelten Proben jeder Mischung für sich, ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Wassergehalt die Betonabplatzungen feiner werden. Sehr deutlich ist dies zu erkennen, wenn man die getrocknete Basismischung (Wassergehalt 0,00%) mit der wassergelagerten Proben (Wassergehalt 4,71%) vergleicht. Der Siebdurchgang bei 4 mm Siebmaschenweite liegt gerade einmal bei 9 % im Vergleich zu den 96 % bei der in Wasser gelagerten Proben. Das heißt, die abgeplatzt Stücke der getrockneten Proben sind viel größer als die der wassergelagerten Brandplatten. Vergleicht man die verschiedenen Mischungen untereinander sieht man, dass die LPB-Mischung viel gröber abplatzt als die anderen Mischungen derselben Lagerungsart. Das ist auf das sehr kurze Abplatzen und die eher schlagartige Zerstörung der Brandplatten der LPB-Mischung zurückzuführen.

Die 250°C Heißluft behandelten Probekörper platzen sehr fein ab (Abbildung 5.46). Bei der Basismischung liegt die Sieblinie zwischen den unbehandelten, im Wasser gelagerten Proben und den unter Normklima gelagerten Probekörpern. Die Sieblinien der anderen beiden Mischungen sind nicht sehr aussagekräftig, da die Mengen des abgeplatzen Materials äußerst gering sind (vgl. Abschnitt 5.4.3).



**Abbildung 5.46:** Sieblinie des Abgeplatzen Materials der mit 250°C Heißluft behandelten Probekörper

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ultra High Performance Concrete (UHPC) ist ein Beton mit hervorragenden Werkstoffeigenschaften, für die praktische Anwendung dieses Hochleistungswerkstoffes ist jedoch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig. Aus UHPC lassen sich schlanke und dünnwandige Bauteile errichten, die schon in einer großen Zahl, zum Beispiel im Hochbau, im Brückenbau, im Tunnelbau und in der Fertigteilindustrie zur Anwendung kommen. Gerade bei diesen Anwendungen ist es wichtig neben der genauen Kenntnis über das Trag- und Verformungsvermögen, auch Kenntnisse über das Verhalten des Werkstoffes im Brandfall zu erlangen. Gerade bei UHPC ist das Abplatzverhalten unter hoher Temperaturbeanspruchung, wie sie im Brandfall auftritt, sehr kritisch zu sehen. Ursache dafür ist der durch die Brandeinwirkung entstehende Wasserdampf, der durch das dichte Betongefüge am Entweichen gehindert wird und zu hohen inneren Dampfdrücken führt, die problematische Eigenspannungen hervorrufen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Brandversuche an unterschiedlich modifizierten UHPC-Mischungen mit der Einheitstemperaturkurve durchgeführt und das Abplatzverhalten untersucht. Dazu wurde zunächst ein Brandversuchsofen konstruiert, der das abgeplatzte Material schnellst möglich aus dem Versuchsofen befördert. Mit Hilfe dieses Ofens wird das abgeplatzte Material durch die im Ofen auftretende Hitze bis zum Versuchen nicht weiter verändert und kann untersucht werden.

Das Versuchsprogramm umfasst Vorversuche und Hauptversuche. In den Vorversuchen wurden die modifizierten Mischungen konstruiert und die Frisch- und Festbetoneigenschaften ermittelt. Dazu wurden in den Vorversuchen folgende Betonprüfungen durchgeführt:

- Ermittlung des Ausbreitfließmaßes
- Ermittlung des Luftgehalts und Frischbetonrohichte
- Biegezugfestigkeitsprüfung
- Druckfestigkeitsprüfung.

Die Hauptversuche umfassten die eigentlichen Brandversuche und die Ermittlung der Festbetoneigenschaften. Für die Versuchsdurchführung wurden vier unterschiedliche UHPC Mischungen vorbereitet. Für die Brandversuche wurden jeweils 10 Probekörper mit der Basismischung des Instituts, mit Mikrohohlglaskugeln, mit Luftporenbildner und mit PP-Fasern

hergestellt. Damit standen für jede Nachbehandlungs- und Lagerungsart zwei Brandplatten zur Verfügung. Vier Brandplatten jeder Mischung wurden mit 250°C Heißluft behandelt. Danach wurden jeweils zwei bis zu Versuchsbeginn unter Wasser und zwei im Klimaschrank gelagert. Weitere zwei Brandplatten wurden bis Versuchsbeginn bei 105°C Heißluft getrocknet (annähernd Massenkonstanz). Von den restlichen vier Brandplatten jeder Mischung wurden ohne vorherige Nachbehandlung jeweils zwei unter Wasser und im Klimaschrank gelagert.

Während der Brandversuche wurden die Temperaturverläufe über dem Querschnitt der Probekörper und das Gewicht der Brandplatten aufgezeichnet. Das abgeplatzte Material wurde aufgefangen und durch Siebung wurde die Korngrößenverteilung bestimmt.

Zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften wurden für jede Brandplatte drei Prismen hergestellt, die denselben Nachbehandlungs- und Lagerungsbedingungen unterzogen wurden wie der zugehörigen Brandplatte. Neben der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit wurden der Wassergehalt und die Festbetonrohddichte bestimmt. Darüber hinaus wurden auch Porositätsmessungen durchgeführt.

Die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Die LPB- und MHG-Mischungen weisen wie gewollt weitaus geringere Festbetonrohddichten im Vergleich zu der Mischung mit PP-Fasern und der Basis-Mischung auf. Dadurch sind auch die Festigkeitswerte der LPB- und MHG-Mischung wesentlich geringer als die der anderen beiden Mischungen. Die Druckfestigkeiten sind bis zu 40% kleiner.

Die LPB- und MHG-Mischungen weisen bei allen Lagerungsbedingungen den höchsten Wassergehalt auf. Es zeigt sich, dass die Mischungen mit Luftporenbildner und Mikro-Hohlglaskugeln im Vergleich zu den anderen beiden Mischungen wesentlich schneller Wasser aufnehmen. Das ist auf die Hohlräume und die geringere Festbetonrohddichte zurückzuführen.

Bei der Auswertung der Ergebnisse der Brandversuche wurde festgestellt, dass der Abplatzbeginn sich gegengleich zum Wassergehalt verhält. Das heißt mit höherem Wassergehalt platzen die Brandplatten früher ab als bei niedrigeren Wassergehalt. Das kann damit erklärt werden, dass während der Brandeinwirkung durch den höheren Wassergehalt

mehr Wasser in der gleichen Zeit in Dampf umgewandelt wird und der Wasserdampfdruck in der Probe dadurch schneller steigt.

Es hat sich gezeigt, dass das Abplatzverhalten auch maßgeblich vom Wassergehalt beeinflusst wird. Mit zunehmendem Wassergehalt sinkt die durchschnittliche Abplatzintensität ab. Das heißt mit zunehmendem Wassergehalt steigert sich die Abplatzdauer und die Mischungen platzen feinkörniger ab.

Durch die 250°C Heißluftbehandlung verbessert sich das Abplatzverhalten aller Mischungen. Die Abplatzintensität ist deutlich reduziert. Das ist auf die durch die Wärmebehandlung hervorgerufene Erhöhung der Porosität und Veränderung der Porenradienverteilung der Probekörper zurückzuführen.

Die Einbringung von Hohlräumen bewirkt eine Erhöhung des Abplatzzeitpunktes, jedoch erhöht sich auch die Intensität der Abplatzungen drastisch. Das ist dadurch zu erklären, dass sich der Wasserdampf zwar in den eingebrachten Luftporen sammeln kann und somit der Dampfdruck nicht so schnell ansteigt, jedoch entweicht er nicht, da kein durchgängiges Porensystem vorhanden ist.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass PP-Fasern am effizientesten gegen explosive Betonabplatzungen wirken. Durch die Einbringung von Hohlräume kann der Abplatzzeitpunkt hinaus gezögert, aber nicht verhindert werden. Es zeigt sich, dass neben vorhandenen Hohlräumen auch Verbindungen zwischen den Hohlräumen vorhanden sein müssen, um Betonabplatzungen zu verhindern. Bei den PP-Fasern hat *Pistol* gezeigt, dass sich durch den Faserdruck Mikrorisse bilden (*Pistol*, 2016, S. 78-79). Auch die 250°C Heißluftbehandlung verbessert das Abplatzverhalten von UHPC durch die Erhöhung der Porenradien.

Um weitere Fragen zu klären wäre es für weiterführende Untersuchungen von Interesse, die Gewichtsmessungen nicht mittels einer Hängevorrichtung durchzuführen, sondern das Gewicht des gesamten Ofens mit Probekörper zu messen. Darüber hinaus wäre es von Vorteil das Gewicht des abgeplatzten Materials ebenfalls in Echtzeit während der Versuchsdurchführung aufzuzeichnen.

Auch die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen sollten länger aufrechterhalten bleiben. Es war deutlich zu erkennen, dass bei den wassergelagerten Probekörper noch keine

Massenkonstanz eingetreten war. Die 250°C Heißluft behandelten Proben wiesen noch einen sehr geringen Wassergehalt auf.

In Zukunft wäre es interessant UHPC-Mischungen mit PP-Fasern und Luftporeneintrag zu kombinieren. Einerseits könnte dadurch der eklatante Abfall der Druckfestigkeit reduziert werden und ein besseres Ergebnis in Bezug auf Betonabplatzungen erzielt werden. Darüber hinaus könnten auch nicht alkaliresistente Mikro-Hohlglaskugeln verwendet werden, damit der Hohlraum nicht durch die Mikro-Hohlglaskugeln verschlossen ist. Von großem Interesse wäre es auch Untersuchungen an den UHPC-Mischungen mit anderen Temperaturkurven, wie zum Beispiel die Hydrocarbonkurve (HC), durchzuführen.

Die vorliegenden Untersuchungen stellen einen Beitrag für weitere Forschungen, für das Abplatzverhalten von UHPC, dar. Die erlangten Erkenntnisse zeigen die Komplexität dieses Themas auf und dienen zum besseren Verständnis des Materialverhaltens von UHPC unter Brandbeanspruchung.

## 7 Literaturverzeichnis

- BASF.* (2013). Abgerufen am 05. 09 2016 von [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20\(Austria\)/basf-masterair-9010-tdb.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20(Austria)/basf-masterair-9010-tdb.pdf)
- BASF.* (2014). Abgerufen am 05. 09 2016 von [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20\(Germany\)/BASF-Elkem%C2%A0Microsilica%C2%A0Grade%C2%A0940%C2%A0U-S-tds.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20(Germany)/BASF-Elkem%C2%A0Microsilica%C2%A0Grade%C2%A0940%C2%A0U-S-tds.pdf)
- BASF.* (2015). Abgerufen am 05. 09 2016 von [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20\(Austria\)/BASF-MasterGlenium-ACE-430-tds.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/German%20(Austria)/BASF-MasterGlenium-ACE-430-tds.pdf)
- Baumhüter.* (2010). Abgerufen am 05. 09 2016 von <http://baumhueter-extrusion.de/wcms/ftp/b/baumhueter-extrusion.de/uploads/hprprospekt.pdf>
- BBT Trading Consulting GmbH.* (2009). Abgerufen am 10. August 2016 von <http://www.b-b-t.ch/produkte/kunststoff2.html>
- Berger, M., Schneider, U., Kirnbauer, J.* (2009). *-einfluss des Vakuummischprozesses auf ausgewählte Eigenschaften ultrahochfester Betone* (Bd. 15). (E. O.-I. Schneider, Hrsg.) Wien: Inst. für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, TU Wien.
- Bruckner, H., Schneider, U., Kirnbauer, J.* (2015). *Festbeton.* (E. Bölskey, H. Bruckner, Hrsg.) Wien: Inst. für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, TU Wien.
- Datenblatt Quecksilberporosimetrie. (kein Datum). *GNF Berlin-Adlershof.* Abgerufen am 08. 09 2016 von [www.gnf-berlin.de/app/download/5785064289/Quecksilber-Porosimetrie.pdf](http://www.gnf-berlin.de/app/download/5785064289/Quecksilber-Porosimetrie.pdf)
- Dehn, F., Holschemacher, K.* (2002). Faserbeton - ein innovativer Baustoff auf dem Weg in die Zukunft. In *G. König, K. Holschemacher, F. Dehn, Faserbeton: Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus der Praxis und Wissenschaft* (S. 1-18). Berlin: Bauwerk Verlag GmbH.

- Diederichs, U., Schneider, U., Horvath, J. (2001). Zum Abplatzverhalten von Hochleistungsbetonen unter Brandangriff (Bd. 7). (E. O.-I. Schneider, Hrsg.) Wien: Inst. für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, TU Wien.*
- Ductal. (2016). Abgerufen am 11. Juli 2016 von <http://www.ductal.com/wps/portal/ductal/2-Structural>*
- Fehling, E., Schmidt, M., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R., Middendorf, B. (2005). Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC) (Bd. 1). Kassel: Kassel University Press GmbH.*
- Gay, M., Kleen, E., & Niepmann, D. (2003). Ultrahochfester beton (UHFB) - Stand der Technik und Entwicklungsmöglichkeiten. In G. König, K. Holschemacher, F. Dehn, Zusatzmittel für Ultrahochleistungsbeton (S. 45-53). Berlin: Bauwerk Verlag GmbH.*
- Geisenhanslüke, C., Schmidt, M., Teichmann, T. (2007). Optimierung der Packungsdichte des Feinstkorns für Ultra-Hochleistungs- und Selbstverdichtende Betone. In M. Schmidt, E. Fehling, Ultra High Performance Concrete (UHPC) 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der universität Kassel (Bd. 7, S. 165-183). Kassel: kassel university press GmbH.*
- Holschemacher, K., Dehn, F. (2003). Ultrahochfester beton (UHFB) - Stand der Technik und Entwicklungsmöglichkeiten. In G. König, K. Holschemacher, F. Dehn, Ultrahochfester Beton: Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus der Praxis und Wissenschaft (S. 1-12). Berlin: Bauwerk Verlag GmbH.*
- Horvath, J., Schneider, U. (2006). Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten. Berlin: Bauwerk Verlag GmbH.*
- Horvath, J., Schneider, U., Diederichs, U. (2004). Brandverhalten von Hochleistungsbetonen (Bd. 11). (E. O.-I. Schneider, Hrsg.) Wien: Inst. für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, TU Wien.*
- Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. (kein Datum). HBM measure and predict with confidence. Abgerufen am 30. 09 2016 von <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/b3021.pdf>*

- Huisman, S.* (2010). Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung. Dissertation an der TU Wien.
- Kampen, R., Richter, T.* (2014). *Zement-Merkblatt Betontechnik B3: Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe.* (V. D. e.V., Hrsg.) Abgerufen am 09. 08 2016 von <http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkbl%C3%A4tter/B3.pdf>
- Kampmeier, B., Hollmann, D.* (2011). Grundlagen für die Brandschutzbemessung von Bauteilen aus ultra-hochfestem Beton. In *D. Hosser* (Hrsg.). 214, S. 39-64. Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz.
- Kesten-Kühne, L.* (2015). *Diener electronic.* Abgerufen am 08. 09 2016 von [http://www.plasma.de/de/plasma\\_wissenswertes/part05.html](http://www.plasma.de/de/plasma_wissenswertes/part05.html)
- Kirchberger, H., Bruckner, H., Schneider, U., Oswald, M.* (2014). *Bindemittel.* (E. Bölskey, H. Bruckner, Hrsg.) Wien: Inst. für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, TU Wien.
- Kirnbauer, J.* (2013). Der Vakuummischprozess zur Herstellung von Ultra High Performance Concrete. Dissertation an der TU Wien.
- Klug, Y., Holschemacher, K., Dehn, F.* (2011). Grundlagen des Faserbetons. In *K. Bergmeister, F. Fingerloos, J.-D. Wörner, Beton-Kalender 2011: Kraftwerke, Faserbeton* (S. 21-88). Berlin: Ernst & Sohn.
- Kollegger, J.* (2009). *Betonbau Stahlbetonbau Skriptum.* Wien: institut für Tragwerkskonstruktionen - Betonbau, TU Wien.
- König, G., Viet Tue, N., Zink, M.* (2001). *Hochleistungsbeton: Bemessung, Herstellung und Anwendung.* Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH.
- Kordina, K., Meyer-Ottens, C., Richter, E.* (1999). *Beton Brandschutz Handbuch.* Düsseldorf: Verlag Bau+Technik.
- Kremer Pigmente.* (2013). Abgerufen am 05. 09 2016 von <http://www.kremer-pigmente.com/media/pdf/59910-59920.pdf>

- Kustermann, A.* (2005). *Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betongefüge* (Bd. 2). München: Institut für Werkstoffe des Bauwesens Universität der Bundeswehr München.
- Lafarge.* (2016). Abgerufen am 05. 09 2016 von <http://www.lafarge.at/zement/produkte/der-contragress-525-n/>
- Lins, M.* (2004). Verhalten von Ultrahochfesten Beton (UHPC) Unter Brandbeanspruchung. Diplomarbeit an der TU Wien.
- Nold, P.* (2012). *Warum mischen nicht alle Beton-Mischer "gut"?* Abgerufen am 12. August 2016 von [http://www.eirich.com/upload/media/media/224/BFT\\_1\\_2012\\_Why\\_does\\_not\\_any\\_concrete\\_mixer\\_perform\\_well%5B1071%5D.pdf](http://www.eirich.com/upload/media/media/224/BFT_1_2012_Why_does_not_any_concrete_mixer_perform_well%5B1071%5D.pdf)
- ÖNORM B 4710-1. (2002). Beton Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis.
- ÖNORM EN 12350-6. (2009). Prüfung von Frischbeton Teil 6: Frischbetonrohichte.
- ÖNORM EN 12390-7. (2009). Prüfung von Festbeton Teil 7: Dichte von Festbeton.
- ÖNORM EN 1363-1. (2012). Feuerwiderstandsprüfung Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
- ÖNORM EN 196-1. (2006). Prüfverfahren für Zement Teil 1: Bestimmung der Festigkeit.
- ÖNORM EN 197-1 (Entwurf). (2014). Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.
- ÖNORM EN 206. (2014). Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- ÖNORM EN 934-2. (2014). Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpresshilfen.
- Palecki, S.* (2006). *Hochleistungsbeton unter Frost-Tau-Wechselbelastung: Schädigungs- und Transportmechanismen* (Bd. 9). (P. D.-I. Setzer, Hrsg.) Göttingen: Cuvillier.
- Peneder, I.* (2016). Uniaxiales Bruchverhalten von ultrahochfestem Beton mit und ohne Temperatureinflüsse. Diplomarbeit an der TU Wien.
- Pistol, K.* (2016). *Wirkungsweise von Polypropylen-Fasern in brandbeanspruchtem Hochleistungsbeton* (Bd. 146). Berlin: Bundeslehranstalt für Materialforschung und -prüfung.

POROTEC GmbH. (kein Datum). Abgerufen am 08. 09 2016 von [http://www.porotec.de/porositaet/hg\\_porosimetrie.html](http://www.porotec.de/porositaet/hg_porosimetrie.html)

POROTEC GmbH. (2001). *Bedienungsanleitung PASCAL 140/240/440*. Hofheim.

Richard, P., Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. In *Cement and Concrete Research* (Bd. 25, S. 1501-1511).

Richter, T. (1999). *Hochfester Beton - Hochleistungsbeton*. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik.

Rosbacher, L., Schneider, U., Kirnbauer, J. (2010). *Einfluss unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden auf ausgewählte Eigenschaften vakuumgemischter ultrahochfester Betone* (Bd. 16). (E. O.-I. Schneider, Hrsg.) Wien: Inst. für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, TU Wien.

Rümmelin, A. T. (2005). Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Betonen. Diplomarbeit an der Fachhochschule Stuttgart.

Safranek, K., Schneider, U., Harand, H., Bruckner, H. (2008). *Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone* (Bd. 13). (E. O.-I. Schneider, Hrsg.) Wien: Inst. für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, TU Wien.

Saravanja, M., Anders, S., Klingsch, W. (2013). Wirkung unterschiedlicher Fasern und Fasergehalte auf das Verhalten ultrahochfester Betone (UHPC) bei hohen Temperaturen. In R. Nothnagel, H. Twelmeier, *Baustoff und Konstruktion - Festschrift zum 60. Geburtstag von Harald Budelmann* (S. 469-476). Braunschweig: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Schmidt, M. (2003). Ultra-Hochleistungsbeton - Ausgangsstoffe, Eigenschaften und Leistungsfähigkeit. In M. Schmidt, E. Fehling, *Ultra-Hochfester Beton; Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa* (Bd. 2). Kassel: Kassel University Press GmbH.

Schneider, U., Horvath, J. (2003). *Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen* (Bd. 8). (E. O.-I. Schneider, Hrsg.) Wien: Inst. für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, TU Wien.

- Siebel, E., Müller, C.* (2003). Geeignete Zemente für die Herstellung von UHFB. In *G. König, K. Holschemacher, & F. Dehn, Ultrahochfester Beton: Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus der Praxis und Wissenschaft* (S. 13-24). Berlin: Bauwerk Verlag GmbH.
- Stangl, A.* (2011). Optimierung der Packungsdichte und Bestimmung der minimal erforderlichen Wasserfilmdicke zur Herstellung von Ultra - Hochleistungsbeton. Diplomarbeit an der TU Wien.
- Stephan, D., Schmidt, M.* (2007). Nanooptimierte Hochleistungswerkstoffe für Hightech Konstruktionen. In *M. Schmidt, E. Fehling, Nanotechnologie im Bauwesen; Nanooptimierte Hightech-Baustoffe* (Bd. 8). Kassel: Kassel University Press GmbH.
- Tang, M.-C.* (2004). High Performance Concrete - Past, Present and Future. In *M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslüke, Ultra High Performance Concrete (UHPC)* (Bd. 3, S. 3-10). Kassel: kassel university press GmbH.
- Tobermorite Mineral Data.* (kein Datum). Abgerufen am 19. August 2016 von <http://webmineral.com/data/Tobermorite.shtml#.V7cFQdSLRlb>
- Toms, M.-L.* (2013). Sachstandsbericht zu ultrahochfesten Beton und Feuerbeton unter besonderer Berücksichtigung der Festigkeitssteigerungen. Diplomarbeit an der TU Wien.
- Wörner, J.-D.* (2002). Kuststofffaserverstärkter Beton. In *G. König, K. Holschemacher, F. Dehn, Faserbeton: Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus der Praxis und Wissenschaft* (S. 153-162). Berlin: Bauwerk Verlag GmbH.
- Xonotlite Mineral Data.* (kein Datum). Abgerufen am 19. August 2016 von <http://webmineral.com/data/Xonotlite.shtml#.V7cOg9SLRlb>
- Zwick GmbH & Co. KG.* (2016). Abgerufen am 09. 09 2016 von [https://www.zwick.de/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku\\_pi/02\\_416\\_z100bis250\\_spm\\_allround\\_tcii\\_pi\\_d.ashx](https://www.zwick.de/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_pi/02_416_z100bis250_spm_allround_tcii_pi_d.ashx)



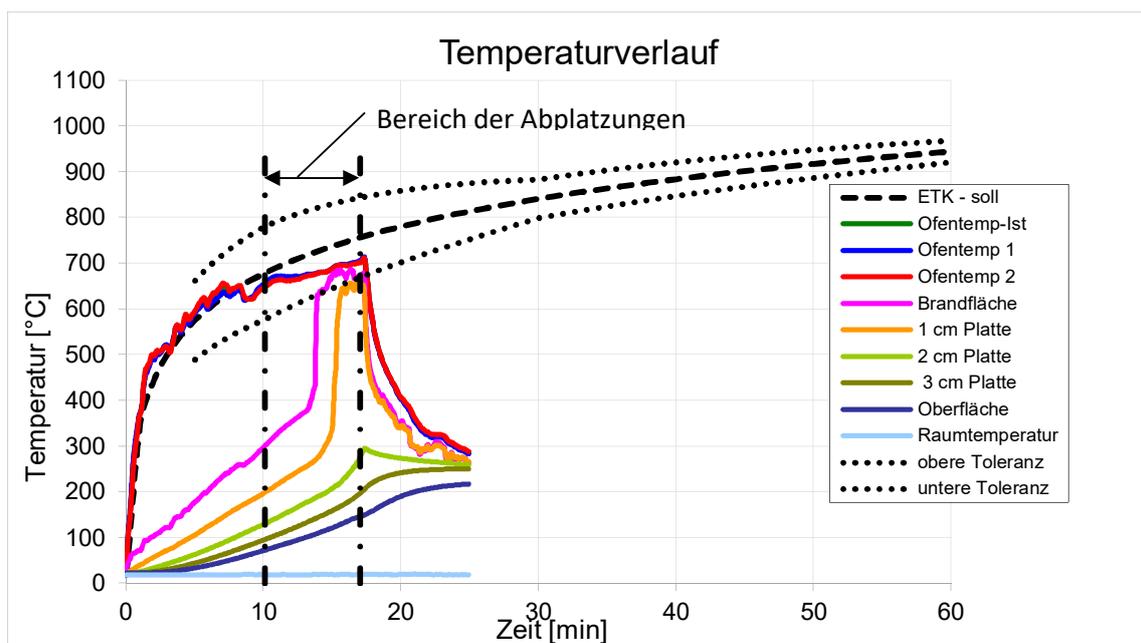
## 8 Anhang

### 8.1 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_K\_1



**Abbildung 8.1:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

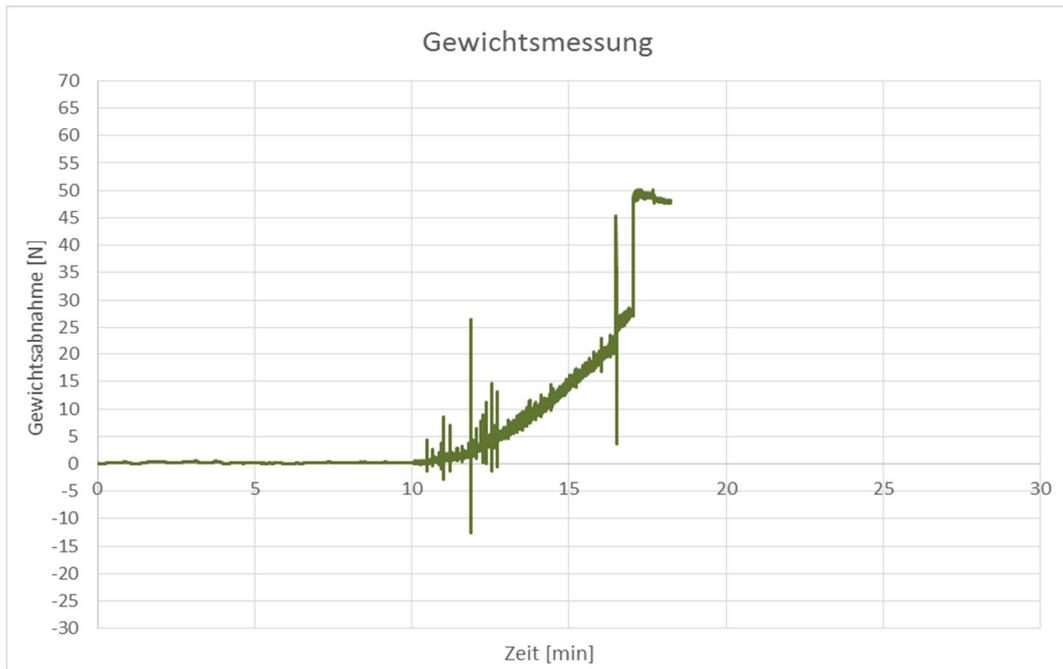
Masse der Platte vor Brandversuch:	6725,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	2889,0 g
Masse abgeplatzt Material:	2381,0 g
Wassergehalt:	4,34 %



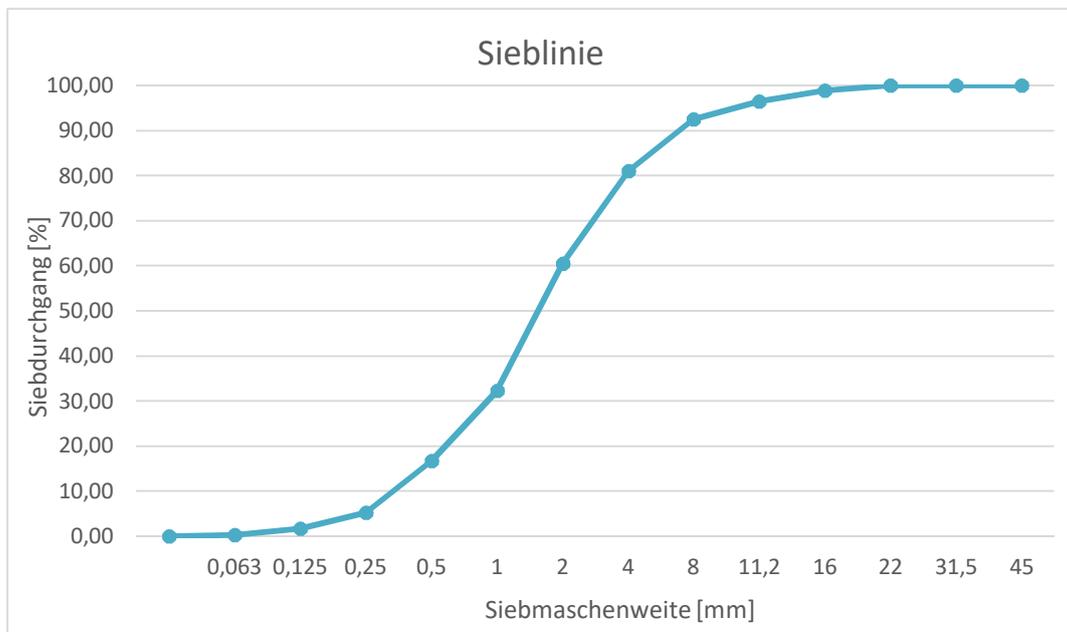
**Abbildung 8.2:** Temperaturverlauf Platte BAS\_K\_1

**Versuchsablauf:**

- 10,08 min Erste Abplatzungen hörbar
- 11,87 min Eine sehr laute, größere Abplatzung
- 17,00 min Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch



**Abbildung 8.3:** Gewichtsmessung Platte BAS\_K\_1



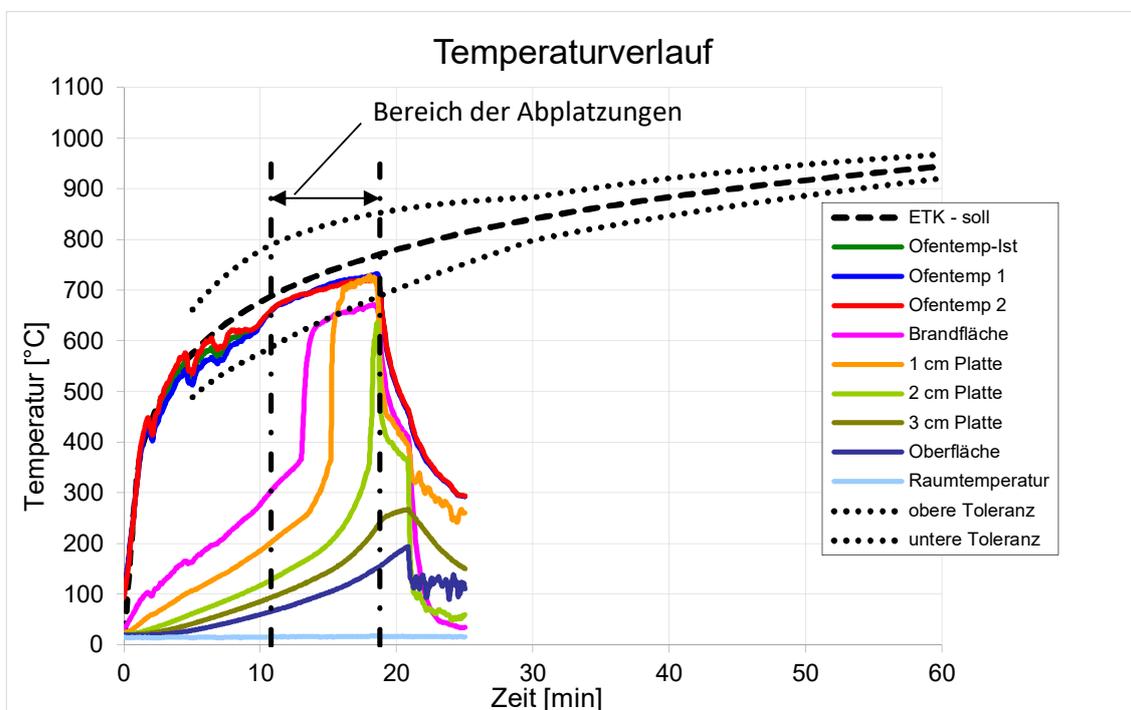
**Abbildung 8.4:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte BAS\_K\_1

## 8.2 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_K\_2



**Abbildung 8.5:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

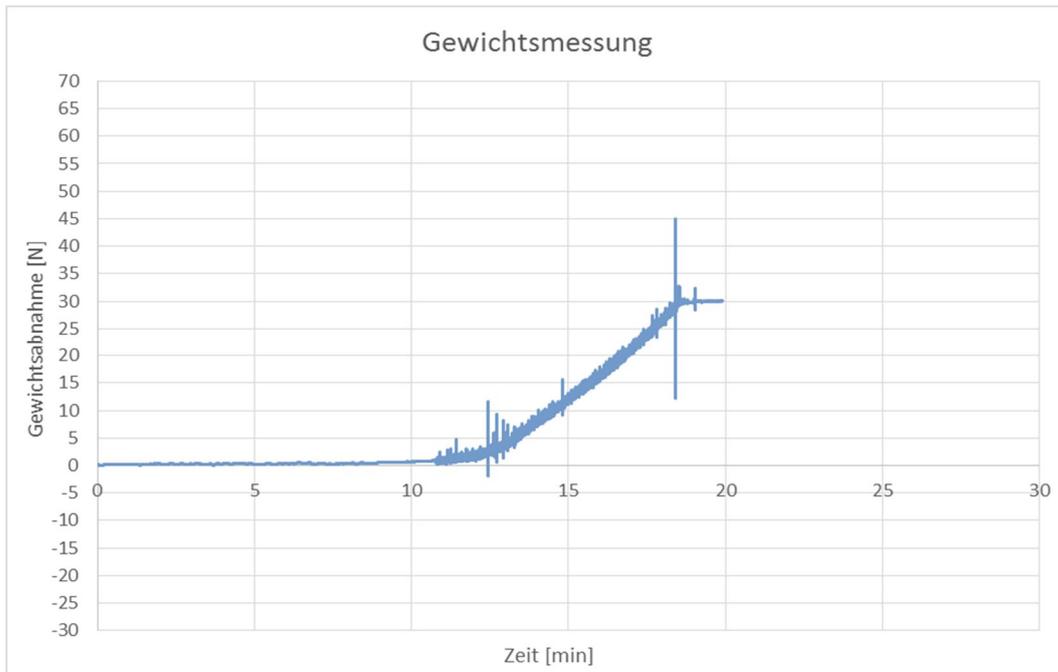
Masse der Platte vor Brandversuch:	6777,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	- g
Masse abgeplatzt Material:	2925,0 g
Wassergehalt:	4,33 %



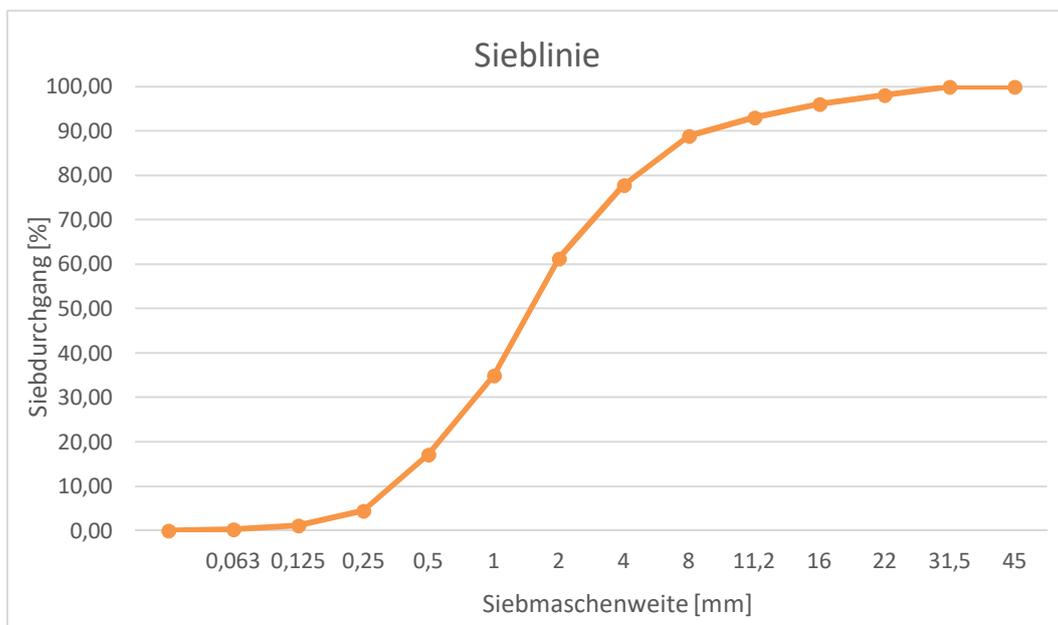
**Abbildung 8.6:** Temperaturverlauf Platte BAS\_K\_2

**Versuchsablauf:**

- 10,75 min Erste Abplatzungen hörbar
- 13,75 min Abplatzungen werden immer lauter
- 18,75 min Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch

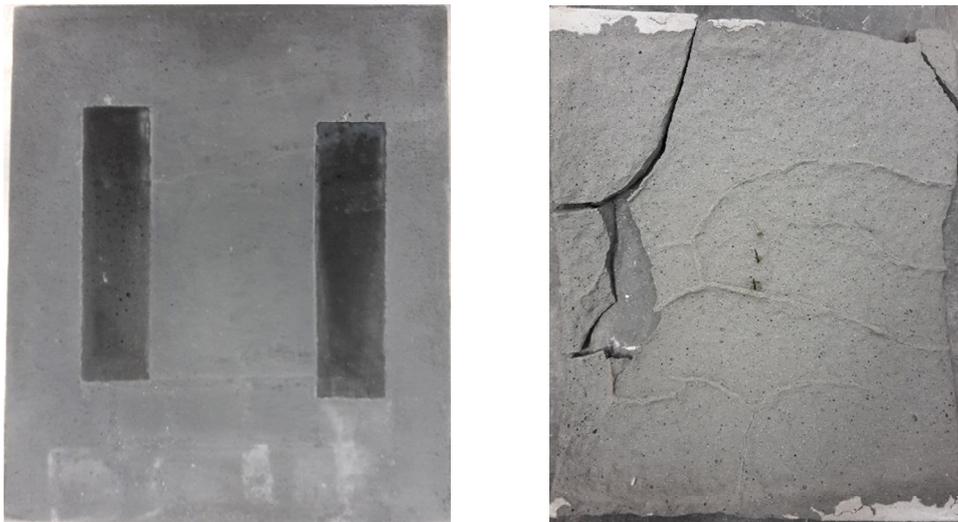


**Abbildung 8.7:** Gewichtsmessung Platte BAS\_K\_2



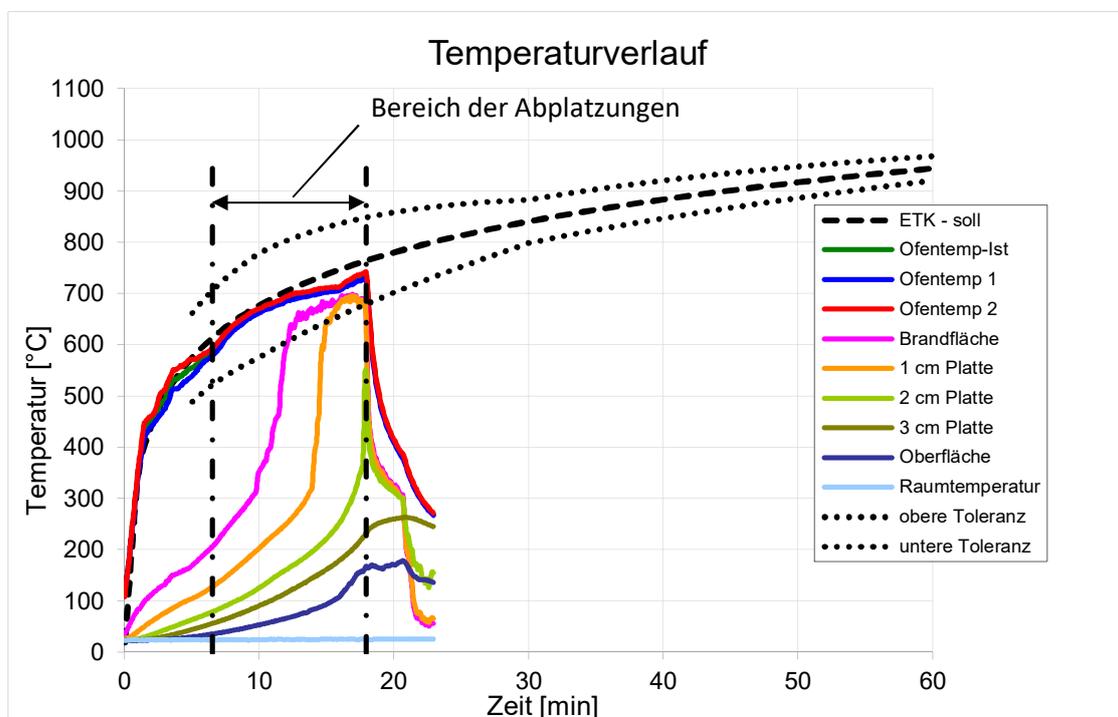
**Abbildung 8.8:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte BAS\_K\_2

### 8.3 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_W\_1



**Abbildung 8.9:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

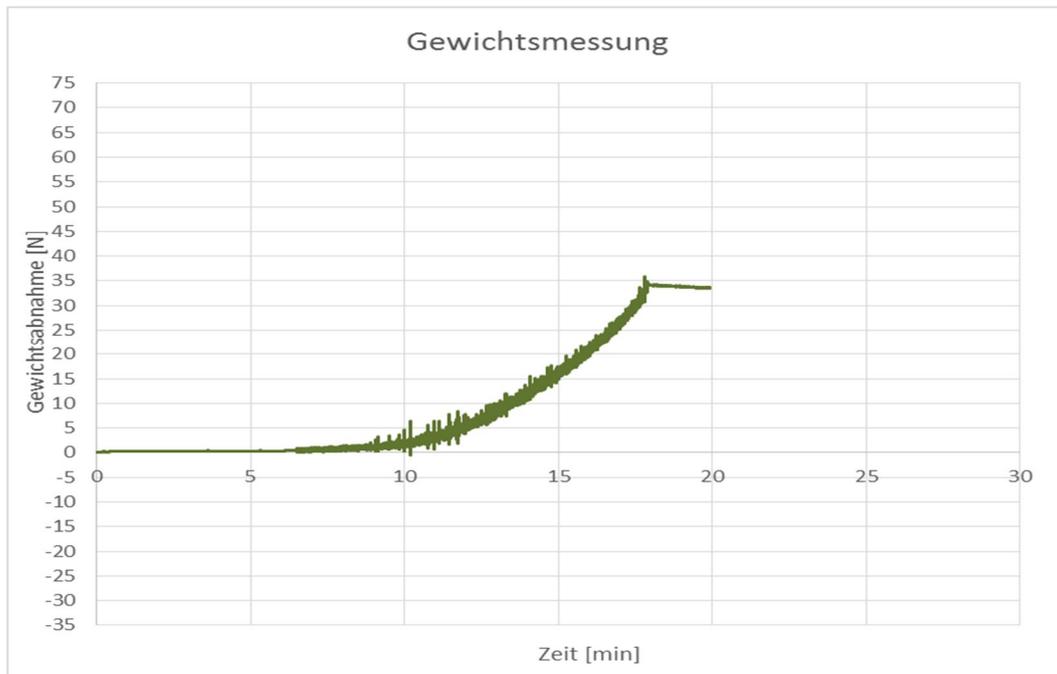
Masse der Platte vor Brandversuch:	6785,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	2751,5 g
Masse abgeplatztes Material:	2874,0 g
Wassergehalt:	4,67 %



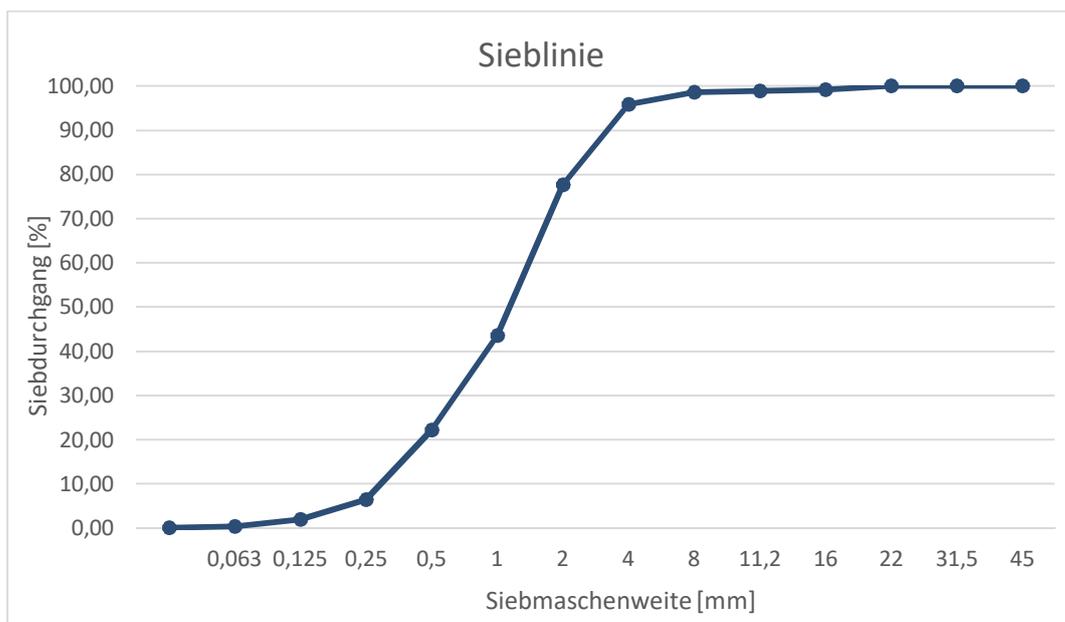
**Abbildung 8.10:** Temperaturverlauf Platte BAS\_W\_1

**Versuchsablauf:**

6,50 min	Erste Abplatzungen hörbar
9,00 min	Abplatzungen werden immer lauter und intensiver
11,75 min	Sehr laute Abplatzungen mit hoher Intensität
17,92 min	Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch

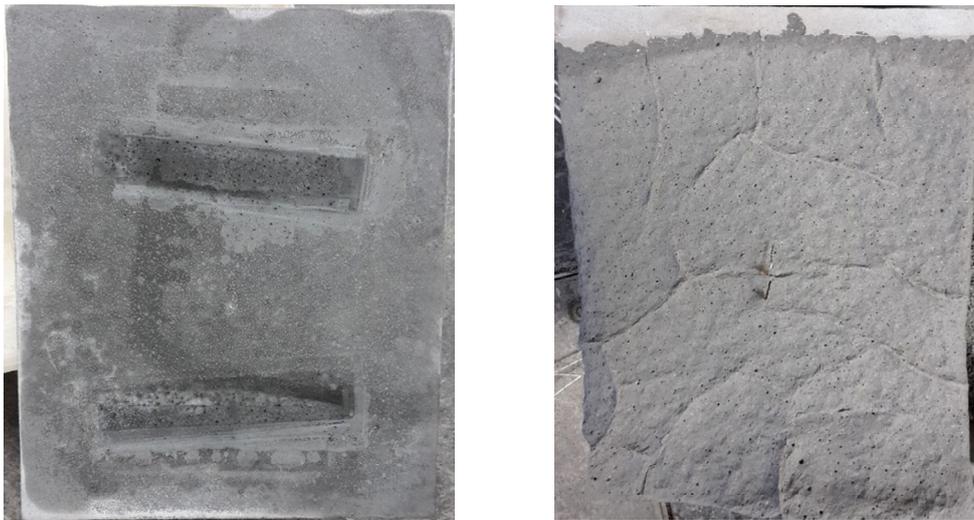


**Abbildung 8.11:** Gewichtsmessung Platte BAS\_W\_1



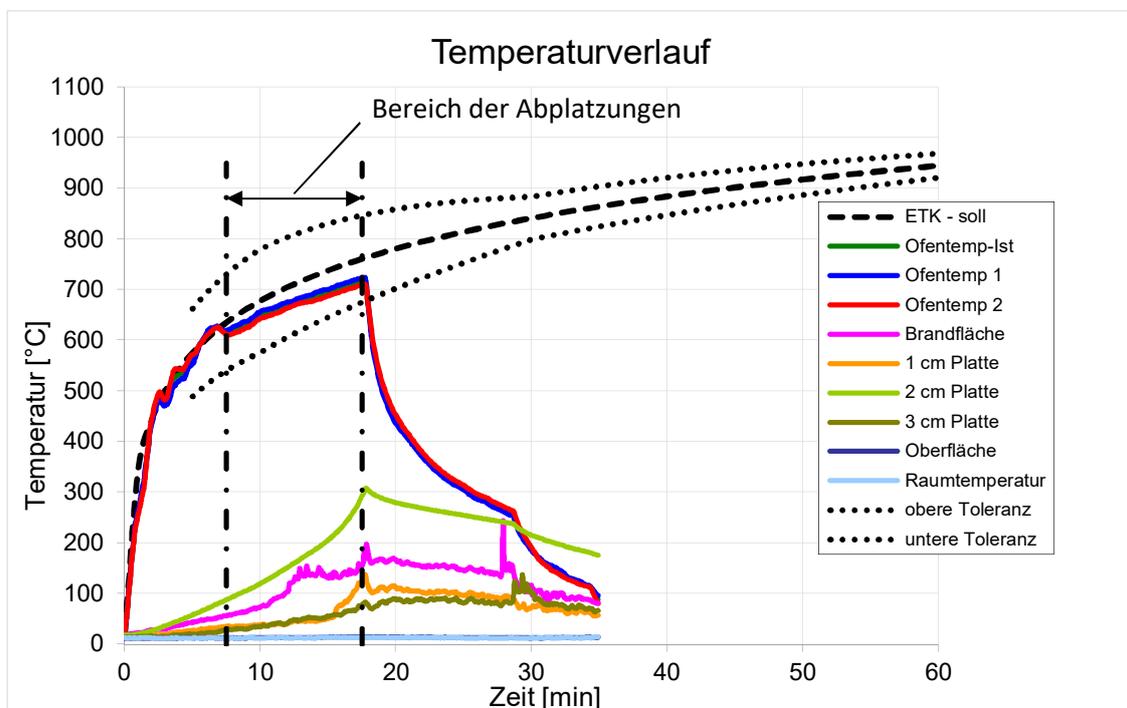
**Abbildung 8.12:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte BAS\_W\_1

## 8.4 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_W\_2



**Abbildung 8.13:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

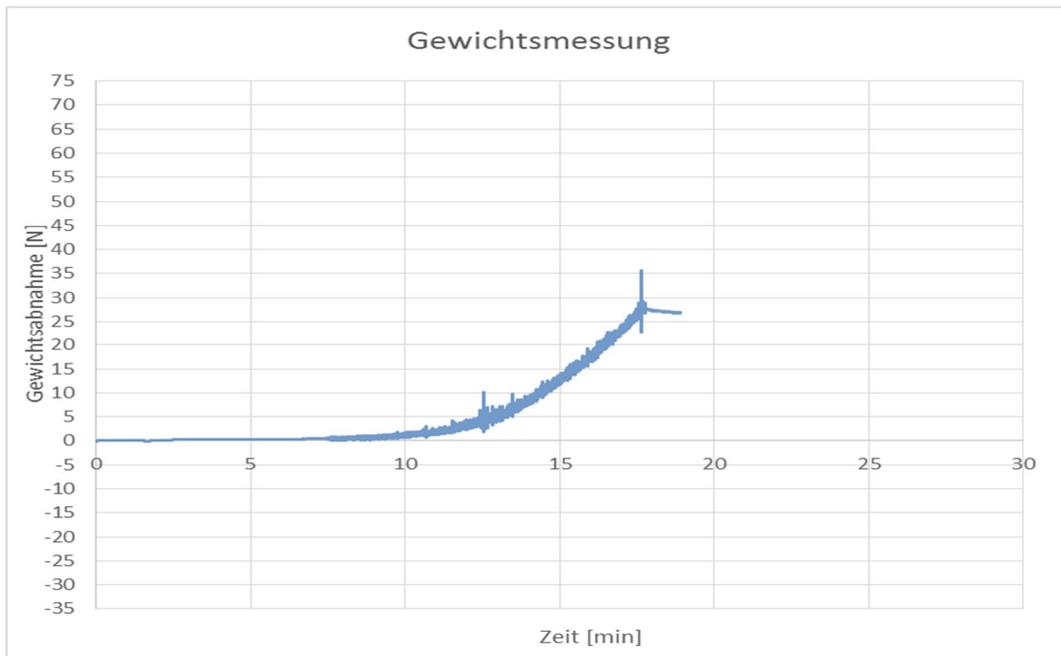
Masse der Platte vor Brandversuch:	6697,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	3807,0 g
Masse abgeplatzt Material:	2417,0 g
Wassergehalt:	4,74 %



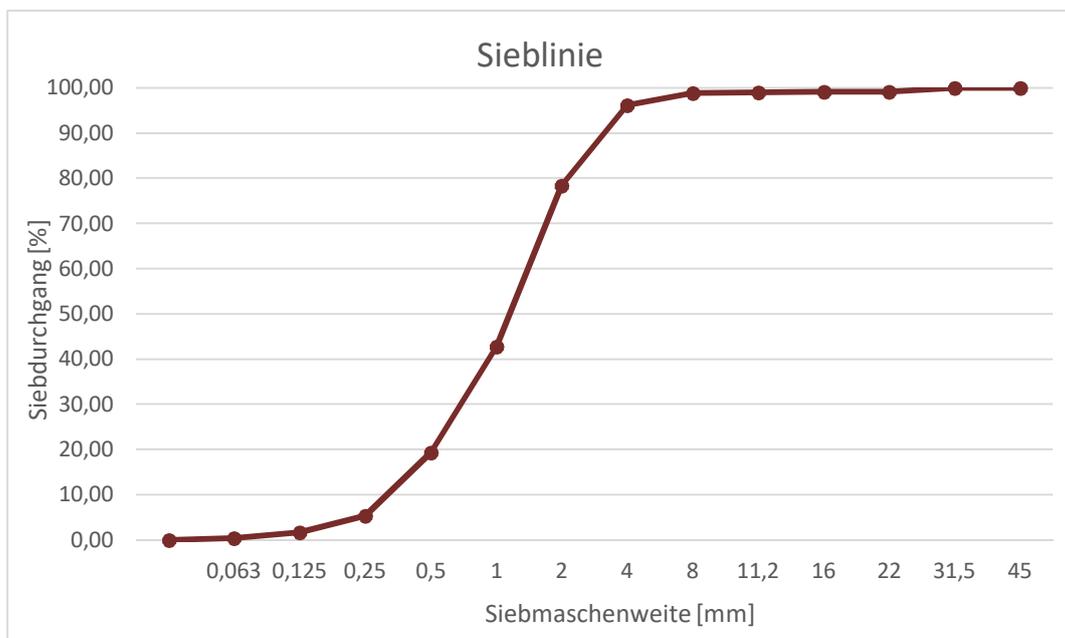
**Abbildung 8.14:** Temperaturverlauf Platte BAS\_W\_2

**Versuchsablauf:**

7,50 min	Erste Abplatzungen hörbar
9,50 min	Abplatzungen werden lauter
12,00 min	Abplatzungen werden immer lauter
17,50 min	Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch

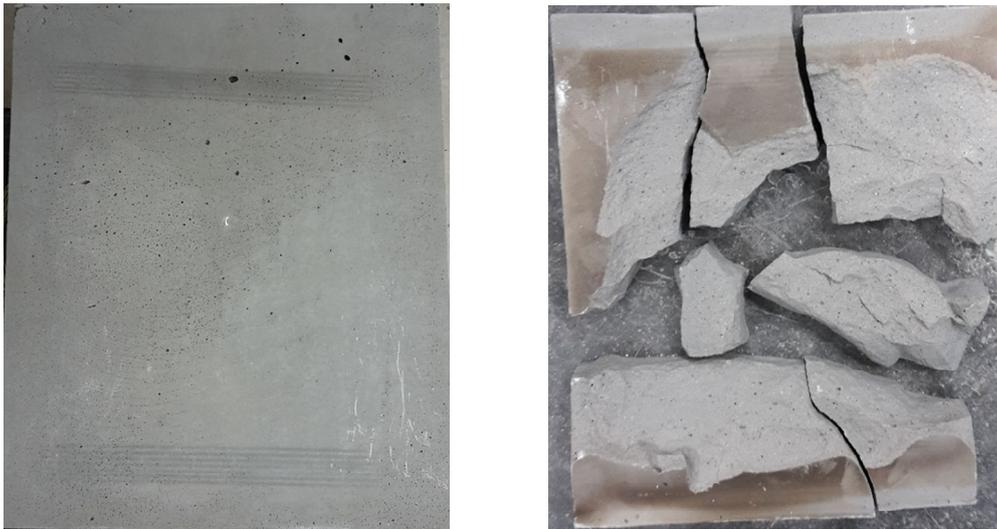


**Abbildung 8.15:** Gewichtsmessung Platte BAS\_W\_2



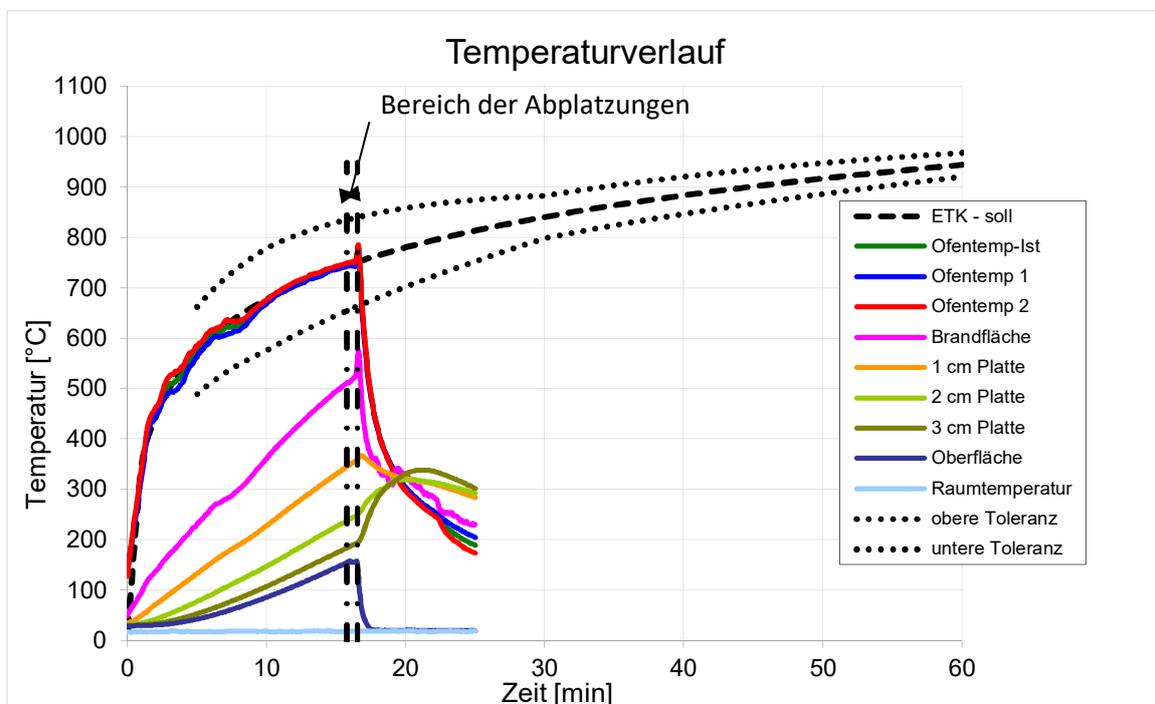
**Abbildung 8.16:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte BAS\_W\_2

## 8.5 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_L105\_1



**Abbildung 8.17:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

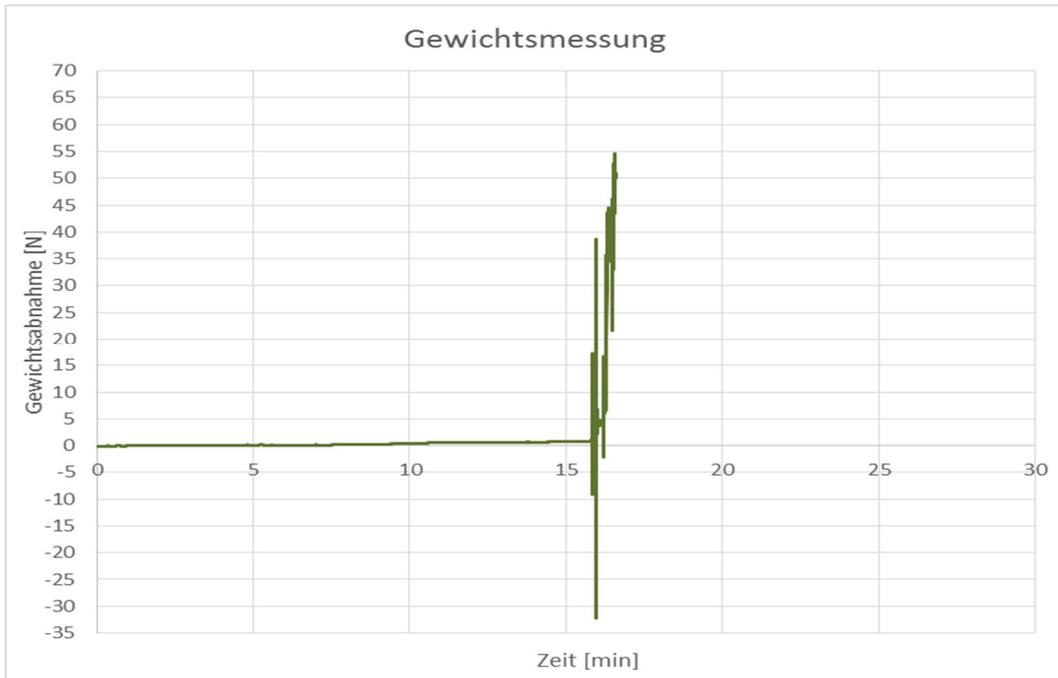
Masse der Platte vor Brandversuch:	6568,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	- g
Masse abgeplatztes Material:	1226,5 g
Wassergehalt:	0,00 %



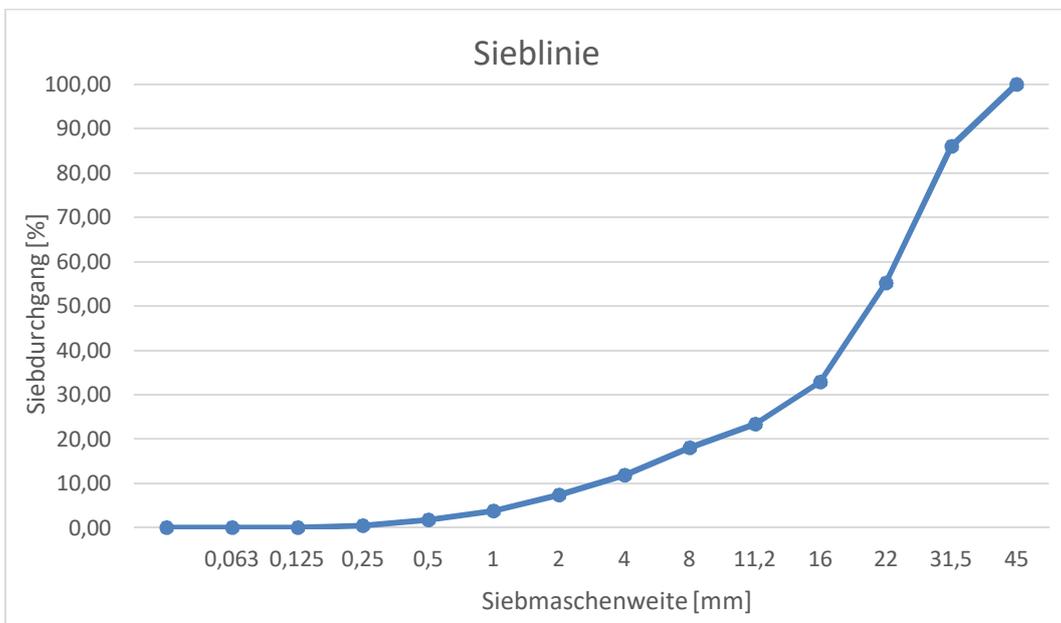
**Abbildung 8.18:** Temperaturverlauf Platte BAS\_L105\_1

**Versuchsablauf:**

- 15,75 min Erste Abplatzungen hörbar (sehr laut)
- 16,50 min Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch



**Abbildung 8.19:** Gewichtsmessung Platte BAS\_L105\_1



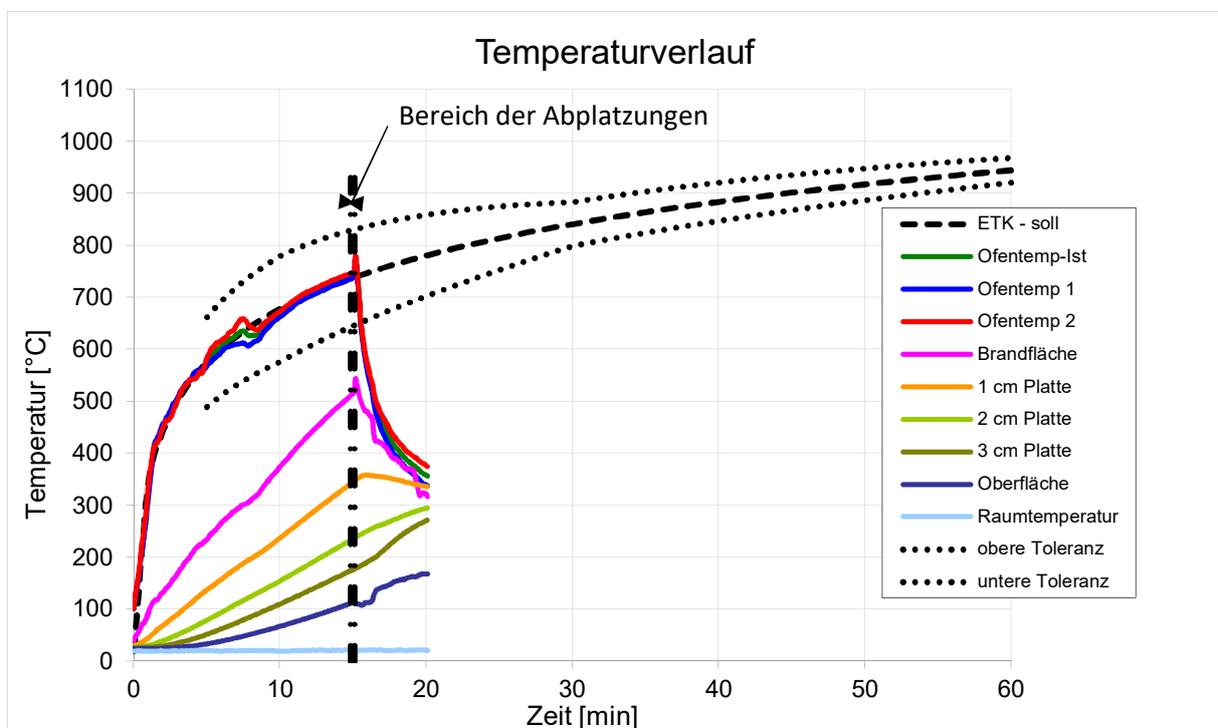
**Abbildung 8.20:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte BAS\_L105\_1

## 8.6 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_L105\_2



**Abbildung 8.21:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

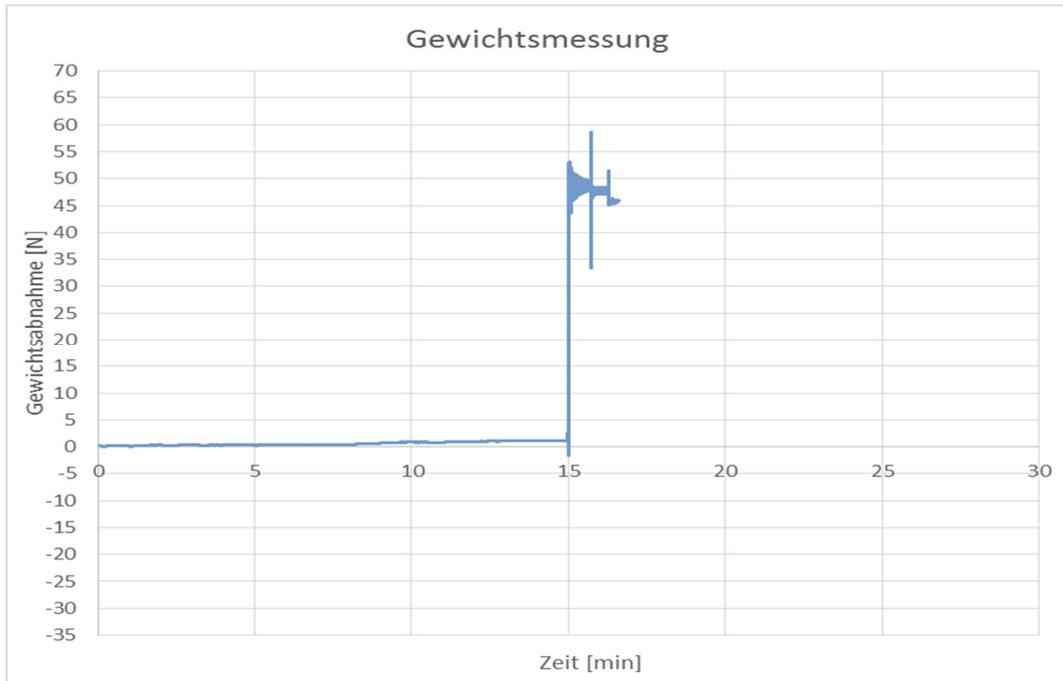
Masse der Platte vor Brandversuch:	6462,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	- g
Masse abgeplatztes Material:	825,5 g
Wassergehalt:	0,00 %



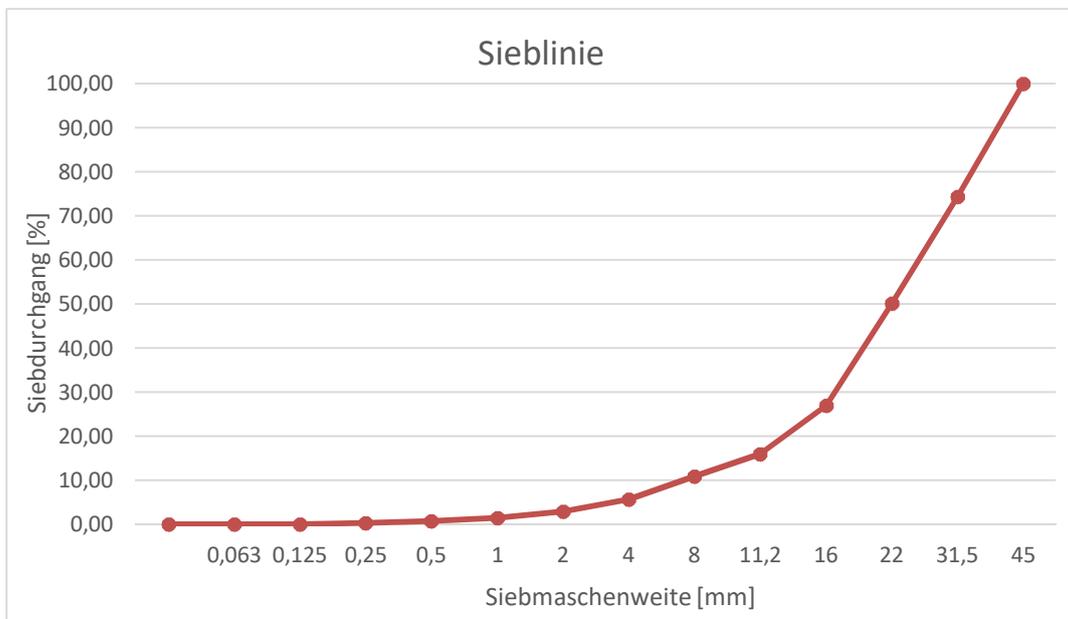
**Abbildung 8.22:** Temperaturverlauf Platte BAS\_L105\_2

**Versuchsablauf:**

14,80 min Erste Abplatzungen hörbar (sehr laut)  
 15,08 min Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch

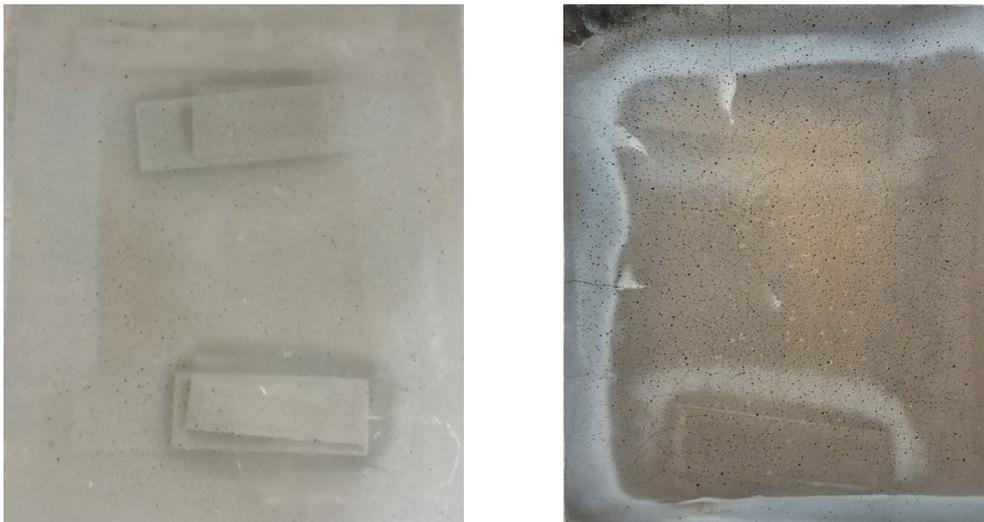


**Abbildung 8.23:** Gewichtsmessung Platte BAS\_L105\_2



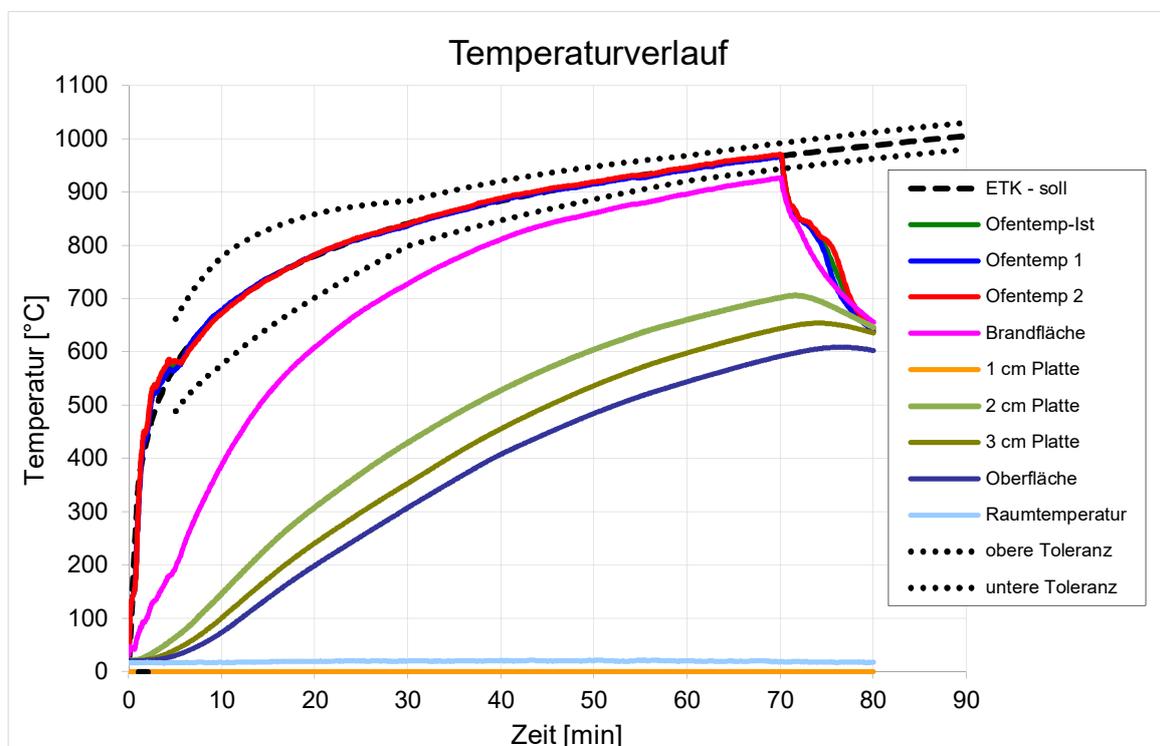
**Abbildung 8.24:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte BAS\_L105\_2

## 8.7 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_L250\_K\_1



**Abbildung 8.25:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

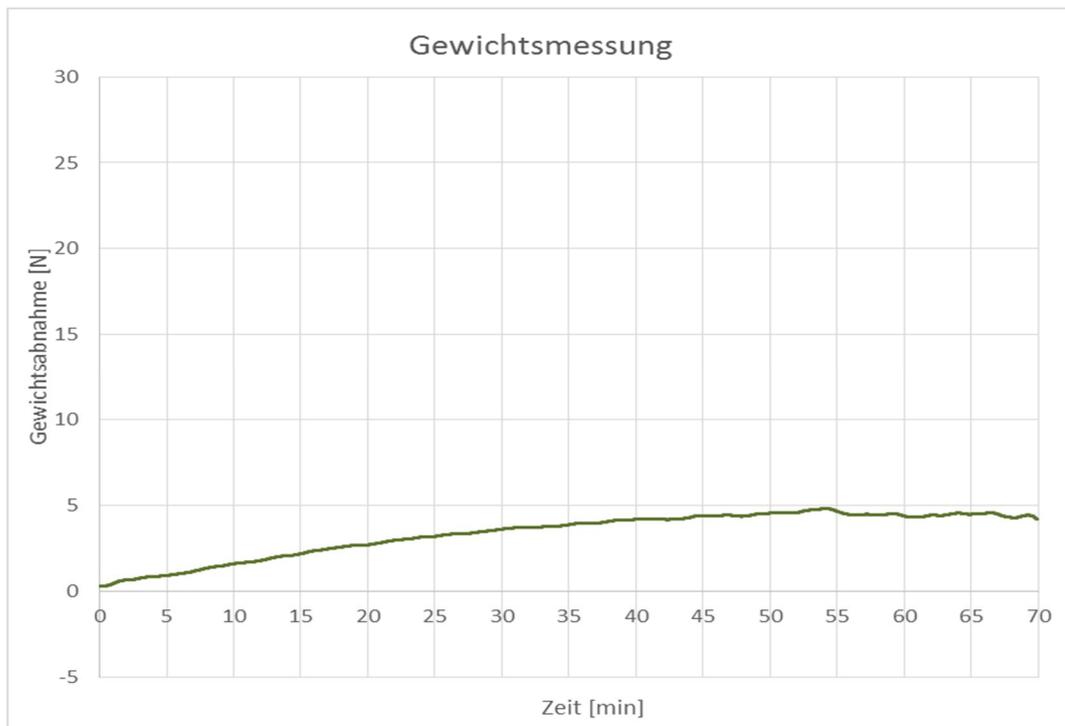
Masse der Platte vor Brandversuch:	6400,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6190,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,03 %



**Abbildung 8.26:** Temperaturverlauf Platte BAS\_L250\_K\_1

**Versuchsablauf:**

Keine Vorkommnisse  
70,00 min Versuchsende



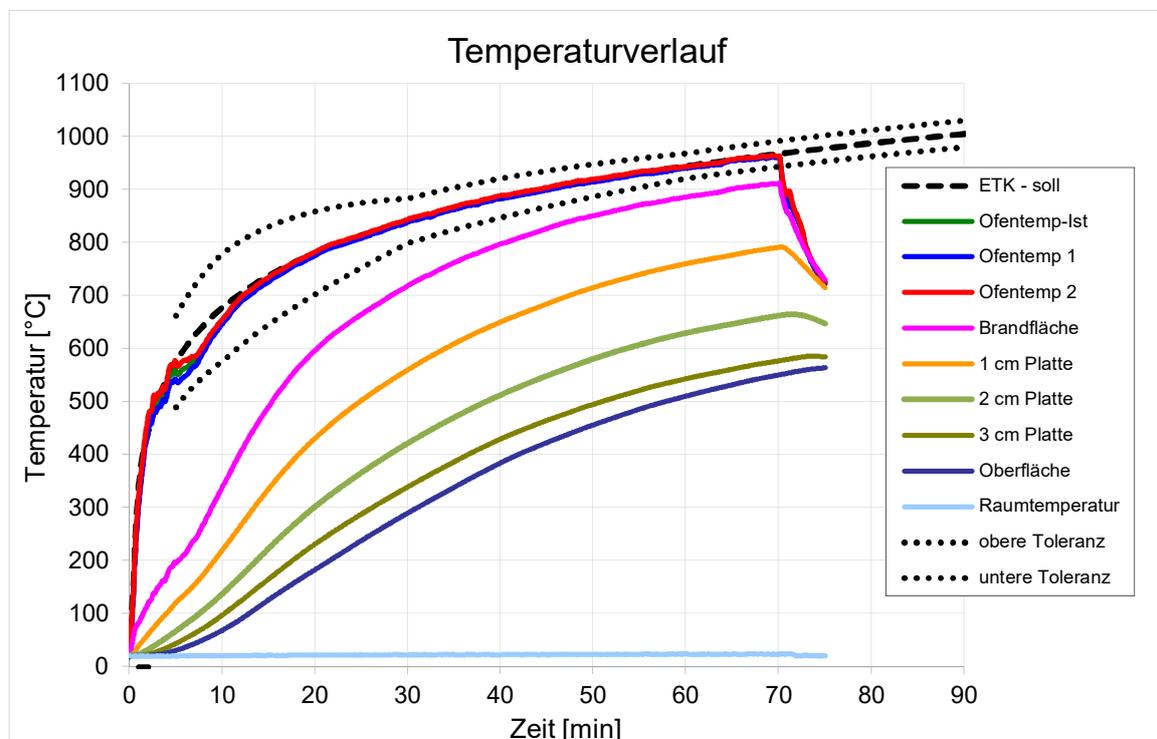
**Abbildung 8.27:** Gewichtsmessung Platte BAS\_L250\_K\_1

## 8.8 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_L250\_K\_2



**Abbildung 8.28:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

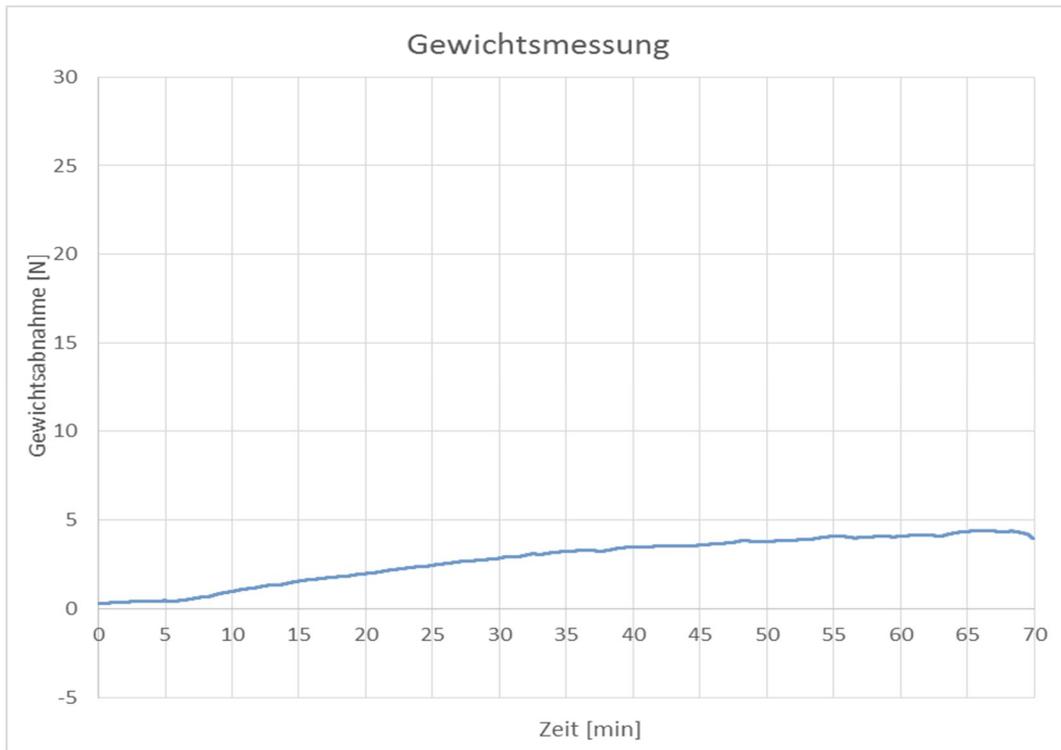
Masse der Platte vor Brandversuch:	6441,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6208,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,10 %



**Abbildung 8.29:** Temperaturverlauf Platte BAS\_L250\_K\_2

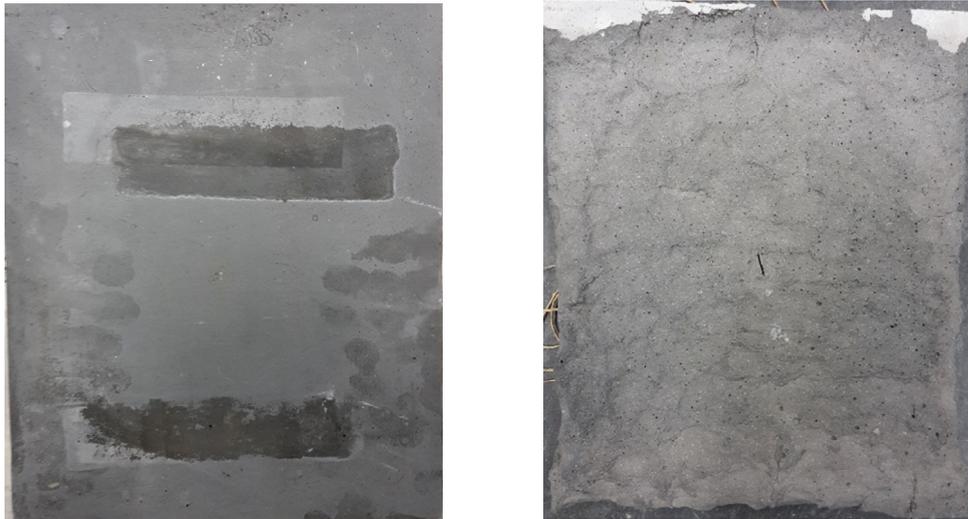
**Versuchsablauf:**

4,50 min      Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min    Versuchsende



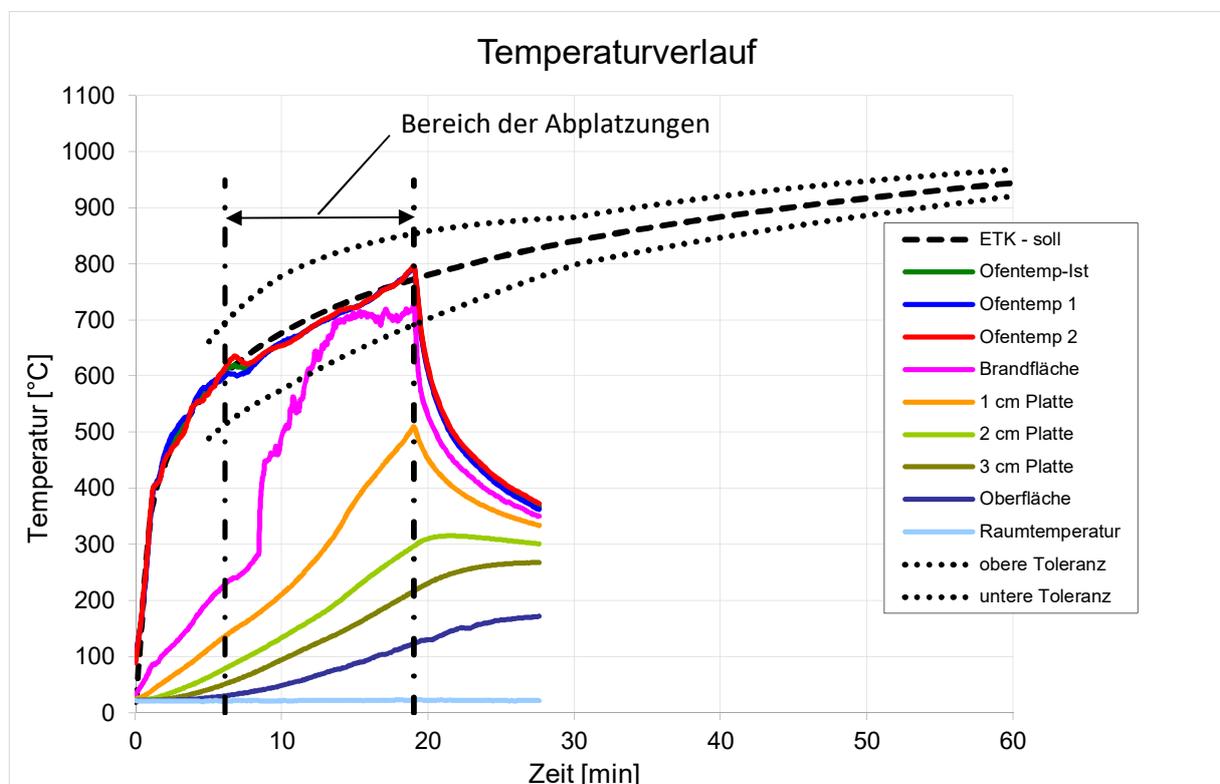
**Abbildung 8.30:** Gewichtsmessung Platte BAS\_L250\_K\_2

## 8.9 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_L250\_W\_1



**Abbildung 8.31:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

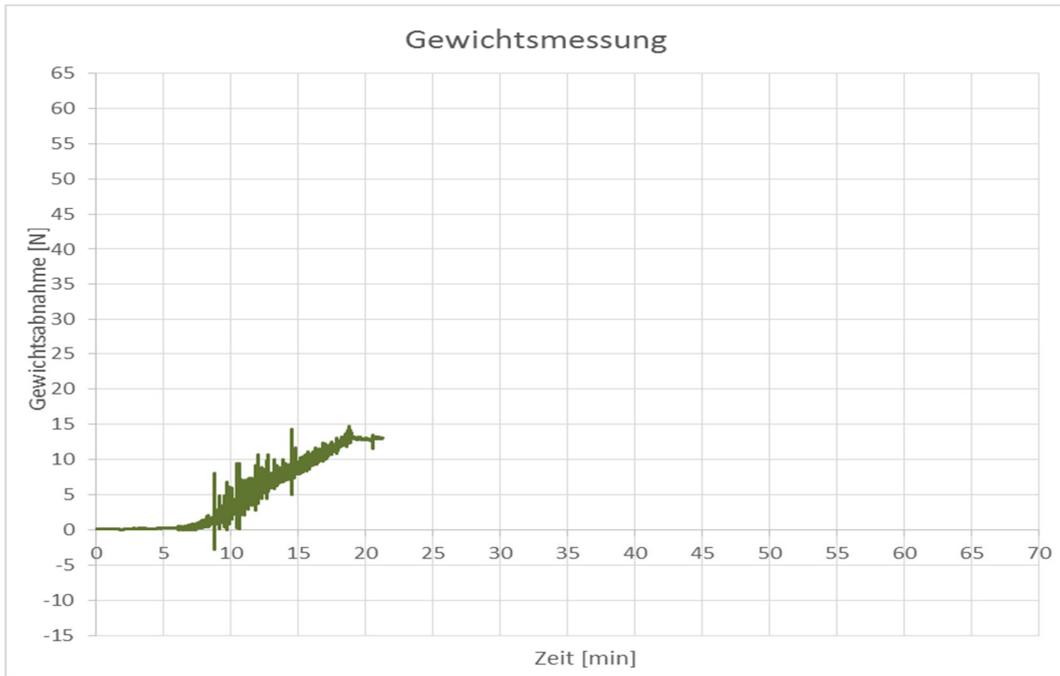
Masse der Platte vor Brandversuch:	6775,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5370,0 g
Masse abgeplatzt Material:	1035,5 g
Wassergehalt:	3,09 %



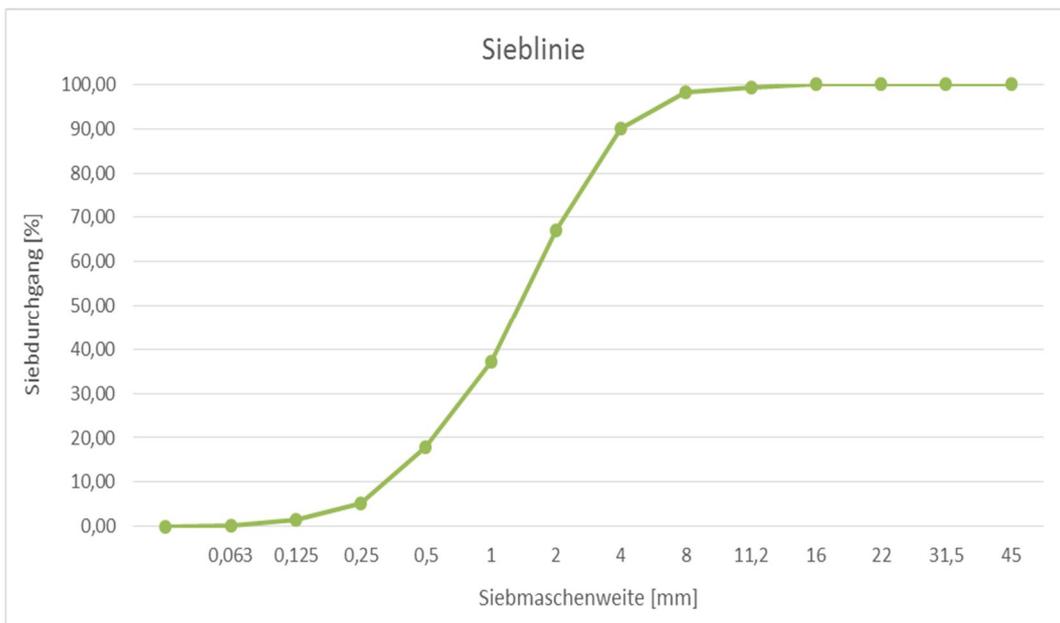
**Abbildung 8.32:** Temperaturverlauf Platte BAS\_L250\_W\_1

**Versuchsablauf:**

- 6,08 min Erste Abplatzungen hörbar
- 8,30 min Eine sehr laute, größere Abplatzung
- 15,00 min Abplatzungen werden weniger (alle 2-3 Sekunden)
- 18,30 min Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch



**Abbildung 8.33:** Gewichtsmessung Platte BAS\_L250\_W\_1



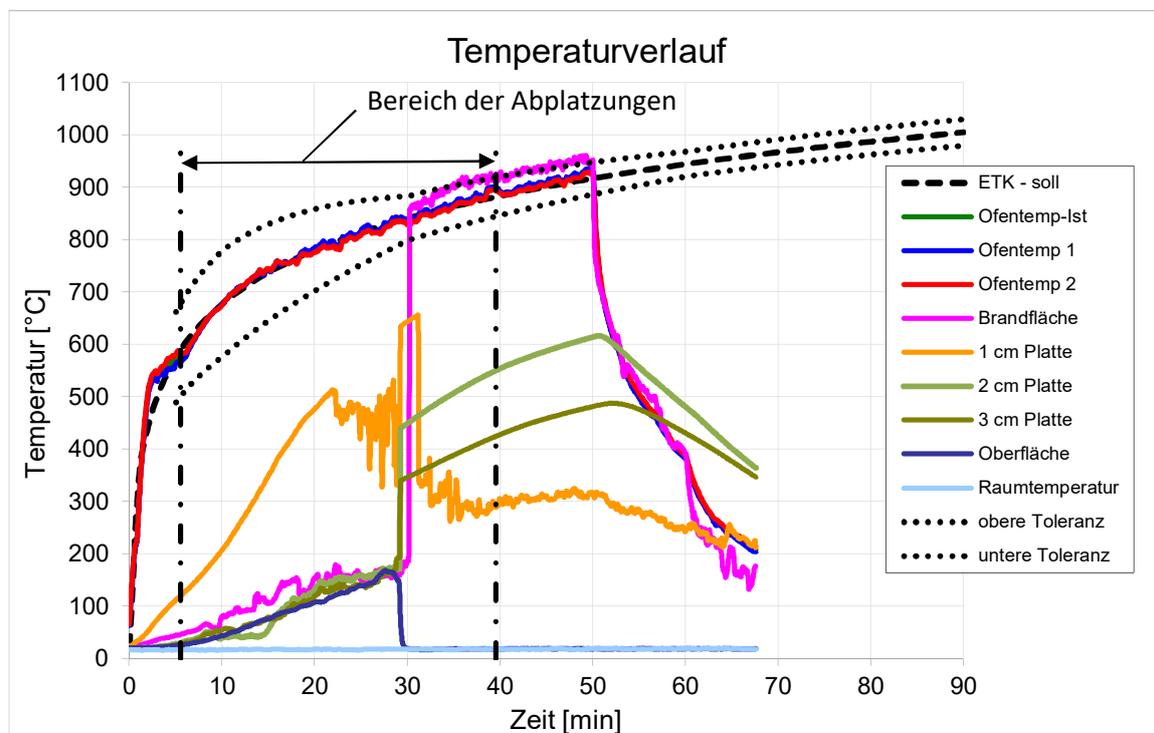
**Abbildung 8.34:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte BAS\_L250\_W\_1

## 8.10 Brandversuchsprotokoll Platte BAS\_L250\_W\_2



**Abbildung 8.35:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

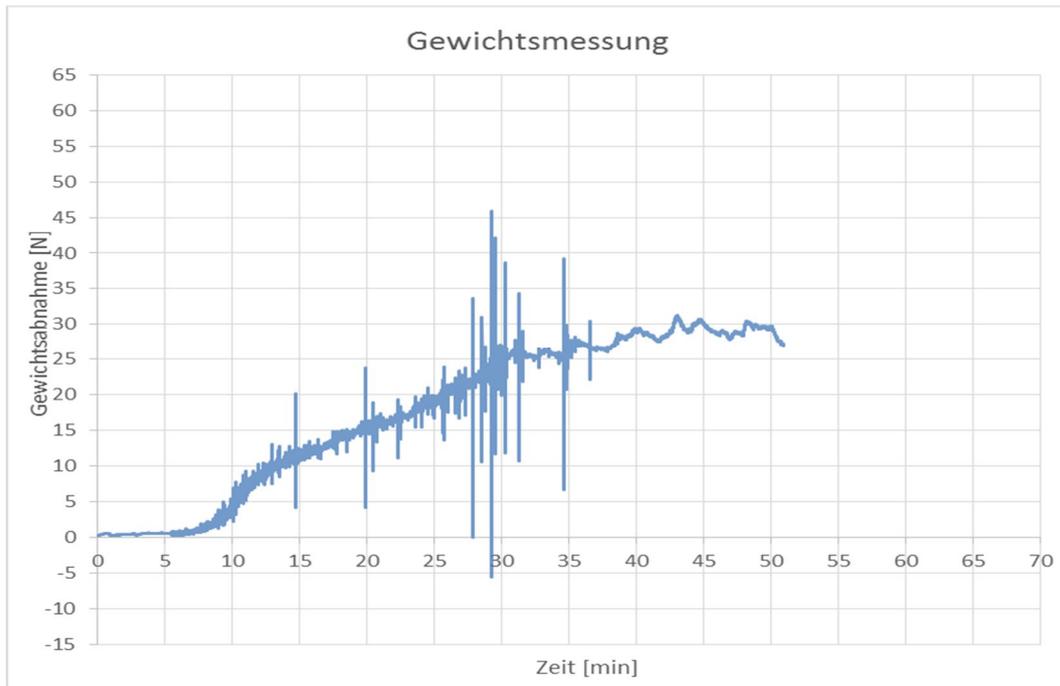
Masse der Platte vor Brandversuch:	6650,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	4007,0 g
Masse abgeplatzt Material:	1717,5 g
Wassergehalt:	3,14 %



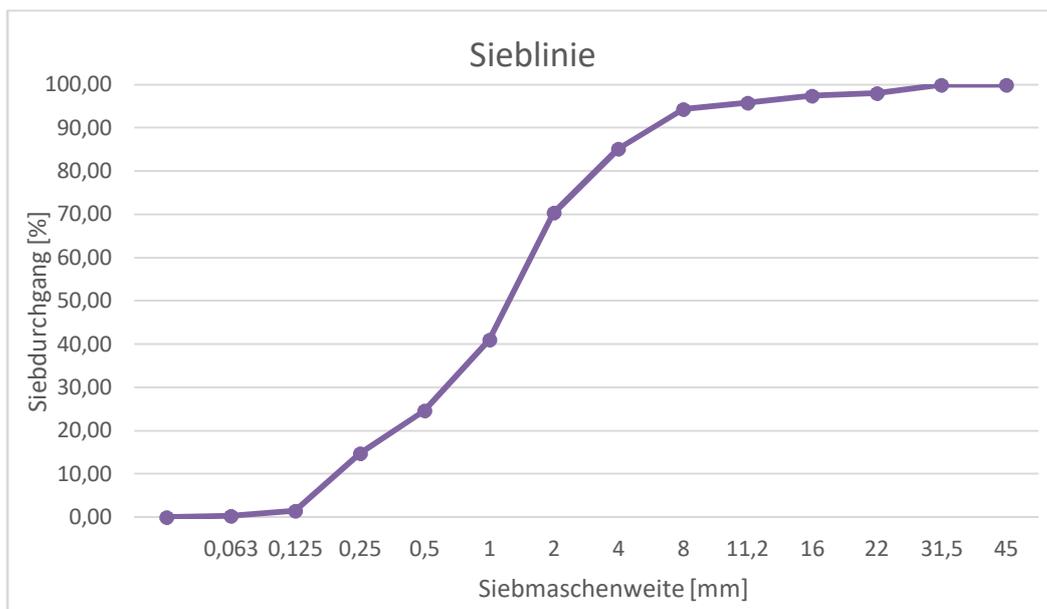
**Abbildung 8.36:** Temperaturverlauf Platte BAS\_L250\_W\_2

**Versuchsablauf:**

5,50 min	Erste Abplatzungen hörbar
14,75 min	Eine sehr laute größere Abplatzung
20,30 min	Einzelne sehr laute Abplatzungen; Abplatzungen werden weniger (alle 2-3 Sekunden)
32,25 min	Abplatzungen werden immer weniger (alle 3-5 Sekunden)
38,00 min	Abplatzungen haben aufgehört
50,00 min	Versuchsende (Gas leer)



**Abbildung 8.37:** Gewichtsmessung Platte BAS\_L250\_W\_2



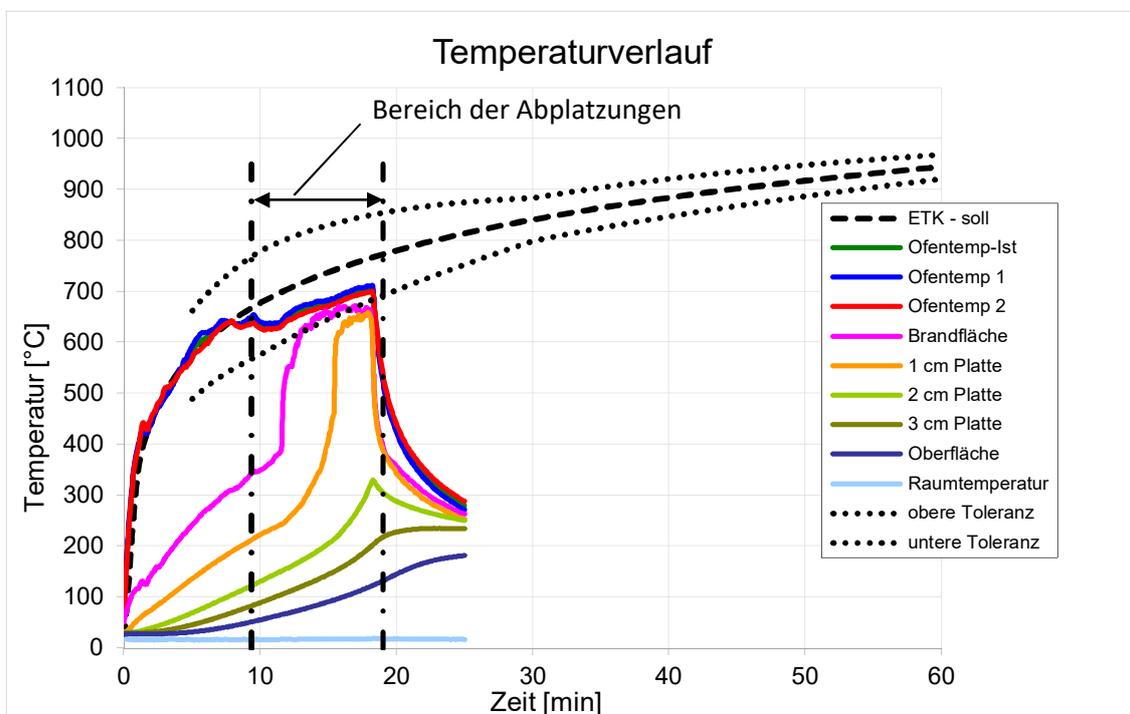
**Abbildung 8.38:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte BAS\_L250\_W\_2

### 8.11 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_K\_1



**Abbildung 8.39:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

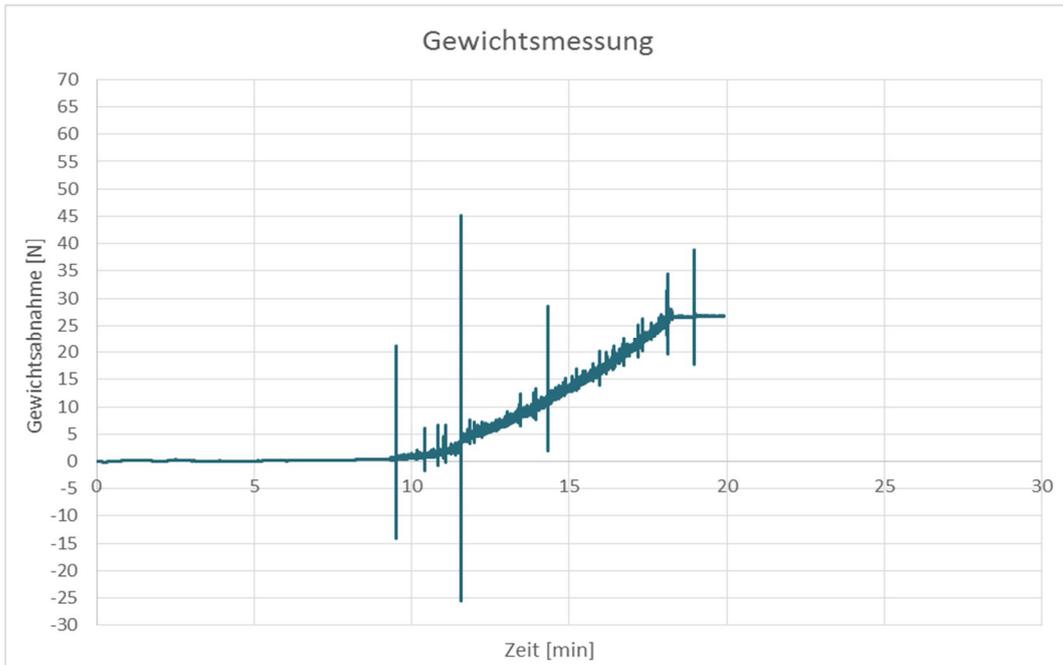
Masse der Platte vor Brandversuch:	5842,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	2442,5 g
Masse abgeplatzt Material:	2307,0 g
Wassergehalt:	5,35 %



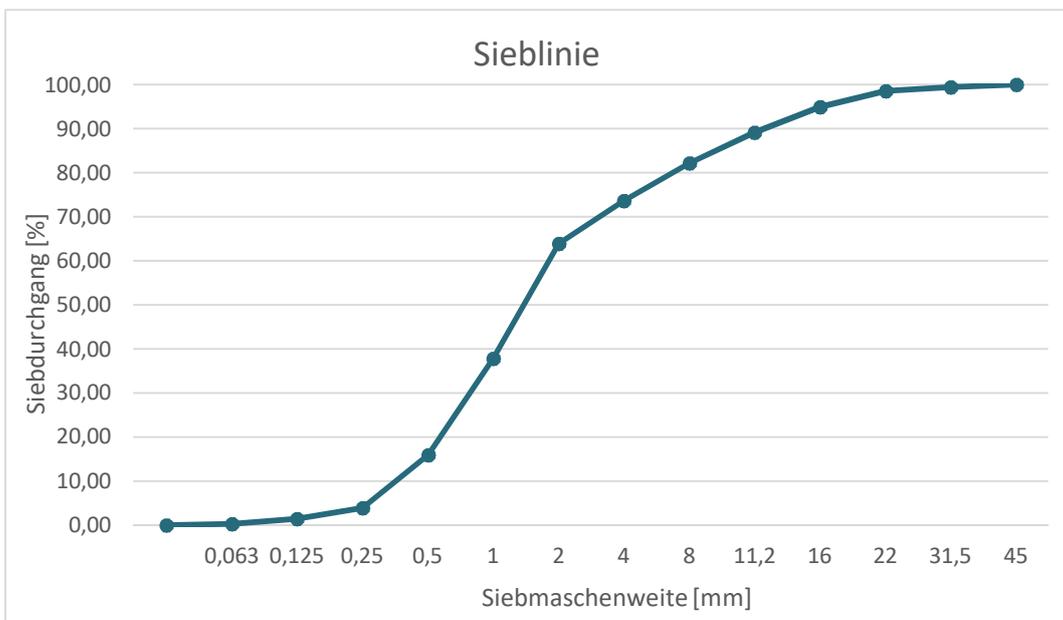
**Abbildung 8.40:** Temperaturverlauf Platte MHG\_K\_1

**Versuchsablauf:**

- 9,33 min     Erste Abplatzungen hörbar
- 11,55 min   Eine sehr laute größere Abplatzung
- 14,33 min   Eine sehr laute größere Abplatzung
- 19,00 min   Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch

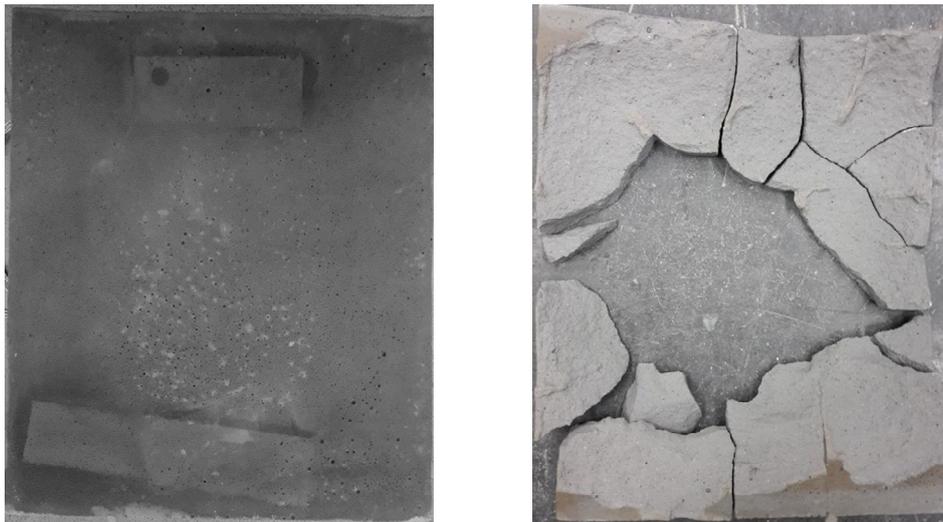


**Abbildung 8.41:** Gewichtsmessung Platte MHG\_K\_1



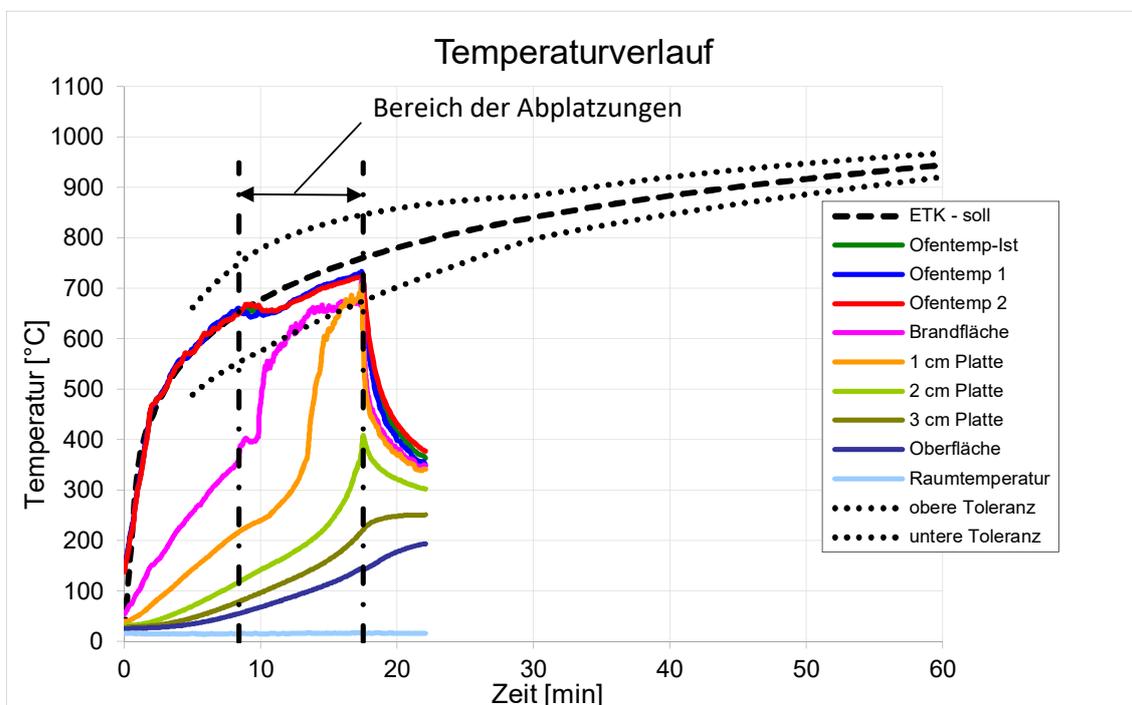
**Abbildung 8.42:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte MHG\_K\_1

## 8.12 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_K\_2



**Abbildung 8.43:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

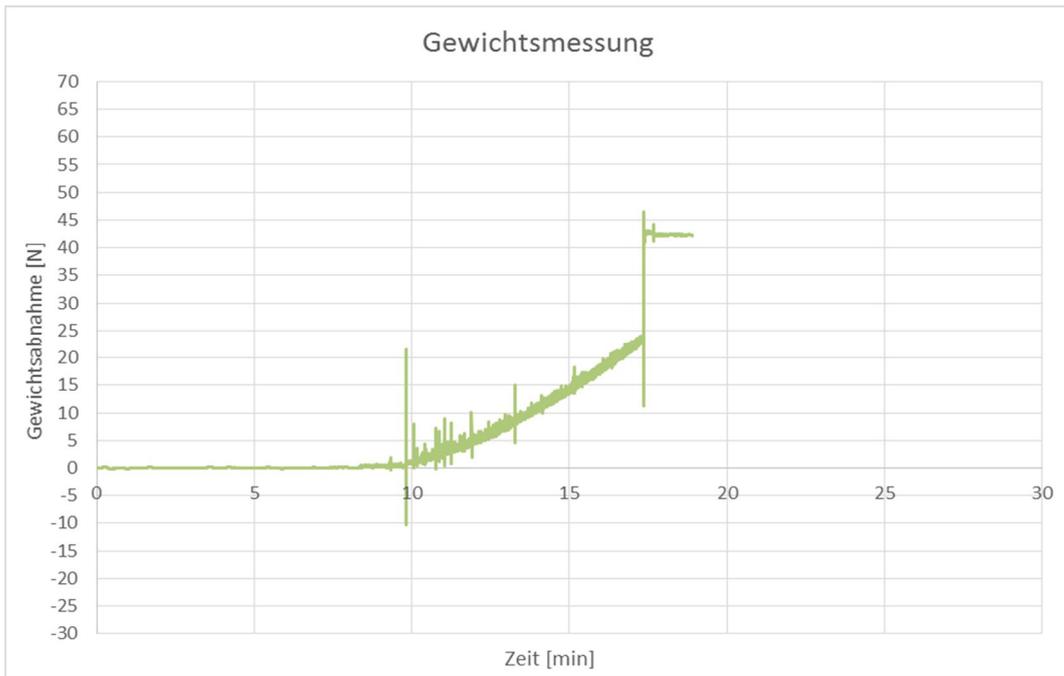
Masse der Platte vor Brandversuch:	5731,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	- g
Masse abgeplatzt Material:	2694,5 g
Wassergehalt:	5,36 %



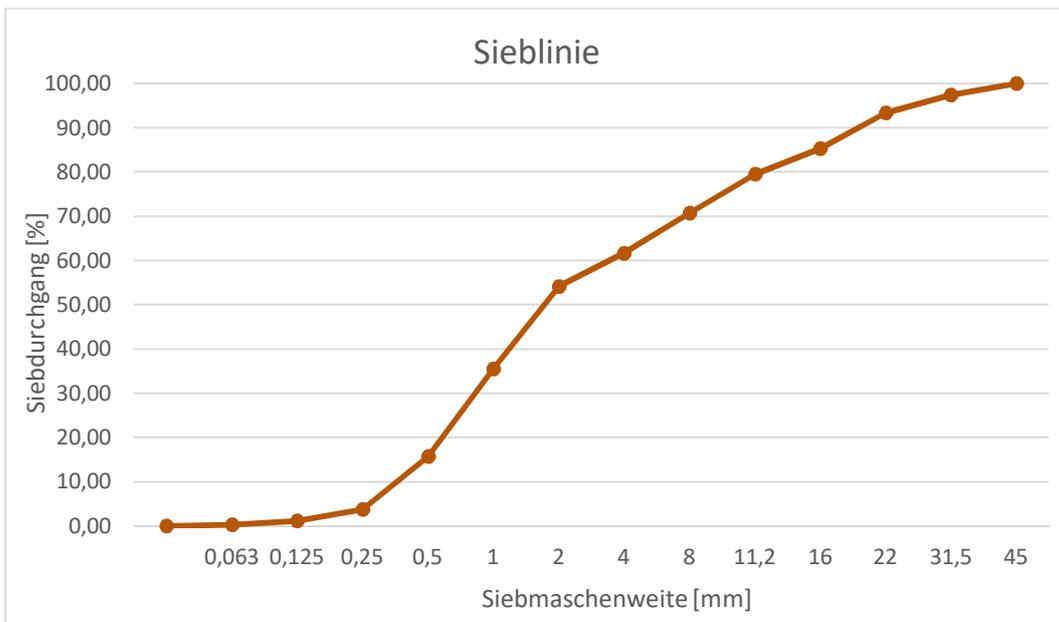
**Abbildung 8.44:** Temperaturverlauf Platte MHG\_K\_2

**Versuchsablauf:**

- 8,38 min      Erste Abplatzungen hörbar
- 9,67 min      Eine sehr laute, größere Abplatzung
- 17,50 min     Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch

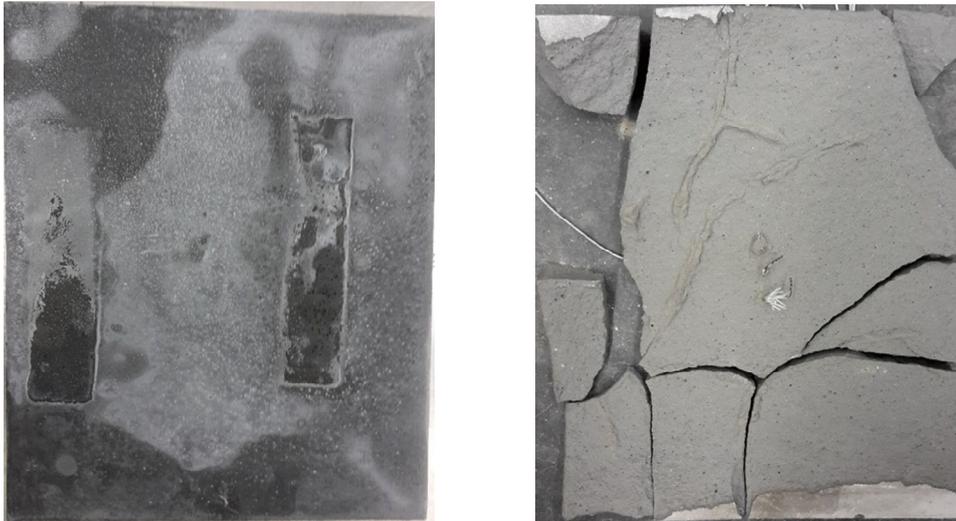


**Abbildung 8.45:** Gewichtsmessung Platte MHG\_K\_2



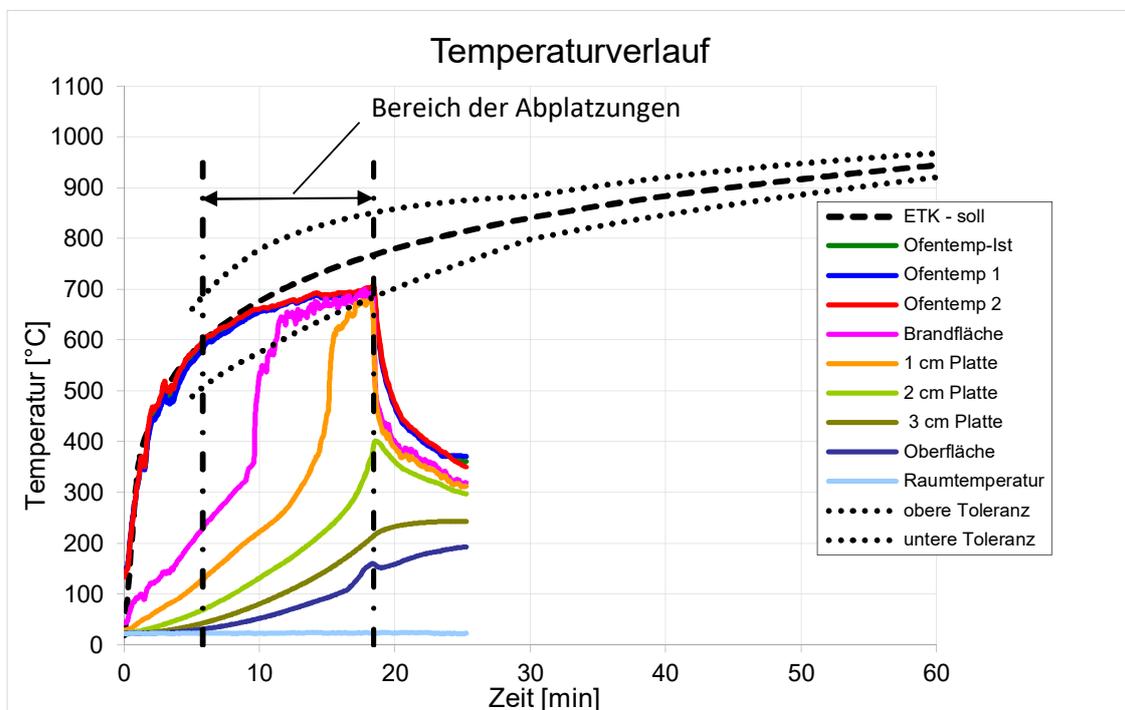
**Abbildung 8.46:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte MHG\_K\_2

### 8.13 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_W\_1



**Abbildung 8.47:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

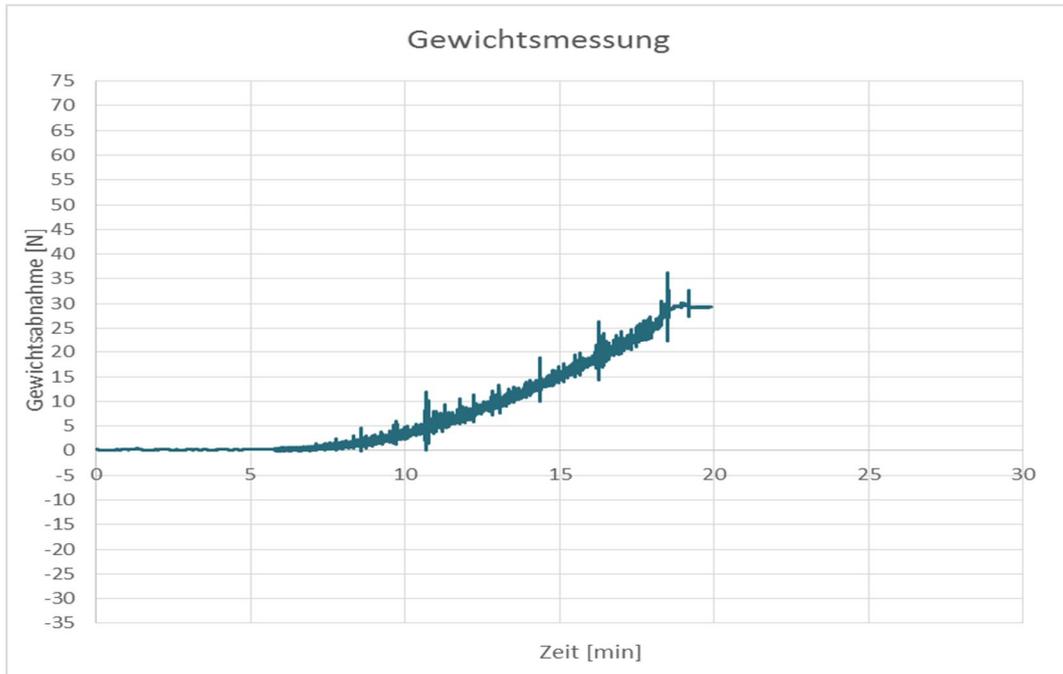
Masse der Platte vor Brandversuch:	5843,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	- g
Masse abgeplatzt Material:	2440,0 g
Wassergehalt:	6,37 %



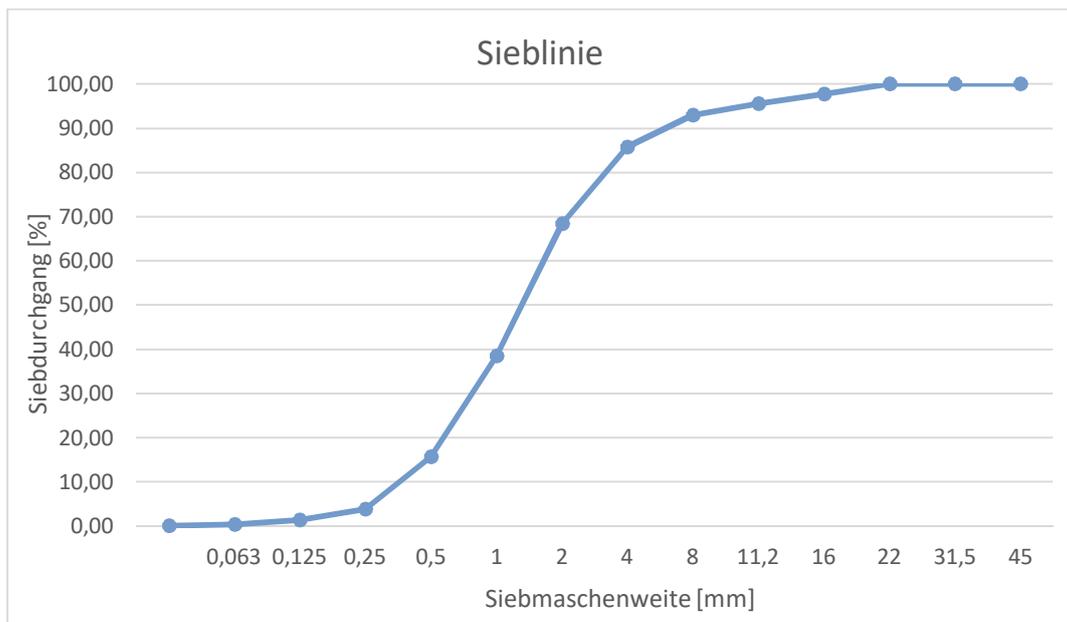
**Abbildung 8.48:** Temperaturverlauf Platte MHG\_W\_1

**Versuchsablauf:**

- 5,78 min Erste Abplatzungen hörbar
- 6,68 min Abplatzungen werden immer lauter und intensiver
- 15,00 min Abplatzungen sehr laut
- 18,40 min Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch



**Abbildung 8.49:** Gewichtsmessung Platte MHG\_W\_1



**Abbildung 8.50:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte MHG\_W\_1

### 8.14 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_W\_2



**Abbildung 8.51:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (rechts); nach Brandversuch (links)

Masse der Platte vor Brandversuch:	6025,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	3167,0 g
Masse abgeplatzt Material:	2226,0 g
Wassergehalt:	6,41 %

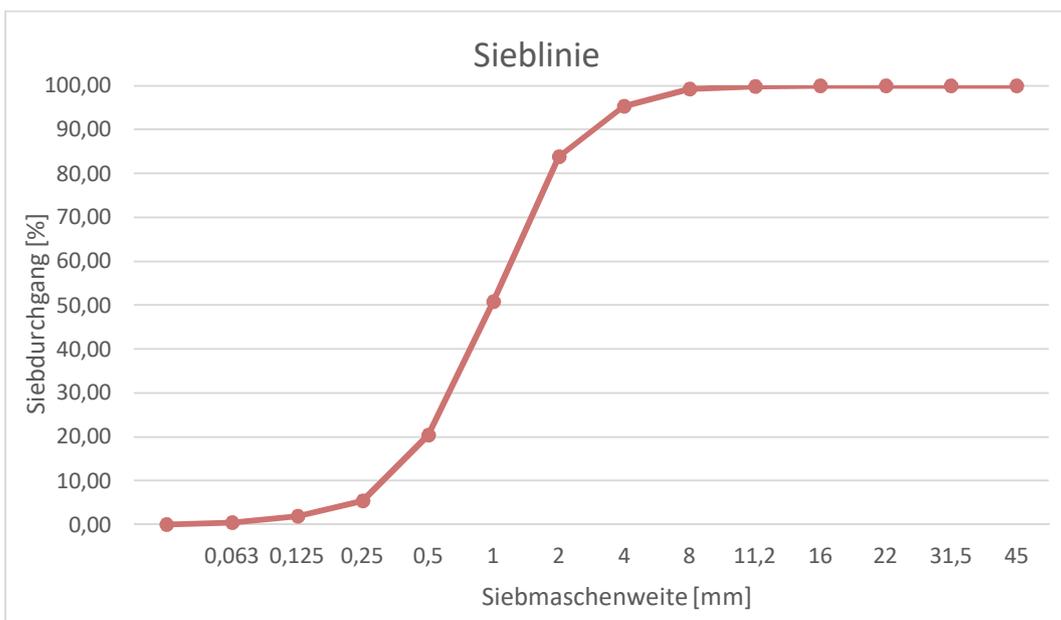
Abbildung des Temperaturverlaufs der Platte MHG\_W\_2 nicht vorhanden

**Versuchsablauf:**

- 7,00 min Erste Abplatzungen hörbar
- 7,83 min Durchgehende Abplatzungen, die immer lauter werden  
Immer wieder einzelne, laute Knalle hörbar
- 18,18 min Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch

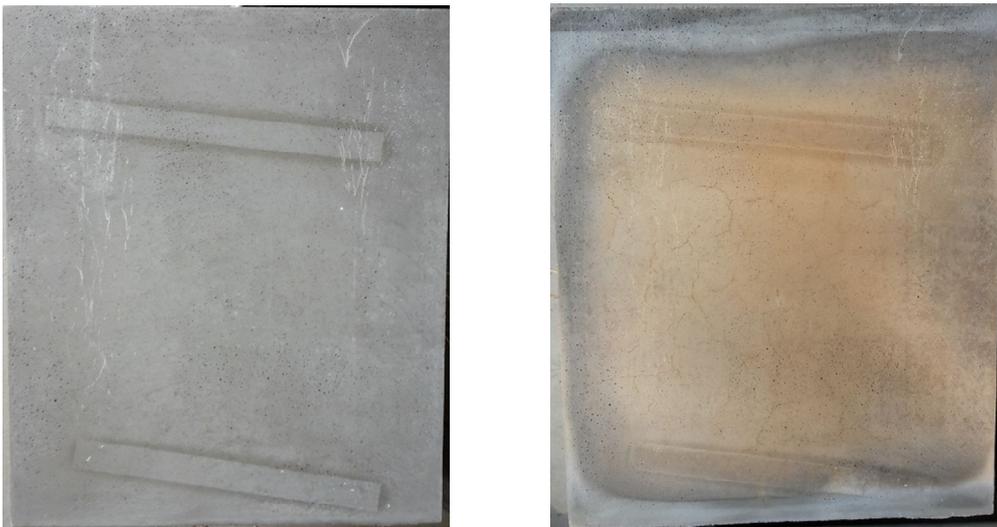


**Abbildung 8.52:** Gewichtsmessung Platte MHG\_W\_2



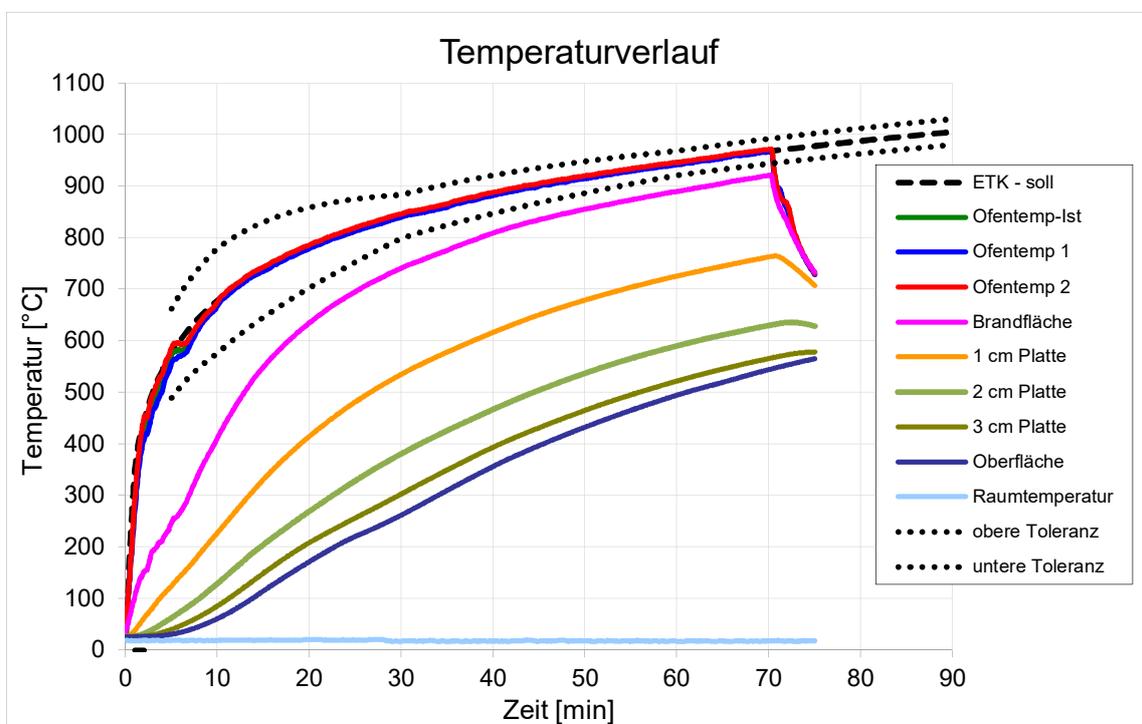
**Abbildung 8.53:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte MHG\_W\_2

### 8.15 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_L105\_1



**Abbildung 8.54:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

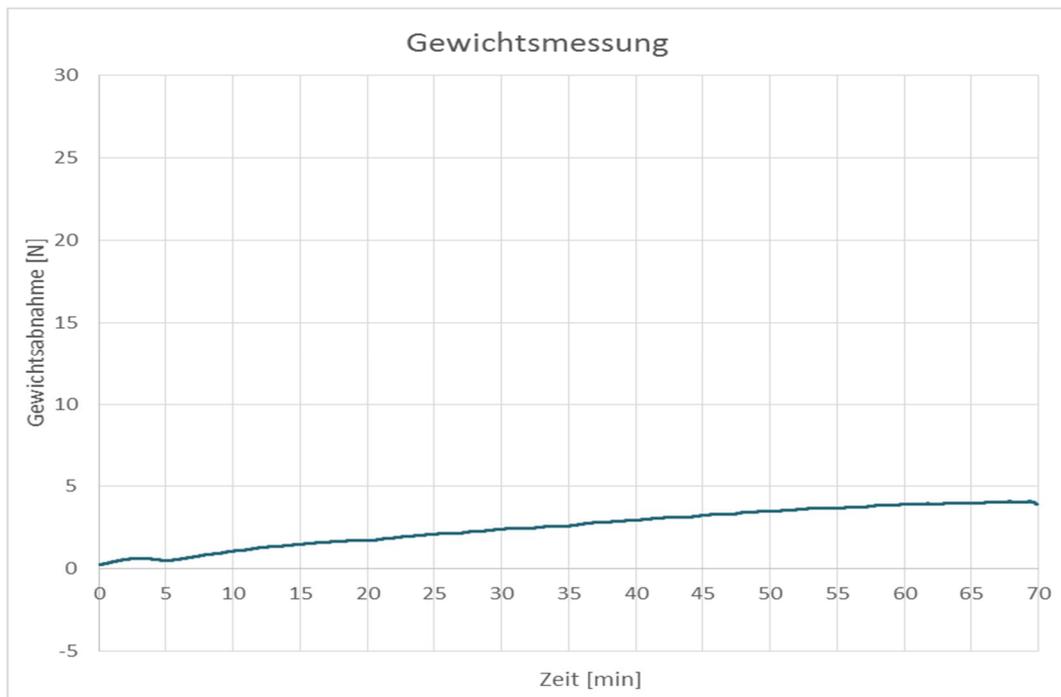
Masse der Platte vor Brandversuch:	5644,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5430,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,00 %



**Abbildung 8.55:** Temperaturverlauf Platte MHG\_L105\_1

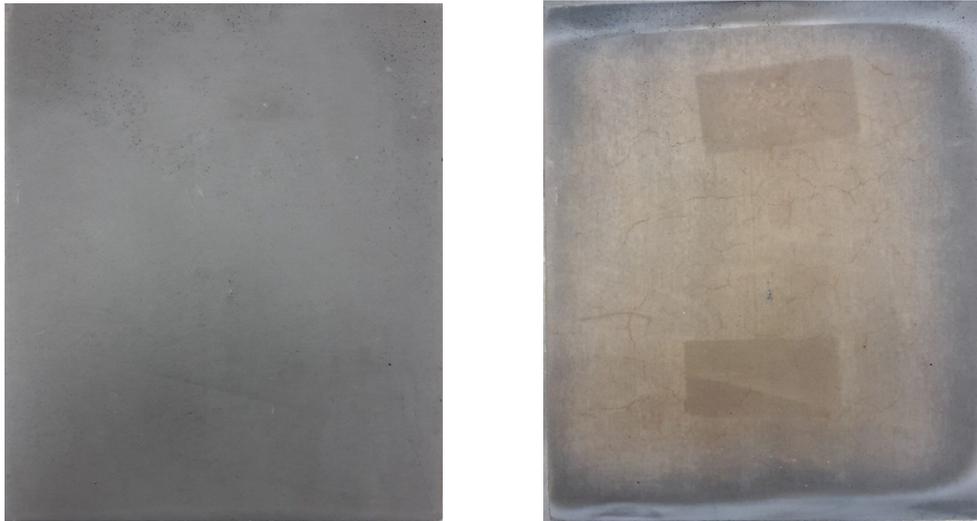
**Versuchsablauf:**

Keine Vorkommnisse  
70,00 min Versuchsende



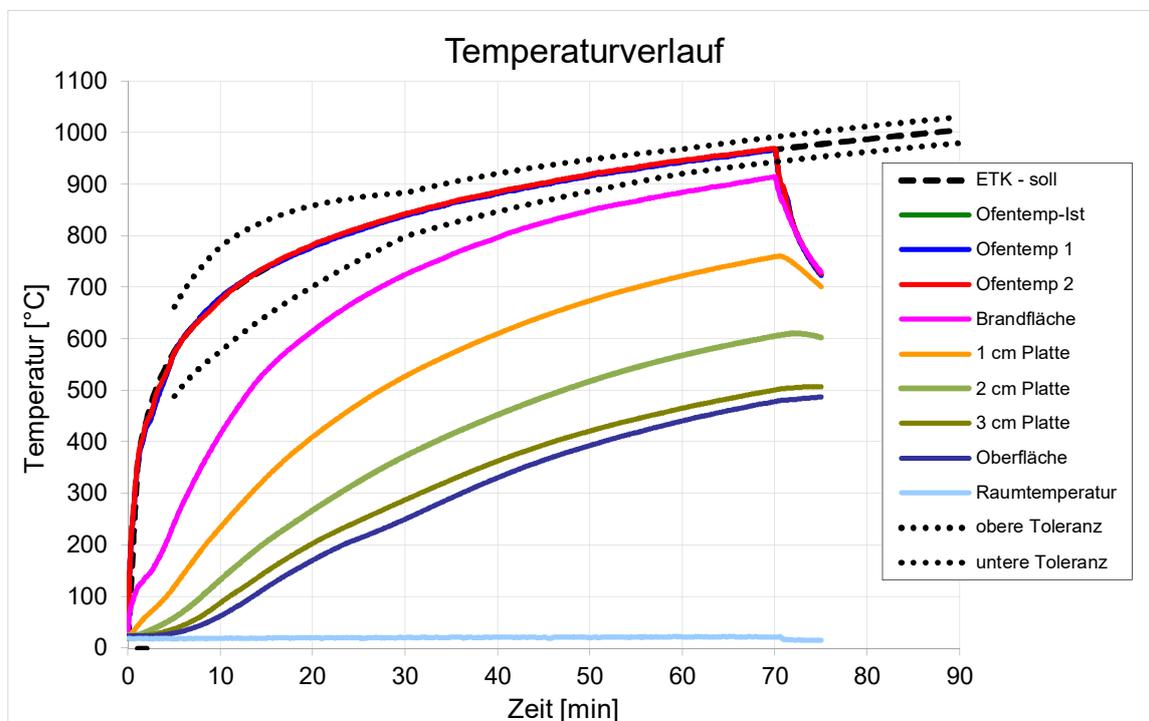
**Abbildung 8.56:** Gewichtsmessung Platte MHG\_L105\_1

## 8.16 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_L105\_2



**Abbildung 8.57:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

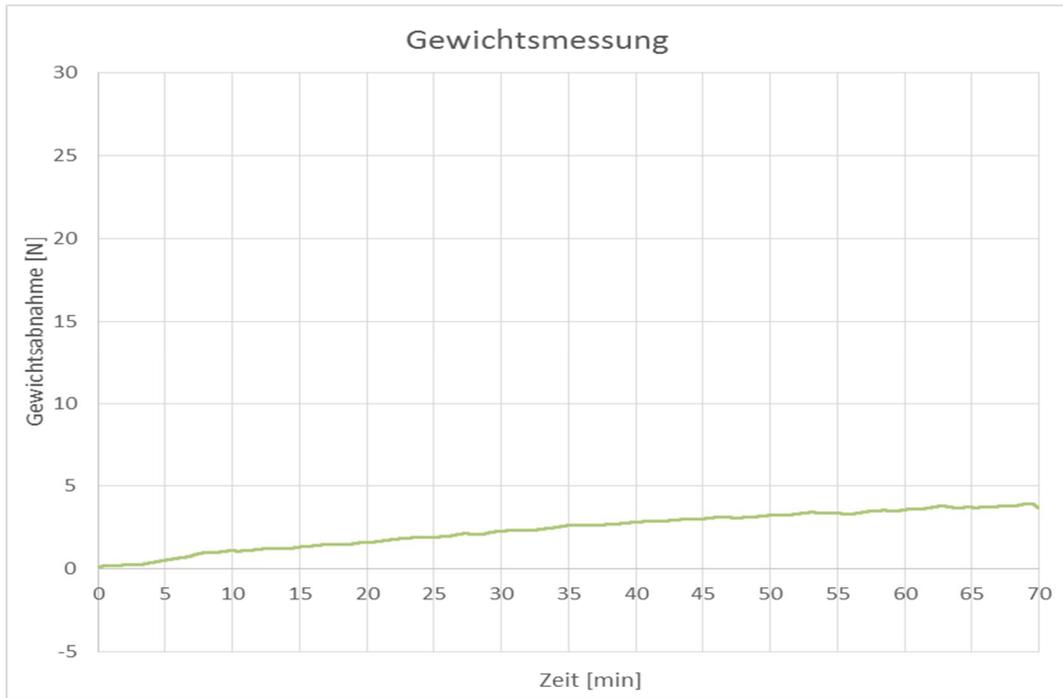
Masse der Platte vor Brandversuch:	5682,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5470,5 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,00 %



**Abbildung 8.58:** Temperaturverlauf Platte MHG\_L105\_2

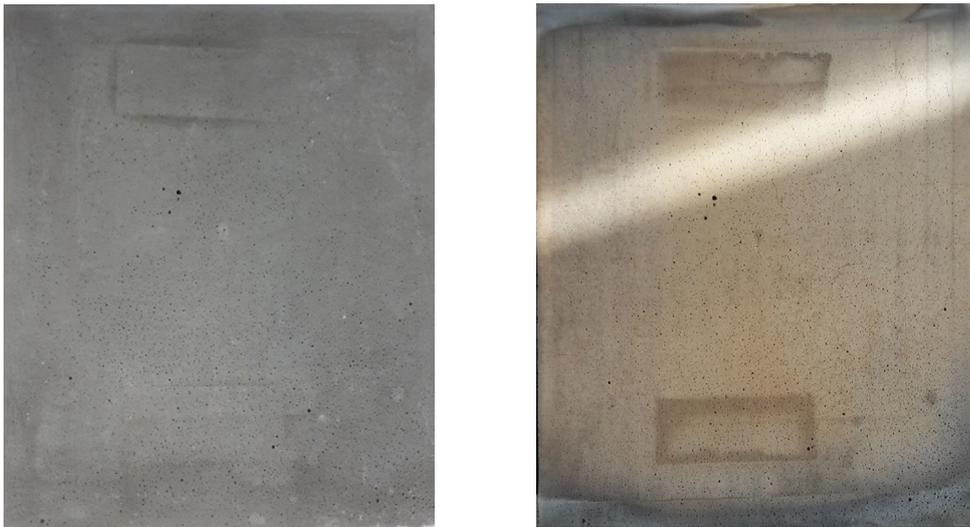
**Versuchsablauf:**

Keine Vorkommnisse  
70,00 min Versuchsende



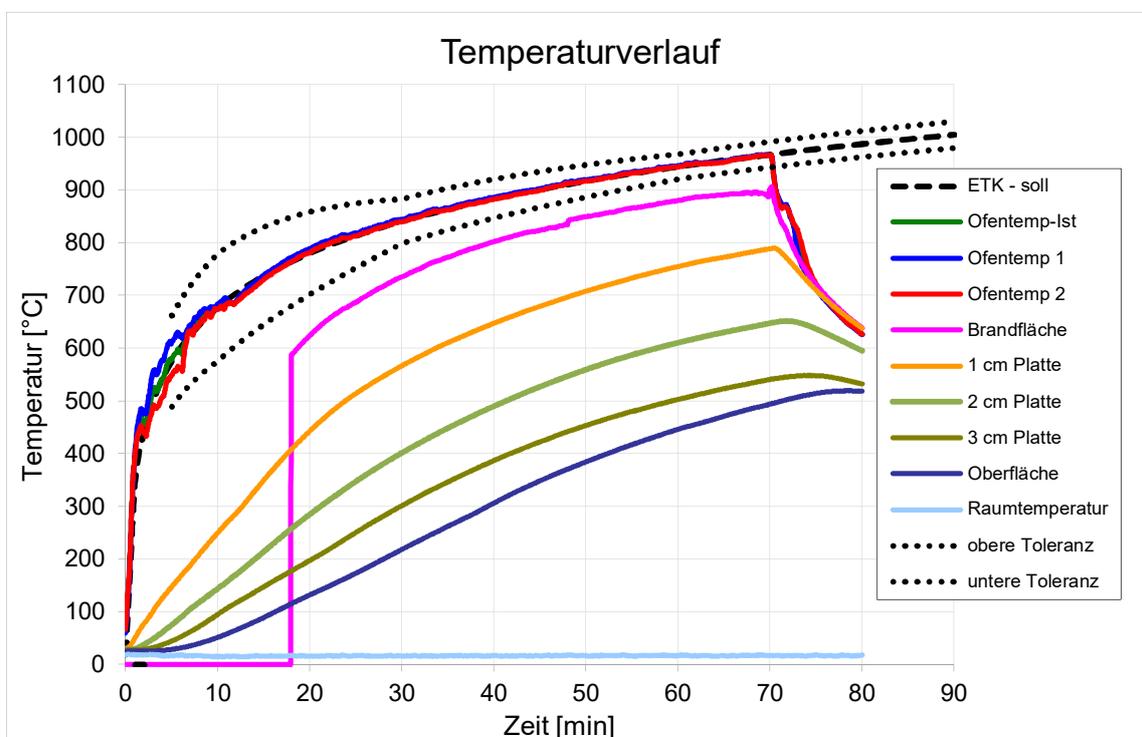
**Abbildung 8.59:** Gewichtsmessung Platte MHG\_L105\_2

### 8.17 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_L250\_K\_1



**Abbildung 8.60:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

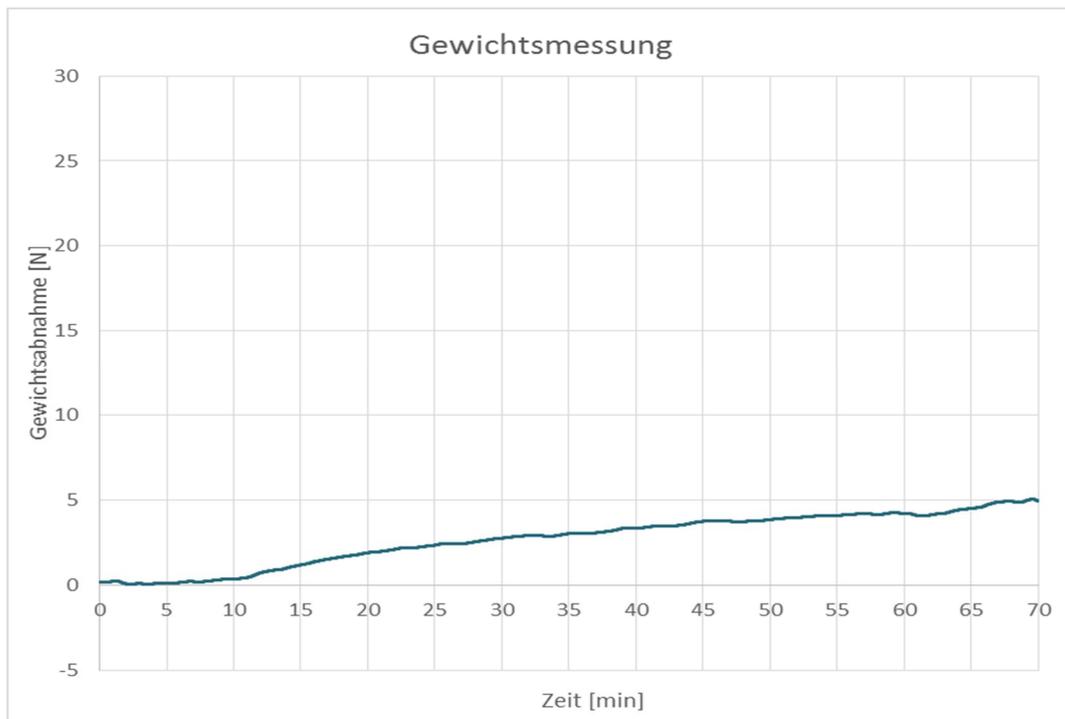
Masse der Platte vor Brandversuch:	5584,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5315,5 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	1,10 %



**Abbildung 8.61:** Temperaturverlauf Platte MHG\_L250\_K\_1

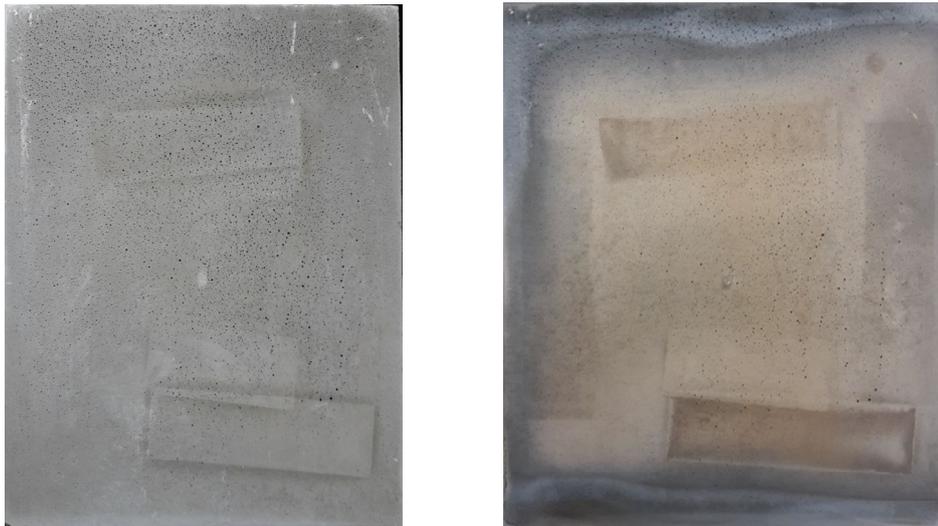
**Versuchsablauf:**

Keine Vorkommnisse  
70,00 min Versuchsende



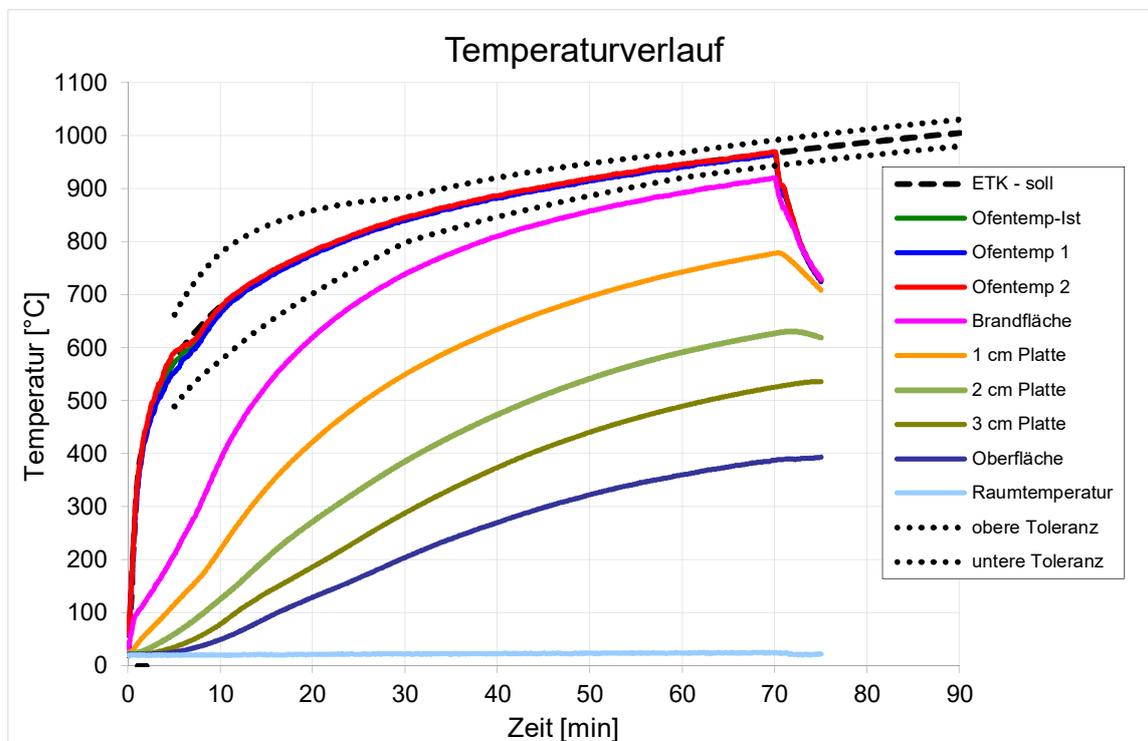
**Abbildung 8.62:** Gewichtsmessung Platte MHG\_L250\_K\_1

## 8.18 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_L250\_K\_2



**Abbildung 8.63:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

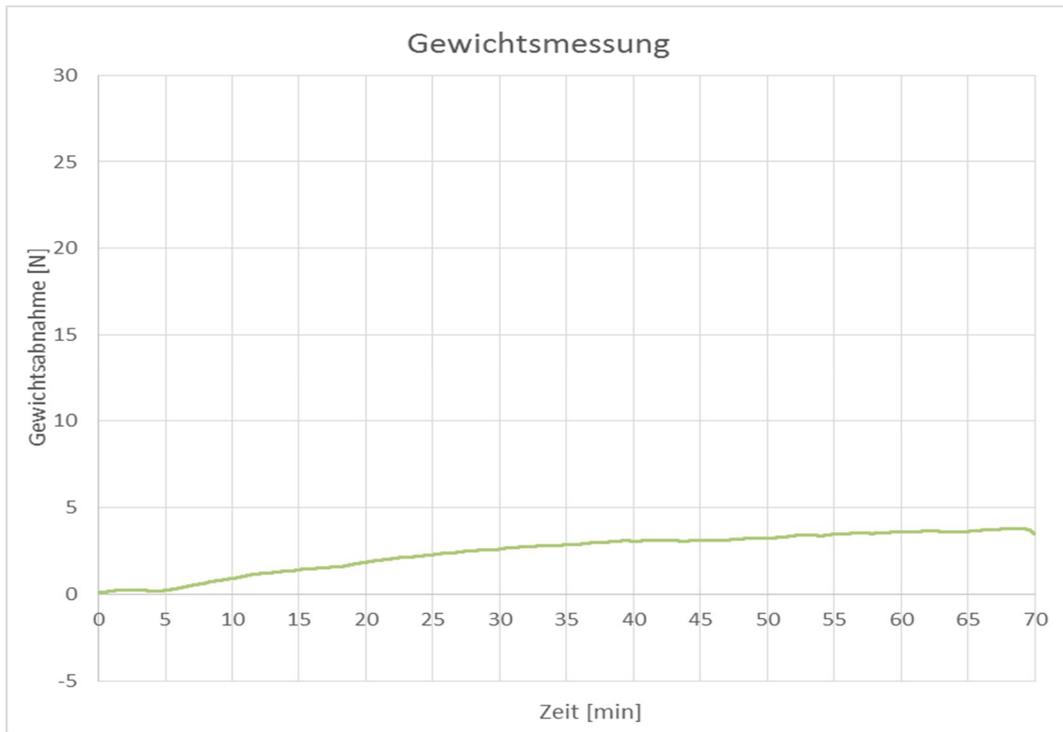
Masse der Platte vor Brandversuch:	5615,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5364,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	1,19 %



**Abbildung 8.64:** Temperaturverlauf Platte MHG\_L250\_K\_2

**Versuchsablauf:**

2,50 min Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min Versuchsende



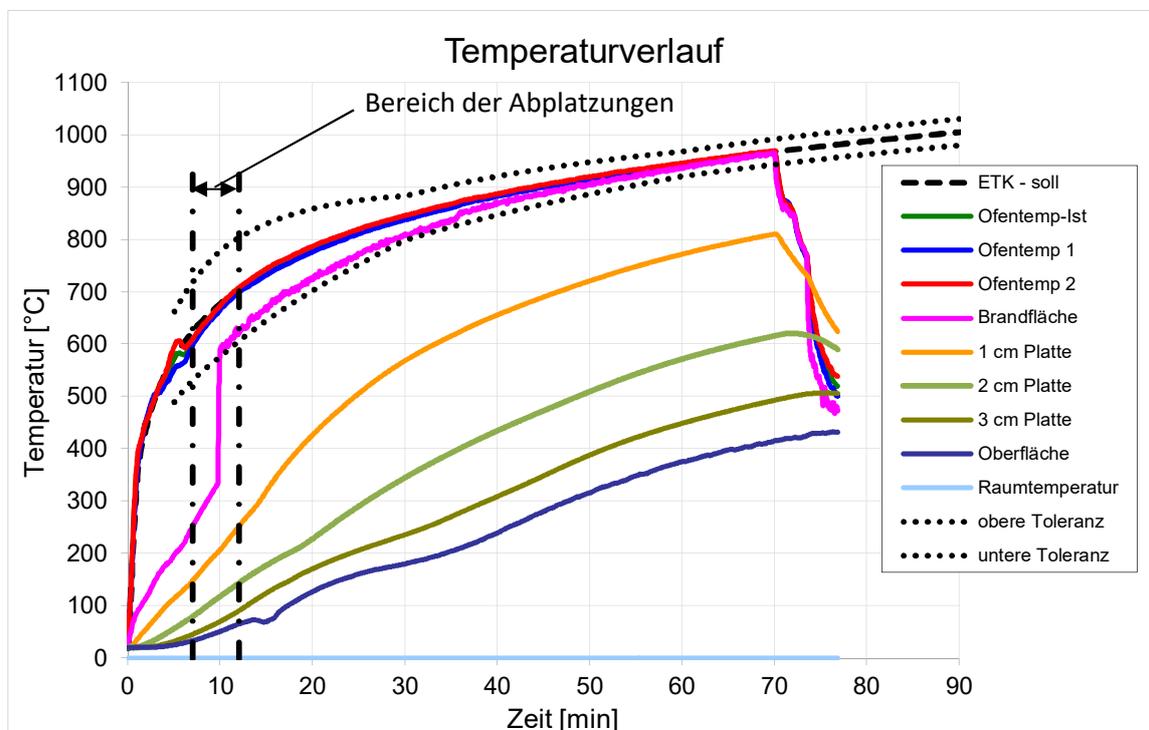
**Abbildung 8.65:** Gewichtsmessung Platte MHG\_L250\_K\_2

### 8.19 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_L250\_W\_1



**Abbildung 8.66:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

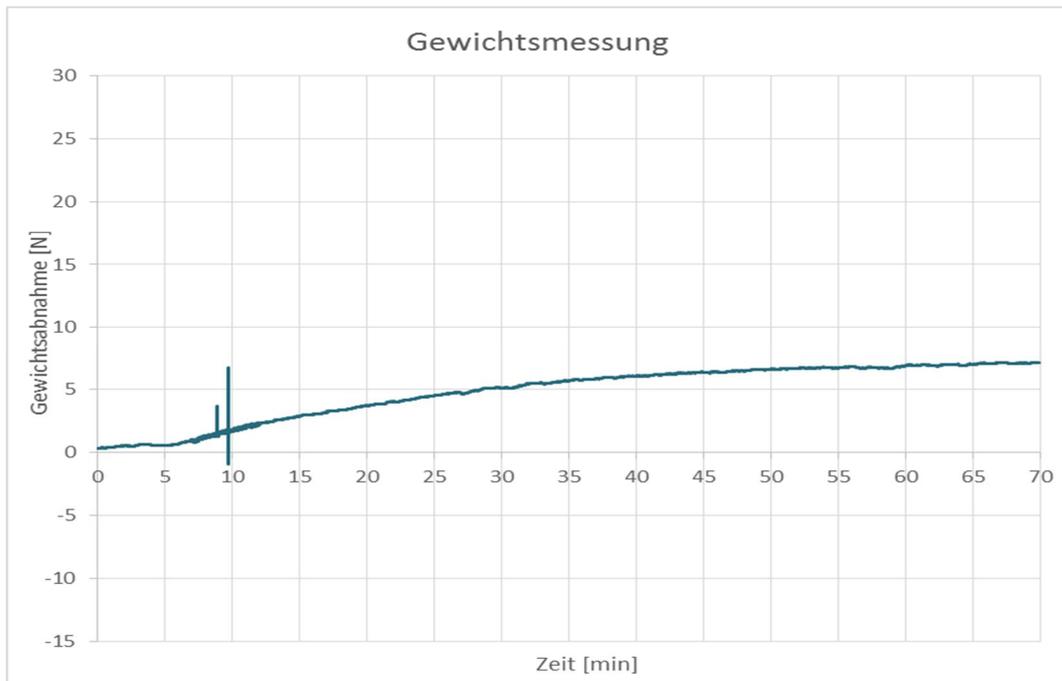
Masse der Platte vor Brandversuch:	5978,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5448,5 g
Masse abgeplatzt Material:	27,0 g
Wassergehalt:	5,19 %



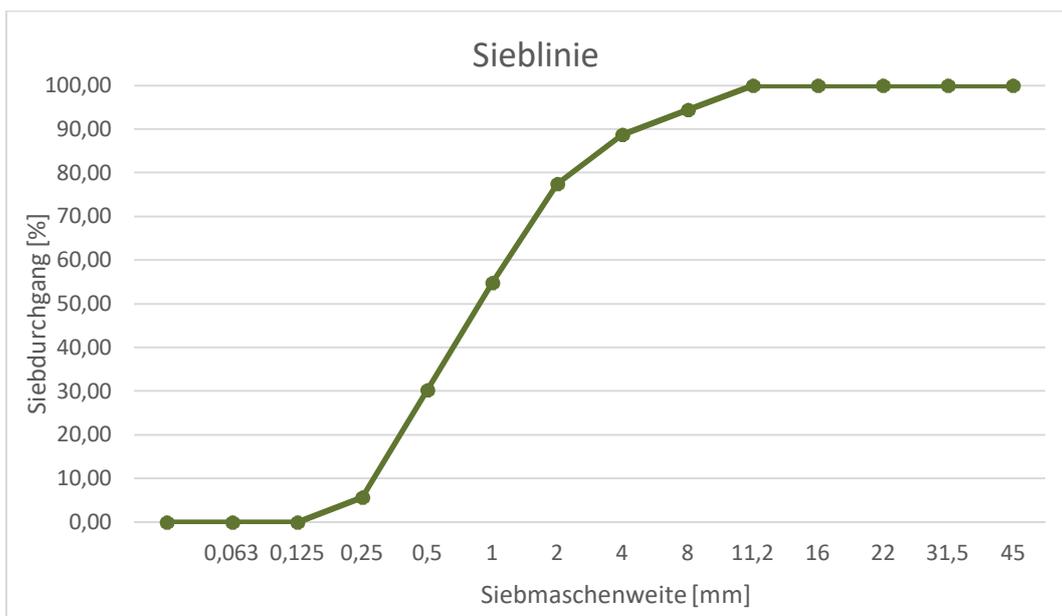
**Abbildung 8.67:** Temperaturverlauf Platte MHG\_L250\_W\_1

**Versuchsablauf:**

- 6,97 min     Erste Abplatzungen hörbar
- 9,75 min     Eine sehr laute, größere Abplatzung
- 12,00 min    Abplatzungen haben aufgehört
- 70,00 min    Versuchsende

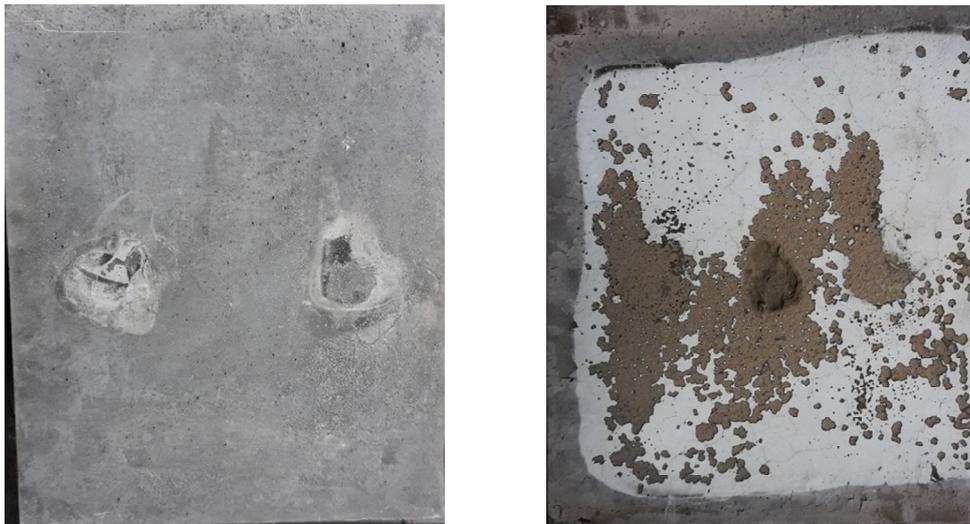


**Abbildung 8.68:** Gewichtsmessung Platte MHG\_L250\_W\_1



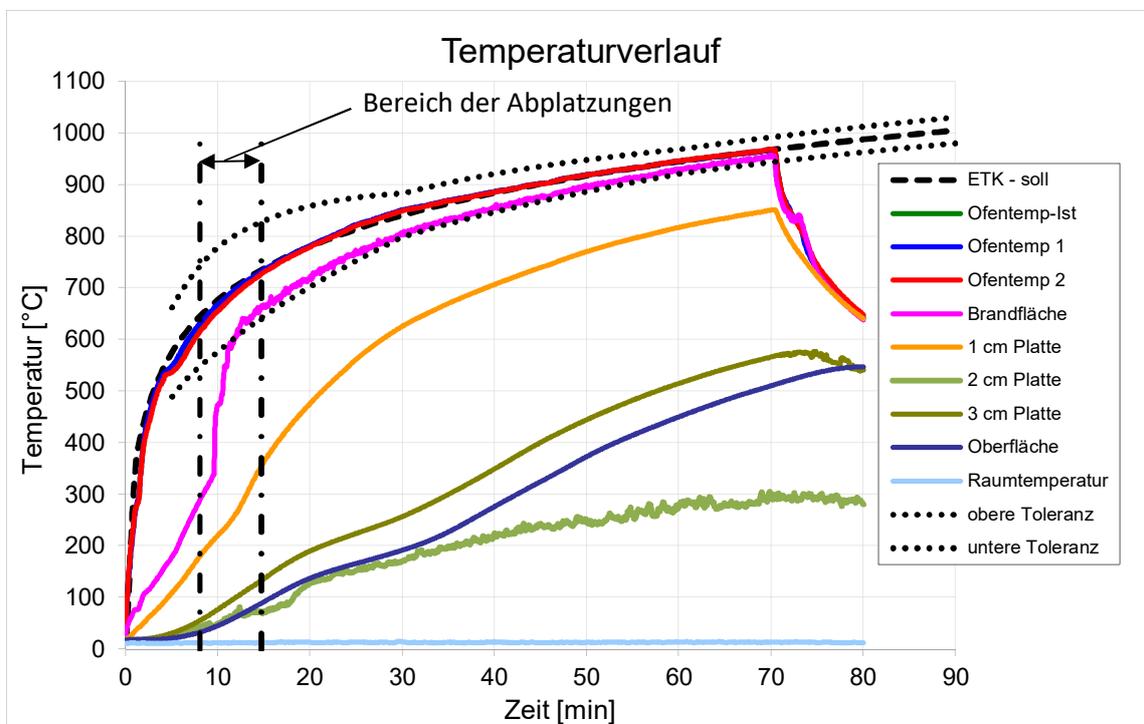
**Abbildung 8.69:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte MHG\_L250\_W\_1

## 8.20 Brandversuchsprotokoll Platte MHG\_L250\_W\_2



**Abbildung 8.70:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

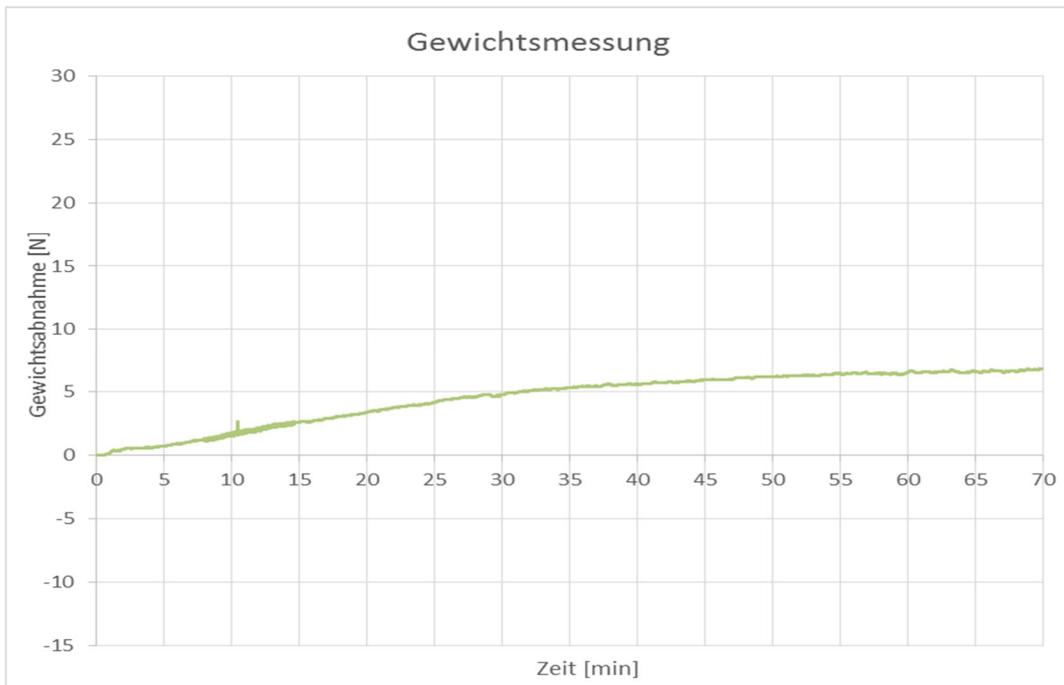
Masse der Platte vor Brandversuch:	5793,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5303,0 g
Masse abgeplatzt Material:	20,0 g
Wassergehalt:	5,49 %



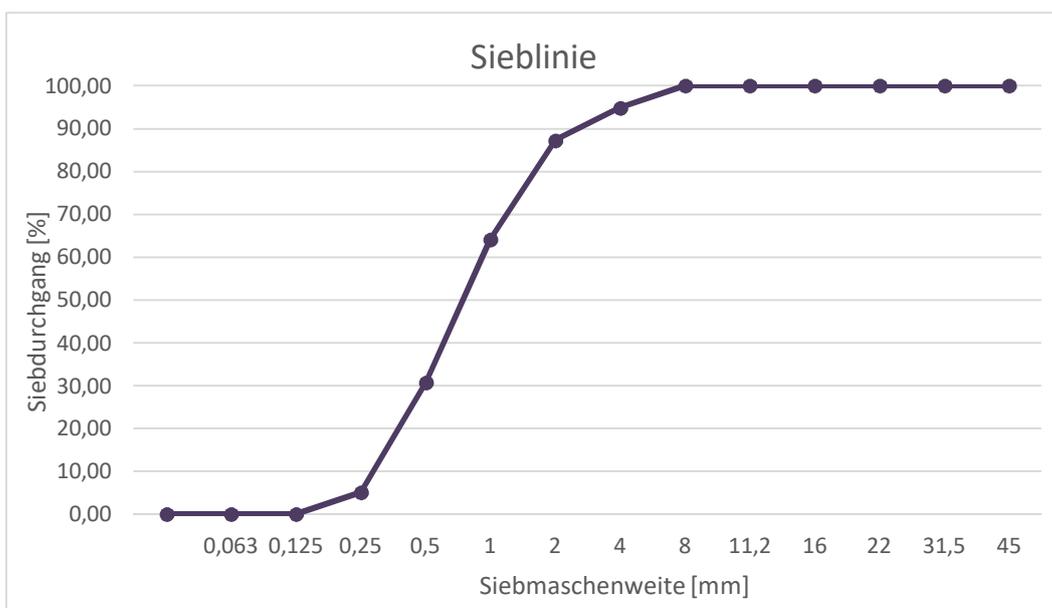
**Abbildung 8.71:** Temperaturverlauf Platte MHG\_L250\_W\_2

**Versuchsablauf:**

- 8,00 min     Erste Abplatzungen hörbar
- 12,45 min   Eine lautere, größere Abplatzung
- 14,66 min   Abplatzungen haben aufgehört
- 70,00 min   Versuchsende



**Abbildung 8.72:** Gewichtsmessung Platte MHG\_L250\_W\_2



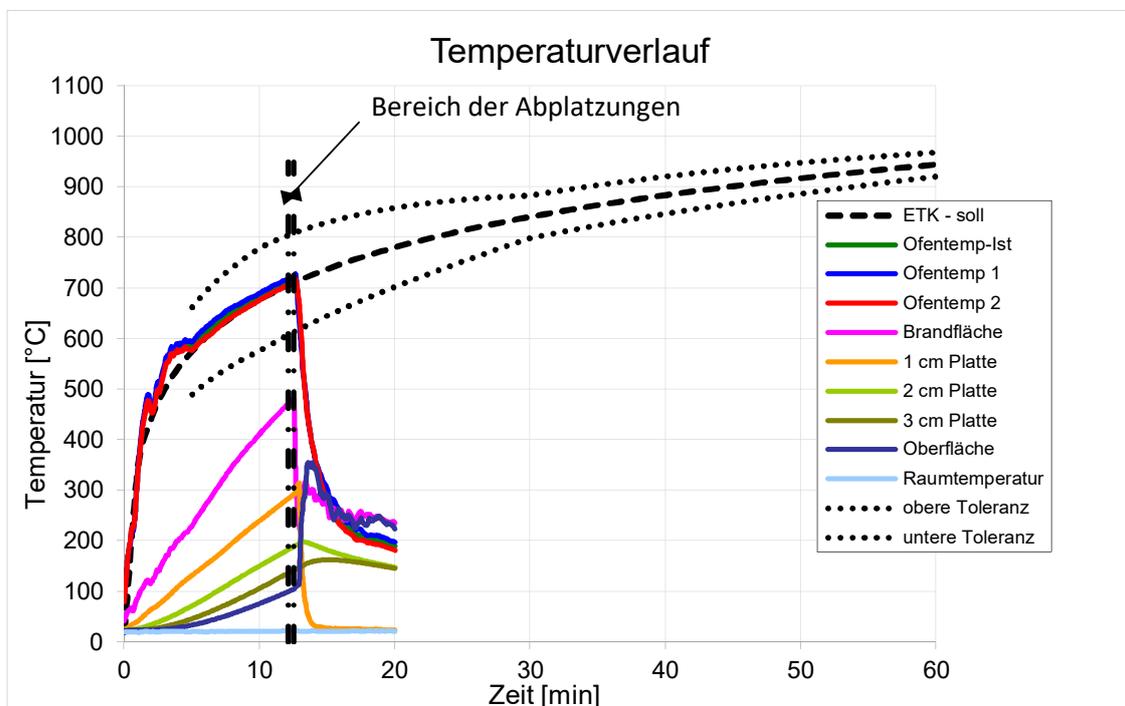
**Abbildung 8.73:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte MHG\_L250\_W\_2

## 8.21 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_K\_1



**Abbildung 8.74:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

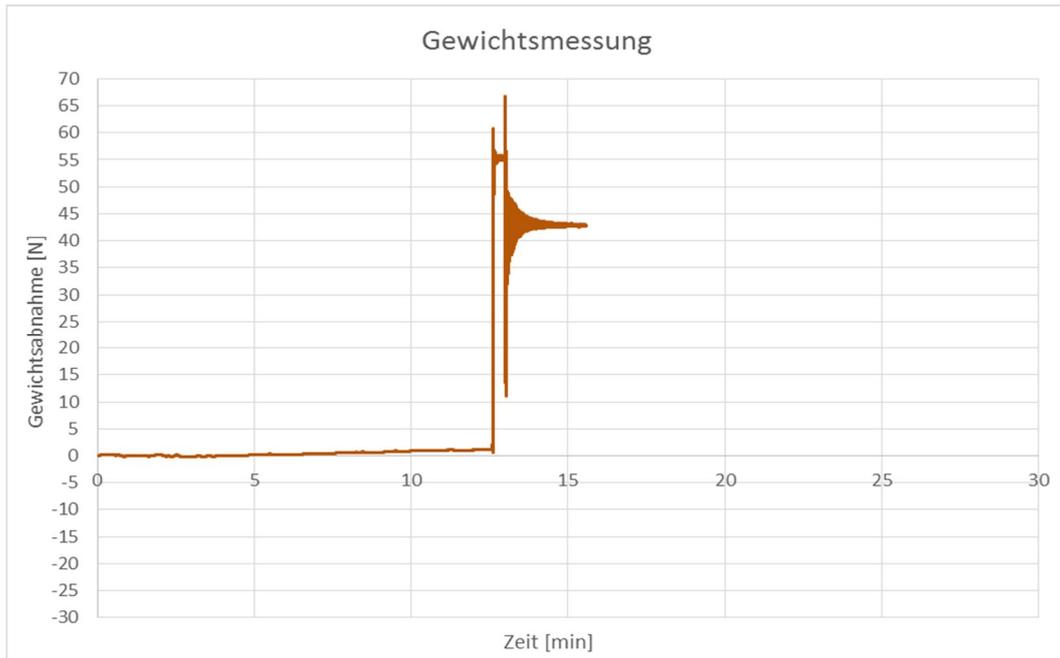
Masse der Platte vor Brandversuch:	5470,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	- g
Masse abgeplatzt Material:	1364,0 g
Wassergehalt:	4,00 %



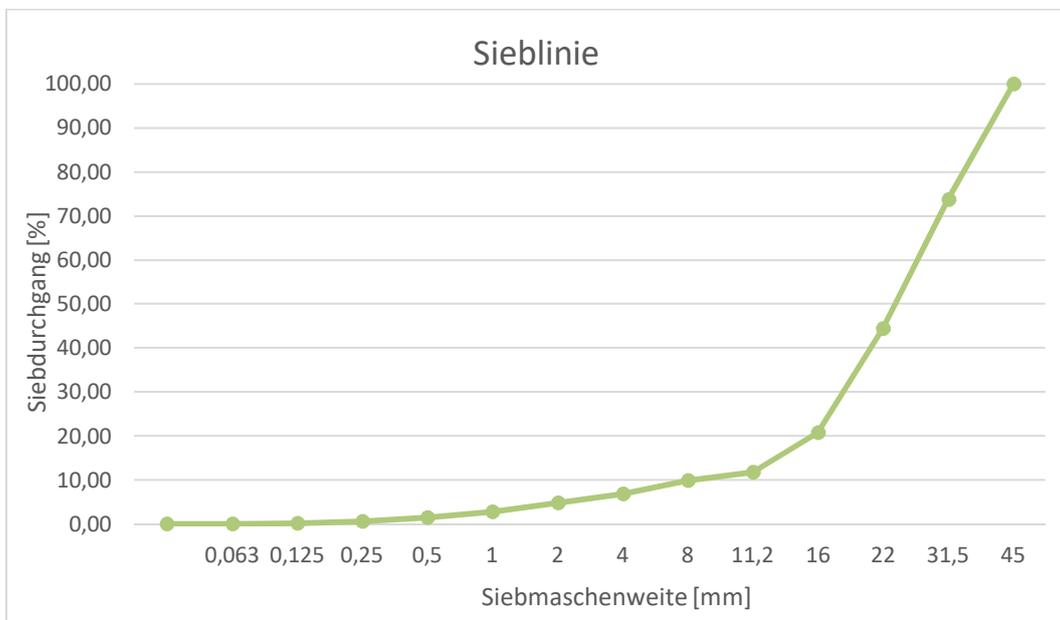
**Abbildung 8.75:** Temperaturverlauf Platte LPB\_K\_1

**Versuchsablauf:**

12,50 min Erste Abplatzungen (sehr laut); sofortige Zerstörung der Probe  
 Versuchsabbruch



**Abbildung 8.76:** Gewichtsmessung Platte LPB\_K\_1



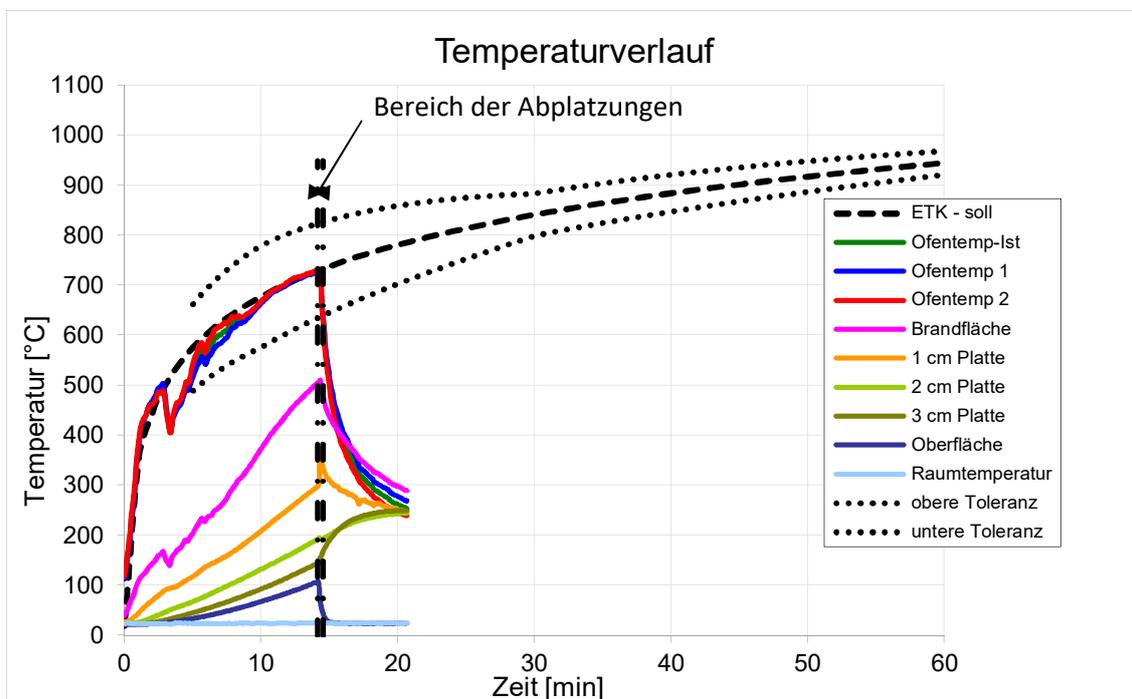
**Abbildung 8.77:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte LPB\_K\_1

## 8.22 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_K\_2



**Abbildung 8.78:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

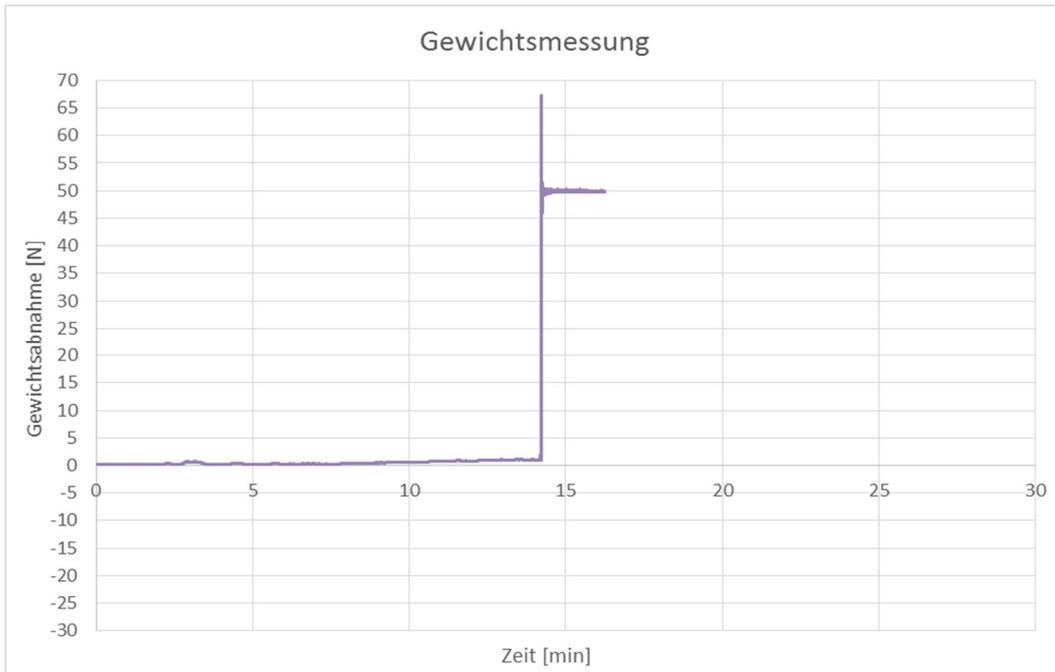
Masse der Platte vor Brandversuch:	5521,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	- g
Masse abgeplatzt Material:	1216,5 g
Wassergehalt:	4,05 %



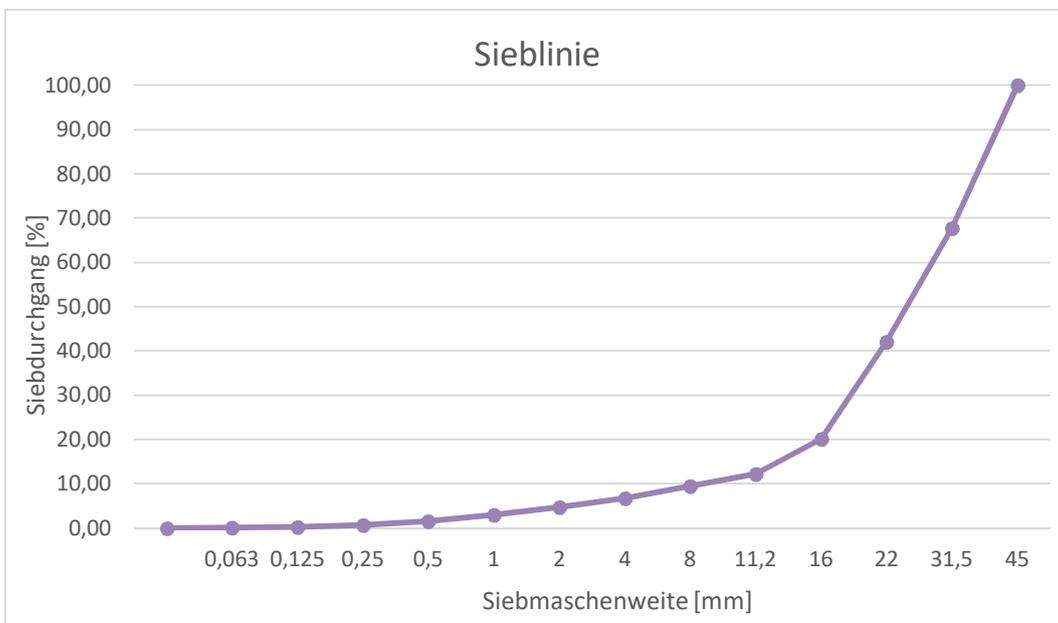
**Abbildung 8.79:** Temperaturverlauf Platte LPB\_K\_2

**Versuchsablauf:**

14,30 min Erste Abplatzungen (sehr laut); sofortige Zerstörung der Probe  
 Versuchsabbruch

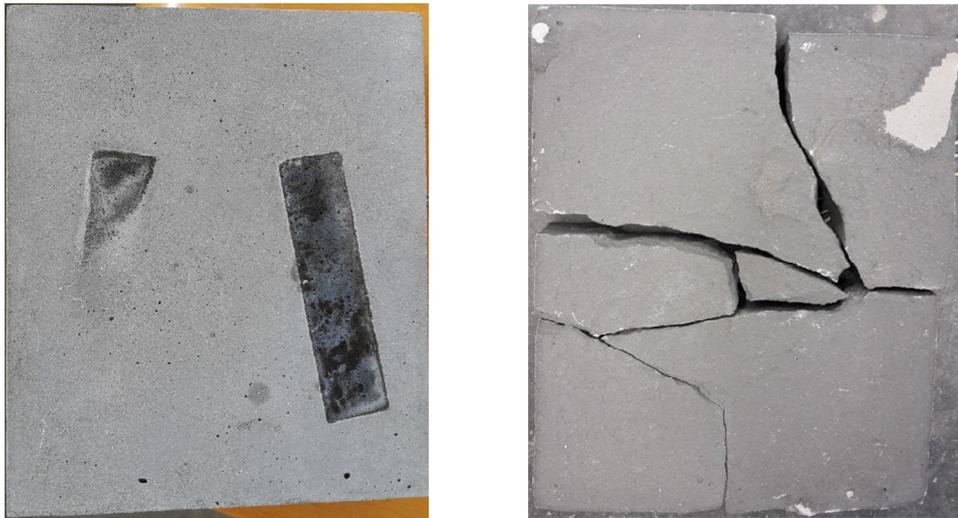


**Abbildung 8.80:** Gewichtsmessung Platte LPB\_K\_2



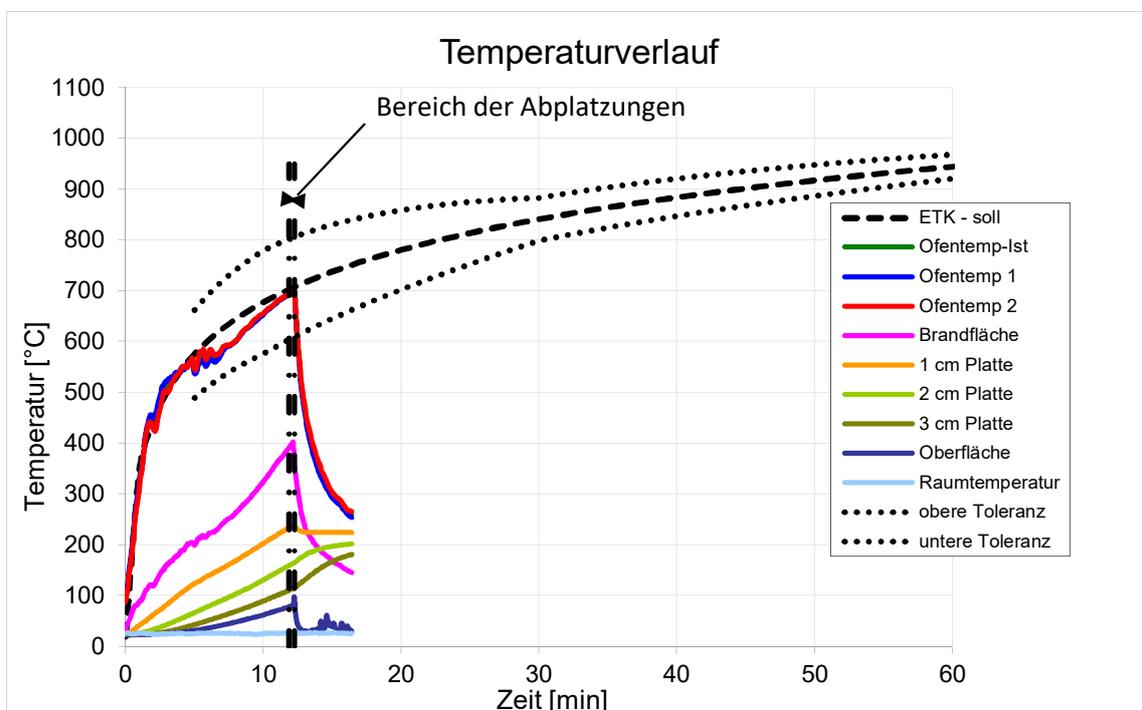
**Abbildung 8.81:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte LPB\_K\_2

### 8.23 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_W\_1



**Abbildung 8.82:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

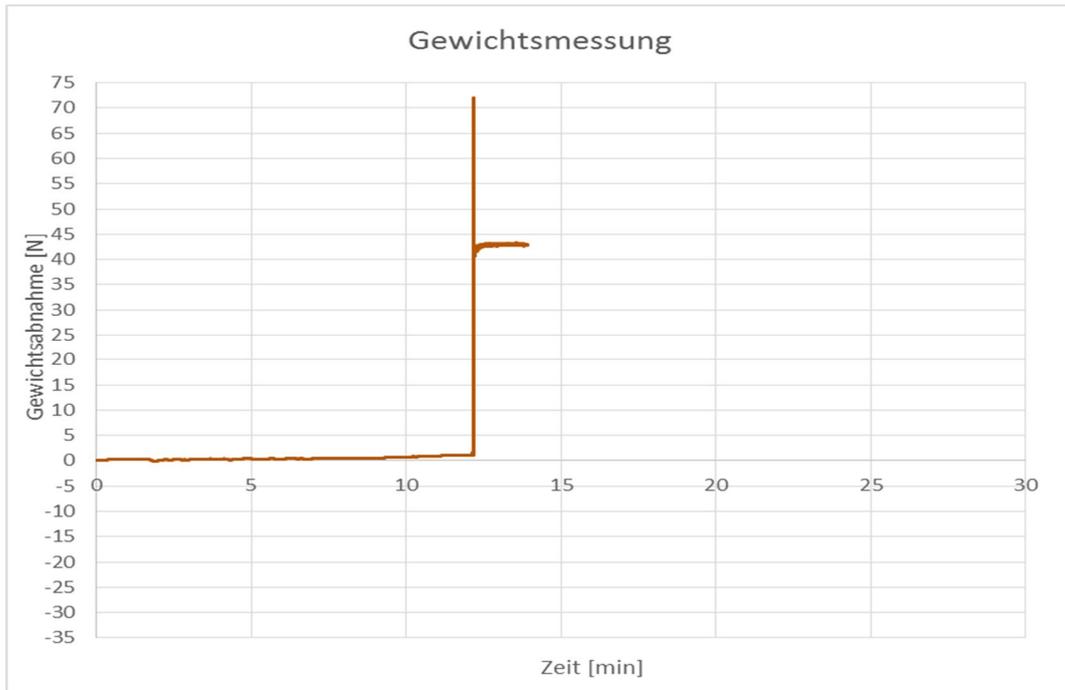
Masse der Platte vor Brandversuch:	5626,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	- g
Masse abgeplatztes Material:	640,0 g
Wassergehalt:	5,62 %



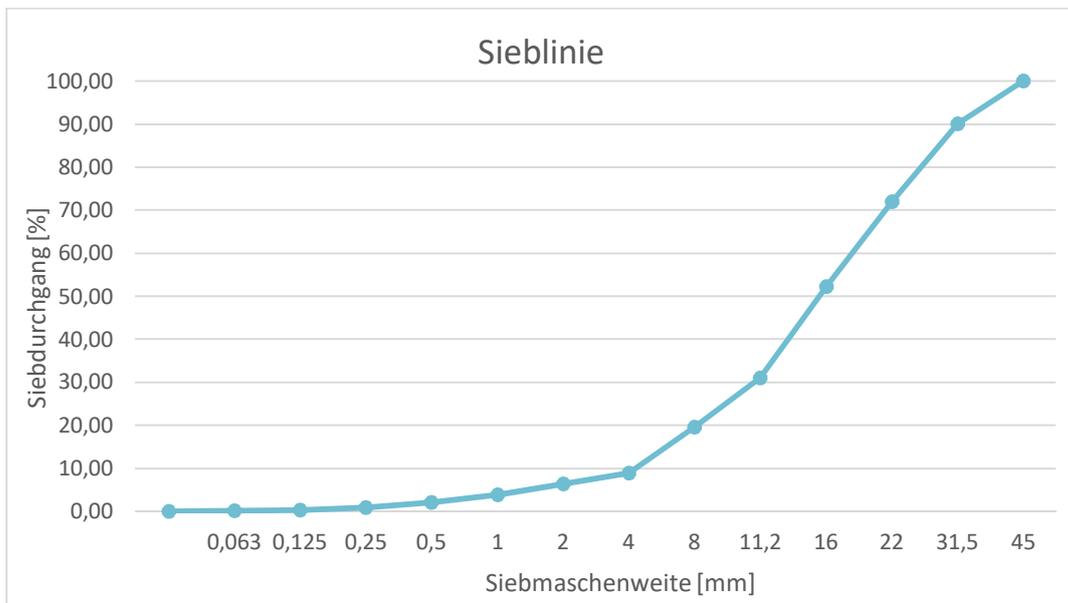
**Abbildung 8.83:** Temperaturverlauf Platte LPB\_W\_1

**Versuchsablauf:**

12,25 min Erste Abplatzungen (sehr laut); sofortige Zerstörung der Probe  
 Versuchsabbruch

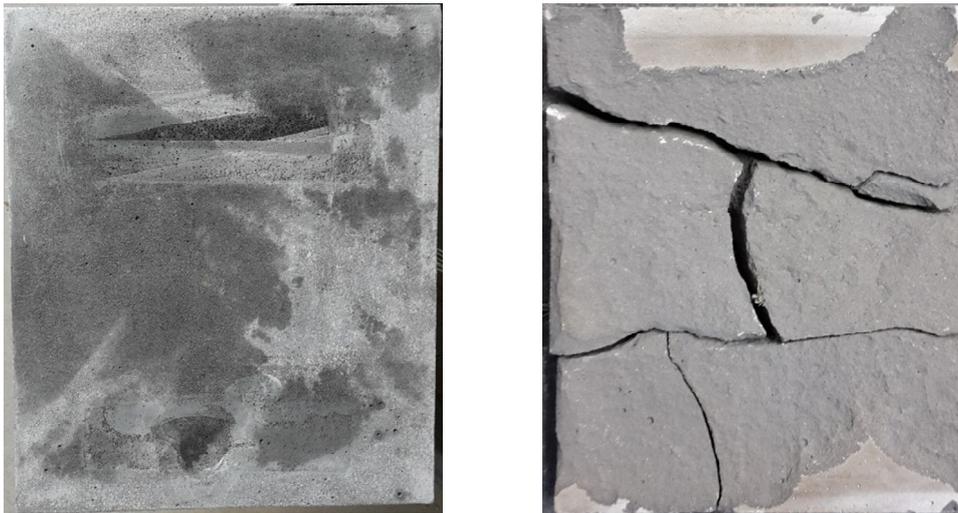


**Abbildung 8.84:** Gewichtsmessung Platte LPB\_W\_1



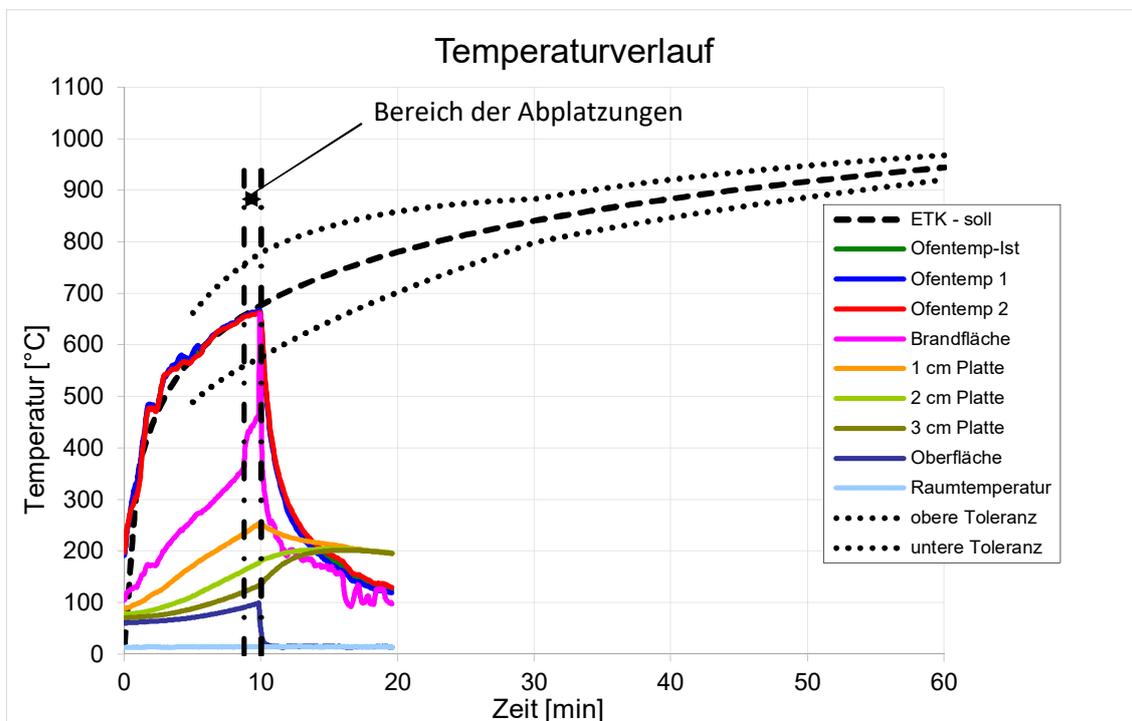
**Abbildung 8.85:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte LPB\_W\_1

## 8.24 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_W\_2



**Abbildung 8.86:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

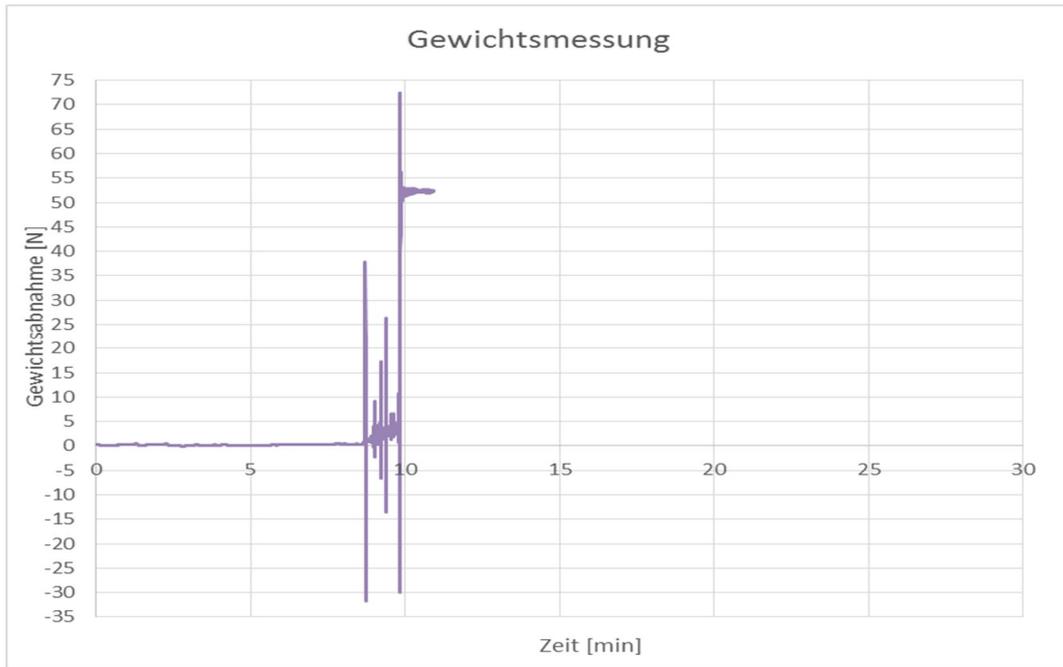
Masse der Platte vor Brandversuch:	5806,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	- g
Masse abgeplatzt Material:	626,5 g
Wassergehalt:	5,95 %



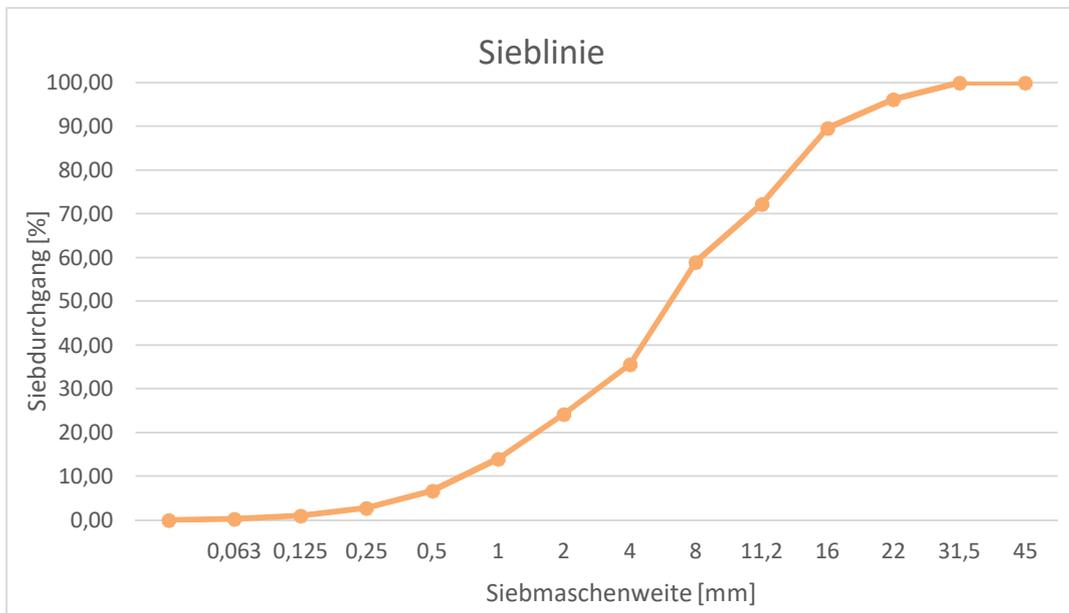
**Abbildung 8.87:** Temperaturverlauf Platte LPB\_W\_2

**Versuchsablauf:**

- 8,75 min Erste Abplatzungen (sehr laut)
- 10,00 min Zerstörung der Probe; Versuchsabbruch



**Abbildung 8.88:** Gewichtsmessung Platte LPB\_W\_2



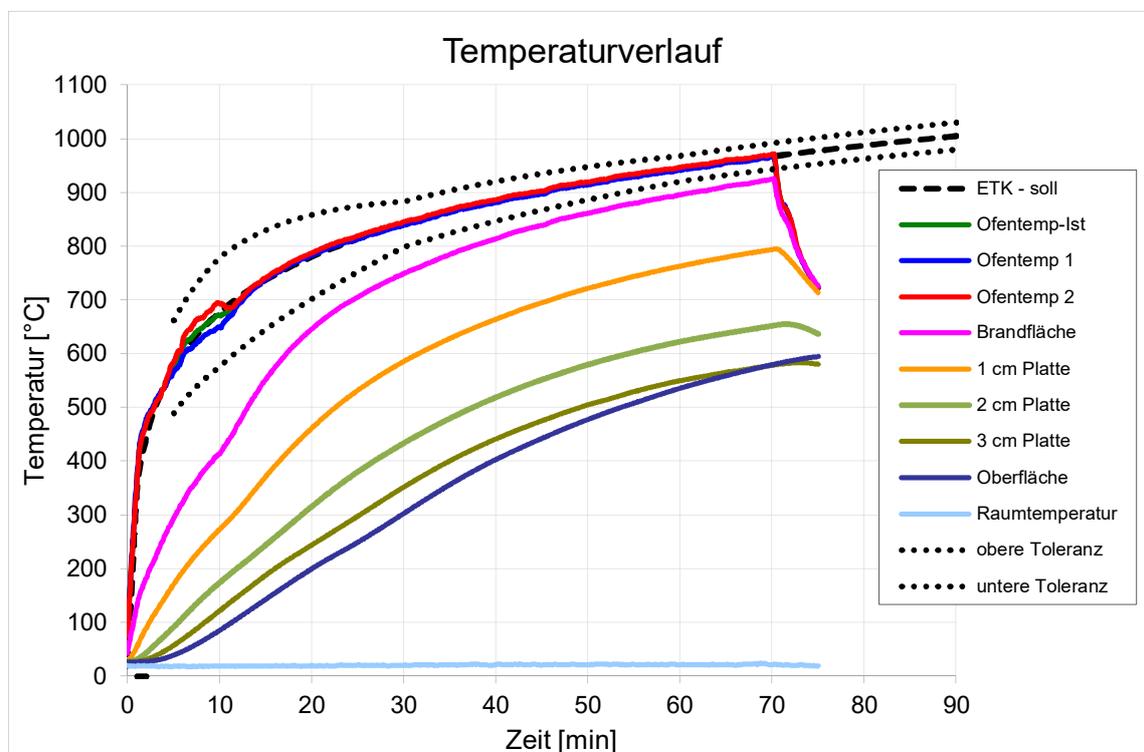
**Abbildung 8.89:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte LPB\_W\_2

## 8.25 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_L105\_1



**Abbildung 8.90:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

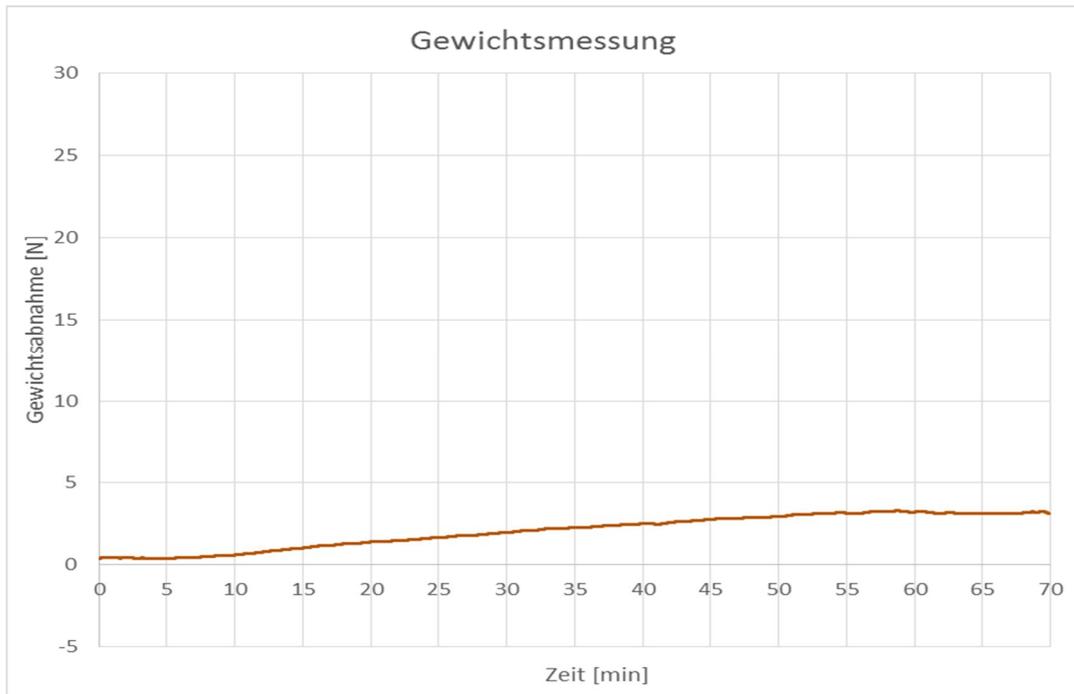
Masse der Platte vor Brandversuch:	5284,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5123,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,00 %



**Abbildung 8.91:** Temperaturverlauf Platte LPB\_L105\_1

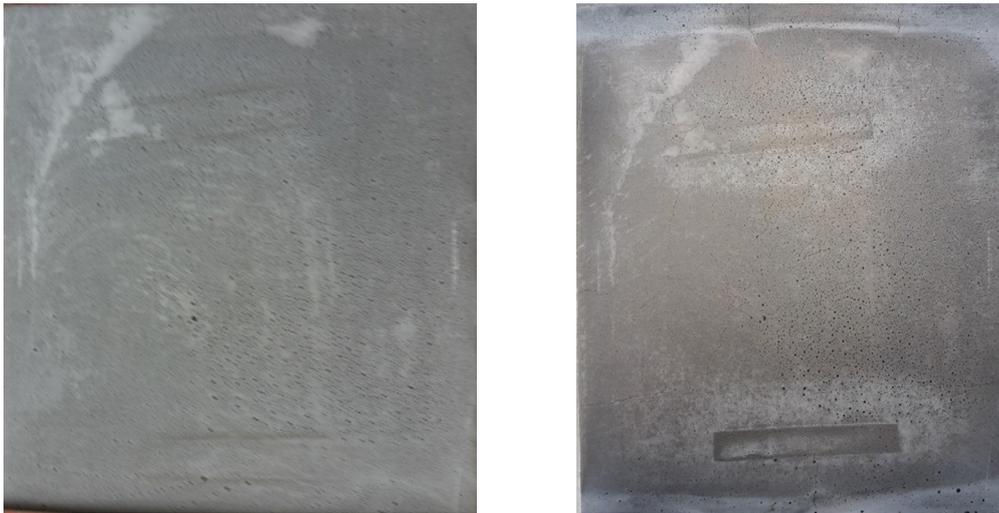
**Versuchsablauf:**

3,00 min      Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min    Versuchsende



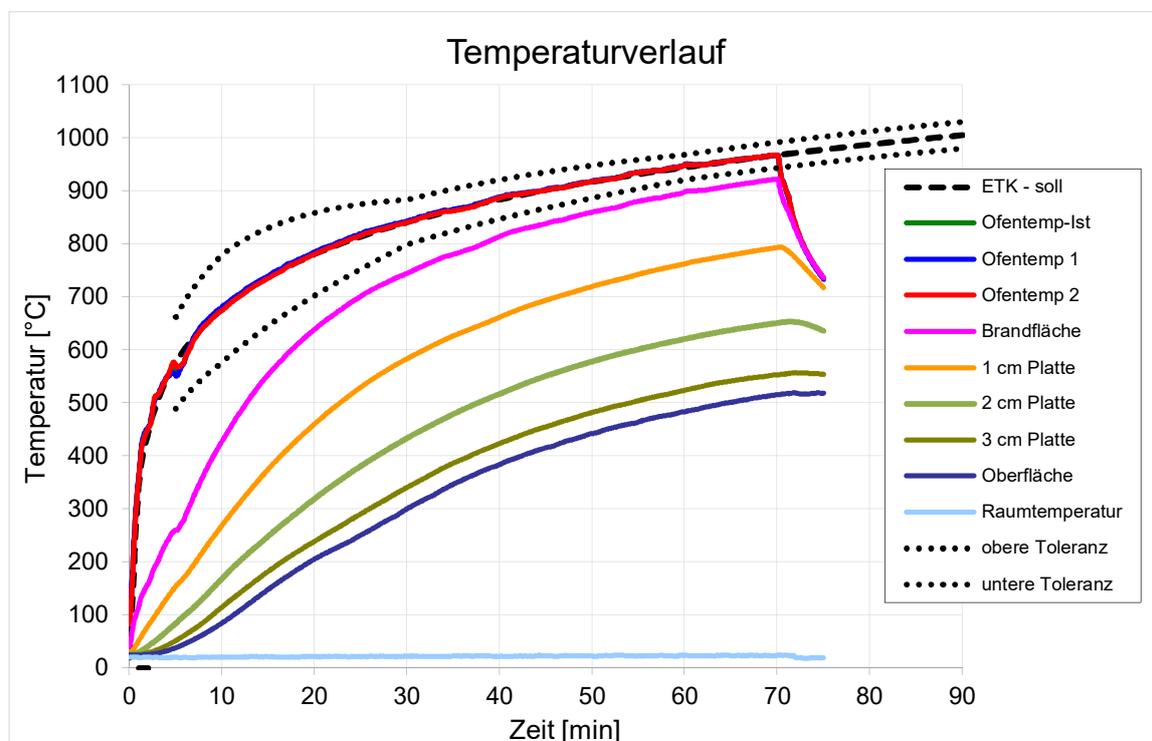
**Abbildung 8.92:** Gewichtsmessung Platte LPB\_L105\_1

## 8.26 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_L105\_2



**Abbildung 8.93:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

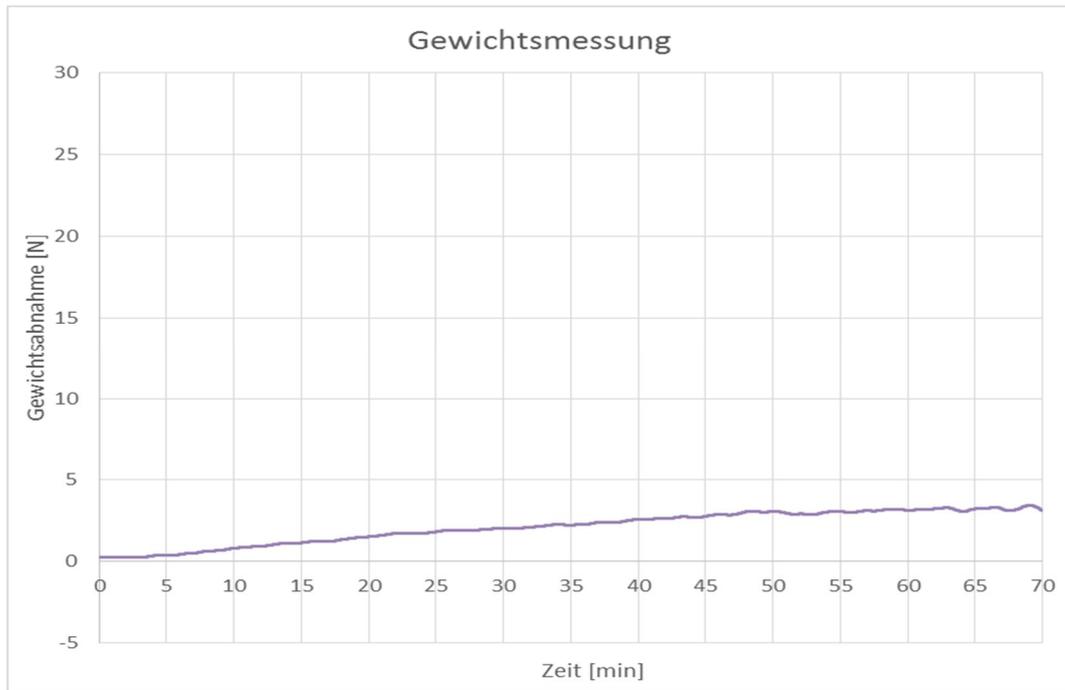
Masse der Platte vor Brandversuch:	5471,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5299,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,00 %



**Abbildung 8.94:** Temperaturverlauf Platte LPB\_L105\_2

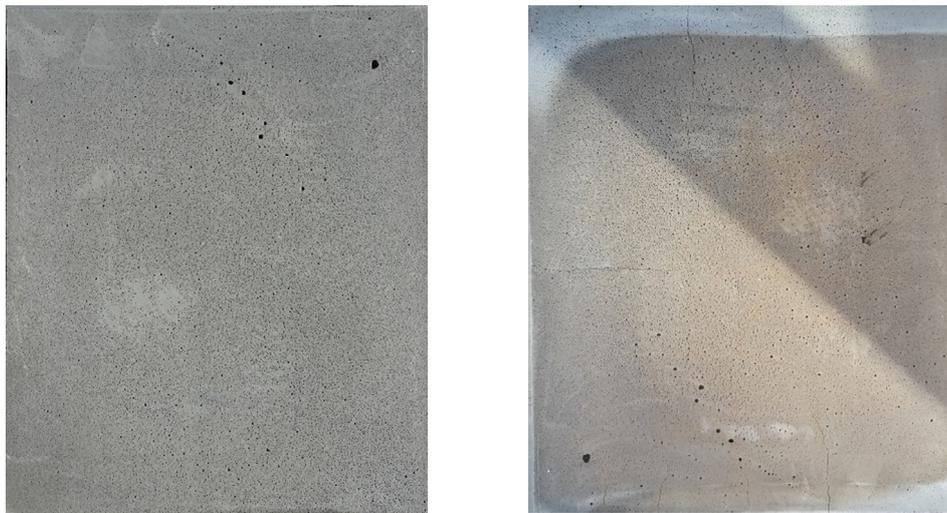
**Versuchsablauf:**

2,00 min      Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min    Versuchsende



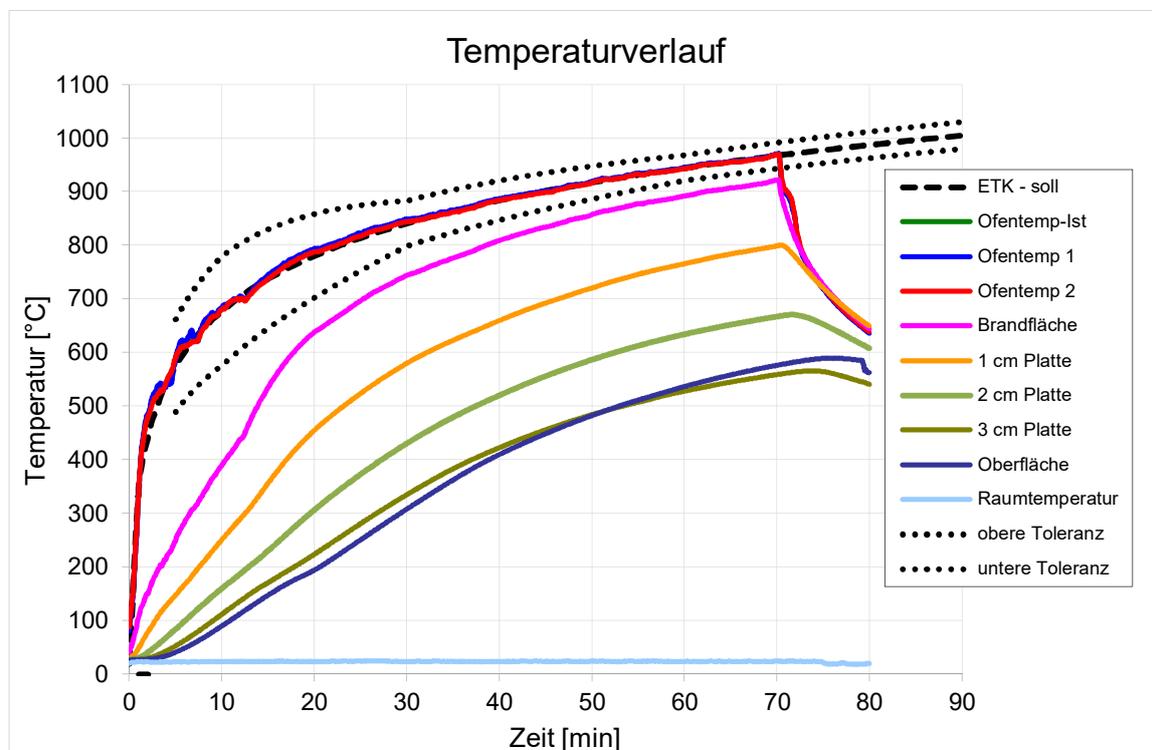
**Abbildung 8.95:** Gewichtsmessung Platte LPB\_L105\_2

## 8.27 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_L250\_K\_1



**Abbildung 8.96:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

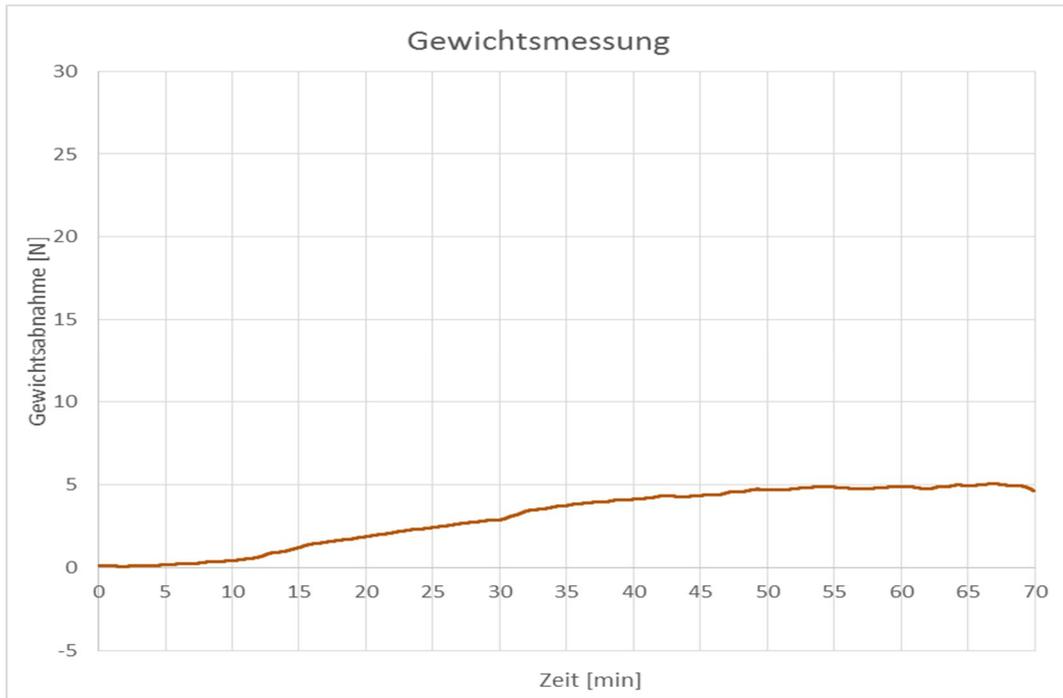
Masse der Platte vor Brandversuch:	5457,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5223,5 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	1,08 %



**Abbildung 8.97:** Temperaturverlauf Platte LPB\_L250\_K\_1

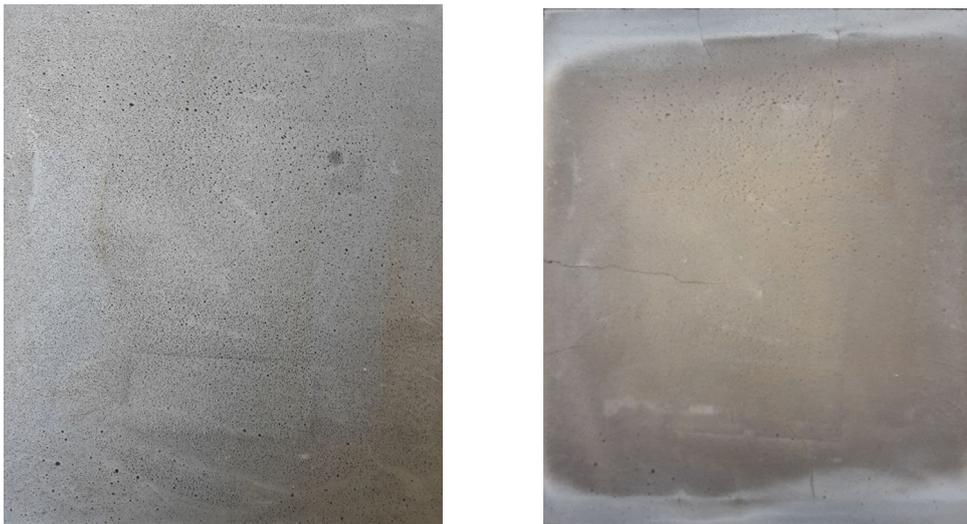
**Versuchsablauf:**

Keine Vorkommnisse  
70,00 min Versuchsende



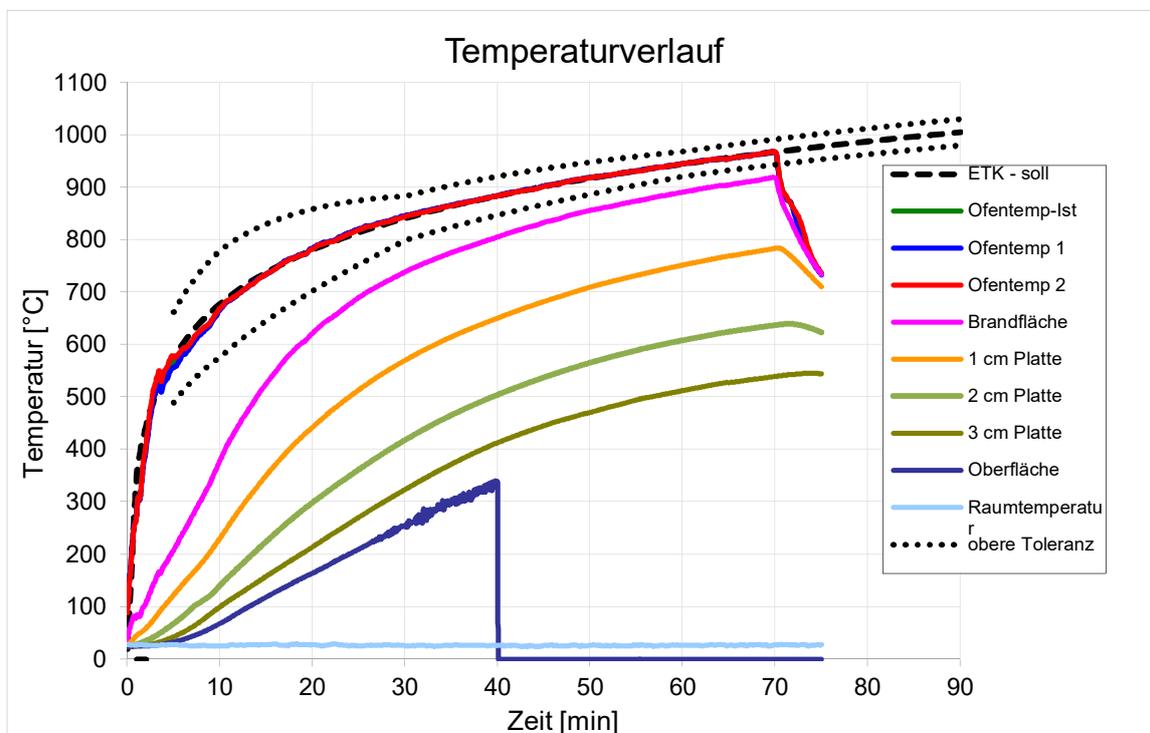
**Abbildung 8.98:** Gewichtsmessung Platte LPB\_L250\_K\_1

## 8.28 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_L250\_K\_2



**Abbildung 8.99:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

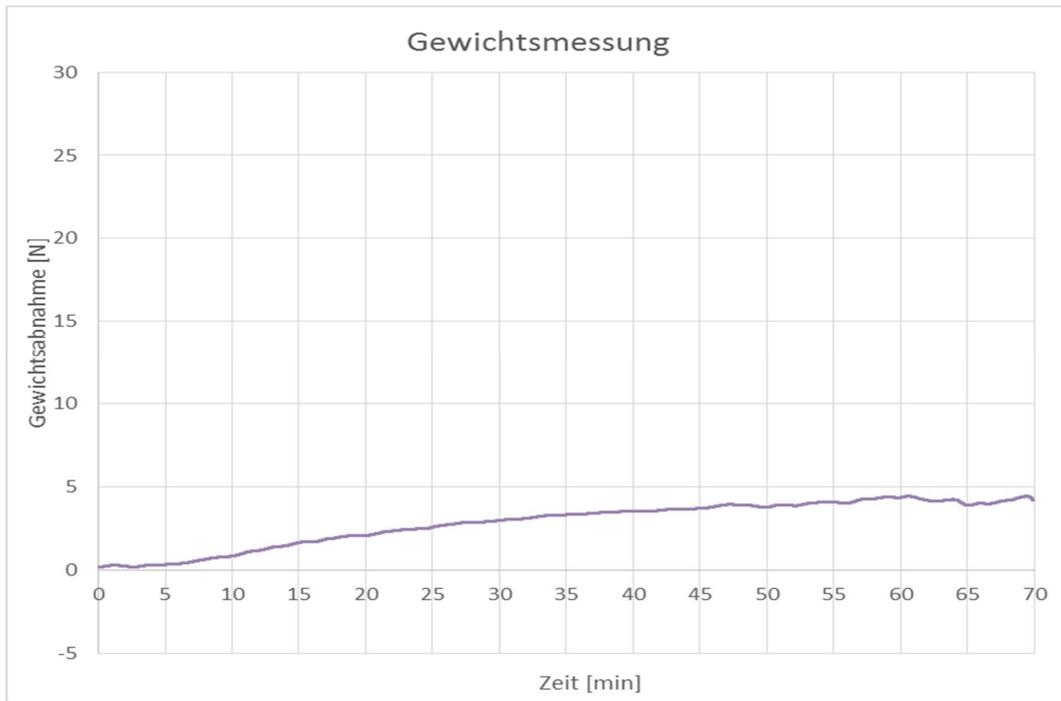
Masse der Platte vor Brandversuch:	5561,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5339,5 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	1,06 %



**Abbildung 8.100:** Temperaturverlauf Platte LPB\_L250\_K\_2

**Versuchsablauf:**

4,75 min Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min Versuchsende



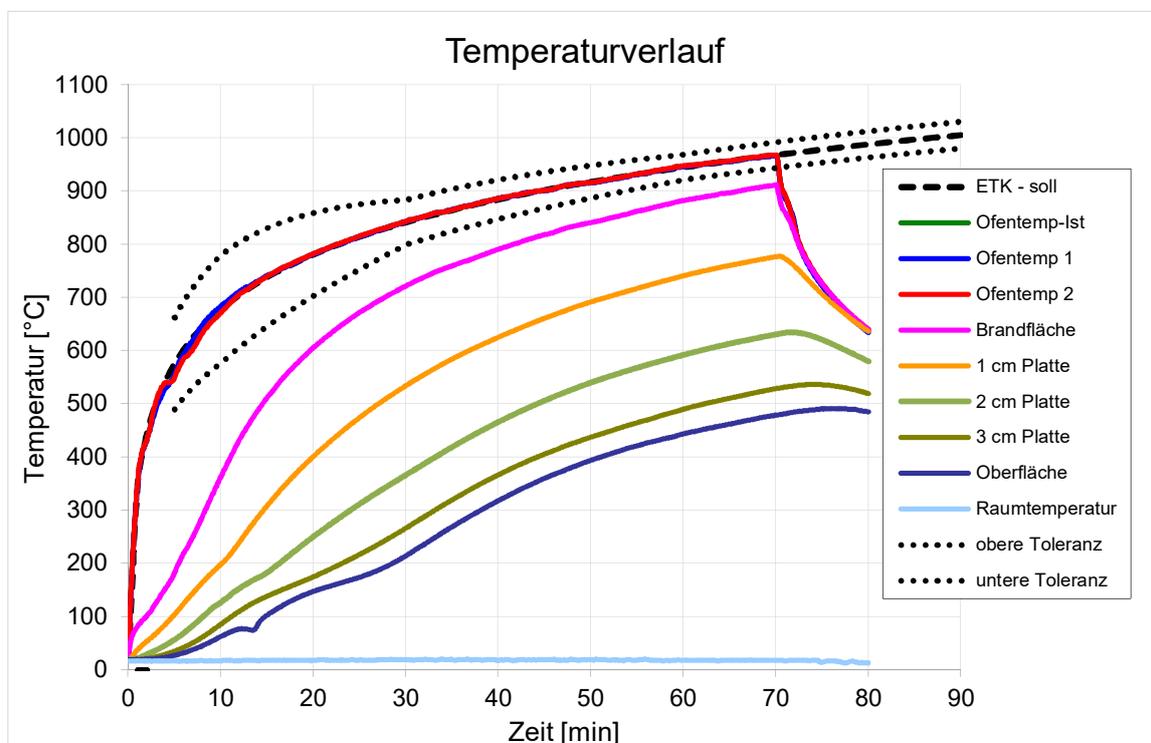
**Abbildung 8.101:** Gewichtsmessung Platte LPB\_L250\_K\_2

## 8.29 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_L250\_W\_1



**Abbildung 8.102:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

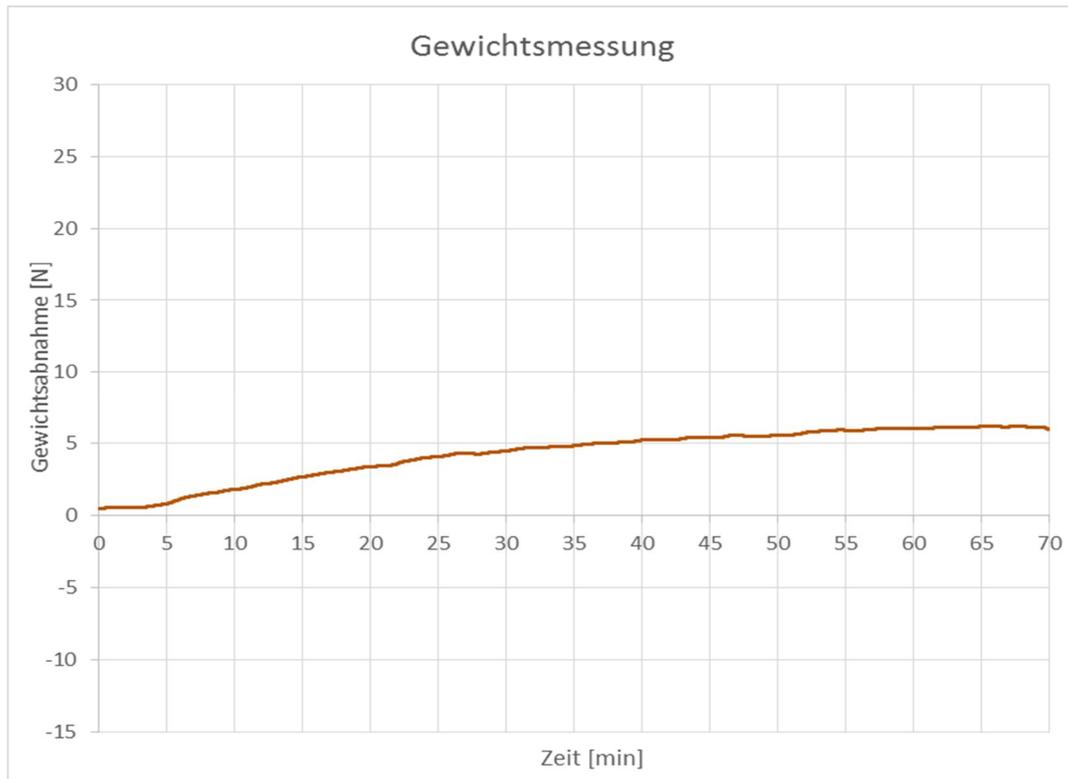
Masse der Platte vor Brandversuch:	5596,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5216,5 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	4,53 %



**Abbildung 8.103:** Temperaturverlauf Platte LPB\_L250\_W\_1

**Versuchsablauf:**

12,25 min    Lautes Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min    Versuchsende



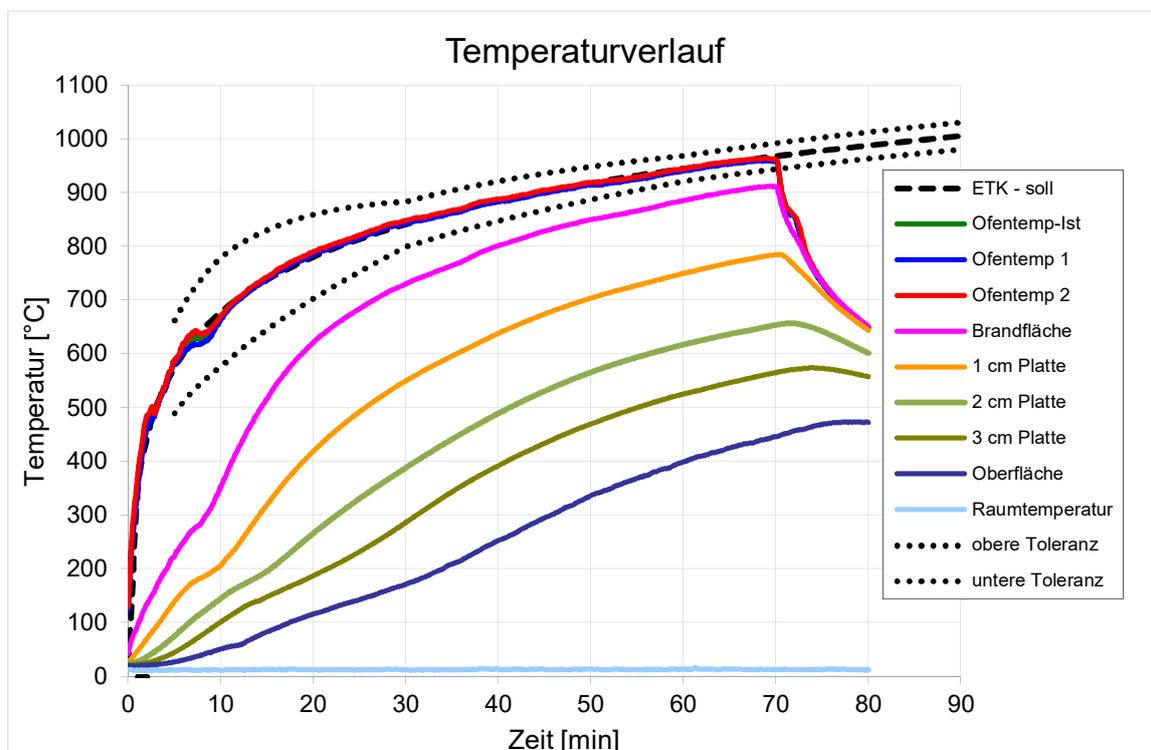
**Abbildung 8.104:** Gewichtsmessung Platte LPB\_L250\_W\_1

### 8.30 Brandversuchsprotokoll Platte LPB\_L250\_W\_2



**Abbildung 8.105:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

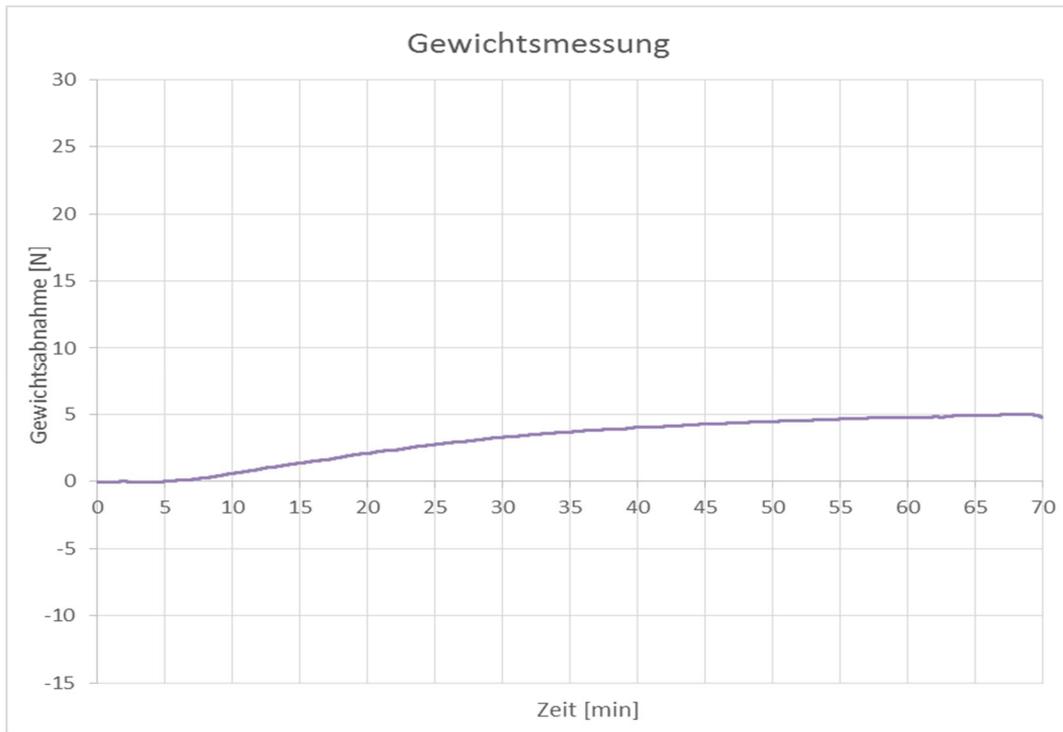
Masse der Platte vor Brandversuch:	5647,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	5244,5 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	5,08 %



**Abbildung 8.106:** Temperaturverlauf Platte LPB\_L250\_W\_2

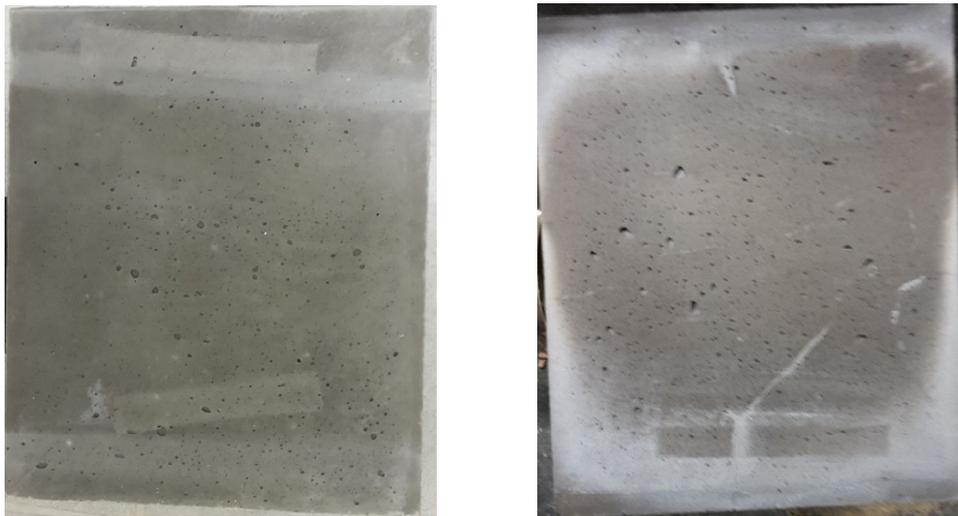
**Versuchsablauf:**

17,00 min    Lautes Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min    Versuchsende



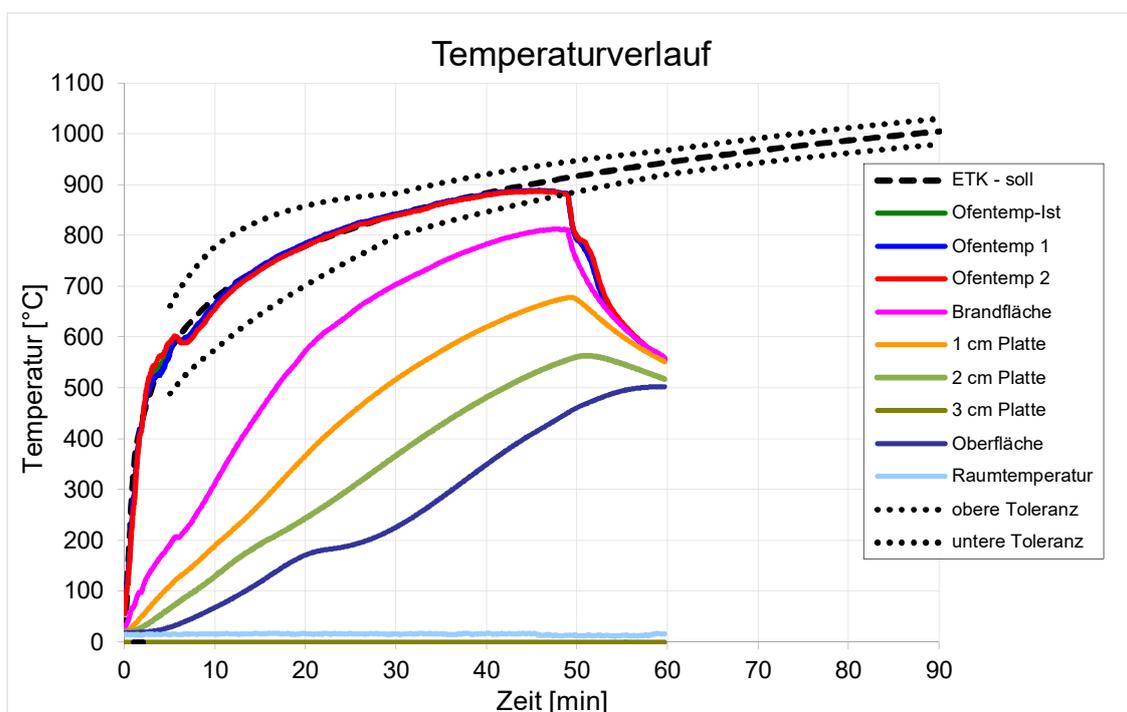
**Abbildung 8.107:** Gewichtsmessung Platte LPB\_L250\_W\_2

### 8.31 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_K\_1



**Abbildung 8.108:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

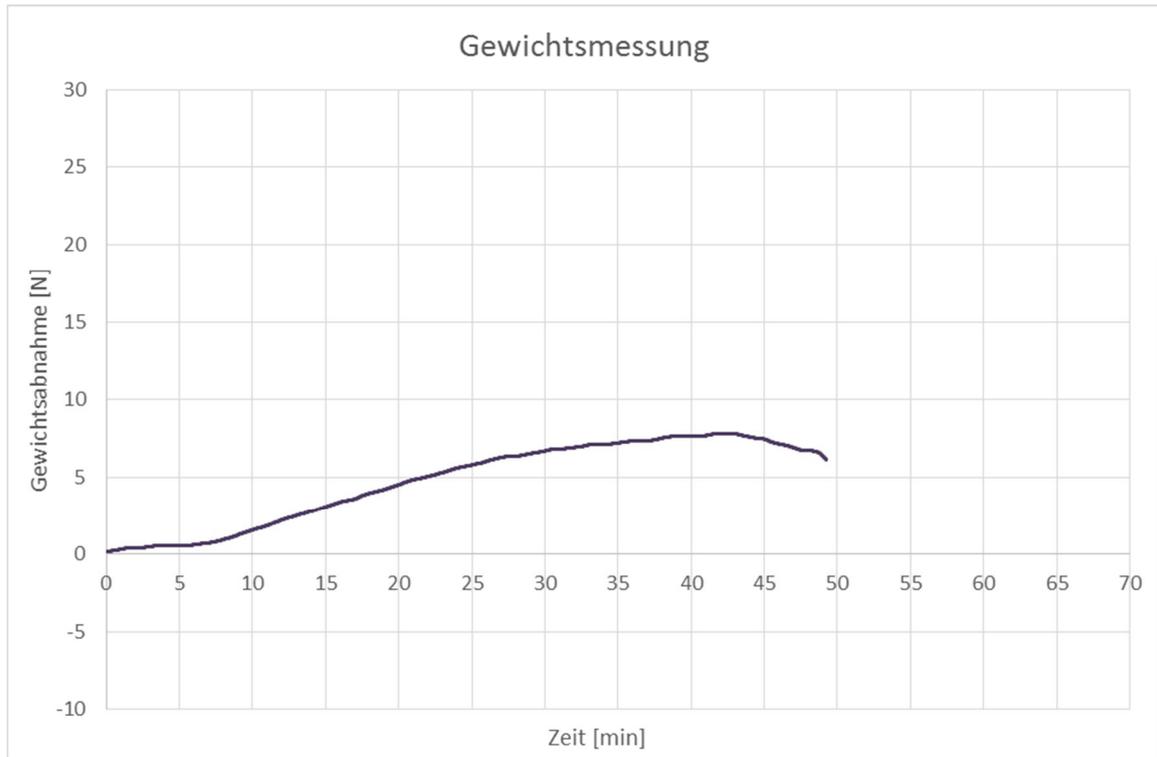
Masse der Platte vor Brandversuch:	6682,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6185,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	4,43 %



**Abbildung 8.109:** Temperaturverlauf Platte FAS\_K\_1

**Versuchsablauf:**

Keine Vorkommnisse  
49,00 min Versuchsende (Gas leer)



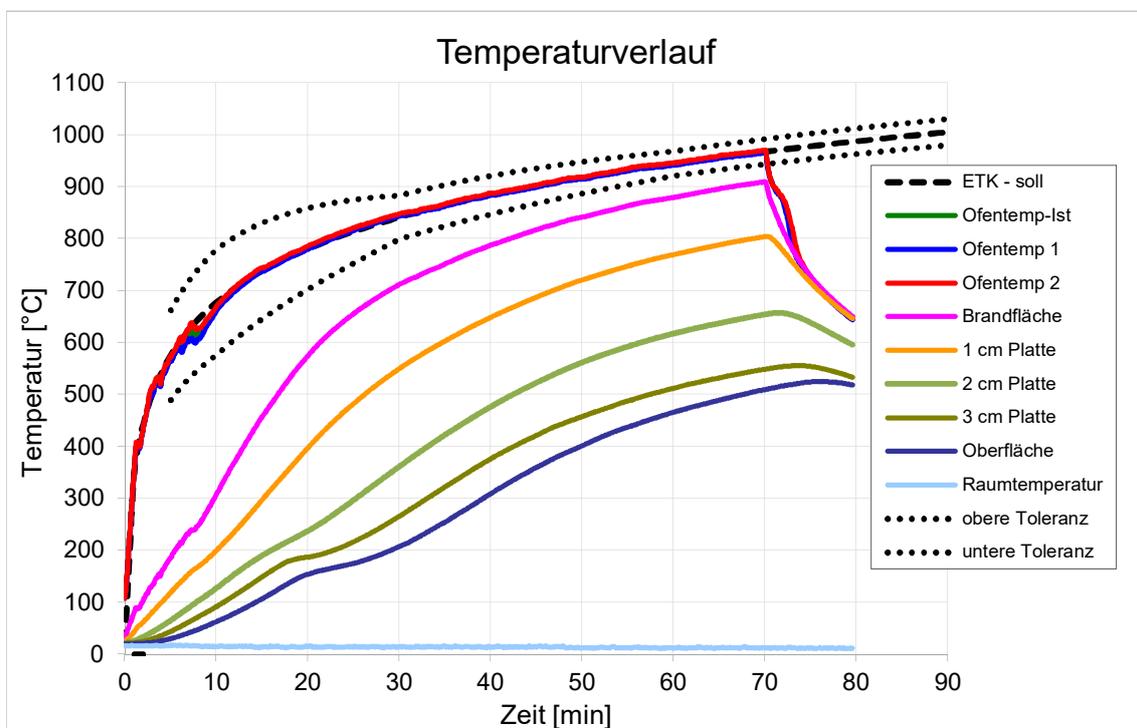
**Abbildung 8.110:** Gewichtsmessung Platte FAS\_K\_1

### 8.32 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_K\_2



**Abbildung 8.111:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

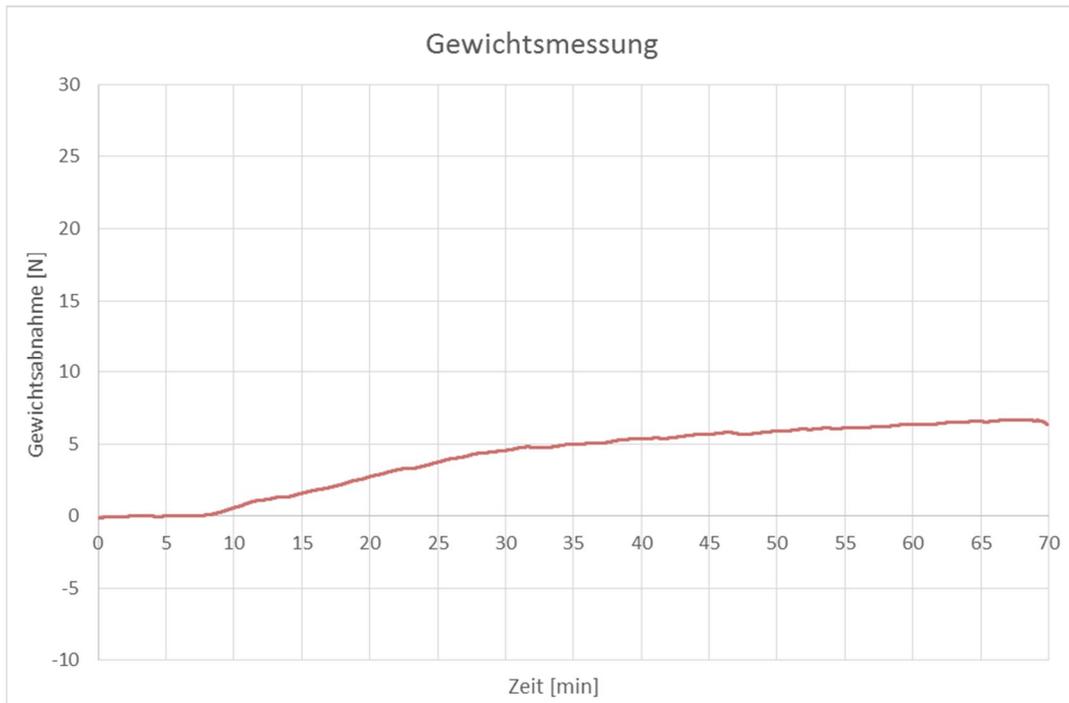
Masse der Platte vor Brandversuch:	6741,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6210,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	4,41 %



**Abbildung 8.112:** Temperaturverlauf Platte FAS\_K\_2

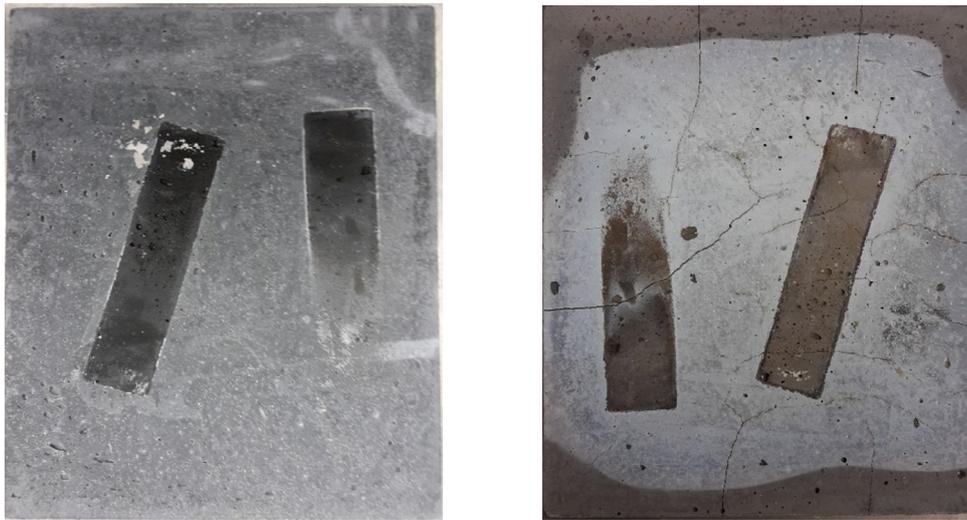
**Versuchsablauf:**

1,05 min      Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min     Versuchsende



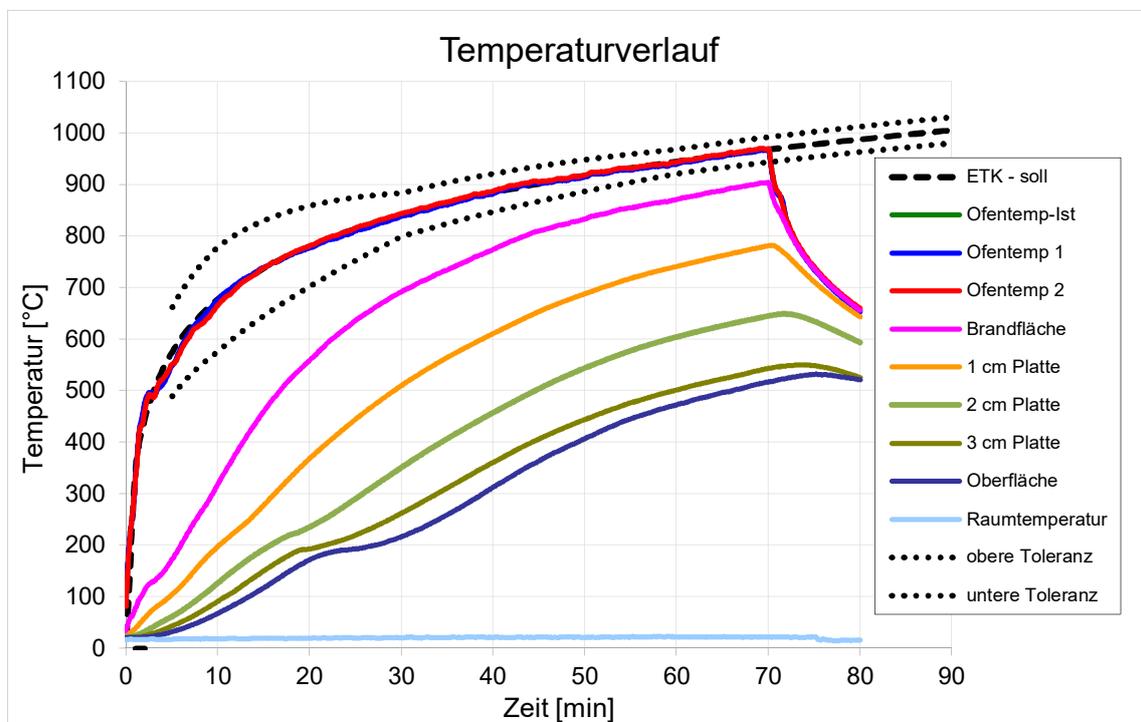
**Abbildung 8.113:** Gewichtsmessung Platte FAS\_K\_2

### 8.33 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_W\_1



**Abbildung 8.114:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

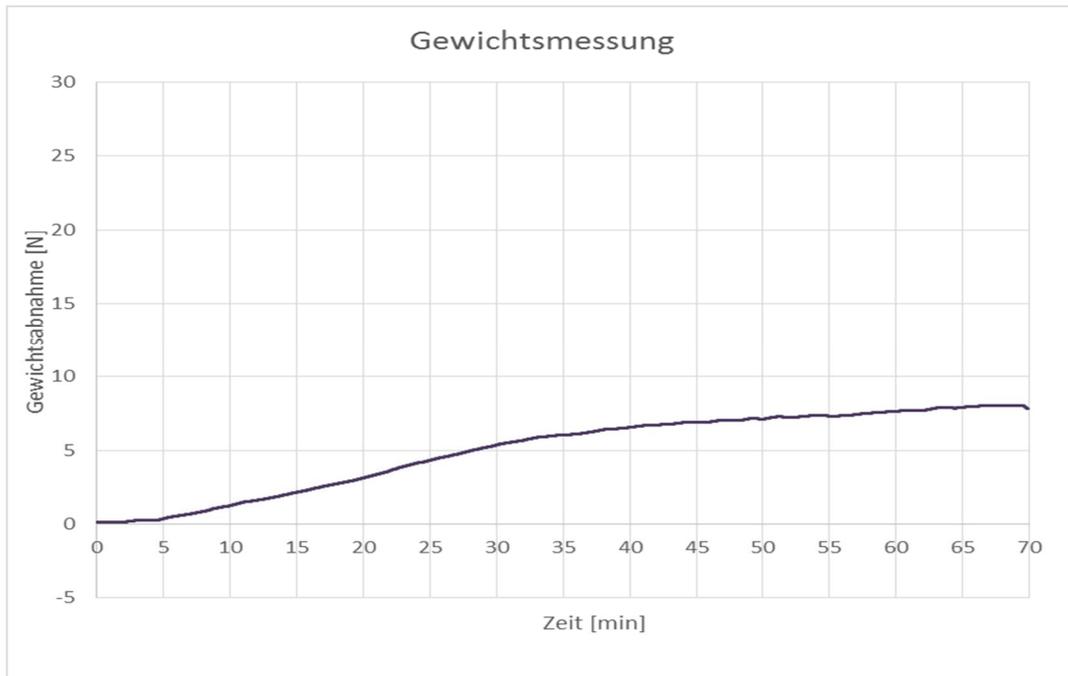
Masse der Platte vor Brandversuch:	6850,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6263,5 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	5,16 %



**Abbildung 8.115:** Temperaturverlauf Platte FAS\_W\_1

**Versuchsablauf:**

4,00 min      Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min    Versuchsende



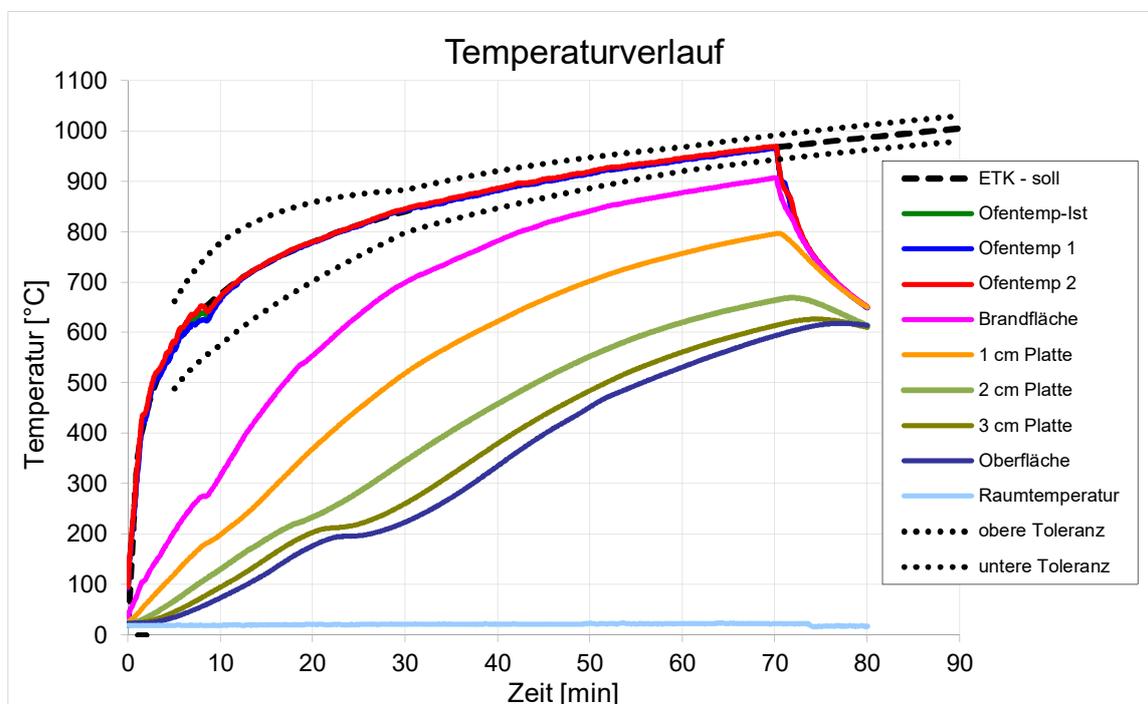
**Abbildung 8.116:** Gewichtsmessung Platte FAS\_W\_1

### 8.34 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_W\_2



**Abbildung 8.117:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

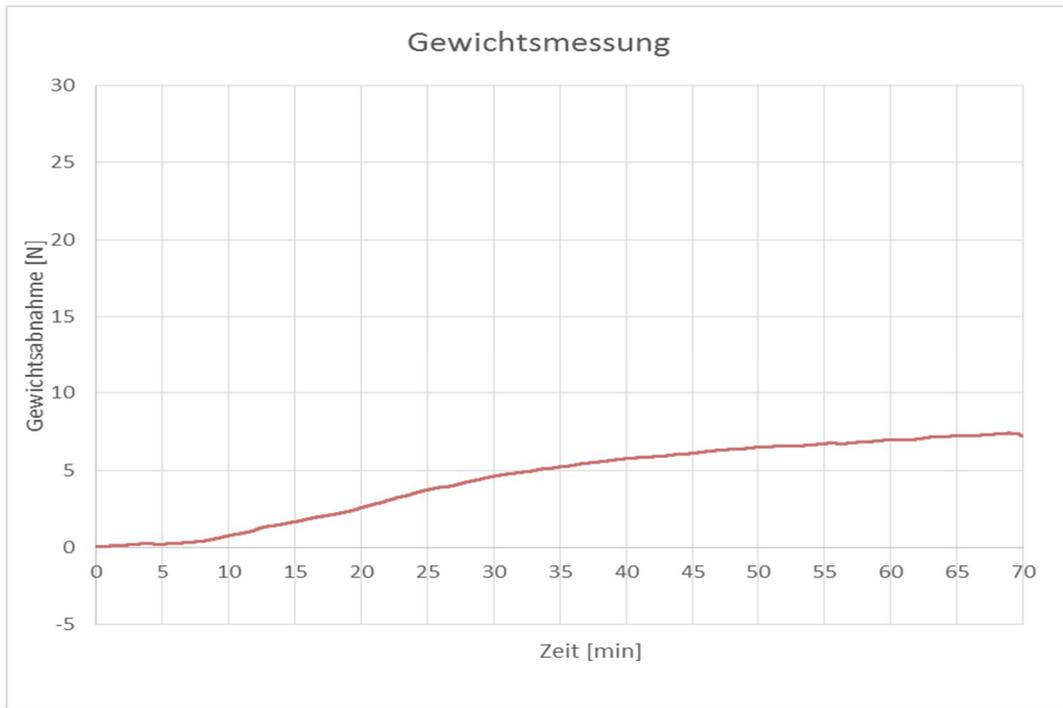
Masse der Platte vor Brandversuch:	6859,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6290,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	5,24 %



**Abbildung 8.118:** Temperaturverlauf Platte FAS\_W\_2

**Versuchsablauf:**

3,50 min      Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min    Versuchsende



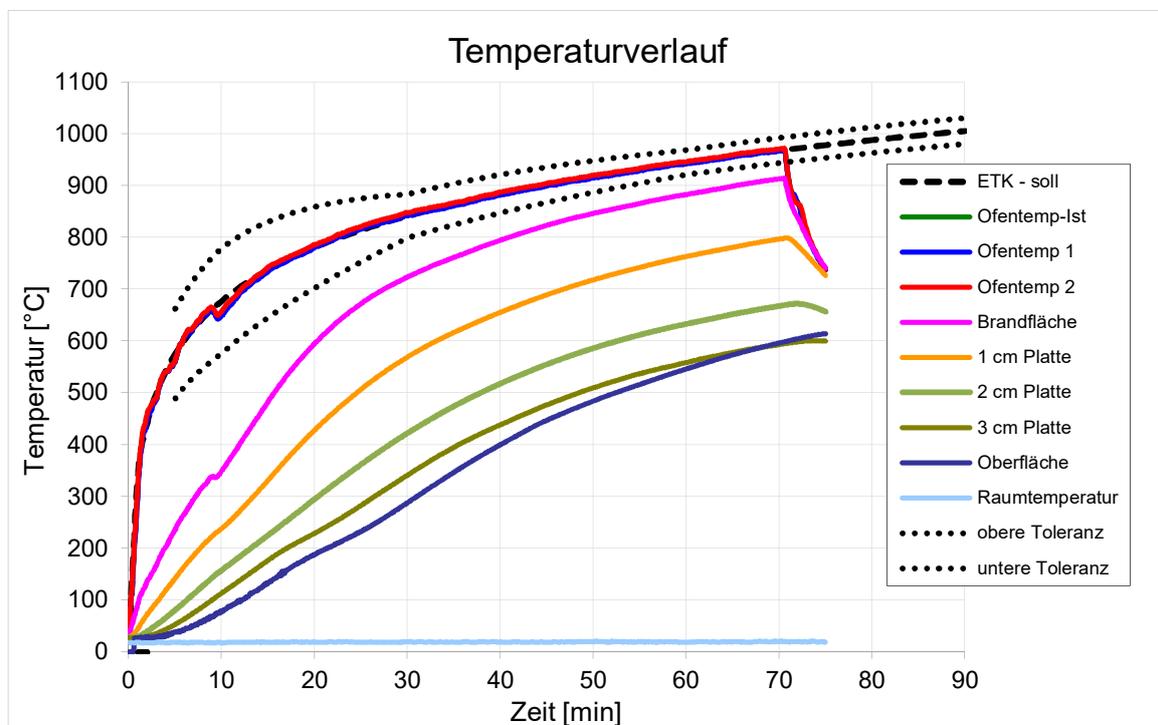
**Abbildung 8.119:** Gewichtsmessung Platte FAS\_W\_2

### 8.35 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_L105\_1



**Abbildung 8.120:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

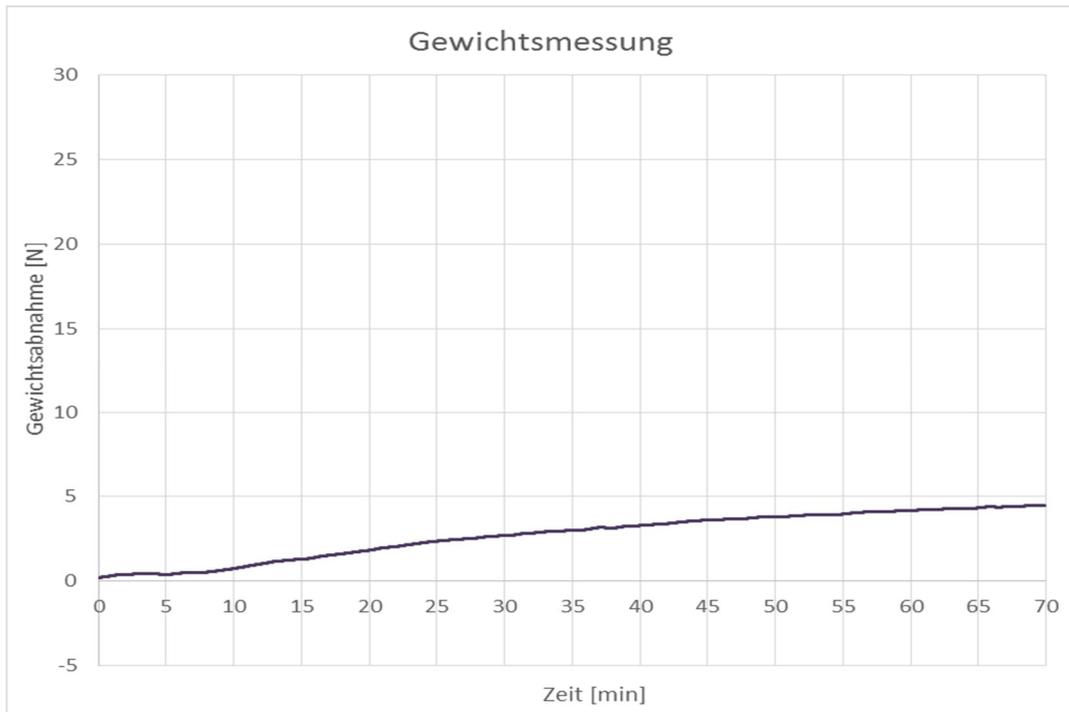
Masse der Platte vor Brandversuch:	6394,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6146,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,00 %



**Abbildung 8.121:** Temperaturverlauf Platte FAS\_L105\_1

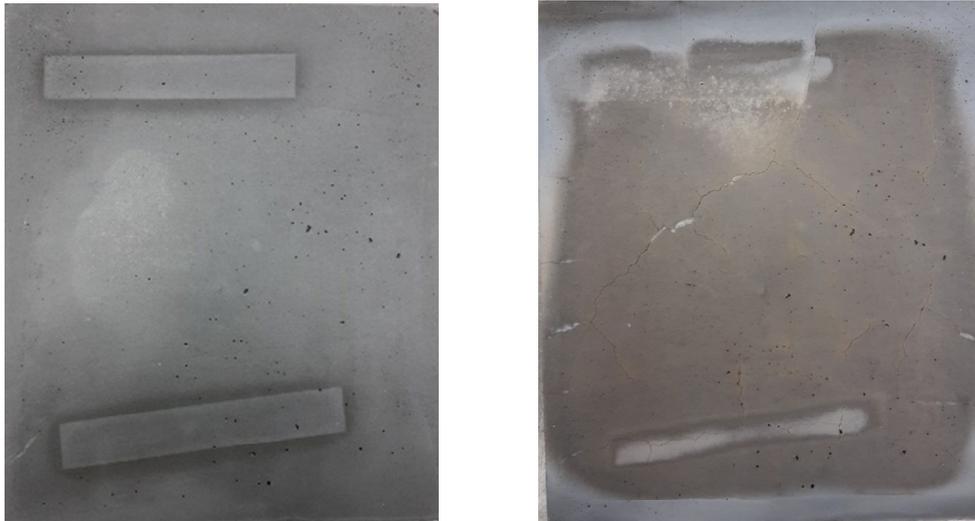
**Versuchsablauf:**

2,45 min      Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min    Versuchsende



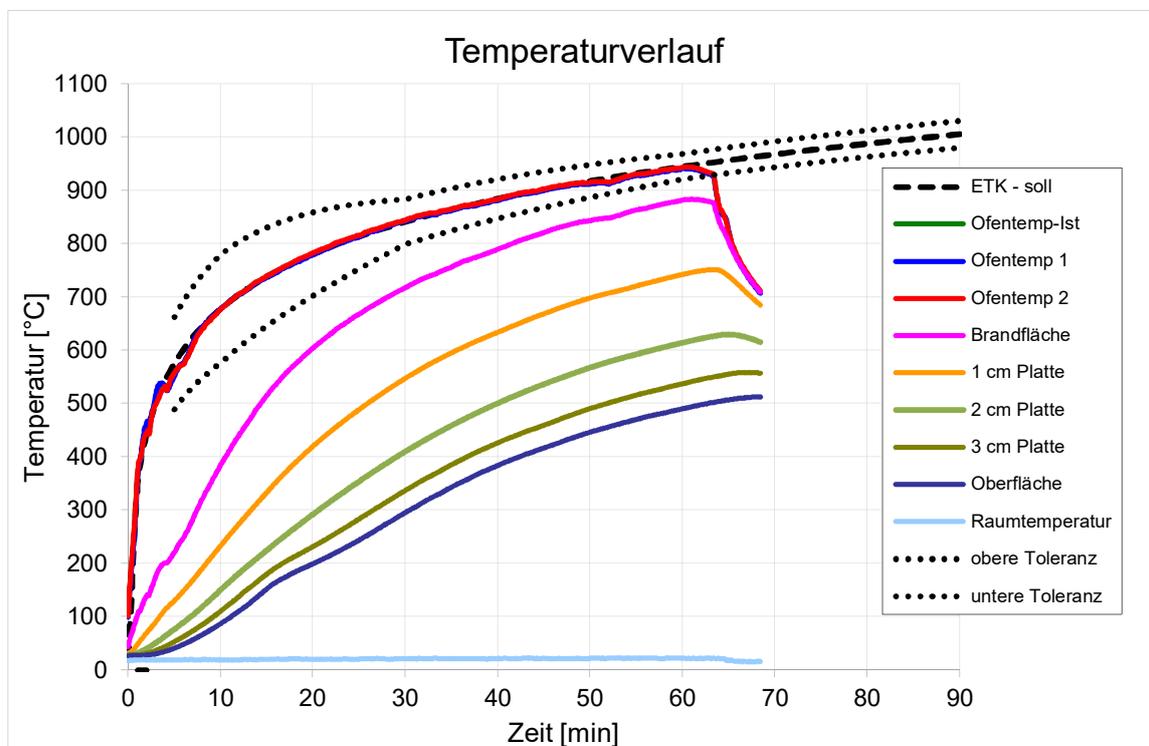
**Abbildung 8.122:** Gewichtsmessung Platte FAS\_L105\_1

### 8.36 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_L105\_2



**Abbildung 8.123:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

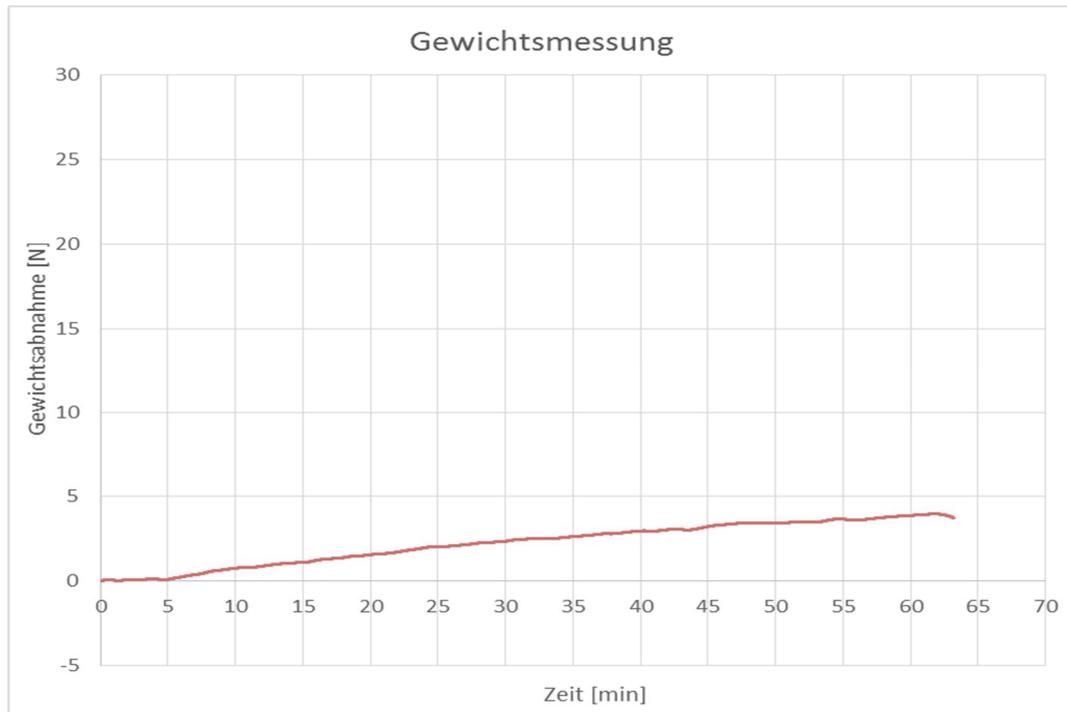
Masse der Platte vor Brandversuch:	6606,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6360,5 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,00 %



**Abbildung 8.124:** Temperaturverlauf Platte FAS\_L105\_2

**Versuchsablauf:**

1,95 min      Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
63,25 min    Versuchsende (Gas leer)



**Abbildung 8.125:** Gewichtsmessung Platte FAS\_L105\_2

## 8.37 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_L250\_K\_1

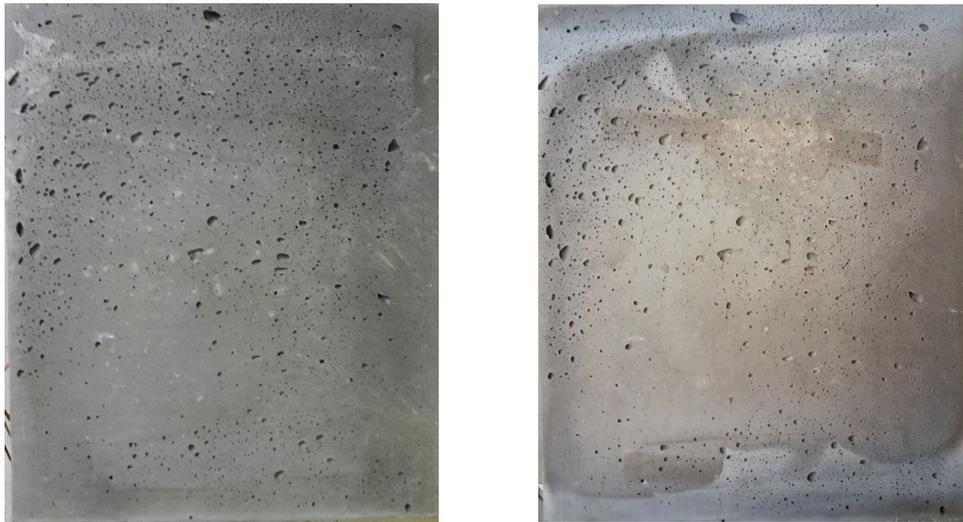


Abbildung 8.126: Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

Masse der Platte vor Brandversuch:	6383,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6124,0 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,37 %

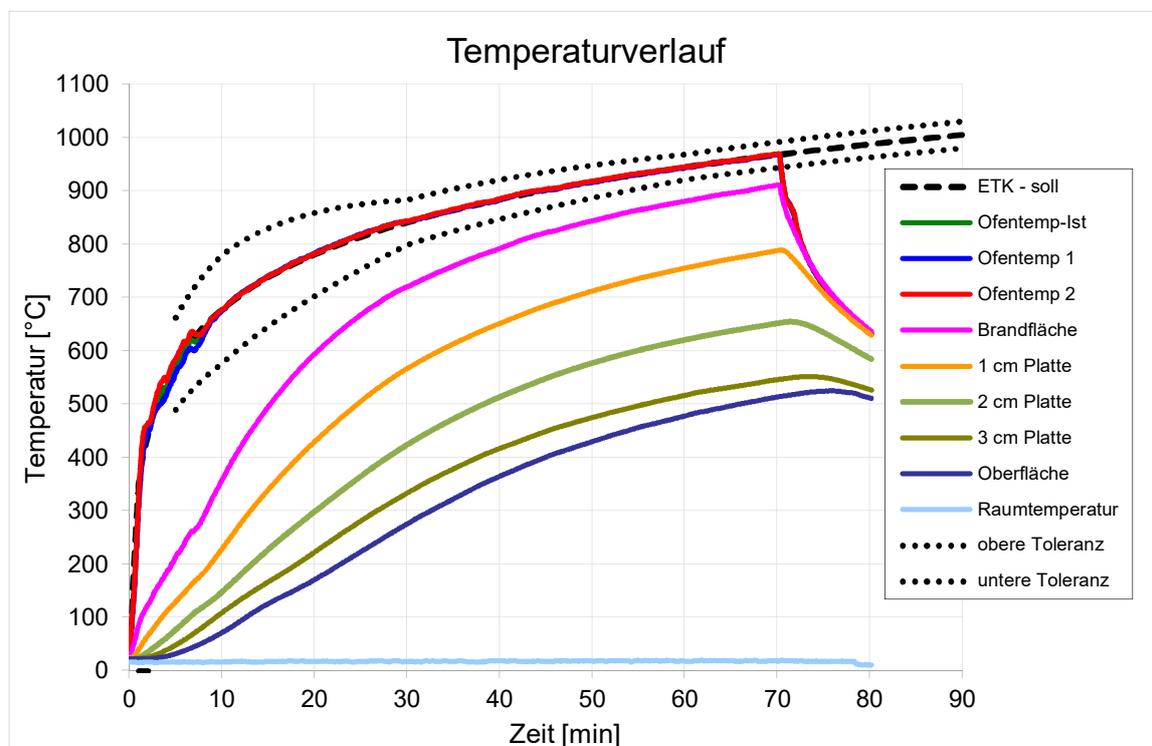
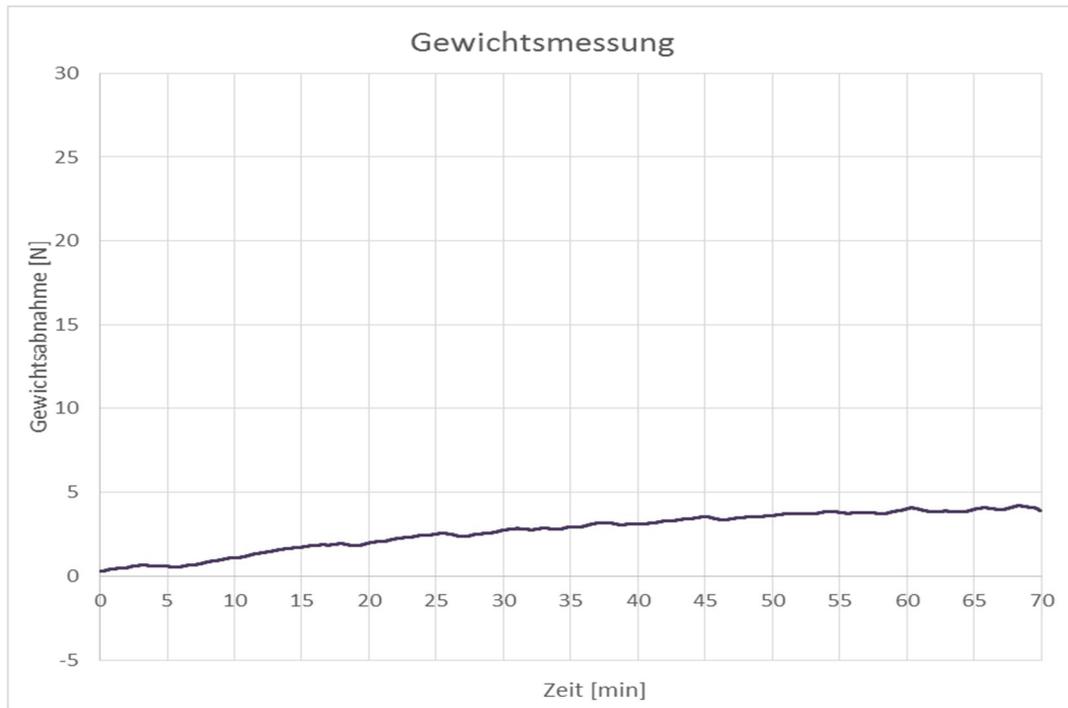


Abbildung 8.127: Temperaturverlauf Platte FAS\_L250\_K\_1

**Versuchsablauf:**

5,00 min      Knacken hörbar (keine Abplatzungen)  
Keine Vorkommnisse  
70,00 min    Versuchsende



**Abbildung 8.128:** Gewichtsmessung Platte FAS\_L250\_K\_1

## 8.38 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_L250\_K\_2

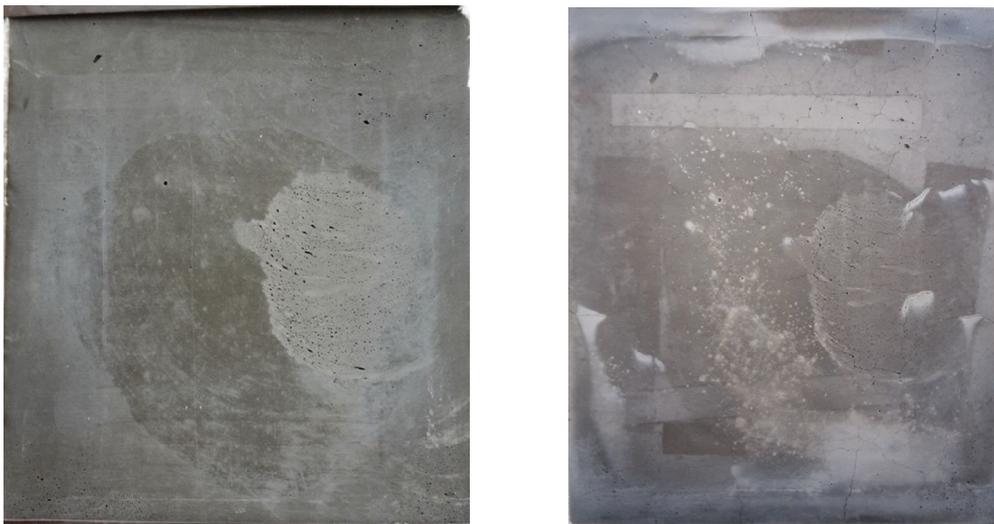


Abbildung 8.129: Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

Masse der Platte vor Brandversuch:	6591,5 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6326,5 g
Masse abgeplatzt Material:	- g
Wassergehalt:	0,41 %

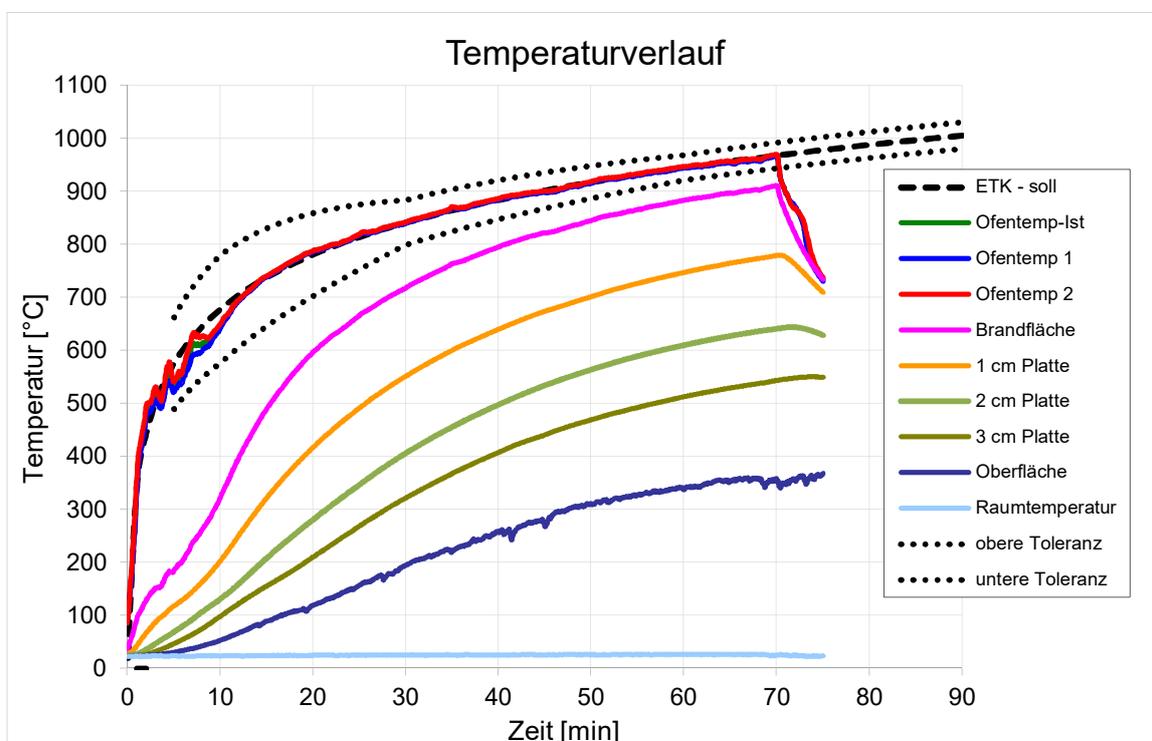
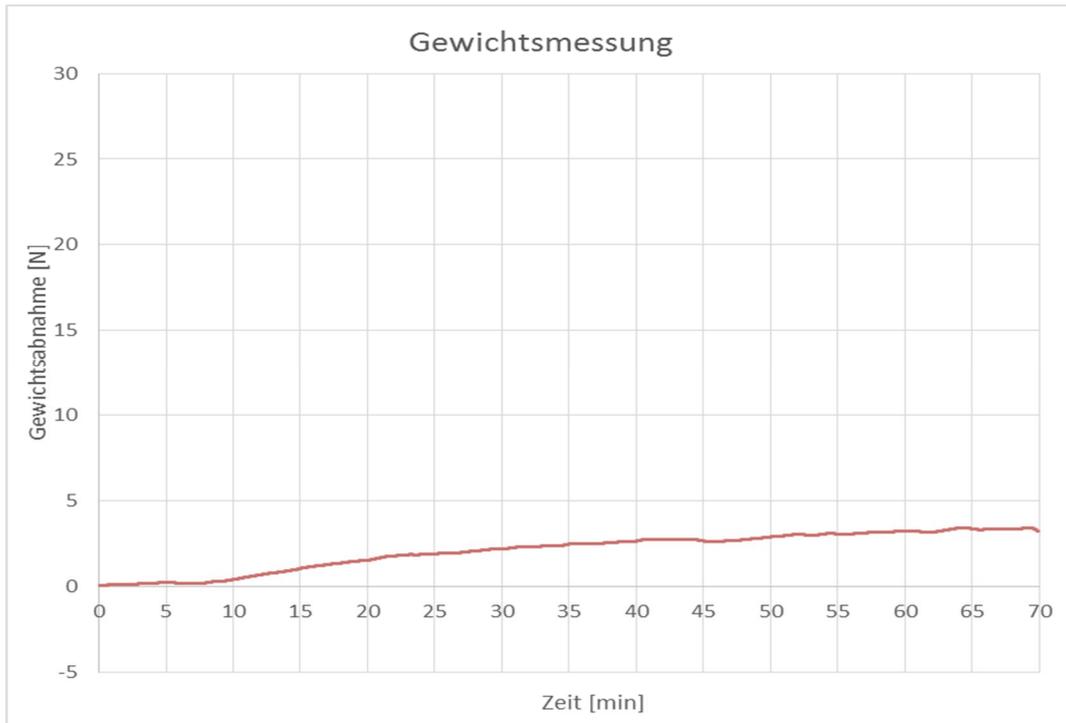


Abbildung 8.130: Temperaturverlauf Platte FAS\_L250\_K\_2

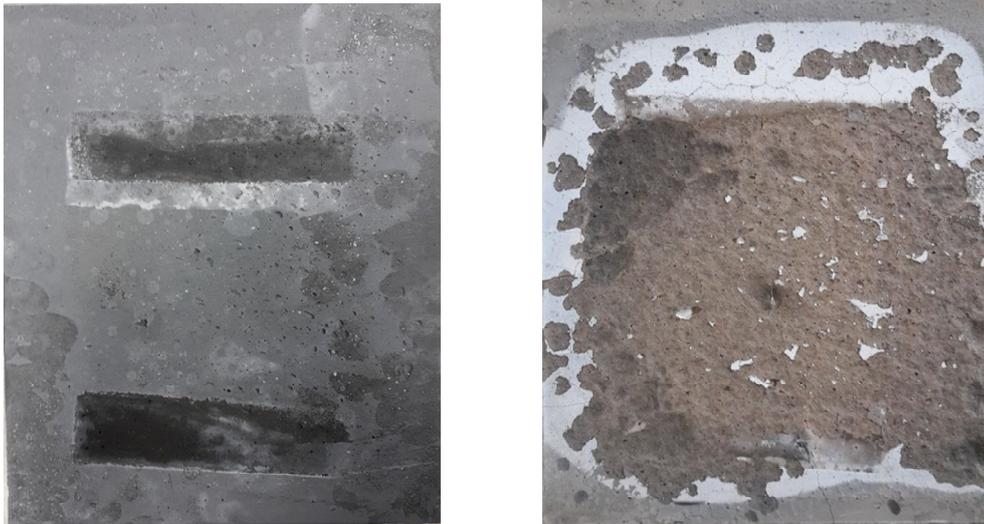
**Versuchsablauf:**

Keine Vorkommnisse  
70,00 min Versuchsende



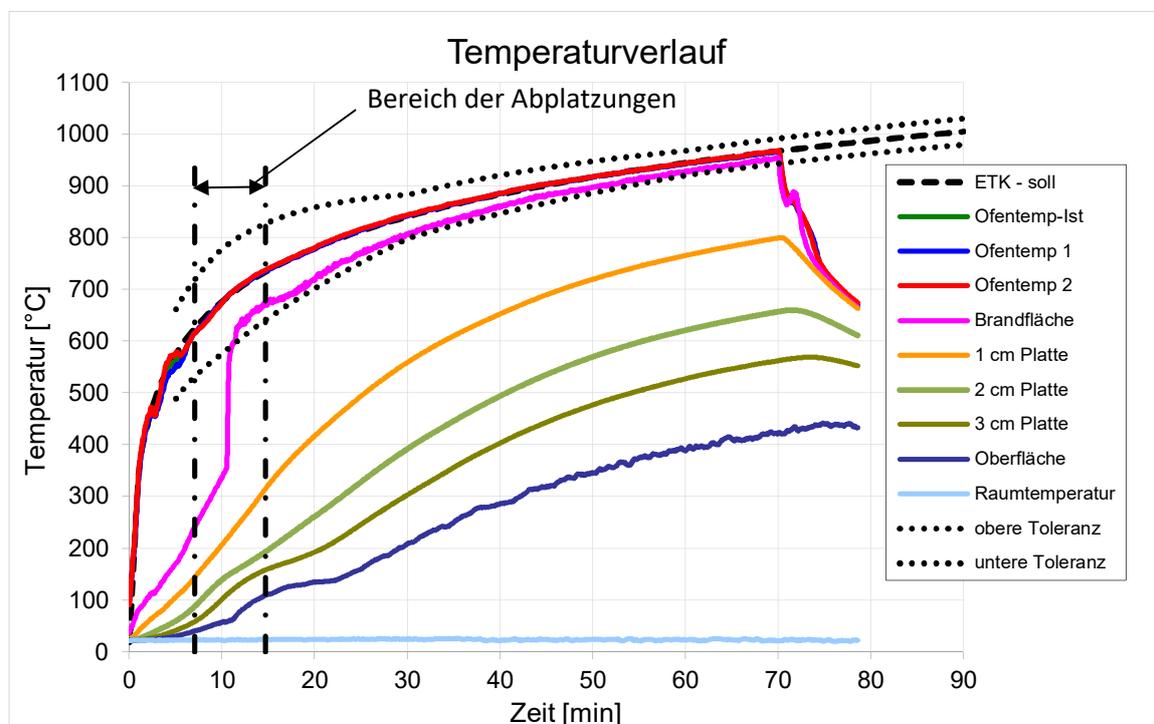
**Abbildung 8.131:** Gewichtsmessung Platte FAS\_L250\_K\_2

### 8.39 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_L250\_W\_1



**Abbildung 8.132:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

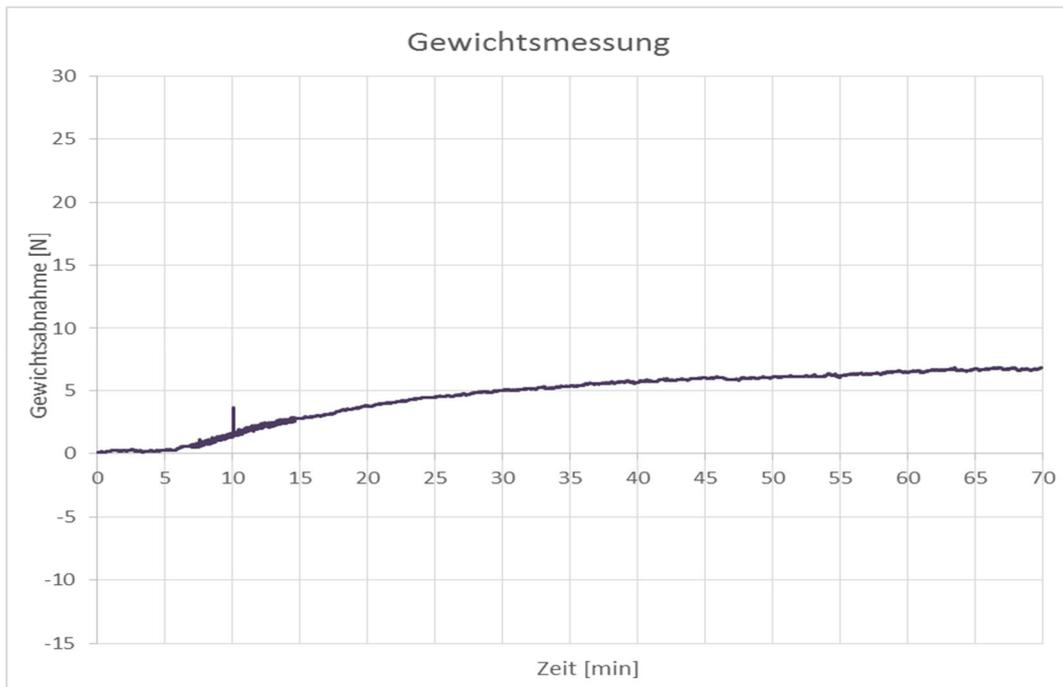
Masse der Platte vor Brandversuch:	6773,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6256,5 g
Masse abgeplatzt Material:	71,5 g
Wassergehalt:	3,75 %



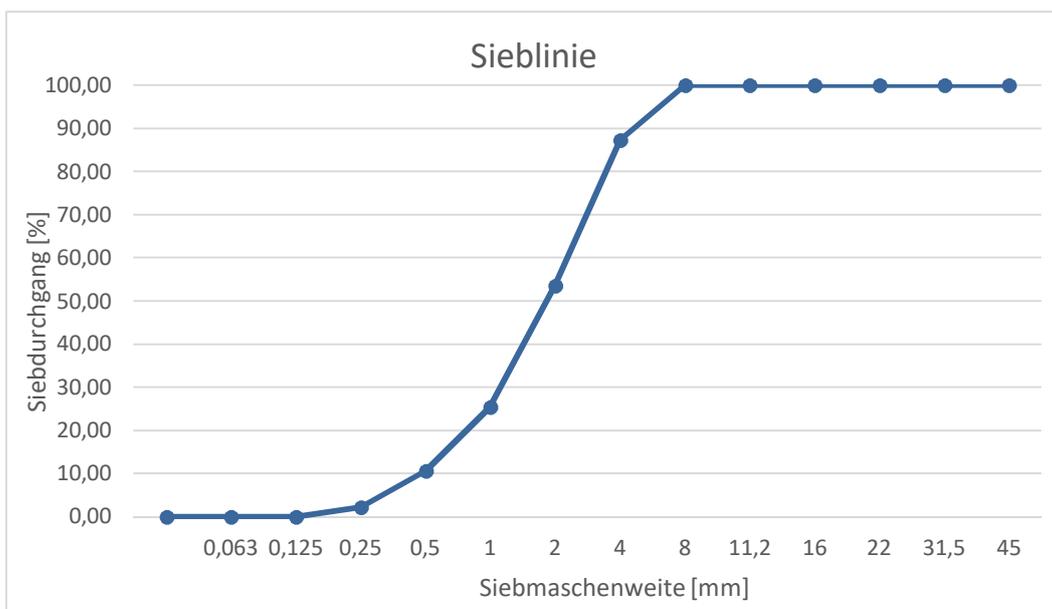
**Abbildung 8.133:** Temperaturverlauf Platte FAS\_L250\_W\_1

**Versuchsablauf:**

7,00 min	Erste Abplatzungen hörbar
11,75 min	Abplatzungen werden weniger (alle 5-10 Sekunden)
14,66 min	Abplatzungen haben aufgehört
70,00 min	Versuchsende

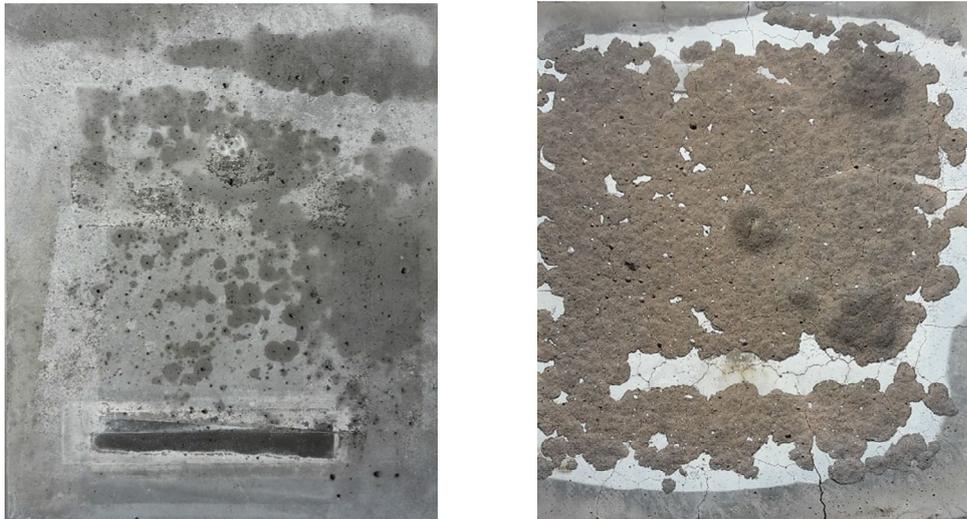


**Abbildung 8.134:** Gewichtsmessung Platte FAS\_L250\_W\_1



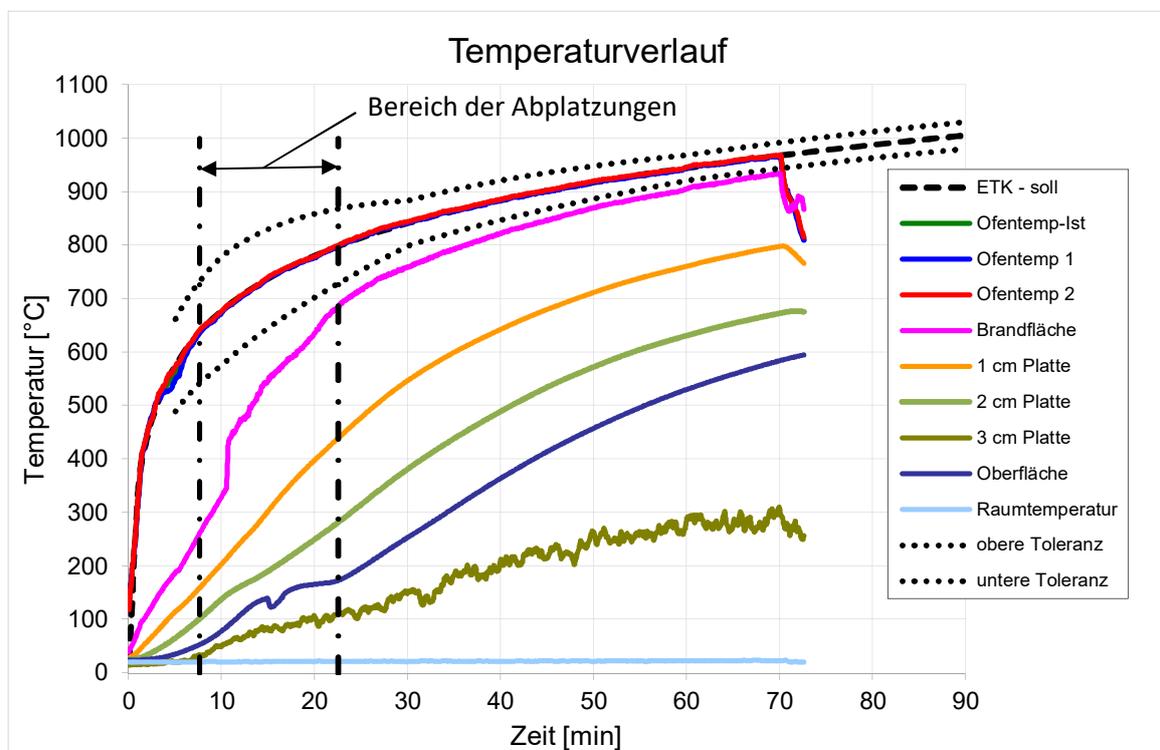
**Abbildung 8.135:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte FAS\_L250\_W\_1

### 8.40 Brandversuchsprotokoll Platte FAS\_L250\_W\_2



**Abbildung 8.136:** Oberfläche der Brandplatte: Vor Brandversuch (links); nach Brandversuch (rechts)

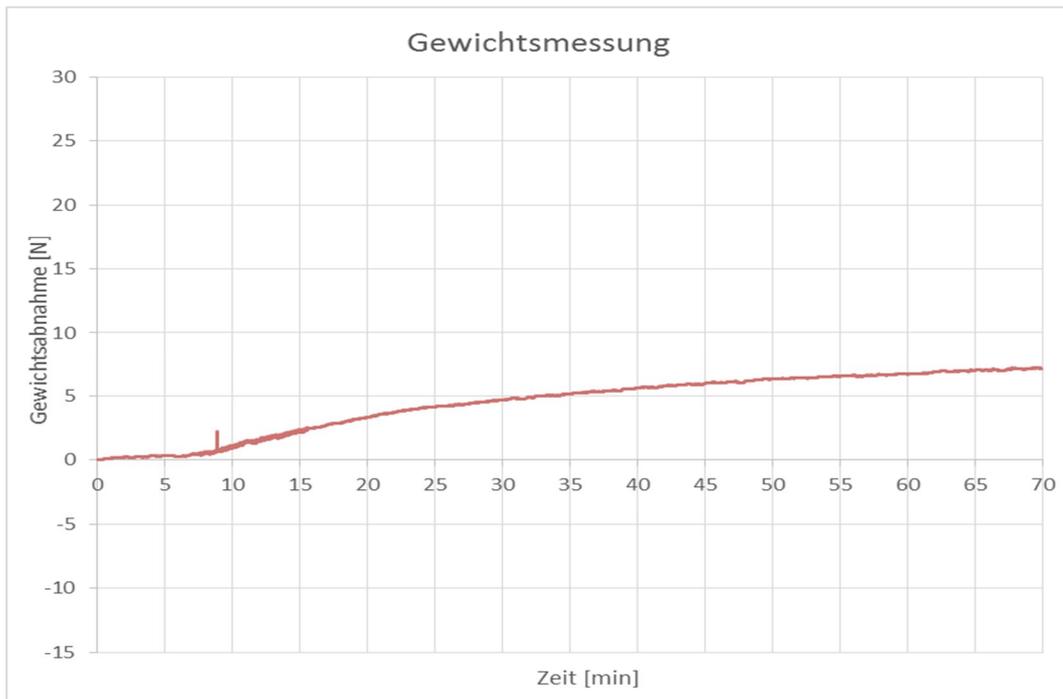
Masse der Platte vor Brandversuch:	6805,0 g
Masse der Platte nach Brandversuch:	6255,5 g
Masse abgeplatzt Material:	68,0 g
Wassergehalt:	3,36 %



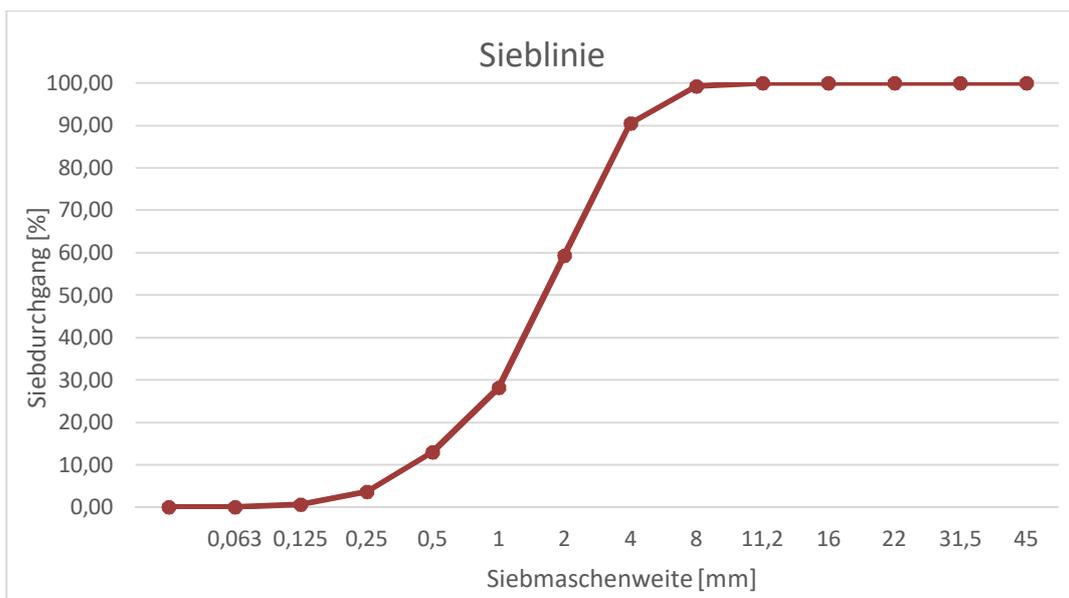
**Abbildung 8.137:** Temperaturverlauf Platte FAS\_L250\_W\_2

**Versuchsablauf:**

7,57 min	Erste Abplatzungen hörbar
15,35 min	Abplatzungen werden weniger (alle 8-12 Sekunden)
22,50 min	Abplatzungen haben aufgehört
70,00 min	Versuchsende



**Abbildung 8.138:** Gewichtsmessung Platte FAS\_L250\_W\_2



**Abbildung 8.139:** Sieblinie des abgeplatzten Materials der Platte FAS\_L250\_W\_2