



# DIPLOMARBEIT

## Master Thesis

### **Frühschwindverhalten von ultrahochfesten Betonen**

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

unter der Leitung von

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Deix Karl

Institut für Hochbau und Technologie, TU Wien  
Karlsplatz 13, 1040 Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Karol Bulowski

Matrikelnummer 1326277

Ignaz-Weigl-Gasse 1/17+18, 1110 Wien

Wien, am 21.06.2016

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich vorliegende Arbeit selber ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel erledigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Informationen und Daten sind im Literaturverzeichnis genannt. Weitere Personen waren an der inhaltlich Erstellung der Arbeit nicht beteiligt.

Ich bestätige, dass ich reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Wien, am 21.06.2016

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand aufgrund meiner Diplomarbeit, die ich an der technischen Universität in Wien am Institut für Hochbau und Technologie - Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstoffe und Brandsicherheit der TU Wien im Zeitraum von Juli 2014 bis Juli 2015 gemacht habe.

Vor allem bedanke ich mich herzlich bei Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Karl Deix für die Betreuung, unschätzbare Unterstützung und Begutachtung. Ebenso bedanke ich mich bei Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Heinrich Bruckner und Dipl.-Ing. Dr.-techn. Johannes Kirnbauer für zahlreiche Ratschläge.

Schlussendlich danke ich sehr meiner Ehefrau Anna, meinen Eltern sowie Geschwistern, die mir während des ganzen Studiums viel geholfen haben, für mich immer da sind und mich oft fragen: wann ich mit dem Studium fertig werde?

*"Es ist des Lernens kein Ende"*

Robert Schumann

---

---

## Abkürzungsverzeichnis

|                     |  |
|---------------------|--|
| UHPC                | ultrahochfester Beton (in Englisch: Ultra High Performance Concrete) |
| Ca(OH) <sub>2</sub> | Calciumhydroxid  |
| W/Z-Wert            | Wasserzementwert   |
| CO <sub>2</sub>     | Kohlendioxid   |
| Ca(OH) <sub>2</sub> | Calciumhydroxid  |
| QM                  | Quarzmehl  |
| QS, GK              | Quarzsand  |
| SF                  | Stahlfasern  |
| MS                  | Microsilica  |
| VR                  | Versuch  |
| CEM I               | Portlandzement   |
| CEM II              | Portlandkompositzement   |
| CEM III             | Hochofenzement   |
| S.                  | Serie  |
| FM                  | Fließmittel  |
| PK                  | Probekörper  |
| GK                  | Gesteinskörnung  |
| PVA                 | Kunststofffasern (Polyvinylalkohol-Fasern)                           |
| PZ                  | Portlandzement   |
| C <sub>3</sub> A    | Tricalciumaluminat   |

---

---

## Inhaltsverzeichnis

|       |   |        |
|-------|---|--------|
| 1     | Kurzfassung.....  | - 5 -  |
|       | Summary .....   | - 6 -  |
| 2     | Einleitung .....  | - 7 -  |
| 3     | Zusammensetzung.....  | - 11 - |
| 3.1   | Zement.....   | - 11 - |
| 3.2   | Wasser .....  | - 13 - |
| 3.3   | Zusatzstoffe .....  | - 16 - |
| 3.4   | Gesteinskörnung.....  | - 17 - |
| 3.5   | Zusatzmittel .....  | - 18 - |
| 3.6   | Fasern.....   | - 19 - |
| 4     | Schwinden.....  | - 19 - |
| 4.1   | Kapillarschwinden.....  | - 19 - |
| 4.2   | Autogenes Schwinden .....   | - 20 - |
| 4.2.1 | Selbstaustrocknung.....   | - 21 - |
| 4.2.2 | Autogene Verformungen.....  | - 21 - |
| 4.2.3 | Hydratation.....  | - 22 - |
| 4.3   | Trocknung Schwinden.....  | - 24 - |
| 4.4   | Carbonatisierungsschwinden .....                                    | - 24 - |
| 5     | Messverfahren .....   | - 25 - |
| 5.1   | Distanz-Mess-Sensoren Präzisionstyp.....                            | - 26 - |
| 5.2   | Der Spannungsumwandler.....   | - 27 - |
| 5.3   | Digital-Multimeter Datenerfassung und Datenaufzeichnung-System..... | - 27 - |
| 5.4   | Thermodraht .....   | - 28 - |
| 5.5   | Probekörper .....   | - 28 - |
| 6     | Vorbereitung.....   | - 31 - |
| 6.1   | Waage .....   | - 31 - |
| 6.2   | Mörtelmischer.....  | - 31 - |
| 6.3   | Abdeckungen .....   | - 32 - |
| 6.4   | Abdeckungen.....  | - 32 - |
| 7     | Versuche.....   | - 33 - |
| 7.1   | Vorversuch.....   | - 33 - |
| 7.1.1 | Ergebnisse .....  | - 35 - |

---

---

|       |                                     |        |
|-------|-------------------------------------|--------|
| 7.2   | Versuchsplanung .....               | - 37 - |
| 7.3   | Versuch 1 .....                     | - 39 - |
| 7.3.1 | Ergebnisse .....                    | - 40 - |
| 7.3.2 | Bewertung .....                     | - 43 - |
| 7.4   | Versuch 2.....                      | - 46 - |
| 7.4.1 | Ergebnisse .....                    | - 47 - |
| 7.4.2 | Bewertung .....                     | - 49 - |
| 7.5   | Versuch 3.....                      | - 52 - |
| 7.5.1 | Ergebnisse .....                    | - 53 - |
| ..... | .....                               | - 55 - |
| ..... | .....                               | - 56 - |
| 7.5.2 | Bewertung .....                     | - 56 - |
| 7.6   | Versuch 4.....                      | - 59 - |
| 7.6.1 | Ergebnisse .....                    | - 60 - |
| ..... | .....                               | - 62 - |
| 7.6.2 | Bewertung .....                     | - 62 - |
| 7.7   | Versuch 5.....                      | - 65 - |
| 7.7.1 | Ergebnisse .....                    | - 65 - |
| ..... | .....                               | - 65 - |
| 7.7.2 | Bewertung .....                     | - 69 - |
| 7.8   | Versuch 6.....                      | - 72 - |
| 7.8.1 | Ergebnisse .....                    | - 73 - |
| 7.8.2 | Bewertung .....                     | - 76 - |
| 7.9   | Versuch 7.....                      | - 79 - |
| 7.9.1 | Ergebnisse .....                    | - 80 - |
| 7.9.2 | Bewertung .....                     | - 84 - |
| 8     | Interpretation der Ergebnisse ..... | - 86 - |
| 9     | Schlussfolgerung .....              | - 88 - |

---

---

## 1 Kurzfassung

Das Ziel der Arbeit war es, den Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Fröhschwindverhalten des ultrahochfesten Betons zu ermitteln. Werkstoffliche Ursachen für Formänderungen des Betons im jungen Alter lassen sich nach ihrer Entstehung einteilen in:

- Hydratationswärme
- chemisches Quellen
- chemisches Schwinden
- autogenes Schwinden infolge Selbstaustrocknung

Die zwei letzten Punkte treten vor allem bei hochfestem Beton in Erscheinung [24]. Das Schwinden des Betons ist besonders sehr hoch in den ersten 48 Stunden infolge chemischer Reaktionen und physikalischer Vorgänge wie Selbstaustrocknung während der Hydratation. Um die Einflüsse auf das Schwinden des ultrahochfesten Betons zu ermitteln, wurden Antworten auf unten dargestellte Fragen gesucht:

1. Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwindverhalten des ultrahochfesten Betons in Abhängigkeit des W/Z Wertes?
  2. Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei Verwendung unterschiedlicher Zemente?
  3. Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Fließmittel?
  4. Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Microsilica (Zusatzstoff)?
  5. Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Quarzmehl (Zusatzstoff)?
  6. Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei Zugabe unterschiedlicher Mengen Quarzsand (Zusatzstoff)?
  7. Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei Zugabe verschiedener Fasern?
-

## Summary

The aim of the study was to determine the influence of the concrete composition of the ultra-high strength concrete at an early age shrinkage behaviour. Material causes of the form changes of the young concrete can be differentiated according to their origin as follows:

- heat of hydration
- chemical swell
- chemical shrinkage
- autogenous shrinkage as a result of self-drying-out process

The last two points appear particularly when it concerns high-strength concrete [24]. The shrinkage of the concrete is especially high in the first 48 hours as a consequence of chemical reactions and physical processes such as self-drying-out process during hydration. In order to determine the influences on the shrinkage of the ultra-high-strength concrete, the were the questions below to be answered:

1. How does the shrinkage of the ultra-high-strength concrete differ in 48 hours depending on the Water-cement ratio?
  2. How does the shrinkage of the ultra-high-strength concrete differ in 48 hours when using different types of cement?
  3. How does the shrinkage of the ultra-high-strength concrete differ in 48 hours when using varying dosage of super-plasticiser?
  4. How does the shrinkage of the ultra-high-strength concrete differ in 48 hours when using varying dosage of Microsilica (Additive)?
  5. How does the shrinkage of the ultra-high-strength concrete differ in 48 hours when using varying dosage of siliceous dust (Additive)?
  6. How does the shrinkage of the ultra-high-strength concrete differ in 48 hours after the addition of different quantities of siliceous sand (Additive)?
  7. How does the shrinkage of the ultra-high-strength concrete differ in 48 hours after the addition of different fibres?
-

## 2 Einleitung

Heutzutage möchten die Architekten immer etwas neues, besonderes und interessantes einsetzen. Sie wollen etwas außergewöhnliches und einzigartiges zeigen. Heutzutage ist es nichts besonders, eine traditionelle Wohnanlage zu entwerfen. Derzeit können die Bauwerke nur in dem Fall weltbekannt werden, wenn sie nicht nur extrem hoch, schlank, dünn und lang, sondern auch aus moderne Materialien und Technologien gebaut werden. Außerdem geht es um wirtschaftliche Gründe. Einerseits gibt es einen großen Eindruck von den Architekten, andererseits von der Wirtschaft.

Aus der oben vorgestellten Gründe werden fast seit 100 Jahren intensive Forschungen auf dem Gebiet des Betons in aller Welt durchgeführt, um die hoch gesteckte Anforderungen von der Seite sowohl der Architekten als auch der Wirtschaft zu erfüllen. Derzeit ist es das Ziel vieler wissenschaftlicher Forschungen, UHPC zu verbessern und weiterzuentwickeln.

Zuerst wurde Portlandzement offiziell von Josef Aspdin 1824 entwickelt und patentiert. Bewehrter Beton wurde erstmals von W. B. Wilkinson im Jahre 1854 entwickelt. Demnach ist die Geschichte des Stahlbetons nur etwa 150 Jahre alt [23].

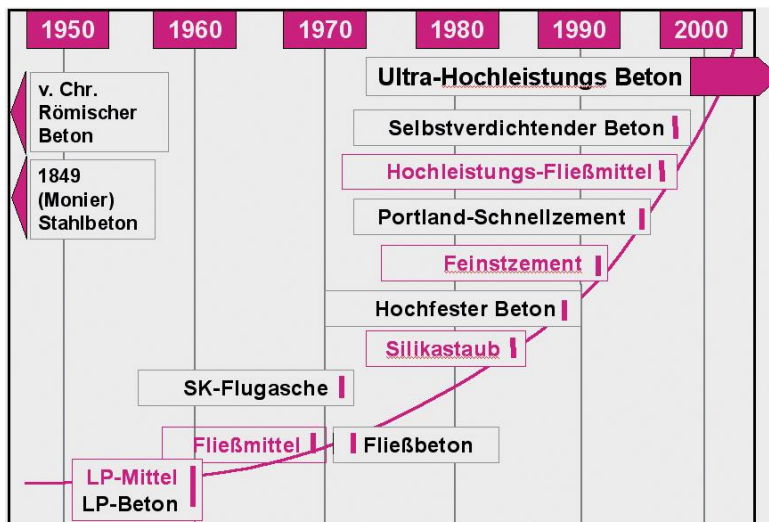


Abbildung 3.1-1: Entwicklungsgeschichte des Betons (aus dem Vortrag von Prof. Schmidt, Universität Kassel, auf den 49. Ulmer Beton und Fertigteil-Tagen) [23]



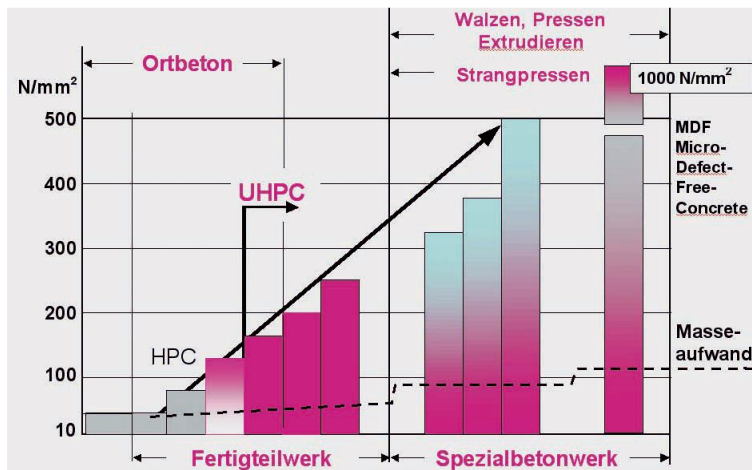


Abbildung 3.1-2: Entwicklungsgeschichte der Betonfestigkeiten (aus dem Vortrag von Prof. Schmidt, Universität Kassel, auf den 49. Ulmer Beton und Fertigteile-Tagen) [23]

Derzeit gibt es viele Forschungen auf dem Gebiet ultrahochfester Betone in Österreich und Deutschland. Wie auf dem oberen Bild vorgestellt ist, werden als ultrahochfester Betone bezeichnet, die Druckfestigkeiten oberhalb der Festigkeitsklasse C100/115, zum Teil auch mehr als 200 N/mm<sup>2</sup>, erreichen.

Mit Hilfe des Hochleistungs-Baustoffs ist es möglich, nachhaltige und ökonomische Bauwerke unter Verwendung sehr schlanke Bauteile zu erschaffen. Momentan kann er zwar eine Druckfestigkeit größer als 200 N/mm<sup>2</sup>, aber eine niedrige Zugfestigkeit erreicht werden, deshalb kann UHPC noch nicht für alle Konstruktionstyp eingesetzt werden. [23]

Normalbeton besteht sich aus Zement, Wasser und Gesteinskörnung, aus diesem Grund sprechen wir über ein sogenanntes 3-Stoff-System. Um die ultrahochfesten Beton herzustellen, muss zur Mischung einerseits viel weniger Wasser dazu gegeben werden, andererseits mehr Zement. Deshalb ist es die Herstellung des UHPCs nur mit Hilfe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen möglich. Deswegen handelt es sich bei ultrahochfester Beton um ein 5-Stoff-System.

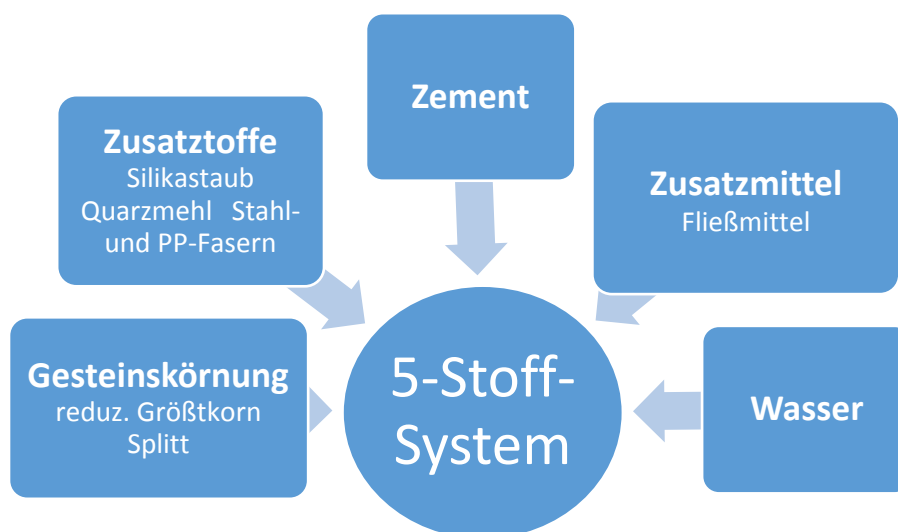


Abbildung 3.1-3: Bestandteile des ultrahochfesten Betons

---

Eigentlich ist es möglich, einen UHPC mit einer Festigkeit von über  $700 \text{ N/mm}^2$  unter Laborbedingungen zu erstellen. Aber es ist äußerst schwierig, diese Bedingungen im Fertigteilwerk bzw. auf der Baustelle zu reproduzieren. [23]

Es gibt bis derzeit viele Beispiele, wo ein Hochleistungsbeton verwendet wurde:

- Bei dem Bau des „Laurentienne“-Gebäudes in Montreal wurde 1984 ein Hochleistungsbeton mit einer Druckfestigkeit von  $106 \text{ N/mm}^2$  eingesetzt
- Beim Bau des „Two Union Square-Gebäudes“ in Seattle wurde 1988 ebenfalls ein Hochleistungsbeton mit dann schon  $145 \text{ N/mm}^2$  eingesetzt.
- Brücke in Wapello, Iowa (Abbildung 2-4)
- Sunyudo Brücke: Seoul, Korea (Abbildung 2-5)
- In Kärnten in Österreich wurde die längste Brücke der Welt (157 m) gebaut (Abbildung 2-6)
- Hochhäuser
  - o Der höchste Wolkenkratzer der Welt wurde in 2007 mit etwa 800 min Berj in Dubai errichtet.(Abbildung 2-7)
  - o CN Tower in Toronto in 1975 mit 553m (Abbildung 2-8)



Abbildung 2-5: Sunyudo Brücke, Seoul, Korea  
Die Brücke aus UHPC [33]



Abbildung 2-4: Die Brücke aus UHPC in  
Wapello [33]



Abbildung 2-6: Die längste Brücke der Welt aus UHPC, Österreich, Kärnten [32]



Abbildung 2-7: Der Burj Khalifa, Dubai, höchstes Gebäude der Welt, 800m [34]



Abbildung 2-8: CN Tower in Toronto in 1975 mit 553m [36]

---

## 3 Zusammensetzung

### 3.1 Zement

Zement (Klinker + Gips) ist ein feingemahlendes hydraulisches Bindemittel. Dies heißt, dass Zement zusammen mit Wasser selbständig sowohl an Luft als auch unter Wasser erhärtet und raumbeständig bleibt. Im Wesentlichen wird dabei Zementstein,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  und Wärme (exothermer Prozess) gebildet.

Es gibt gemäß ÖN EN 197-1 fünf Hauptzementarten

- CEM I: Portlandzemente
- CEM II: Portlandzemente mit Zusatzstoffen:
  - o Portlandhüttenzement
  - o Portlandflugaschezement
  - o Portlandkompositzement
- CEM III: Hochofenzement
- CEM IV: Puzzolanzement
- CEM V: Kompositzement

Hauptbestandteile-Zusatzstoffmenge:

- A, B oder C
- Anteile sind den Hauptzement zugeordnet

Hauptbestandteile-Zusatzstoffe:

- S Hütten sand
- V silikatische Flugasche
- W kalkreiche Flugasche
- D Mikrosilika
- L/LL Kalkstein
- P/Q Puzzolan
- T gebrannter Schiefer
- M Mixture

Anforderungen gemäß ÖNORM B 3327

- Garantierter  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalt
- Späterer Erstarrungsbeginn
- Begrenzte Schwankungsbreite der Mahlfeinheit
- Begrenzte Wärmeentwicklung
- Begrenzte Wasserabsonderung
- Garantierte Biegezugfestigkeit
- Garantierte Druckfestigkeit nach einem Tag
- Garantierte Zementtemperatur bei Anlieferung [2]

Ein dichter Zementstein mit hoher Festigkeit entsteht dann, wenn der W/Z-Wert kleiner als 0,4 ist. Beton mit solchem Wert lässt sich aber sehr schwer verarbeiten und verdichten.

---

Deswegen ist es unbedingt notwendig, um ein Fließmittel dazu zugeben. Da UHPC sehr dicht sein muss, ist es Optimierung der Packungsdichte sehr wichtig. Zum Erreichen einer hohen Packungsdichte müssen die Hohlräume zwischen den größeren Partikeln mit entsprechend kleineren Partikeln gefüllt werden. Das kann durch die Zugabe von Feinteilen erreichen werden

Die wesentliche Herausforderung des ultrahochfesten Betons ist ein sehr niedriger W/Z-Wert, der nicht größer als 0,3 sein sollte. Es ist empfohlen, in der Herstellung die C<sub>3</sub>A-arme bzw. C<sub>3</sub>A-freie Portlandzemente zu verwenden. Gröber aufgemahlene Zemente weisen eine geringere spezifische Oberfläche und damit einen geringeren Wasseranspruch auf [1]. Es wird den Einfluss des W/Z-Wert auf die Schwinddehnung der Betonmischung in nachfolgender Abbildung 3.1-1 dargestellt.

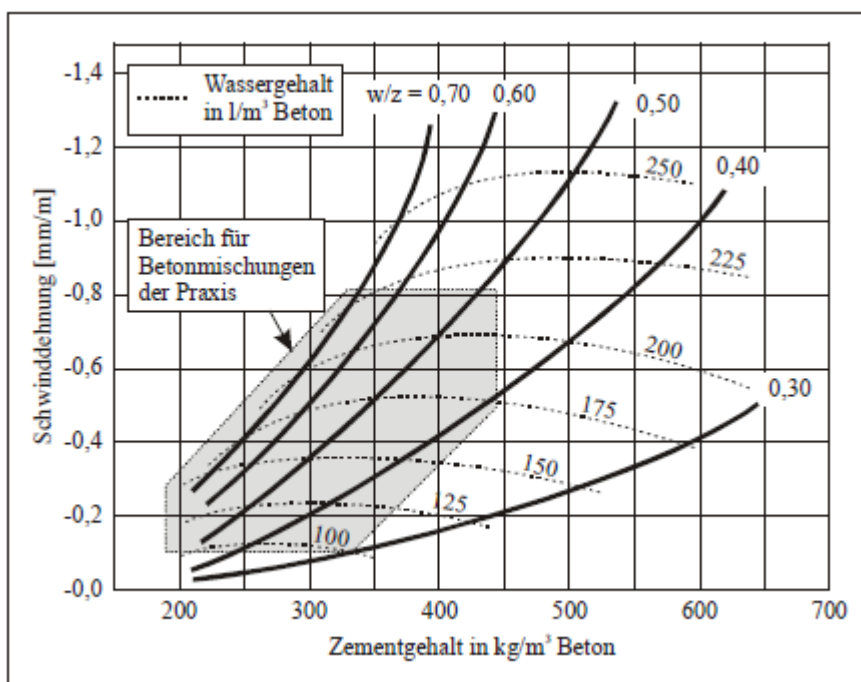
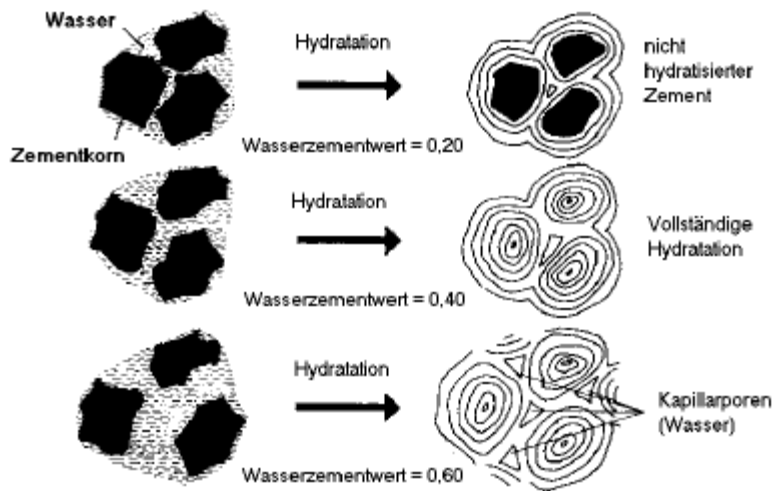


Abbildung 3.1-1: Abhängigkeit zwischen Zementgehalt und Schwinddehnung [13]

### 3.2 Wasser

Ein Bindemittelleim erhärtet, weil das Wasser mit den Bindemittelkörnern reagiert. Dieser Vorgang wird Hydratation genannt.



Zement braucht für die „vollständige Hydratation“ 40% seine Masse an Wasser ( $W/Z = 0,4$ ). Ist weniger Wasser vorhanden ( $W/Z < 0,4$ ), hydratisiert der Zement nicht vollständig. Ist mehr Wasser vorhanden ( $W/Z > 0,4$ ), lagert sich der Überschuss im Zementleim ein und hinterlässt später im Zementstein die sogenannte Kapillarporen.

Abbildung 3.2-1: Hydratationsprozess in Abhängigkeit des Wasser/Bindemittelwerts [35]

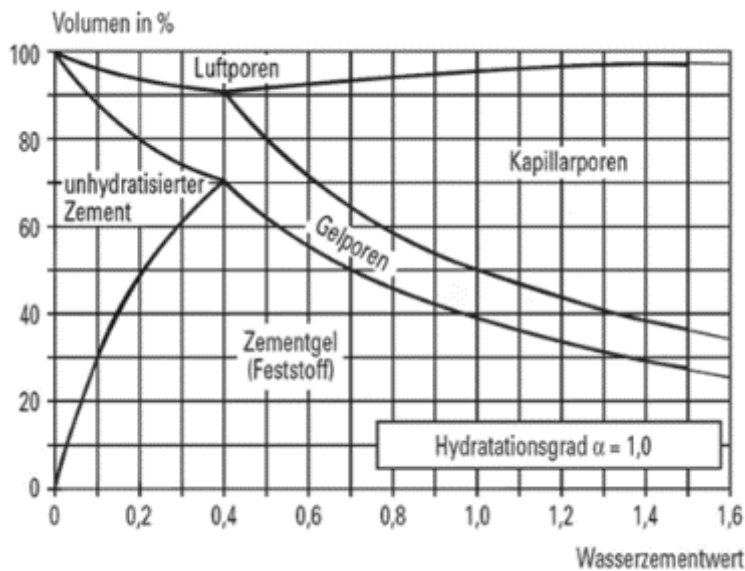


Abbildung 3.2-2: Hydratationsprozess in Abhängigkeit des W/Z-Werts [35]

---

Je mehr Wasser beim Herstellen des Zementleims verwendet wird, desto mehr Kapillarporen enthält der Zementstein. Die Folgen sind:

- geringe Festigkeit
- geringe Dichte
- geringe Beständigkeit
- geringer Korrosionsschutz[3]

Anhand der oben dargestellten Gründen sieht man deutlich, dass ultrahochfeste Betone mit ziemlich niedrigen, kleineren als 0,4 W/Z-Werten hergestellt werden müssen. Heutzutage werden solche Betone mit dem Wert  $W/Z = 0,15$  erfolgreich hergestellt. Die Zementkörner werden auch bei nur teilweiser Hydratation an der Kornoberfläche fest miteinander verbunden. Da die Festigkeit des Zementkorns bei rund 200 bis 400 MPa liegt und weitgehend erhalten bleibt, tragen die unhydratisierten Klinkerreste im Inneren des Zementsteins zur Festigkeit bei. Eine vollständige Hydratation ist daher nicht Voraussetzung für eine hohe Festigkeit des Zementsteins. [1]

Das Gemisch aus Zement und Wasser wird als Zementleim bezeichnet. Unmittelbar nach Wasserzugabe beginnen die Hydrationsreaktionen. Am Anfang gibt es das Ansteifen des Zementleims. Die weitere Verfestigung wird als Erstarren definiert. Schlussendlich wird es die letzte Phase, die als Erhärten bezeichnet wird, stattgefunden. Die schematische Darstellung ist auf der Abbildung 3-2 dargestellt.

Unmittelbar nach dem Kontakt mit Wasser findet eine kurze und sehr intensive Hydratation statt. Die ersten Hydratationsprodukte sind zu klein, um den Raum zwischen den Zementpartikeln zu überbrücken und ein festes Gefüge einzubauen. Aus diesem Grund bleiben die Zementpartikel gegeneinander beweglich.

Das Erstarren des Zementleims beginnt nach etwa ein bis drei Stunden, wenn sich Calciumsilicathydratkristalle auf den Klinkerpartikel bilden.

Anschließend setzt die dritte Periode, die als Beschleunigungsperiode genannt wird. Sie beginnt nach etwa vier Stunden und endet nach circa 12 bis 24 Stunden. Während der Periode werden die Hohlräume zwischen Zementpartikeln überbrückt.

Die fortschreitende Verfestigung des Gefüges wird als Erhärten des Zements bezeichnet. [22]. Die Hydratation des Zements ist ein exothermer Prozess. Die Reaktionsenergie wird Hydratationswärme genannt. [22]

---

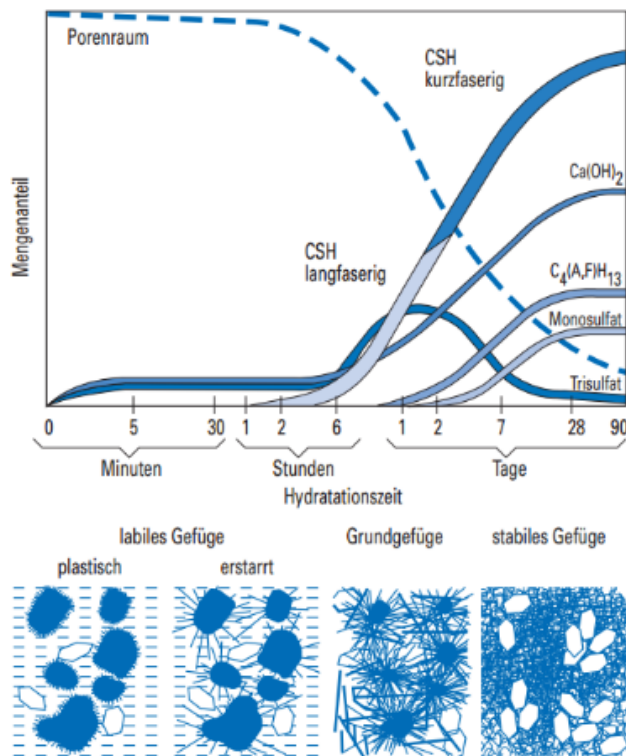


Abbildung 3.2-3: Die schematische Darstellung der Hydratationsphase [22]

Die Zementhydratation ist schematisch auf der Abbildung 3.2-4 dargestellt. Die Reaktion des Silikastaubs führt zu einer Verbesserung des Porensystems des hochfesten Zementsteins. Alle Zwickelräume zwischen den unhydratisierten Zementkörnern werden gefüllt [5].

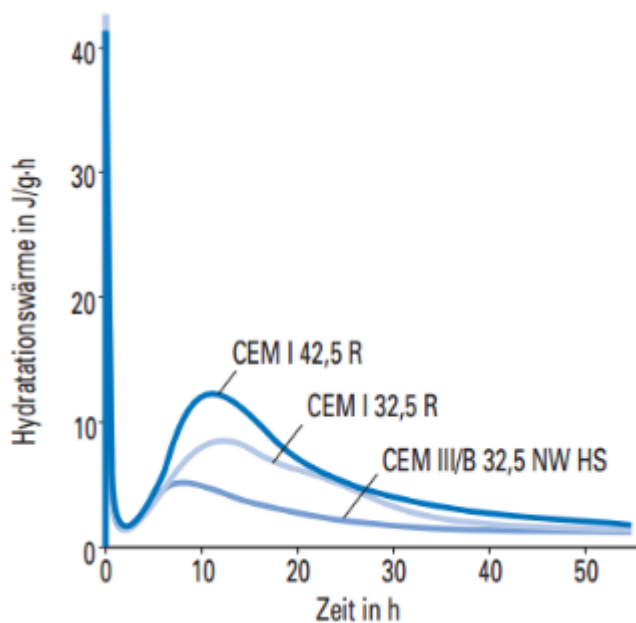


Abbildung 3.2-4: Hydrationswärmeentwicklung unterschiedlicher Zemente [22]



---

### 3.3 Zusatzstoffe

DIN EN 206 unterscheidet zwischen inerten (Typ 1) und hydraulisch wirksamen Zusatzstoffen (Typ 2). In ultrahochfesten Betonen finden vorwiegend folgende Zusatzstoffe Anwendung:

- Silikastaub (Mikrosilika)
- Flugasche
- Gesteinsmehl
- Metakaolin
- (Feinhüttensand , gebrannter Ölschiefer)

Mit Zusatzstoffen können sowohl physikalische als auch chemische Effekte erzielt werden. Zum einen füllen sie durch ihre geringe Größe die Zwischenräume des teilweise hydratisierten Zementes, was zu einem dichteren Gefüge und somit zu einer höheren Packungsdichte führt. Zum anderen bilden Zusatzstoffe des Typs 2 durch Reaktion mit dem Calciumhydroxid zusätzliche Calciumsilikathydrat-Phasen, die eine Festigkeitssteigerung bewirken.

Es wird am häufigsten zur Herstellung von UHPC Silikastaub (Mikrosilika) verwendet. Bei hohen Mikrosilicagehalten sinkt der pH-Wert, wodurch das alkalische Milieu zur Passivierung des Stahls verloren gehen kann. Agglomerationen von Mikrosilica können als Keimzellen für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) dienen.

Flugasche zählt wie die Silikastäube zu den puzzolanischen Zusatzstoffen. Die Korngrößen sind zwar vergleichbar mit denen von Zement, aber haben eine kugelförmige Kornform. Flugasche vermindert die Frühfestigkeit von Betonen und gleichzeitig die Wärmeentwicklung in den ersten Stunden [4].

Gesteinsmehle bestehen in der Regel aus fein gemahlenem Quarz-, Kalk-, Sand- oder Basaltgestein. Die Mahlfeinheit des Quarzmehls liegt im Bereich der Mahlfeinheit des Zements. [1] Sie zählen zu den inerten Stoffen und reagieren unter normalen Bedingungen nicht mit den restlichen Betonbestandteilen [4].

---

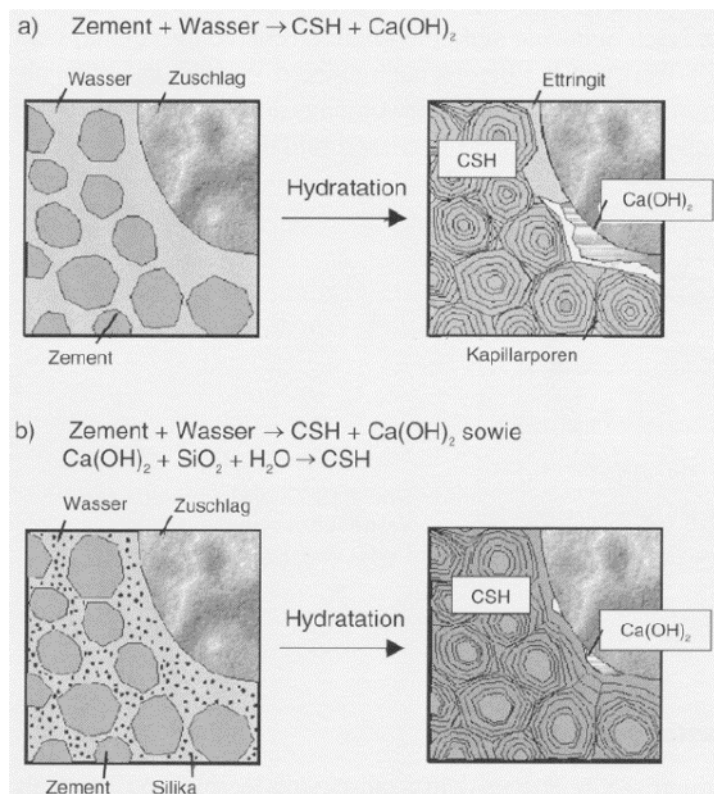


Abbildung 3.3-1: Schematische Darstellung der Hydratation [35]

### 3.4 Gesteinskörnung

Bei hochfesten Betonen verringert sich die Festigkeitsdifferenz zwischen der Gesteinskörnung und Zementstein. Um Druckfestigkeiten über  $100 \text{ N/mm}^2$  erreichen zu können, sind Gesteine mit hoher Festigkeit und hohem E-Modul zu empfehlen. Zu bevorzugen ist gebrochene Körnung mit überwiegend gedrungener Form, also Edelsplitt, womit auch hohe Zugfestigkeits- und E-Modulwerte erzielt werden können [5]. Der Einfluss von Basalt auf ausgewählte physische und mechanische Eigenschaften von Zementmörtel zeigen, dass Basalkörnungen sich dafür eignen [6]. Nach [7] benötigen Betone mit größerem Großkorn und mit gut korngestuftem Zuschlag benötigt aufgrund des geringen Hohlraumgehalts des Zuschlags weniger Bindemittelleim zur Erzielung vergleichbarer Verarbeitungs- und Festbetoneigenschaften.

Als Gesteinskörnung wird für UHPC üblicherweise Quarzsand verwendet. Quarzsande weisen eine hohe Gesteinsfestigkeit auf, sind leicht verfügbar und bilden eine dichte und feste Übergangszone zwischen Gesteinskorn und Bindemittelmatrix aus. Im Hinblick auf gute rheologische Eigenschaften des Frischbetons eignen sich Sande mit runder Kornform besser als gebrochener Sand [1]. Es werden wegen des niedrigen W/Z-Wertes insbesondere Gesteinskörnungen mit einem niedrigen Wasseranspruch empfohlen.

### 3.5 Zusatzmittel

Schwindreduzierende Zusatzmittel sind im 1980 in Japan entwickelt, um das Schwinden von Betonbauteilen abzumindern. Es werden durch schwindreduzierende Zusatzmittel organische, wasserlösliche und hygroskopische Stoffe, die die Oberflächenspannung von Wasser herabgesetzt werden, genannt [8].

Es wurden gemäß ÖNEN 934-2 die folgenden Arten der Zusatzmittel definiert:

- Betonverflüssiger
- Fließmittel
- Luftporenbilder
- Verzögerer
- Stabilisierer
- Erstarrungsbeschleuniger/Erhärtungsbeschleuniger
- Dichtungsmittel
- Verzögerer/Betonbeschleuniger
- Verzögerer/Fließmittel
- Erstarrungsbeschleuniger/Betonverflüssiger
- Viskositätsmodifizierer

Betonverflüssiger und Fließmittel verringern den Wasserbedarf des Betons für das Erreichen einer bestimmten Konsistenz. Damit ist bei gleichem W/Z Wert ein geringer Bindemittelgehalt notwendig. Fließmittel sind hochwirksame Betonverflüssiger. Aus Sicht der Chemie gehören alle Fließmittel den Tensiden an.

Luftporenbilder führen künstliche Luftporen ein und verbessern die Frostbeständigkeit. Verzögerer verlängern die Verarbeitungszeit und verzögern die Anfangserhärtung. Stabilisierer vermeiden das Absondern von Wasser (Bluten). Erstarrungsbeschleuniger beschleunigen das Erstarren des Betons (Spritzbeton).[3]

Bei ultrahochfesten Betonen werden hauptsächlich die folgenden Arten verwendet:

- Betonverflüssiger
- Fließmittel
- Luftporenbilder
- Verzögerer
- Stabilisierer

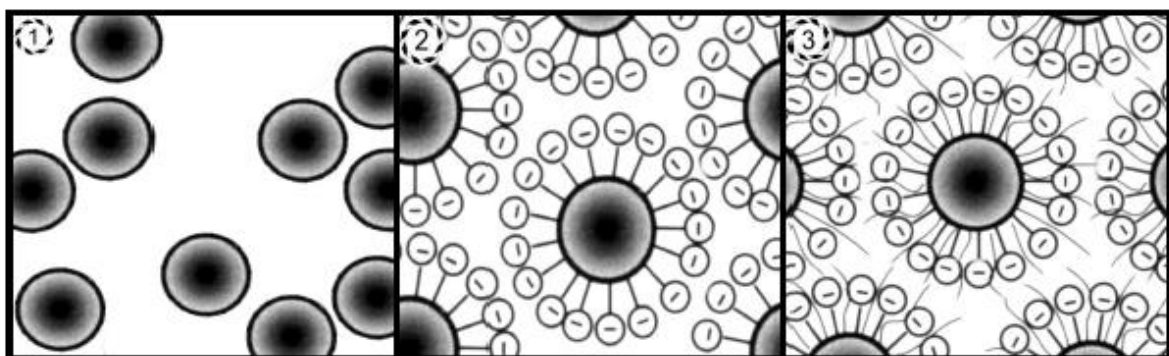


Abbildung 3.5-1: Schematische Darstellung des Fließmittels [9]

---

Das erste Bild von der linken Seite zeigt die Zementkörner ohne Fließmittel. Die Einzelkörner verkleben und die Durchfeuchtung wird erschwert. Nach der Zugabe von Fließmitteln (das Bild in der Mitte) findet Dispergierwirkung durch elektrische Abstoßungskräfte statt. Gleichzeitig sinkt die Oberflächenspannung des Zugabewassers. Bei Fließmitteln der dritten Generation sind zusätzlich sterische Abstoßungskräfte vorhanden (Bild 3) [9].

### **3.6 Fasern**

UHPC weist ein sprödes Bruchversagen auf. Die Zugabe von Fasern zur Sicherung einer ausreichenden Materialduktilität führt zu einer Verschlechterung des Fließverhaltens und der Entlüftungsneigung des Frischbetons. Fasern können im UHPC beigemischt werden, um einen progressiven Rissfortschritt zu vermindern und somit spröden Bruchversagen nach Überschreiten der Bruchspannung zu vermeiden [10]. Heutzutage haben wir viele verschiedene Arten der Faserarten zur Verfügung:

- Metallfasern
- Synthetische Fasern
- Naturfasern
- Keramische Fasern
- 

## **4 Schwinden**

Als Schwinden werden lastunabhängige äußere Volumenänderungen von Beton bezeichnet, die durch Veränderungen des Wasserhaushalts im Beton verursacht werden. Das Schwinden von Beton kann man nach dem Zeitraum des Auftretens oder nach der Ursache für die Veränderung des Wasserhaushalts in folgende Arten teilen:

- Kapillar- und Frühschwinden
- Gesamtschwinden besteht aus:
  - o Autogenem Schwinden
  - o Trocknungsschwinden
- Carbonatisierungsschwinden [12]

### **4.1 Kapillarschwinden**

Kapillarschwinden (Frühschwinden, plastisches Schwinden) sind die äußeren Verformungen des Betons in Folge von Wasserverlust über die Betonoberfläche. Das ist die einzige Schwindart, die durch eine richtige Nachbehandlung, wie zum Beispiel das Abdecken des Betons mit Folien, minimiert werden kann [12].

---

## 4.2 Autogenes Schwinden

Die Definition des Begriffes wird in Anlehnung an [29] vorgenommen und ist in Abbildung 4.2-1 dargestellt.

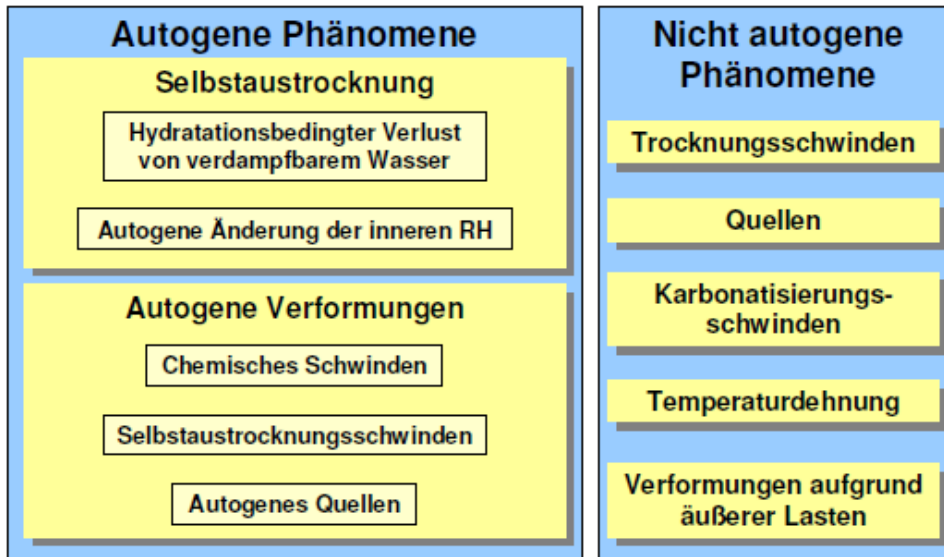


Abbildung 4.2-1: Definition der autogenen und nicht autogenen Phänomene anhand [29]

Das autogene Schwinden ist die Hauptursache für Mikrorissen im UHPC, die insbesondere bei Zugabe von Microsilica auftreten, was auf das autogene Schwinden der Bindemittelmatrix zurückgeführt werden kann. Die autogene Verformungen der Bindemittelmatrix eines Betons werden von Materialparametern beeinflusst und sind eng mit der Hydratation, Selbstaustrocknung und Gefügeeigenschaften verknüpft [29].

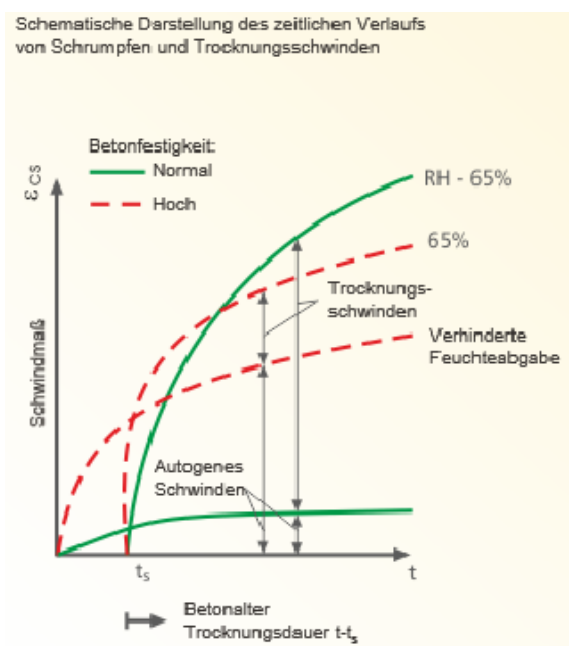


Abbildung 4.2-2: Schematische Darstellung des autogenen Schwindens sowie Trocknungsschwinden des normalen und hochfesten Betons [31]

Anhand Stands des Wissens kann gesagt werden, dass die kapillaren Zugspannungen die Hauptursache des früheren autogenen Schwindens sind. Diese sind grundsätzlich von der Porenstruktur und den Grad der Selbstaustrocknung der Porenräume abhängig.

#### 4.2.1 Selbstaustrocknung

Die Selbstaustrocknung entsteht durch die Hydratation verursachter Verlust von verdampfbarem Wassern eines erstarrten zementgebundenen Materialsystems [29]. Bei der Zementhydratation muss genügend Wasser für die chemischen Reaktionen und zur Füllung der dabei entstehenden Gelsporen zur Verfügung stehen. Wenn es nicht der Fall ist, kommt es bei konservierter Lagerung ohne Wassernachschub von außen zu einer „Selbstaustrocknung“ der Poren. Das kann in Verbindung mit dem chemischen Schrumpfen bei der Zementhydratation, zu einer Volumenänderung, dem „autogenen Schwinden“ führen. Da bei Hochleistungsbetonen aufgrund des geringen W/B-Wertes nur wenig Wasser für den Hydratationsprozess zur Verfügung steht, findet hier eine starke Selbstaustrocknung mit autogenem Schwinden statt [11].

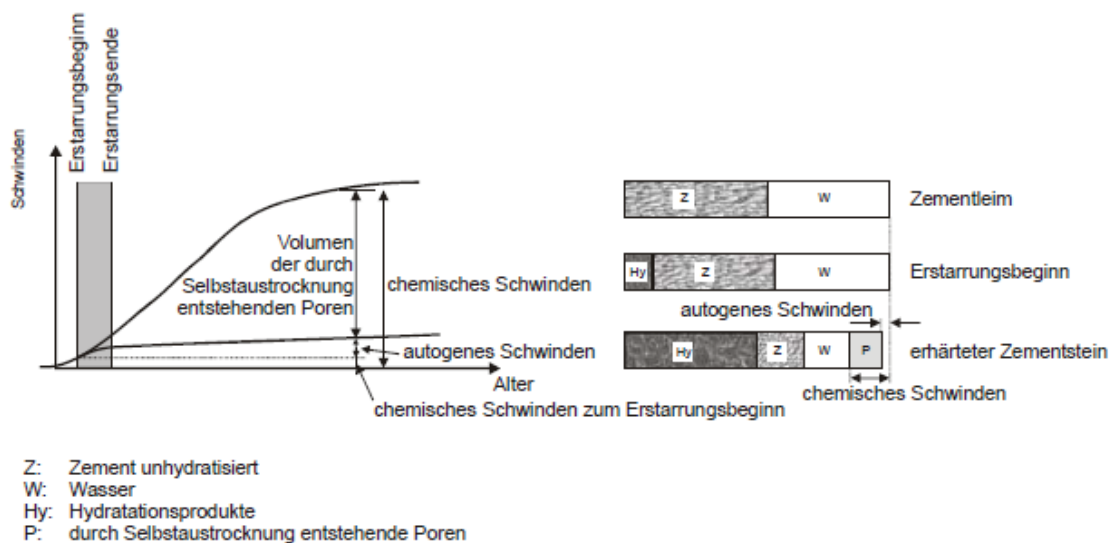


Abbildung 4.2-3: Definition des chemischen und autogenen Schwindens [11]

#### 4.2.2 Autogene Verformungen

Dies ist Verformung eines geschlossenen, isothermen, zementgebundenen Materialsystems. Dies kann sowohl Kontraktion (autogenes Schwinden) als auch Expansion (autogenes Quellen) sein.

**Chemisches Schwinden** ist die absolute Volumenverringerung durch Hydratationsreaktionen.

**Das Selbstaustrocknungsschwinden** ist durch das chemische Schwinden bzw. die Selbstaustrocknung verursachte autogene Verformung eines erstarrten zementgebundenen Materialsystems verursacht.

Man versteht durch **autogenes Quellen** die Hydratation hervorgerufene Volumenzunahme in einem geschlossenen (kein Materialaustausch zwischen dem zementgebundenen Material und Umgebung), isothermen (Temperatur ist konstant), zementgebundenen Materialsystem [29].

### 4.2.3 Hydratation

Es ist notwendig, an der Stelle den Prozess Hydratation zu erwähnen, weil die autogenen Verformungen direkte Folge der Hydratation sind.

Man versteht durch den Begriff Hydratation alle Reaktionen der Zementbestandteile mit Wasser.

#### 4.2.3.1 Portlandzement

Die autogenen Verformungen sind direkte Folge der Hydratation des Zements und der reaktiven Zusatzstoffen, deshalb ist die Quantifizierung des Hydratationsfortschritts erforderlich, um das Verformungsverhalten verschiedener Mischungszusammensetzungen zu beurteilen und zu vergleichen. Sowohl die Hydratation als auch die Gefügeeigenschaften der Bindematrix, die besonders im jungen Alter starken hydratationsbedingten Veränderungen vorliegen, werden wesentlich durch die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe bestimmt [29].

#### Wärmeentwicklung

In diesem Zusammenhang hat die besondere Bedeutung den Ablauf der früheren Hydratation des PZs. Die autogene Verformungen sind eine direkte Folge der Hydratation des Zements und reaktiven Zusatzstoffen, deshalb ist es nützlich, eine Quantifizierung des Hydratationsfortschritts zu zeigen, um die Verformungsverhalten verschiedener Mischungszusammensetzungen zu beurteilen. Die frühere Hydratation lässt sich anhand der im Zeitablauf unterschiedlich entstehenden Reaktionswärme in verschiedene Abschnitte unterteilen. [30] Es ist deutlich in der Abbildung 4.2-3 erkennbar.

---

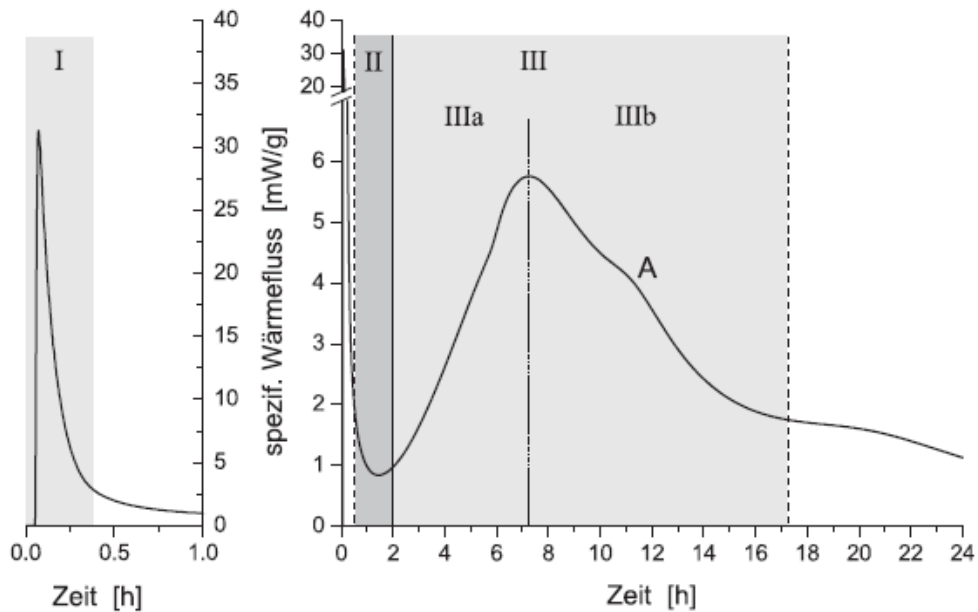


Abbildung 4.2-4: Zeitlicher Verlauf der früheren Zementhydratation eines PZs anhand der entstehenden Wärme: I: Initialperiode, II: Induktionsperiode, III: Hauptperiode, IIIa: Beschleunigungsphase, IIIb: Abklingphase [30]

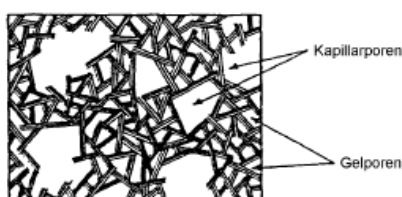
Die Initialperiode beschreibt die ersten 30 Minuten nach dem Kontakt mit Wasser und Zement und ist gekennzeichnet durch einen sehr hohen Wärmefluss, der durch das Auflösen eines Teils der Sulfate und des  $C_3A$  verursacht wird. Gleichzeitig kommt es zur Bildung von Ettringit und zur Hydratation der Silikate.

In der Induktionsperiode findet keine weitere Hydratation der Silikate statt.

Die Hauptperiode startet nach einer Passivierungsschicht auf den Silikaten.

### Powers-Brownyard Modell

Es ist ein Modell, bei dem im Zementstein unhydratisierter Zement, Hydratationsprodukt und Poren vorliegen. Die Phasen der Hydratation werden nicht unterschieden und als Zementgel bezeichnet. Das Zementgel ist porös. Im Zementstein ist das Zementgel durch Kapillarporen mehr oder weniger aufgelockert. Die Autoren nehmen an, dass das Zementgel einen konstanten Gehalt an chemisch und physikalisch gebundenem Wasser und einen festen Volumenanteil der Geldporen von 28% mit einem Porendurchmesser von etwa 2 nm besitzt [29].



4.2-5: Schematische Darstellung des Zementgels nach Power [29]



### 4.3 Trocknung Schwinden

Durch die Abgabe von Wasser über die Bauteiloberfläche an die Umgebung verkürzt sich Beton lastunabhängig. Das Verhalten wird als Trocknungsschwinden bezeichnet. Beim Trocknungsschwinden wird Wasser aus den Poren an die Umgebung abgegeben.

Je größer der W/Z Wert ist, desto kleiner ist der Anteil des autogenen Schwinden und größer des Trocknungsschwinden [11].

### 4.4 Carbonatisierungsschwinden

Als Carbonatisierung wird die Reaktion von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Luft mit dem bei der Hydratation des Zements entstandenem Calciumhydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>) bezeichnet. Die Freisetzung des Wassers führt zu einer Volumenverminderung, die als Carbonatisierungsschwinden bezeichnet wird. Das Carbonatisierungsschwinden hat praktisch keinen Einfluss auf die Formänderung eines Bauteils [13].

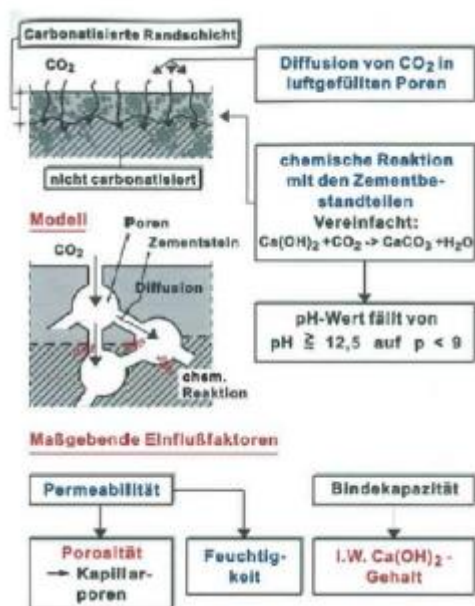


Abbildung 4.4-1: Schematische Darstellung der Carbonatisierung [2]

Das Schwindmaß des Betons wird also größer durch:

- größeren Wassergehalt,
- größeren w/z-Wert, vor allem bei gleichem Zementgehalt,
- größeren Zementsteingehalt (nur bei gleichem w/z-Wert),
- größeren Zementgehalt (nur bei gleichem w/z-Wert)
- größere Schwindneigung des Zements,
- größeres Schwinden der Gesteinskörnung,
- kleineren E-Modul der Gesteinskörnung,
- schnelleres Austrocknen, was wiederum vom Verhältnis Volumen / austrocknende Oberfläche abhängt [14]

## 5 Messverfahren

Wo sind die Versuche durchgeführt worden?

Die Schwindversuche des Betons sind im Labor der Technischen Universität Wien, Straße Adolf-Blaumauergasse 1-3 in der BBB-Halle durchgeführt worden.

Wie funktioniert die Messanlage?

Die Messungen des Schwindens erfolgen auf der folgenden Versuchseinrichtung, die am Institut bereits eingerichtet wurde.

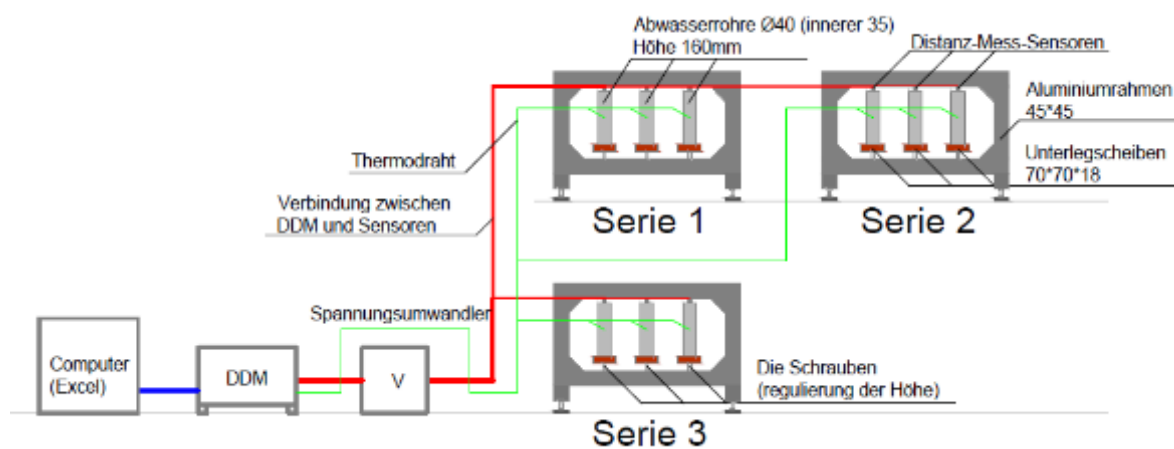


Abbildung 5-1: Die schematische Darstellung der Messanlage

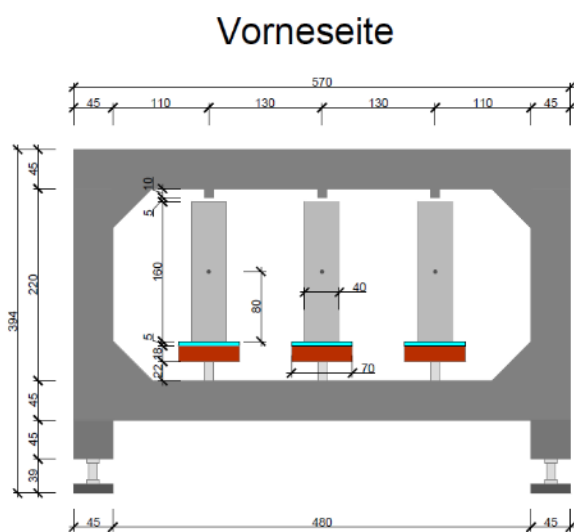


Abbildung 5-2: Messanlage Vorne

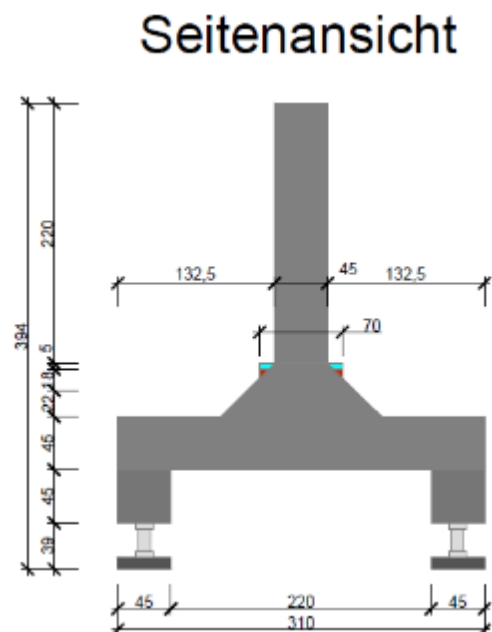


Abbildung 5-3: Messanlage von der Seite



Abbildung 5-4: Messraum



Abbildung 5-5: Messraum

### 5.1 Distanz-Mess-Sensoren Präzisionstyp

Diese Sensoren wurden in den Versuchen verwendet, um die möglichst genauer Ergebnisse des Schwindsverhaltens zu bekommen.

Tabelle 5-1 Technische Daten des Sensors [15]

|                   |              |
|-------------------|--------------|
| Typ               | GP2Y0AH01K0F |
| Messbereich       | 4,5 - 6 mm   |
| Betriebsspannung  | 5V/DC        |
| Auflösung         | 0,1 mm       |
| Temperaturbereich | -10 - +60°C  |

Der Sensor funktioniert auf der Basis der optischen Triangulation mit IR-Licht. Der Sensor ermöglicht eine sehr präzise Abstandsmessung zwischen 4,5 - 6,0 mm mit einer Auflösung von min. 0,1 mm. Durch eine analoge Ausgangsspannung wird die absolute Entfernung im Messbereich dargestellt. Die Messung ist unabhängig von der Farbe des Objekts. Konzipiert wurde den Sensor zur Ermittlung der Papierstärke in Kopierern und Druckern [15].



Abbildung 5.1-1: Distanz-Mess-Sensor-Präzisionstyp [15]

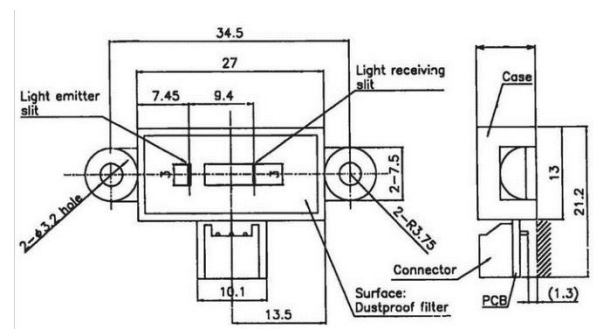


Abbildung 5.1-2: Die schematische Darstellung des Distanz-Mess-Sensor-Präzisionstyps [15]

---

## 5.2 Der Spannungsumwandler

Da die benutzten Distanz-Mess-Sensoren die Versorgungsspannung zwischen 0,3 und 7 V benötigen, ist es notwendig, einen Spannungsumwandler zu verwenden. Ein Spannungsumwandler ist notwendig, um den Strom von 230 V auf zwischen 0,3 V und 7 V umzuwandeln. Es ist das mit der Hilfe der Spannungsumwandler von der italienischen Firma „Gruppo K.E.R.T.“ verschafft.

## 5.3 Digital-Multimeter Datenerfassung und Datenaufzeichnung-System



Abbildung 5-8: Digital-Multimeter Datenerfassung und Datenaufzeichnung ( Abk. DMM)

Es werden die Spannungen und die Temperaturen der Probekörper mit der Hilfe des Geräts gemessen. Es ist in den Forschungen das DMM Modell 2700 von der Firma Keithley benutzt. Das Gerät ist mit dem Computer verbunden. Die Daten, die gemessen werden, werden im Excel mit dem Namen ExceLINX dargestellt. Es ist im vorhandenen Excel möglich, die Zeitschritte der Bemessungen einzustellen [16].

---

---

## 5.4 Thermdraht



Abbildung 5.4-1: Thermodrähte. Sie werden als Verbindung zwischen Temperaturmessgerät und Probekörper gedient

Sie werden benutzen, um die Temperatur des Probekörpers genau zu bestimmen. Es werden die isolierten Thermodrähte von der Firma Hesselman in den Versuchen verwendet. [17]

## 5.5 Probekörper

Als Probebehälter werden die Kunststoffrohre verwendet. Sie haben einen äußeren Durchmesser von 40 mm, einen inneren von 35 mm und eine Höhe von 160 mm (Abbildung 5.4-1). Außerdem werden sehr kleine Löcher mit der Hilfe eines aufgeheizten Nagel in der Mitte der Rohren gemacht, um die Enden der Thermodrähte einzustecken (Abbildung 5.4-4). Die verwandten Kunststoffrohre sind rau, deswegen müssten sie immer vor einem Versuch mittels Gleitmittel eingerieben werden, um eine Reibung zwischen Beton und Rohr zu minimalisieren. Zuerst wurde Vaseline verwendet (siehe Abbildung 5.4-2). In der nächsten Versuchen wurden die inneren Flächen mittels Hochleistungsfett mit Festschmierstoffen für Metall MOLYKOTE BR 2 PLUS (Abbildung. 5.5-3) geschmiert. Das Fett ist gut geeignet. Anschließend werden geschmierte Kunststoffrohre von der unteren Seite mittels der Silikon auf den Plexiglasplatten (Abbildung 5.4-3), deren die Größe 70\*70\*5 mm betragen, befestigt.

---



Abbildung 5.5: Vaseline. Sie wird als Schmierung der inneren Flächen der Probekörper verwendet



Abbildung 5.5-1: Das Kunststoffrohr Es wird als Probekörper (Schalung) verwendet



Abbildung 5.5-3: MOTYKOLE BR-2 Plus. Es werden die Probekörper mit Hilfe des Fettes geschmiert

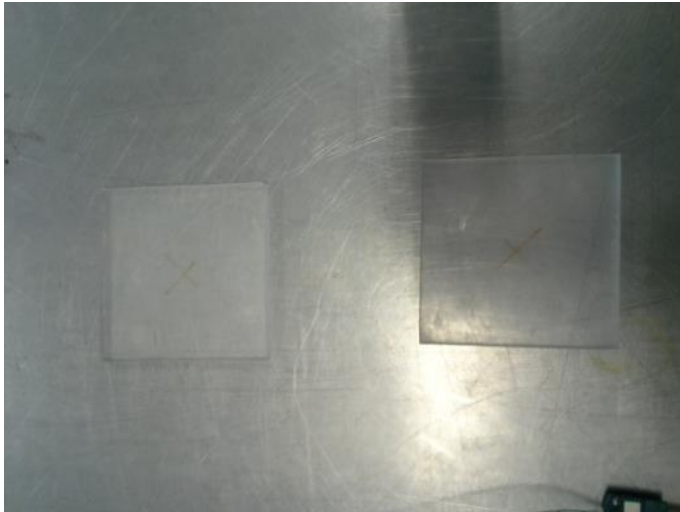


Abbildung 5.5-4: Unterlage. Es werden die Plexigläser verwendet. Es werden die Probekörper auf sie mithilfe des Silikons aufgeklebt.



Abbildung 5.5-5: Die vorbereiteten Probekörper. In der Mitte der Probekörpern befinden sich die Löcher, in die die Thermodrähte eingesteckt werden

## 6 Vorbereitung

### 6.1 Waage

Zuerst müssen jedes Mal die entsprechenden Mengen der Bestandteile des Betons sorgfältig vorbereitet werden. Deshalb müssen die Bestandteile immer präzise gewogen werden. Es ist das mit Hilfe der Waage (Abbildung 6.1-1) der Firma KERN & SOHN GmbH durchgeführt worden.



Abbildung 0-1: Die verwendete Waage

### 6.2 Mörtelmischer

Ursprünglich war es geplant, dass die Mischungen auf einem einfachen und ganz primitiven Mörtelmischer vorbereitet wurden. UHCP unterscheidet sich jedoch von normalem Beton durch seine Zusammensetzung und Eigenschaften. Um die Eigenschaften des UHCPs zu erfüllen, muss ein geeigneter professioneller Mörtelmischer benutzt werden. Deshalb wurde der Mörtelmischer von der Firma EIRICH (Abbildung 6.2-1) benutzt.

Der eingesetzte Intensiv-Mischer gewährleistet aufgrund der hohen Mischintensitäten und Schrägstellung des Mischbehälters:

- kurze Mischzeiten,
  - Homogenes Untermischen kleinster Mengen von Zusatzstoffen und -mitteln,
  - Homogenisieren von Rohstoffen mit stark unterschiedlichen Rohdichten,
-





Abbildung 6.2-1: Die benutzte Mörtelmischer

### 6.3 Abdeckungen

Es ist notwendig den Beton zu verdichten. Die Entlüftung der vorbereiteten Betons erfolgt durch das Rütteln auf dem Elektro-Rütteltisch (Abbildung 6.3-1) erledigt.



Abbildung 6.3-1: Der Rüttler

### 6.4 Abdeckungen

Anschließend müssen die Probekörper abgedeckt werden. Da es noch nicht entwickelt wurde, was sich als Decken der Probekörper am besten eignet, werde ich vor dem Beginnen meiner Versuche ein gutes Material suchen.

Die Abdeckung der Probekörper ist notwendig, um Beton gegen vorzeitiges Austrocknen zu schützen und zu starker Temperaturänderung zu verhindern. Es gibt ein paar Arten der Nachbehandlung:

---

- 
- Feucht halten
  - Folien, Schutzmatten
  - Flüssige Nachbehandlungsmittel
  - Belassen in der Schalung

Die Mindestnachbehandlungsdauer ist, in Abhängigkeit von der Expositionsklasse und von der Festigkeitsentwicklungsstufe in der ÖN B4710-1, Tab. NAD 17 geregelt.

Auch nach der Mindestnachbehandlungszeit darf der Beton nur langsam austrocknen. Die Austrocknungsgefahr ist groß, wenn der Beton wärmer als die Luft ist. [2]

Anhand der oben vorgestellten Gründe sieht man deutlich, dass es notwendig ist, der geprüfte Beton nachzubehandeln, damit die Ergebnisse richtig bewerten.

Als Betonschalungen sollen nicht saugende Materialien, die gut mit einem Trennmittel behandelt werden können, benutzt werden. Das sind zum Beispiel Schaltafeln aus Holz, beschichtete Holzplatten, Plexiglas, PVC-Platten, Styroporplatten, Styrodurplatten.

Als Betonschalungen sollten nicht saugende Materialien, unbeschichtete Spannplatten, MDF-Platten oder Materialien, wie zum Beispiel Karton, die durch Wasseraufnahme einen großen Teil ihrer Festigkeit verlieren. Da es zwischen feuchtem Beton und Aluminium zu einer sehr starken Reaktion mit Blasenbildung kommt, sind Alu-Blechen für Betonschalungen absolut verboten.[19]

Außerdem eine wesentliche Rolle spielt dabei Reflexion für den Sensor. Da Licht auch auf der Beton beeinflusst werden kann, gewählte Material reflektiert werden soll. Ein weißes raues Papier ist zum Beispiel ein Material, das gut reflektiert. Es ist sogenannte diffuse Reflexion, die bei rauen Oberflächen, wie zum Beispiel Wände, Kleidung, Papier, bewegtes Wasser, aufgetreten werden kann [20]. Darüber hinaus gibt es auch die Farbe eines Materials wichtig. Es ist immer so, dass die weiße Farbe des Lichtes reflektieren und die Schwarze absorbieren. Aus diesem Grund sind zusätzlich zum Plexiglas weißes Papier geklebt worden.

## **7 Versuche**

### **7.1 Vorversuch**

Am Anfang wurden es die Untersuchungen durchgeführt, um die beste Abdeckung für die Probekörper herauszufinden.

Die Abdeckungen dürfen nicht zu dick, nicht zu schwer und ein bisschen schmaler als innerer Durchmesser des Rohrs.

Nach mehreren Versuchen wurden folgende Materialien verwendet:

- rostfreier Stahl (Abbildung 7.1-5),
-

- Plexiglas (Abbildung 7.1-3) mit geklebtem Papier (Abbildung 7.1-2)
- dünne, glatte Zementschalen (Abbildung 7.1-1)

Die Zementabdeckungen wurden aus die vergossenen auf dem Tisch Zement (Abbildung 7.1-1) gemacht. Als den Zement schon ein bisschen nach die halbe Stunde hart geworden ist, wurden die Kreise mit Durchmesser 32mm im Zement eingepägt.



Abbildung 7.1-1: Zementschalen



Abbildung 7.1-2: Plexiglas mit geklebtem Papier



Abbildung 7.1-3: Rostfreier Stahl



Abbildung 7.1-4: Plexiglas



Abbildung 7.1-5: Zementschale



Abbildung 7.1-6: Zementschale

### 7.1.1 Ergebnisse

Um die Versuchen durchzuführen, wurde in aller drei Serien die gleiche Mischung verwendet (Tab. 7.1-1).

Tabelle 7-1 Bestandteile der Mischungen

#### Vorversuch

W/Z-0,30

| Bestandteile | Bezeichnung                        | Masse [g] |
|--------------|------------------------------------|-----------|
| Wasser       | Wasser                             | 2000      |
| Zement       | Cem I 52,5 N C <sub>3</sub> A-frei | 600       |
| Fließmittel  | ACE 430                            | 104       |

Decken:

- Serie 1: Plexiglas mit geklebtem Papier
- Serie 2: Rostfreier Stahl
- Serie 3: Zementschale

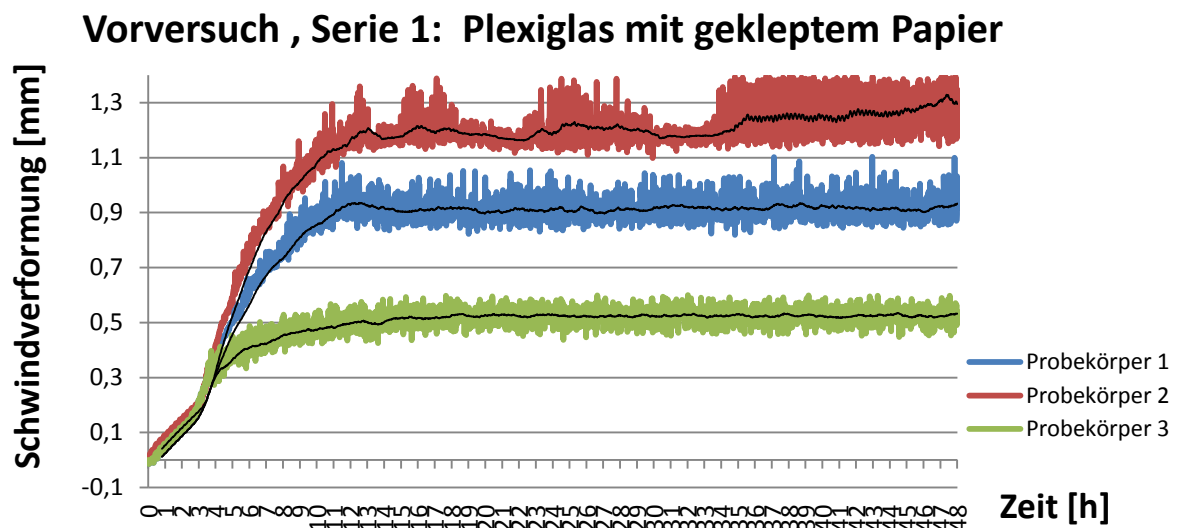


Abbildung 7.1-7: Vorversuch, Es wurden die Abdeckungen aus Plexigläser, mit geklebtem Papier auf der Oberfläche, verwendet

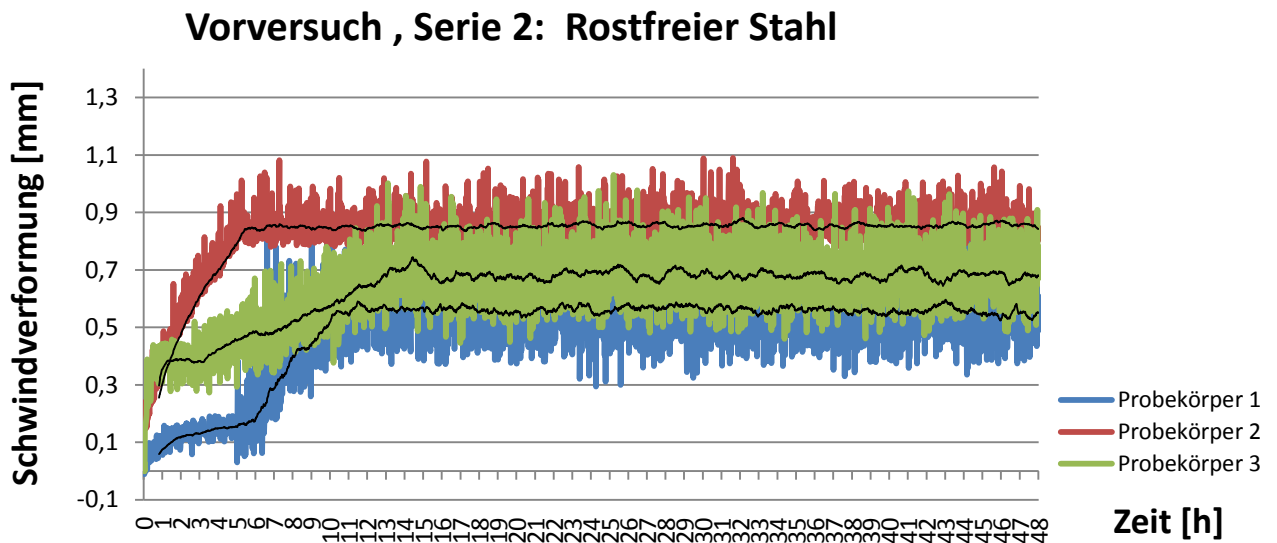


Abbildung 7.1-8: Vorversuch, Es wurden die Abdeckungen aus Plexigläser, mit gekleptem Papier auf der Oberfläche, verwendet

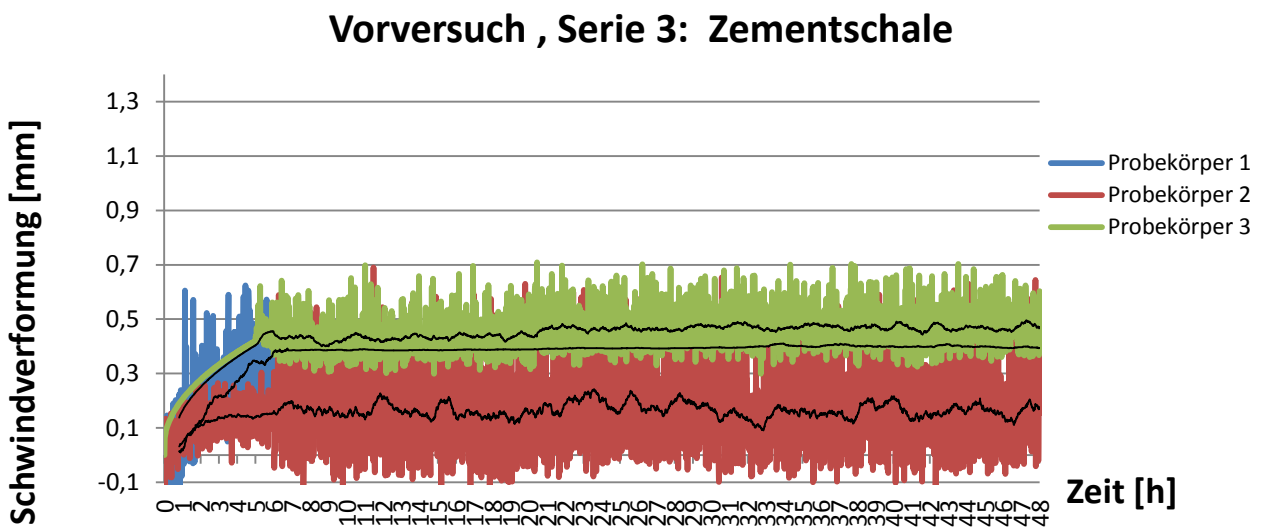


Abbildung 7.1-9: Vorversuch, Es wurden die Abdeckungen aus Plexigläser, mit gekleptem Papier auf der Oberfläche, verwendet

Es wurden die drei ganz unterschiedlichen Diagramme dargestellt. Es gab ziemlich andere Abläufe in jeder Serie. Darüber hinaus sind die Abläufe der Probekörper sowohl in der ersten als auch in der zweiten Serie nicht gleich. Zwei Probekörper in der ersten Serie haben zwar fast die vergleichbaren Ergebnisse, aber in der zweiten Serie ergeben sich chaotische, unvergleichbare und zufällige Verläufe.

Da die Dichten des Plexiglasses und des Stahls viel kleiner als die Dichte des Zements sind, sind die Zementschalen viel schwerer, deshalb die Mischung besser gedrückt werden kann. Schlussendlich wurden die Zementschalen gewählt.

---

## 7.2 Versuchsplanung

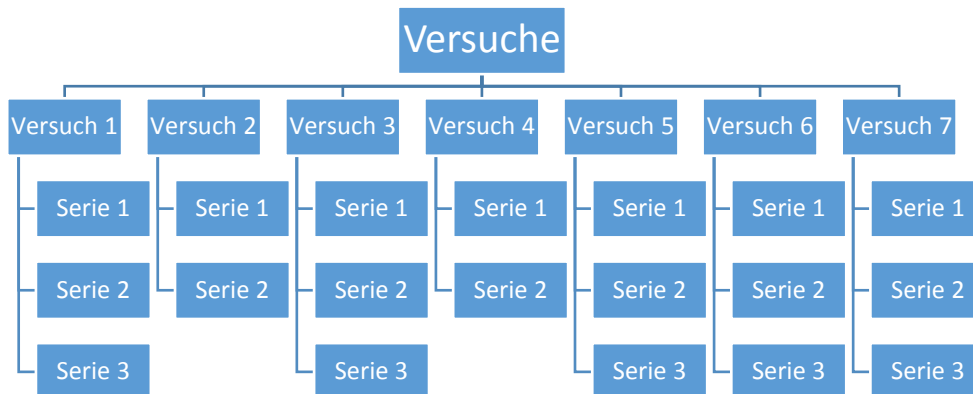


Abbildung 7.2-1: Versuchsplan

Der Versuchsplan ist in Abbildung 7.2-1 dargestellt. Es wurde insgesamt die sieben Versuche durchgeführt. Jeder Versuch besteht sich entweder aus drei oder zwei Serien und jede Serie besteht sich aus drei Probekörper. Es wurden jedes Mal in jeder Serie drei Probekörper überprüft, um zu beobachten, ob sie vergleichbare die Ergebnisse haben. Die genaue Beschreibung der Versuche ist in der Tabelle 7-2 zusammengestellt.

---



### 7.3 Versuch 1

*Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons in Abhängigkeit des W/Z Werts?*

Um auf die oben gestellte Frage zu beantworten, wurden drei Mischungen, die sich durch W/Z-Wert unterscheiden (Tab. 7.2-2), vorbereitet. Es wurden die drei Mischungen mit der W/Z-Werten 0,20; 0,25 und 0,30 gemacht.

Ursprünglich wurde es geplant, dass diese Versuche anhand der Rezepte vollständigen [21] durchgeführt werden. Es gibt jedoch in der Rezeptur den Quarzsand, der das Schwinden hinsichtlich verringert kann. Deshalb kann es schwieriger sein, das Schwinden zu beobachten und festzustellen, wovon das Schwinden abhängt. Aus diesem Grund wurde die Rezeptur [27] verwendet, die kein Sand enthält. Das heißt, es wurde nur Matrix verwendet.

Tabelle 7-3 Die Mischungen der drei Serien in der ersten Versuch.

| Bestandteile         | Bezeichnung                        | Serie 1       | Serie 2       | Serie 3       |
|----------------------|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                      |                                    | Wert W/Z-0,20 | Wert W/Z-0,25 | Wert W/Z-0,30 |
|                      |                                    | Masse [g]     | Masse [g]     | Masse [g]     |
| <b>Wasser</b>        | Wasser                             | <b>330</b>    | <b>415</b>    | <b>498</b>    |
| <b>Zement</b>        | Cem I 52,5 N C <sub>3</sub> A-frei | 1659          | 1659          | 1659          |
| <b>Zusatzstoff 1</b> | ElkemMicrosilica Grade 940-U       | 415           | 415           | 415           |
| <b>Zusatzstoff 2</b> | Quarzmehl                          | 830           | 830           | 830           |
| <b>Fließmittel</b>   | ACE 430                            | 106           | 68            | 55            |
| <b>W/Z-Wert</b>      |                                    | 0,20          | 0,20          | 0,20          |

Tabelle 7.3-2 Zeitdauer der Mischungen

| Nr. | Mischreihenfolge | Zeit [s] |
|-----|------------------|----------|
| 1   | Cem.+MS+QM+QS    | 180      |
| 2   | Wasser+FM        | 30       |
| 3   | Mischen          | 120      |
|     | Σ                | 330      |



### 7.3.1 Ergebnisse

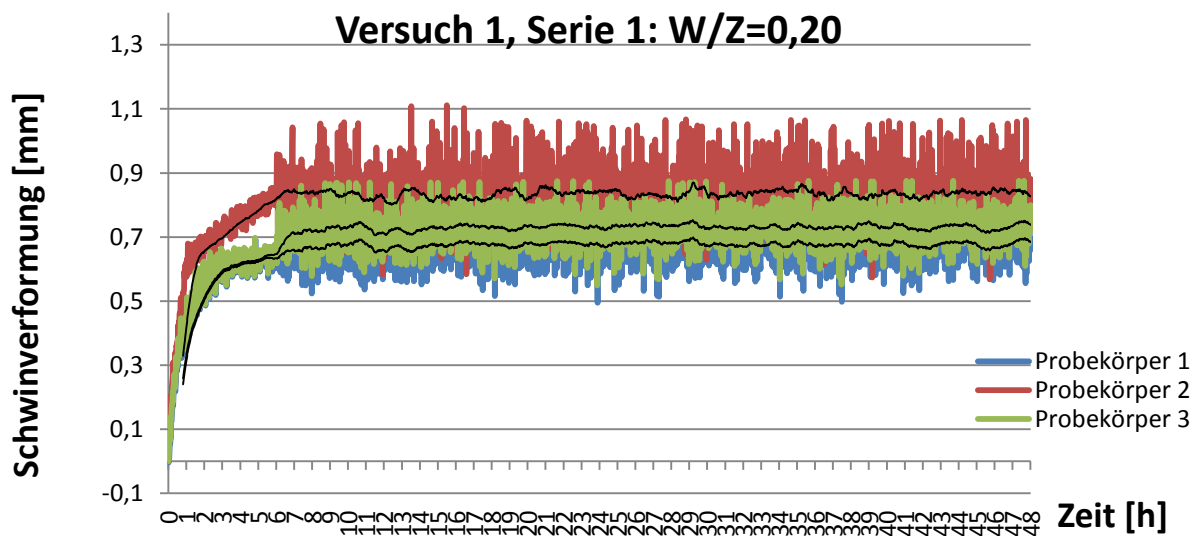


Abbildung 7.3.1-1: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (W/Z=0,20)

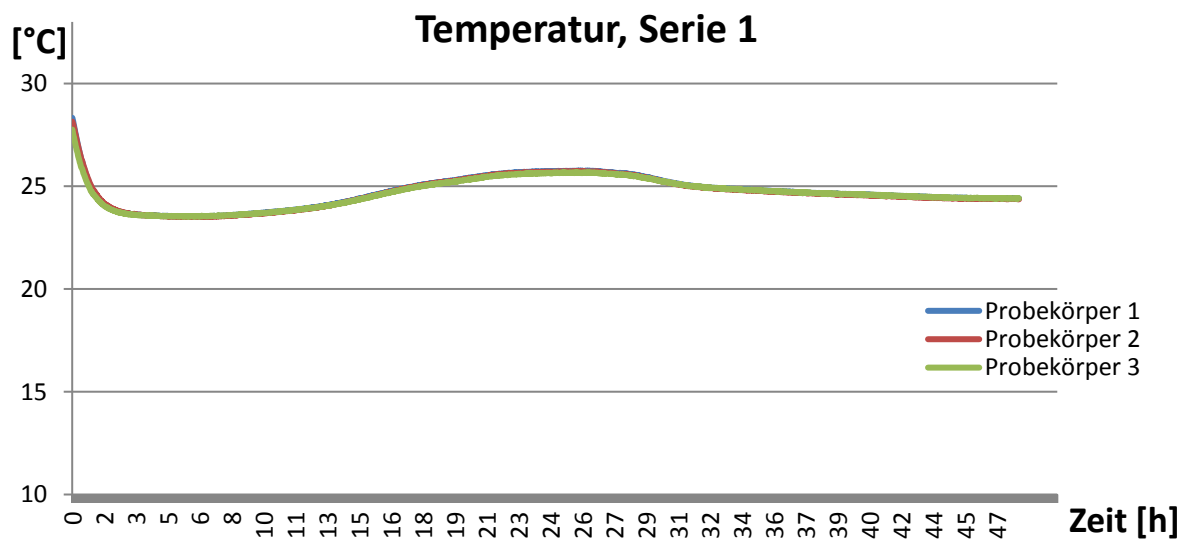


Abbildung 7.3.1-2: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (W/Z=0,20)

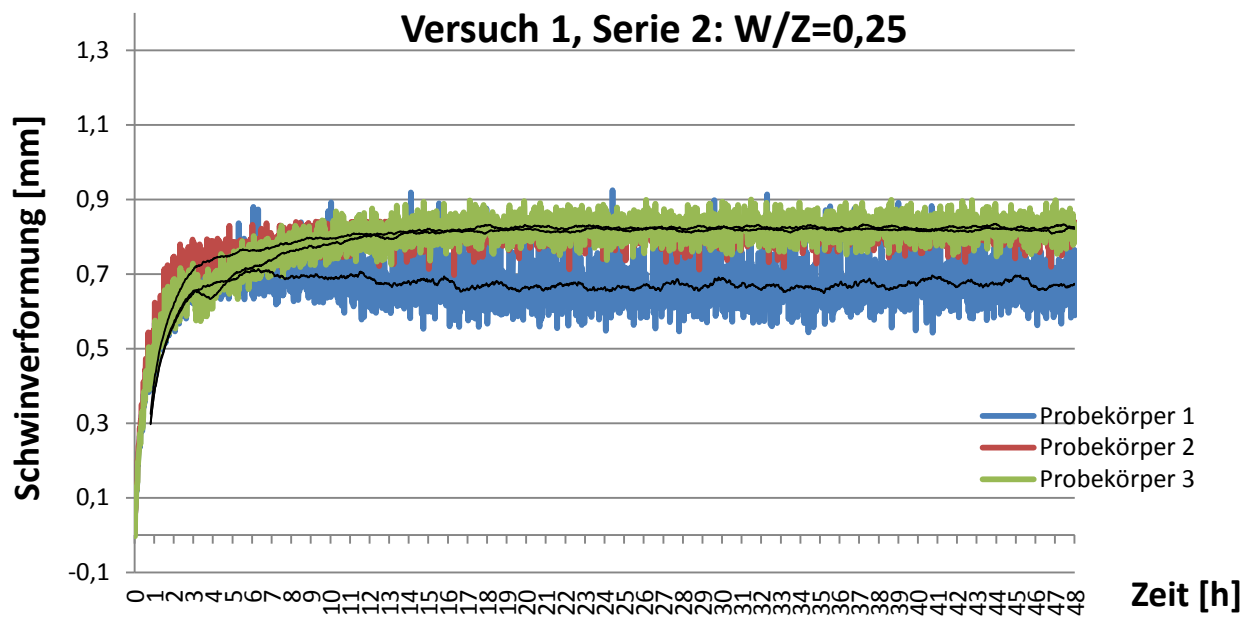


Abbildung 7.3.1-3: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (W/Z=0,25)

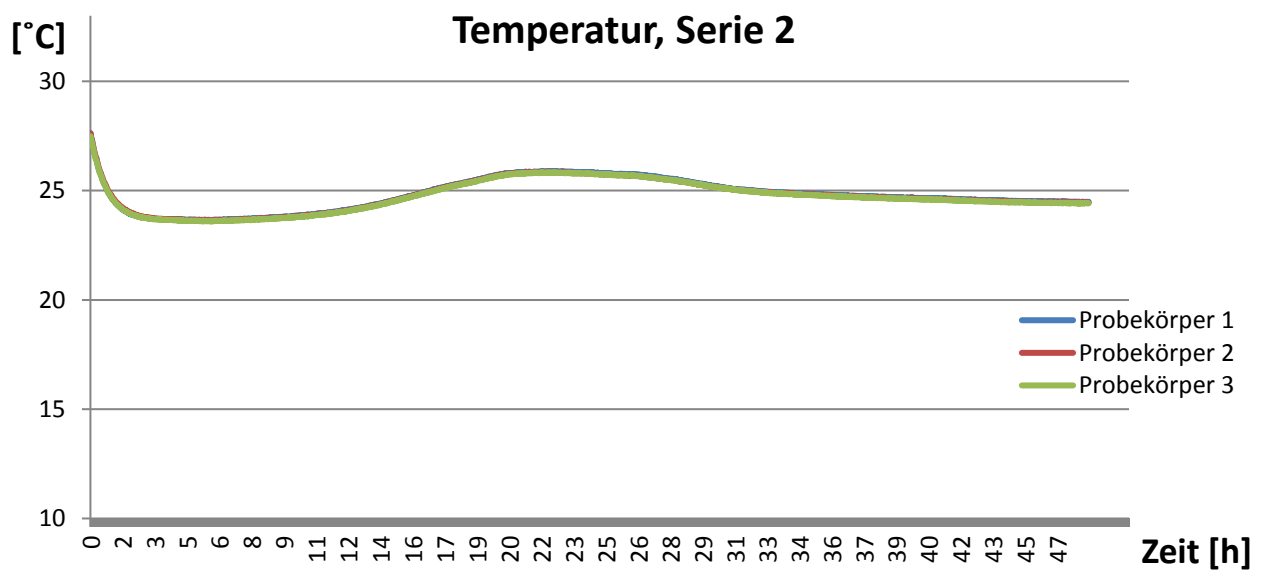


Abbildung 7.3.1-4: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (W/Z=0,25)

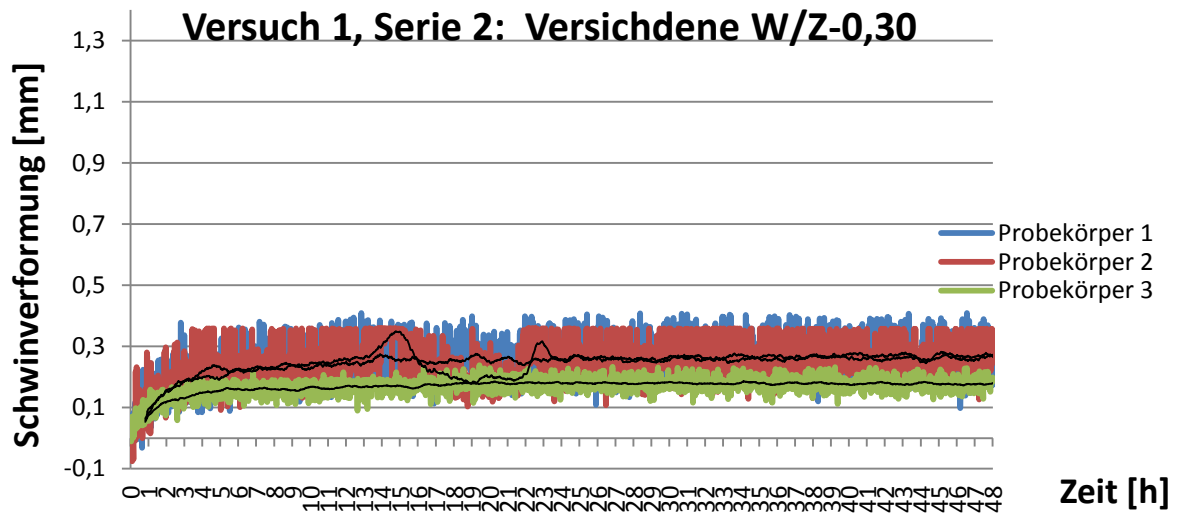


Abbildung 7.3.1-5: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (W/Z=0,30)

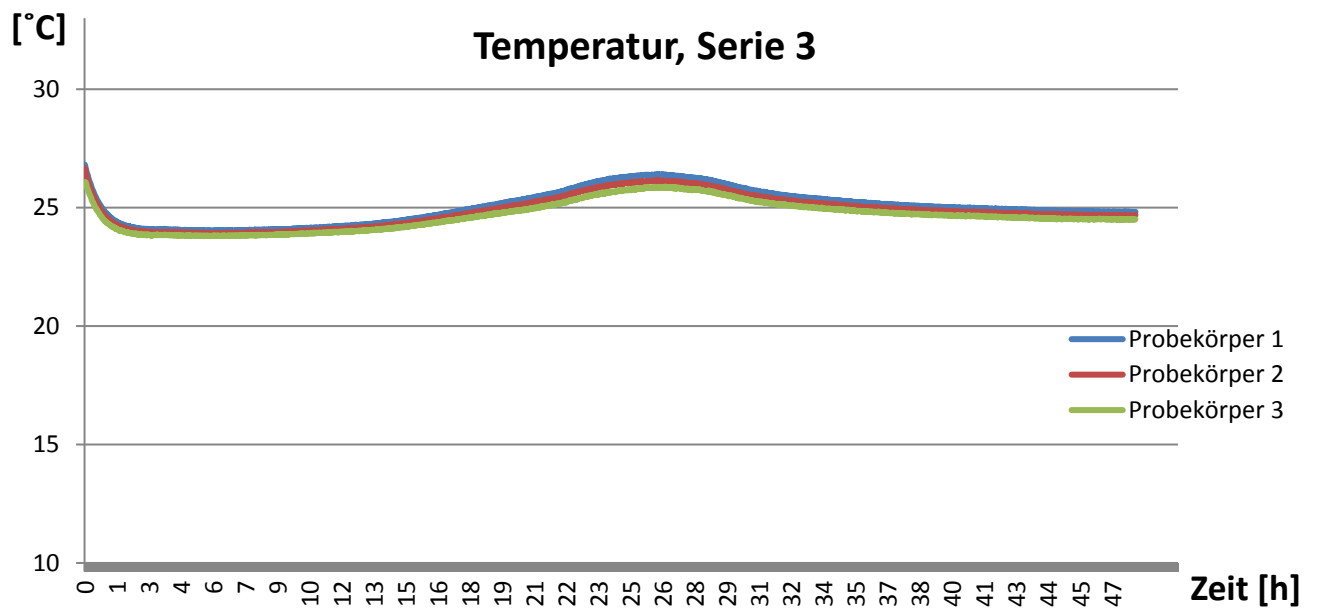


Abbildung 7.3.1-6: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (W/Z=0,30)

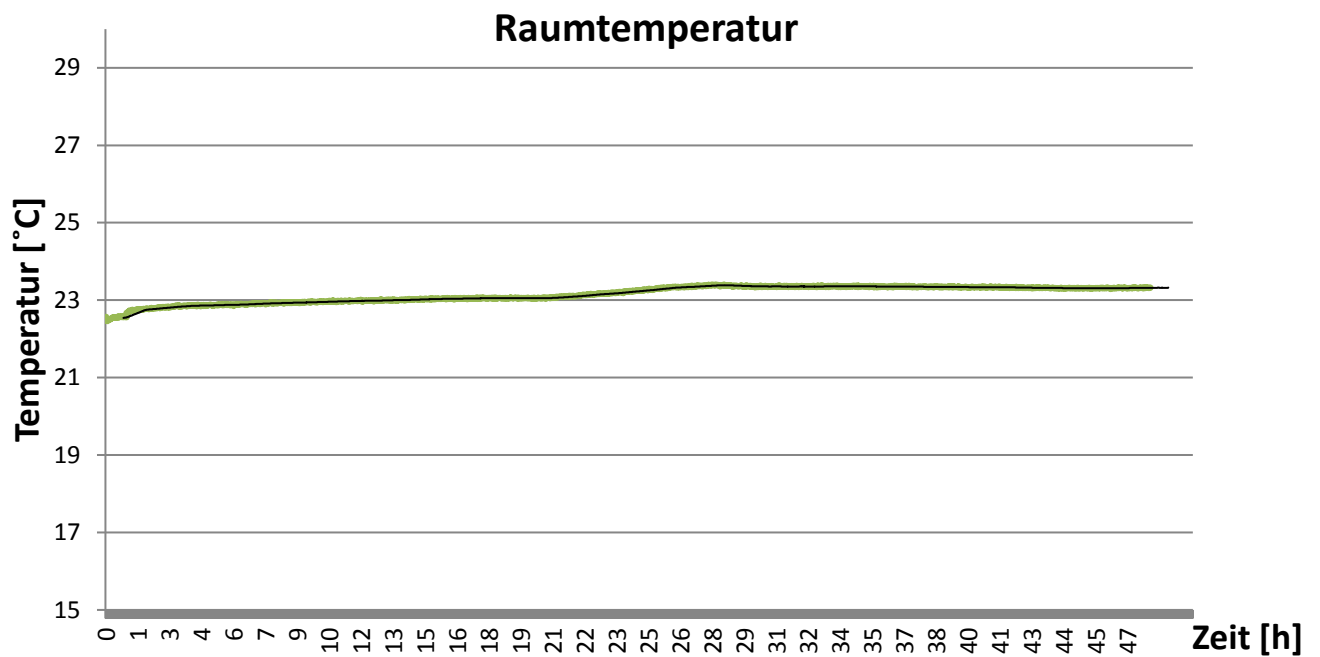


Abbildung 7.3.1-7: Die Temperatur des Raums während des ersten Versuchs

### 7.3.2 Bewertung

Um die Ergebnisse ersichtlicher darzustellen, werden die Ergebnisse der drei Serien zusammengefasst.

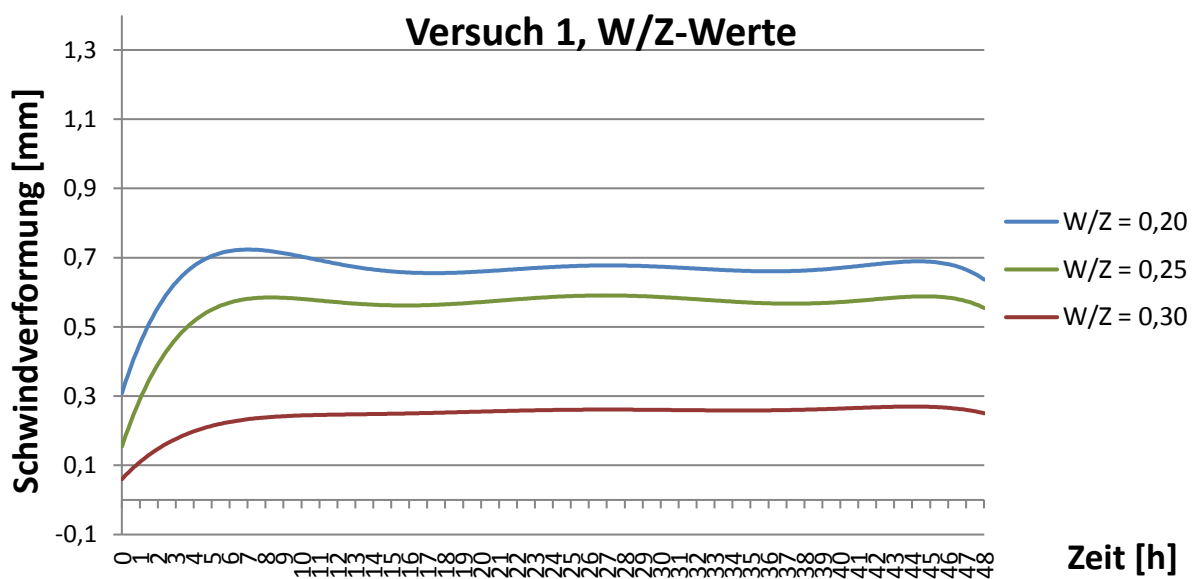


Abbildung 7.3-1: Schwindverformungen im ersten Versuch

Um die vergleichbare Ergebnisse zu kriegen, werden die Schwindmaße der einzelnen Serien in Tabelle 7.3.2-1 zusammengestellt. Da die Ergebnisse des Schwindens der Probekörper in jeder einzelnen Serie fast gleich sind, mach es Sinn, nur ein Ergebnis von jeder Serie zum Vergleich heranzuziehen. Die Schwindmaße werden mit Hilfe folgender Gleichung Nummer 1 ermittelt, damit können die Unterschiede besser gemerkt werden.

$$\text{Schwindmaß} = \frac{\Delta l}{l_0} * 100[\%] \quad 1$$

Wobei:

- $\Delta l$       Schwingung
- $l_0$         Probekörperlänge

Es wurden die Schwindmaße nach drei, zehn und zweiundvierzig Stunden der Bemessungen gerechnet. Es gibt anhand Standes des Wissens die erste wichtige Phase des Schwindens zwischen etwa zwei bis sechs Stunden. Das ist die sogenannte plastische oder kapillare Schwinden [25]. Aus diesem Grund macht es Sinn, das erste Schwindmaß nach drei Stunden zu ermitteln. Das zweite Mal wird die Bemessung des Schwindens nach zehn Stunden durchgeführt. Der Grund besteht darin, dass zwischen etwa zehn bis zwanzig Stunden das sogenannte chemische Schwinden stattfindet. Bei hochfesten Betonen, die mit deutlich niedrigen W/Z-Werten ( $W/Z < 0,40$ ) hergestellt werden, kommt es zu einer inneren Austrocknung, die zu einer Herabsetzung und Entstehung eines Unterdruckes führt [13]. Die letzte Bemessung findet nach zweiundvierzig Stunden statt, weil der Erhärtungsverlauf des Zementsteins nicht vollständig ist. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 7.3.2-1 deutlich dargestellt.

Tabelle 7-4: Schwindmaße der Probekörper im ersten Versuch

| Versuch 1 | W/Z-Wert | Schwindmaß [%] |           |           |
|-----------|----------|----------------|-----------|-----------|
|           |          | 3 Stunde       | 10 Stunde | 42 Stunde |
| Serie 1   | 0.30     | 0.13           | 0.15      | 0.24      |
| Serie 2   | 0.25     | 0.20           | 0.35      | 0.39      |
| Serie 3   | 0.20     | 0.42           | 0.44      | 0.45      |

Anhand Tabelle 7-4 gibt es sich zu erkennen, dass je niedriger den W/Z-Wert ist, desto größer das Schwindmaß ist. In der ersten drei Stunden ist die Zunahme des Schwindens bei allen Serien am größten. Auf dem ersten Augenblick ist es zu erkennen, dass es in der ersten drei Stunden einen großen Unterschied des Schwindens zwischen der Serie 1 und 3 gibt. Das Schwinden in der ersten Serie ist nämlich etwa 3,5 Mal größer als in der ersten Serie.

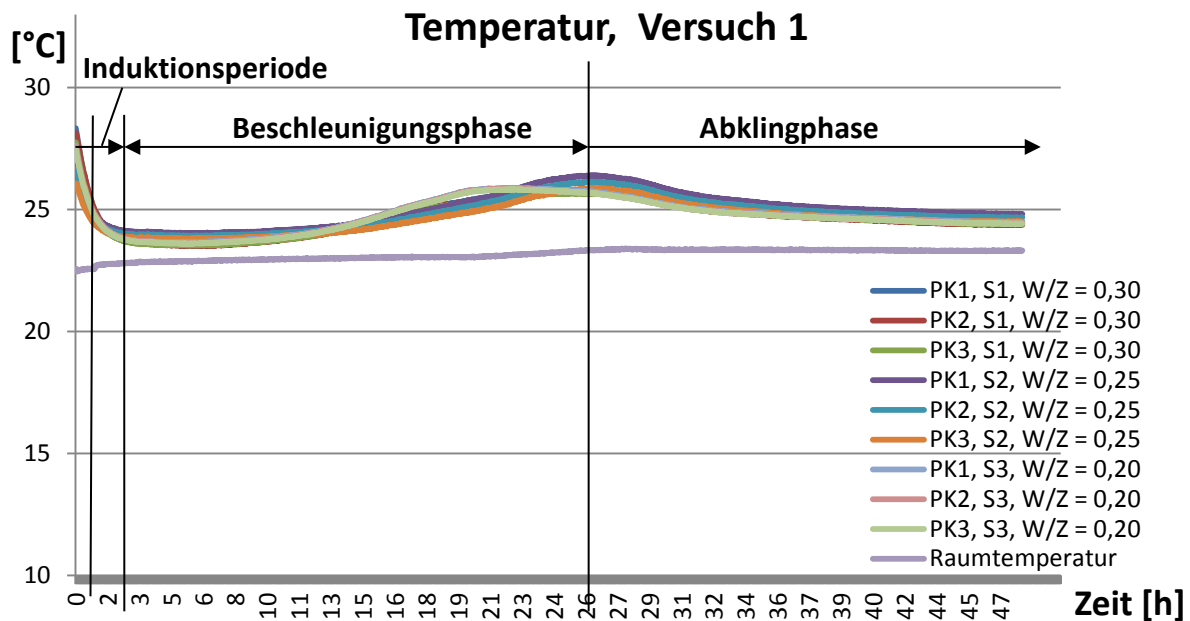


Abbildung 7.3.2-2: Die Temperaturverläufe im ersten Versuch.

In der oberen Abbildung wurden die Zeitperioden des Probekörpers 3 von der Serie 3 markiert. Auf den ersten Augenblick sieht man deutlich, dass fast alle Temperaturverläufe gleich sind. Es gibt kaum Unterschied. Dies kann nämlich bedeutet, dass der W/Z-Wert kaum Einfluss auf das Temperaturverlauf hat. Anhand das Diagramm kann festgestellt werden, dass es am Anfang in der Induktionsperiode zur maximalen Temperatur von etwa 28°C kommt. Dann sind die Temperaturen in der ersten zwei Stunden plötzlich von etwa 28°C bis 24°C heruntergefallen. Danach gibt es zwischen der zweiten und sechsundzwanzigsten Stunde eine ziemlich langsame Erhöhung der Temperaturen von etwa 24°C bis 27°C in der Beschleunigungsphase. Anschließend gibt es die Abklingphase, in der die Temperaturen bis etwa 25°C sinken. Von ungefähr der vierzigten Stunde sind die Temperaturen konstant und sie betragen alle circa 25°C. Außerdem ist die Raumtemperatur immer kleiner als die Temperaturen des Probekörpers.

Beantwortung der Fragenstellung:

*Diese Zementleime zeigen das typische für Zementleime mit niedrigen W/Z-Werten starke Anfangsschwinden, das bereits vor der Erstarrung begann. Man sieht deutlich, dass je niedriger der W/Z-Wert ist, desto größer das Anfangsschwinden ist. Diese Aussage bestätigt den Stand des Wissens, anhand dessen das autogene Schwinden mit abnehmenden W/Z-Wert zunimmt.*

## 7.4 Versuch 2

*Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei Verwendung unterschiedlicher Zemente?*

In diesem Fall wurden zwei verschiedene Arten von Zementen verwendet, um festzustellen, wie es das Schwinden des Betons von den Zementen abhängt. Zuerst wurden die Zemente gewählt. Anhand Standes der Erkenntnisse, kann festgestellt werden, dass hauptsächlich die C<sub>3</sub>A- arme bzw. C<sub>3</sub>A- freie Portlandzemente zur Herstellung UHCP verwendet werden sollen [22]. Im deutschen Regelwerk DIN EN 206-1/DIN 1045-2 gilt Beton einer Festigkeitsklasse von über C50/60 als hochfest [26]. Anhand der ÖN EN 197-1 gibt es zwei Gruppen der Portlandzemente. Man unterscheidet nämlich zwischen:

- CEM I: Portlandzemente
- CEM II: Portlandzemente mit Zusatzstoffen

Anhand obiger Überlegung werden drei folgende Zemente überprüft:

- Der Contragess Portlandzement I 52,5 N WT 27 C<sub>3</sub>A-frei/HS C<sub>3</sub>A-frei
- Der Contragess Portlandzement I 42,5 N WT 27 C<sub>3</sub>A-frei/HS C<sub>3</sub>A-frei

Die Matrizen wurden anhand der Mischung[27] hergestellt. Es wurde den W/Z-Wert 0,30 angenommen. Die Zusammensetzungen sind in der Tabelle 7.3.2-1 deutlich dargestellt. Die Mischungsdauern ist es gleich wie im ersten Versuch. Sie ist in der Tabelle 7.3-2. dargestellt.

Table 7.3.2-1: Bestandteile im Versuch 2.

| Bestandteile  | Bezeichnung                  | Serie 1                 | Serie 2                 |
|---------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|               |                              | Cem I 52,5<br>Masse [g] | Cem I 42,5<br>Masse [g] |
| Wasser        | Wasser                       | 330                     | 415                     |
| Zement        |                              | 1659                    | 1659                    |
| Zusatzstoff 1 | ElkemMicrosilica Grade 940-U | 415                     | 415                     |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl                    | 830                     | 830                     |
| Fließmittel   | ACE 430                      | 106                     | 68                      |

### 7.4.1 Ergebnisse

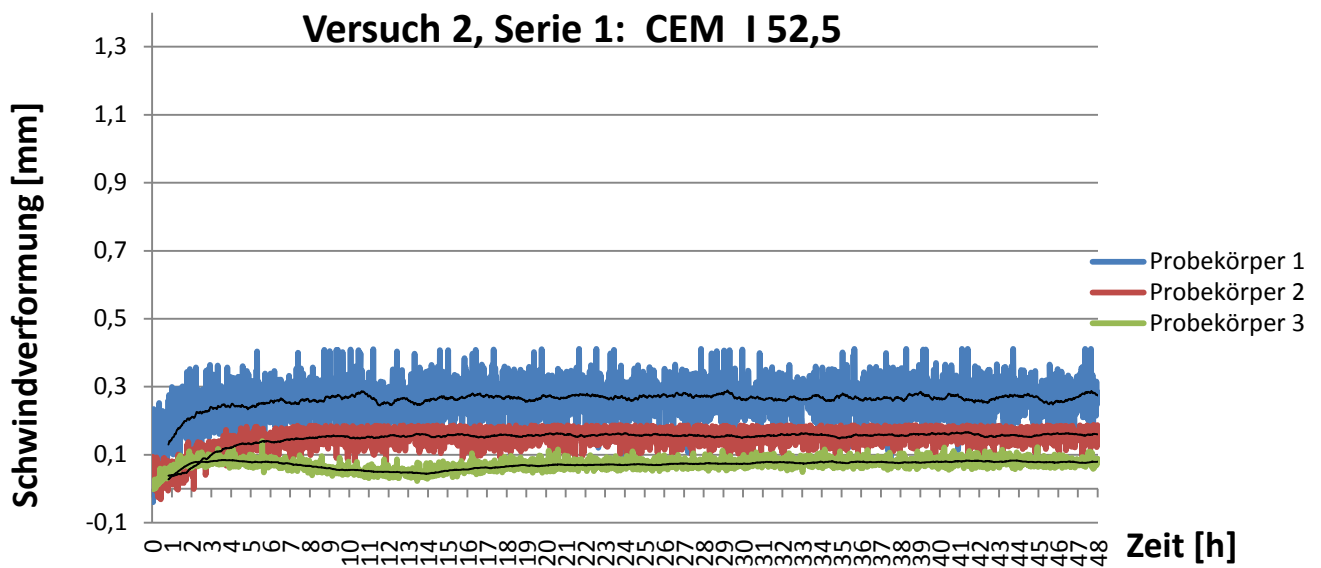


Abbildung 7.4-1: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (CEM I 52,5)

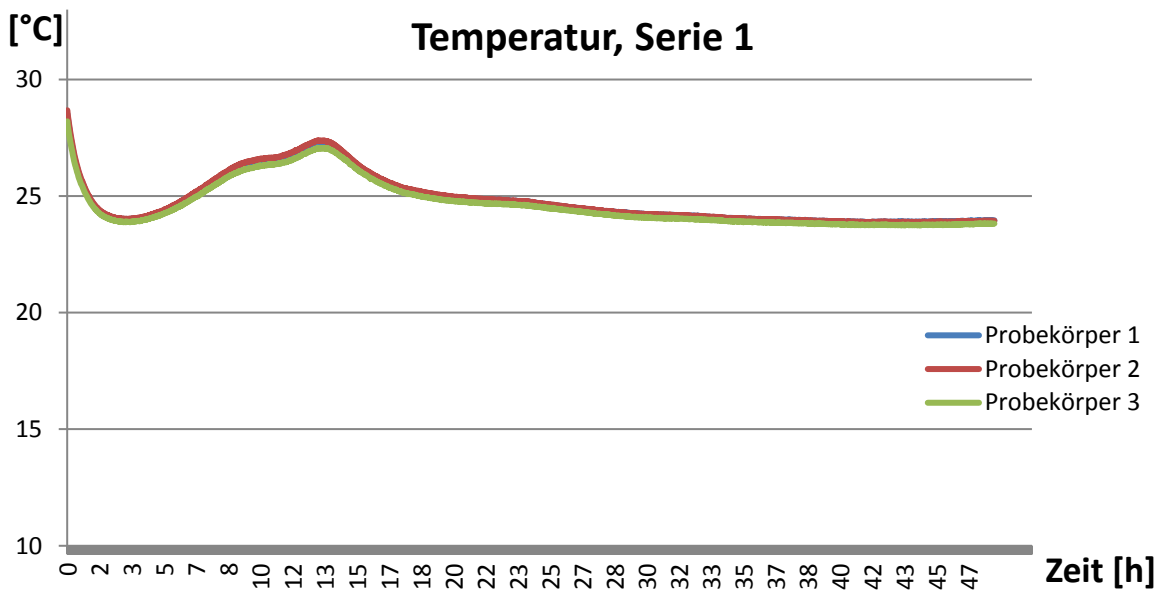


Abbildung 7.4-2: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (CEM I 52,5)



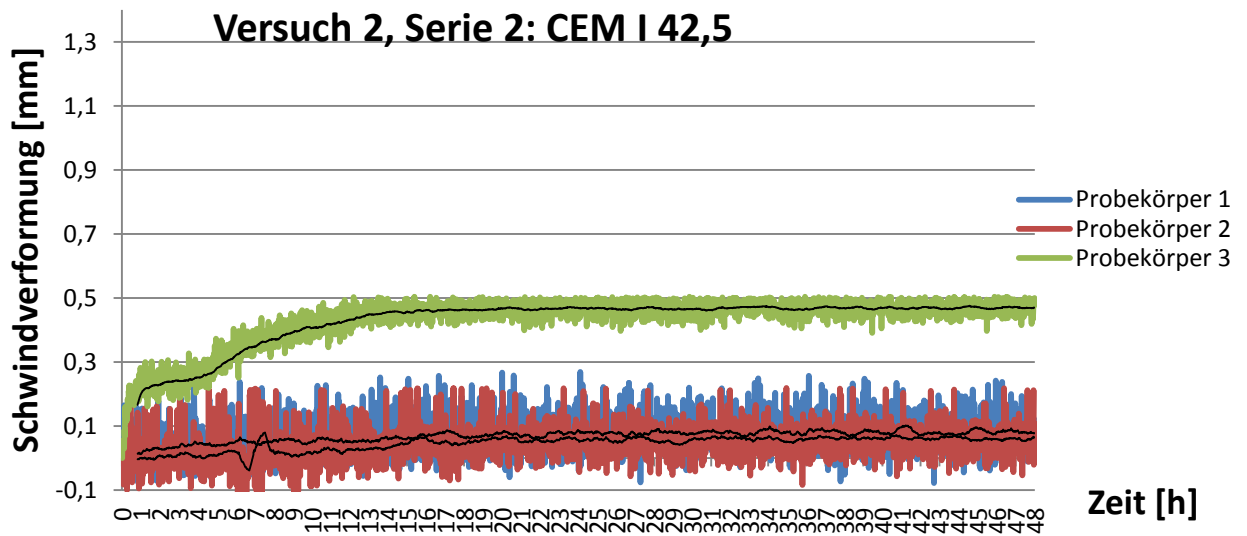


Abbildung 7.4-3: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (CEM I 42,5)

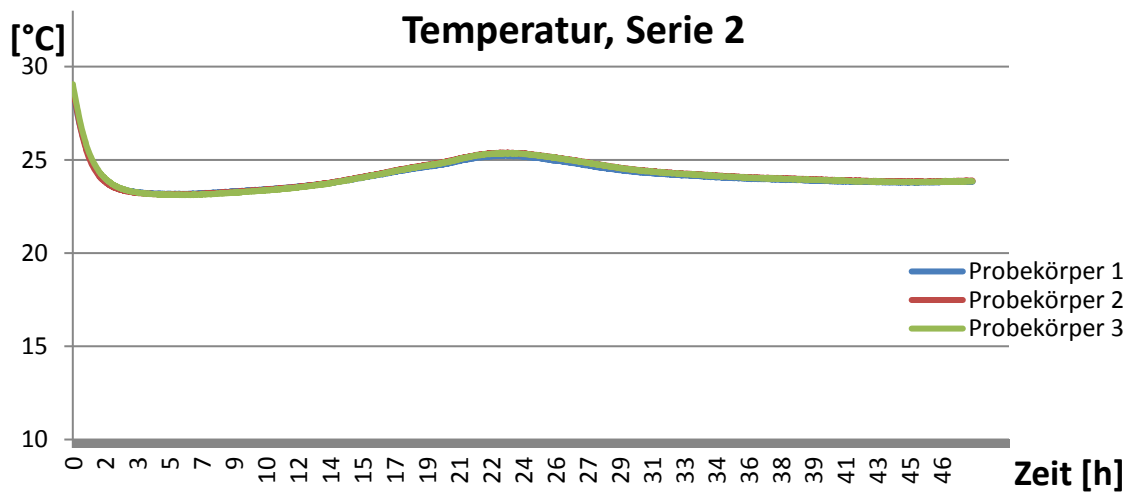


Abbildung 7.4-4: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (CEM I 42,5)

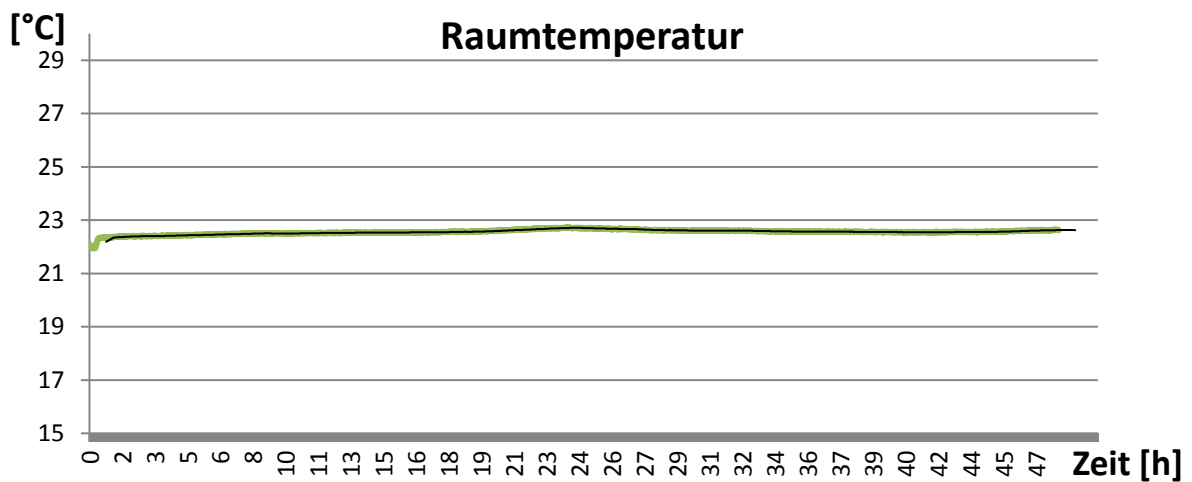


Abbildung 7.4-5: Die Temperatur des Raums während des zweiten Versuchs.

### 7.4.2 Bewertung

Die Ergebnisse der Serien sind in Abbildung 7.4-6 zusammengefasst. Da es kaum Schwinden der Mischungen in der Probekörper 2 und 3 sowohl in der ersten als auch in der zweiten Serie gibt, sind sie nicht nachvollziehbar, deshalb wurden sie zum Vergleich nicht herangezogen werden. Schlussendlich wurden zwei Schindverläufe verglichen.

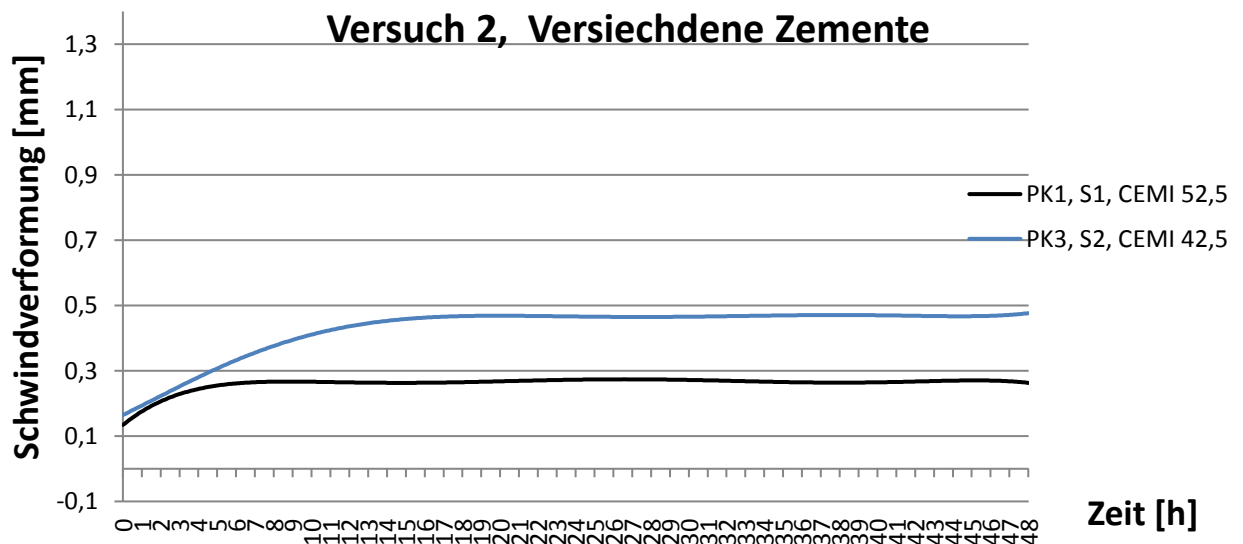


Abbildung 7.4-6: Schwindverformungen im zweiten Versuch.

Die Ergebnisse des Schwindens der zwei gewählten Probekörper sind in der Tabelle 7.4.2-1 dargestellt.

Tabelle 7-5: Schwindmaße der Probekörper im ersten Versuch.

| Versuch 2 | CEM         | Schwindmaß [%] |           |           |
|-----------|-------------|----------------|-----------|-----------|
|           |             | 3 Stunde       | 15 Stunde | 42 Stunde |
| Serie 1   | CEM I, 52,5 | 0.12           | 0.17      | 0.19      |
| Serie 2   | CEM I, 42,5 | 0.17           | 0.29      | 0.29      |

Anhand der Ergebnisse des Schwindens sieht man deutlich, dass das Schwinden des Betons offensichtlich von der Festigkeitsklasse des Zements abhängt. Nach drei Stunden ist das Schwinden des Betons in der ersten Serie etwa 42% größer als das Schwinden in der Serie 2. Nach 15 Stunden beträgt die Unterschied circa 71% und nach 42 Stunden mehr als 52 %.

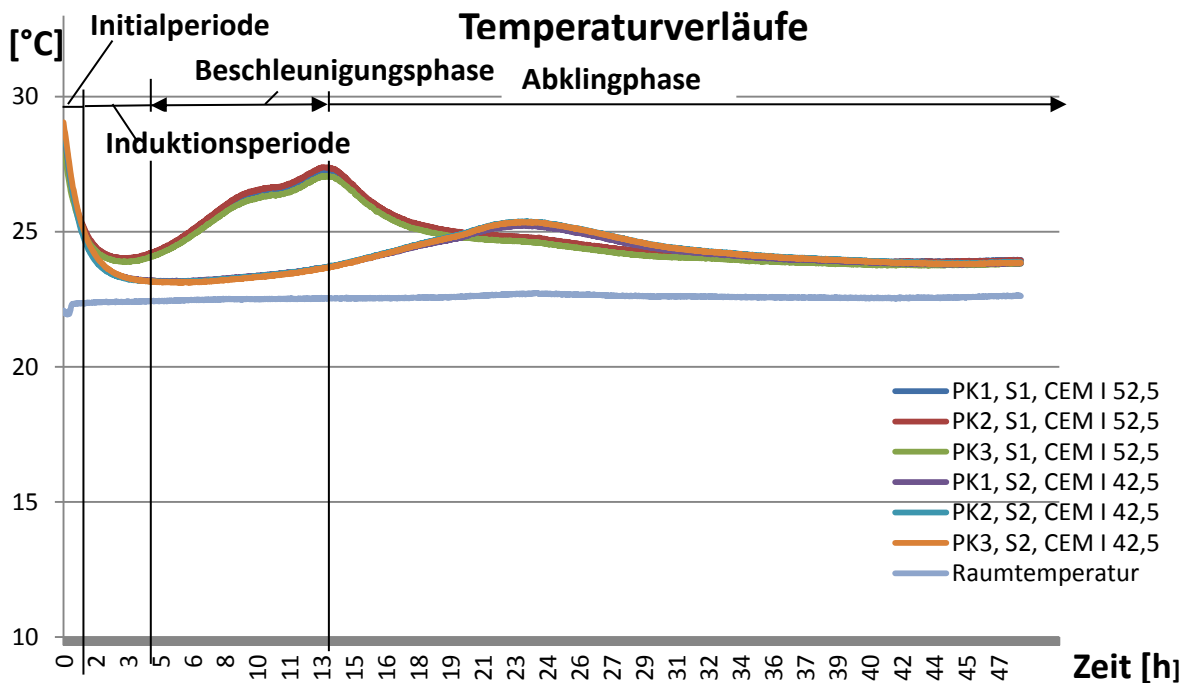


Abbildung 7.4-7: Die Temperaturverläufe im zweiten Versuch.

Es wurden in der Abbildung 7.4-7 die Temperaturverläufe im zweiten Versuch dargestellt. Es ist sich zu erkennen, dass die drei Temperaturverläufe jeder Serie fast gleich sind. Es wurden Phasen der Wärme flüsse des Portlandzements in der Serie 1 in der Abbildung markiert. In der ersten 31 Stunden unterscheiden sich die Temperaturverläufe der Serien 1 und 2 sehr voneinander. Die Maximaltemperatur beträgt in der ersten Serie etwa 27°C und sie wurde nach circa zwölf Stunden erreicht. Zwischen der zweiten und zwölften Stunde steigt die Temperatur von etwa 23,5°C bis etwa 27°C kontinuierlich in der ersten Serie. Es ist die sogenannte Beschleunigungsphase. Danach sinkt die Temperatur langsamer bis ungefähr 23,5°C. Ab etwa der einunddreißigsten Stunde sind die Temperaturverläufe in der beiden Serien konstant und sie betragen circa 23,5°C. Es ist die Beschleunigungsphase in der zweiten Serie langsamer als in der zweiten Seite. Sie dauert zwischen fünften und vierundzwanzigsten Stunde und steigt von etwa 23 °C bis etwa 25°C.

Beantwortung der Fragenstellung:

*Die beiden Zemente weisen bis zur fünften Stunde etwa gleiches Schwinden auf. Anhand der Untersuchung kann festgestellt werden, dass das Schwinden des Betons von der Festigkeitsklasse des Zements offensichtlich abhängig ist. Je größer die Festigkeit des Zements ist, desto kleiner ist das autogene Schwinden.*

*Die Ergebnisse stimmen mit Stand des Wissens überein.*

---

## 7.5 Versuch 3

*Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Fließmittel?*

Erst mit der Entwicklung des Fließmittels war es möglich, die Konstruktionen aus UHCP zu erreichen, deswegen spielt das Zusatzmittel die wichtigste Rolle während der Herstellung des UHPC. Das Zusatzmittel ermöglicht die Verringerung des Wassergehalts, was auch ein großen Einfluss auf das Frühschwindenverhalten des Betons haben kann.

Es wurden drei Mischungen mit unterschiedlichen Mengen des Fließmittels untersucht. Sie wurden mit dem W/Z-Wert 0,30 gemacht. Anbei in der Tabelle 7.4.2-1 sind die Bestandteile der Matrizen dargestellt. Die Mischzeiten sind gleich wie bei den früheren Mischungen.

Tabelle 7-6: Bestandteile der Serien im Versuch 3

| Bestandteile  | Bezeichnung                        | Serie 1                 | Serie 2                | Serie 3              |
|---------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
|               |                                    | FM-weniger<br>Masse [g] | FM-mittel<br>Masse [g] | FM-mehr<br>Masse [g] |
| Wasser        | Wasser                             | 498                     | 498                    | 498                  |
| Zement        | Cem I 52,5 N C <sub>3</sub> A-frei | 1659                    | 1659                   | 1659                 |
| Zusatzstoff 1 | ElkemMicrosilica<br>Grade 940-U    | 415                     | 415                    | 415                  |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl                          | 830                     | 830                    | 830                  |
| Fließmittel   | ACE 430                            | <b>65</b>               | <b>75</b>              | <b>85</b>            |

### 7.5.1 Ergebnisse

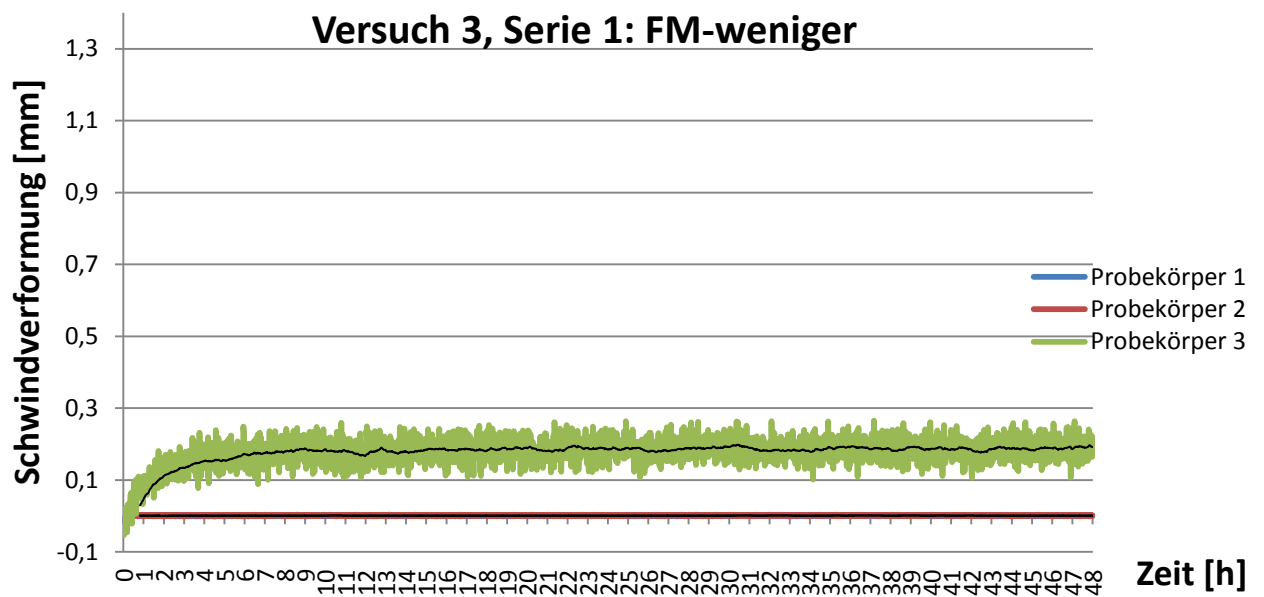


Abbildung 7.5-1: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (FM-weniger)

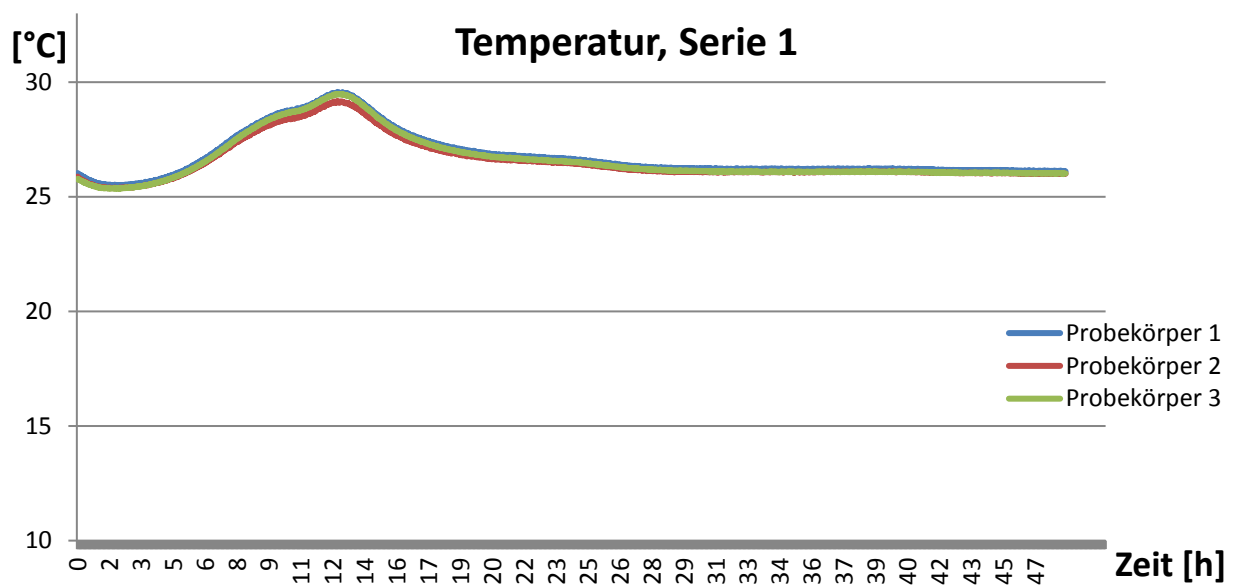


Abbildung 7.5-2 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (FM-weniger).

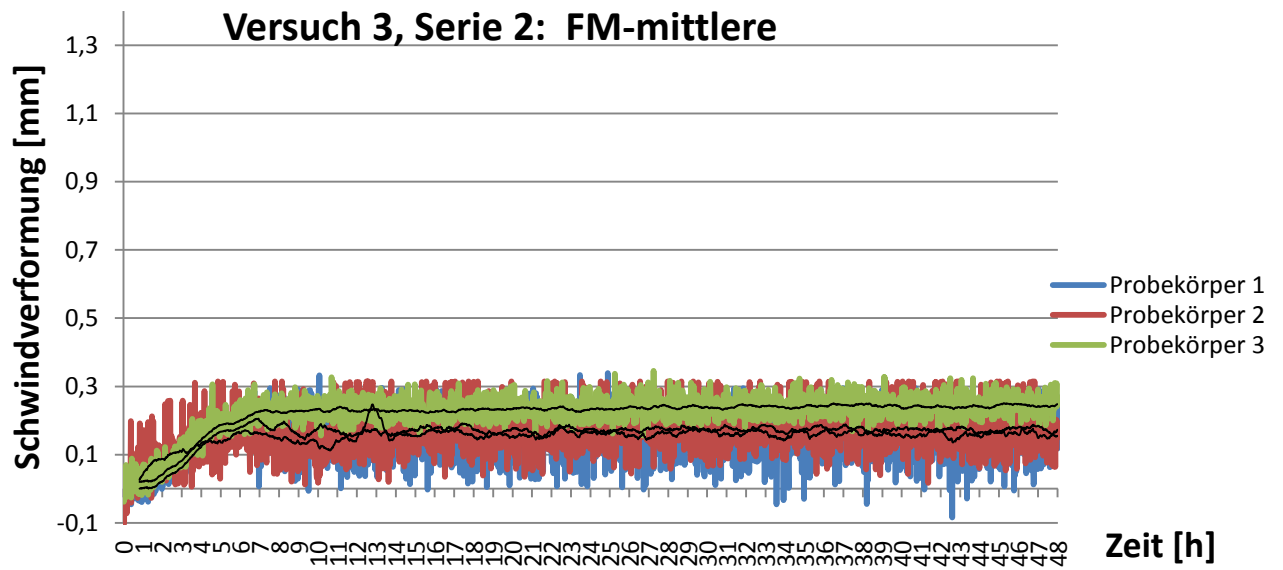


Abbildung 7.5-3: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (FM-mittel)

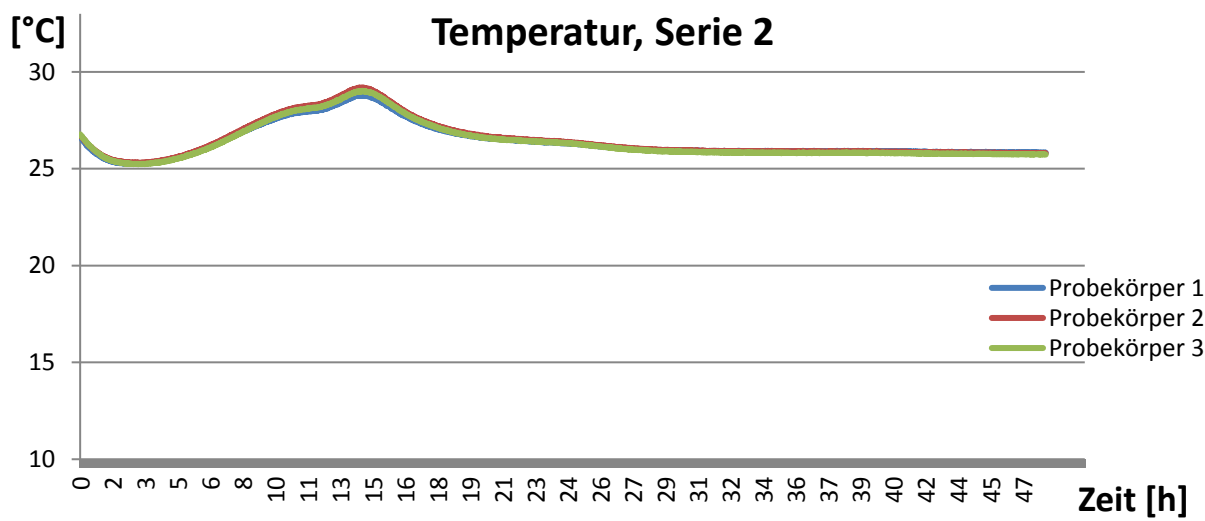


Abbildung 7.5-4: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (FM-mittel)

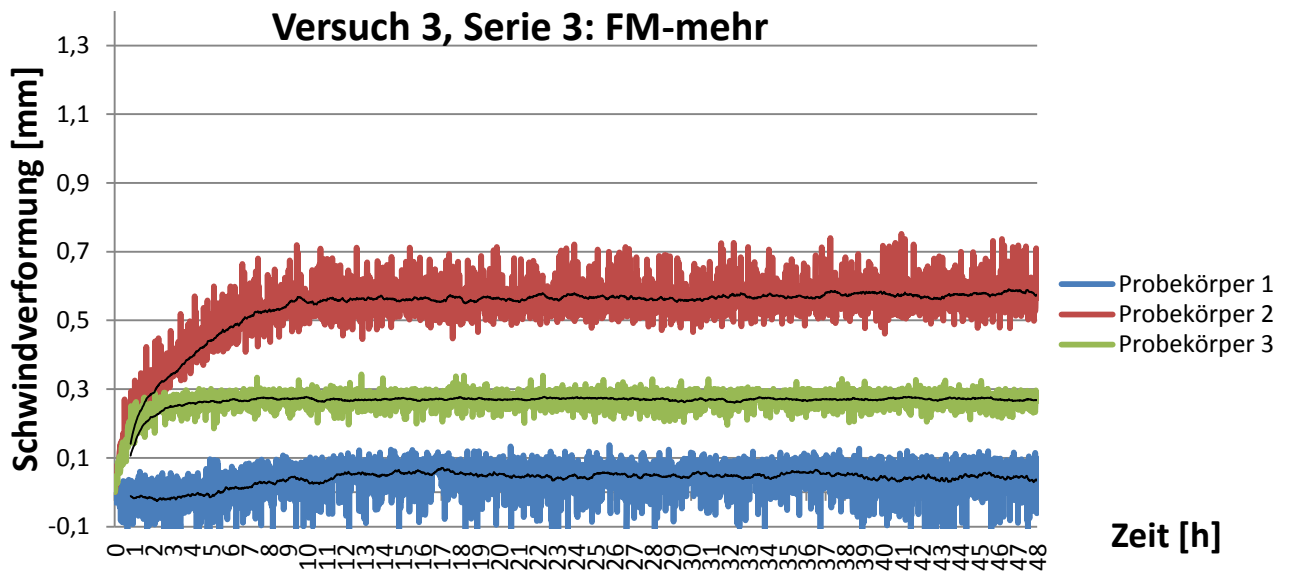


Abbildung 7.5-5: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (FM-mehr)

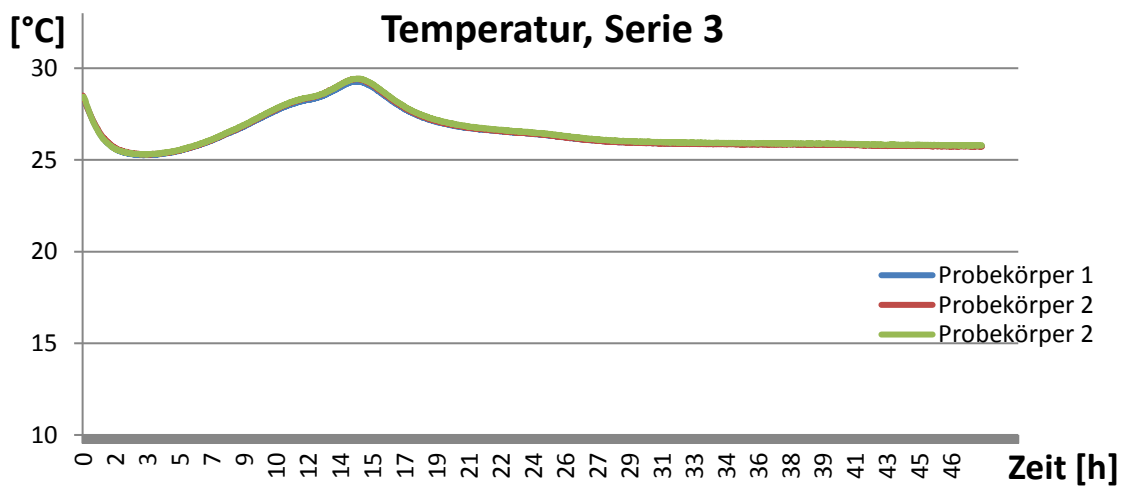


Abbildung 7.5.1-6: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (FM-mehr)



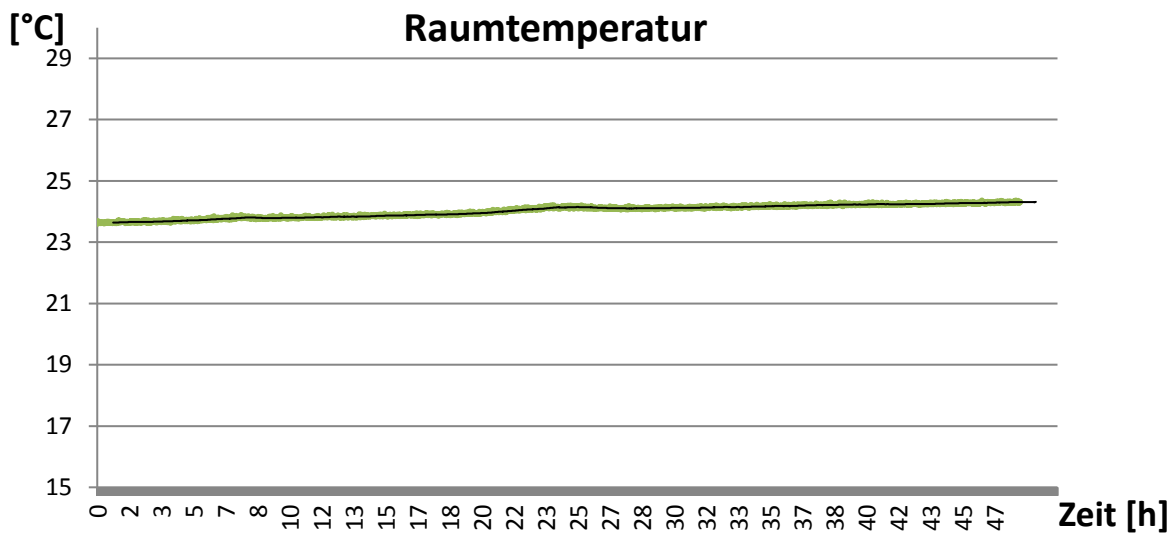


Abbildung 7.5.1-7: Die Temperatur des Raums während des dritten Versuchs

### 7.5.2 Bewertung

Die Ergebnisse wurden zusammengefasst und in Abbildung 7.5-6 dargestellt. Zuerst gibt es sich zu erkennen, dass es die Ergebnisse des Schwindens des Betons im ersten und zweiten Probekörper in der ersten Serie nicht glaubwürdig und tauglich sind, weil sie fast kein Schwinden zeigen, aus diesem Grund sind sie nicht in Betracht gezogen worden. Es wurden hier die Schwindmaße ermittelt und in der Tabelle 7.5.2-1 dargestellt.

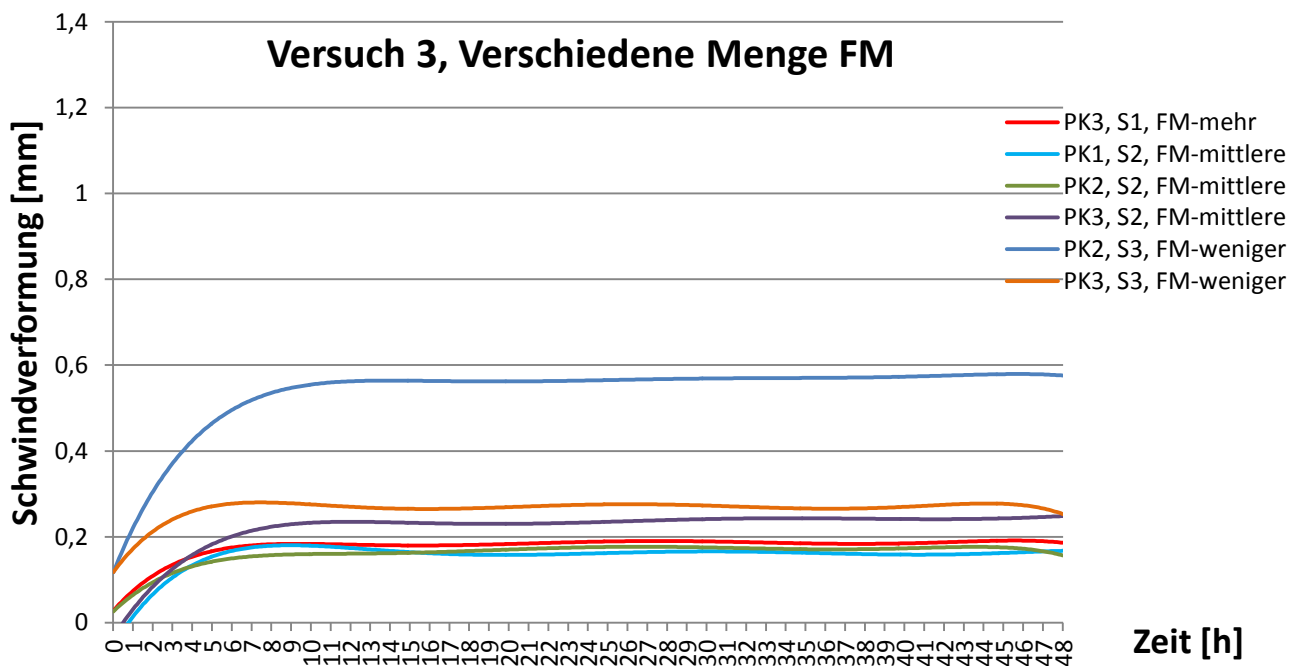


Abbildung 7.5-6: Schwindverformungen im dritten Versuch

Tabelle 7-7: Schwindmaße der Probekörper im dritten Versuch

| Versuch 3 | FM       | Schwindmaß [%] |           |           |
|-----------|----------|----------------|-----------|-----------|
|           |          | 3 Stunde       | 15 Stunde | 42 Stunde |
| PK3, S1   | mehr     | 0.04           | 0.12      | 0.13      |
| PK1, S2   | mittlere | 0.07           | 0.09      | 0.13      |
| PK2, S2   | mittlere | 0.06           | 0.08      | 0.08      |
| PK3, S2   | mittlere | 0.06           | 0.14      | 0.18      |
| PK2, S3   | weniger  | 0.22           | 0.36      | 0.37      |
| PK3, S3   | weniger  | 0.15           | 0.16      | 0.18      |

Anhand obiger Tabelle ist zu erkennen, dass die kleinste Schwinden in der ersten und das größte in der dritten Serie aufgetreten sind. In der ersten drei Stunden gibt es in allen Fällen das größte Schwindwachstum. In der Zeit zwischen der fünfzehnten und zweiundvierzigsten Stunde nimmt das Schwinden fast nicht zu. Obwohl es das größte Schwinden in der dritten Serie gibt, ist es deutlich, dass innerhalb der Serie sich die Schwindmaße der Probekörper voneinander unterscheiden. Nach der dritten Stunde beträgt den Unterschied zwischen den zweiten und dritten Probekörper 7% und nach fünfzehnten Stunden schon 20%. Anhand der Ergebnisse kann behauptet werden, dass das Fließmittel einen wesentlichen Einfluss auf das Schwinden des Betons hat. Je größer Anteil des Fließmittels gibt, desto größer ist das Schwinden des Betons. Solche Behauptung kann zwar aufgestellt werden, aber es müssen noch mehrere Untersuchungen durchgeführt werden, um sie zu bestätigen.

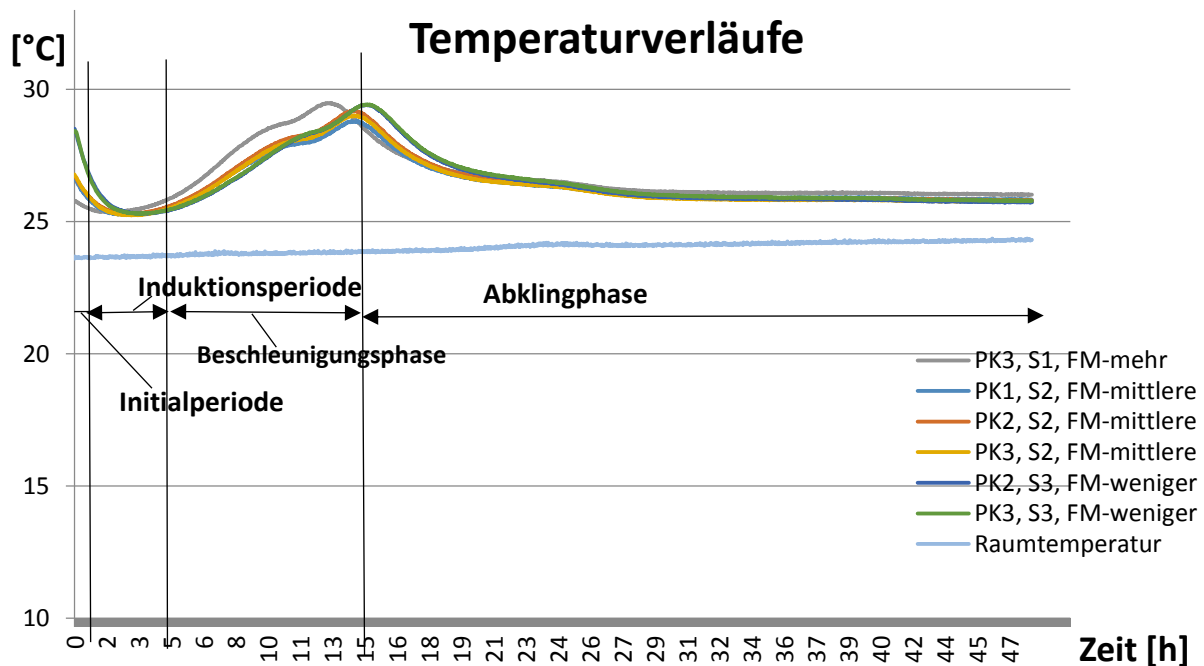


Abbildung 7.5-7: Die Temperaturverläufe im dritten Versuch

Es wurden auf der Abbildung 7.5-7 Zeitphasen beispielhaft für den dritten Probekörper der zweiten Serie markiert. Man sieht beispielweise, dass die Beschleunigungsphase zwischen fünfter und fünfzehnter Stunde stattfindet und in der Zeit die Temperatur des Betons steigt von etwa 25,5°C bis 29,0°C. Diese Temperaturverläufe unterscheiden sich kaum voneinander.

Beantwortung der Fragenstellung:

*Die Ergebnisse zeigen, dass das Fließmittel das autogene Schwinden deutlich verringert hat, was mit dem Stand des Wissens übereinstimmt.*

---

---

## 7.6 Versuch 4

*Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Microsilica?*

Die Mikrorisse, die im Beton auftreten, die eigentlich bei Zugabe von MS auftreten, sind vor allem auf das autogene Schwinden zurückzuführen. Das erhöhte autogene Schwinden bei Zugabe von MS kann auf:

- das chemische Schwinden bei ihrer puzzolanischen Reaktion und
- die Verfeinerung der Porenstruktur

zurückgeführt werden, die eine verstärkte Selbstaustrocknung und größere Kapillarspannungen zur Folge haben [29].

Somit spielt MS eine wesentliche Rolle, deshalb macht das es Sinn, den Einfluss des MS auf das Schwinden der Bindemittelmatrix zu überprüfen.

Im Rahmen der Untersuchung wurden zwei Mischungen, die sich durch Zugabe verschiedener Menge MS unterscheiden, vorbereitet. Die Bestandteile der Bindemittelmatrizen sind in der Tabelle 7.5.2-1 dargestellt.

Tabelle 7-8 Bestandteile der Serien im vierten Versuch.

| Bestandteile  | Bezeichnung                        | Serie 1    | Serie 2    |
|---------------|------------------------------------|------------|------------|
|               |                                    | MS-weniger | MS-mehr    |
|               |                                    | Masse [g]  | Masse [g]  |
| Wasser        | Wasser                             | 498        | 498        |
| Zement        | Cem I 52,5 N C <sub>3</sub> A-frei | 1659       | 1659       |
| Zusatzstoff 1 | ElkemMicrosilica<br>Grade 940-U    | <b>315</b> | <b>515</b> |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl                          | 830        | 830        |
| Fließmittel   | ACE 430                            | 75         | 75         |
| W/Z-Wert      |                                    | 0,30       | 0,30       |

### 7.6.1 Ergebnisse

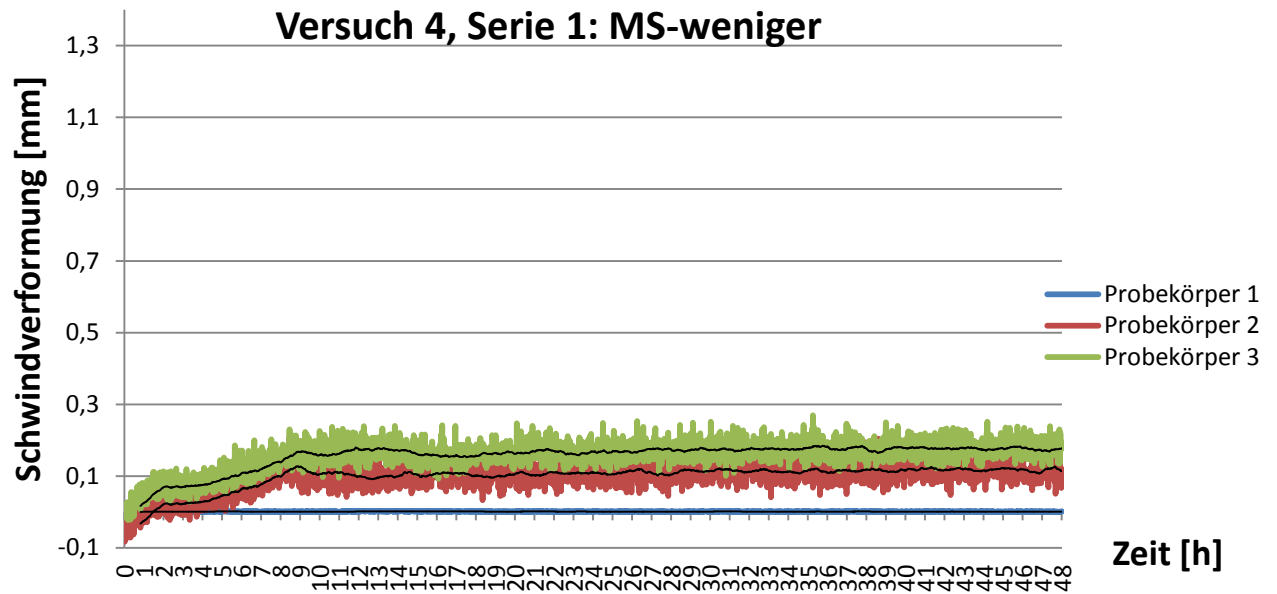


Abbildung 7.6-1: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (MS-weniger)

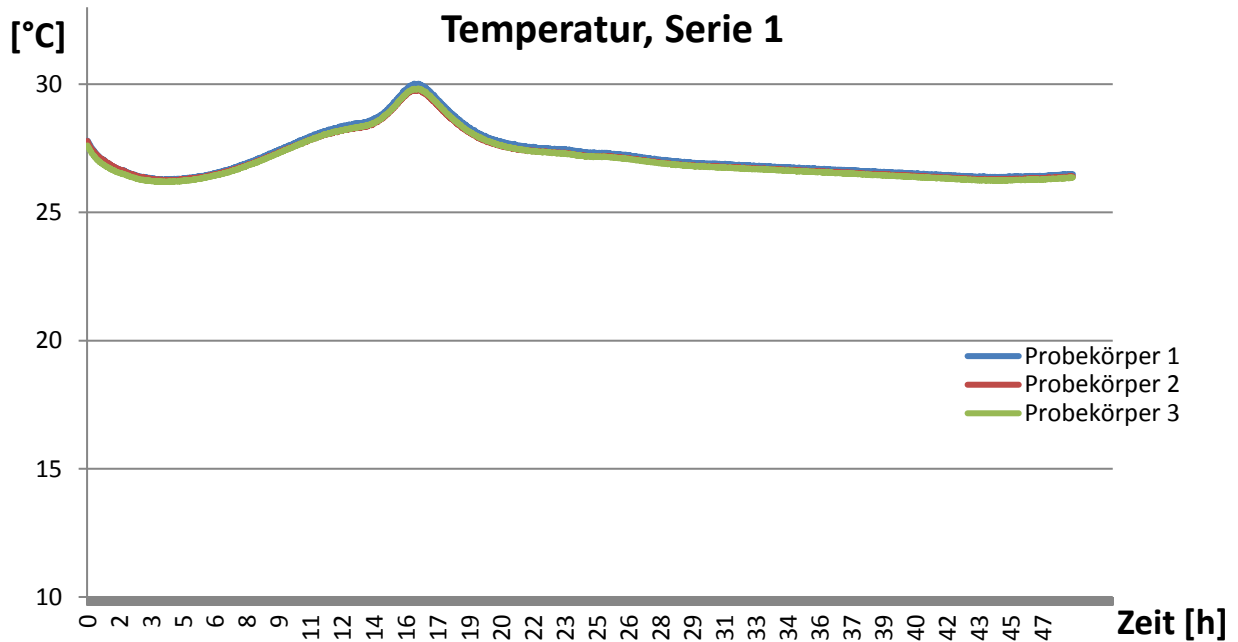


Abbildung 7.6-2: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (MS-weniger)

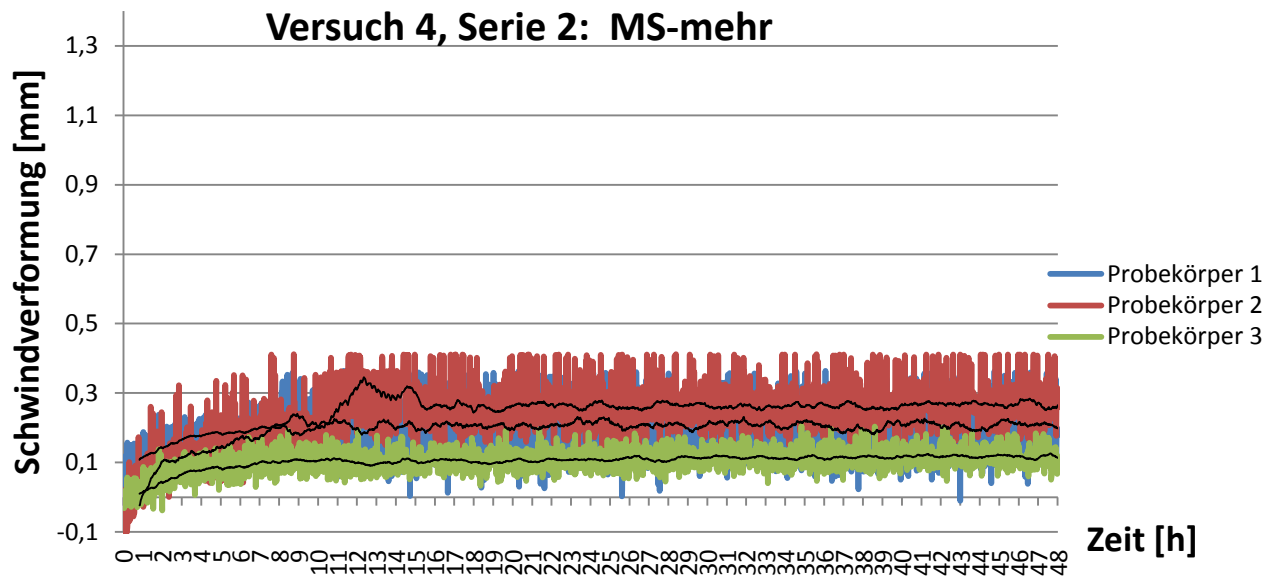


Abbildung 7.6-3: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (MS-mehr)

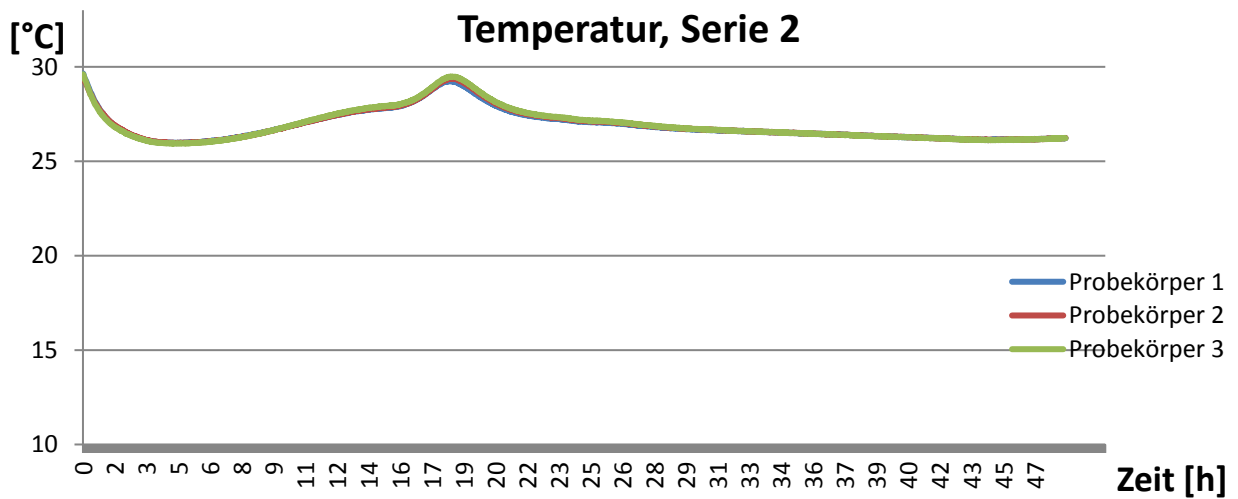


Abbildung 7.6-4: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (MS-mehr)

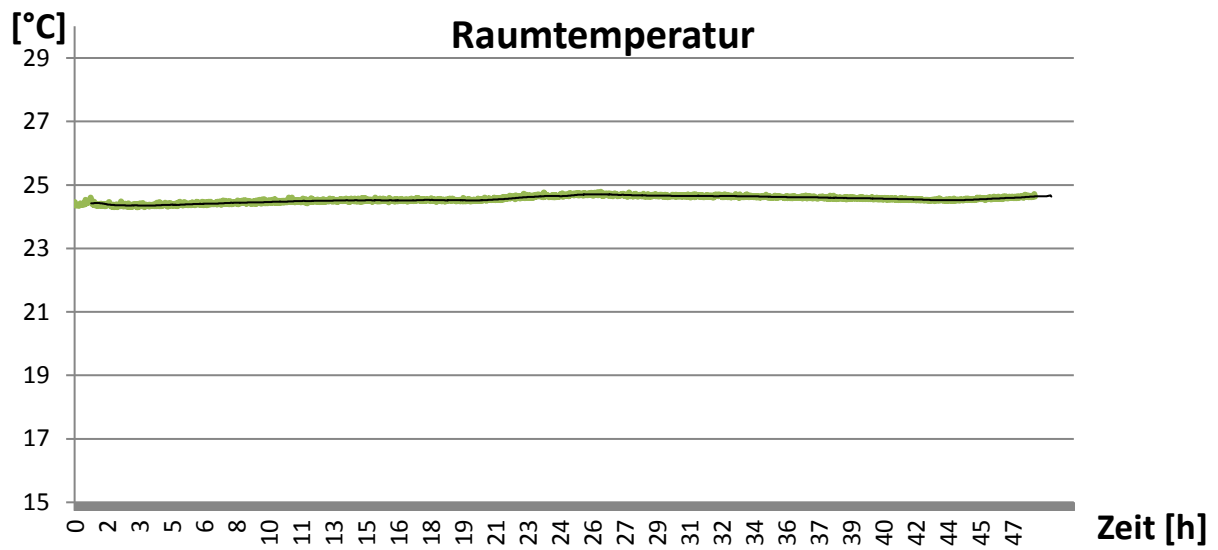


Abbildung 7.6.1-5: Die Temperatur des Raums während des vierten Versuchs

### 7.6.2 Bewertung

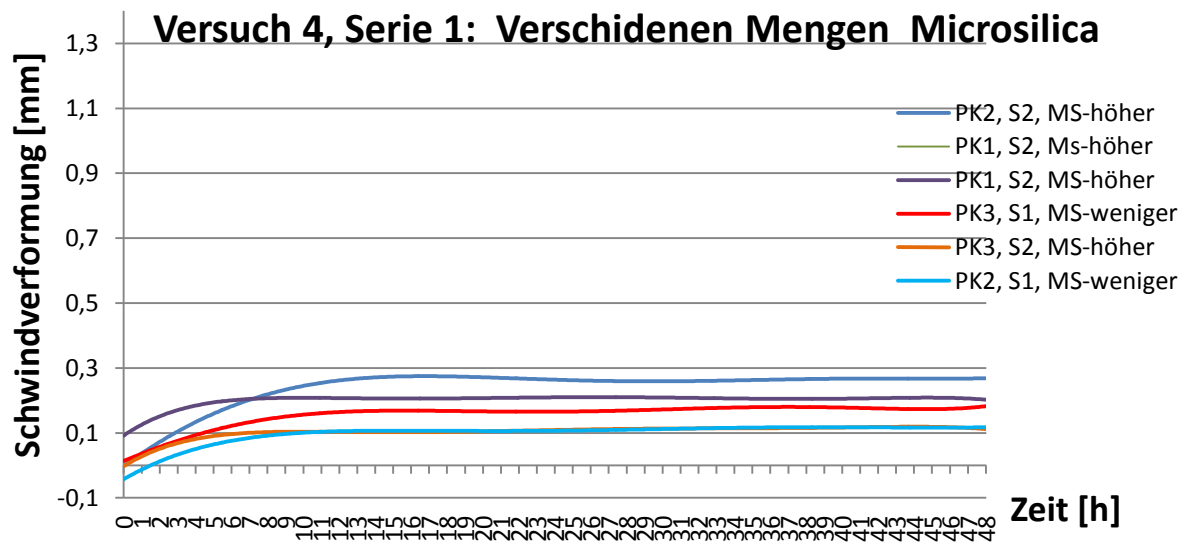


Abbildung 7.6-5: Schwindverformungen im vierten Versuch

Tabelle 7-9: Schwindmaße der Probekörper im vierten Versuch

| Versuch 4 | MS      | Schwindmaß [%] |           |           |
|-----------|---------|----------------|-----------|-----------|
|           |         | 3 Stunde       | 10 Stunde | 42 Stunde |
| PK2, S1   | weniger | 0.01           | 0.07      | 0.09      |
| PK3, S1   | weniger | 0.04           | 0.09      | 0.14      |
| PK1, S2   | mehr    | 0.09           | 0.12      | 0.18      |
| PK2, S2   | mehr    | 0.09           | 0.14      | 0.14      |
| PK3, S2   | mehr    | 0.03           | 0.07      | 0.09      |

Da in der ersten Serie im ersten Probekörper kein Schwinden gemessen wurde, wird angenommen, dass das Ergebnis nicht glaubwürdig ist und damit nicht in Betracht gezogen wird. Auf den ersten Augenblick ist sich zu erkennen, dass es in den ersten drei Stunden ein geringes Schwinden auftritt, was darauf zurückgeführt wird, dass puzzolanische Stoffe keine hydraulischen Eigenschaften haben. Zwei von drei Mischungen in der zweiten Serie weisen größer Schwinden als die Mischungen in der ersten Serie auf.

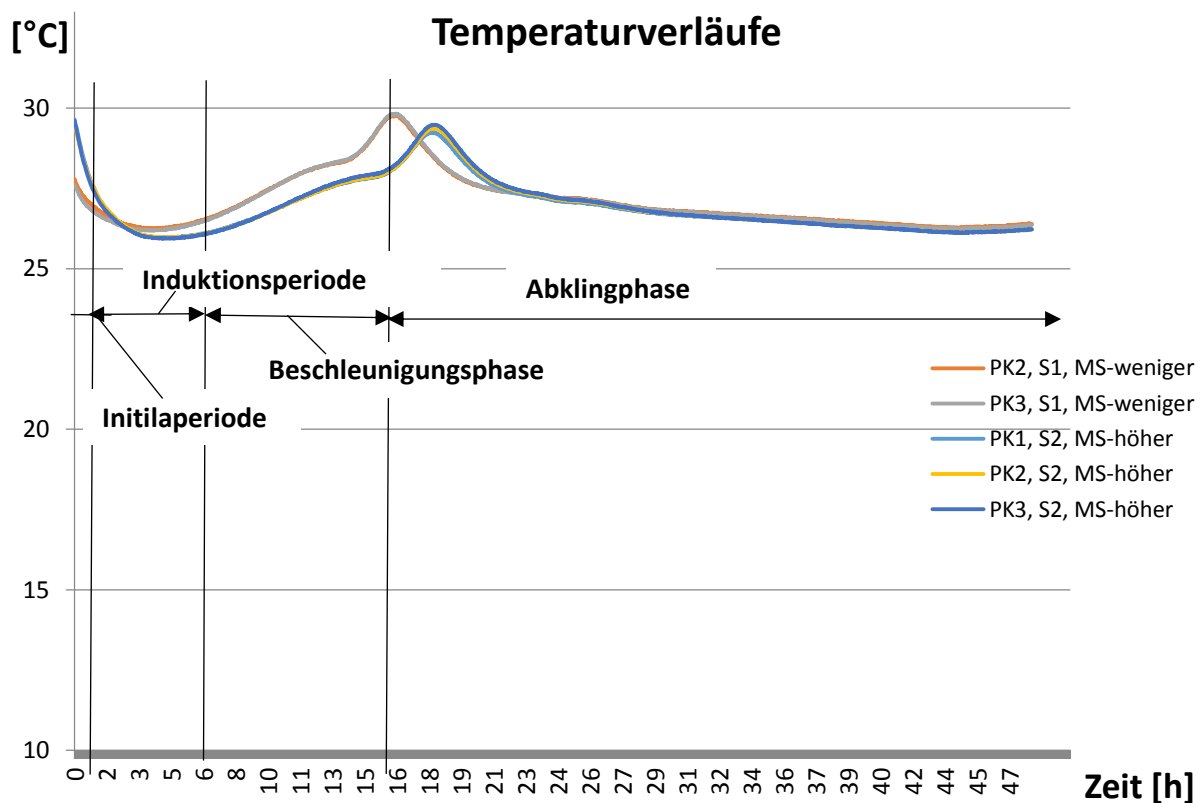


Abbildung 7.6-6: Die Temperaturverläufe im vierten Versuch



---

In der Abbildung 7.6-6 wurden die Temperaturverläufe der Mischungen für verschiedene Menge Microsilica dargestellt. Obwohl die Temperaturverläufe gleich in beiden Serien gleich sind, zeigt sich, dass in der Mischungen mit niedriger Menge MS die Temperaturen bis Beschleunigungsphase höher sind.

Beantwortung der Fragenstellung:

*Das Schwinden ist deutlich nur in den ersten zehn Stunden zu erkennen. Es gibt zwischen dem Schwinden des Betons in der ersten und in der zweiten Serie kaum einen Unterschied, was darauf hinweist, dass Microsilica keinen oder kaum Einfluss auf das Schwinden hat. Anhand der Ergebnisse kann nur vermutet werden, dass je mehr Microsilica es gibt, desto größer das Schwinden in den erten zehn Stunden ist.*

*Die Ergebnisse stimmen mit Stand des Wissens überein. Laut vorherrschenden Literatur führt die Zugabe von Microsilica zu größeren Schwindverformungen. Microsilica ist etwa 100-mal feiner als Zement. Der Anteil an reaktivem  $\text{SiO}_2$  liegt bei über 90 % M-%. Das  $\text{SiO}_2$  reagiert mit dem als primärs Hydratationsprodukt gebildeten  $\text{CaOH}_2$ , und es bilden sich draus weitere, festigkeitssteigerenden CSH-Phasen.[1].*

*Durch eine Zugabe von Microsilica in den ersten 24 Sttunden der Hydratation ist das autogene und chemische Schwinden besonders stark ausgeprägt.*

---

## 7.7 Versuch 5

Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Quarzmehl ?

Tabelle 7-10: Bestandteile der Mischungen im fünften Versuch

| Bestandteile  | Bezeichnung                        | Serie 1                 | Serie 2              | Serie 3                   |
|---------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
|               |                                    | QM-weniger<br>Masse [g] | MS-mehr<br>Masse [g] | MS-viel mehr<br>Masse [g] |
| Wasser        | Wasser                             | 498                     | 498                  | 498                       |
| Zement        | Cem I 52,5 N C <sub>3</sub> A-frei | 1659                    | 1659                 | 1659                      |
| Zusatzstoff 1 | ElkemMicrosilica<br>Grade 940-U    | 415                     | 415                  | 415                       |
| Zusatzstoff 2 | Quarzmehl                          | <b>730</b>              | <b>930</b>           | <b>1030</b>               |
| Fließmittel   | ACE 430                            | 90                      | 90                   | 90                        |
| W/Z-Wert      |                                    | 0,30                    | 0,30                 | 0,30                      |

### 7.7.1 Ergebnisse

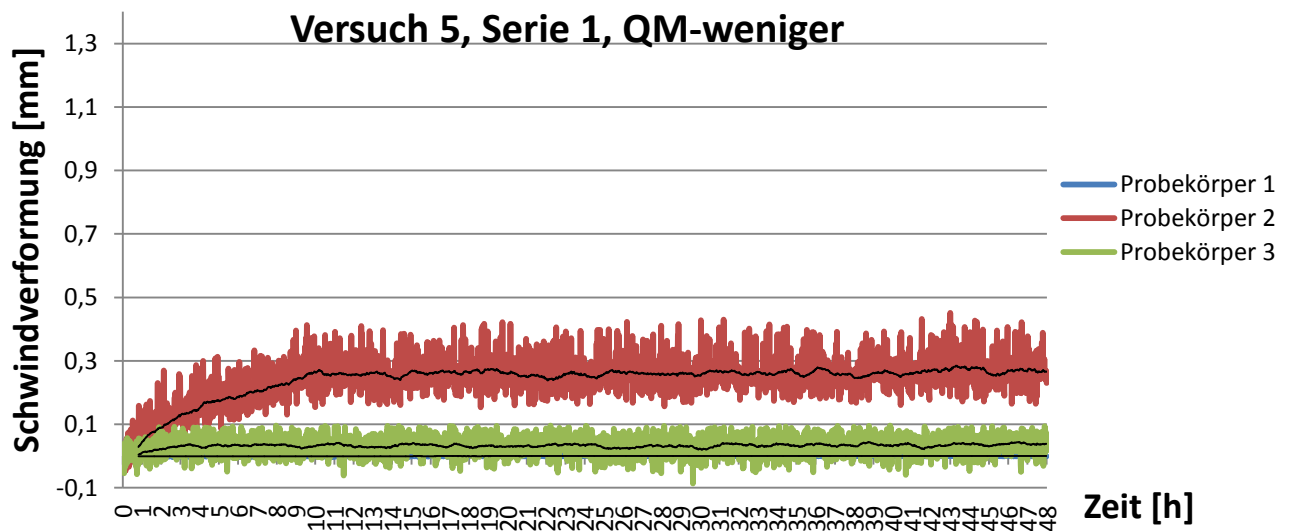


Abbildung 7.7.1-1: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (QM-weniger)

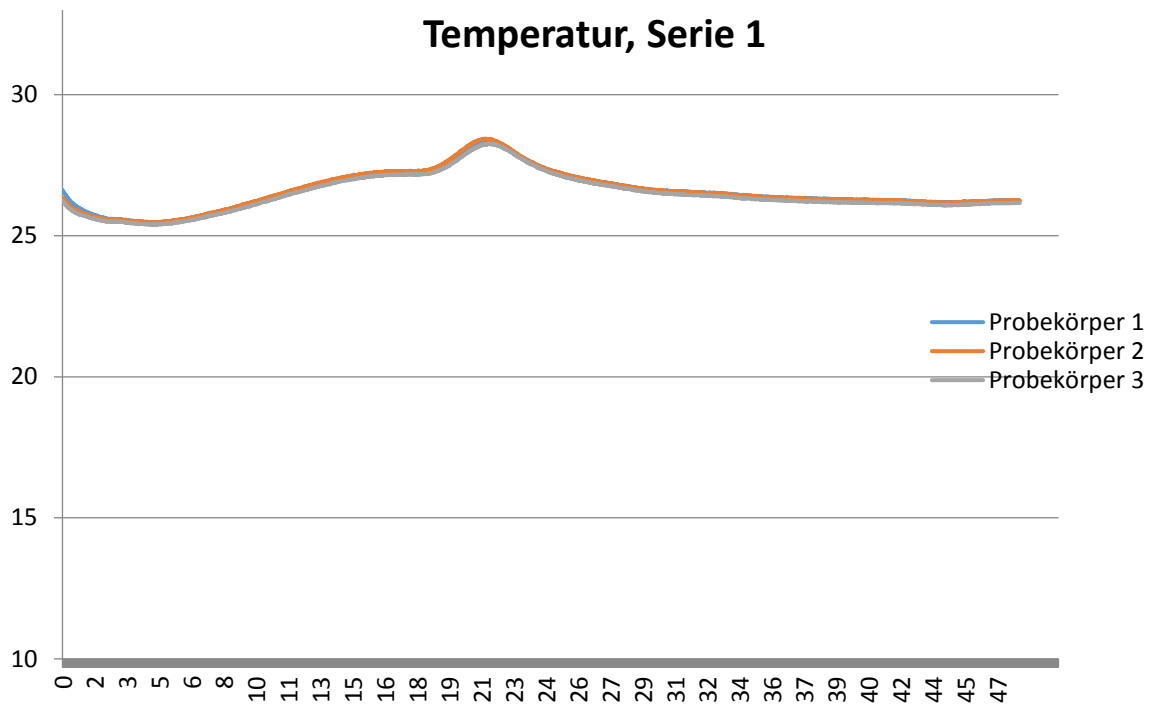


Abbildung 7.7.1-2: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (QM-weniger)

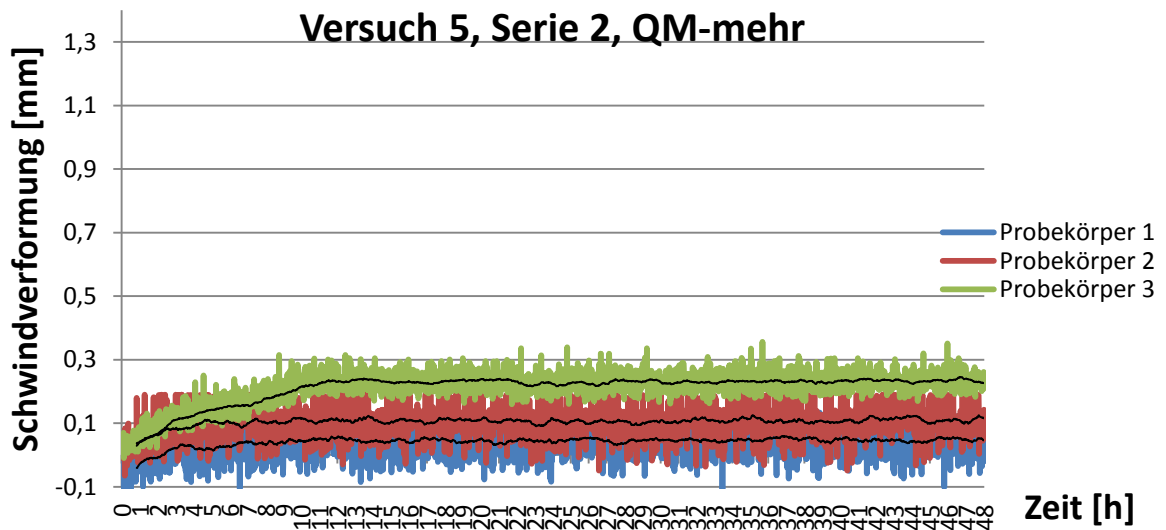


Abbildung 7.7.1-3: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (QM- mehr)

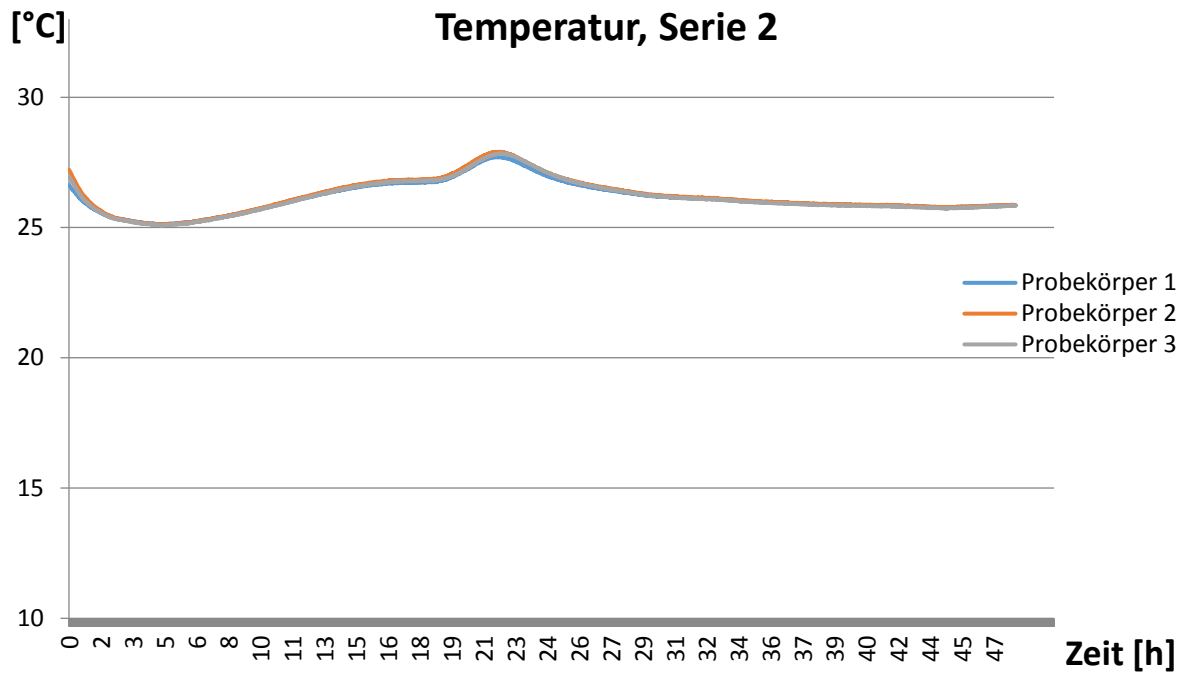


Abbildung 7.7.1-4: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (QM-mehr)

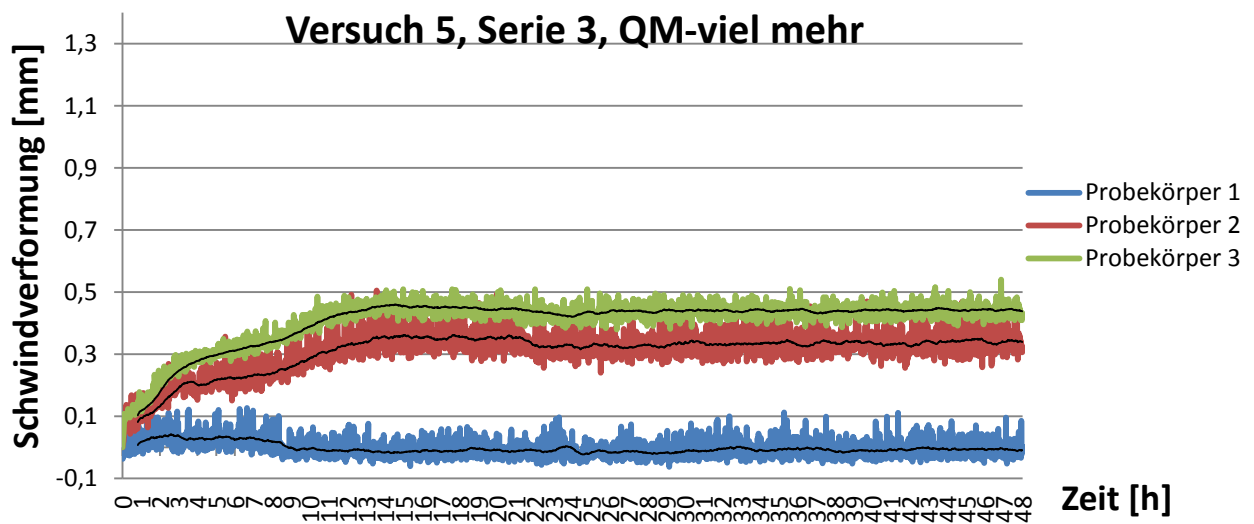


Abbildung 7.7.1-5: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (QM-viel mehr)

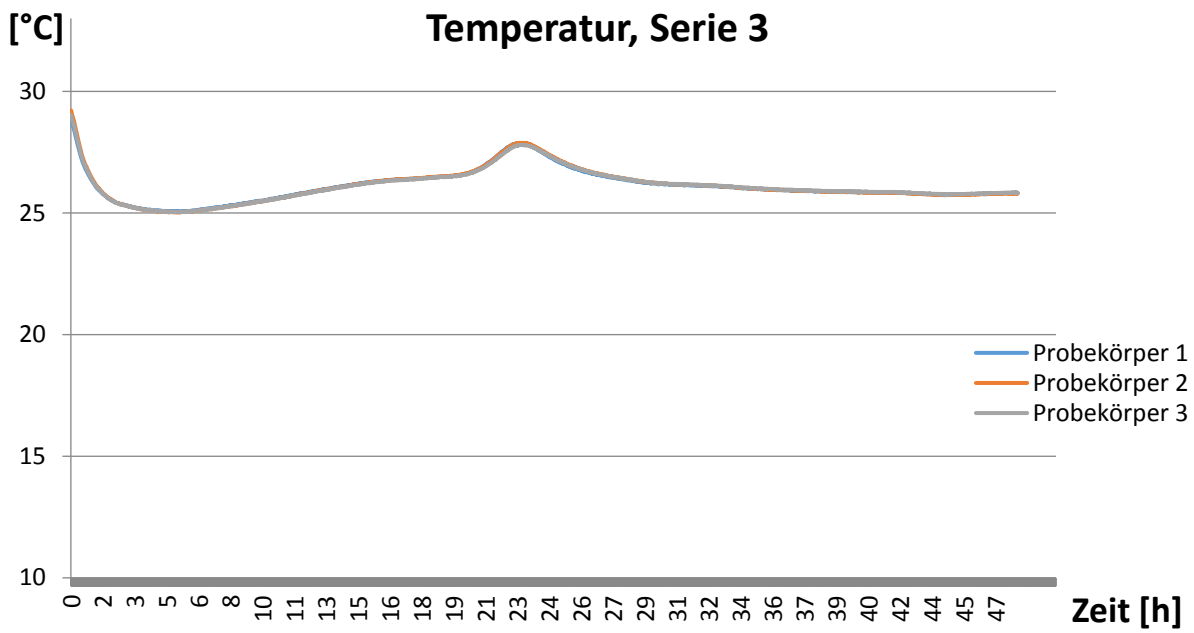


Abbildung 7.7.1-6: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (QM-viel mehr)

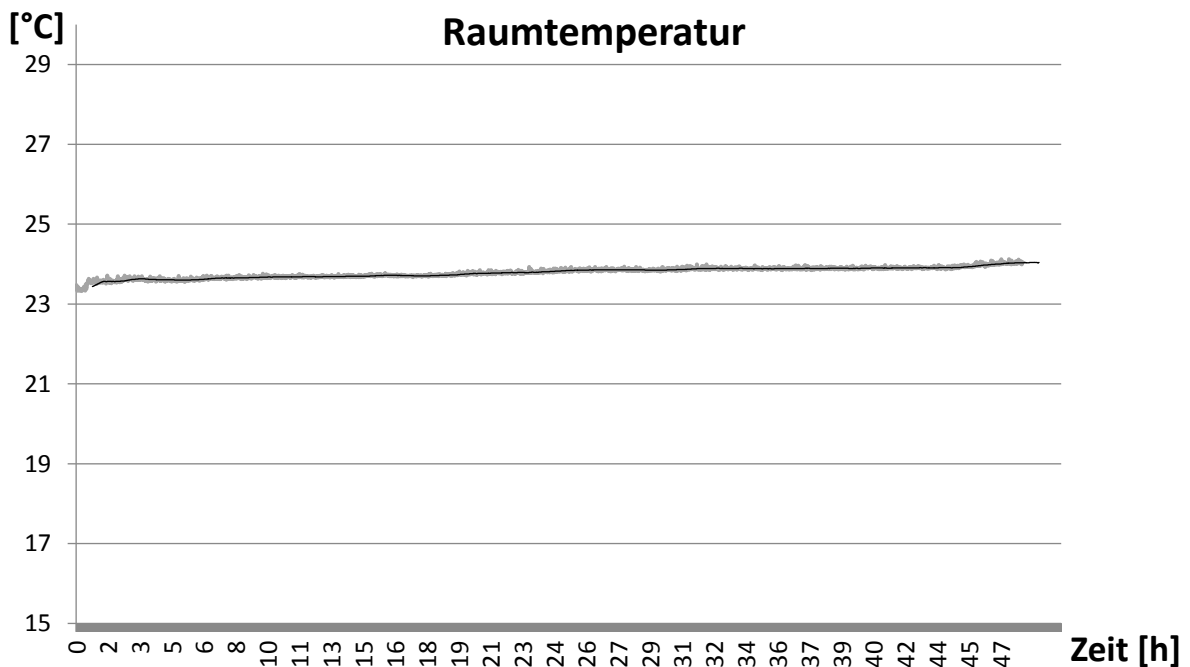


Abbildung 7.7.1-7: Die Temperatur des Raums während des fünften Versuchs

### 7.7.2 Bewertung

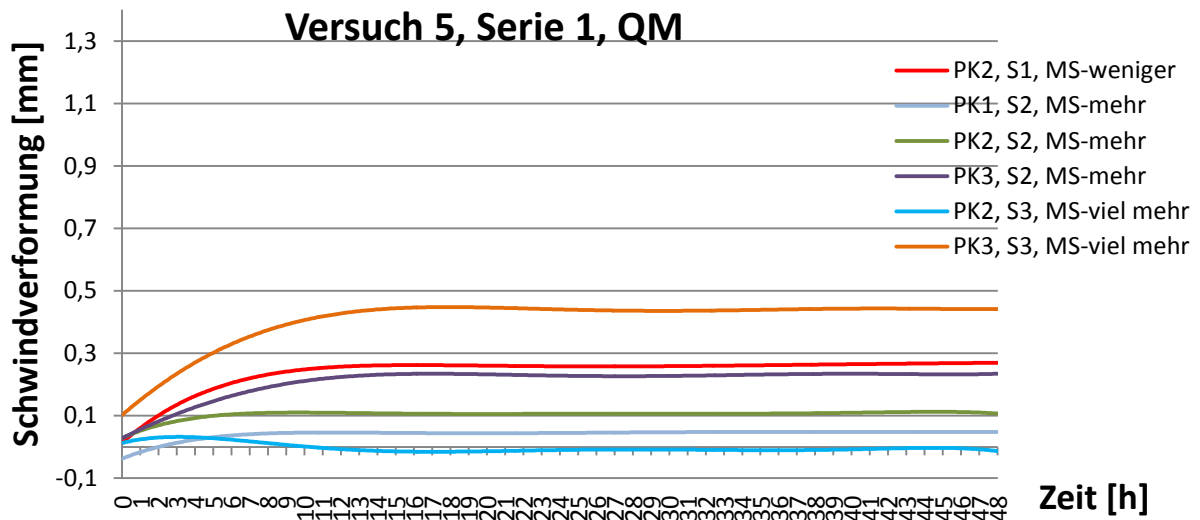


Abbildung 7.7-1: Schwindverformungen im fünften Versuch

Tabelle 7-11: Schwindmaße der Probekörper im fünften Versuch

| Versuch 5 | MS        | Schwindmaß [%] |           |           |
|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|
|           |           | 3 Stunde       | 10 Stunde | 42 Stunde |
| PK2, S1   | weniger   | 0.09           | 0.14      | 0.27      |
| PK1, S2   | mehr      | 0.00           | 0.01      | 0.01      |
| PK2, S2   | mehr      | 0.06           | 0.09      | 0.11      |
| PK3, S2   | mehr      | 0.07           | 0.14      | 0.16      |
| PK2, S2   | viel mehr | 0.12           | 0.21      | 0.26      |
| PK3, S2   | viel mehr | 0.16           | 0.28      | 0.28      |

Die Abbildung 7.7-1 zeigt die unterschiedliche Graphen an. Das Schwinden ist es deutlich bis zur circa zehnter Stunde in der Anfangsphase der Hydratation aufgetreten. Dann gibt es fast kein Schwinden mehr.

Die Mischung im PK2 in der Serie 3, wo am größte Menge QM vorliegt, zeigt beinahe keine Volumenabnahme, sondern Quellen, deshalb ist diese Mischung schwer zu bewerten. Die Mischung im PK3 in der Serie 3 zeigt die größte Volumenabnahme. Der Volumen nimmt gleichmäßig bis circa dreizehnter Stunde an und dann gibt es fast kein Schwinden. Laut der Tabelle 7.7.2-1 beträgt das Schwindmaß in der Serie 3 0,28%. Die Gesamtverformung der Mischung nach 42 Stunden beträgt 0,28%

Bei der Serie 2 gibt es drei Diagramme, die in der ersten zehn Stunden verschiedene Volumenabnahmen zeigen. Danach ist es fast keine Schwindverformung zu beobachten.

Schlussendlich gibt es nach 42 Stunden, ausgehend von der Ausgangslänge, eine Verkürzung von 0,11% und 0,16%.

In der ersten Serie gibt es, genau so wie in anderen Serien, ziemlich große Volumenabnahme in der ersten zehn Stunden. Nach 42 Stunden ergibt sich in Summe ein Schwindmaß von 0,27%.

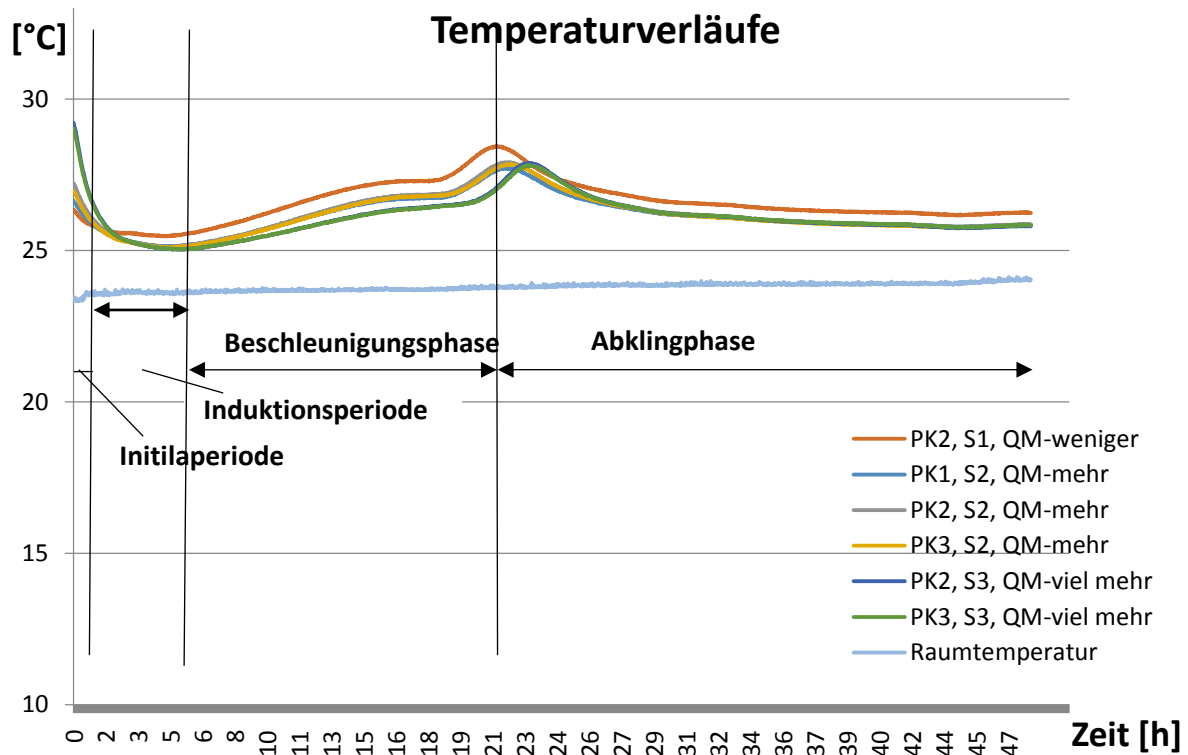


Abbildung 7.7-2: Die Temperaturverläufe im fünften Versuch

Es hat sich auf der Abbildung 7.7-2 sehen, dass die höchste Hydratationstemperatur in der Mischung mit der kleinsten Dosierung des Quarzmehls ist. Die Unterschiede zwischen den Temperaturen sind jedoch fast gleich.

Beantwortung der Fragenstellung

*Bei diesen Versuchen sind die Ergebnisse sehr unterschiedlich. Die Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass bei größer Zugabe von Quarzmehl die Schwindverformungen etwas höher sind.*

*Laut der Literatur gehört Quarzmehl zu den inaktiven Zusatzstoffen. Sie reagieren weder mit Zement noch mit Wasser. Deswegen ist die Hydratation dadurch nicht beeinflusst [38].*

*Die Ergebnisse des Versuchs stimmen jedoch mit den Ergebnissen aus der Arbeit [38] überein.*

---



---

## 7.8 Versuch 6

*Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Quarzsand ?*

Tabelle 7-12: Bestandteile der Mischungen im sechsten Versuch

| Bestandteile           | Bezeichnung                        | Serie 1                | Serie 2                 | Serie 3              |
|------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
|                        |                                    | QS-normal<br>Masse [g] | QS-weniger<br>Masse [g] | QS-mehr<br>Masse [g] |
| <b>Wasser</b>          | Wasser                             | 240                    | 240                     | 240                  |
| <b>Zement</b>          | Cem I 52,5 N C <sub>3</sub> A-frei | 800                    | 800                     | 800                  |
| <b>Zusatzstoff 1</b>   | ElkemMicrosilica<br>Grade 940-U    | 200                    | 200                     | 200                  |
| <b>Zusatzstoff 2</b>   | Quarzmehl                          | 400                    | 400                     | 400                  |
| <b>Gesteinskörnung</b> | QS 0,1-0,5 mm                      | <b>1060</b>            | <b>760</b>              | <b>1360</b>          |
| <b>Fließmittel</b>     | ACE 430                            | 75.5                   | 70                      | 90                   |
| <b>W/Z</b>             |                                    | 0,30                   | 0,30                    | 0,30                 |

### 7.8.1 Ergebnisse

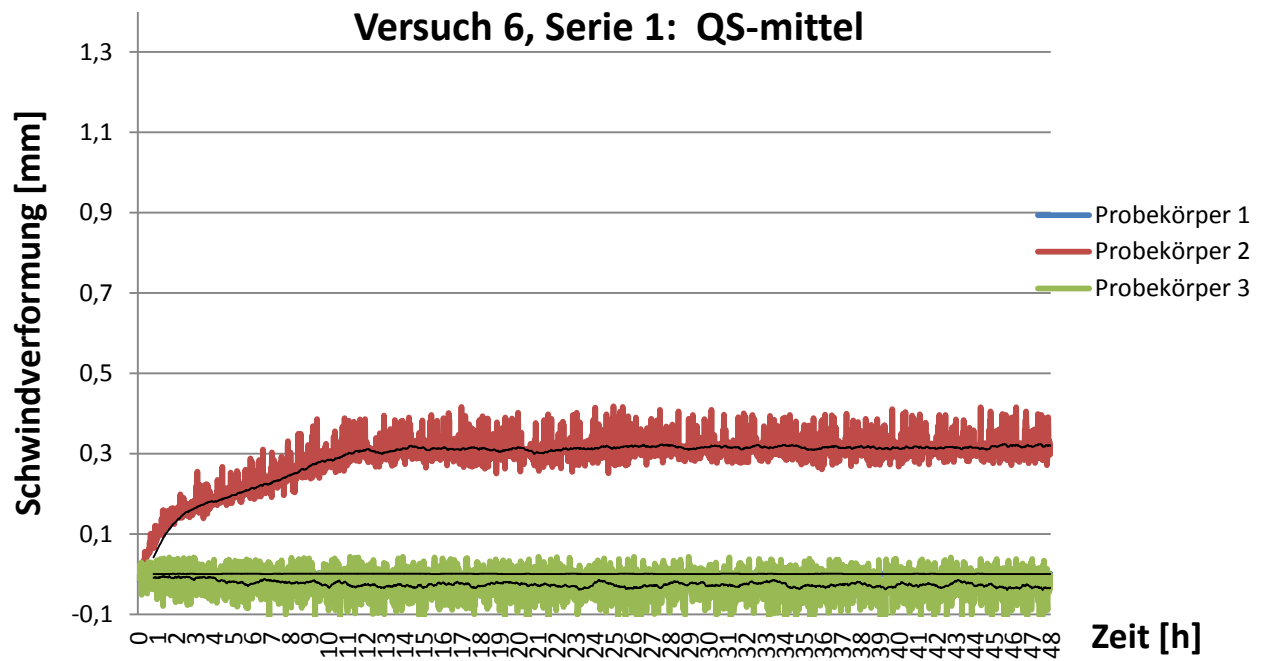


Abbildung 7.8-1: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (QS-mittel)

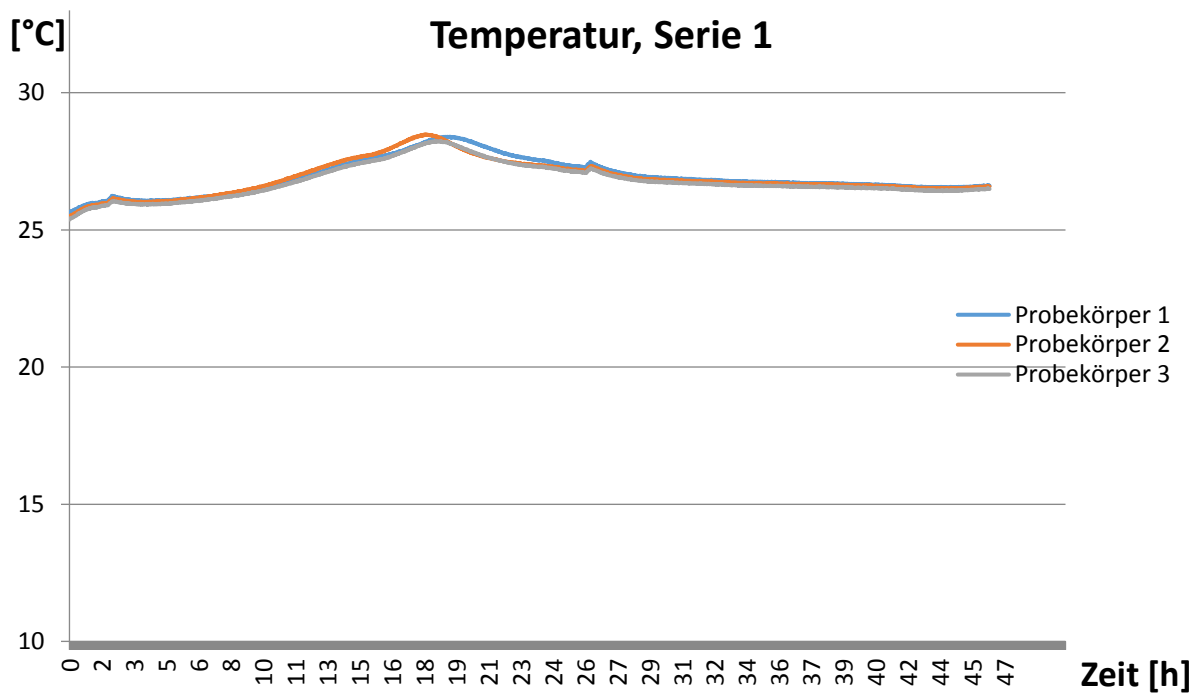


Abbildung 7.8-2: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (QS-mittlere)

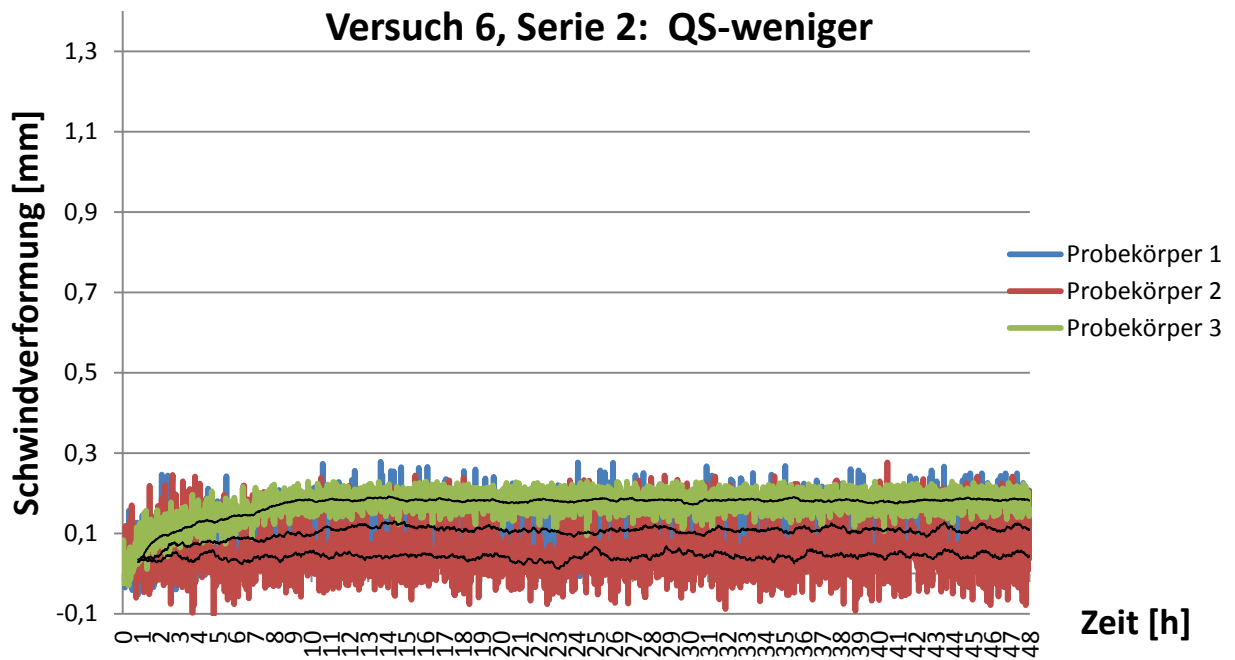


Abbildung 7.8-3: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (QS-weniger)

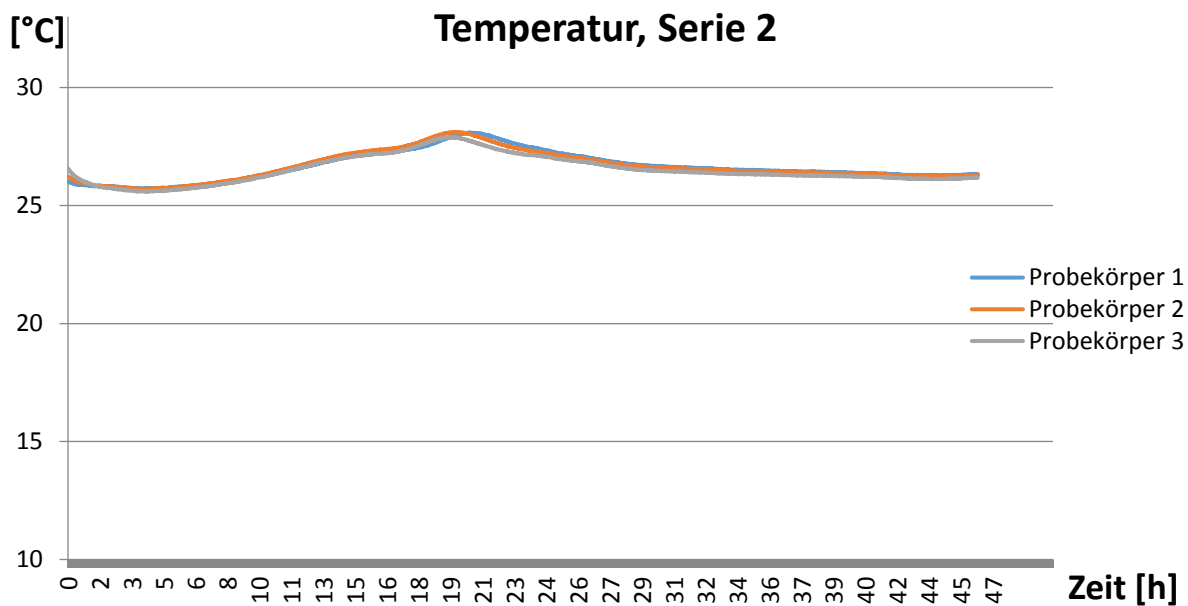


Abbildung 7.8-4: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (QS-weniger)

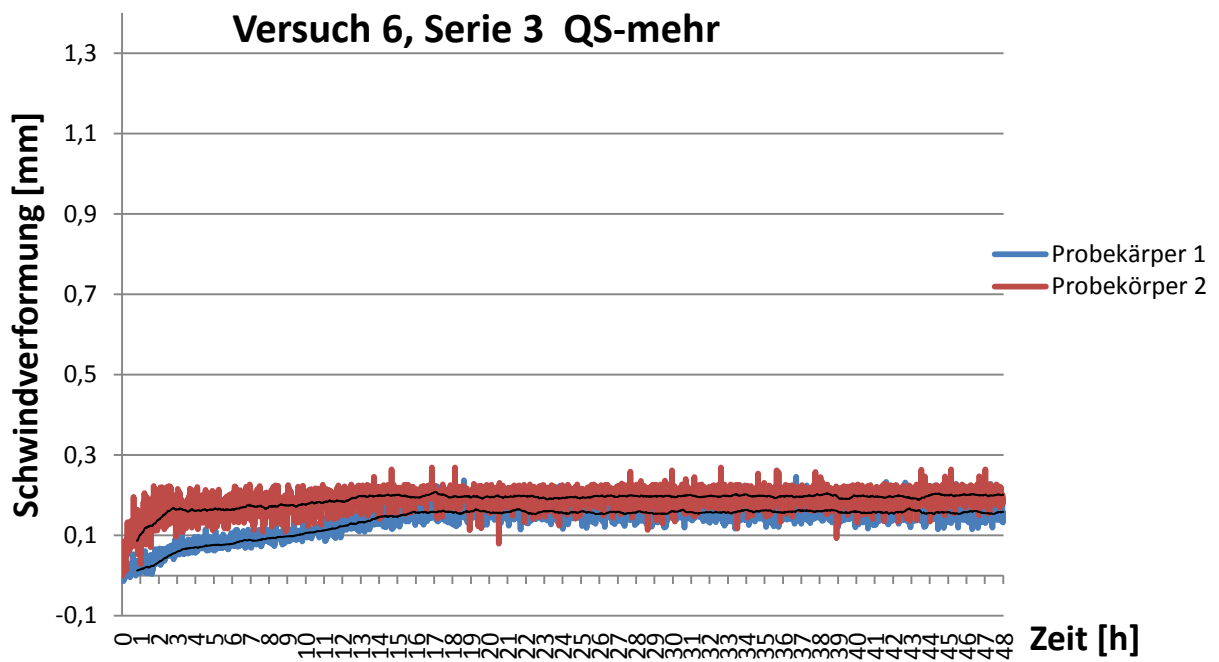


Abbildung 7.8-5: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (QS-mehr)

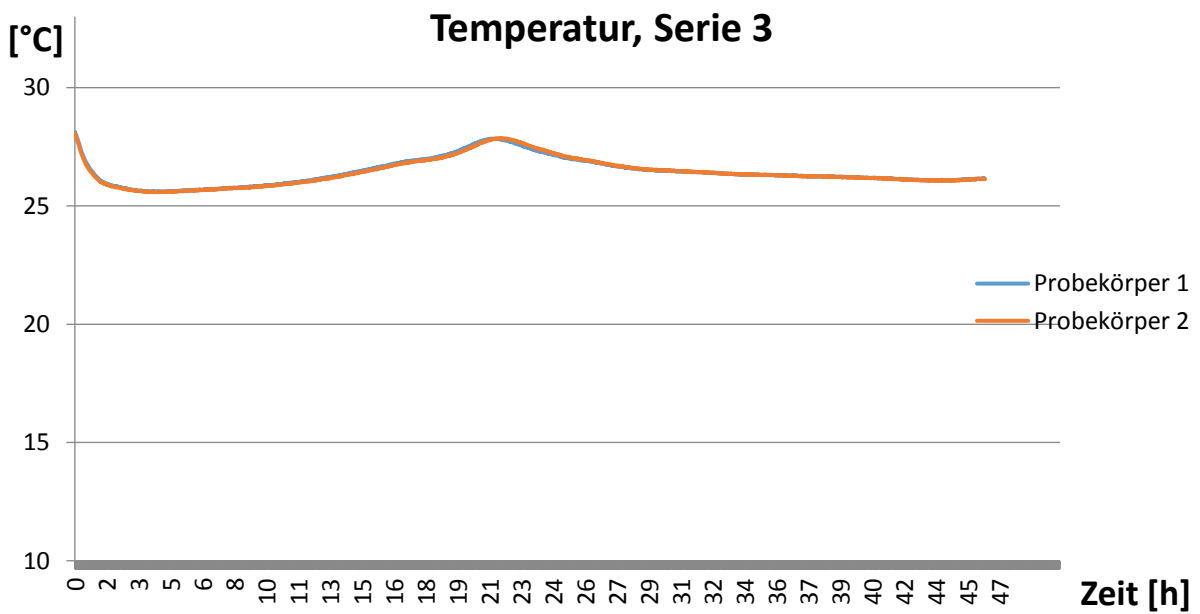


Abbildung 7.8-6: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (QS-mehr)

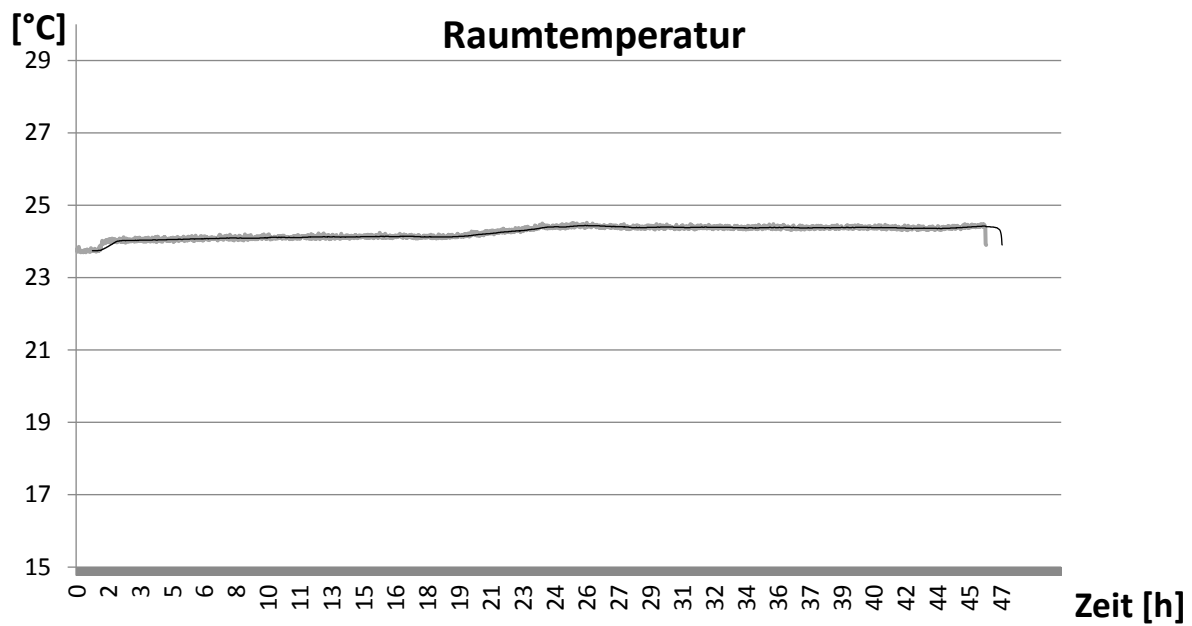


Abbildung 7.8-7: Die Temperatur des Raums während des sechsten Versuchs

### 7.8.2 Bewertung

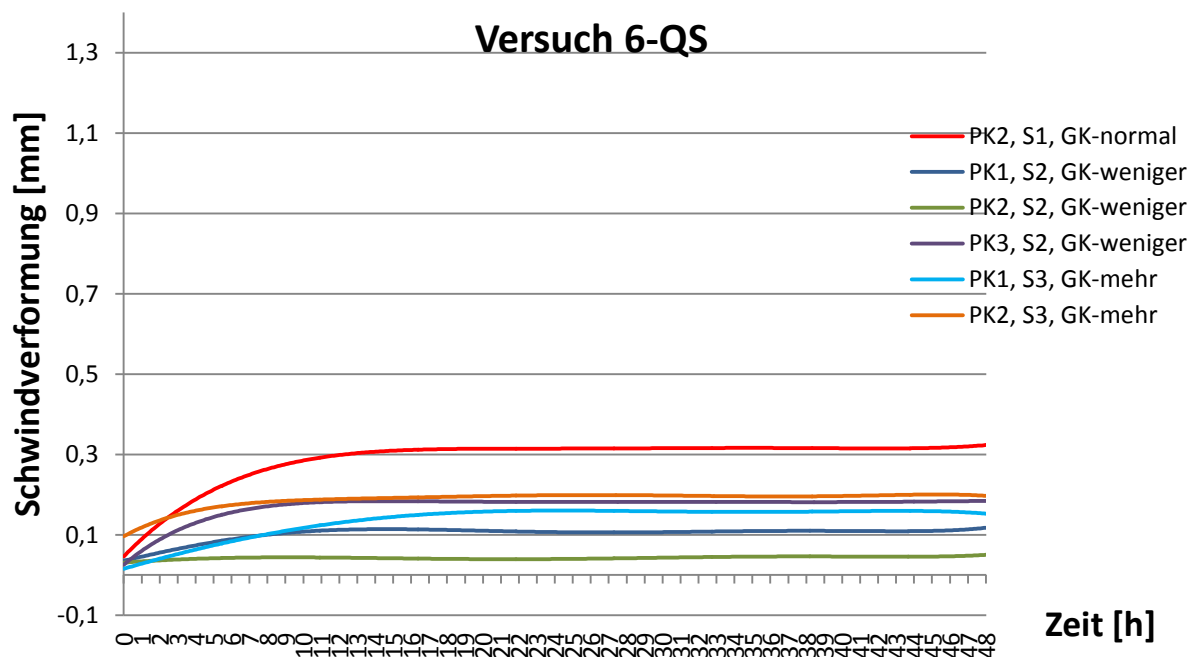


Abbildung 7.8-8: Zusammenfassung Versuch 6

Tabelle 7-13: Schwindmaße der Probekörper im sechsten Versuch

| Versuch 6 | QS      | Schwindmaß [%] |           |           |
|-----------|---------|----------------|-----------|-----------|
|           |         | 3 Stunde       | 10 Stunde | 42 Stunde |
| PK2, S1   | mittel  | 0.10           | 0.19      | 0.19      |
| PK1, S2   | weniger | 0.05           | 0.06      | 0.05      |
| PK2, S2   | weniger | 0.03           | 0.03      | 0.03      |
| PK3, S2   | weniger | 0.07           | 0.11      | 0.12      |
| PK1, S3   | mehr    | 0.04           | 0.08      | 0.09      |
| PK2, S3   | mehr    | 0.09           | 0.10      | 0.14      |

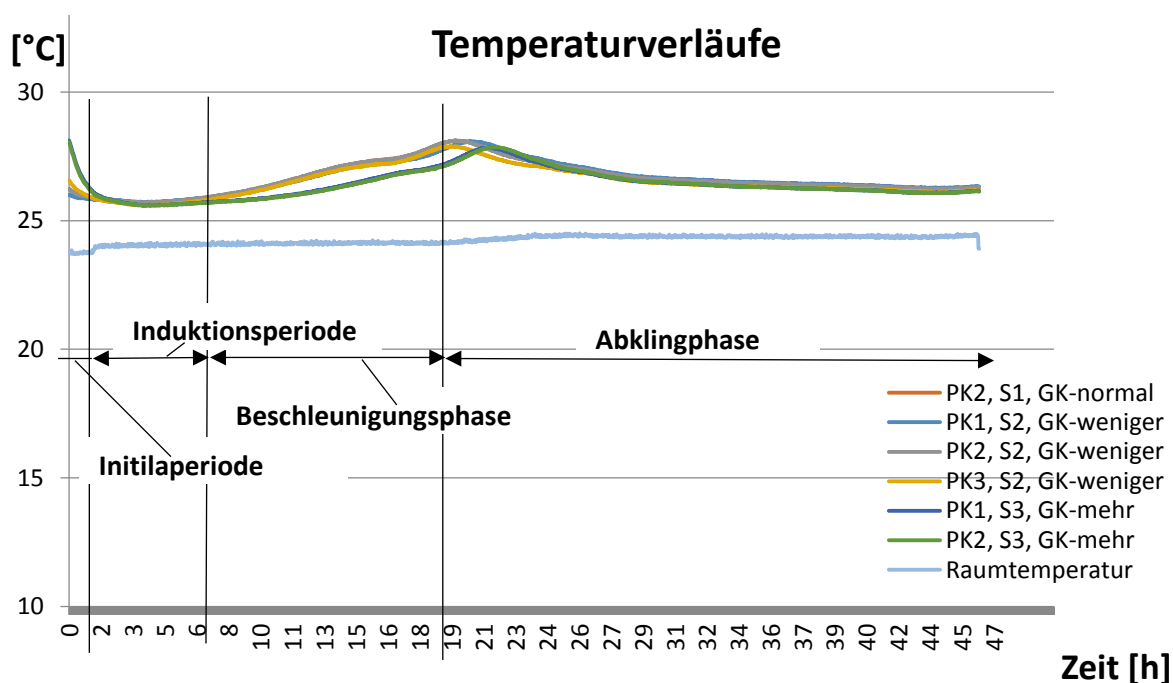


Abbildung 7.8-9 Die Temperaturverläufe im sechsten Versuch.

Bei der Serie 1 (QS - "mittlere Menge") kommt es in der ersten zehn Stunden zur größten Volumenabnahme. Danach ist es fast kein Schwinden zu erkennen. Nach 42 Stunden beträgt das Schwindmaß 0,19%.

Die Volumenabnahme in der zweiten Serie (weniger GK) steigt es zwar regelmäßig bis zur circa zehnten Stunde, aber ist nicht so groß, wie in der ersten Serie. Darüber hinaus kommt es bei der Mischung im Probekörper weder zur Volumenabnahme noch zum Quellen. Deshalb kann es nicht betrachtet werden. Nach 42 Stunden betragen die Schwindmaße laut der Tabelle 7.8.2-1 0,05%, 0,03% und 0,12%.

Die Verläufe in der dritten Serie sind beinahe gleich wie in der zweiten Serie. Das Schwinden ist nur in der ersten drei Stunden zu sehen. Danach ist es gar kein Schwinden zu erkennen.

Beantwortung der Fragenstellung

*Anhand der Ergebnisse ist es schwer eine Aussage zu formulieren, weil die Mischungen sehr ähnliche Schwindverformungen haben und die Volumenabnahme der Mischung mit "normaler Menge" des Quarzsandes größer als mit erhöhter und niedriger Dosierung des Quarzsandes ist. Deshalb kann es nur vorsichtig gesagt werden, dass je mehr Quarzsand sich (0,1 - 0,5 mm) in einer Mischung befindet, desto kleiner die Volumenabnahme der Mischung ist.*

---

## 7.9 Versuch 7

*Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei Zugabe verschiedener Fasern?*

Da die UHCP ein sprödes Bruchversagen aufweist, werden oft Fasern dazu gegeben, um die Rissbildung infolge Zwangsbeanspruchung zu vermeiden und einer ausreichender Materialduktilität zu gewährleisten.

In diesem Versuch wurde überprüft, welcher Einfluss auf das Schwinden des UHCPs mit Fasern hat.

Es wurden drei verschiedene Fasern überprüft:

- Kürzere Polypropylenfasern(PP)
- Längere Polypropylenfasern (PP)
- Stahlfasern

Die verwendeten Stahlfasern weisen eine Zugfestigkeit von etwa 200 MPa auf. Sie haben einen Durchmesser von etwa 0,1 mm und Längen 6mm.

PP-Fasern weisen eine hohe Alkalibeständigkeit und Zugfestigkeiten bis 700 MPa sowie Elastizitätsmodul zwischen 7 und 18 GPa auf. [1]

Tabelle 7-14 Bestandteile der Mischungen im siebten Versuch.

| Bestandteile     | Bezeichnung                        | Serie 1                | Serie 2                | Serie 3                  |
|------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
|                  |                                    | PP-kürzer<br>Masse [g] | PP-länger<br>Masse [g] | Stahlfasern<br>Masse [g] |
| Wasser           | Wasser                             | 498                    | 498                    | 498                      |
| Zement           | Cem I 52,5 N C <sub>3</sub> A-frei | 1659                   | 1659                   | 1659                     |
| Zusatzstoff<br>1 | ElkemMicrosilica<br>Grade 940-U    | 415                    | 415                    | 415                      |
| Zusatzstoff<br>2 | Quarzmehl                          | 730                    | 930                    | 1030                     |
| Zusatzstoff<br>3 | Faser                              | <b>1.59</b>            | <b>1.59</b>            | <b>158.60</b>            |
| Fließmittel      | ACE 430                            | 90                     | 90                     | 90                       |



### 7.9.1 Ergebnisse

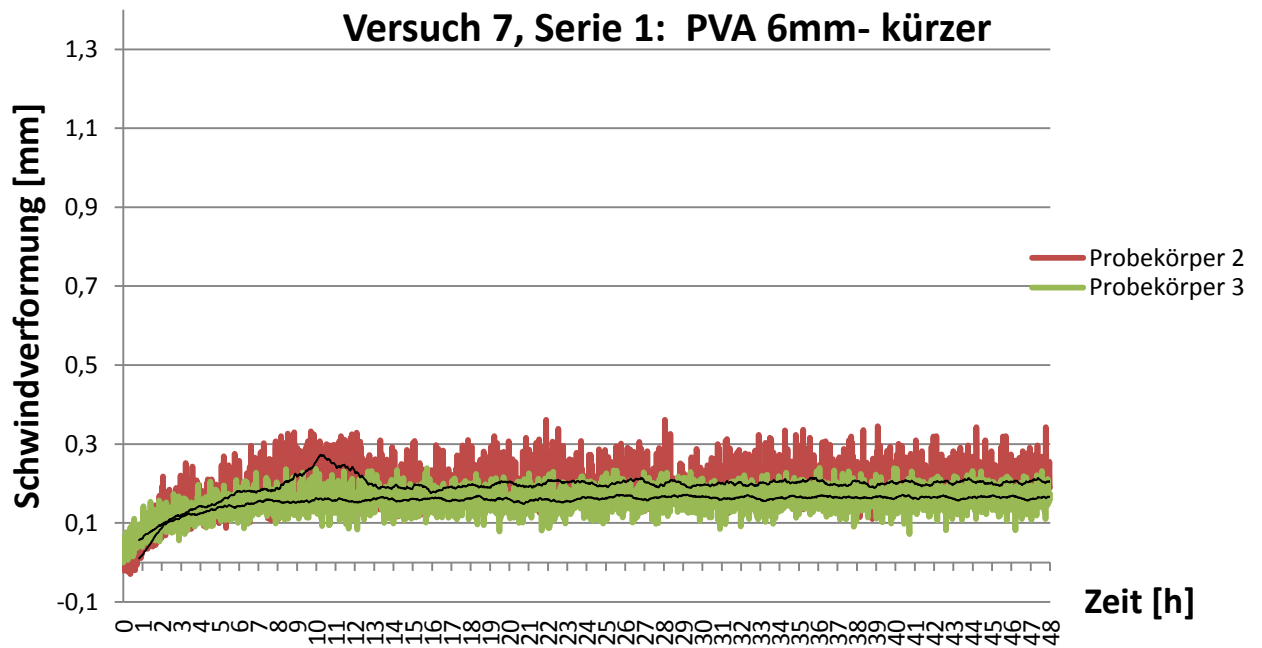


Abbildung 7.9-1: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (PP-kürzer)

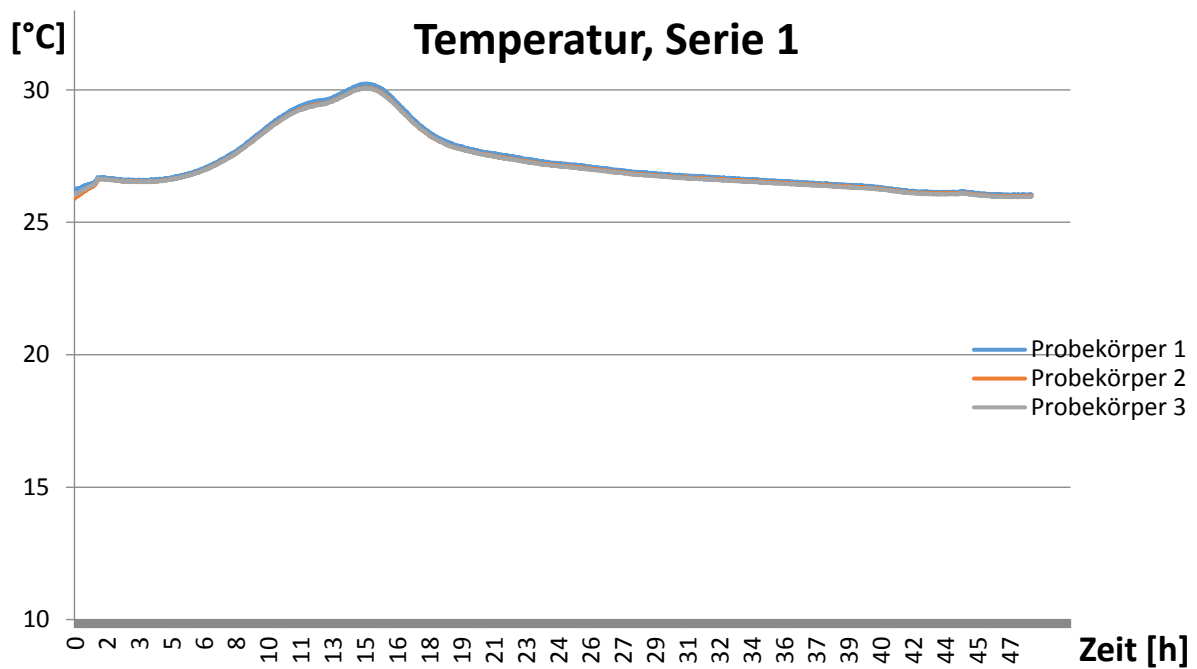


Abbildung 7.9-2: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (PP-kürzer)

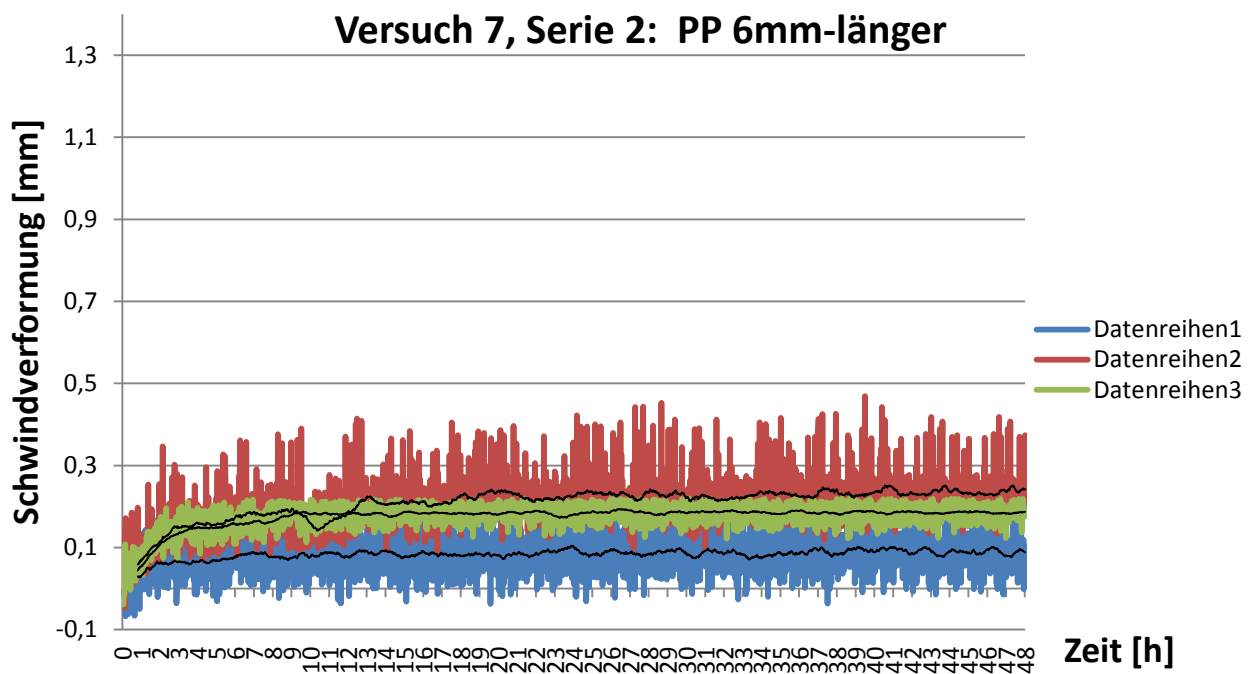


Abbildung 7.9-3: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (PP-länger)

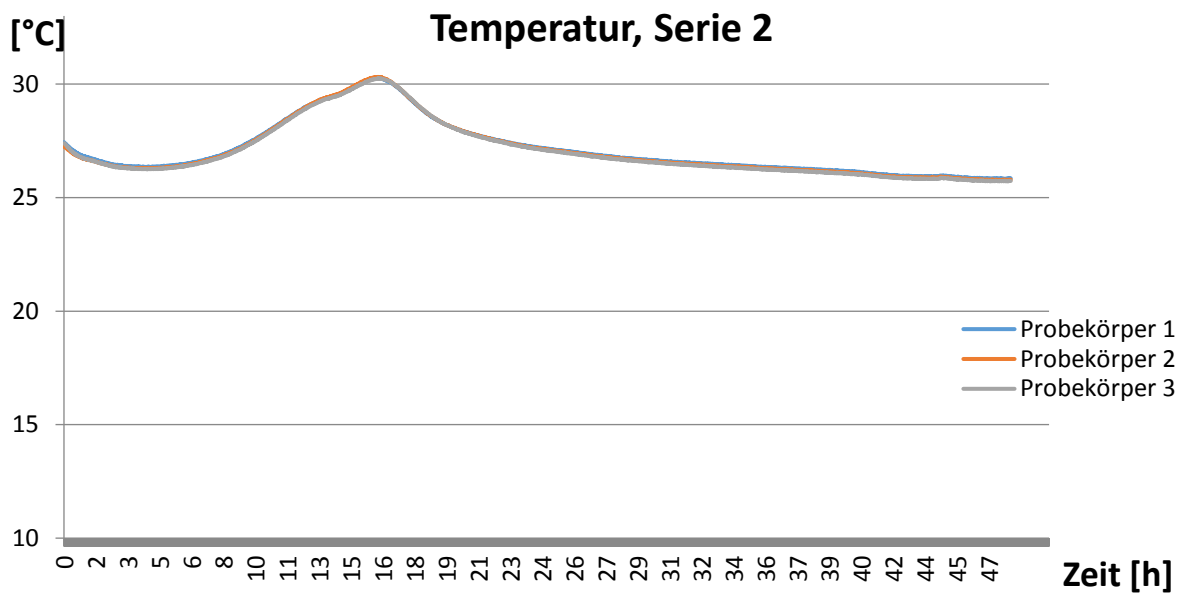


Abbildung 7.9-4: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (PP-länger)

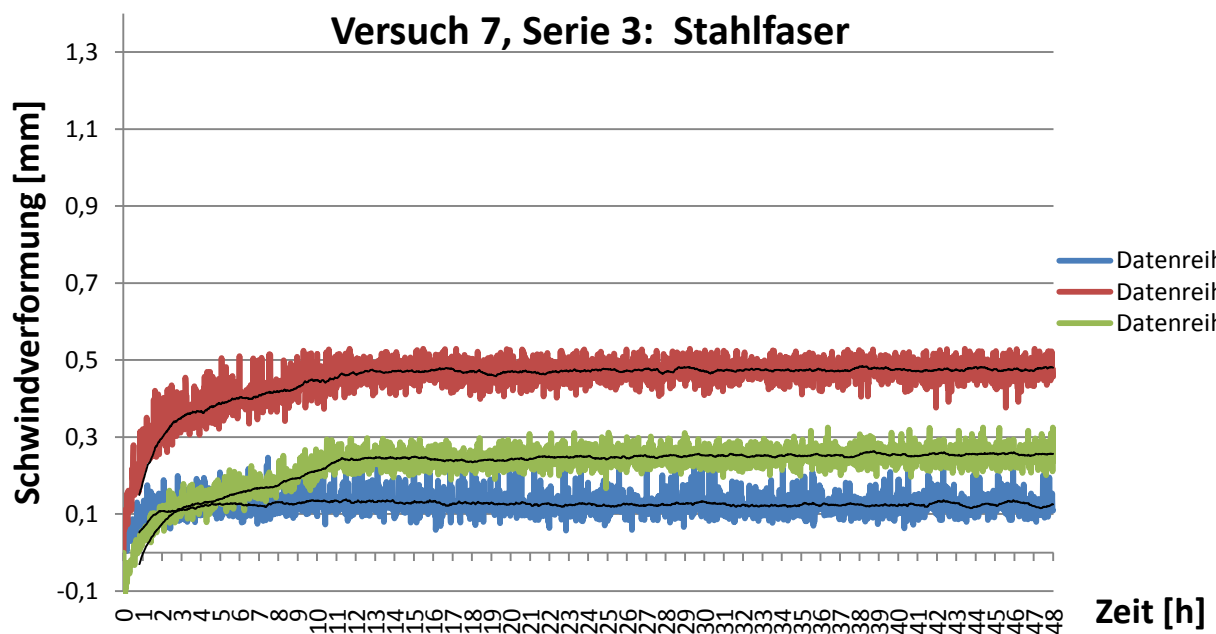


Abbildung 7.9-5: Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (Stahlfasern)

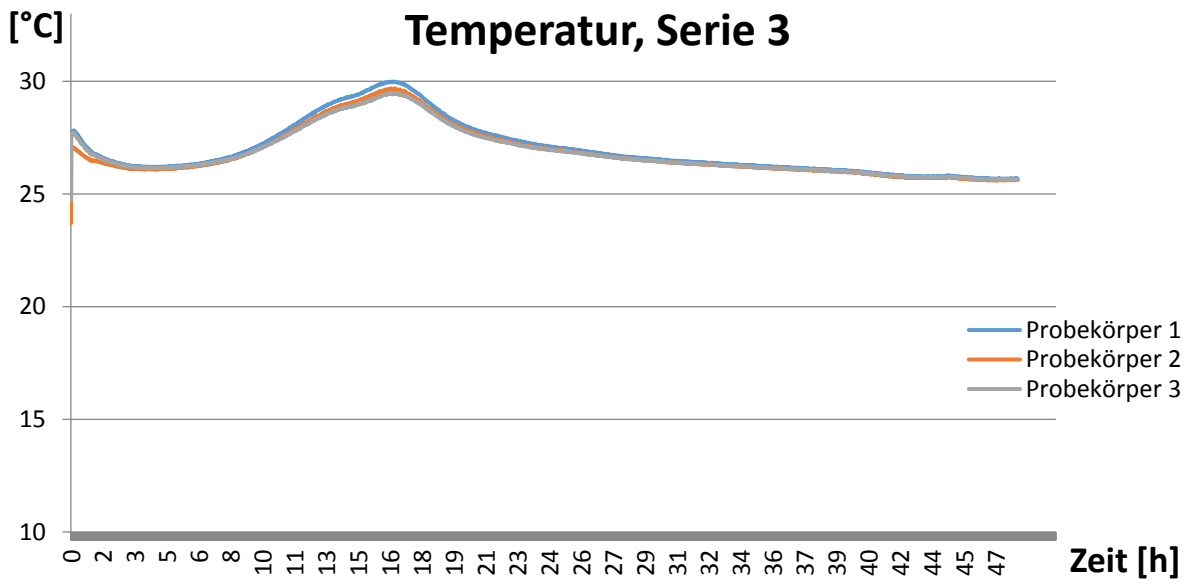


Abbildung 7.9-6: Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (Stahlfasern)

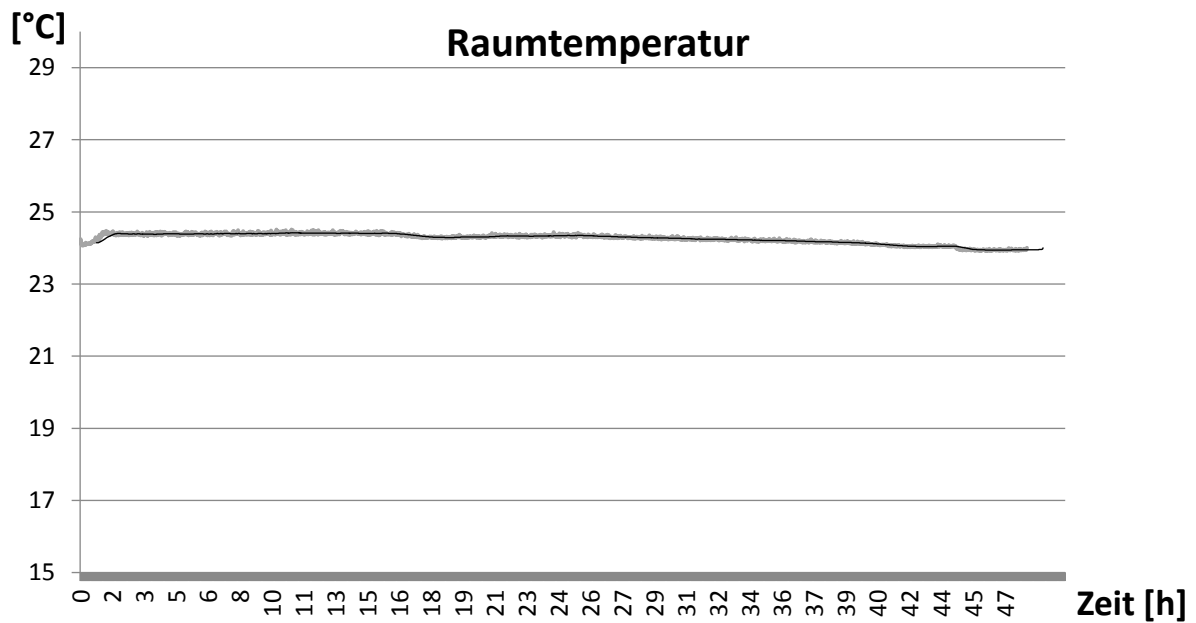


Abbildung 7.9-7: Die Temperatur des Raums während des siebten Versuchs

### 7.9.2 Bewertung

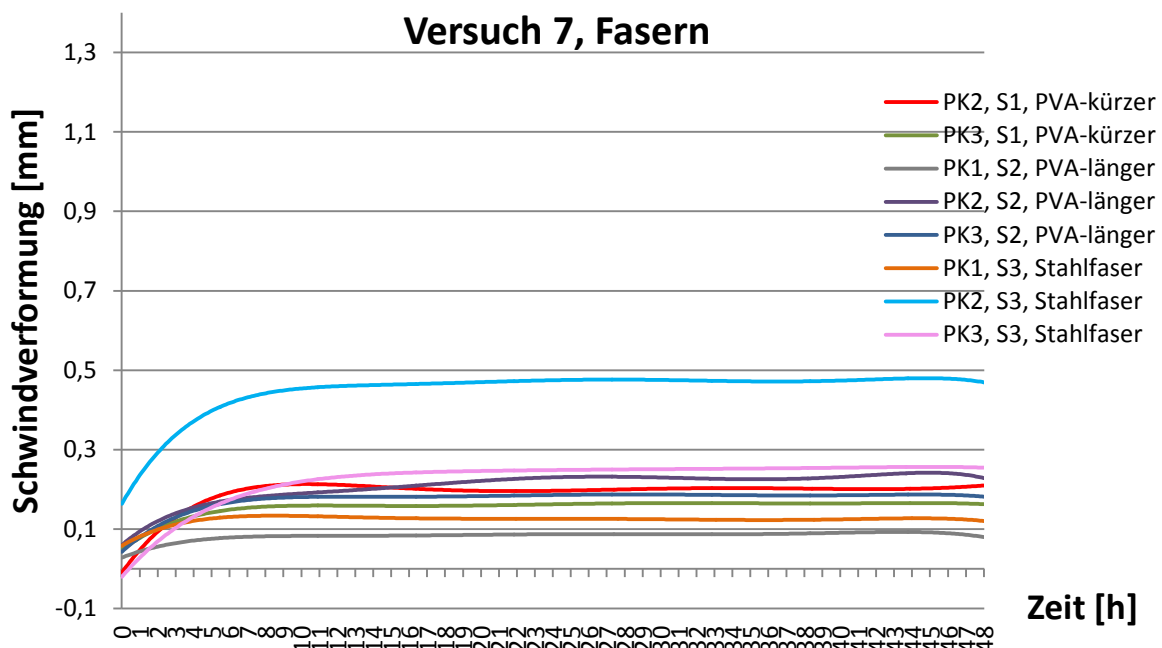


Abbildung 7.9-8: Zusammenfassung

Tabelle 7-15: Schwindmaße der Probekörper im siebten Versuch

| Versuch 7 | Fasern     | Schwindmaß [%] |           |           |
|-----------|------------|----------------|-----------|-----------|
|           |            | 3 Stunde       | 10 Stunde | 42 Stunde |
| PK2, S1   | PP-kürzer  | 0.08           | 0.13      | 0.14      |
| PK3, S1   | PP-kürzer  | 0.05           | 0.11      | 0.13      |
| PK1, S2   | PP-länger  | 0.01           | 0.02      | 0.04      |
| PK2, S2   | PP-länger  | 0.08           | 0.14      | 0.15      |
| PK3, S2   | PP-länger  | 0.09           | 0.10      | 0.12      |
| PK1, S3   | Stahlfaser | 0.07           | 0.07      | 0.08      |
| PK2, S3   | Stahlfaser | 0.20           | 0.28      | 0.31      |
| PK3, S3   | Stahlfaser | 0.07           | 0.14      | 0.16      |

Die PP-Fasern wurden möglichst fein verteilt und zu den Bestandteilen vor der Mischung gegeben. Die Stahlfasern wurden auch zusammen mit den anderen Bestandteilen gemischt. Es hat in der Mischung, wo die Stahlfasern dazu gegeben wurden, nicht alles geklappt, weil viele von ihnen schon während der Mischung gesunken sind. Aus diesem Grund kann es angenommen werden, dass am Ende circa 90% von der zugemischten Stahlfasern sich nicht in den Probekörpern befunden haben.

Alle Verläufe sind beinahe gleich. Die Ausnahme ist es das Schinden der Mischung im PK 2 in der Serie 3, wo es schon am Anfang eine sehr große Volumenabnahme gab, deshalb beträgt der Schwindmaß der Mischung nach drei Stunden (plastisches Schwinden) 0,20%, was circa

0,12% größer als die Schwindverformungen der übrigen Mischungen. Deshalb wurde die Mischung in der PK2 von der dritten Serie nicht betrachtet.

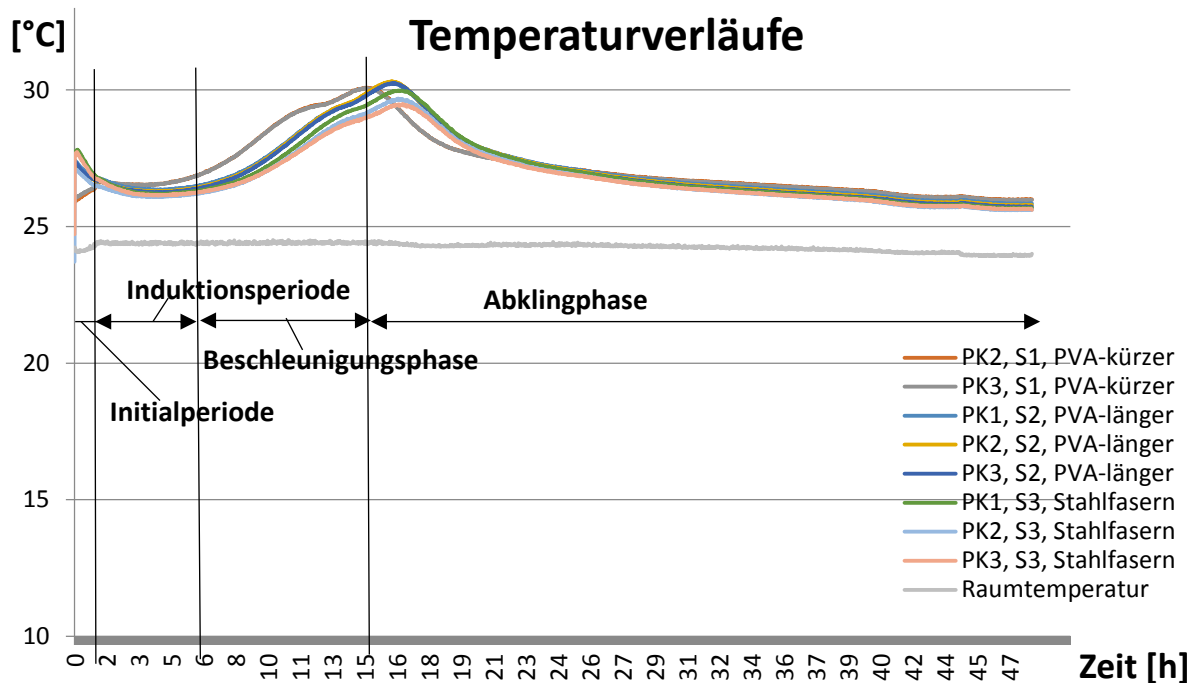


Abbildung 7.9-9: Die Temperaturverläufe im siebten Versuch

Die Temperaturverläufe sind beinahe gleich. Alle Mischungen haben die höchste Temperatur circa in der 16 Stunde.

Beantwortung der Fragenstellung

*Alle Verläufe sind fast gleich. Wenn es zusätzlich berücksichtigt wird, dass es in der Mischung 3 kaum Stahlfasern gab (fast alle Fasern sind während der Mischung gesunken), kann es festgestellt werden, dass Fasern kein Einfluss auf Schwindverformung haben.*

*Laut Literatur werden Fasern bei Herstellung von UHPC verwendet, um Brandeigenschaften und Festigkeiten des Betons zu verbessern.*

*Die Ergebnisse stimmen mit Literatur überein. Das Schwinden des Betons wird durch Zugabe von Fasern nur wenig beeinflusst. [39]*

---

## 8 Interpretation der Ergebnisse

Anhand der Serie 1 kann festgestellt werden, dass das Schwinden vor allem durch den W/Z-Wert beeinflusst wird. Es kann auf Basis durchgeführten Versuchen festgestellt werden, dass je niedriger den W/Z-Wert ist, desto größer das Anfangsschwinden ist, was den Stand des Wissens, anhand dessen das autogene Schwinden mit abnehmenden W/Z-Wert steigt, bestätigt. Wenn es um die Temperaturentwicklung geht, ist es so, dass bei Mischungen mit einem höheren W/Z-Wert die Temperaturhöchstwerte niedriger sind.

Während des zweiten Versuchs wurden verschiedene Zementklassen verglichen (CEM I 52,5 und CEM I 42,5). Bei dem CEM I 42,5 dauert das Schwinden länger (regelmäßige Volumenabnahme vom plastischen bis chemischen Schwinden) als das Schwinden des CEM I 52,5 (die Volumenabnahme erfolgt eigentlich nur in der plastischen Phase). Man sieht auch wesentliche Unterschiede in der Temperaturentwicklung. Die Hydratationsperiode der Mischung mit CEM I 52,5 (höhere Klasse) ist kürzer als die Hydratationsperiode der zweiten Mischung bis zur 22 Stunde. Außerdem ist die maximale Temperatur der Mischung mit dem CEM I 52,5 ungefähr um 2°C höher als in der zweiten Mischung.

Beim dritten Versuch, wo der Fließmittelgehalt variiert wurde, hat sich gezeigt, dass mit steigendem Fließmittelgehalt die Volumenabnahme steigt. Unterschiede der Schwindverformung sind jedoch nicht so gut erkennbar wie in der früheren Versuchen, was darauf hinweist, dass die Menge des Fließmittels nicht so große Rolle wie den W/Z-Wert oder Zementklasse spielt.

Bei Mischung mit mehr Microsilica oder Quarzmehl ist es die Volumenabnahme größer.

Die Zugabe von Fasern hat kein Einfluss auf das Schwinden.

In folgende Tabelle 8-1 wurden alle Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 8-1

| <b>FRAGE</b>  | <b>ANTWORT</b>  |
|---|---|
| <i>Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons in Abhängigkeit des W/Z-Werts?</i>                                 | Je niedriger der W/Z-Wert ist, desto größer ist das Anfangsschwinden. Diese Aussage bestätigt den Stand des Wissens, anhand dessen das autogene Schwinden mit abnehmendem W/Z-Wert zunimmt.   |
| <i>Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei Verwendung unterschiedlicher Zemente?</i>                      | Es kann festgestellt werden, dass das Schwinden des Betons von der Festigkeit des Zements offensichtlich abhängig ist. Je höher die Festigkeit des Zements ist, desto kleiner ist das autogene Schwinden.   |
| <i>Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Fließmittel?</i>               | Die Ergebnisse zeigen, dass größere Mengen von Fließmittel das autogene Schwinden deutlich verringert haben, was mit dem Stand des Wissens übereinstimmt.   |
| <i>Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Microsilica (Zusatzstoff)?</i> | Die durchgeführte Untersuchung weist darauf hin, dass Microsilica keinen oder kaum Einfluss auf das Schwinden hat. Aufgrund der Ergebnisse kann es nur vermutet werden, dass je mehr Microsilica in einer Mischung vorliegt, desto größer das Schwinden ist. Dies stimmt mit dem Stand des Wissens überein. |
| <i>Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Quarzmehl (Zusatzstoff)?</i>   | Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass bei größerer Zugabe von Quarzmehl die Volumenabnahmen etwas höher sind.  |



|   |   |
|---|---|
| <i>Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei unterschiedlicher Dosierung von Quarzsand (Zusatzstoff)?</i> | Bei verschiedener Dosierung von Quarzsand sind es die Schwindverformungen sehr ähnlich. Es kann nur vorsichtig gesagt werden, dass je mehr Quarzsand (0,1-0,5 mm) in einer Mischung sich befindet, desto kleiner die Volumenabnahme der Mischung ist. |
| <i>Wie unterscheidet sich nach 48 Stunden das Schwinden des ultrahochfesten Betons bei Zugabe verschiedener Fasern?</i>                             | Aufgrund der Untersuchung kann es gesagt werden, dass Fasern keinen Einfluss auf das Schwinden haben. Dies stimmt mit Stand des Wissens überein.  |

## 9 Schlussfolgerung

Ultrahochfester Beton ist ein innovatives Material, mit dem sehr schlanke Bauteile gebaut werden können. Erst mit der Entwicklung des Fließmittels war es möglich, ultrahochfesten Beton herzustellen. Die wichtigste Voraussetzung für UHPC ist die sehr niedriger W/Z-Wert, was ohne Zugabe eines Fließmittels praktisch nicht möglich ist.

Mit dem UHPC ist es schon jetzt möglich sehr schlanke und bewehrungsarme Bauteile zu schaffen, jedoch gibt es noch ein paar wesentliche Probleme, wie zum Beispiel Frühschwindverhalten. Diese Fragestellung sollte gelöst werden, damit er problemloser eingesetzt werden kann.

Das Ziel der Arbeit war es, die Ursachen des Frühschwindverhalten des UHPCs herauszufinden. Aufgrund der niedrigen W/Z-Werte und sehr hohen Anteile der Feinelemente (Quarzsand, Quarzmehl, Microsilica) sowie Zemente mit hoher Festigkeitsklasse ist es das Frühschwinden (erste 48 Stunde) des UHPCs viel höher im Vergleich zum herkömmlichen Beton, was sehr ungünstige Rissbildung verursachen kann.

Im Rahmen der Arbeit wurde die Reihe von den sieben Serien ( im jeden Versuch drei Serien und in jeder Serie drei Probekörper) durchgeführt.

Im ersten Versuch wurde es den Einfluss des W/Z-Wertes auf das Schwinden des UHCP in früherer Phase untersucht. Es hat sich gezeigt, dass das autogene Schwinden mit abnehmendem W/Z-Wert zunimmt, was den Stand des Wissens bestätigt.

Danach wurde der Wirkung der Zemente mit unterschiedlichen Festigkeitsklassen analysiert. Es hat sich herausgestellt, dass durch unterschiedliche Zemente das autogene Schwinden leicht zu beeinflussen ist. Es deutet sich nämlich an, dass je höher die Festigkeit des Zements ist, desto kleiner das autogene Schwinden ist.

Anschließend wurde unter die Lupe das Fließmittel genommen. Es hat sich herausgestellt, dass durch Fließmittel das Schwinden des UHPCs herabgesetzt wird, was in Einklang mit dem Stand des Wissen steht.

---

Im Nachhinein wurde die Wirkung der Zusatzstoffe (Microsilica, Quarzmehl und Quarzsand) nachgeforscht. Es hat sich daraus hergeleitet, dass mit zunehmender Dosierung der Zusatzstoffe die Volumenabnahme der Mischung vermutlich sinkt.

Schlussendlich wurde den Einfluss der Fasern auf Minderung der Volumenmischung in der Frühphase überprüft. Wie die Untersuchung gezeigt hat, haben sie keinen Einfluss auf das Frühschwindverhalten des UHPC.

Zunächst wurde im Rahmen der Arbeit die Prüfmethode weiter entwickelt. Ursprünglich wurden die PVC Rohren, die auf Plastikunterlagen befestigt wurden, mit der Mischung gefüllt und dann wurde es das Schwinden gemessen. Diese Mischungen wurden leider nicht abgedeckt und infolgedessen das äußere Klima eine Wirkung auf die Ergebnisse hatte. Aus diesem Anlass wurden anfangs anhand von der Vorversuche die geeignete Abdeckungen heraufgefunden. Dies waren dünne Zementblätter. Dies sind nämlich dünne Zementschale. Sie wurden geschleift und poliert, damit sie keine Flüssigkeiten aufgesaugen.

UHPC ist ein Meilenstein in Bauwesen. In der näheren Zukunft wird der Beton hoffentlich öfter eingesetzt. Zuerst muss aber das Problem des Schwindens gelöscht werden, was noch weitere wissenschaftliche Untersuchungen gebrauchen wird.

## Literaturverzeichnis

- [1] Kirnbauer, J.: „Doctoral Thesis: Vacuum Mixing of Ultra High Performance Concrete“. Wien, Österreich, Juni 2013. S.
  - [2] Smart Minerals GmbH
  - [3] Beton akademie- Betontechnologie 1
  - [5] Thienel, K.-Ch.; Kustermann, A.: „Sonderbetone Normalbeton, Hochfester Beton, Hochleistungsbeton, Ultrahochfester Beton“. München, Deutschland, Wintersemester 2011.
  - [6] Zieliński, K.; Olszewski, P.: „Der Einfluss von Basaltfasern auf ausgewählte physische und mechanische Eigenschaften von Zementmörtel“. Poznań, Polen, 2005.
  - [7] Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: „Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)“.
  - [8] Schäffel, P.; Rickert, J.: „Einfluss von schwindreduzierenden Zusatzmitteln auf das Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein“. Teil 1. Düsseldorf, Deutschland, Juni 2007.
  - [9] Rummelin, A. T.: „Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Betonen“. Stuttgart, Deutschland, 2005.
-

- 
- [10] Schachinger, A. I.: „Maßnahmen zur Herstellung von rissfreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität“. München, Deutschland, März 2007.
- [11] Murr, R.; Draxl, R.; Huber, H.: „Autogenes Schwinden und adiabatische Wärmeentwicklung – zwei wichtige Parameter für hochbeanspruchte Betone von „Weißen Wannen““. Prüfstelle der MVA Strass, Pöyry Infra GmbH.
- [12] Schaffel, P.: „Zum Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel und Werkstoffe auf das autogene Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein“. Weimar, Deutschland, 2009.
- [13] Alawieh, H.: „Zur experimentellen Bestimmung der Schwindverformungen von Zementstein“. Bochum, Deutschland, 2006.
- [14] Thienel, K.-Ch.: „Werkstoffe des Bauwesens, Festbeton“. München, Deutschland, Frühjahrstrimester 2008.
- [15] „Distanz-Mess-Sensor Präzisionstyp GP2Y0AH01K0F Sharp GP2Y0AH01K0F Messbereich(e)“. [Online]. <http://www.conrad.at/ce/de/product/185366/Distanz-Mess-Sensor-Präzisionstyp-GP2Y0AH01K0F-Sharp-GP2Y0AH01K0F-Messbereiche-45-6-mm-5-VDC> [Zugegriffen: 17 September 2014].
- [16] „Modell 2701 Digital-Multimeter Datenerfassung und Datenaufzeichnung-System w / 2 Slots Ethernet / RS232“. [Online]. <http://www.keithley.com/products/data/datalogger/?mn=2701> [Zugegriffen: 25 August 2014].
- [17] „Isolierte Thermodrähte (ITD)“. [Online]. [http://www.hesselmann.de/pdf/10-7\\_30.PDF](http://www.hesselmann.de/pdf/10-7_30.PDF) [Zugegriffen: 25 August 2014].
- [18] „Selbstverdichtender Beton SVB“. [Online]. <http://www.skl.ch/data/docs/download/1563/de/Merkblatt-SVB-Beton.pdf> [Zugegriffen: 10 August 2014].
- [19] Richner, H.: „Bau einer Betonschalung“. D-BAUG, 2011.
- [20] „Reflexion von Licht“. [Online]. [http://m.schuelerlexikon.de/phy\\_abi2011/Reflexion\\_von\\_Licht.htm](http://m.schuelerlexikon.de/phy_abi2011/Reflexion_von_Licht.htm) [Zugegriffen: 20 August 2014].
- [21] Kirnbauer, J.: „Mischungsberechnung für UHCP- Zweck: Gruppe 4: Modellboot“. Adolf Blamauergasse 1-3, 1030 Wien, Österreich, 2 Juni 2014.
- [22] „Hydratation des Zements und Gefüge des Zementsteins“. [Online]. [https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompodiumZementBeton/1-4\\_Hydratation.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompodiumZementBeton/1-4_Hydratation.pdf) [Zugegriffen: 21 August 2014].
- [23] Man-Chung Tang: „Ultra-Hochfester Beton- Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft“. San Francisco, USA, April 2004.
- [24] König, Holschemacher, Dehn: Ultrahochfester Beton
-

- 
- [25] Slowik, V.; Schmidt, D.; Fritsch, R.: „Auf Kapillardruckmessung basierende Nachbehandlung von Betonflächen im Plastischen Zustand“. Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 11, 2007.
- [26] Alonso M. T.; „Hochfester Beton“, Düsseldorf.
- [27] Kirnbauer, J.: „Mischungsberechnung für UHCP- Zweck: Gruppe 4: Nullmischung nur Matrix“. Adolf Blamauergasse 1-3, 1030 Wien, Österreich, 20 Februar 2013.
- [28] ÖN EN 197-1 „Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement (konsolidierte Fassung)“.
- [29] Fontana, P.: „Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen“. Berlin, Deutschland, 20 April 2006
- [30] Hesse, Ch.: „Der Reaktionsverlauf der frühen Hydratation von Portlandzement in Relation zur Temperatur“. Dresden, Deutschland, 2009.
- [31] Das Programm: Dlubal RFEM 5.01
- [32] <http://blog.voeb.com/wordpress/ultrahochfester-beton-wild-bruecke-2/>
- [33] <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/006.cfm>
- [34] <http://www.welt.de/reise/article5724733/Tickets-fuer-den-Burj-Dubai-gibts-im-Internet.html>
- [35] Kusterman, A.: „Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betonfüge“. Heft 2, Müschen,, Deutschland, 2005
- [36] [https://de.wikipedia.org/wiki/CN\\_Tower](https://de.wikipedia.org/wiki/CN_Tower)
- [37] [https://de.wikipedia.org/wiki/Hochfester\\_Beton](https://de.wikipedia.org/wiki/Hochfester_Beton)
- [38] Lahofer A.: „Schwindverhalten von ultrahochfesten Beton“. 03.07.2014
- [39] Grübl P., Weigler H., Sieghart K.: „Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften“ 2. Auflage

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 3.1-1 Entwicklungsgeschichte des Betons(aus dem Vortrag von Prof. Schmidt, Universität Kassel, auf den 49. Ulmer Beton und Fertigteil-Tagen). [23]..... - 7 -

Abbildung 3.1-2 Entwicklungsgeschichte der Betonfestigkeiten(aus dem Vortrag von Prof. Schmidt, Universität Kassel, auf den 49. Ulmer Beton und Fertigteil-Tagen) [23] ..... - 8 -

Abbildung 3.1-3 Bestandteile des ultrahochfesten Betons..... - 8 -

---

---

|  |        |
|--|--------|
| Abbildung 3.1-1 Abhängigkeit zwischen Zementgehalt und Schwinddehnung .....  | - 12 - |
| Abbildung 3.2-1 Hydratationsprozess in Abhängigkeit des Wasser/Bindemittelwerts .....  | - 13 - |
| Abbildung 3.2-2 Hydratationsprozess in Abhängigkeit des W/Z-Werts .....  | - 13 - |
| Abbildung 3.2-3 Die schematische Darstellung der Hydratationsphase, [22] .....   | - 15 - |
| Abbildung 3.2-4 Hydratationswärmeentwicklung unterschiedlicher Zemente, [22]. .....  | - 15 - |
| Abbildung 3.3-1 Schematische Darstellung der Hydratation.....  | - 17 - |
| Abbildung 3.5-1 Schematische Darstellung des Fließmittels [9].....   | - 18 - |
| Abbildung 4.2-1 Definition der autogenen und nicht autogenen Phänomene anhand [29].-   | 20     |
| -  |        |
| 4.2-2 Schematische Darstellung des autogenen Schwindens sowie Trocknungsschwindens des normalen und Hochfesten Betons. [31].....   | - 20 - |
| Abbildung 4.2-3 Definition des chemischen und autogenen Schwindens [11] .....  | - 21 - |
| Abbildung 4.2-4 Zeitlicher Verlauf der früheren Zementhydratation eines PZs anhand der entstehenden Wärme: I: Initialperiode, II: Induktionsperiode, III: Hauptperiode, IIIa: Beschleunigungsphase, IIIb: Abklingphase. [30] ..... | - 23 - |
| 4.2-5 Schematische Darstellung der Zementgels nach Power [29]. .....   | - 23 - |
| Abbildung 4.4-1 [2] Schematische Darstellung der Carbonatisierung. ....  | - 24 - |
| Abbildung 5.5-1 Vaseline. Sie wird als Schmierung der inneren Flächen der Probekörper verwendet. ....  | - 29 - |
| Abbildung 5.5-2 Das Abwasserrohr. Es wird als Probekörper (Schalung) verwendet. ....   | - 29 - |
| Abbildung 6.1-1 Waage .....  | - 31 - |
| Abbildung 6.3-1 Mörtelmischer. ....  | - 32 - |
| Abbildung 6.4-1 Der Rüttler .....  | - 32 - |

---

---

|   |        |
|---|--------|
| Abbildung 7.1-1 Zementschalen .....   | - 34 - |
| Abbildung 7.1-2 Plexiglas mit geklebtem Papier.....   | - 34 - |
| Abbildung 7.1-3 Rostfreier Stahl .....  | - 34 - |
| Abbildung 7.1-4 Plexiglas.....  | - 34 - |
| Abbildung 7.1-5 Zementschale .....  | - 34 - |
| Abbildung 7.1-6 Zementschale .....  | - 34 - |
| Abbildung 7.1-7Vorversuch, Es wurden die Decken aus Plexigläser mit gekleptem Papier auf der Oberfläche verwendet. .... | - 35 - |
| Abbildung 7.1-8Vorversuch, Es wurden die Decken aus Plexigläser mit gekleptem Papier auf der Oberfläche verwendet. .... | - 36 - |
| Abbildung 7.1-9Vorversuch, Es wurden die Decken aus Plexigläser mit gekleptem Papier auf der Oberfläche verwendet. .... | - 36 - |
| Abbildung 7.2-1 Versuchsplan.....   | - 37 - |
| Abbildung 7.3-1Schwindverformungen im ersten Versuch.....   | - 43 - |
| Abbildung 7.3-2-2Die Temperaturverläufe im ersten Versuch.....  | - 45 - |
| Abbildung 7.4-1Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (CEM I 52,5). ....  | - 47 - |
| Abbildung 7.4-2 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (CEM I 52,5).....  | - 47 - |
| Abbildung 7.4-3 Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (CEM I 42,5). ....   | - 48 - |
| Abbildung 7.4-4 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (CEM I 42,5).....  | - 48 - |
| Abbildung 7.4-5 Die Temperatur des Raums während des zweiten Versuchs. ....   | - 49 - |
| Abbildung 7.4-6 Schwindverformungen im zweiten Versuch.....   | - 49 - |

---

---

|  |        |
|--|--------|
| Abbildung 7.4-7 Die Temperaturverläufe im zweiten Versuch. ....                    | - 50 - |
| Abbildung 7.5-1 Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (FM-weniger). ....        | - 53 - |
| Abbildung 7.5-2 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (FM-weniger).....   | - 53 - |
| Abbildung 7.5-3 Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (FM-mittlere).....        | - 54 - |
| Abbildung 7.5-4 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (FM-mittlere). .... | - 54 - |
| Abbildung 7.5-5 Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (FM-mehr).....            | - 55 - |
| Abbildung 7.5-6 Schwindverformungen im dritten Versuch.....                        | - 56 - |
| Abbildung 7.5-7 Die Temperaturverläufe im dritten Versuch.....                     | - 57 - |
| Abbildung 7.6-1 Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (MS-weniger). ....        | - 60 - |
| Abbildung 7.6-2 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (MS-weniger).....   | - 60 - |
| Abbildung 7.6-3Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (MS-mehr). ....            | - 61 - |
| Abbildung 7.6-4 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (MS-mehr). ....     | - 61 - |
| Abbildung 7.6-5Schwindverformungen im vierten Versuch. ....                        | - 62 - |
| Abbildung 7.6-6 Die Temperaturverläufe im vierten Versuch. ....                    | - 63 - |
| Abbildung 7.7-1Schwindverformungen im fünften Versuch.....                         | - 69 - |
| Abbildung 7.7-2Die Temperaturverläufe im fünften Versuch.....                      | - 70 - |
| Abbildung 7.8-1 Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (GK-mittlere).....        | - 73 - |
| Abbildung 7.8-2 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (GK-mittlere). .... | - 73 - |
| Abbildung 7.8-3Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (GK-weniger). ....         | - 74 - |
| Abbildung 7.8-4 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (GK-weniger).....   | - 74 - |

---

---

|  |        |
|--|--------|
| Abbildung 7.8-5 Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (GK-mehr).....          | - 75 - |
| Abbildung 7.8-6 Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (GK-mehr). ....   | - 75 - |
| Abbildung 7.8-7Die Temperatur des Raums während des sechsten Versuchs. ....      | - 76 - |
| Abbildung 7.8-8Schwindverformungen im sechsten Versuch.....                      | - 76 - |
| Abbildung 7.8-9 Die Temperaturverläufe im sechsten Versuch.....                  | - 77 - |
| Abbildung 7.9-1Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (PP-kürzer). ....        | - 80 - |
| Abbildung 7.9-2Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (PP-kürzer).....   | - 81 - |
| Abbildung 7.9-3Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (PP-länger).....         | - 81 - |
| Abbildung 7.9-4Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (PP-länger).....   | - 82 - |
| Abbildung 7.9-5Die Ergebnisse des Schwindens des Betons (Stahlfasern). ....      | - 82 - |
| Abbildung 7.9-6Die inneren Temperaturen den Betonprobekörpern (Stahlfasern)..... | - 83 - |
| Abbildung 7.9-7 Die Temperatur des Raums während des siebten Versuchs. ....      | - 83 - |
| Abbildung 7.9-8 Schwindverformungen im siebten Versuch.....                      | - 84 - |
| Abbildung 7.9-9 Die Temperaturverläufe im siebten Versuch.....                   | - 85 - |

## **Tabellenverzeichnis**

|  |        |
|--|--------|
| Tabelle 5-1 Technische Daten des Sensors [15] .....                    | - 26 - |
| Tabelle 7-1 Bestandteile der Mischungen .....                          | - 35 - |
| Tabelle 7-2 Geplante Versuche.....                                     | - 38 - |
| Tabelle 7-3 Die Misschungen der drei Serien in der ersten Versuch..... | - 39 - |

---



---

|  |        |
|--|--------|
| Tabelle 7-4 Schwindmaße der Probekörper im ersten Versuch. ....    | - 44 - |
| Tabelle 7-5 Schwindmaße der Probekörper im ersten Versuch. ....    | - 50 - |
| Tabelle 7-6 Bestandteile der Serien im Versuch 3. ....             | - 52 - |
| Tabelle 7-7 Schwindmaße der Probekörper im dritten Versuch. ....   | - 57 - |
| Tabelle 7-8 Bestandteile der Serien im vierten Versuch. ....       | - 59 - |
| Tabelle 7-9 Schwindmaße der Probekörper im vierten Versuch. ....   | - 63 - |
| Tabelle 7-10 Bestandteile der Mischungen im fünften Versuch. ....  | - 65 - |
| Tabelle 7-11 Schwindmaße der Probekörper im fünften Versuch. ....  | - 69 - |
| Tabelle 7-12 Bestandteile der Mischungen im sechsten Versuch. .... | - 72 - |
| Tabelle 7-13 Schwindmaße der Probekörper im sechsten Versuch. .... | - 77 - |
| Tabelle 7-14 Bestandteile der Mischungen im siebten Versuch. ....  | - 79 - |
| Tabelle 7-15 Schwindmaße der Probekörper im siebten Versuch. ....  | - 84 - |
| Tabelle 8-1. ....  | - 87 - |

---