

Experimentelle Methodik zur Bestimmung des autogenen Schwindverhaltens von Hochleistungsbetonen

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

zur

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

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Hannes Weicken

Hannover 2019

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Technische Universität Dresden

Kommissionsmitglied: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Vorsitz: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Tag der Prüfung: 17.08.2018

Impressum

Autor: Dipl.-Ing. Hannes Weicken

Titel: Experimentelle Methodik zur Bestimmung des autogenen
Schwindverhaltens von Hochleistungsbetonen

Schriftenreihe: Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 20

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Institut für Baustoffe
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9a
30167 Hannover
Tel.: 0511 / 762-3722
Fax: 0511 / 762-4736
<http://www.baustoff.uni-hannover.de>

ISBN 978-3-936634-23-5

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus, für seine unendliche Geduld, die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit und die Erstberichterstattung. Die stete Diskussionsbereitschaft in Verbindung mit den vielen fachlichen Anregungen sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann für die Mitwirkung als Kommissionsmitglied und Herrn Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Teile meiner wissenschaftlichen Arbeit entstanden im Rahmen des Verbundforschungsvorhaben GIGAWIND *alpha ventus* und GIGAWIND *life*, die beide vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wurden. Mein Dank gilt daher auch dem Fördermittelgeber.

Für die hervorragende Zusammenarbeit, die zahlreichen fachlichen Diskussionen und die tatkräftige Unterstützung bedanke ich mich bei den damaligen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Baustoffe. Der fast freundschaftliche Umgang hat auch zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Bei Ines Störmer und insbesondere bei Michael Brachter möchte ich mich für den technischen Austausch und die stete Unterstützung bei der Durchführung der vielen experimentellen Untersuchungen bedanken. Des Weiteren danke ich Dr. Y. Abebe, Dr. J. Gerlach, Dr. J. Hümme, Dr. J. Imbrasaite sowie Dr. D. Madey für die Übernahme des Lektorats und für die Unterstützung auf den letzten Metern.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie, meiner Lebensabschnittsgefährtin und meinen Freunden, die mich immer uneingeschränkt unterstützt und über die vielen Jahre alle auf ihre Weise motiviert haben.

Hannes Weicken

für meine Großeltern Herta und Gotthelf Kühn

Kurzfassung

Mittlerweile existiert in der Baupraxis eine Vielzahl an Anwendungsfällen, die ohne die Verwendung von hochfesten (HPC) oder ultrahochfesten (UHPC) Betonen nicht realisierbar wären. Für die Bemessung dieser Bauteile werden in der Regel die Druck- und Ermüdungsfestigkeit des Materials benötigt, wohingegen die auftretenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bislang nicht bzw. nicht ausreichend berücksichtigt werden. Deutlich wird dies u.a. im Bereich der Windenergie, wo sehr fließfähige Hochleistungsmörtel und -betone sowohl onshore (in Vergussfugen) als auch offshore (in Grouted Joints) verwendet werden. Im Grouted Joint kann es in Folge von autogenen Schwindverformungen und aufgrund der Dehnungsbehinderung durch das innenliegende Stahlrohr zu Rissen innerhalb des Grouts kommen. Je nach Art und Umfang der Risse kann es in Kombination mit den dynamischen Einwirkungen zur Verminderung der Dauerhaftigkeit und der Tragfähigkeit der Verbindung kommen.

Weder für die Bauart (Grouted Joint) noch für das Bauprodukt (Grout) existiert derzeit eine anwendbare Norm, weswegen für den vorliegenden Anwendungsfall immer eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich ist. Dazu sehen die zur Verfügung stehenden Regelwerke u.a. [DAfStB06] und [DNV14] jedoch keine Prüfung der autogenen Schwindverformungen vor. Erschwerend kommt hinzu, dass auch für die Messung von autogenen Schwindverformungen bislang lediglich auf ein Prüfverfahren aus den USA [ASTM1698] zurückgegriffen werden kann. Obwohl das Phänomen des autogenen Schwindens bereits seit den 30er Jahren Gegenstand der Forschung ist, wurde aufgrund von unterschiedlichen Forschungsansätzen noch kein einheitliches Prüfverfahren festgelegt. Neben einem geeigneten Messverfahren wird für die Auswertung der gemessenen Verformungen ein Startpunkt der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen, die sogenannte *time zero* benötigt. Dabei wird der Zeitpunkt des Übergangs zwischen freien und spannungsinduzierenden Verformungen ermittelt, was bislang an separat hergestellten Probekörpern durchgeführt wird und damit zu einer erheblichen Über- bzw. Unterschätzung der autogenen Schwindverformungen führen kann.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die realistische Abschätzung von in situ auftretenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen von Hochleistungsmörteln und -betonen. Dazu wurden nicht nur die prüftechnischen Einflüsse auf die Verformungsmessung systematisch untersucht, sondern auch die notwendigen Verfahren zur Bestimmung der *time zero* überprüft und weiterentwickelt. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Temperatur (quasi-isotherm und nicht-isotherm) zur Abbildung realer Baustellenbedingungen berücksichtigt und die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die Verformungen beschrieben. Zur Ermittlung der

Schwindverformungen wurde auf das Schwindschlauch-, das Schwindkegel- und das Schwindrinnenverfahren zurückgegriffen. Durch leichte Modifikationen eignen sich diese Prüfverfahren alle für das Messen des autogenen Schwindens. Für die Überprüfung der Anwendbarkeit wurden ausgewählte in der Literatur verwendete Verfahren zur Bestimmung der *time zero* verglichen und den Ergebnissen aus zusätzlichen Untersuchungen im dehnungsbehinderten Schwindringverfahren gegenübergestellt. Mit Hilfe der ausgewerteten relativen Verformungsbeschleunigung konnte ein Zeitpunkt identifiziert werden, der eine gute Näherung zum Zeitpunkt der ersten Spannungsentwicklung im Schwindring darstellt.

Die vorgestellte Prüf- und Auswertemethode bietet den Vorteil, dass die für die Auswertung der autogenen Schwindverformungen notwendige *time zero* nicht in einem parallelen Versuch bestimmt werden muss, sondern sich direkt aus den sich einstellenden Verformungen bei der Schwindmessung ermitteln lässt. Somit werden Übertragungsfehler vermieden, die sich aufgrund voneinander abweichender Hydratationsverläufe in beiden Prüfaufbauten ergeben können. Die entwickelte Prüf- und Auswertemethode wurde an vier am Markt erhältlichen Hochleistungsmörteln und -betonen sowie an einem ultrahochfesten Feinkornbeton (UHPC) überprüft und bei drei unterschiedlichen Prüftemperaturen (5 °C, 20 °C und 30 °C) angewendet. Unter Berücksichtigung der ermittelten prüftechnischen Einflüsse wurden Prüfgrundsätze formuliert, die ein fehlerfreies Messen des autogenen Schwindens ermöglichen. In Kombination mit der hinreichend genauen Übereinstimmung zwischen dem in dieser Arbeit identifizierten Startpunkt und dem Beginn der spannungsinduzierenden autogenen Verformungen ist eine exakte Auswertung der gemessenen Schwindverformungen möglich. Somit ist es gelungen, ein Prüfverfahren vorzustellen mit dem autogene Schwindverformungen reproduzierbar gemessen werden können und eine Auswertemethode zu präsentieren, mit der eine zielsichere und exakte Bestimmung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen möglich ist.

Diese Arbeit bildet daher die Grundlage für ein normativ zu regelndes Prüfverfahren zur Bestimmung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen von Hochleistungsmörteln und -betonen. Derartige Mörtel und Betone werden u.a. im Bereich der Windenergie verwendet.

Stichworte:

spannungsinduziertes autogenes Schwinden, *time zero*, Hochleistungsmörtel, Prüf- und Auswertemethode, Temperatureinfluss, dehnungsbehinderte Verformungen

Abstract

A large number of constructions cannot be realized without the use of high-performance (HPC) or ultra-high-performance (UHPC) concretes. For the design of those structural components, the compressive and the fatigue strength of the material need to be known. However, the stress-inducing autogenous shrinkage deformations are not considered sufficiently so far.

This is obvious in the construction of wind energy converters, for example, where flowable high-performance mortars are used onshore (in grouting gaps) and offshore (in grouted joints). In grouted joints, cracks can occur due to autogenous shrinkage deformations restrained by the internal steel tube. Depending on the type and the quantity of cracks, and the combination with dynamic effects, the durability and the load capacity of the connection may be reduced.

There is currently no applicable standard with regard to the type of construction (grouted joint) and the construction product (grout material). Therefore, an approval for each individual case is needed. However, the only available references ([DAfStB06] and [DNV14]) do not require the determination of autogenous shrinkage. This is aggravated by the fact that only a test method from the USA [ASTM1698_09] for the measurement of autogenous shrinkage can be employed so far. Although the phenomenon of autogenous shrinkage has been the subject of research since the Nineteen-Thirties, a standard test procedure has not yet been established due to different research approaches. In addition to a suitable measuring procedure, a starting point for the stress-inducing autogenous shrinkage deformations, the so-called time zero, is required for the evaluation of the measured deformations. For this purpose, the point of transition from free and stress-inducing deformations is determined, which was previously carried out on separately test specimens. However, this measurement may lead to a considerable over- or underestimation of the autogenous shrinkage deformations.

The aim of this dissertation is to estimate realistic stress-inducing autogenous shrinkage deformations of high-performance mortars. For this, the influences of the test procedures on the deformation measurement were systematically examined. Moreover, the procedures for determination of time zero, which is necessary for a realistic estimation of practice-relevant stress-induced autogenous shrinkage, were examined and optimized. In addition, the influence of temperature (quasi- and non-isothermal) on real site conditions was considered and the resulting effect on the deformation has also been analyzed. In order to determine the autogenous shrinkage deformations, different test methods - corrugated tubes, shrinkage cone and shrinkage drain - were used. By applying slight modifications, all of these test procedures were

deemed to be adequate for the measurement of autogenous shrinkage. In order to check their applicability, selected methods used in the literature for the determination of the time zero were compared with the results of additional investigations using the restrained shrinkage ring. By evaluating the relative rate of deformations, it was possible to identify a good approximation point for the first stress development detected in the shrinkage ring.

The main advantage of the proposed test and evaluation method is that it allows to determine the time zero directly from the resulting deformations as determined from the shrinkage measurements. Thus, the results are significantly more accurate in comparison to the other test methods conducted on the basis of parallel experiments on different specimens. As a result, unforeseen errors can be avoided, which may occur due to different development of hydration in the parallel test setups. The developed test and evaluation method was tested on four ordinary high-performance mortars and one ultra-high-performance concrete (UHPC). The tests were conducted at three different temperatures (5 °C, 20 °C and 30 °C). Based on the analysis of the influence of different test procedures, certain test-principles were formulated, which allow an accurate measurement of autogenous deformations. Exact evaluation of the measured deformations is possible as confirmed by the sufficiently precise agreement between the starting point identified in this work and the beginning of the stress-inducing autogenous deformations. Consequently, a suitable test procedure in combination with a precise evaluation method is presented, which allows an accurate determination of the autogenous shrinkage deformations.

In other words, the present work forms a basis for a normative test procedure for the determination of the stress-induced autogenous shrinkage of high-performance mortars that are used for example for the grouting of offshore wind energy converters.

Keywords:

stress-induced autogenous shrinkage, *time zero*, high-performance-mortar, test and evaluation method, influence of temperature, restraint deformation

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	I
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungen	VIII
Kapitel 1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Gliederung der Arbeit	5
Kapitel 2 Stand der Forschung	7
2.1 Hydratationsprozesse	7
2.2 Chemisches Schwinden	9
2.3 Autogenes Schwinden	12
2.4 Einflüsse auf das autogene Schwinden	14
2.4.1 Zement, Zusatzstoffe und -mittel	14
2.4.2 Zementleim, Mörtel und Beton	19
2.4.3 Prüftemperaturen	20
2.5 Verformungsmessungen in der frühen Phase der Hydratation	23
2.5.1 Allgemeines	23
2.5.2 Prüfverfahren	24
2.5.3 <i>Time zero</i>	30
2.5.4 Diskussion der vorgestellten Verfahren	34
2.6 Zusammenfassung	36
Kapitel 3 Experimentelle Untersuchungen	38
3.1 Notwendigkeit der Untersuchungen	38
3.2 Konzeption der Untersuchungen	39
3.3 Charakterisierung der verwendeten Materialien	43
3.4 Besonderheiten der einzelnen Prüfverfahren	46
3.5 Vorüberlegungen zur Durchführung und Auswertung der Untersuchungen	56
Kapitel 4 Darstellung und Auswertung der Untersuchungsergebnisse	62
4.1 Einführung	62
4.1.1 Vorgehen	62
4.1.2 Einflüsse auf die gemessenen Verformungen	64

4.2	Vergleich der Verfahren zur Bestimmung der <i>time zero</i> bei unterschiedlichen Prüftemperaturen	65
4.2.1	Abhängigkeit der Hydratationswärmeentwicklung vom verwendeten Prüfverfahren	66
4.2.2	Gegenüberstellung von Startzeitpunkten (<i>time zero</i>) und Verformungsverläufen bei einer Prüftemperatur von 20 °C	67
4.2.3	Gegenüberstellung von Startzeitpunkten (<i>time zero</i>) und Verformungsverläufen bei einer Prüftemperatur von 30 °C	77
4.2.4	Gegenüberstellung von Startzeitpunkten (<i>time zero</i>) und Verformungsverläufen bei einer Prüftemperatur von 5 °C	83
4.2.5	Bewertung des Temperatureinflusses und Festlegung eines Referenzverfahrens zur Bestimmung der <i>time zero</i>	87
4.3	Abschätzung des versuchstechnischen Einflusses auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen	91
4.3.1	Allgemeines	91
4.3.2	Varianten des Schwindschlauchverfahrens durch veränderte Lagerungsarten des Prüfaufbaus	92
4.3.3	Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindkegelverfahren	97
4.3.4	Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren	101
4.4	Spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen unter variierenden quasi-isothermen Prüfbedingungen	110
4.4.1	Allgemeines	110
4.4.2	Identifizierung von temperaturbedingten versuchstechnischen Einflüssen	111
4.4.3	Einfluss der Umgebungstemperatur bei der Herstellung der Probekörper	118
4.4.4	Entwicklung von Zwangsspannungen bei unterschiedlichen Prüftemperaturen	121
4.5	Spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen unter nicht-isothermen Prüfbedingungen	126
4.5.1	Verformungsermittlung mit dem Schwindkegelverfahren bei festgelegter Temperaturkurve	126
4.5.2	Verformungsermittlung mit dem Schwindkegelverfahren bei real-auftretenden Bauteiltemperaturen	128
Kapitel 5	Bewertung der Prüfverfahren in Bezug auf die Anwendbarkeit als einheitliches Verfahren	135
5.1	Diskussion der versuchstechnischen Einflüsse	135

5.2	Vor- und Nachteile der einzelnen Prüfverfahren	138
5.3	Übertragbarkeit der einzelnen Prüfbedingungen auf reale Verhältnisse im Bauteil	141
Kapitel 6	Bewertung des Temperatureinflusses auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen	143
6.1	Allgemein	143
6.2	Gegenüberstellung der freien und dehnungsbehinderten autogenen Schwindverformungen	143
6.3	Spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen über die Zeit	150
6.4	Fazit	156
Kapitel 7	Anwendungsbeispiel mit der entwickelten Auswertemethode zur Bestimmung spannungsinduzierender autogener Schwindverformungen	161
7.1	Vorstellung der Prüf- und Auswertemethode	161
7.2	Anwendungsbeispiel mit SAP- und SRA-modifizierten Hochleistungsmörteln	163
Kapitel 8	Zusammenfassung und Ausblick	165
8.1	Zusammenfassung	165
8.2	Ausblick	169
	Literaturverzeichnis	170
	Abbildungsverzeichnis	179
	Tabellenverzeichnis	183
	Anhang	184

Abkürzungen

CSH	[-]	Calciumsilikathydrat
DMS	[-]	Dehnungsmessstreifen
Grout 1	[-]	untersuchtes Groutmaterial Nr. 1
Grout 2	[-]	untersuchtes Groutmaterial Nr. 2
Grout 3	[-]	untersuchtes Groutmaterial Nr. 3
Grout 4	[-]	untersuchtes Groutmaterial Nr. 4
PCE	[-]	Polycarboxylatether
T_{\max}	[-]	maximale Hydratationstemperatur
$t_{T_{\max}}$	[-]	Zeitpunkt der maximalen Hydratationstemperatur
t_{Ring}	[-]	Zeitpunkt der ersten Spannungsentwicklung im Schwindring
$t_{A_{\max}}$	[-]	Zeitpunkt der maximalen relativen Verformungsbeschleunigung
$t_{V_{\max}}$	[-]	Zeitpunkt der maximalen relativen Verformungsgeschwindigkeit
t_{Vicat}	[-]	Zeitpunkt des Erstarrungsendes nach Vicat
UHPC 5	[-]	untersuchter ultrahochfester Beton (Material Nr. 5)
WAK	[-]	Wärmeausdehnungskoeffizient

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Mittlerweile existiert in der Baupraxis eine Vielzahl von Anwendungsfällen, die ohne die Verwendung von hochfesten (HPC) oder ultrahochfesten (UHPC) Betonen nicht realisierbar wären. Für die Bemessung dieser Bauteile werden in der Regel die Druck- und Ermüdungsfestigkeit des Materials benötigt, wohingegen die auftretenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bislang nicht bzw. nicht ausreichend berücksichtigt werden. Die Berechnung der autogenen Schwindverformungen nach [DIN1992] orientiert sich lediglich an der Festigkeitsklasse und berücksichtigt weder puzzolanische Zusatzstoffe noch schwindreduzierende Zusatzmittel.

Deutlich wird dies u.a. im Bereich der Windenergie, wo sehr fließfähige Hochleistungsmörtel und -betone sowohl onshore (in Vergussfugen) als auch offshore (in Grouted Joints) verwendet werden. Der sogenannte Grouted Joint stellt die kraftschlüssige Verbindung zwischen aufgehender Gründungsstruktur und dem in den Meeresboden gerammten Stahlrohr sicher. Die Verankerung der aufgehenden Tragstruktur in den Meeresboden wird dabei mittels einer Rohr- in Rohrverbindung realisiert, bei der der entstehende Zwischenraum mit hochfließfähigem und hochfestem Vergussmörtel oder -beton verfüllt wird.

Der vorliegende Anwendungsfall erfordert derzeit sowohl für den Verbindungstyp (Grouted Joint) als auch für das zu verwendende Vergussmaterial (Grout) eine Zustimmung im Einzelfall zur Anwendbarkeit der Bauart und der Verwendbarkeit des Bauprodukts. Dazu sehen die zur Verfügung stehenden Regelwerke (u.a. [DAfStB06] und [DNV14]) jedoch keine Prüfung der autogenen Schwindverformungen vor, welche beim Anwendungsfall Grouted Joint im Hinblick auf die zu erwartende Verformung von großem Interesse sind. Unter der Annahme von isotropen Schwindverformungen im Material kann es aufgrund der Volumenverringerung zur Ablösung des Groutmaterials vom Außenrohr sowie zur Ausbildung von Rissen in axialer und in radialer Richtung des Groutkörpers kommen, was insbesondere bei Eindringen von Wasser aufgrund der hoch dynamischen Einwirkungen zur Verminderung der Dauerhaftigkeit und der Tragfähigkeit der Verbindung führen kann.

Generell sind die für die VergROUTUNG verwendeten VergUSSmÖrtel und -betone durch hohe Zementgehalte und geringe Wasser/Zement-Werte (w/z-Werte) gekennzeichnet, wodurch nahezu sämtliche hygrisch-bedingten Verformungen aus dem autogenen Schwinden resultieren.

Das Phänomen der autogenen Schwindverformungen ist bereits seit den 30er Jahren bekannt [Nev28]. Seitdem haben sich diverse Forschungsarbeiten mit dem Thema beschäftigt. Dabei wurden sowohl die grundlegenden Mechanismen [Jen01a] als auch die die Einflüsse auf die Größe der Verformungen [Fon06] untersucht. Mit der Entwicklung von hochfesten Betonen in den 80er Jahren wurden die autogenen Schwindverformungen erstmals praktisch relevant [Jen96a], wodurch auch die Entwicklung von Möglichkeiten zu ihrer Reduzierung [Jen01], [Jen02] und [Mec11] in den Fokus der Forschung gerückt ist. Heute besteht allgemeiner Konsens darüber, dass kapillare Zugspannungen, deren Größe vornehmlich vom Aufbau der Porenstruktur und vom Grad der Selbstaustrocknung abhängig ist, die Hauptursache für das autogene Schwinden darstellen [Fon06].

Inzwischen stehen verschiedene Verfahren zur Beurteilung der autogenen Schwindverformungen zur Verfügung. Da in der Praxis bislang kaum Konstruktionen existieren, bei denen sich der Lastfall autogenes Schwinden entscheidend auf die Dauerhaftigkeit und die Tragfähigkeit des Bauteils auswirkt, steht bisher weder eine normative Regelung noch ein einheitliches Prüfverfahren zur Messung und Auswertung von autogenen Schwindverformungen zur Verfügung. Neben unterschiedlichen Messverfahren existieren auch für die Bestimmung des Startpunktes der autogenen Schwindverformungen, der sogenannten *time zero*, zahlreiche Verfahren [Wei02a]. Dabei ist der Zeitpunkt des Übergangs zwischen freien und spannungsinduzierenden Verformungen von besonderem Interesse. Bei einer zeitlichen Verschiebung dieses Startzeitpunktes kommt es zu deutlichen Unterschieden in den Endschwindwerten. Gerade bei unterschiedlichen Prüftemperaturen kann es durch die separate Ermittlung der *time zero* zu Ungenauigkeiten kommen, da die Probenvolumina je nach Prüfprozedere unterschiedlich sind, wodurch sich zwangsläufig zu berücksichtigende Temperatureffekte im Material selbst ergeben.

Wie entscheidend das Ergebnis der autogenen Schwindverformungen von der Auswertung abhängt, kann exemplarisch an einem Roundrobin-test mit 10 beteiligten Instituten [JCI3] aufgezeigt werden. Bei Verwendung eines einheitlichen Materials und einer einheitlichen *time zero* wurden Endschwindwerte ermittelt, die im Bereich von +100 $\mu\text{m}/\text{m}$ und -300 $\mu\text{m}/\text{m}$ schwankten, was bei der Betrachtung jedes einzelnen Ergebnisses zu deutlich abweichenden Aussagen über das autogene Schwindverhalten von ein und demselben Material führen würde (Abbildung 1-1).

Da die Probenvolumina je nach verwendetem Prüfaufbau zur Messung des autogenen Schwindens unterschiedlich waren, ergeben sich unvermeidbare Temperatureffekte, die das Ergebnis deutlich beeinflussen. Weiterhin wurde hier auf die separate Bestimmung der *time zero* in den einzelnen Instituten verzichtet und die gemessenen Verformungen unabhängig von den dort vorliegenden Standortfaktoren (u.a. Temperatur, Luftfeuchte, Mischvorgang, Laborant) mit einer einheitlich festgelegten *time zero* ausgewertet.

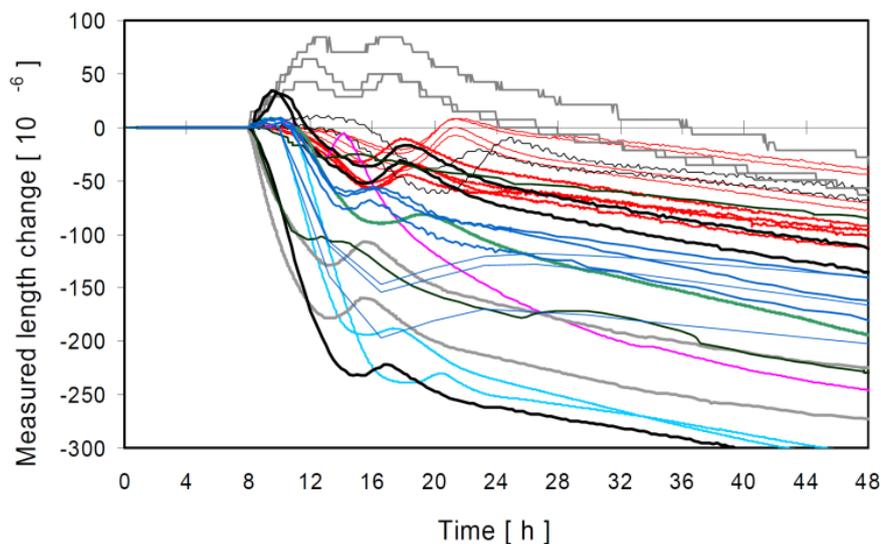


Abbildung 1-1: Autogene Schwindwerte eines Rundrobintests aus [Bjø06]

Zusätzlich ergeben sich aus den spezifischen Randbedingungen „offshore“ weitere Einflüsse auf die autogenen Schwindverformungen, die bislang noch nicht ausreichend erforscht sind. Je nach Lage der Groutverbindung über oder unter Wasser können während der Verfüllung und Aushärtung des Groutmaterials unterschiedliche Temperaturen über einen längeren Zeitraum vorherrschen, wobei zusätzlich eine Differenz der Temperatur zwischen dem Ort der Herstellung (Lufttemperatur) und dem Ort des Aushärtens (Wassertemperatur) auftreten kann. Die Frage, ob sich unterschiedliche Umgebungstemperaturen auf die Höhe der autogenen Schwindverformungen auswirken oder ob es lediglich zu einer Verzögerung bzw. Beschleunigung der ablaufenden Hydratation und damit nur zu einer Beeinflussung des zeitlichen Schwindverlaufes kommt, ist bis dato ebenfalls nicht geklärt. Bisherige Untersuchungsergebnisse (Abbildung 1-2) ergeben sowohl einen unsystematisch als auch einen nichtlinearen Einfluss der Temperatur auf die autogenen Endschwindwerte (aus [Epp10]).

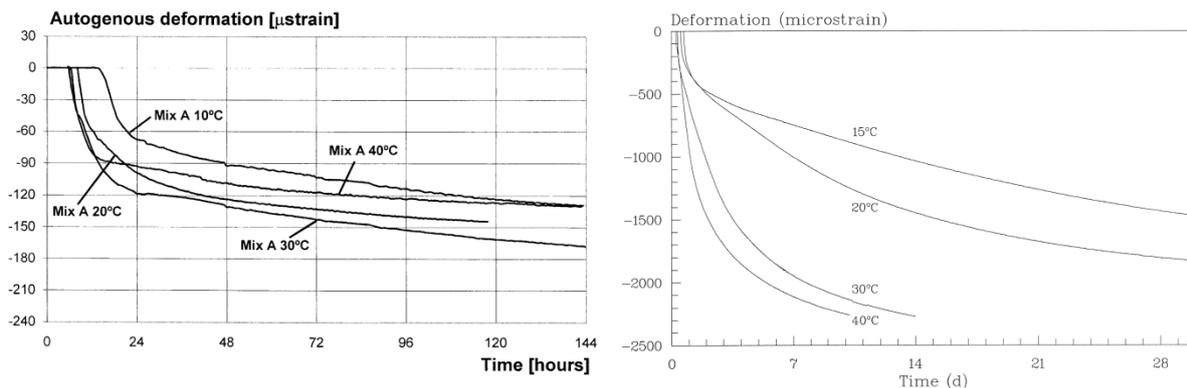


Abbildung 1-2: Autogene Schwindwerte bei unterschiedlichen Prüftemperaturen aus [Lur01] (links) und aus [Jen99] (rechts)

Es wird deutlich, dass die Messung und die Auswertung von autogenen Schwindverformungen bislang noch mit großen Unsicherheiten verbunden sind. Gerade bei der Beurteilung von praxisrelevanten autogenen Schwindverformungen sind vergleichbare und reproduzierbare Werte unabdingbar, um eine genauere Abschätzung des Materialverhaltens innerhalb der Verbindung Grouted Joint zu ermöglichen. Die Einbeziehung der unterschiedlichen Prüftemperaturen bedarf zur Auswertung der gemessenen Verformungen neben einer Auswahl geeigneter Prüfverfahren auch die direkte Ermittlung der *time zero* an dem schwindenden Probekörper. Erst dann ist eine Unterscheidung zwischen material- und versuchstechnischem Einfluss möglich und sinnvoll.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die realistische Abschätzung von in situ auftretenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen von Hochleistungsmörteln und -betonen sowie die Beurteilung des Einflusses von unterschiedlichen Umgebungstemperaturen auf die autogenen Schwindverformungen. Dazu soll eine geeignete Prüf- und Auswertemethode entwickelt werden, die zum einen auf die separate Bestimmung der *time zero* verzichten kann und zum anderen auf ein Prüfverfahren zurückgreift, mit dem die Messungen der autogenen Schwindverformungen fehlerfrei und reproduzierbar möglich sind. Die bis dato in der Literatur vorgestellten Verfahren zur Ermittlung der *time zero* sehen überwiegend die Prüfung in einem parallelen Versuch vor. Durch unterschiedliche Hydratationsverläufe in den Prüfaufbauten kann es zu einem Übertragungsfehler des Startzeitpunktes kommen, der sich direkt auf die resultierenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen auswirkt. Zudem wird bei einem weit verbreiteten Verfahren die *time zero* mit Hilfe des Eindringwiderstands gegenüber einer beschwerten Nadel bestimmt, wodurch kein direkter Zusammenhang zwischen dem Gefügestand des Materials im parallel durchge-

fürten Versuch und dem in der Schwindmessung verwendeten Materials besteht. Dieses Vorgehen kann insbesondere bei der Variation der Prüftemperaturen zu einer erheblichen Fehlinterpretation der resultierenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen führen.

Mithilfe einer zu entwickelnden Auswertemethode soll das autogene Schwinden, welches direkt spannungsinduzierend wirkt, exakt und reproduzierbar auch bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen bestimmt werden. Hierbei kann auf die Ermittlung der *time zero* in einem parallelen Versuch verzichtet werden, da der Startpunkt direkt aus der Verformungsmessung abgeleitet wird. Dazu werden charakteristische Punkte aus den gemessenen Verformungen ermittelt und den Ergebnissen aus den dehnungsbehinderten Untersuchungen mit dem Schwindringverfahren gegenübergestellt. Eine hinreichende Übereinstimmung der so ermittelten Startpunkte vorausgesetzt, kann damit immer eine exakte und nur für die einzelne Prüfung gültige *time zero* bestimmt werden. Darauf aufbauend werden Prüfgrundsätze formuliert, die bei der Verwendung einzelner Prüfverfahren beachtet werden müssen, um die Angabe reproduzierbarer praxisrelevanter spannungsinduzierender autogener Schwindverformungen zu ermöglichen. Dadurch wird zudem eine Bewertung der teilweise konträren Hypothesen aus der Literatur zum Einfluss der Temperatur auf das autogene Schwinden erwartet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen darüber hinaus als Grundlage für die Entwicklung eines normativ geregelten Prüf- und Auswerteverfahrens für spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Grouted Joints dienen. Die Berücksichtigung der autogenen Schwindverformungen in einer Richtlinie für Grouted Joints ist zwingend erforderlich, da die rechnerische Abschätzung des Eurocodes (DIN EN 1992-1-1) deutlich geringere Werte liefert, als die tatsächlich gemessenen und zudem die Verwendung von schwindreduzierenden Zusätzen nicht berücksichtigt werden kann. Ein einheitliches Verfahren ermöglicht es der Praxis die unter speziellen Offshorebedingungen auftretenden Schwindverformungen zu ermitteln und die mögliche Rissbildung sowohl in axialer als auch in radialer Richtung abzuschätzen. So kann, je nach Anwendungsfall, das geeignete Vergussmaterial ausgewählt und die entsprechenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindwerte für die Bemessung zur Verfügung gestellt werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Zunächst werden in Kapitel 2 die in der Literatur dokumentierten Grundlagen und Erkenntnisse zum autogenen Schwinden von Hochleistungsmörteln- und betonen zusammengestellt. Hierbei werden die Hydratationsvorgänge und die in der frühen Phase auftretende Verformungen näher beschrieben, um die einzelnen Schwindar-

ten klar voneinander trennen zu können. Anschließend werden die wesentlichen materialspezifischen Einflüsse auf die autogenen Schwindverformungen herausgearbeitet. Weitergehend werden die verschiedenen Arten der Verformungsmessung in der frühen Phase der Hydratation erläutert und auf deren Eignung hin überprüft. Neben den existierenden Prüfverfahren findet eine detaillierte Diskussion über den Startpunkt der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen statt.

In Kapitel 3 wird die Notwendigkeit der experimentellen Untersuchungen erläutert und das Versuchsprogramm sowie die geplante Vorgehensweise vorgestellt. Weiterhin werden Voruntersuchungen präsentiert, die zum einen der Charakterisierung der verwendeten Materialien dienen und zum anderen auf Besonderheiten bei den einzelnen Prüfaufbauten hinweisen. Abschließenden werden die Grundlagen für die Auswertung der Untersuchungsergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Das folgende Kapitel 4 umfasst sämtliche Versuchsergebnisse der eigenen Untersuchungen, die vorgestellt und ausgewertet werden. Besonderer Fokus liegt dabei zu Beginn auf der Bestimmung des Startzeitpunktes der spannungsinduzierenden Schwindverformungen, der anhand der Ergebnisse aus den dehnungsbehinderten Untersuchungen verifiziert wird. Mit der ausgewählten Auswertemethode folgt im Anschluss die Identifizierung der prüftechnischen Einflüsse unter Variation der einzelnen Prüfverfahren. Darauf aufbauend wird der Temperatureinfluss unter quasi- und nicht-isothermen Prüfbedingungen systematisch untersucht. Zur Absicherung der Erkenntnisse werden dabei nicht nur die Ergebnisse der freien sondern auch der dehnungsbehinderten Schwindverformungen berücksichtigt.

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem vorherigen Kapitel werden in Kapitel 5 die prüftechnischen Einflüsse auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen diskutiert. Dabei werden die jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Prüfverfahren gegenübergestellt und abschließend die Übertragbarkeit der Prüfbedingungen im Labor auf reale Verhältnisse im Bauteil geprüft.

Nachfolgend werden in Kapitel 6 die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zum Temperatureinfluss diskutiert und Hypothesen zum Einfluss der Temperatur vorgestellt.

Kapitel 7 beinhaltet neben der Beschreibung der entwickelten Prüf- und Auswertemethode auch ein Anwendungsbeispiel mit schwindreduzierenden Zusätzen.

Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

Kapitel 2

Stand der Forschung

2.1 Hydratationsprozesse

Portlandzementklinker ist ein hydraulisches Bindemittel, welches durch die Zugabe von Wasser nicht nur an der Luft sondern auch unter Wasser reagiert und erhärtet. Die Reaktivität des Zements entsteht durch das Brennen der Hauptbestandteile Ton und Kalkstein, wodurch die Klinkerminerale Tricalciumsilicat (C_3S), Dicalciumsilicat (C_2S), Tricalciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferriten (C_4AF) entstehen. Die einzelnen Klinkerphasen unterscheiden sich sowohl in der Reaktionsgeschwindigkeit als auch am Beitrag an der Festigkeitsentwicklung des Zementsteins [VDZ02]. C_3S als Hauptbestandteil des Klinkers reagiert direkt nach dem Kontakt mit Wasser und beeinflusst damit wesentlich das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten. Die Festigkeitsentwicklung beruht auf der Bildung von kurzfasrigen Calciumsilikathydraten (CSH), die durch die langsam ablaufende Hydratation von C_2S erst im höheren Alter beeinflusst wird. Die enthaltenen Aluminate beeinflussen im Wesentlichen das Erstarren des Zementleims und tragen wenig zur späteren Festigkeit bei [Grü01].

Zur Abschätzung des Reaktionsfortschritts kann der Hydratationsgrad des Zements bestimmt werden. Dieser gibt an, wieviel des enthaltenen Zements zu einem bestimmten Zeitpunkt reagiert hat. Aufgrund der wachsenden Wasserfilmdicke bei steigendem w/z-Wert ist der Hydratationsgrad bei höheren w/z-Werten tendenziell größer als bei niedrigen w/z-Werten, wobei der Wert von 1,0 lediglich theoretisch erreicht werden kann. Reiner Portlandzementklinker benötigt zur vollständigen Reaktion näherungsweise 40 % seiner Masse an Wasser bei einem Hydratationsgrad von 1,0 [Pow47z]. Dabei werden annähernd 25 % des Wassers in die entstehenden Hydratphasen eingebaut und sind somit chemisch gebunden. Das sogenannte Zementgel kann selbst bei dichtester Packung den Raum nicht vollständig ausfüllen, wodurch die restlichen 15 % des Wassers in die verbleibenden Zwischenräume eingelagert. Durch die hohen Oberflächenkräfte innerhalb der sehr feinen Gelporen (≤ 2 nm) ist dieses Wasser physikalisch gebunden, wodurch die Reaktion zwischen unhydratisiertem Zement und dem in den Gelporen enthaltende Wasser bei normalen Umgebungstemperaturen verhindert wird. Ohne diesen Anteil an Gelporenwasser kann der Zement nicht vollständig hydratisieren [VDZ02]. Ab einem w/z-Wert größer als 0,40 und einem theoretischen Hydratationsgrad von 1,0 verbleibt immer unge-

bundenes Wasser innerhalb des Zementsteingefüges. Aus dem sogenannten „Überschusswasser“ entstehen die Kapillarporen, deren Anteil mit steigendem w/z-Wert stark anwächst.

Direkt nach dem Mischen von Zement und Wasser entsteht in der Regel flüssiger Zementleim, dessen Steifigkeit im weiteren Verlauf kontinuierlich bis hin zum Übergang in den festen Zementstein zunimmt. Dabei verändert sich fortlaufend der Verformungswiderstand des Zementleims, welcher in drei Hydratationsstadien unterteilt werden kann (vgl. Abbildung 2-1). Wird keine äußere Energie (z.B. Rüttelenergie) in den Leim eingebracht, führen die direkt nach Wasserzugabe beginnenden Hydratationsreaktionen zu einem Ansteifen des Leims. Durch das Einbringen von Rüttelenergie kann der ansteifende Zementleim wieder verflüssigt werden. Nach dem Ansteifen beginnt die Phase der Erstarrung, wobei die Bestimmung des Erstarrungsbeginns und des Erstarrungsendes in [DIN196_3] geregelt ist und durch den Widerstand gegenüber dem Eindringen einer beschwerten Nadel bestimmt werden kann. Die nach dem Erstarrungsende fortschreitende Verfestigung des Gefüges wird als Erhärten bezeichnet, wobei ab diesem Zeitpunkt erste Festigkeitswerte ermittelt werden können.

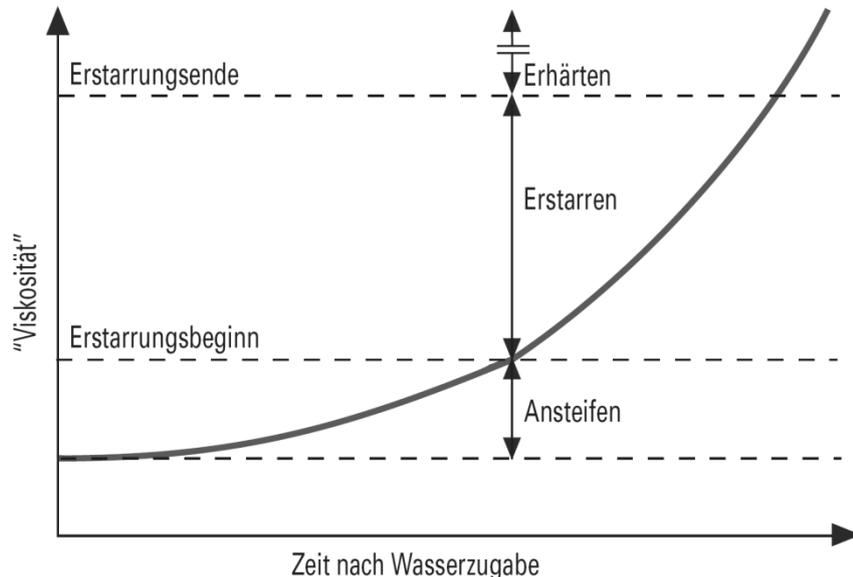


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zementleim aus [VDZ02]

Die Hydratation eines Zements ist immer eine exotherme Reaktion, deren Temperaturabhängigkeit allgemein mit der Arrhenius-Funktion beschrieben werden kann. Im Bereich des Betons wird vom Begriff der „Reife“ gesprochen, wobei davon ausge-

gangen wird, das Betone gleicher Reife die gleiche Druckfestigkeit aufweisen. Mit Hilfe der Bestimmung der Aktivierungsenergie des betrachteten Bindemittels ist eine Abschätzung der Festigkeitsentwicklung eines Betons bei unterschiedlichen Erhärtungstemperaturen möglich [Grü01]. Dafür stehen mehrere Ansätze zur Verfügung, wobei die „gewogene Reife“ ermittelt mit der CEMIJ-Methode sowohl die verlangsamende Wirkung niedriger Temperaturen als auch die beschleunigende Wirkung hoher Temperaturen bezogen auf 20 °C abbilden kann.

Bezogen auf die Zeit ergeben sich bei höheren Lagerungstemperaturen schneller nennenswerte Festigkeiten als bei niedrigeren Lagerungstemperaturen. Dieser Effekt dreht sich in der Regel bei der Betrachtung der Festigkeiten im hohen Alter um. So wurde in [Bon66], ausgehend von einer Erhärtung nach Norm (20 °C), bei einer geringeren Lagerungstemperatur eine höhere und bei einer höheren Lagerungstemperatur eine niedrigeren Druckfestigkeit festgestellt. Zum einen gibt [Ric69] als Ursache dafür, Unterschiede im Anteil an festigkeitssteigernden langfaserigen Calciumsilikathydraten, die sich bei geringerer Temperatur vermehrt ausbilden, an. Zum anderen spricht [Loc00] von festigkeitsmindernden Gefügespannungen, die bevorzugt bei schnellerer Erhärtung, also höherer Temperatur, auftreten.

Die unterschiedlichen Umgebungstemperaturen beeinflussen damit den Hydratationsprozess selbst und somit auch direkt das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten des Zementleims. Unabhängig von der Temperatur führt auch die Änderung der Art und Zusammensetzung des Bindemittels zu einem geänderten Hydratationsprozess, weswegen die Reifermittlung immer nur für das gleiche Material gilt. Den größten Einfluss haben dabei in der Regel die PCE-Fließmittel, die durch deren dispergierende Wirkung die Flockenstruktur der Zementpartikel auflösen und dadurch stark verflüssigend wirken [Röß06]. Durch sterische und elektrostatische Effekte werden die einzelnen Zementpartikel auf Abstand gehalten, wodurch sich ebenfalls die Zeit bis zum Vernetzen der sich bildenden CSH-Phasen verlängert, was letztlich die Erhöhung der Erstarrung des Zementleims zur Folge hat. Bezogen auf die Festigkeitsentwicklung wurde in Untersuchungen aus [Röß06] festgestellt, dass PCE-Fließmittel bei konstantem Wassergehalt zu einer Verdichtung des Gefüges im Vergleich zur Referenz beitragen können. Durch die dispergierende Wirkung des Fließmittels werden die einzelnen Abstände der Zementpartikel verringert und somit der Porenraum vermindert.

2.2 Chemisches Schwinden

Durch die chemische Reaktion von Portlandzement und Wasser entstehen Hydratationsprodukte, die ein geringeres Volumen als die beteiligten Ausgangsstoffe einnehmen. Die Volumenverringerung beruht auf den unterschiedlichen Bindungsfor-

men des Wassers innerhalb des Zementsteins. Zur vollständigen Hydratation werden je nach Lagerungsbedingung der Probe theoretisch zwischen 36 und 42 % der Zementmenge an Wasser benötigt. Mit Hilfe des von Powers und Brownyard entwickelten Modells [Pow47] können die einzelnen Anteile des Zementsteins in Abhängigkeit vom w/z-Wert und vom Hydratationsgrad bestimmt und der Anteil des chemischen Schwindens berechnet werden.

Die Gültigkeit der Kernaussagen des Modells ist bis heute gegeben und wurde bislang von zahlreichen Autoren verwendet, immer wieder experimentell bestätigt sowie in [Bro04] überarbeitet. [Pow47] sehen in ihrem Modell die Unterteilung des Zementsteins in unhydratisiertem „Zement“, „Hydratationsprodukte“ und „Poren“ vor, deren Volumenanteile sich aus den im Modell verwendeten Berechnungsansätzen ergeben. Grundsätzlich wird das Anmachwasser während der Hydratation chemisch, physikalisch adsorptiv und als flüssiges Wasser in den Hohlräumen des Zementsteins gebunden. Dabei wird eine Unterteilung des Wassers innerhalb des Zementsteins in „verdampfbares“ und „nicht verdampfbares“ vorgenommen, wobei die beiden Anteile nicht unabhängig voneinander sind und daher stets im gleichbleibenden Verhältnis vorliegen [Pow47]. Die Austreibung des verdampfbares Wassers wurde dabei unter Vakuum mit Zugabe von dem Trocknungsmittel Magnesiumperchlorat durchgeführt. Dabei liegt das verdampfbare Wasser in den feinen Gelporen der Hydratationsprodukte vor und wird deswegen auch oft als „Gelwasser“ oder auch „physikalisch gebundenes Wasser“ bezeichnet. Mittels Glühen bei 1000 °C kann der noch verbleibende nicht verdampfbare Wasseranteil bestimmt werden. Obwohl sich durch dieses experimentelle Vorgehen nicht der gesamte Teil des „chemisch gebundenen Wassers“ ermitteln lässt, wird dieser Anteil von Powers und Brownyard dennoch näherungsweise als das chemisch gebundene Wasser angesehen [Not07]. Das nicht für die Hydratation benötigte Wasser wird „Überschusswasser“ oder auch „Kapillarwasser“ genannt, was zur Ausbildung der Kapillarporen führt.

Mit Hilfe des Modells von Powers [Pow47] lassen sich die einzelnen Bestandteile bzw. die volumetrische Zusammensetzung des Zementsteins berechnen. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass 1 g Zement maximal 0,23 g nicht verdampfbare Wasser binden kann. Dabei ist die Dichte des nicht verdampfbares Wassers mit $\rho=1,35 \text{ g/cm}^3$ größer 1,0, woraus sich rechnerisch ermitteln lässt, dass aus 1 g Zement genau $0,49 \text{ cm}^3$ Hydratationsprodukte gebildet werden können [Ada06]. Nach dem Powers/Brownyard-Modell besteht 1 cm^3 Zementstein aus ca. $0,72 \text{ cm}^3$ Hydratationsprodukte und ca. $0,28 \text{ cm}^3$ sich zwangsläufig ausbildende Gelporen. Die 28 Vol.-% bezogen auf den Anteil des hydratisierten Zements sind dabei unabhängig vom Wasserzementwert und vom Hydratationsgrad des Zements selbst [Bea92]. Das sogenannte Gel/Zement-Verhältnis ergibt sich daraus zu 2,13, was bedeutet, dass

sich aus 1 cm³ vollständig hydratisiertem Zement 2,13 cm³ Hydratationsprodukte und darin eingeschlossene Gelporen bilden. Daraus ergibt sich die minimal notwendige Wassermenge, die zur vollständigen Hydratation benötigt wird zu 0,36 g/g Zement. Dieser Wert konnte mit einem experimentellen Ergebnis von 0,38 g/g Zement nahezu bestätigt werden.

Durch die Hydratationsreaktion kommt es bei reinem und wasserfreiem Portlandzementklinker bei vollständiger Hydratation zu einer Volumenverringerung. Aufgrund der unterschiedlichen Dichten des Anmachwassers und des nicht verdampfbaren Wassers ergibt sich innerhalb des Zementsteins ein unvermeidbarer Porenraum, der auch als „Schrumpfporenraum“ bezeichnet wird. Rechnerisch ergibt sich dabei ein Volumen von 0,06 cm³/g Zement oder 0,19 cm³ je cm³ Zement. Eine gewisse Probekörpergeometrie sowie Porigkeit vorausgesetzt, wird bei der Lagerung der Proben unter Wasser in diesen so entstandenen Porenraum Wasser gesaugt. Liegt der ursprüngliche Wassergehalt unterhalb des minimal notwendigen, kann der Zement durch das zusätzlich angesaugte Wasser trotzdem vollständig hydratisieren.

Wird die Probe hingegen an der Luft oder konservierend gelagert, saugt der entstehende Porenraum nicht Wasser, sondern Luft an. Die Ausbildung von luft- oder wasserdampfgefüllten Schrumpfporen steigert somit die Porosität des Zementsteins und damit auch seinen Raumbedarf. Dementsprechend erhöht sich auch das Gel/Zement-Verhältnis auf 2,32 cm³/cm³. Daher ändert sich ebenfalls die minimal notwendige Wassermenge auf einen Wert von 0,42 g/g Zement.

Je nach Zusammensetzung des verwendeten Zements variiert der Anteil des chemischen Schwindens jedoch. [Pow85] gelang es, das chemische Schwinden der einzelnen Klinkerphasen experimentell zu ermitteln und stellte beim Tricalciumaluminat das größte chemische Schwinden fest. Die Reduzierung der Menge des Tricalciumaluminats im Zement hat folglich die Reduzierung des chemischen Schwindens zur Folge. In Tabelle 2-1 sind die nach 28 Tagen ermittelten Volumenveränderungen der einzelnen Klinkerphasen (bezogen auf 100 g Portlandzement) dargestellt.

Tabelle 2-1: Chemisches Schwinden der einzelnen Klinkerphasen aus [Pow85]

Klinkerphase	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
chemisches Schwinden [cm ³ /100 g]	4,81	2,02	10,91	2,47

Zur Darstellung der Volumenverhältnisse innerhalb des Zementseins sind neben den volumetrischen Zusammenhänge aus [Pow47] zwei vereinfachende Grundbedingun-

gen aus [Han70] notwendig. Dabei wird angenommen, dass ausreichend freier Porenraum zur Bildung der Hydratationsprodukte sowie genügend Wasser für die Hydratation zur Verfügung stehen. Daraus ergeben sich die volumetrischen Anteile bezogen auf das Ausgangsvolumen der Reaktanten Zement und Wasser bei unterschiedlicher Lagerung und unterschiedlichem Hydratationsgrad (vgl. Abbildung 2-2).

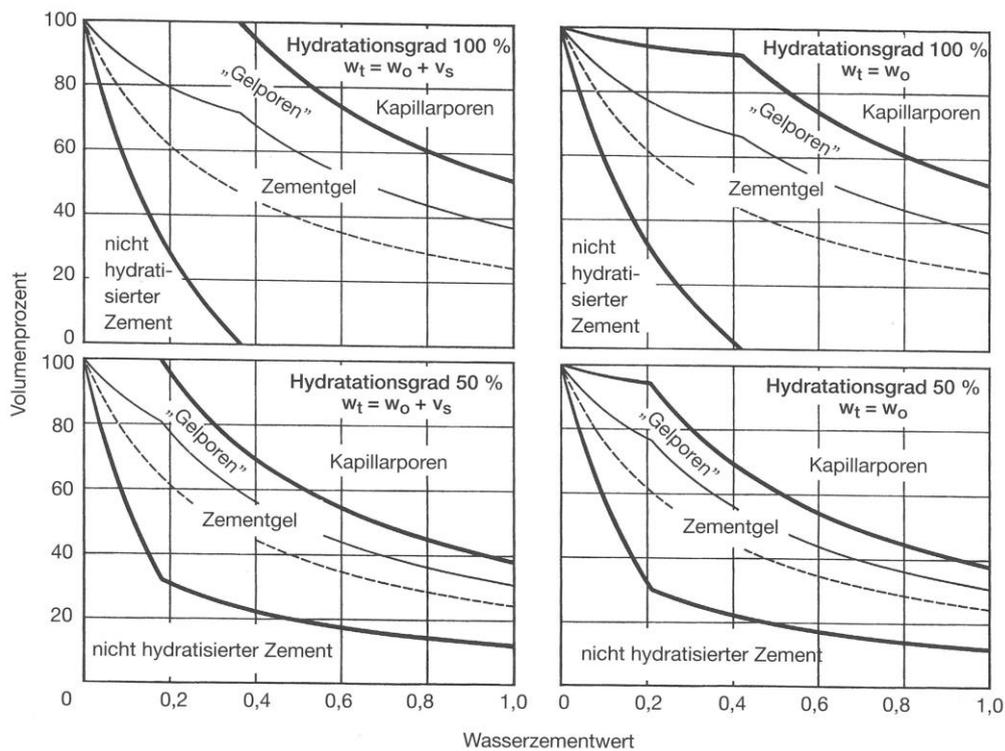


Abbildung 2-2: Volumenanteile bei Lagerung unter Wasser (links) und Lagerung an der Luft (rechts) bei jeweils unterschiedlichen Hydratationsgraden aus [Loc00]

Bei den luftgelagerten Proben bilden sich auch bei einem Hydratationsgrad von 1,0 immer Kapillarporen. Das hängt damit zusammen, dass die Schrumpfporen mit einem Volumen von $0,06 \text{ cm}^3/\text{g}$ Zement größtmäßig zu den Kapillarporen zählen. Weiterhin geht [Loc00] davon aus, dass diese Poren nicht mehr mit Hydratationsprodukten ausgefüllt werden können. Sobald die minimal notwendige Wassermenge unterschritten wird, steigt der Anteil an unhydratisiertem Zement an, wodurch die innere Selbstaustrocknung verstärkt wird.

2.3 Autogenes Schwinden

Die durch das chemische Schwinden entstandenen Schrumpfporen können bei Wasserlagerung, abhängig von der Porosität des entstehenden Zementsteins, Was-

ser ansaugen. Dadurch können nach der Erstarrung keine äußerlich messbaren Verformungen mehr festgestellt werden [Loc00]. Bei konservierender Lagerung hingegen ist kein Austausch von Wasser mit der Umgebung möglich, wodurch es zu einer Verringerung der relativen Luftfeuchte im Inneren kommt und der Zementstein sich gewissermaßen von innen heraus selbst austrocknet und sich in der Folge zusammenzieht. Dieses Phänomen wird im Allgemeinen als „autogenes Schwinden“ bezeichnet, dessen Größe abhängig von der ausgebildeten Porenstruktur und dem mechanischen Widerstand des Zementsteins ist. Weiterhin ist bei höherfesten Materialien die Porosität so gering, dass selbst bei Wasserlagerung kein ausreichender Transport von Wasser ins Innere des Probekörpers möglich ist, wodurch die Art der Lagerung keinen Einfluss auf das autogene Schwinden hat [Not07].

Das autogene Schwinden ist laut [Taz00] eine „makroskopisch messbare Verformung“, die während der Zementhydratation nach dem Erstarrungsbeginn auftritt. Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, sind die Volumenveränderungen aus chemischem und autogenem Schwinden zu Beginn der Hydratation quasi identisch, was u.a. in [Boi99] ermittelt wurde. Das chemische Schwinden führt laut [Grü01] ab dem Zeitpunkt des Erstarrens nicht mehr zu äußerlich messbaren Verformungen, sondern zur Ausbildung von Schrumpfporen innerhalb des erhärtenden Zementsteins. Dieser Vorgang endet erst mit dem Ende der Hydratation und kann, volumetrisch betrachtet, bis zu 50-mal so groß sein wie das autogene Schwinden [Jen01a]. Somit lässt sich die Längenänderung eines erhärteten und konservierend gelagerten Zementsteins, der sich immer aus einem Anteil an Hydratationsprodukten, unhydratisiertem Zement, chemisch und physikalisch gebundenem Wasser sowie unterschiedlichen Poren zusammensetzt, auf das autogene Schwinden zurückführen.

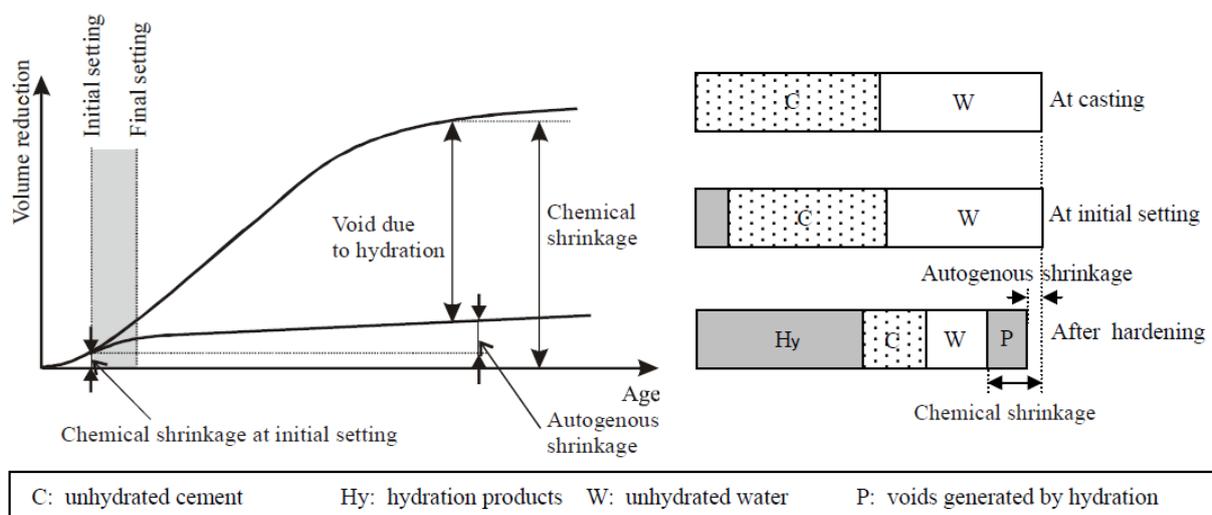


Abbildung 2-3: Übersicht über das chemische und das autogene Schwinden aus [Taz95z]

Das autogene Schwinden wird bei sehr niedrigen w/z -Werten ($< 0,4$) beobachtet und steigt mit weiterer Reduzierung des Wassergehaltes und bei der Zugabe von puzzolanisch-reagierenden Zusatzstoffen wie z.B. Microsilica. Obwohl das Phänomen schon über 50 Jahre bekannt ist und bis dato zahlreiche Veröffentlichungen zu diesem Thema existieren, sind die zu Grunde liegenden Mechanismen bisher noch nicht abschließend geklärt. Ein allgemeiner Konsens besteht allerdings darüber, dass ein Zusammenhang zwischen dem autogenen Schwinden und der Abnahme der relativen Luftfeuchte innerhalb des Porengefüges besteht [Lur03b], was in weiteren Forschungsarbeiten bestätigt wurde [Lou99], [vBre01], [Naw04] und [Jia05]. Dabei besteht die Auffassung, dass die entstehenden meist luftgefüllten Schrumpfporen den größeren Poren das Wasser entziehen und dieser Vorgang in Verbindung mit dem Hydratationsprozess zum Absinken der relativen Luftfeuchte innerhalb des Zementsteingefüges führt. Zu Beginn der Hydratation kommt es abhängig von Zementart, w/z -Wert, Zusatzstoffen und Umgebungstemperatur, zu einer deutlichen Verringerung der inneren Luftfeuchte, wobei die Kurve im weiteren Verlauf zunehmend abflacht. In diesem Zusammenhang wurde in [Jen99] festgestellt, dass die relative Luftfeuchte in zementgebundenen Systemen durch die innere Selbstaustrocknung nicht unter etwa 75 % sinken kann. Untersuchungen von [Pow47z] bestätigen, dass ab diesem Wert die Zementhydratation gehemmt wird und somit auch keine weitere Porenbildung innerhalb des Zementsteingefüges stattfindet.

2.4 Einflüsse auf das autogene Schwinden

Das autogene Schwinden wird wesentlich von der Zementart, dem Wassergehalt sowie der Art der enthaltenden Zusatzstoffe und -mittel beeinflusst. Mit der Wahl eines anderen Zements ändern sich in der Regel auch die Anteile der unterschiedlichen Klinkerphasen, die wiederum zu unterschiedlichen Volumenverringerungen führen [vgl. Tabelle 2-1] und dadurch die autogenen Schwindverformungen beeinflussen. Ein sinkender Wassergehalt führt neben der Erhöhung des Anteils an unhydratisiertem Zement zu einer Verfeinerung des Porengefüges und somit zu einer Steigerung des autogenen Schwindens (vgl. Kapitel 2.3). Ähnliches gilt für die Zugabe von Microsilica, welches ebenso wie Zement nach der Reaktion ein geringeres Volumen einnimmt als die beiden Ausgangsstoffe [Jen96a] und zusätzlich durch die geringe Partikelgröße zu einer Verfeinerung des Porengefüges [Bec96] und dadurch direkt und indirekt zur Erhöhung des autogenen Schwindens beiträgt.

2.4.1 Zement, Zusatzstoffe und -mittel

Die Zusammensetzung eines Portlandzements hat aufgrund der unterschiedlichen Anteile einzelner Klinkerphasen großen Einfluss auf das chemische Schwinden eines

entsprechend zusammengesetzten Zementleims. Die Beeinflussung des chemischen Schwindens wirkt sich aufgrund der veränderten Ausbildung des Porengefüges zwangsläufig auf das autogene Schwindverhalten des Leims aus. Darüber hinaus hat auch die Zementart einen Einfluss auf das autogene Schwinden. Je nach Zementart variiert sowohl der Anteil an reinem Portlandzementklinker als auch die dem reinen Portlandzement beigemischten Zusatzstoffe. So wurde in [Sch00] festgestellt, dass drei unterschiedliche Zemente mit derselben Festigkeitsklasse (42,5 N/mm²) und einem Wasserzementwert von 0,35 unterschiedliche autogene Schwindwerte erreichen. Der höchste Endschwindwert ergab sich beim reinen Portlandzement (-0,32 ‰), wobei dieser damit über doppelt so hoch war wie beim Portlandhüttenzement (-0,15 ‰) und immer noch höher als beim Portlandkalksteinzement (-0,20 ‰). Der Einfluss der Substitution des Portlandzementklinkers wurde dabei nicht näher betrachtet. Beim Verlauf der Schwindverformungen des Portlandhüttenzements konnte zu Beginn der Messung ein Quellen des Probekörpers beobachtet werden, welches dann in der Folge in eine Schwindverformung überging und der Verformungsverlauf erst nach ca. sechs Tagen nach Messbeginn die Abszissenachse geschnitten hat.

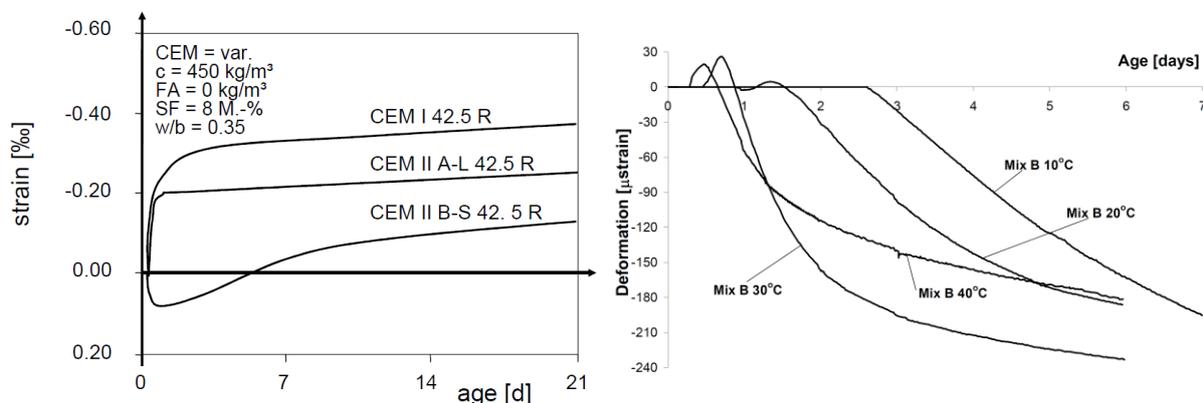


Abbildung 2-4: Effect of cement type on the free autogenous shrinkage aus [Sch00]; Autogenous deformation of Mix B (BFS cement) cured at different temperatures aus [Lur03a]

Neben der Zementart sind zur optimalen Abstimmung des Mehlkornbereiches heutiger Hochleistungsmörtel und -betone noch weitere Zusatzstoffe bzw. -mittel erforderlich. Der Zusatzstoff Microsilica wirkt aufgrund der puzzolanischen Reaktion und des Füllereffekts festigkeitssteigernd und wird daher oft bei Hochleistungsmörteln und -betonen eingesetzt. Microsilica zählt zu den künstlichen Puzzolanen und wird bei der Siliziumproduktion durch Filterung der Elektrodenabluft gewonnen. Die hohe puzzolanische Reaktion ergibt sich zum einen aus dem Gehalt an reaktivem amor-

phen Siliziumdioxid (bis zu 95 %) und zum anderen an der Größe der zur Verfügung stehenden reaktiven Oberfläche. Mit einer nahezu runden Kornform und einem mittleren Korndurchmesser von ca. $0,1 \mu\text{m}$ ist ein Microsilicapartikel etwa 100-mal kleiner als ein Zementkorn [Bec96]. Daraus ergeben sich die Größe der Oberfläche, die für die Reaktion zur Verfügung steht sowie der Füllereffekt. Durch den Größenunterschied können Zwischenräume, die selbst bei dichtester Packung der Zementkörner entstehen, mit Microsilica gefüllt und somit die Packungsdichte der Zusammensetzung erhöht werden. Die Zugabe von Microsilica führt zu einer Erhöhung des autogenen Schwindens. Das Siliziumdioxid reagiert im Laufe der Hydratation mit dem gelösten CH aus der Zementreaktion zu festigkeitsbildenden C-S-H-Phasen. Dabei verlieren die Ausgangsprodukte an Volumen, wobei in der Literatur Volumenverringereungen von $20 \text{ ml}/100 \text{ g SiO}_2$ festgestellt wurden, die deutlich höher sind als beim reinen Portlandzement mit $5\text{-}7 \text{ ml}/100 \text{ g Zement}$ [Jen96a]. Weiterhin führt die Zugabe von Microsilica aufgrund der oben genannten Gründen zu einer Verfeinerung des Porengefüges. Mit der Reduzierung der mittleren Porendurchmesser erhöhen sich die kapillaren Zugspannungen innerhalb des Gefüges, was zwangsläufig zu einer Erhöhung der autogenen Schwindverformungen führt. Die Ergebnisse aus Abbildung 2-5 zeigen neben der veränderten relativen Luftfeuchte innerhalb des Zementsteins eine Erhöhung der autogenen Verformungen um ca. $1000 \mu\text{m}/\text{m}$ durch die Zugabe von 10 % Microsilica.

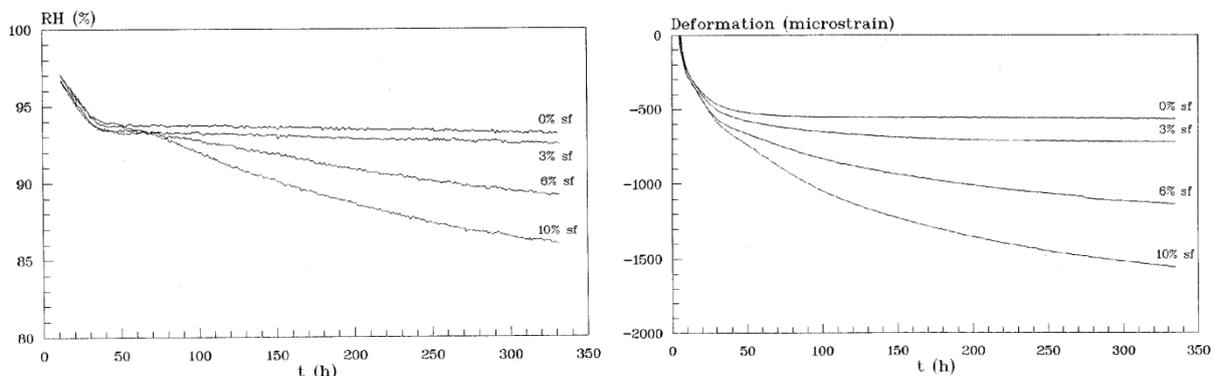


Abbildung 2-5: Relative Luftfeuchte und autogene Verformungen eines Zementleims mit $w/c = 0,3$ und unterschiedlichen Microsilicagehalten bei einer Prüftemperatur von $30 \text{ }^\circ\text{C}$ aus [Jen96a]

Weiterhin enthalten die zum autogenen Schwinden neigenden Hochleistungsmörtel und -betone zur Sicherstellung der Fließfähigkeit in der Regel hochwirksame PCE-Fließmittel. Die Fließmittelmoleküle bewirken aufgrund von sterischen Effekten eine Aufspaltung der Agglomerate und halten die einzelnen Zementpartikel zu Beginn auf Abstand. Durch die Anlagerung der Fließmittelmoleküle wird die Reaktion

mit dem Wasser anfänglich gehemmt und die Hydratation somit verzögert [Daa16]. Mit zunehmender Zeit verlieren die Fließmittelmoleküle ihre Wirkung [Sch15] und ein Vernetzen der wachsenden CSH-Phasen setzt ein, wodurch die Hydratationsgeschwindigkeit ansteigt. Ab diesem Zeitpunkt haben die Fließmittelmoleküle keinen weiteren Einfluss mehr auf die Hydratation und verzögern damit lediglich den Erstarrungsbeginn bzw. das Erstarrungsende. Durch Auflösung der Agglomerate kommt es auch im Mehlkornbereich zu einer dichteren Packung der einzelnen Partikel, womit eine Reduzierung des Anteils an Kapillarporen und damit eine Verfeinerung des entstehenden Porengefüges einhergeht. [Taz95z] stellte jedoch eine minimale Verringerung des autogenen Schwindens durch die Zugabe von hochwirksamen PCE-Fließmitteln fest, wobei er vermutete, dass diese aus dem veränderten Hydrationsverlauf resultieren.

Während auf die Zugabe von Fließmitteln bei der Anwendung von Hochleistungsmörteln und -betonen nicht verzichtet werden kann, ist darüber hinaus die gezielte Zugabe von speziellen Zusatzmitteln, die eine Reduzierung der autogenen Schwindverformungen bewirken, möglich. Dabei kommen neben Superabsorbent-Polymers (SAP) auch Shrinkage-Reducing-Admixtures (SRA) zum Einsatz. Sogenannte superabsorbierende Polymere (SAP) wurden in den 80er Jahren entwickelt und fanden hauptsächlich im Sanitär- und Hygienebereich Anwendung. Die durch Polymerisation entstehende Partikel mit einer Größe von 100 μm - 300 μm besitzen durch die sehr hohe Dichte anionischer funktionaler Gruppen die Fähigkeit, große Mengen an Wasser zu binden [Jen01]. Die in Mörteln und Betonen eingesetzten SAP müssen so konzipiert sein, dass sie zum einen eine ausreichende Stabilität gegenüber dem alkalischen Milieu sowie den gelösten Ionen innerhalb des Zementleims besitzen. Zum anderen müssen die SAP mechanisch so stabil sein, dass sich deren Wirkungsweise durch den Mischvorgang mit den Ausgangsstoffen und durch das anschließende Verarbeiten nicht verändert. Mit der Verwendung von SAP werden sowohl die Frisch- als auch die Festbetoneigenschaften verändert. Je nach Art der Zugabe der SAP-Partikel (trocken oder wassergesättigt) kommt es zu einer Verschlechterung der Verarbeitung des Frischbetons, wobei der Einfluss mit sinkendem w/z-Wert ansteigt. Zur Kompensation dieses Effekts wird der Zusammensetzung in der Regel zusätzliches Wasser hinzugefügt oder mit der Zugabe von hochwirksamen PCE-Fließmitteln kompensiert. Nach [Mön09] führt die zweite Variante weiterhin zur Steigerung der Dauerhaftigkeitseigenschaften und zur Reduzierung der mittleren Porenradien innerhalb des Zementsteins. Grundsätzlich beruht die Reduzierung des autogenen Schwindens durch die Zugabe der SAP auf einer inneren Nachbehandlung des Zementsteins. Durch geringe w/z-Werte erhöht sich nicht nur das Potential der inneren Selbstaustrocknung, sondern auch die Porosität des Zementsteins. Dadurch ist eine Nachbehandlung im klassischen Sinne bis ins Bauteilinnere nicht

mehr möglich. Mit dem Einbringen von SAP-Partikeln kommt es zu einer Art inneren Nachbehandlung, da die wassergesättigten Partikel das Wasser nicht sofort nach dem Anmischen des Frischbetons abgeben, sondern erst mit Beginn der inneren Austrocknung des erhärtenden Zementsteins [Mec11]. Dadurch werden die nicht-reagierten Zementpartikel mit Wasser versorgt, wodurch die innere Selbst austrocknung und damit das autogene Schwinden verringert wird.

Die verzögerte Wasserabgabe der SAP-Partikel führt ebenfalls dazu, dass der effektive w/z-Wert, bei der Zugabe einer zusätzlichen Wassermenge zur Sicherstellung gleichbleibender Verarbeitungseigenschaften, im Vergleich zur Referenzmischung ohne SAP unverändert bleibt [Mec11]. Daraus ergibt sich, dass der Großteil der Schwindreduktion allein aus der Zugabe der SAP resultieren muss.

Die Zugabe von SAP bewirkt neben der Schwindreduktion eine Veränderung der Hydratationsgeschwindigkeit [Mec12], wodurch es unabdingbar ist, die *time zero* individuell und an jeder Zusammensetzung zu bestimmen. Andernfalls kann es zu deutlichen Fehlinterpretationen über die Wirkungsweise von SAP kommen.

Es existieren mittlerweile zahlreiche Untersuchungen zu mit SAP-modifizierten Mörteln und Betonen, die nahezu alle eine deutliche Schwindreduktion durch die Zugabe von SAP belegen. In [Iga06] werden vergleichende Untersuchungen an Zementleimen und Betonen durchgeführt, die zeigen, dass abhängig von der Zugabemenge der superabsorbierenden Polymere unterschiedliche autogene Schwindverformungen resultieren (vgl. Abbildung 2-6). Zum einen wird deutlich, dass die Zugabe von SAP eine deutliche Reduktion (bis zu 90 %) der autogenen Schwindverformungen bewirkt und zum anderen eine Diskrepanz bei der Reduktion der autogenen Verformungen zwischen Leimen und Betonen besteht. Zweiteres wird in Kapitel 2.4.2 näher behandelt. Weiterhin lässt sich auf der rechten Seite der Abbildung 2-6 deutlich erkennen, dass die zusätzlich zugegebene Wassermenge zur Sicherstellung der Frischbetoneigenschaften zwar zur Verringerung der effektiven Schwindreduktion führt, aber dennoch ausgeschlossen werden kann, dass die Reduktion auf der zusätzlichen Wasserzugabe resultiert. Die Mischungen mit SAP und zusätzlicher Wassermenge zeigen weiterhin ein geringeres autogenes Schwinden als die Referenzzusammensetzung mit zusätzlicher Wassermenge ohne eine SAP-Zugabe.

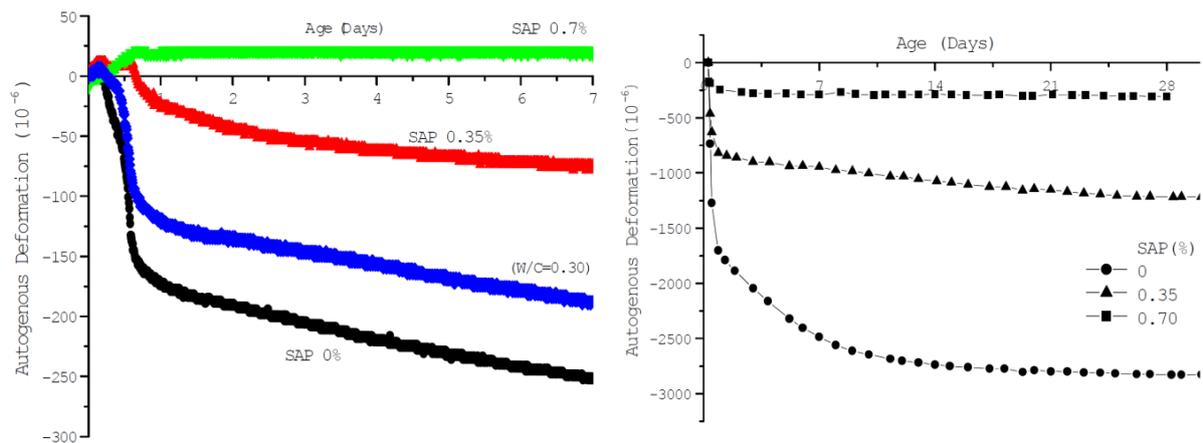


Abbildung 2-6: Autogenous deformation of ordinary cement pastes (links) and silica fume-containing cement pastes (rechts) both with different amounts of SAP aus [Iga06]

Eine weitere Möglichkeit zur Minimierung der autogenen Schwindverformungen von Hochleistungsmörteln und -betonen mit geringem Wasserzementwert ist die Zugabe von sogenannten Shrinkage-Reducing-Admixtures (SRA). Dabei handelt es sich um organische, wasserlösliche und hygroskopische Stoffe, die die Oberflächenspannung von Wasser herabsetzen [Sch07a]. Die Hauptanwendung dieser Zusatzmittel diente der Reduktion der Längenänderung, die durch den Vorgang des Trocknungsschwindens verursacht wurde. Weiterhin ergab sich ebenfalls eine positive Wirkung der SRA auf die Verminderungen von autogenen Schwindverformungen des Zementsteins. Neben der Reduzierung der Oberflächenspannung des eingelagerten Wassers innerhalb der Poren, kommt es durch den Einsatz der SRA auch zu einer Verfeinerung des Porensystems. Die Kombination von beidem sorgt für eine Erhöhung der inneren relativen Feuchte im Zementstein mit sehr geringen Wasserzementwerten (vgl. [Sch07b]). Dabei vermutet der Autor die Abminderung des durch die Selbst-austrocknung hervorgerufenen Spaltdrucks im Gefüge, was wiederum zu einer Reduzierung der autogenen Schwindverformungen des Zementsteins führt.

2.4.2 Zementleim, Mörtel und Beton

Zusätzlich zu den rein stofflichen Einflüssen ist das autogene Schwindmaß abhängig vom Gehalt des Leims und somit dem Anteil des schwindfähigen Materials am Gesamtvolumen der Zusammensetzung. Die Steigerung des Leimgehalts hat eine Zunahme der absoluten autogenen Verformungen zur Folge. Gleichzeitig verringert sich bei gleichem Volumen der Anteil des nicht schwindfähigen Materials. Abhängig von der Art und Menge der Gesteinskörnung werden die autogenen Schwindverformungen behindert, mit der Folge einer Reduzierung der messbaren Verformungen. In

[Ham02] zeigten vergleichende Verformungsmessungen an einem Beton und dem im Beton enthaltenden Zementleim deutlich Unterschiede. Der reine Zementleim mit einem Volumenanteil von 28 %, erreichte nach 168 h ein etwa zehnmal höheres Schwindmaß als der Beton. Durch verschiedene Einflüsse wie die Fließmittelzugabe zur Einhaltung des Wasserzementwertes, das Porenwasser der Gesteinskörnung und die unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten durch veränderte Abstände der einzelnen Zementpartikel, kann dieses Verhältnis schwanken und ist daher nicht verallgemeinerbar. Dennoch ist die Reduktion bzw. Behinderung der autogenen Schwindverformungen durch die Gesteinskörnung deutlich zu erkennen und ändert sich bei jeder Zusammensetzung. Die Messung des autogenen Schwindens am Zementleim und die Hochrechnung auf den zugehörigen Mörtel oder Beton ist auch bei Kenntnis der Zusammensetzung nicht möglich. Die Tendenzen von festgestellten Effekten ändern sich in der Regel nicht, jedoch können mitunter abweichende Verformungscharakteristika festgestellt werden [Hol01].

Hierbei handelt es sich um eine Verringerung der messbaren Verformungen, nicht jedoch um eine direkte Reduzierung des autogenen Schwindens. Die Gesteinskörnung im Gefüge hat in der Regel einen Anteil von 60-70 Vol.-% und behindert den schwindenden Leim an zahlreichen Stellen. Wird eine nicht schwindende Gesteinskörnung mit einem entsprechenden E-Modul unterstellt, kommt es zu einer Mikrorissbildung innerhalb des Zementsteins [Del00].

Mit der Wahl einer leichten Gesteinskörnung kann sich auch ein gegenteiliger Effekt im Zementstein einstellen. Dabei handelt es sich entweder um natürliche (z.B. Bims) oder industrielle hergestellte (z.B. Blähton) Gesteinskörnung, welche beide meist sehr porös sind und kleinere Steifigkeiten als normale Gesteinskörnung aufweisen. Durch den geringeren E-Modul ergibt sich ein kleinerer Behinderungsgrad des schwindenden Zementsteins. Der entscheidende Effekt bezüglich der Schwindreduktion ergibt sich aus der Möglichkeit die offenporige Gesteinskörnung vor der Herstellung des Mörtels oder Betons mit Wasser zu sättigen. Das zusätzlich eingebrachte Wasser wird während der Hydratation verbraucht und sorgt damit für eine Art innere Nachbehandlung. Die Folge ist sowohl ein geringeres autogenes Schwindmaß als auch eine verringerte Ausbildung von Mikrorissen [Ben01].

2.4.3 Prüftemperaturen

Theoretisch betrachtet, dürften sich Temperaturänderungen nicht auf die Höhe der autogenen Schwindverformungen auswirken, da es lediglich zu einer Änderung der Reaktionsgeschwindigkeit des Systems und damit zu einer Verschiebung der *time zero* kommen sollte. Ob unterschiedliche Temperaturen auch zur Ausbildung einer veränderten Porenstruktur oder zu einer abweichenden inneren Feuchteab-

nahme führt und ob dieses dann in unterschiedlich hohen autogenen Schwindverformungen resultiert, ist bislang nicht bekannt. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse aus Untersuchungen mit variierenden Prüftemperaturen noch über die Zeit vergleichbar sind. Durch die Beeinflussung der Hydratationsvorgänge müsste sich auch die Schwindverformung über die Zeit verändern. Das bedeutet, dass nicht nur der Zeitpunkt der *time zero* verschoben wird, sondern ebenfalls der weitere Schwindverlauf durch unterschiedliche Verformungsgeschwindigkeiten unterschiedlich sein müsste. Wenn es zu einer Verdopplung der Reaktionsgeschwindigkeit kommt und angenommen wird, dass sich die Schwindgeschwindigkeit ähnlich verhält, kann der Schwindwert nach *time zero* bei höherer Temperatur nicht mit dem ermittelten Schwindwert bei niedriger Temperatur zum gleichen Zeitpunkt verglichen werden. Ob allerdings von gleichen autogenen Schwindverformungen in Abbildung 2-7 gesprochen werden kann, ist fraglich, da nach 96 h deutliche Unterschiede zu erkennen sind. Vergleicht man jedoch die Endschwindwerte bei unterschiedlichen Prüftemperaturen zum Zeitpunkt des jeweiligen Messendes ergeben sich bei 10 °C (nach 96 h), 23 °C (nach 168 h) und 36 °C (nach 336 h) mit ca. 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ ähnliche autogene Schwindwerte. Die Zugabe von SRA führt bei unterschiedlichen Prüftemperaturen zu deutlich unterschiedlichen Endschwindwerten selbst bei erhöhter Prüfdauer bei den geringeren Prüftemperaturen (vgl. Abbildung 2-7, rechts).

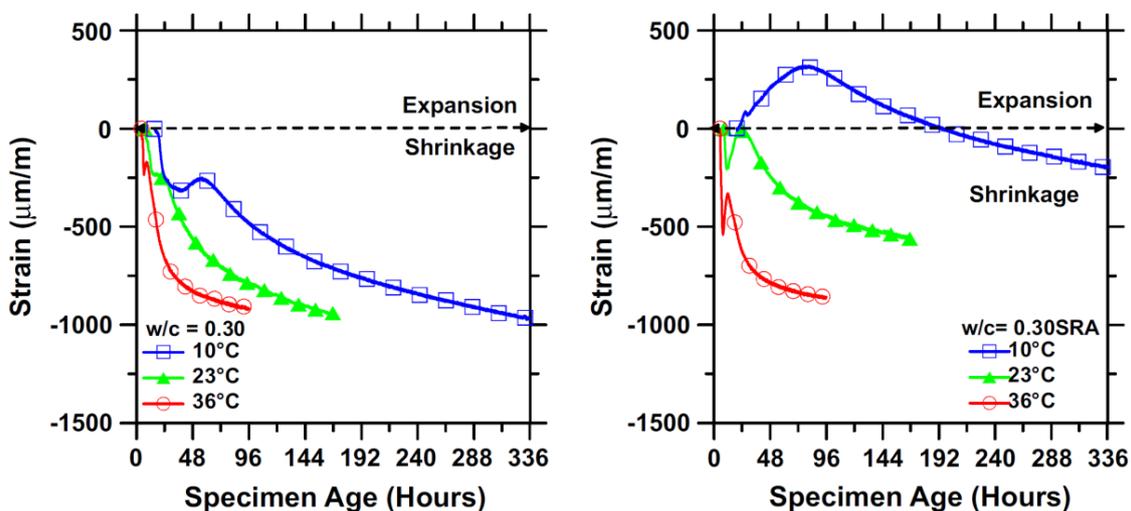


Abbildung 2-7: Autogene Schwindverformungen ab dem Erstarrungsende von Zementleim (links) und Zementleim mit SRA (rechts) gelagert bei unterschiedlichen Temperaturen aus [San12]

Die Messungen der autogenen Schwindverformungen werden in der Regel bei 20 °C unter quasi-isothermen Bedingungen durchgeführt. Um die Mechanismen der Tem-

peratur besser verstehen zu können, werden bei diesen Untersuchungen in der Regel auch quasi-isotherme Temperaturbedingungen eingehalten, allerdings unter Variation der Prüftemperaturen. Für die Einhaltung dieser Bedingung darf die Probekörpertemperatur während der gesamten Prüfdauer nicht mehr als 2 K von der Prüftemperatur abweichen [Ham06]. Je nach Prüfaufbau kann zur Einhaltung dieser Forderung eine aktive Temperierung des schwindenden Probekörpers notwendig werden.

Die Erhöhung der Temperatur führt weiterhin zu einer Beschleunigung der exothermen Hydratationsprozesse, wobei eine Senkung der Temperatur zu einer Verlangsamung führt. Mit dem Reifeprinzip lassen sich auf Grundlage der Arrhenius-Gleichung Temperaturunterschiede während der Erhärtung berücksichtigen und die Festigkeitsentwicklung von Beton mit Hilfe mehrerer Methoden abschätzen [deV98].

In [Lur01] wurde festgestellt, dass die Änderung der Prüftemperatur einen deutlichen Einfluss auf die autogenen Schwindverformungen hat, wobei die Art der Beeinflussung weder systematisch noch linear ist. Dabei wurde das autogene Schwinden an drei verschiedenen Zementen bei vier unterschiedlichen Prüftemperaturen (10 °C - 40 °C) gemessen. Der Zeitpunkt der ersten Spannungsentwicklung in der Autogenous Deformation Testing Machine (ADTM) [vBr99] wurde als Zeitpunkt für die *time zero* definiert. Aus den Ergebnissen konnte abgeleitet werden, dass die höheren Prüftemperaturen nicht zwangsläufig zu höheren autogenen Schwindverformungen führen, da bei den drei untersuchten Betonen keine einheitliche Reihenfolge der Endschwindwerte in Abhängigkeit der Prüftemperatur festgestellt werden konnte. Allerdings waren der Anstieg der Verformung und der Anstieg der Spannungsentwicklung in der ADTM bei 40 °C am höchsten, wodurch eine erhöhte Gefahr der Rissbildung erwartet wurde.

Wie sich unterschiedliche Temperaturen auf die Änderung der relativen Feuchte und die daraus resultierenden autogenen Schwindverformungen auswirken ist derzeit nicht bekannt. [Jen99] gelang es die Änderungen der relativen Feuchte innerhalb des Zementsteins bei Prüftemperaturen von 15 °C bis 40 °C für einen reinen Zementleim mit einem w/z-Wert von 0,3 zu bestimmen. Dabei wurde bestätigt, dass die relative Feuchte niemals unter einen Wert von 75 % absinkt. Die Beschreibung der Temperaturunterschiede mit Hilfe der Reife-Methode gelang aufgrund der enthaltenen Microsilica jedoch nicht.

Unter realen Bedingungen kommt es während der Hydratation in der Regel zu einer deutlichen Erhöhung der Temperatur innerhalb des Bauteils und damit zu einem nicht-isothermen Temperaturverlauf. Grundsätzlich führt eine Temperaturerhöhung zu einem Ausdehnen des Materials mit der Folge einer vermeintlichen Schwindre-

duktion, was bei der Angabe von realistisch auftretenden autogenen Schwindverformungen berücksichtigt werden muss.

Mit Hilfe der Unterwasserwägung wurde in [Lou00] der über die Zeit variierende Temperatúrausdehnungskoeffizient einer erhärtenden Zementleimprobe bestimmt und durch Multiplikation mit dem Temperaturverlauf als thermische Dehnung von den gemessenen Verformungen abgezogen. Somit konnte eine temperaturbereinigte Schwindverformung angegeben werden, die bei einer realistischen Temperaturerhöhungen im Probekörperkern von 45 °C nach 24 Stunden hingegen einen rund dreimal so großen Wert ergab, wie beim Referenzversuch bei quasi-isothermen Bedingungen von 20 °C.

Da sich der Temperatúrausdehnungskoeffizient gerade im jungen Alter des erhärtenden Zementsteins fortlaufend ändert und die Bestimmung der *time zero* bei variierenden Umgebungsbedingungen sehr aufwendig ist, konzentriert sich der Großteil der Untersuchungen in dieser Arbeit auf einen quasi-isothermen Temperaturverlauf. Für die Untersuchungen unter nicht-isothermen Bedingungen, wird der Temperatúrausdehnungskoeffizient vereinfachend als konstant angenommen. Durch die höheren Temperaturen kommt es zu einer Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit des zu untersuchenden Materials. Die Beschleunigung der chemischen Vorgänge führt ebenfalls zu einer Beeinflussung der *time zero* insofern, als das der Zeitpunkt früher auftritt als in einer vergleichbaren Untersuchung unter quasi-isothermen Bedingungen. Daher würde die Verwendung ein und derselben *time zero* zu einer fehlerhaften Auswertung der Untersuchung unter nicht-isothermen Bedingungen führen. Die Schwierigkeit der Auswertung liegt in der Notwendigkeit, dass der Probekörper zur Bestimmung der *time zero* über die gesamte Untersuchungsdauer den gleichen Temperaturen ausgesetzt ist, wie das Material bei der eigentlichen Schwinduntersuchung.

2.5 Verformungsmessungen in der frühen Phase der Hydratation

2.5.1 Allgemeines

Direkt nach dem Mischen von Zement und Wasser beginnt eine exotherme Reaktion, wodurch erste Hydratationsprodukte gebildet werden. Die Erstarrung des Zementleims wird bei herkömmlichen Zementen durch die Zugabe von Calciumsulfat in den ersten Stunden verzögert. Abhängig von der Konsistenz kommt es im noch flüssigen Zustand zu Entlüftungsvorgängen und eventuellen oberflächennahen Verdunstungsprozessen zu ersten äußerlich messbaren Volumenverringierungen des Zementleims.

Im Laufe des Ansteifens resultieren weitere Schwindverformungen aus dem chemischen Schwinden gefolgt von dem autogenen Schwinden bei konservierender Lagerung.

Die ersten Volumenverringernungen durch Entlüftungsvorgänge müssen bei einigen Prüfverfahren bei der Versuchsdurchführung berücksichtigt werden, haben allerdings keinen Einfluss auf die Schwindverformungen des erhärtenden Zementleims.

Zur Messung der reinen volumetrischen Veränderungen aufgrund des chemischen Schwindens werden kapillare Saugspannungen des entstehenden Porengefüges ausgenutzt, wodurch das Volumen der Schrumpfporen im Inneren des Zementsteingefüges sehr genau bestimmt werden kann.

Sobald der Probekörper konservierenden Lagerungsbedingungen ausgesetzt ist, ist ein Wasseransaugen aus der Umgebung nicht mehr möglich, wodurch es zum autogenen Schwinden kommt. Zur Messung dieser Schwindverformungen existieren zwei grundlegende Verfahren. Bei dem volumetrischen Verfahren wird die Volumenveränderung der Probe durch Unterwasserwägung bestimmt. Das lineare Verfahren misst die Volumenveränderung durch den Einbau in entsprechende Prüfsaufbauten, die eine Bestimmung der Längenänderung des eingebauten Probekörper zulassen.

2.5.2 Prüfverfahren

Zur Bestimmung der Volumenveränderung durch das chemische Schwinden wird in der Regel die Wassermenge bestimmt, die von dem reagierenden Zementleim adsorbiert wird. Unter Zuhilfenahme des archimedischen Prinzips kann mittels Unterwasserwägung die Volumenveränderung einer Zementleimprobe ermittelt werden. Bei der sogenannten „buoyancy-method“ wird eine frisch angemischte Zementleimprobe von 25 g in eine zylindrische Schale eingefüllt und solange verdichtet bis eine vollständig entlüftete und geschlossene Zementleimschicht entsteht. Der Zementleim wird im Anschluss mit etwa 10 g synthetischer Porenlösung oder deionisiertem Wasser vollständig bedeckt. Die Menge des zusätzlichen Wassers reicht aus, um die Verringerung von 6-8 Volumen-% bei vollständiger Hydratation des Zements auszugleichen. Vor dem Einbau in die Prüfvorrichtung wird das verbleibende Volumen der zylindrischen Schale mit einem Paraffinöl mit einer Dichte $< 1,0$ (Wasser) aufgefüllt. Die Schale wird wiederrum in ein mit dem gleichen Paraffin gefülltes Bad an eine Waage gehängt. Da hierbei sehr kleine Masseänderungen gemessen werden, müssen sämtliche Temperaturänderungen aus der Hydratation und der Umgebung ausgeschlossen werden, weshalb das Paraffinbad in einem großen Wasserbecken temperiert wird (siehe Abbildung 2-8).

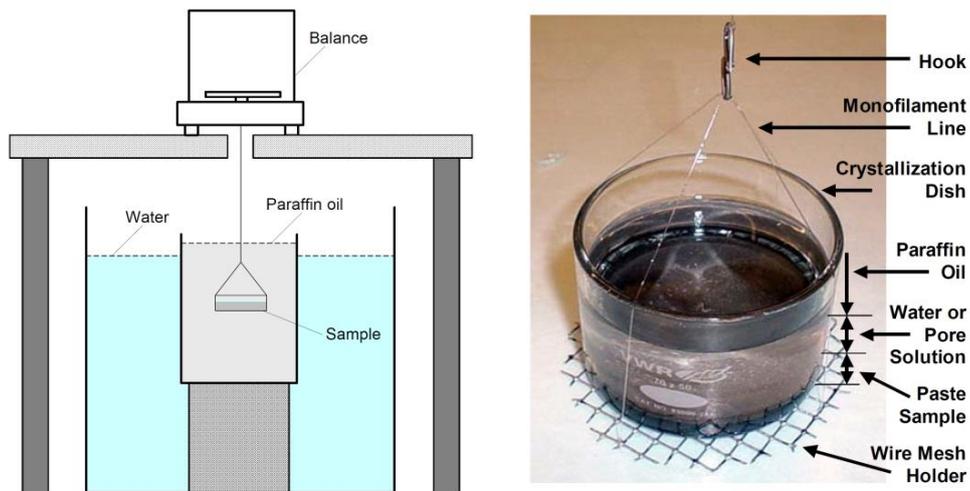


Abbildung 2-8: Versuchsaufbau zur Bestimmung des chemischen Schwindens aus [San06]

Durch die geringere Schichtdicke des Zementleims (~3,0 mm) in der zylindrischen Schale können sämtliche durch chemisches Schwinden entstehende Hohlräume innerhalb des Gefüges durch das Ansaugen des zur Verfügung gestellten Wassers ausgeglichen werden. Die Schale ist oben offen, wodurch das Einfließen des umliegenden Paraffinöls diese Volumenverringerung innerhalb der Schale wieder ausgleichen kann. Da das Volumen der Schale und damit die Auftriebskraft konstant bleiben, kann mit der Masseänderung das Volumen des eingesaugten Wassers bestimmt werden. Der volumetrische Anteil des chemischen Schwindens zum Zeitpunkt t , bezogen auf die Masse des Zements, lässt sich mit folgender Formel 2.1 berechnen:

$$V_{cS}(t) = \frac{M_t - M_b}{\rho_p \cdot M_z} \quad [2.1]$$

- mit: M_t = Masse des Zementleimes unter Wasser zum Zeitpunkt t [g]
 M_b = Masse des Zementleimes unter Wasser - 30 min nach der Wasserzugabe [g]
 M_z = Masse des Zementes [g]
 ρ_p = Dichte des Paraffinöls (g/dm^3)

[San06] beobachteten, dass mit steigender Schichtdicke (3, 6, und 24 mm) des Zementleims, die Volumenverringerungen bezogen auf die Masse des Zements aufgrund des chemischen Schwindens ab einem gewissen Zeitpunkt differieren. Während das chemische Schwinden bei einer Schichtdicke von 3 mm weiter ansteigt, kommt es bei der 24 mm dicken Schicht langsam zu einer Stagnation des chemi-

schen Schwindens. Dieses ist mit einer Verringerungen der Wasserdurchlässigkeit mit fortschreitender Hydratation zu erklären ist [Gei83]. Bei den größeren Schichtdicken erreicht das an der Oberfläche anliegende Wasser die sich ausbildenden Poren im Inneren der Zementleimschicht nicht mehr, wodurch keine weitere Volumenverringerng detektierbar ist. Dieser Bereich ist dadurch nahezu konservierend gelagert, wodurch es bei dem untersuchten w/z-Wert von 0,3 zu autogenen Schwindverformungen kommt. Diese sind, volumetrisch betrachtet, jedoch deutlich kleiner als die Veränderungen durch das chemische Schwinden, weshalb das Ergebnis dadurch nicht wesentlich beeinflusst wird.

Die Messung der autogenen Schwindverformungen wird erst durch die konservierende Lagerung der Probekörper möglich. Dadurch kann ein Wasseransaugen aus der Umgebung vollständig verhindert werden, wodurch die Voraussetzungen für eine Selbstaustrocknung der Probe gegeben sind. Dabei wird grundlegend zwischen der volumetrischen und der linearen Messung unterschieden. Die Verformungen werden bei dem volumetrischen Verfahren mittels Unterwasserwägung aufgezeichnet. Dazu wird eine vollständig verdichtete Probe mit einem Gewicht von 100 bis 150 g in einen Kunststoff sack gefüllt, welcher verschlossen an eine Waage in ein temperiertes Paraffinölbad gehängt wird. Frühere Untersuchungen in einem Wasserbad führten zu der Erkenntnis, dass die verwendeten Kunststofffolien nicht komplett diffusionsdicht waren, mit der Folge, dass die Probe nicht konservierend gelagert wurde, wodurch es zu Fehleinschätzungen in den Messungen der Schwindverformungen kam [Lur07]. Weiterhin kann es zu einer Fehlinterpretation der Ergebnisse kommen, wenn bei instabilen Mischungszusammensetzungen Bluterscheinungen innerhalb des Kunststoff sackes auftreten. Das überschüssige Wasser wird im Verlauf der Hydratation wieder von der Probe aufgenommen, was zu einer Volumenverringerng des Kunststoff sackes und dadurch zu einer vermeintlichen Erhöhung des autogenen Schwindens führt. Durch die Sicherstellung der Stabilität der Zusammensetzung und der Lagerung der Probe in einem Paraffinölbad lässt sich mit Hilfe der Formel 2.2 die volumetrische Schwindverformung der Probe zum Zeitpunkt t bestimmen:

$$\varepsilon_{Vol}(t) = \frac{M_t - M_b}{\rho_p \cdot V_z} \quad [2.2]$$

- mit: M_t = Masse des Zementleimes unter Wasser zum Zeitpunkt t [g]
 M_b = Masse des Zementleimes unter Wasser - 30 min nach der Wasserzugabe [g]
 V_z = Volumen des Zementleimes – 30 min nach der Wasserzugabe
 ρ_p = Dichte des Paraffinöls (g/dm³)

Unter der Annahme einer isotropen Schwindverformung über den gesamten Probekörperquerschnitt entspricht die lineare Dehnung (ε_{lin}) etwa einem Drittel der volumetrischen Dehnung (ε_{vol}):

$$\varepsilon_{lin} = \frac{\varepsilon_{vol}}{3} \quad [2.3]$$

Zur direkten Ermittlung der linearen Verformungen existieren ebenfalls etablierte Verfahren, die sich durch Aufbau, Probengeometrie und Möglichkeiten zur Temperierung unterscheiden. Voraussetzungen für das Messen von autogenen Schwindverformungen sind neben der konservierten Lagerung des Probekörpers, der möglichst frühe Start der Verformungsmessungen. Bei der in Dänemark entwickelten Wellrohrmethode [Jen95] wird die Probe in einen ca. 420 mm langen Schwindschlauch (corrugated tube) mit einem Durchmesser von ca. 30 mm gefüllt. Im Anschluss kann der Schlauch waagrecht in den Prüfaufbau eingebaut und die Messung mittels induktiven Wegaufnehmern mit einer Auflösung von 1 μm direkt gestartet werden. Die aus Polyethylen bestehenden Schwindschläuche besitzen eine geriffelte Struktur, deren Steifigkeit in axialer Richtung deutlich geringer ist als in radialer. Somit führt jede Volumenveränderung der Probe innerhalb des Schlauches zu einer Längenänderung des selbigen, die an beiden Enden oder mittels einer einseitigen Einspannung an einem Ende mit induktiven Wegaufnehmern aufgenommen werden kann. Durch den speziellen Aufbau der Schläuche ergeben sich weitere Vorteile bzgl. der Messgenauigkeit dieses Prüfverfahrens. Zum einen werden durch die geriffelte Form des Schlauches die Auflagerpunkte zwischen Probekörper und Prüfaufbau reduziert, wodurch die Reibung, die einer Verformung des Schwindschlauches entgegenwirkt, minimiert wird. Zum anderen ist die Probekörperoberfläche im Vergleich zu einem glatten Zylinder deutlich erhöht, was den Wärmeübergang zwischen hydratisierendem Material und der Umgebung erhöht und dadurch der Grenzwert für isothermen Messung aus [Ham06] von 2 K auch bei einer Luftlagerung eingehalten werden kann. Bedingt durch den recht geringen Durchmesser der Schläuche eignet sich dieses Verfahren primär für fließfähige Mörtel und Beton bis zu einem Größtkorn von max. 5 mm. Bei sehr viskosen Materialien kann für das Befüllen des Schlauches ein Rütteltisch oder eine Kartuschenpresse wie in [Epp10] verwendet werden. Dabei konnte ein Einfluss auf die autogenen Schwindverformungen in Abhängigkeit des Einfüllvorgangs detektiert werden [Epp10b].

Zur Sicherstellung der quasi-isothermen Temperaturbedingungen kann der gesamte Prüfaufbau wenn notwendig in einem temperierten Paraffinbad gelagert werden, da der Wärmeübergang bei Flüssigkeiten (Öl) größer ist als bei Gasen (Luft).

Ein zweites Verfahren zur Bestimmung der autogenen Schwindverformungen ist der Schwindkegel der Firma Schleibinger. Durch die geometrischen Abhängigkeiten bei der Kegelgeometrie und der Annahme isotropen Schwindens des Materials entspricht die Änderung des Radius genau der Änderung der Höhe des Kegels. Somit führen sämtliche Volumenveränderungen durch Schwind- und Quellvorgänge zu einer Änderung der Probekörperhöhe, die auf Grundlage des beschriebenen Zusammenhangs direkt in eine lineare Dehnung umgerechnet werden kann. Zur Erfassung der Höhenänderung dient ein Laser, der mit einer Auflösung von $0,3 \mu\text{m}$ [Sch18] den Abstand zu einem Reflektor, der beim Vorbereiten der Probe auf der Kegeloberfläche angeordnet wird, misst. Es handelt sich daher um ein berührungsloses Verfahren, wodurch Messfehler durch die Federkraft von anliegenden induktiven Wegaufnehmern vermieden werden. Zur Minimierung der Haftreibung zwischen dem schwindendem Material und der Kegeltopffinnenseite wird in den Kegeltopf vor dem Einfüllen des Materials eine aus Silikon bestehende Folientüte eingelegt. Zur Sicherstellung der konservierenden Lagerungsbedingungen wird die freie Oberfläche des Schwindkegels nach dem Einfüllen mit einer handelsüblichen Kunststoffolie abgedeckt und mittels eines Gummibands an der Oberseite des Kegeltopfes fixiert. Vorteile des Schwindkegels sind das einfache Befüllen und die Möglichkeit der aktiven Temperierung. Der Kegeltopf ist so konstruiert, dass zwischen zylindrischer Außenwand und kegelförmiger Negativform ein Hohlraum vorhanden ist, der mittels zweier Anschlüsse mit temperiertem Wasser durchflossen werden kann. Das dazu notwendige Kryostat gewährleistet die exakte Temperierung des Materials in einem Temperaturbereich von $5 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Der Kegeltopf besteht aus einer Aluminiumlegierung und besitzt damit eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, was eine einheitliche Temperierung des Probekörpers sicherstellt. Zudem muss bei nicht-isothermen Temperaturverläufen die Formänderung des Kegeltopfes bei der Auswertung der Schwindverformungen berücksichtigt werden. Der Hersteller gibt den Wärmeausdehnungskoeffizienten des Kegelmaterials mit $23 \mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ an.

Ein weiteres Prüfgerät ist die Schwindrinne, die ebenfalls von der Firma Schleibinger hergestellt wird. Aufgrund der Länge des Probekörpers von 100 cm ist eine Normierung der Ergebnisse nicht mehr notwendig. Konzipiert ist die Schwindrinne für spezielle Prüfungen bei denen die Oberfläche (Breite: $6,0 \text{ cm}$) des Probekörpers austrocknen kann. Dadurch beinhaltet das Ergebnis der Verformungsmessung sowohl einen Anteil aus autogenem Schwinden als auch einen Anteil aus Trocknungsschwinden. Zur Messung der Verformungen befindet sich an beiden Enden des Prüfaufbaus jeweils eine Metallplatte (Höhe: $4,0 \text{ cm}$) mit einem in Richtung des eingefüllten Materials spitzwinklig abspreizenden Dorn. Von diesen ist je eine fest und eine verformungsfrei gelagert. Durch Verzahnung des erhärtenden Materials mit den Endplatten kommt es aufgrund hygrischer Verformungen zu einer Lageverschiebung

der beweglich gelagerten Endplatte, die mittels eines induktiven Wegaufnehmers mit einer Auflösung von 1 μm aufgenommen wird. Dieser Vorgang setzt eine ausreichende Festigkeit des Materials voraus, da sonst keine Ankopplung zwischen dem schwindenden Material und den beiden Endplatten möglich wäre. Zur Verringerung der Wandreibung sollte die Schwindrinne mit einem Neoprenschaumfließ ausgekleidet werden. Der Nachteil vom Fließ ist die wärmeisolierende Wirkung, die in Kombination mit dem notwendigen Materialvolumen von 2,4 dm^3 zu einer nicht unerheblichen Temperaturentwicklung des Probekörpers führen kann. Daher hat der Hersteller einen Nachfolger der herkömmlichen Schwindrinne entwickelt, die durch die doppelwandige Ausführung, ähnlich wie beim Schwindkegel, mit Wasser temperiert werden kann. Durch die Abdeckung der freien Oberfläche mittels einer Folie kann auch bei diesem Prüfaufbau eine nahezu konservierende Lagerungsbedingung realisiert werden, wobei darüber hinaus auch die Abdichtung der Endplatten mittels Fett exakt ausgeführt sein muss. So können ab dem Zeitpunkt der Ankopplung des erhärtenden Materials an die Endplatten autogene Schwindverformungen gemessen werden. Dabei sind jedoch der evtl. verspätete Messbeginn sowie die evtl. erhöhte Temperaturentwicklung zu beachten.

Ein letzter in dieser Arbeit verwendeter Prüfaufbau ist der sogenannte Schwindring (restrained ring test), der ursprünglich zur Bestimmung der Rissneigung von Mörteln und Betonen, resultierend aus Trocknungsschwinden, verwendet wurde [Epp09b] und noch heute zu diesem Zweck eingesetzt wird. Mit der gleichen Modifikation des Prüfaufbaus, wie bei der Schwindrinne, wird durch das Abdecken des Materials durch eine Folie die konservierende Lagerung des Probekörpers sichergestellt. Somit kann der Schwindring auch für die Bestimmung der Rissneigung bzw. Ermittlung der Spannungsentwicklung infolge autogenen Schwindens verwendet werden. Das Prinzip des Schwindrings beruht auf der Behinderung des Schwindens des mineralischen Materials durch den innenliegenden Stahlring. Aufgrund der höheren Steifigkeit des Stahls ergeben sich im Betonring Zugspannungen. Diese werden durch an der Innenseite des Stahlrings aufgeklebte Dehnungsmessstreifen erfasst. Über die Dicke des Stahlrings lässt sich der Behinderungsgrad einstellen, wobei ein niedriger Behinderungsgrad, die Wahrscheinlichkeit eines Risses im Mörtel- oder Betonring minimiert [Hos04] und damit die Aufzeichnung der weiteren Spannungsentwicklung ermöglicht. Grundsätzlich lässt sich mit diesem Verfahren der Beginn der Spannungsentwicklung im Mörtel oder Beton sehr gut detektieren, da sich im innenliegenden Stahlring erst Spannungen ergeben, wenn diese vom mineralischen System übertragen werden können. Die Überschreitung der Zugfestigkeit des eingebauten Materials führt zwangsläufig zu einem Riss im Mörtel- oder Betonring.

2.5.3 *Time zero*

Für die Ermittlung der autogenen Schwindverformungen ist neben dem möglichst frühen Beginn der Messungen auch die Bestimmung des Startpunkts der spannungsinduzierenden Verformungen essentiell. Der Beginn der Verformungen wird international als *time zero* bezeichnet und in der Regel mit Hilfe eines parallelen Versuchs ermittelt. Mit den unter Kapitel 2.5.2 beschriebenen Verfahren lassen sich zwar sämtliche Verformungen des Probekörpers messen, jedoch treten gerade zu Beginn der Untersuchungen Verformungen auf, die nicht auf das autogene Schwinden zurückzuführen sind. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Volumenverringerungen aufgrund von chemischem Schwinden sowie Entlüften und Setzen des eingebauten Materials. Die auftretenden Volumenverringerungen können zu Beginn der Hydratation innerhalb des noch plastisch verformbaren Zementleims ausgeglichen werden, wodurch noch keine Eigenspannungen im Gefüge auftreten.

Notwendige Bedingung für den Beginn der autogenen Schwindverformungen ist eine nennenswerte Festigkeitsentwicklung des erstarrenden Zementleims, ab dem die innere Selbstaustrocknung aufgrund der unter Kapitel 2.3 beschriebenen Mechanismen zu makroskopisch messbaren Verformungen führt. Somit sind alle Verformungen, die keine Zwangsspannungen im Gefüge initiieren, für die Bestimmung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen irrelevant.

Das Japan Concrete Institute (JCI) veröffentlichte 1999 die erste Definition zum autogenen Schwinden: "Autogenous shrinkage is the macroscopic volume reduction of cementitious materials when cement hydrates after initial setting. Autogenous shrinkage does not include volume change due to loss or ingress of substances, temperature variation, application of an external force and restraint" [Taz00]. Definiert ist hier die makroskopisch messbare Volumenreduktion, die ohne äußere Einwirkungen in einem geschlossenen System bei gleichbleibender Temperatur (20 °C) ab dem Zeitpunkt des Erstarrungsbeginns auftritt. Die *time zero* wird laut Definition in einem parallelen Versuch mit dem Nadelpenetrationsverfahren bestimmt. Da hierbei der Eindringwiderstand des erstarrenden Materials gegenüber einer beschwerten Nadel gemessen wird, besteht jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen dem ermittelten Erstarrungsbeginn und dem Zeitpunkt der inneren Selbstaustrocknung im erhärtenden Zementleim. Der Autor kritisiert zudem den relativ willkürlichen Zeitpunkt, der keinesfalls reproduzierbar zu bestimmen ist sowie die unzureichende Festigkeit des Gefüges zum Zeitpunkt des Erstarrungsbeginns [San09]. Da es sich dabei lediglich um eine Definition handelt, wird auch häufig anstelle des Erstarrungsbeginns das Erstarrungsende als maßgebender Startpunkt für die autogenen Schwindverformungen verwendet.

Erste Unterschiede bzgl. der Bestimmung des Startpunkts ergeben sich bereits bei der Wahl der Norm, nach welcher die Bestimmung der Erstarrungszeiten durchgeführt werden soll. Das generelle Prüfverfahren ist sowohl im europäischen als auch im amerikanischen Raum genormt, wobei dabei jeweils zwischen Prüfungen am Zementleim und Prüfungen am Mörtel unterschieden wird. Neben leichten Abweichungen zwischen [DIN196_3] und [ASTMC191] in der Vicatringgeometrie und dem Vicatnadeldurchmesser ist bei der Messung eine Prüftemperatur von $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $(23 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ vorgegeben. In den jeweiligen Pendants für Mörtel [DIN480_2] und [ASTMC807] bestehen deutlichere Unterschiede. Während in der europäischen Norm die gleiche Nadel wie im Zementleimversuch jedoch mit einem erhöhten Gesamtgewicht von $(1.000 \pm 1) \text{ g}$ verwendet wird, wird in der amerikanischen Norm eine doppelt so dicke Nadel mit einem Durchmesser von $(2 \pm 0,05) \text{ mm}$ mit einem leicht erhöhten Gesamtgewicht $(400 \pm 0,5) \text{ g}$ verwendet. Da die europäische Norm zusätzlich auf die Untersuchung von Zusatzmitteln und dabei auf die sehr temperaturabhängigen Betonverflüssiger und Fließmittel abzielt, ist hier neben der Prüftemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ auch die Prüfung bei $(5 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ geregelt. Grundsätzlich wurde die Definition vom JCI lediglich für die Messung der autogenen Schwindverformungen von reinen Zementleimen aufgestellt, weswegen fraglich ist, ob bei der Untersuchung von Mörteln und dementsprechend der Anwendung des modifizierten Nadelpenetrationsversuchs, noch immer eine Korrelation zwischen der *time zero* und den ermittelten Erstarrungszeiten besteht. Bedingt durch die Gesteinskörnung und der veränderten Prüfaufbaugeometrie und -masse kann es im Vergleich zu den Zementleimuntersuchungen zu deutlich unterschiedlichen Erstarrungszeiten kommen. Weiterhin ist bislang nicht bekannt, wie sich unterschiedliche Prüftemperaturen auf den Zusammenhang zwischen der Erstarrungszeit und der *time zero* auswirken. Zwar lassen sich die Erstarrungszeiten bei einer Prüftemperatur von $5 \text{ }^\circ\text{C}$ weiterhin eindeutig bestimmen, dennoch ist unklar, ob sich die *time zero* im gleichen Verhältnis ändert wie die Erstarrungszeiten.

Einige Jahre nach der Definition vom JCI wurde eine zweite Definition von Jensen und Hansen [Jen96a] vorgestellt, die zwischen „autogenous deformation“ und „self-desiccation shrinkage“ unterscheidet. Demnach sind die „autogenous deformation“ definiert als „bulk deformation of a closed, isothermal, cementitious material not subjected to external forces“ und das „self-desiccation shrinkage“ als „autogenous deformation of a set cementitious material system caused by chemical shrinkage“. Dabei wurden die grundsätzlichen Bedingungen der ersten Definition übernommen, wobei nicht nur von einer Volumenreduktion sondern grundsätzlich von autogenen Verformungen, also Schwind- und Quellvorgängen ausgegangen wird. Die Verformungen, die direkt aus dem chemischen Schwinden resultieren, werden hier als „Selbst-

austrocknungsschwinden“ definiert, wobei kein Startpunkt der Verformungen angegeben wird.

Um dennoch Aussagen über die Höhe von autogenen Schwindverformungen machen zu können, sieht die phänomenologische Herangehensweise der Auswertung den Zeitpunkt, ab dem die Verformungen aus autogenem Schwinden von den Verformungen aus chemischem Schwinden abweichen, als *time zero* vor. Unabhängig von den Gefügeeigenschaften werden hierbei chemisches und autogenes Schwinden parallel mit dem volumetrischen Verfahren gemessen. In Abbildung 2-9 ist, ein isotropes Schwinden vorausgesetzt, zu erkennen, dass beide Schwindarten am Anfang der Messungen nahezu identische Verformungen aufweisen. Ab dem Zeitpunkt, ab dem die Verläufe voneinander abweichen, wird davon ausgegangen, dass sämtliche von außen messbaren Verformungen durch autogenes Schwinden, unabhängig von der mechanischen Gefügeeigenschaft, ausgelöst werden. Daher kann hierbei nicht abgeschätzt werden, ob und in welchem Maße die gemessenen Verformungen ab der *time zero* zu inneren Spannungen im Zementstein führen. Bei einer Temperaturänderung ermöglicht die parallele Messung jedoch, den direkten Vergleich der aufgenommenen Verformungen und damit die eindeutige Verschiebung des Zeitpunkts, ab dem die autogenen Verformungen von den chemischen Schwindverformungen abweichen.

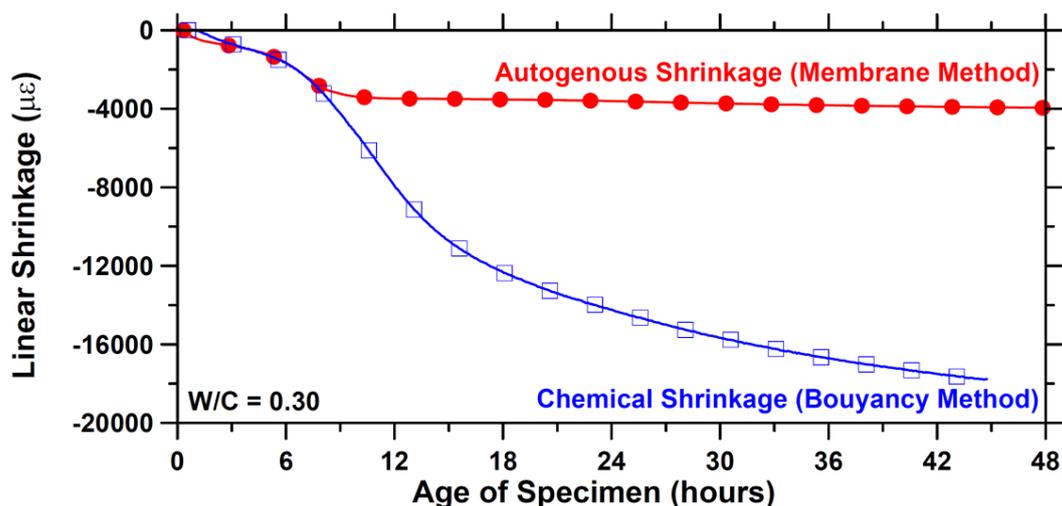


Abbildung 2-9: Vergleich zwischen chemischen und autogenem Schwindwerten umgerechnet auf lineare Schwindverformungen aus [San06]

Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass es bei Mörtelsystemen nicht eingesetzt werden kann. Die Messung des chemischen Schwindens kann ausschließlich unter Wasser durchgeführt werden, wobei lediglich geringste Mengen an Wasser von einer

Zementleimprobe mit einem Gewicht von 25 g eingesaugt werden. Bei einer Mischprobe kann es aufgrund einer möglichen Fehleinschätzung der Menge an enthaltener Gesteinskörnung zu einem erheblichen Fehler bei der Bestimmung des Zementleimvolumens kommen. Zudem ist es möglich, dass das Gesteinskorn selbst in der Lage ist, Wasser aufzunehmen, wodurch das Ergebnis des chemischen Schwindens über die Wasseraufnahmemenge der Probe zusätzlich verfälscht werden könnte.

Die eher praxisorientierte Herangehensweise der Auswertung sieht die Verwendung des Zeitpunkts, ab dem das erstarrende Zementsteingefüge erste Spannungen aufnehmen kann, als Startpunkt der autogenen Schwindverformungen vor. Daher wird in diesem Zusammenhang auch oft von „spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen“ gesprochen. Das Gefüge ist dabei nicht länger als plastisch verformbar einzustufen, wodurch auftretende Verformungen zu Eigenspannungen und bei Behinderung zu Rissen führen können. Die Ermittlung des Zeitpunkts, ab dem das Gefüge erste Spannungen aufnehmen kann, erfordert Untersuchungen unter dehnungsbehinderten Bedingungen. [Spr88] entwickelte den sogenannten „Reißrahmen“, mit dem es möglich ist die durch Hydratationswärmeentwicklung hervorgerufenen Zwangsspannungen in jungem Massenbeton zu bestimmen. Aufgrund des am Ende konisch auseinanderlaufenden Probekörpers verankert sich die eingebaute Probe aufgrund von Schwindverformungen automatisch und bewirkt dadurch eine messbare Stauchung des Prüfrahmens. Das grundlegende Problem hierbei ist die Größe des Probekörpers, wodurch der Forderung nach einer Temperaturerhöhung während der Verformungsmessung von maximal 2 K über den gesamten Probenquerschnitt in der Regel nicht entsprochen werden kann. Isotherme Temperaturbedingungen vorausgesetzt, korrespondiert der Beginn der Spannungsentwicklung gut mit dem Beginn der Längenänderung durch autogenes Schwinden [Wei02a].

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung dehnungsbehinderter Verformungen ist das Schwindringverfahren, bei dem ein innenliegender Stahlring die Verformungen des außen anliegenden Beton- oder Mörtelrings verhindert. Aufgrund der deutlich geringeren Probekörperabmessungen ist die Temperaturentwicklung infolge der Hydratationsreaktion nicht so hoch, wodurch der Grenzwert von 2 K eingehalten werden kann. Der Zeitpunkt, ab dem erste Spannungen im Ring festgestellt werden, kann mit der *time zero* gleichgesetzt werden, was u.a. in [Epp09c] zur Auswertung der freien autogenen Schwindverformungen angewendet wird.

Die direkte Bestimmung der *time zero* ist die Auswertung des Verformungsverlaufes während der Schwindmessung. [Fon06] konnte bei der Analyse der gemessenen Verformungsgeschwindigkeiten im Bereich der Erstarrungszeiten bei sämtlichen Messungen ein ausgeprägtes Geschwindigkeitsmaximum detektieren. Der Zeitpunkt dieses Maximums wurde im Folgenden als Startpunkt für die spannungsinduzieren-

den autogenen Schwindverformungen verwendet. Da bei diesem Vorgehen auf eine Bestimmung der *time zero* in einer parallelen Untersuchung verzichtet werden kann, wird der Startpunkt direkt an dem Material ermittelt an dem auch gleichzeitig die Verformungsmessung durchgeführt wird. Somit kann der Fehler aus eventuellen Materialungleichheiten oder unterschiedlichen Temperaturverläufen und daraus resultierenden zeitlichen versetzten Hydratationsverläufen ausgeschlossen werden. Auch [Dud16] wertete die Verformungskurve der Schwindmessung aus und kam durch die Auswertung und Diskussion weiterer Verfahren zur Bestimmung der *time zero* zu dem Schluss, dass der letzte Hochpunkt vor der maximalen Verformungsgeschwindigkeit sehr gut mit dem Beginn der autogenen Schwindverformungen übereinstimmt. Inwieweit die von [Fon06] und [Dud16] ermittelten Zeitpunkte mit dem Beginn der Spannungsentwicklung im dehnungsbehinderten Schwindring übereinstimmen, ist bislang nicht bekannt.

Darüber hinaus existieren noch weitere Prüfverfahren, die derzeit zur Bestimmung der *time zero* herangezogen werden. Mit Hilfe von Temperaturentwicklung, Ultraschalllaufzeit, gewichteter Reife oder mechanischer Eigenschaften wird der Startpunkt für das autogene Schwinden bestimmt.

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ist der Übergang vom chemischen zum autogenen Schwinden fließend. Da sich in diesem Zeitraum auch die Steifigkeitsverhältnisse des Gefüges aufgrund der voranschreitenden Hydratation kontinuierlich ändern, ist die *time zero* grundsätzlich nicht exakt bestimmbar. Daher werden bis dato experimentelle Ansätze verwendet, um die makroskopisch messbaren Verformungen, resultierend aus dem autogenen Schwinden, von denen aus dem chemischen Schwinden unterscheiden zu können. Die Korrelation mit der wahren *time zero* ist jedoch bei allen Verfahren unterschiedlich, weswegen sich bislang kein einheitliches Verfahren durchgesetzt hat.

2.5.4 Diskussion der vorgestellten Verfahren

Zur weiteren Untersuchung der frühen autogenen Schwindverformungen werden in dieser Arbeit vergleichende Messungen überwiegend mit dem Schwindschlauch- und dem Schwindkegelverfahren durchgeführt. Durch die Verwendung von zwei unterschiedlichen Prüfaufbauten wird die Detektion der Einflüsse durch das verwendete Messverfahren, die Probekörpergeometrie sowie die aktive und passive Temperierung des Probekörpers ermöglicht. Somit kann sichergestellt werden, dass der Einfluss der Temperatur auf das autogene Schwinden nicht durch einen versuchstechnisch bedingten Fehler falsch abgeschätzt wird. Zusätzlich können die übrigen hier erwähnten Verfahren zur Überprüfung und Absicherung der aufgestellten Theorien genutzt werden.

In [Jen95] wird das Schwindschlauchverfahren erstmals vorgestellt und die Genauigkeit der Ergebnisse diskutiert. Die Autoren geben bei der Untersuchung eines Portlandzementleims mit einem w/z-Wert von 0,25 und einem Mikrosilicagehalt von 10 % eine Abweichung zwischen zwei parallel gemessenen Schwindschläuchen von 20 $\mu\text{m}/\text{m}$ nach 24 h an. Die Auswertung der autogenen Schwindverformungen ergibt einen Mittelwert von 750 $\mu\text{m}/\text{m}$, woraus sich ein Variationskoeffizient von 1,3 % ergibt. Die Eignung des Verfahrens für die Messung von autogenen Schwindverformungen wurde daraufhin in weiteren Veröffentlichungen bestätigt [Jen96a], [Jen99] sowie [San06] und wurde durch die American Society for Testing and Materials standardisiert [ASTM1698].

[Epp09a] untersuchte die Wiederholgenauigkeit des Schwindkegelverfahrens nicht am reinen Zementleim, sondern an einer UHPC-Zusammensetzung mit zwei unterschiedlichen Zementen. Dabei testete er die Wiederholgenauigkeit des Schwindkegelverfahrens mit Zement A und konnte bei fünf aufeinander folgenden Messungen nach 24 h einen Mittelwert von 0,99 mm/m mit einer Standardabweichung von 0,02 mm/m und einem Variationskoeffizient von 2,0 % ermitteln. Die Endschwindwerte der Zusammensetzung mit Zement B ergab einen Endschwindwert von 1,03 mm/m nach 24 h.

In einer weiteren Veröffentlichung, verglich [Epp10b] die Ergebnisse aus Schwindkegel- und Schwindschlauchverfahren unter Verwendung der gleichen Zusammensetzungen aus [Epp09a]. Die dargestellten autogenen Verformungen setzen sich dabei jeweils aus drei hintereinander durchgeführten Messungen zusammen. Unabhängig vom verwendeten Zement zeigte sich ein nahezu identischer Endschwindwert bei beiden Verfahren. Obwohl beide Prüfverfahren auf komplett unterschiedlichen Messprinzipien basieren, ist auch der Verlauf der autogenen Schwindverformung über die Zeit vergleichbar.

Ganz andere Beobachtungen wurden bei der Auswertung eines in [Bjø06] veröffentlichten Ringversuchs gemacht. Daran beteiligt waren zehn Institutionen die die linearen Verformungen durch das autogene Schwinden an einem Mörtel mit einem w/z-Wert von 0,375 bestimmt haben. Das von den Institutionen verwendete Messverfahren war grundsätzlich gleich, wobei die Probenkörpergröße zwischen den Institutionen variierte. Die Verläufe sind in Abbildung 2-10 dargestellt und zeigen eine enorme Bandbreite der Ergebnisse bei gleichem Material. Ursachen dafür sind u.a. die unterschiedliche Temperaturentwicklung in den einzelnen Probekörpern und die Verwendung nicht-identischer Prüfaufbauten in unterschiedlichen Laboren. Das Beispiel zeigt bereits, dass die Messung der autogenen Schwindverformungen sehr sensibel ist und ein Messverfahren benötigt wird, welches möglichst robust gegen äußere Ein-

flüsse ist und eine hohe Temperaturentwicklung des Probekörpers während der Untersuchung verhindert.

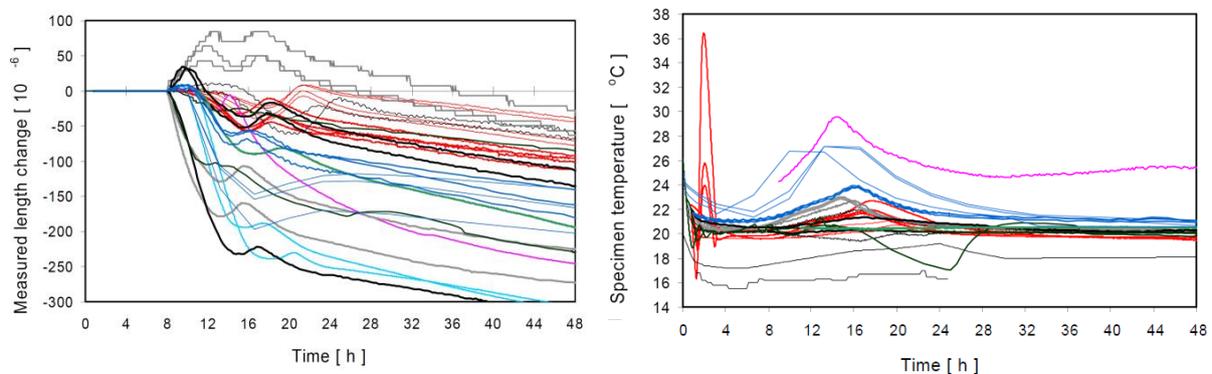


Abbildung 2-10: Ergebnisse aus einem Ringversuch, Längenänderung (links) und Temperaturerhöhung (rechts) aus [Bjø06]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass beide Verfahren, sowohl bei reinen Zementleimen als auch bei aus mehreren Komponenten bestehenden Zusammensetzungen, zu reproduzierbaren Ergebnisse führen. Dennoch muss beachtet werden, dass zahlreiche Einflussfaktoren die Ergebnisse der frühen autogenen Schwindverformungen beeinflussen können. Zu den Einflüssen zählen die Misch- und Umgebungsbedingungen, die Art des Einfüllens, die enthaltenden Zusatzstoffe und -mittel sowie das verwendete Prüfverfahren. Der größte Einfluss resultiert nach Meinung des Autors aus der Wahl des Auswertverfahrens. Die einzelnen Verfahren zur Bestimmung der *time zero* wurden bereits in Kapitel 2.5.3 näher diskutiert, jedoch kann an dieser Stelle bereits festgestellt werden, dass die Art der Auswertung die Ergebnisse maßgeblich beeinflusst. Gerade bei der Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Temperaturen auf das autogene Schwindverhalten und der damit einhergehenden maßgebenden Veränderung des Hydratationsverlaufes kann die fehlerhafte Bestimmung der *time zero* zu unzutreffenden Schlussfolgerungen führen.

2.6 Zusammenfassung

Die Vielzahl an Möglichkeiten zur Bestimmung der *time zero* zeigt, dass sich in der Praxis noch kein Verfahren durchgesetzt hat und allgemein anerkannt ist. Aufgrund der beschriebenen Sichtweisen (phänomenologisch und praxisorientiert) existieren zwei unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung des Startpunkts der autogenen Schwindverformungen (vgl. Kapitel 2.5.3). Eine nicht exakte Ermittlung der *time zero*

würde zu einem willkürlichen Nullen der gemessenen Verformungen führen und damit zu einer Unter- bzw. Überschätzung der freien autogenen Schwindverformungen.

Gerade bei der Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Temperaturen kann eine Fehlbestimmung des Startpunktes zu falschen Schlussfolgerungen führen. Daher ist die Höhe der gemessenen autogenen Schwindverformungen direkt abhängig von der Auswahl des Verfahrens zur Bestimmung des Startpunktes. Da in dieser Arbeit die spannungsinduzierenden Verformungen im Vordergrund stehen, sind alle gemessenen Verformungen, die vor dem Erreichen einer gewissen Steifigkeit auftreten zu vernachlässigen, da diese nicht zur Entwicklung von Eigenspannungen im Zementsteingefüge beitragen.

Bei den bisherigen Untersuchungen zum autogenen Schwinden standen meist die Detektion der Einflüsse und nicht das Prüfverfahren im Fokus. In [Fon06] werden unterschiedliche Verfahren benutzt, welche für die jeweiligen Untersuchungen geeigneten waren, jedoch für ein einheitliches und reproduzierbares Prüfverfahren zur Bestimmung von spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen nicht ausreichen. Zudem wurden viele dieser Untersuchungen an reinen Zementleimen durchgeführt und nicht wie in dieser Arbeit an unterschiedlichen Mörtel- und Betonsystemen.

Bei der Wahl eines indirekten Verfahrens wie z.B. die Ermittlung der Erstarrungszeit, wäre neben der Prüfung der Anwendbarkeit des Verfahrens bei unterschiedlicher Prüftemperatur auch die Prüfung der Korrelation zwischen dem Erstarrungsbeginn und der *time zero* notwendig. Das indirekte Verfahren lässt bereits bei reinen Zementleimen und bei einer Prüftemperatur von 20 °C, durch die eher willkürlich gesetzten Grenzen, keine detaillierten Rückschlüsse auf die Gefügeeigenschaften zu, weshalb erwartet wird, dass die Ermittlung der Erstarrungszeit bei unterschiedlichen Prüftemperaturen, ebenfalls zu einer ungenauen Bestimmung der *timezero* führen würde. Hinzu kommt, dass es bei der Untersuchung eines Vergussbetons mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 5 mm, gerade im noch plastischen Zustand zu großen Schwankungen bei der Ermittlung der Erstarrungszeit kommen kann. Aufgrund der enthaltenen Gesteinskörnung ($D \leq 5$ mm) besteht die Möglichkeit, dass die Nadelspitze direkt auf ein Gesteinskorn auftreffen, wodurch es zu einer Unterschätzung der Eindringtiefe und damit zur fehlerhaften Bestimmung des Erstarrungsbeginns kommen kann.

Kapitel 3

Experimentelle Untersuchungen

3.1 Notwendigkeit der Untersuchungen

Aus der durchgeführten Literaturrecherche geht hervor, dass zur Messung der autogenen Schwindverformung mehrere Verfahren zur Verfügung stehen und dass die Höhe der Verformungen von einer Vielzahl an Einflüssen abhängig ist. Weiterhin wird deutlich, dass die Vergleichbarkeit der in der Literatur vorhandenen Ergebnisse sehr schwierig und die Beschreibung des Einflusses der Prüftemperaturen auf das autogene Schwinden nur bedingt möglich ist.

Die Verwendung verschiedener Auswertemethoden zur Ermittlung der autogenen Schwindverformungen führt in vielen Fällen zu erheblichen Unterschieden in den resultierenden Endschwindwerten gleicher Zusammensetzungen. Da lediglich ein Zeitpunkt ermittelt wird, ab dem die autogenen Schwindverformungen starten, führt ein Fehler in der Bestimmung der *time zero* direkt zu vermeintlich unterschiedlich großen autogenen Schwindverformungen. Da zum Zeitpunkt der *time zero* in der Regel hohe Schwindgeschwindigkeiten auftreten, kann es durch ein fehlerhaftes Nullen der gemessenen Verformungen zu eklatanten Fehlinterpretationen kommen.

- Der Vergleich zwischen von bislang verwendeten sowie neu entwickelten Verfahren zur Bestimmung der *time zero* und dem Zeitpunkt der Spannungsentwicklung im Schwindring soll die Dringlichkeit eines einheitlichen Verfahrens unterstreichen.

Grundsätzlich können sich bereits bei der Untersuchung lediglich eines Materials durch die Verwendung verschiedener Prüfverfahren unterschiedliche Ergebnisse im Verlauf und in der Höhe der gemessenen Verformungen ergeben. Da meistens nur ein Prüfverfahren angewandt wurde, kann im Nachgang nicht zwischen material- und versuchstechnischen Einflüssen unterschieden werden. Die Konsequenz ist ein Ergebnis, welches nicht zwangsläufig fehlerfrei ist und damit nicht den tatsächlichen autogenen Schwindverformungen entspricht.

- Mit Hilfe der systematischen Gegenüberstellung der Ergebnisse aus unterschiedlichen Prüfverfahren können die Auswirkungen auf die autogenen Schwindverformungen detektiert und die festgestellten versuchstechnisch bedingten Unterschiede aufgezeigt werden.

Eine weitere Herausforderung stellt die Bestimmung des Einflusses unterschiedlicher Umgebungs- bzw. Prüftemperaturen dar. Zur Bestimmung des autogenen Schwindverhaltens unter Temperatureinfluss wird in den bisherigen Untersuchungen das gleiche Verfahren zur Ermittlung der *time zero* verwendet wie bei den Untersuchungen bei einer Prüftemperatur von 20 °C. Ob dieses Vorgehen allerdings zu einem realistischen Ergebnis führt, ist bisher nicht bekannt, wird aber bislang vorausgesetzt [San12]. Erst mit dem Nachweis, dass sich mit dem angewendeten Verfahren auch bei verschiedenen Prüftemperaturen jeweils die korrekte *time zero* ermitteln lässt, ist die Untersuchung des Einflusses der Temperatur möglich und sinnvoll.

- Die gezielte Auswahl der eingesetzten Prüfverfahren und die Verwendung einer geeigneten Methode zur Bestimmung der *time zero* soll hier Aufschluss darüber geben, ob unterschiedliche Prüftemperaturen einen Einfluss auf die sich ergebenden autogenen Schwindverformungen haben.

Erschwerend bei sämtlichen in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen kommt hinzu, dass zur Prüfung der Materialien lediglich eine kleine Probenmenge aus einem größeren Gebinde entnommen werden musste. Selbst bei sachgemäßer Entnahme der Probe können sich bereits leichte Schwankungen in den jeweiligen Zusammensetzungen ergeben. Dabei führt beispielsweise schon die kleinste Abweichung im Gehalt des hochwirksamen Fließmittels zu einer Änderung des Ausbreitfließmaßes. Darüber hinaus kann es aufgrund der verzögernden Wirkung zu einem zeitlich versetzten Erstarrungsverhalten kommen. Somit lässt sich bei der Bestimmung der *time zero* in einem parallelen Versuch, also mit unterschiedlich entnommenen Proben, nicht ausschließen, dass die ermittelte *time zero* aufgrund des unterschiedlichen Reaktionsverlaufs nicht auf die eigentliche Messung der Schwindverformung anwendbar ist. Die Anwendung des so ermittelten Startpunkts kann daher wiederum zu einer inkorrekten Ermittlung der autogene Endschwindwerte führen.

- Die Durchführung mehrerer Untersuchungsreihen sowohl mit dem Schwind Schlauch- als auch mit dem Schwindkegelverfahren lassen jeweils eine Aussage über die Vergleichs- und Wiederholgenauigkeit der Messungen von autogenen Schwindverformungen zu.

3.2 Konzeption der Untersuchungen

Zur Beschreibung des Einflusses von unterschiedlichen Prüftemperaturen auf das autogene Schwindverhalten von Hochleistungsmörteln werden Untersuchungen sowohl zum freien und dehnungsbehinderten Verformungsverhalten als auch zur Bestimmung der materialspezifischen Festigkeitsentwicklung durchgeführt. Die Grund-

lage dafür bilden genormte und in der Literatur anerkannte Prüfverfahren, welche allesamt unter quasi-isothermen Bedingungen durchgeführt werden. Dabei gelten die Prüfungen bei 20 °C jeweils als Referenz, die in Anlehnung an die Vergussrichtlinie [DAfStB06] durch die Prüftemperaturen 5 °C und 30 °C wiederum unter quasi-isothermen Bedingungen ergänzt werden.



Abbildung 3-1: Untersuchungsprogramm

Die umfangreiche Parametervariation zielt darauf ab, sämtliche durch die Temperatur resultierende Einflüsse zu erfassen und durch eine systematische Auswertung die Auswirkungen auf das autogene Schwinden zu beschreiben. Grundlage dafür bildet die Annahme, dass die Messung der Effekte exakt und reproduzierbar mit den ausgewählten Prüfverfahren über alle angegebenen Prüftemperaturen möglich ist. Ferner muss berücksichtigt werden, dass das reine Aufnehmen der Messwerte nicht ausreicht und zur Bestimmung des autogenen Schwindens, die Ermittlung einer exakten *time zero* notwendig ist. Dafür ist die Charakterisierung der verwendeten Materialien bzgl. der Konsistenz und des Erstarrungsverhaltens unter Temperatureinfluss notwendig. Das Untersuchungsprogramm (vgl. Abbildung 3-1) liefert durch die Kombination der Material- und Schwinduntersuchungen die erforderliche Datenbasis zur Bewertung des Schwindverhaltens unter Temperatureinfluss.

Die exakte Bestimmung der *time zero* wirkt sich unmittelbar auf die sich ergebenden autogenen Schwindverformungen aus. Aufgrund von Materialschwankungen und den unterschiedlichen Prüftemperaturen müssen ausgewählte Prüfverfahren zur Ermittlung des Startpunktes auf deren Anwendbarkeit und Genauigkeit hin überprüft werden:

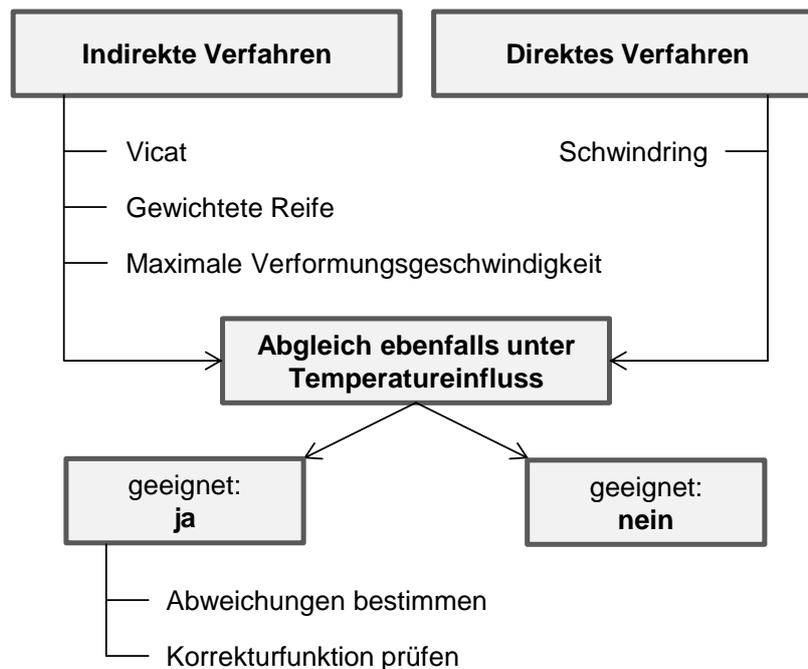


Abbildung 3-2: Vorgehen bei der Auswahl des Verfahrens zur Bestimmung der *time zero*

Der Zeitpunkt ab dem das Gefüge Spannungen übertragen kann, ist direkt mit dem Schwindring bestimmbar, weswegen hier auch von dem direkten Verfahren gesprochen wird. Da es sich hierbei um eine sehr aufwendige Untersuchung handelt, soll die Anwendbarkeit der indirekten Verfahren (vgl. Abbildung 3-2) überprüft werden. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen ist ein Verfahren zu wählen, mit dem die Eigenschaften des Zementsteingefüges direkt bestimmbar sind. Dadurch wird sichergestellt, dass die mechanischen Gefügeeigenschaften, unabhängig von der jeweiligen Prüftemperatur, zum Startpunkt nahezu identisch und die autogenen Schwindverformungen damit direkt miteinander vergleichbar sind. Dazu wird in dieser Arbeit auf das Schwindringverfahren zurückgegriffen, wobei hier der Beginn der Spannungsentwicklung als *time zero* definiert und im Folgenden mit t_{Ring} bezeichnet wird.

Dazu werden ausgewählte Untersuchungen mit dem Schwindring genutzt, um den Spannungsverlauf nach der *time zero* bei unterschiedlichen Temperaturen zu ermit-

teln und mit den Ergebnissen aus den freien autogenen Schwindmessungen zu vergleichen. Die gezielte Beeinflussung des Behinderungsgrades des Schwindrings durch die Verringerung der Querschnittsabmessungen des Betonrings minimiert das Risiko eines Risses im Mörtel- oder Betonring. Die Reduzierung des Behinderungsgrades ermöglicht somit die Messung der Dehnungsentwicklungen über einen längeren Zeitraum hinweg. Durch die unterschiedlichen Prüftemperaturen ist eine Korrelation der ermittelten Startpunkte evtl. nur unter Zuhilfenahme einer Korrekturfunktion möglich.

Wie in Kapitel 2.3 erwähnt gibt es in der Literatur keine einheitliche Terminologie für das autogene Schwinden [Gru91], [Lur03a]]. Da in dieser Arbeit die Verformungen im Vordergrund stehen, die direkt zu Eigenspannungen führen, wird sich an der Definition von [Fon06] orientiert. Dabei wird zwischen plastischen und spannungsinduzierenden Verformungen unterschieden, welche durch die Bestimmung der maximalen relativen Verformungsgeschwindigkeiten voneinander getrennt werden. Um Irrtümer bzgl. der in dieser Arbeit verwendeten Termini zu vermeiden, werden diese nachfolgend kurz definiert:

Gemessene Verformungen:

Sie ergeben sich aus den aufgenommenen Messwerten des freien autogenen Schwindens, welche ab dem Zeitpunkt der Wasserzugabe ermittelt werden. Die dargestellten Verformungen ergeben sich primär aus dem verwendeten Prüfverfahren und enthalten noch sämtliche Fehler aus Materialungleichheiten, Einbaubaubedingungen und Entlüftungs- und Setzverhalten des eingebauten Materials.

Schwindgeschwindigkeit und Schwindbeschleunigung:

Aus den gemessenen Verformungen können mit Hilfe von einfacher und doppelter Bestimmung der Steigung die Extrempunkte des Schwindverlaufes ermittelt werden, die wiederum für die weitere Auswertung notwendig sind.

time zero:

Der Startpunkt der autogenen Schwindverformungen ist durch die *time zero* definiert. Dazu stehen mehrere Verfahren zur Verfügung von denen keines einheitlich geregelt ist. Eine zielführende Methode, die für den Startpunkt der spannungsinduzierenden autogenen Verformungen zur Verfügung steht, ist die Messung der Dehnungsentwicklung im Schwindring.

Spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen:

Diese ergeben sich aus den gemessenen Verformungen, welche zum Zeitpunkt der *time zero* genullt werden und somit den Verformungen entsprechen die zu Eigen-
spannungen im Mörtel- oder Betongefüge führen können.

Endschwindwert (zum Ende der durchgeführten Untersuchung):

Dieser Wert entspricht der Höhe der spannungsinduzierenden autogenen Schwind-
verformung zum angegebenen Zeitpunkt. In der Regel bezieht sich die Zeitangabe
auf den Zeitpunkt der zu Grunde liegenden *time zero* und nicht auf den Zeitpunkt der
Wasserzugabe.

3.3 Charakterisierung der verwendeten Materialien

Bei den Materialien der Hauptuntersuchungen handelt es sich um frei am Markt er-
hältliche Vergussmaterialien, die nahezu ausschließlich als Produkte für den Offsho-
rebereich angeboten werden. Die in Säcken vorkonditionierte Feststoffmischung ent-
hält neben dem Zement, den Zusatzstoffen und der Gesteinskörnung auch Zusatz-
mittel in Pulverform und muss lediglich mit Wasser angemischt werden. Der Herstel-
ler gibt ein Dosierbereich für Wasser an, mit dem die angegebenen Eigenschaften
des Materials erreicht werden können. In der Regel wird bei den Untersuchungen
dieser Arbeit jeweils der minimale Wassergehalt (6,2 % bis 12,0 % bezogen auf
Masse Feststoff) verwendet, da hierbei mit den größten autogenen Verformungen zu
rechnen ist und die höchste Stabilität des Materials erreicht werden müsste. Die ge-
naue Zusammensetzung ist bei keinem Vergussmaterial bekannt, weswegen auch
keine Aussage über die das autogene Schwinden beeinflussende Faktoren, wie der
w/z-Wert, die Zementmenge, die Art und der Gehalt von Zusatzstoffen und -mitteln
sowie das Volumenverhältnis zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung getroffen
werden kann. Lediglich das Größtkorn der Zusammensetzung wird angegeben, wel-
ches zwischen einem und fünf Millimeter variiert. Nach [DAfStB06] wird bei einem
Größtkorn von ≤ 4 mm von einem Vergussmörtel und > 4 mm von einem Vergussbe-
ton gesprochen. Im Folgenden wird daher allgemein der Begriff Vergussmaterial
verwendet.

Zur Charakterisierung der verwendeten Vergussmaterialien werden in Tabelle 3-1
ausgewählte Kennwerte für Frisch- und Festmörteleigenschaften dargestellt.

Tabelle 3-1: Frisch- und Festmörteleigenschaften

Material	Wasser/ Feststoff- Verhältnis [-]	Festigkeit nach 28d [N/mm ²]	Ausbreit- fließmaß [cm]	maximale quasi- isotherme Wärme- entwicklung im Dewar [°C]	LP- Gehalt ungerüttelt [%]	LP- Gehalt gerüttelt [%]	Rohdichte [kg/dm ³]
Grout 1	0,062	131,0	23,0	43,3	4,4	3,8	2,41
Grout 2	0,085	134,5	29,0	55,1	2,4	2,2	2,46
Grout 3	0,084	165,8	19,3	43,2	3,6	3,3	2,37
Grout 4	0,075	181,7	12,5	50,4	4,1	3,6	2,61
UHPC 5	-	157,2	25,0	42,9	3,7	3,4	2,39

Aufgrund der hohen Ausbreitfließmaße (ausgenommen Grout 4) kann davon ausgegangen werden, dass sämtliche untersuchten Materialien hochwirksame Fließmittel enthalten. Das Fließmittel liegt dabei als reiner Wirkstoff in Pulverform vor (ausgenommen UHPC 5), wobei der Anteil bezogen auf die Gesamtmasse von 20 bis 25 kg pro Sack sehr gering ist. Zum Ansetzen einer Mischung wurden in der Regel lediglich 2400 g Trockenwerkmörtel eingewogen. Dadurch reduziert sich nicht nur die absolute Menge des Fließmittels sondern auch die Wahrscheinlichkeit der vollständigen Homogenität der Zusammensetzung innerhalb der Probe. Folglich kann es zu leichten Schwankungen innerhalb der Mischung kommen, was sich gerade bei hochwirksamen Fließmittel schnell auf den Hydratationsverlauf auswirken kann.

Zur Überprüfung der Auswirkung der Teilentnahmen aus einem Gebinde wurden die abgewogenen pulverförmigen Ausgangsstoffe von der Zusammensetzung Grout 1 und UHPC 5 dreimal hintereinander mit Wasser angemischt und dabei jeweils das Ausbreitfließmaß bestimmt. Die repräsentativen Proben von Grout 1 wurden dafür alle aus dem gleichen Gebinde (25 kg Sack) entnommen, wohingegen die pulverförmigen und flüssigen Ausgangsstoffe des UHPC 5 entsprechend der Mischungszusammensetzung einzeln eingewogen wurden. Wie in Abbildung 3-3 zu erkennen ist, ergeben sich in Abhängigkeit des Materials Unterschiede in der Gleichmäßigkeit der ermittelten Ausbreitfließmaße. Da beim UHPC 5 alle Komponenten einzeln abgewogen werden, kann hier von einer nahezu identischen Zusammensetzung bei den drei Durchgängen ausgegangen werden, was sich durch geringe Schwankungen im Ausbreitfließmaß bemerkbar macht. Bei Grout 1 hingegen ergeben sich Schwankungen im Ausbreitfließmaß von bis zu 10,5 %, welche nicht mehr aus normalen Versuchs-

streuungen resultieren können. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass die Zusammensetzungen der einzelnen Proben der verwendeten Trockenmörtel variierende Fließmittelgehalte aufweisen und somit nicht absolut identisch sind.

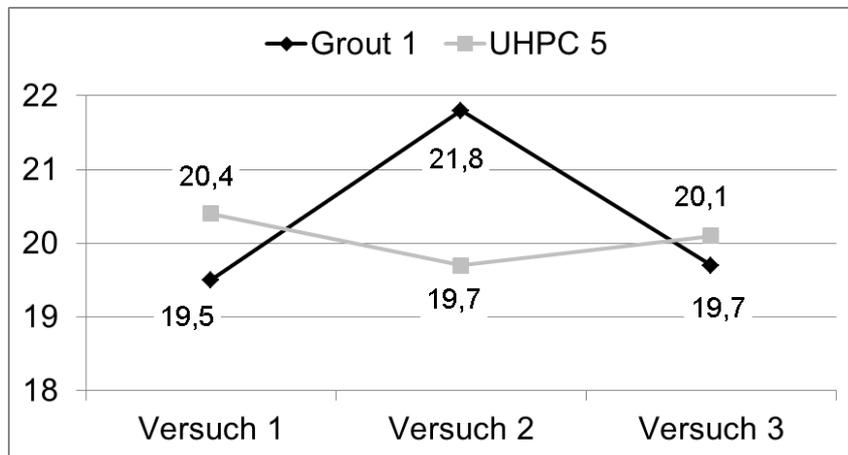


Abbildung 3-3: Ausbreitfließmaße von Grout 1 und UHPC 5

Das Anmischen des Materials wurde in einem Klimaraum mit Normklima (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte) in einem Mörtelmischer (DIN 1164) durchgeführt. Sowohl das jeweilige Material als auch das verwendete Wasser wurden mindestens 24 h vor dem Anmischen im Normklima bei 20 °C und 65 % rel. LF. gelagert. Für die Untersuchungen wurden immer jeweils ein Liter Material nach dem gleichen Mischregime (Tabelle 3-2) für die Dauer von 8 min angemischt. Nach 60 s bzw. ab Umschlag der Pulvermischung in eine Dispersion, wurde der Mischvorgang für 30 s unterbrochen, um die anhaftenden Feinstoffe am Mischerpaddel und an der Innenseite der Rührschüssel wiederum der Dispersion zuzuführen. Somit kann ein vollständiges Vermischen der eingewogenen Bestandteile gewährleistet werden.

Tabelle 3-2: Mischregime

trocken Vormischen	Wasserzugabe	Mischen	Abkratzen der Teile	Mischen
0-15	15-30	30-60	60-90 bzw. ab Umschlag für 30 s	90-480
Stufe 1	Stufe 1	Stufe 1	-	Stufe 1

3.4 Besonderheiten der einzelnen Prüfverfahren

Für die Hauptuntersuchungen wird wie im Kapitel 2.5.2 beschrieben, auf das Schwindschlauch- und das Schwindkegelverfahren zurückgegriffen, da mit beiden Prüfverfahren ein reproduzierbares Messen von sehr kleinen autogenen Schwindverformungen möglich ist.

Die Messmethodik unterscheidet sich bei den beiden Prüfaufbauten grundlegend durch die Geometrie und Lagerung der Prüfkörper sowie in Art und Ausrichtung der Wegaufnehmer. Daher werden gerade zu Beginn der Untersuchungen bereits Unterschiede in den gemessenen Verformungen erwartet. Wie sich diese anfänglichen Unterschiede auf die autogenen Schwindverformungen auswirken und ob die Anwendung der gleichen *time zero* unabhängig vom Prüfverfahren zu vergleichbaren Ergebnissen führt, ist bislang nicht bekannt. Um bei diesem Vergleich eine größtmögliche Genauigkeit gewährleisten zu können, wird die Probenvorbereitung, der Ablauf des Einbaus und der Messvorgang immer nach der gleichen Arbeitsanweisung durchgeführt und im Folgenden näher beschrieben.

Der Mischvorgang der abgewogenen Ausgangsstoffe (vgl. Tabelle 3-2) führt abhängig von der Zusammensetzung zum Eintrag von Luftporen in den Frischmörtel. Generell verringert sich bei steigenden LP-Gehalten bei gleichem Volumen des Probekörpers im Prüfaufbau der Anteil an schwindfähigem Material. Zur Einhaltung möglichst geringer Volumina an Luftporen über die gesamte Untersuchungsreihe wird jedes Material nach dem Anmischen direkt in der Rührschüssel auf einem Vibrationstisch Typ A nach [DIN196_1] auf Stufe 5 für 30 s verdichtet. Bei sämtlichen Mischungen führt das Rütteln zu einer Reduzierung des Luftporengehaltes, was aus den Ergebnissen aus Tabelle 3-1 hervorgeht.

Um das Volumen des schwindfähigen Materials auch im Schwindschlauchverfahren möglichst konstant zu halten, findet das Befüllen der Schläuche ebenfalls unter Rüttelwirkung statt. Die flexiblen Schwindschläuche werden dazu einseitig mit einem Stopfen verschlossen und in ein Kunststoffrohr, welches durch ein Stativ aufrecht stehend fixiert wird, gestellt. Die gesamte Apparatur wird auf einem Vibrationstisch Typ A auf Stufe 5 für zweimal 60 s verdichtet. Während der Verdichtungs Vorgänge wird das Vergussmaterial über einen Trichter in das Wellrohr eingefüllt (vgl. Abbildung 3-4)



Abbildung 3-4: Vibrationstisch mit Halterung (links) zum Verfüllen der Schwindschläuche mit Hilfe eines Trichters (rechts)

Grundsätzlich sollte auf ein Rütteln des Vergussmaterials nach [DAfStB06] verzichtet werden. Da ein Austreiben der durch den Mischvorgang eingebrachten Luft jedoch nicht anders möglich ist, muss hier von der Richtlinie abgewichen werden. Durch die Verwendung des jeweils minimal angegebenen Wassergehalts werden verhältnismäßig viskose Mischungen mit hoher Sedimentationsstabilität erwartet. Zudem hat die enthaltene Gesteinskörnung ein Größtkorn von maximal 5 mm, wodurch die Gefahr des Absinkens der Gesteinskörnung durch den Eintrag von Rüttelenergie weiter reduziert wird. Exemplarisch wurde an der Zusammensetzung mit dem höchsten LP-Gehalt (Grout 4) ein Sedimentationsversuch durchgeführt. Dazu wurden zwei Sedimentationsrohre (\varnothing : 5 cm; Höhe: 30 cm) mit dem entsprechenden Vergussmaterial gefüllt und lediglich das eine für 60 s verdichtet. Nach dem Erhärten wurden die Probestkörper mittig in Längsrichtung durchgesägt, um so eventuelle Ungleichmäßigkeiten visuell feststellen zu können. Wie in Abbildung 3-5 zu erkennen, ist weder ein Absinken der Gesteinskörnung noch eine Ansammlung von Zementleim am oberen Rand des Rohres feststellbar.

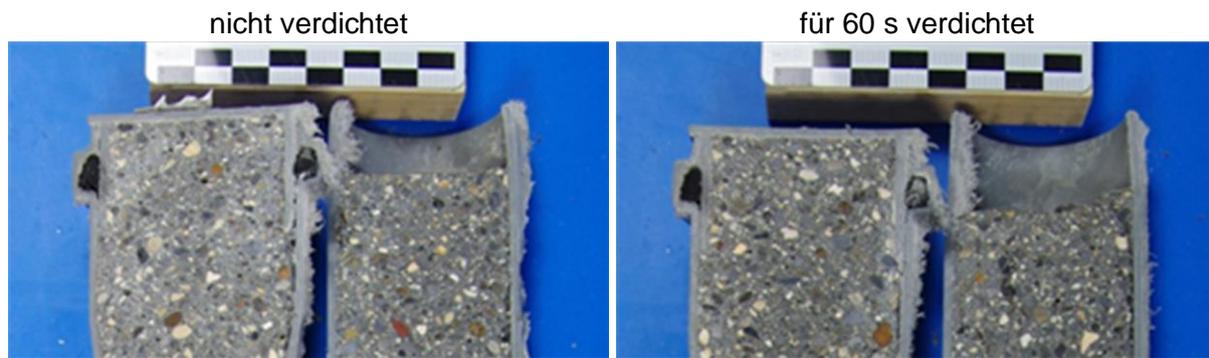


Abbildung 3-5: Aufgeschnittene Sedimentationsrohre von Grout 4

Für den Nachweis der konservierten Lagerungsbedingung der Materialien wurde die Diffusionsdichtheit bei der verwendeten Kunststoffolie des Schwindkegelverfahrens und beim Wellrohr des Schwindschlauchverfahrens überprüft. Dazu wurden mit Folie abgedeckte Gefäße und der an beiden Enden verschlossenen Schwindschlauch mit Wasser gefüllt und in einem Trockenschrank bei 35 °C über die Dauer von 14 Tagen gelagert und in regelmäßigen Abständen gewogen. Der festgestellte Wasserverlust dient damit als Maß für die Diffusionsdichtheit der verwendeten Folien bzw. Schläuche. Als Referenz kam ein ebenfalls mit Wasser gefülltes herkömmliches Marmeladenglas mit einem Blechdeckel mit Kunststoffdichtung zum Einsatz. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-3 dargestellt. Da dieser Prüfaufbau nicht den Verhältnissen im Schwindkegel entspricht, sind die Ergebnisse lediglich untereinander vergleichbar und können nicht direkt auf die nachfolgenden Schwinduntersuchungen übertragen werden. Der Wasserverlust im Schwindschlauch beträgt 1,8 % nach 14-tägiger Lagerung bei 35 °C und ist damit deutlich höher als bei der Referenz dem Marmeladenglas. Der Vergleich zwischen dem Schlauch und der für die Schwindkegeluntersuchung verwendeten Kunststoffolie ergibt einen ca. fünfmal höheren Wert bei der Folie. Bei der dicken Folie verringert sich zwar der Anteil der entwichenen Wassermenge nochmal um die Hälfte, dennoch ist die Verwendung dieser Folie durch die erhöhte Steifigkeit beim Schwindkegelverfahren nicht praktikabel. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Wasserverlust beim Schwindkegelverfahren größer ist als im Schwindschlauchverfahren, was bei der Auswertung der Ergebnisse beachtet werden muss, zumal das Material im Kegel direkt an der Oberfläche unter der Folie parallel zur Messrichtung austrocknet, wo sich ebenfalls der Reflektor zur Bestimmung der Längenänderung des Probekörpers befindet.

Tabelle 3-3: Ergebnisse der Diffusionsdichtheitsprüfung bei 35 °C

Wasserverlust nach x Tagen [d]	Glas [‰]	handelsübliche Kunststoffolie [‰]	dicke Kunststoffolie [‰]	Schlauch [‰]
1	0,02	0,72	0,30	0,15
3	0,02	2,20	0,73	0,49
7	0,05	4,81	1,84	0,99
14	0,07	8,69	3,76	1,82

Schwindkegelverfahren

Nach dem Mischvorgang wird das Material über eine geneigte Rutsche in den Kegel eingefüllt, wodurch nochmals Luft aus dem selbständig fließendem Frischmörtel entweichen kann. Der zur Verformungsmessung notwendige Reflektor wird unter eine handelsübliche Kunststoffolie geklebt und mittig auf der Kegeloberfläche positioniert. Ein leichtes Eindrücken des Reflektors in das noch fließfähige Material gewährleistet einen ausreichenden Verbund und verhindert damit ein Auftreiben des Reflektors durch unterschiedliche Dichten oder evtl. noch nicht abgeschlossene Entlüftungsvorgänge. Anschließend wird die Folie mittels Pinsel vorsichtig auf der Kegeloberfläche glattgestrichen und am oberen Rand des Schwindtopfes umgeschlagen und luftdicht fixiert. Somit kann eine nahezu konservierte Lagerung gewährleistet werden, was durch die Ermittlung der Masse des Prüfgutes vor und nach der Untersuchung kontrolliert wird.

Zur Aufzeichnung der Kerntemperatur ist vor dem Beginn jeder Messung ein Temperaturelement vom Typ K durch die Folie im Volumenmittelpunkt des Schwindkegels unterhalb des mittig liegenden Reflektors positioniert worden. Ein Plexiglaskubus (Abbildung 3-6), welcher den kompletten Schwindkegelaufbau einhaust, dient zur Vermeidung von größeren Temperaturschwankungen resultierend aus Luftbewegungen innerhalb des Klimaraumes. Nach dem Ablauf der Untersuchung wurden die Abnahme der Masse und die Höhe des Schwindkegels bestimmt. Die Höhe des Kegels ergibt sich dabei aus dem Abstand zwischen der Unterkante des Reflektors und der Spitze des Kegels. Die Verformungswerte werden auf die ermittelte Höhe plus den Endwert der gemessenen Verformungen, also auf die Ausgangslänge des Probekörpers zum Beginn der Verformungsmessung, bezogen und als $\mu\text{m}/\text{m}$ mit umgedrehten Vorzeichen dargestellt.



Abbildung 3-6: Befüllen des Kegels mit Hilfe einer Rutsche (links), Plexiglaskubus zum Schutz vor Temperaturschwankungen im Raum (rechts)

Schwindschlauchverfahren

Nach dem Einfüllen des Materials unter Rüttelwirkung wird das offene Ende des Schlauches mit dem zweiten Stopfen verschlossen. Dabei ist darauf zu achten, dass es zu keinem Spannungseintrag durch Stauchung des Schlauches oder Kompression des Materials kommt. Dazu ist im Verschlussstopfen eine Bohrung vorgesehen (vgl. Abbildung 1 2), durch die die überflüssige Luft beim Einpressen des Stopfens entweichen kann.

Zusätzlich wird der flexible und noch offene Schwindschlauch mittels Halterung an der ersten Lamelle auf der Oberkante des Kunststoffrohres fixiert. Dadurch kann der Schlauch spannungsfrei mit dem Stopfen geschlossen und das Loch im Endstopfen mit einer Knetmasse luftdicht verschlossen werden.

Die Längenänderung des gefüllten Schwindschlauchs wird einseitig mit einem induktiven Wegaufnehmer (Auflösung: 0,3 μm) gemessen, wobei das andere Ende des Schlauches mittels Schlauchklemme, Gewindeschraube und Flügelmutter am Prüfaufbau fixiert wird. So ist sichergestellt, dass sämtliche Verformungen des Schwind-

schlauches mit Hilfe des Wegaufnehmers erfasst werden können. Zur Minimierung der Reibung zwischen Prüfvorrichtung und aufliegendem Schwindschlauch wird der Prüfaufbau auf der Seite der Längenänderungsmessung um 2 cm erhöht aufgestellt.

Zur Vereinfachung des Prüfablaufs wurde bei sämtlichen Untersuchungen immer direkt gegen den Kunststoffstopfen gemessen, was trotz der kontinuierlichen Messung zu einem Fehler aufgrund von Kriecherscheinungen des Kunststoffes im Bereich der Messtasterspitze führen kann. Eine Vergleichsmessung über 96 h ergab eine Kriechverformung durch die Federkraft des Wegaufnehmers von $8,0 \mu\text{m}$. Da diese Verformung im Vergleich zu den gemessenen Gesamtverformungen sehr gering ist und der Fehler bei jeder Messung auftritt, bleibt dieser in der späteren Auswertung unberücksichtigt. Die Aufzeichnung der Hydratationswärmeentwicklung erfolgt mit einem Thermoelement Typ K, welches in einer Lamelle etwa in der Mitte des Schwindschlauches mittels einer Knetmasse fixiert wird. So ist das Thermoelement zusätzlich gegenüber den Umgebungsbedingungen geschützt und zeichnet lediglich die Temperaturentwicklung des zu untersuchenden Materials auf.

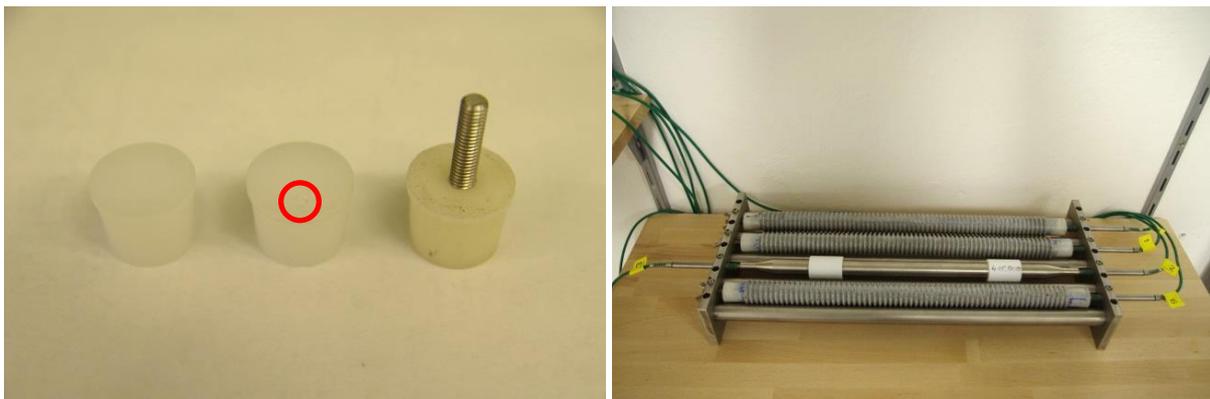


Abbildung 3-7: Stopfen (herkömmlich, mit Entlüftungsloch und mit Gewindestab) (links), Prüfaufbau für drei Schwindschläuche ohne einseitige Erhöhung (rechts)

Mit den vorgestellten Maßnahmen wird mit einem angemessenen Aufwand eine gleichmäßige Homogenität des zu untersuchenden Materials erwartet. Das hohlstellenfreie Befüllen ist bei beiden Prüfverfahren jedoch selbst bei hochfließfähigen Materialien nicht möglich (Abbildung 3-8). Die Folgen und Auswirkungen werden im folgenden Unterkapitel diskutiert.



Abbildung 3-8: Ansammlung von Luftporen unter der Folie des Schwindkegels (links) und in den Lamellen des Schwindschlauches (rechts)

Schwindrinnenverfahren

Die Verformungen werden analog zum Schwindschlauchverfahren an einem Ende des Probekörpers gemessen. Bauartbedingt ist dieses erst möglich, wenn das zu untersuchende Material eine gewisse Steifigkeit besitzt um sich mit der Verankerung an der gegenüberliegenden Seite des Prüfaufbaus zu verkrallen und um Zugkräfte übertragen zu können, die aus den auftretenden Schwindverformungen resultieren.

Durch Modifikation des Prüfaufbaus kann eine nahezu konservierende Lagerung des Probekörpers gewährleistet werden, wodurch die Voraussetzung für die Messung autogener Schwindverformung erfüllt ist. Im Gegensatz zum Schwindschlauch- und Schwindkegelverfahren können Verformungen, ähnlich wie im Schwindring erst nach Erreichen einer ausreichenden Steifigkeit des Materials gemessen werden.

Da die Verformung des Probekörpers an einer Seite gemessen wird und die andere Seite fest eingespannt ist, lässt sich die grundlegende Messmethodik mit der aus dem Schwindschlauchverfahren vergleichen. Ein wesentlicher Unterschied liegt hingegen in der Art der Probenlagerung. Während beim Schwindschlauch ein vollkommen geschlossenes System vorliegt, sind die Lagerungsbedingungen im Schwindrinnenverfahren eher mit denen aus dem Schwindkegelverfahren vergleichbar. Durch den Einsatz von Dichtungsfett und handelsüblicher Kunststoffolie (vgl. Schwindkegelverfahren) kann im Schwindrinnenverfahren eine konservierende Lagerung gewährleistet werden, wobei sich das Material sowohl in der Breite als auch in der Höhe verformen kann ohne dass eine Verformungsänderung detektierbar ist. Daher hat beim Schwindrinnenverfahren anders als beim Schwindkegelverfahren die aufsteigende Luft keinen Einfluss auf das Ergebnis der autogenen Schwindmessung. Weiterhin muss bei der Auswertung der gemessenen Verformungen der im Vergleich zum Schwindschlauchverfahren erhöhte Wasserverlust in Folge der Verwendung der

handelsüblichen Kunststoffolie (vgl. Tabelle 3-3) beachtet werden, wobei anders als beim Schwindkegelverfahren das Trocknungsschwinden an der Oberfläche senkrecht zur Messrichtung stattfindet.

Das Volumen der Schwindrinne ist um ein vielfaches größer als das des Schwindschlauchs und des Schwindkegels. Dadurch ist in der Schwindrinne aufgrund des gesteigerten Materialeinsatzes mit einer höheren Wärmeentwicklung zu rechnen. Bei den Schwindrinnen ist zur Reduzierung der Wärmeentwicklung während der exotherm ablaufenden Reaktion keine aktive Temperierung des Probenmaterials vorgesehen. Zur Charakterisierung des Einflusses der unterschiedlichen Hydratationswärmeentwicklungen wurden Vergleichsuntersuchungen mit einer herkömmlichen und einer mit einem selbst konzipierten Kühlsystem ausgestatteten Schwindrinne durchgeführt. Dazu wurde in die an den Seiten der Schwindrinne befindlichen Hohlräume Silikonschläuche eingebracht, die angeschlossen an ein Kryostat für die Temperierung des Probekörpers sorgen. Durch mehrmaliges Durchleiten des Silikonschlauches innerhalb der Hohlräume des Prüfaufbaus sollte ein hinreichender Wärmeübergang zwischen wassergefülltem Schlauchsystem und dem Edelstahlgehäuse der Schwindrinne sichergestellt werden (vgl. Abbildung 3-9).



Abbildung 3-9: herkömmliche Schwindrinne (links), mit Kühlsystem ausgestattete Schwindrinne (rechts)

Aufgrund der Probenkörperlänge im Schwindrinnenverfahren von einem Meter, kann auf eine Normierung der aufgenommenen Schwindwerte verzichtet werden, wodurch der Fehler bei der Umrechnung im Vergleich zum Schwindschlauch- und Schwindkegelverfahren kleiner ausfallen müsste.

Schwindringverfahren

Mit Hilfe der Untersuchungen mit dem Schwindringverfahren wird der maßgebende Startpunkt (t_{Ring}) der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen er-

mittelt. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Prüfverfahren werden mit dem Schwindring keine linearen Schwindverformungen gemessen, sondern die Stauchung des Stahlrings infolge des aufschwindenden Mörtelrings ermittelt. Grundsätzlich kann durch die Konstruktion des Prüfaufbaus (vgl. Abbildung 3-10) mit dem Boden aus PA, der umlaufenden Schalung aus PVC und der abdeckenden Kunststoffolie die konservierende Lagerung des Probekörpers gewährleistet werden. Beim Schwindring wird die dicke Kunststoffolie (vgl. Tabelle 3-3) verwendet, wodurch der Wasserverlust im Vergleich zum Schwindkegelverfahren geringer und im Vergleich zum Schwindschlauchverfahren höher ausfällt. Dabei ist jedoch von einem geringeren Einfluss des Trocknungsschwindens auf das Ergebnis zu erwarten, da die Austrocknung des Materials senkrecht zur Messrichtung stattfinden würde.



Abbildung 3-10: Schwindring mit installierter Messsensorik (links), Anordnung zweier Schwindringe im Klimaschrank (rechts)

Ähnlich wie im Schwindrinnenverfahren werden auch im Schwindringverfahren erst Verformungen des innenliegenden Stahlrings gemessen, wenn das Gefüge des außenliegenden Mörtel- oder Betonrings soweit erhärtet ist, dass Zugspannungen übertragen werden können. Um diesen Zeitpunkt bei jedem Material und jeder Prüftemperatur zielsicher bestimmen zu können, wurde speziell für diese Untersuchungen ein Schwindring mit einem möglichst geringen Behinderungsgrad verwendet. So wird die Wahrscheinlichkeit einer frühen Rissbildung im schwindenden Material reduziert und die Möglichkeit der Aufzeichnung der Ringverformungen über einen längeren Zeitraum ermöglicht. Dadurch lassen sich die Verformungscharakteristika mit den Ergebnissen aus den anderen Prüfverfahren vergleichen, um so mögliche prüftechnischen Einflüsse detektieren zu können.

Wie sich allerdings unterschiedliche Behinderungsgrade des Mörtelrings auf den Zeitpunkt der ersten Spannungsentwicklung (t_{Ring}) auswirkt, ist bislang nicht bekannt. [Hos06] untersuchte den Zeitpunkt der Rissbildung bei unterschiedlichen Behinde-

rungsgraden und stellte eine immer früher auftretende Rissbildung mit steigendem Behinderungsgrad fest. Dabei war es unerheblich, ob der Behinderungsgrad mit der Erhöhung des Stahlquerschnittes oder der Verringerung des Betonringquerschnitts mit Beibehaltung des jeweils anderen, gesteigert wurde. Generell kann der Behinderungsgrad des Schwindringverfahrens mit der folgenden Formel aus [Hos04] bestimmt werden:

$$\Delta u_{St}(t_i) = \frac{\Delta \varepsilon_{AS}(t_i) \cdot E_B(t_i)}{\frac{E_B(t_i)}{E_{St}} \cdot C_{1R} + C_{2R}} \cdot \frac{R_{St,a} \cdot C_{1R}}{E_{St}} \quad [3.1]$$

Um nun den Einfluss des Behinderungsgrades auf den Zeitpunkt der ersten Spannungsentwicklung (t_{Ring}) feststellen zu können, wurde Material aus einer Mischercharge parallel in zwei Schwindringe mit jeweils unterschiedlichem Behinderungsgrad eingebaut und die auftretenden Spannungen im Stahlring aufgezeichnet. Die Stahlringe mit identischen Abmessungen wurden dabei von zwei unterschiedlich dicken Mörtelringen umschlossen, wobei die Breite der Mörtelringe zwischen 18,0 mm (dünn) und 29,0 mm (dick) variiert. Standardmäßig in dieser Arbeit verwendet, wurde der „dicke“ Mörtelring, dessen Volumen sich am Volumen des Schwindkegels orientiert. Beim „dünnen“ Mörtelring sollte der Behinderungsgrad um ca. 10 % reduziert werden. Die beiden Behinderungsgrade können mit Hilfe der o.g. Formeln berechnet werden und betragen für den „dünnen“ Schwindring 43,4 % und für den „dicken“ 52,5 %.

Erwartungsgemäß ergeben sich abhängig vom Behinderungsgrad unterschiedlich hohe Stauchungen im Schwindring (vgl. Abbildung 3-11), wobei der dickere Mörtelring folgerichtig eine größere Verformung des Stahlrings hervorruft. Das Zusammenziehen des kleineren Mörtelrings wird durch den innenliegenden Stahlring stärker behindert, was zu Zugspannungen innerhalb des Querschnittes führt und sich bereits nach 48 h ein Riss in radialer Richtung einstellt. Beim dickeren Mörtelring lässt sich bis zum Ende der Untersuchung (> 84 h) kein Riss detektieren, obwohl die Stauchung des Stahlrings weiterhin ansteigt.

Entscheidend ist allerdings, dass bei beiden Schwindringen ein nahezu identischer Beginn der spannungsinduzierenden Verformungen (t_{Ring}) festgestellt werden kann. Dieses lässt sich deutlich an dem zeitgleichen Abfall der relativen Verformungsgeschwindigkeiten nach ca. 26 h erkennen (vgl. Abbildung 3-11, rechte Seite). Daher kann davon ausgegangen werden, dass der in dieser Arbeit verwendete Schwindring repräsentative Ergebnisse bzgl. des Startpunkts der spannungsinduzierenden Verformungen (t_{Ring}) liefert. Erst im weiteren Verlauf kommt es zu Abweichungen der

gemessenen Verformungen, wobei im „Ring 2_dünn“ nach etwa 48 h ein eindeutiger Riss im Mörtel durch einen schlagartigen Abfall der Verformungen detektiert wird.

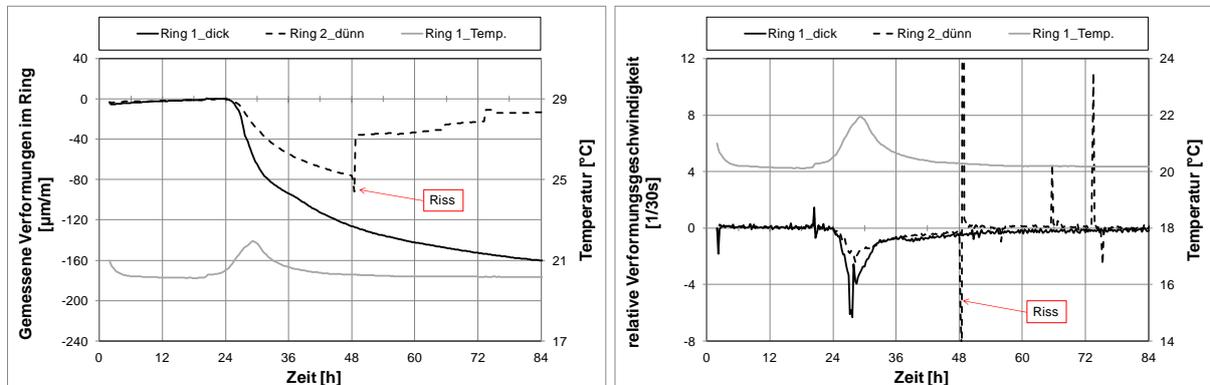


Abbildung 3-11: Verformungsentwicklung im Schwindringverfahren mit unterschiedlichen Behinderungsgraden

Zur Sicherstellung der konservierenden Lagerung des Materials wurde die Temperaturentwicklung nicht direkt im Mörtelring sondern an der Innenseite des Schwindrings gemessen. So kann von einer Positionierung eines Temperatursensors innerhalb des Mörtelrings abgesehen werden, wodurch es keine Fehlstellen innerhalb der Abdeckung des Prüfaufbaus gibt. Somit lässt sich die Möglichkeit des Feuchtigkeits- und Luftaustauschs zwischen dem untersuchten Material und der Umgebung auf ein Minimum reduzieren. Aufgrund der geringen Dicke des Stahlrings von 3,5 mm und der guten Wärmeleitfähigkeit des Edelstahl konnte in einer Vergleichsuntersuchung kein signifikanter Unterschied zwischen dem Temperaturverlauf im Material und an der Innenseite des Schwindrings detektiert werden. Auch die für die Auswertung der Schwindverformungen erforderlichen Zeitpunkte der maximalen Hydratationstemperatur zeigten keine nennenswerten zeitlichen Differenzen.

3.5 Vorüberlegungen zur Durchführung und Auswertung der Untersuchungen

Die Messung der Schwindverformungen beginnt direkt nach dem Einbau der Probe in den jeweiligen Prüfaufbau im noch plastischen Zustand des mineralischen Systems. Folglich werden vor den spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen auch alle weiteren sich evtl. überlagernden Verformungen aufgezeichnet. Dazu zählen das chemische Schwinden, die Setzungs- und Entlüftungsvorgänge sowie die Temperaturverformungen, die aus der Temperaturdifferenz des Materials direkt nach dem Mischen und der jeweiligen Prüftemperatur resultieren. Da das Material zu dieser Zeit noch plastisch verformbar ist, können sämtliche Volumenverän-

derungen durch das Material selbst kompensiert werden, weshalb es noch zu keinerlei Eigenspannungen im Zementsteingefüge kommt. Die zugehörigen freien autogenen Verformungen werden analog zu anderen Veröffentlichungen u.a. [Hol01], [Epp10] mit umgekehrten Vorzeichen aufgetragen, wodurch es in der Regel zu einem Verformungsverlauf oberhalb der Abszisse kommt.

Zur Detektion von variierenden Hydratationsverläufen bei gleichem Material in unterschiedlichen Prüfaufbauten wurde die Temperaturentwicklung des Materials in allen hier verwendeten Prüfverfahren aufgezeichnet. Durch die grundlegend verschiedenen Geometrien der verwendeten Prüfaufbauten, ändert sich nicht nur das Probekörpervolumen sondern auch die Oberfläche, die für die Temperierung der Probe zur Verfügung steht. Daher muss überprüft werden, ob der Grenzwert aus [Taz00] für die Temperaturerhöhung des Materials während der Untersuchungsdauer von maximal 2 K unabhängig vom Prüfaufbau eingehalten werden kann. Weiterhin stellt sich die Frage, ob abweichende Zeitpunkte der auftretenden Temperaturmaxima lediglich auf einen zeitlich versetzten Hydratationsverlauf hindeuten, oder dabei bereits von einer geänderten Hydratationsreaktion des Materials ausgegangen werden muss.

Aufgrund der Verwendung von Material aus einem Anmischvorgang in beiden Prüfaufbauten und der parallelen Messung von freien und dehnungsbehinderten Schwindverformungen sowie der jeweiligen Temperaturentwicklung, kann der Beginn der Spannungsentwicklung im Schwindring eindeutig identifiziert und direkt auf die gemessenen Verformungen im Schwindschlauch angewendet werden. Neben der exakten Ermittlung der freien spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen lässt sich so auch überprüfen, wie die Startpunkte (*time zero*) aus den bislang verwendeten Ersatzverfahren, dem Zeitpunkt der ersten Spannungsentwicklung entsprechen. Ein geeignetes Verfahren muss über den gesamten untersuchten Temperaturbereich reproduzierbare Ergebnisse liefern, die mit den ermittelten Werten aus dem Schwindringverfahren vergleichbar sind. Nur so ist eine Bewertung des Temperatureinflusses auf autogenen Schwindverformungen möglich und sinnvoll. Zudem könnte mit dem möglichen Ersatzverfahren auf die parallele und sehr aufwendige Messung mit dem Schwindringverfahren verzichtet werden.

Für die genaue Ermittlung des Beginns der Spannungsentwicklung im Schwindringverfahren wird ebenfalls die relative Verformungsgeschwindigkeit ermittelt, die zu Beginn der Messung im spannungsfreien Zustand nahezu dem Wert Null entspricht. Sobald die ersten Zugkräfte im Vergussmaterial übertragen werden können, wird der Stahlring gestaucht, wodurch der Verlauf der Änderungsrate ins Negative (bei diesem Verfahren wurde auf den Vorzeichenwechsel verzichtet) abfällt und der Zeitpunkt des Beginns somit eindeutig bestimmbar ist. Es kann vorkommen, dass die Messwerte der im Schwindring verbauten DMS-Viertelbrücken direkt nach dem Start

der Messung bis zum Auftreten erster Spannungen im Stahlring anfangen zu wandern [Hof87]. Da es lediglich zu Beginn der Messung ($\leq 3,0$ h) zu einer Umfangsänderung des Ringes, bedingt durch die anfängliche Temperaturanpassung des gemischten Materials an die jeweiligen Prüftemperatur kommen kann, können spannungsinduzierende Verformungen des Materials ausgeschlossen werden. Das Wandern der Messwerte kann zu einer Fehlbestimmung des Zeitpunkts der Spannungsentwicklung führen, weswegen in diesem Fall auf die aufgezeichneten Messwerte aus der zusätzlich installierten DMS-Halbbrücke zurückgegriffen wird. Aufgrund der speziellen Zusammenschaltung einzelner DMS zu einer Halbbrücke können diese Messwerte nicht für die dauerhafte Messung verwendet werden, da jeder einzelne Messwert aus der Summe der Verformungsanteile aus radialer und axialer Richtung des Schwindrings zusammengesetzt ist. Kommt es nicht zum sogenannten Wandern der Messwerte, ist der Zeitpunkt des Abknickens der relativen Verformungsgeschwindigkeit bei Verwendung der Viertel- oder der Halbbrücke identisch.

Für die Auswertung der gemessenen Verformungen ist die Bestimmung der *time zero* zwangsläufig notwendig. Neben der Anwendung der unter Kapitel 2.5.3 genannten Verfahren werden die einzelnen Verformungsverläufe näher untersucht. Dazu wird neben der relativen Verformungsgeschwindigkeit auch die relative Verformungsbeschleunigung auf deren Extrempunkte und den entsprechenden Zeitpunkten hin untersucht. Je nach Material und Prüftemperatur wurden Messwerte bis zu 168 h in einem Intervall von 30 s aufgezeichnet. Sowohl im Schwindkegel- als auch im Schwindschlauchverfahren ist die nachfolgende „Kurvendiskussion“ der Schwindverläufe nicht ohne weiteres möglich, da die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe stark rauschen. Um dennoch Aussagen über die Zeitpunkte der Extrempunkte im Schwindverlauf machen zu können folgt mit Hilfe einer Regressionsanalyse, die Überführung der aufgenommenen Messwerte in ein Polynom n -ten Grades ($P(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i, n \geq 0$). Dafür wurde auf das Shareware-Programm „Curve Expert“ zurückgegriffen, welches bei der Regressionsanalyse mehrere Lösungen anbietet und dazu den jeweiligen Korrelationsfaktor r_{xy} angibt.

$$r_{XY} = \frac{s_{XY}}{s_X s_Y} \quad [3.2]$$

$$\text{mit: } s_{XY} = \frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n (x_v - \bar{x})(y_v - \bar{y})$$

$$s_X = \frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n (x_v - \bar{x})^2$$

$$s_Y = \frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n (y_v - \bar{y})^2$$

Der Korrelationskoeffizient ist ein Maß für die Stärke eines linearen Zusammenhangs zwischen dem erstellten Polynom n-ten Grades und den tatsächlich gemessenen Verformungen und liegt immer zwischen -1 und 1. In der Tabelle 3-4 sind die Interpretationen möglicher Korrelationskoeffizienten aufgeführt.

Tabelle 3-4: Bewertung des Zusammenhangs in Abhängigkeit des Korrelationsfaktors

r	Interpretation
0	kein linearer Zusammenhang
0 - 0,5	schwach linearer Zusammenhang
0,5 - 0,8	mittlerer linearer Zusammenhang
0,8 - 1,0	stark linearer Zusammenhang
1,0	perfekt linearer Zusammenhang

Die einzelnen Verformungsverläufe wurden mit Hilfe der Regressionsanalyse in Polynome 14ten bis 20ten Grades mit starkem linearen Zusammenhang ($|r| > 0,95$) überführt. Der Grad des vorgeschlagenen Polynoms variierte nicht nur bei unterschiedlichen Vergussmaterialien, sondern auch bei Wiederholversuchen mit dem gleichen Material und der gleichen Prüftemperatur. Die Vorgabe eines bestimmten Grades des Polynoms hätte zur Folge, dass das Programm nicht immer die Lösung mit dem stärksten linearen Zusammenhang zurückgibt, wodurch es zwangsläufig zu größeren Abweichungen zwischen Polynom und dem gemessenen Verformungsverlauf kommen würde. Hinzu kommt, dass im Bereich der größten Verformungsgeschwindigkeit, also der Zeitraum in dem die *time zero* voraussichtlich liegt, die größten Abweichungen festgestellt werden konnten (vgl. Abbildung 3-12).

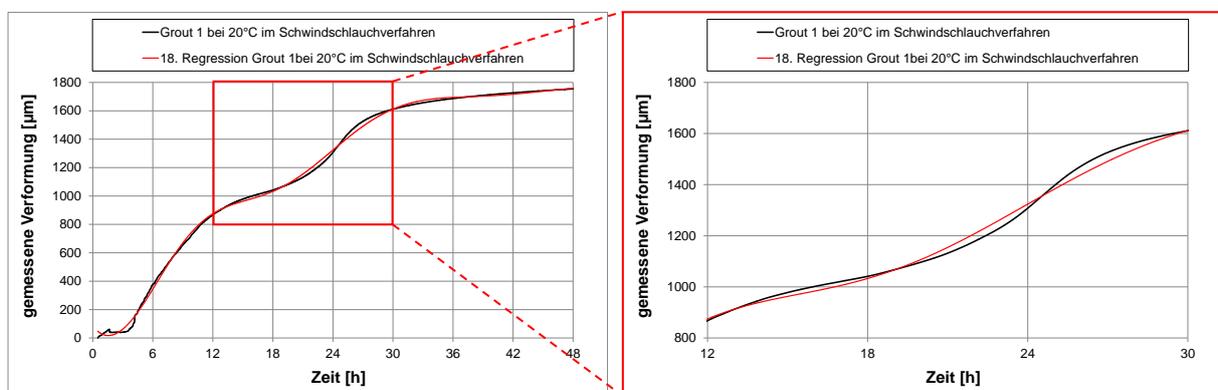


Abbildung 3-12: Vergleich zwischen den gemessenen Verformungen und einem Polynom 18-ten Grades von Grout 1

Das Polynom weicht im Bereich von 12 bis 30 Stunden deutlich von der Ausgangskurve ab, wodurch die Extrempunkte der Regressionskurve zeitlich nicht mehr mit den tatsächlich auftretenden Extrempunkten in den gemessenen Verformungen übereinstimmen müssen. Durch Verformungsgeschwindigkeiten von bis zu 90 $\mu\text{m}/\text{m}$ in diesem Zeitraum wirkt sich der Fehler bei der Bestimmung des Zeitpunkts der *time zero* direkt auf die sich ergebenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen aus. Da innerhalb einer Untersuchungsreihe ebenfalls unterschiedliche Grade des Polynoms auftreten, führen die unterschiedlichen Startpunkte des autogenen Schwindens zu einer größeren Streuung bei der Wiederhol- bzw. Vergleichspräzision.

Daher wurde im Folgenden von der Regressionsanalyse abgesehen und zur Bestimmung der Extrempunkte lediglich die manuelle Ableitung verwendet. Durch die Division der Änderung des Messwertes und der zeitlichen Differenz zwischen den einzelnen Messwertaufnahmen kann so die Schwindgeschwindigkeit bestimmt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Messmethodik ergibt sich bei dem Schwind-schlauchverfahren ein gering und bei dem Schwindkegelverfahren ein stark rauschender Geschwindigkeitsverlauf, an dem eine Extremwertbestimmung nicht durchführbar ist. Eine Möglichkeit dieser Problematik zu begegnen, ist die Ermittlung der Geschwindigkeit über einen größeren Zeitraum. Dadurch würde sich zwar das Rauschen im Geschwindigkeitsverlauf reduzieren, jedoch würde sich die Genauigkeit bei der Ermittlung des Zeitpunkts der Extrempunkte verringern.

Daher wurden die gemessenen Verformungen aus sämtlichen Untersuchungen mit Hilfe einer Methode des Shareware-Programms Matlab R2012a geglättet. Die angewendete Methode „smooth“ ist ein gleitender Durchschnittswertefilter, der aus einer festgelegten Anzahl benachbarter Stützstellen (Zeitpunkte) einen Mittelwert aus den zugehörigen gemessenen Verformungswerten bildet und so jeder einzelnen Stützstelle einen neuen Wert zuweist. Im folgenden Beispiel hat die Spanne der Mittelwertbildung den Wert 5 (vgl. Zeile 1 - 4)

$$yy(1) = y(1) \tag{1}$$

$$yy(2) = (y(1) + y(2) + y(3))/3 \tag{2}$$

$$yy(3) = (y(1) + y(2) + y(3) + y(4) + y(5))/5 \tag{3}$$

$$yy(4) = (y(2) + y(3) + y(4) + y(5) + y(6))/5 \tag{4}$$

...

Aufgrund der Streubreite der zu glättenden Werte muss die Methode durch Schleifen vom Anfang bis zum Ende der einzelnen Stützstellen mehrfach wiederholt werden. Das Ziel dabei ist, dass anhand des neu ermittelten Verlaufs der Verformungsgeschwindigkeit ein eindeutiges Maximum bestimmt werden kann. Als geeignet haben sich dabei zwei Schleifendurchgänge mit 200 und 300 Durchläufen herausgestellt. Je präziser die Verformungskurve geglättet ist, desto genauer lässt sich das Maximum der Verformungsänderung pro Zeiteinheit ermitteln. Deshalb wurde im ersten Schritt der Mittelwert über 5 Stützstellen gebildet und dieser Vorgang mit 200 Wiederholungen durchgeführt. So konnten die Messabweichungen des Messtasters partiell entfernt werden. Der zweite Durchlauf mit 300 Wiederholungen über 30 Stützstellen führt dann zu einer exakten Annäherung der geglätteten Kurve an den ursprünglich gemessenen Verformungsverlauf (vgl. Abbildung 3-13).

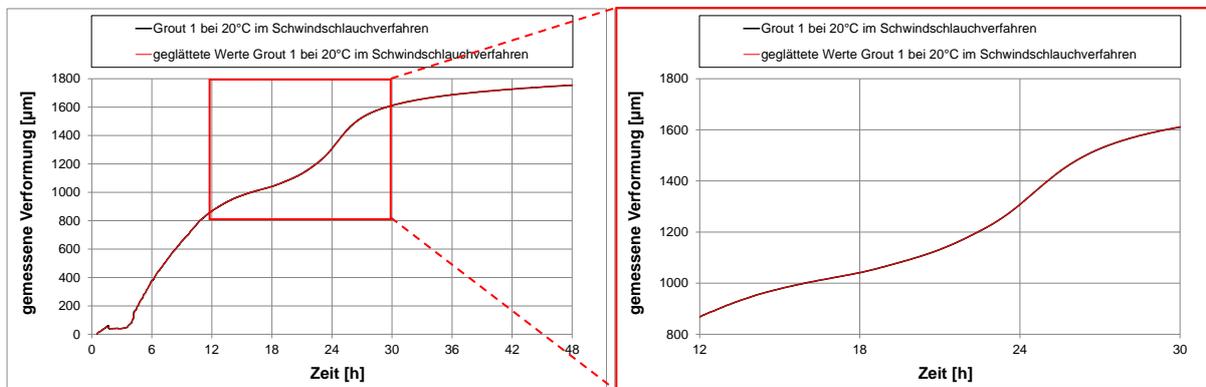


Abbildung 3-13: Vergleich zwischen gemessenen und geglätteten Verformungen von Grout 1

Diese Vorgehensweise ermöglicht die Bestimmung eines eindeutigen Maximums im Verlauf der relativen Verformungsgeschwindigkeit bei nahezu allen untersuchten Vergussmaterialien über den untersuchten Temperaturbereich von 5 °C bis 30 °C unabhängig vom verwendeten Prüfverfahren.

Kapitel 4

Darstellung und Auswertung der Untersuchungsergebnisse

4.1 Einführung

Um den Einfluss der Temperatur auf die autogenen Schwindverformungen empirisch beschreiben zu können, sind Untersuchungen mit umfangreichen Parametervariationen notwendig. Zusätzlich ist ein geeignetes Verfahren anzuwenden, mit dem die korrekte Bestimmung der *time zero* bei jeder Prüftemperatur möglich ist. Der Vergleich der erlangten Ergebnisse bei unterschiedlichen Prüftemperaturen bildet dann im Folgenden die Grundlage für die Entwicklung einer Auswertemethode zur Bestimmung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen.

4.1.1 Vorgehen

Für die Messung der Schwindverformungen wird als Referenz das Schwindschlauchverfahren gewählt, das zum einen allgemein anerkannt und zum anderen aufgrund des jeweiligen Größtkorns und der jeweils ermittelten Konsistenz für alle hier untersuchten Materialien geeignet ist.

Der Beginn der Spannungsentwicklung im Schwindringverfahren dient als Referenz für den Zeitpunkt der *time zero*. Mit der Untersuchung der Spannungsentwicklung im Schwindringverfahren lässt sich eine Kenngröße für die Auswertung von autogenen Schwindmessungen ermitteln. Der Zeitpunkt ab dem der Stahlring durch den aufschwindenden Mörtel zusammengedrückt wird, markiert den Beginn des spannungsinduzierenden autogenen Schwindens. Ab diesem Zeitpunkt ist das Material in der Lage auftretende Kräfte zu übertragen, wodurch alle weiteren Verformungen spannungsinduzierend wirken. Da mit dem Schwindringverfahren keine Schwindverformungen messbar sind, ist eine Kombination der beiden Referenzverfahren notwendig. Dazu wird parallel das jeweilige Material aus einer „Mischercharge“ mit dem Schwindring- und mit dem Schwindschlauchverfahren untersucht. Beide Prüfaufbauten wurden über die Dauer der Messung in einem Klimaschrank unter quasi-isothermen Bedingungen bei 5, 20 und 30 °C gelagert. Mit Hilfe des festgestellten Zeitpunktes t_{Ring} aus dem Schwindringverfahren lassen sich dann die spannungsin-

duzierenden autogenen Schwindverformungen aus dem Schwindschlauchverfahren ermitteln.

Die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen werden im Folgenden mit unterschiedlichen Zeitpunkten zur Bestimmung der *time zero* ermittelt und den Ergebnissen aus dem Referenzverfahren gegenübergestellt. Neben der relativen Verformungsgeschwindigkeit (t_{Vmax}) wird zusätzlich die relative Verformungsbeschleunigung (t_{Amax}) der gemessenen Verformungen dargestellt, da hier weitere Anhaltspunkte zum Verformungsverhalten der einzelnen Materialien erwartet werden. Resultierend aus dem o.g. Vorzeichenwechsel der gemessenen Verformungen ergeben sich entsprechend auch für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung positive Werte, deren Maximum jeweils durch einen Hochpunkt im Verlauf gekennzeichnet ist. Hierbei handelt es sich jeweils um ein direktes Verfahren zur Bestimmung der *time zero*, da der Startpunkt der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen direkt aus der Verformungsmessung bestimmt werden kann.

Im Gegensatz dazu handelt es sich bei der Bestimmung der Erstarrungszeit (t_{Vicat}) nach Vicat [DIN480_2] aufgrund der parallelen Bestimmung in einem separaten Versuch um ein indirektes Verfahren. Entgegen der Angaben von [Taz00] wird hier allerdings nicht der Zeitpunkt des Erstarrungsbeginns sondern der Zeitpunkt des Erstarrungsendes als *time zero* definiert. Der Erstarrungsbeginn ist nach [DIN480_2] erreicht, wenn der Abstand zwischen Nadelspitze und Glasboden ≥ 4 mm ist. Um bei sämtlichen Untersuchungen ein vergleichbares Ergebnis zu erhalten, müsste die Ermittlung der Eindringtiefe zu dem Zeitpunkt vorgenommen werden, an dem der Abstand genau 4 mm beträgt. Die Durchführung der Prüfung zu einem späteren Zeitpunkt würde einen größeren Abstand zwischen Nadel und Glasplatte ergeben, wobei der ermittelte Zeitpunkt ebenfalls als Erstarrungsbeginn definiert wäre. Somit ist der Erstarrungsbeginn praktisch eher als Zeitraum anzusehen und nicht wie für die *time zero* notwendig als Zeitpunkt. Daher wird das Erstarrungsende als maßgeblicher Zeitpunkt verwendet, ab dem die Nadel in den bereits gedrehten Probekörper lediglich noch 1,5 mm in die Probekörperoberfläche eindringen darf. Hier wird, aufgrund der bereits erreichten Festigkeit des Materials und der dreifachen Bestimmung der Eindringtiefe an jeweils unterschiedlichen Stellen, ein eindeutigeres Ergebnis erwartet. Aufgrund der stark schwankenden Erstarrungszeiten bei den verwendeten Materialien und untersuchten Prüftemperaturen wurde auf die parallele Bestimmung des Erstarrungsendes verzichtet. Um dennoch ein aussagekräftiges Ergebnis für die Erstarrungszeiten jedes einzelnen Materials zu erlangen, wurden im Vorfeld der Schwinduntersuchungen jeweils zwei Durchgänge mit je zwei Vicatproben bei allen drei Prüftemperaturen durchgeführt. Der Zeitpunkt t_{Vicat} wird als Mittelwert aus den vier einzelnen Ergebnissen für jedes Material und jede Prüftemperatur angegeben.

Der Vergleich der resultierenden spannungsinduzierenden Verformungen, abhängig von der Art der Ermittlung der *time zero*, ermöglicht eine Aussage über die Genauigkeit der o.g. Verfahren und über evtl. auftretende Abweichungen zum Referenzzeitpunkt t_{Ring} .

4.1.2 Einflüsse auf die gemessenen Verformungen

Durch die teilweise sehr fließfähigen Konsistenzen einzelner Vergussmaterialien (vgl. Tabelle 3-1) in Kombination mit einem erhöhten Luftporengehalt, kann es trotz des angepassten Einbauvorgangs nach dem Start der Messungen zu weiteren Entlüftungsvorgängen des Vergussmaterials kommen. Abhängig vom Prüfaufbau, der Viskosität sowie dem Ansteifverhalten des Vergussmaterials kommt es dadurch in den ersten Stunden der Messung zu einer zusätzlichen Beeinflussung der gemessenen Verformungen.

Bei den horizontal gelagerten Schwindschläuchen kann die Luft nicht entweichen und sammelt sich daher entgegen der Schwerkraft an der Oberseite in den einzelnen Lamellen des Schlauches (Abbildung 3-8). Das geschlossene System verhindert das Entweichen der aufsteigenden Luft, wodurch sich das Volumen des Schwindschlauches nicht ändert und somit keine Längenänderung aufgrund von Entlüftungsvorgängen messbar ist.

Beim Schwindkegel hingegen, sammeln sich aufsteigende Luftporen an der Oberfläche des Vergussmaterials unterhalb der Adhäsionsfolie (Abbildung 3-8). Ein Entlüften des Vergussmaterials führt zu einer Reduktion des Materialvolumens unterhalb des Reflektors. Da sich durch das Absinken des Reflektors der Abstand zum Laser vergrößert, können so Verformungen gemessen werden, die nicht direkt auf Schwindprozesse zurückzuführen sind.

Bei einem Volumen des Schwindkegels von circa $0,62 \text{ dm}^3$ und einer angenommenen aufsteigenden Luftmenge von $0,1 \text{ Vol.-%}$ verringert sich das Volumen unterhalb des Reflektors um $0,00062 \text{ dm}^3$. Durch Umstellen der Formel 4.1 nach h ergibt sich eine Höhenänderung von $0,0012 \text{ dm}$ bzw. $120 \text{ }\mu\text{m}$.

$$V_{\text{Kegel}} = 1/3 \times G \times h \quad [4.1]$$

Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass sich die aufsteigende Luft unter dem Reflektor sammelt, was bei ausreichendem Luftvolumen zu einem Aufschwimmen des Reflektors führen kann. Die Verringerung des Abstands zwischen Laser und Reflektor

ergibt ein Quellen im Verformungsverlauf, das lediglich auf das Messverfahren nicht jedoch auf das Material zurückzuführen ist.

Grundsätzlich können so bei gleichem Vergussmaterial im Schwindkegel höhere Gesamtverformungen als im Schwindschlauch gemessen werden. Je größer das Volumen der aufsteigenden Luft dabei ist, desto größer sind die Abweichungen.

4.2 Vergleich der Verfahren zur Bestimmung der *time zero* bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Wie in Kapitel 2.5.3 beschrieben, stehen für die Ermittlung des Startpunktes der autogenen Schwindverformungen mehrere Verfahren zur Verfügung, bei denen der Zeitpunkt der *time zero* zum Teil erheblich variiert. Bei der Prüfung gemäß [DIN480_2] kann davon ausgegangen werden, dass das Material bei den Prüftemperaturen 5 °C und 20 °C einen vergleichbaren Widerstand gegenüber dem Eindringen einer beschwerten Nadel zum Zeitpunkt des Erstarrungsendes besitzt. Ob diese wiederum auf den Beginn der autogenen Schwindverformungen der durch den Temperatureinfluss unterschiedlich schnell hydratisierenden Materialien übertragbar ist, gilt es zu klären. Weiterhin stellt sich die Frage, ob das Verfahren auch bei einer Erhöhung der Prüftemperatur auf 30 °C anwendbar ist und darüber hinaus zu verwertbaren Ergebnissen führt.

Ein weiterer Ansatz zur Bestimmung der *time zero* ist die Auswertung des Verformungsverlaufes. In [Fon06] ergibt sich bei reinen Zementleimen und einer Prüftemperatur von 20 °C jeweils ein Maximum in der Verformungsgeschwindigkeit. Da dieser Ansatz bislang nur in der o.g. Arbeit angewendet wurde, gilt es zu klären, ob sich bei den verwendeten Vergussmaterialien ebenfalls ein derartiges charakteristisches Maximum im Verlauf der Verformungsgeschwindigkeit einstellt und wie die Verformungsverläufe durch die abweichenden Prüftemperaturen (5 °C; 30 °C) beeinflusst werden.

Es wird deutlich, dass die Vergleichbarkeit der beiden vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der *time zero* bei unterschiedlichen Prüftemperaturen mit dem Referenzverfahren (Schwindring) überprüft werden muss. Die Verfahren müssen in der Lage sein, den durch Variation der Temperatur zu erwartenden beschleunigenden oder verzögernden Effekt auf den Hydratationsverlauf und damit auch auf den Schwindverlauf zu erfassen. Mit der Gegenüberstellung der Verformungskurven bei unterschiedlichen Prüftemperaturen werden dann weitere Erkenntnisse zum Einfluss der Temperatur auf das spannungsinduzierende autogene Schwinden erwartet.

4.2.1 Abhängigkeit der Hydratationswärmeentwicklung vom verwendeten Prüfverfahren

Anhand der Aufzeichnungen der Probekörpertemperatur und beiden Prüfaufbauten lassen sich Unterschiede im Hydratationsverlauf feststellen. Eine Verschiebung des Zeitpunkts der maximalen Temperatur (T_{\max}) deutet dabei auf eine zeitlich verschobene Reaktion hin. Bei den Prüftemperaturen (5 °C, 20 °C und 30 °C) kommt es in den Prüfaufbauten aufgrund von unterschiedlichem Materialvolumen und Probekörpergeometrie zu variierenden Verläufen der Temperaturen, die sich nicht nur in der Höhe der maximalen Temperatur sondern auch im Zeitpunkt von T_{\max} unterscheiden. Durch die unterschiedlichen Geometrien der Probekörper und die daraus resultierenden Abweichung der einzelnen Probenvolumina wird mit einer variierenden Hydratationswärmeentwicklung in Abhängigkeit des verwendeten Prüfverfahrens gerechnet. Dabei reagiert das Material im Schwindring aufgrund des größeren Volumens der Probe und der geringeren spezifischen Oberfläche in Bezug auf das Probekörpervolumen immer langsamer auf die jeweilige Prüftemperatur als das Material im Schwindschlauch. Daher wird die maximale Temperatur im Schwindschlauch bei hoher Prüftemperatur immer früher und bei niedriger Prüftemperatur immer später als im Schwindring erreicht.

Ob es aufgrund der verschobenen Hydratationsverläufe auch zu einer Verschiebung von t_{Ring} kommt, ist bislang nicht bekannt. Falls es zu einer Verschiebung von t_{Ring} kommt, ist weiterhin unklar ob $\Delta t_{T_{\max}}$ gleich $\Delta t_{t_{\text{Ring}}}$ ist. Dazu wurden zwei identische Schwindringe mit dem Material aus einer „Mischercharge“ parallel befüllt und in einem Klimaschrank bei 20 °C gelagert. Durch die zusätzliche Lagerung eines Rings in einem Wasserbad konnte eine höhere Hydratationswärmeabfuhr und damit eine Reduzierung der maximalen Temperatur erreicht werden. Wie zu erwarten war, ergibt sich für den temperierten Ring eine geringere Hydratationstemperatur mit der Folge, dass T_{\max} zeitlich später als beim nicht-temperierten Ring mit größerem T_{\max} auftritt (vgl. Abbildung 4-1). Da ebenfalls die Zeitpunkte von t_{Ring} variieren, lassen sich nun $\Delta t_{T_{\max}}$ und $\Delta t_{t_{\text{Ring}}}$ miteinander vergleichen. Die Abstände sind bei der Untersuchung von vier unterschiedlichen Materialien nahezu identisch, weshalb das Verschieben von t_{Ring} durch $\Delta t_{T_{\max}}$ auch in den folgenden Auswertungen angewendet werden kann.

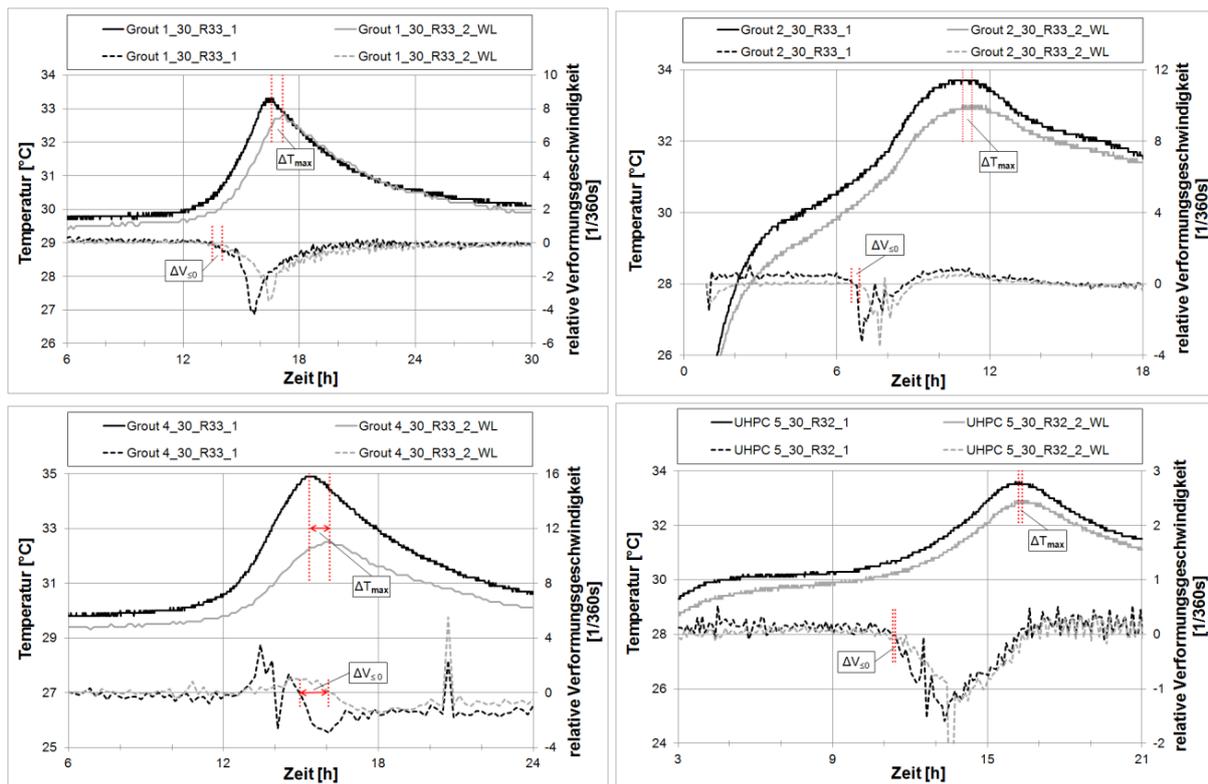


Abbildung 4-1: Veränderung der Zeitpunkte T_{max} und t_{Ring} im Schwindring unter temperierten und nicht-temperierten Bedingungen

Die Differenz der jeweils ermittelten Zeitpunkte von T_{max} ergibt den Betrag um den t_{Ring} verschoben wird, damit der Hydratationsverlauf des Materials im Schwindringverfahren zeitlich mit dem im Schwind Schlauchverfahren vergleichbar ist.

Abhängig von der Temperatur wird der Verlauf der Spannungsentwicklung auf der Zeitachse nach links oder nach rechts verschoben. Bei einer Prüftemperatur von 30 °C wird bei sämtlichen Materialien das Maximum der Temperatur im Schwind Schlauchverfahren früher als im Schwindringverfahren erreicht, wodurch t_{Ring} um $\Delta t_{T_{max}}$ nach links verschoben wird. Bei einer Prüftemperatur von 5 °C wird das Maximum der Temperatur im Schwindringverfahren früher erreicht, weshalb t_{Ring} um $\Delta t_{T_{max}}$ nach links verschoben werden muss.

4.2.2 Gegenüberstellung von Startzeitpunkten (*time zero*) und Verformungsverläufen bei einer Prüftemperatur von 20 °C

Die Prüftemperatur von 20 °C ist in allen o.g. Prüfvorschriften als Referenztemperatur definiert. In Kombination mit der konservierenden Lagerung und einer sehr geringen Temperaturerhöhung innerhalb der Probe sind sämtliche Vorgaben für die Messung von autogenen Schwindverformungen eingehalten.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der parallel durchgeführten Untersuchungen mit dem Schwindschlauchverfahren und dem Schindringverfahren dargestellt. Im Detail werden die relative Schwindgeschwindigkeit und die relative Schwindbeschleunigung im Schwindschlauchverfahren dem Spannungsverlauf im Schindringverfahren gegenübergestellt. Somit ist ein Vergleich zwischen den alternativen Verfahren zur Bestimmung der *time zero* und der ersten Spannungsentwicklung im Schindring möglich. Dabei werden die Zeitpunkte der Spannungsentwicklung im Schindring ($t_{\text{Spannungsentwicklung}}$) in jedem Diagramm durch eine gestrichelte vertikal verlaufende Linie gekennzeichnet, wobei der auf den Hydratationsverlauf im Schwindschlauch bezogene Zeitpunkt ($t_{\text{Spannungsentwicklung}(tk)}$) mit einer andersartig gestrichelten Linie dargestellt wird. Zusätzlich werden die Ergebnisse des separat ermittelten Erstarrungsendes nach Vicat (t_{Vicat}) dargestellt. So kann überprüft werden, inwieweit damit der Beginn der Spannungsentwicklung abgeschätzt werden kann. Da die Standardtemperatur für die Messung von freiem autogenem Schwinden nach [Taz00] und für das Nadelpenetrationsverfahren nach [DIN480_2] $20 \pm 2 \text{ °C}$ beträgt, wird hier die größte Übereinstimmung zwischen t_{Ring} und t_{Vicat} erwartet.

Spannungsentwicklung (t_{Ring})		21,40 h	ΔT :	max. Beschleunigung (t_{Amax})
Erstarrungsende (t_{Vicat})		20,88 h	- 0,52 h	21,97 h
max. Temperatur	Schlauch	26,58 h	ΔT :	max. Geschwindigkeit (t_{Vmax})
	Ring	26,58 h	0,00 h	24,37 h

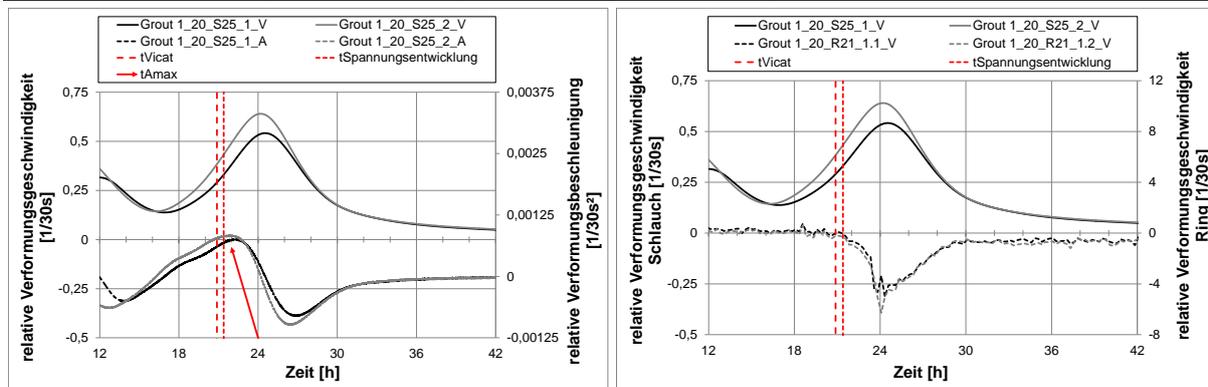


Abbildung 4-2: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von Grout 1

Bei Grout 1 stellen sich erste Verformungen des Rings ab ca. 21,4 h nach Mischbeginn ein. Die hydrationsbedingte Temperaturerhöhung gemessen an der Innenseite des Stahlringes und an der Außenseite des Schwindschlauches startet bereits vor der beobachteten Spannungszunahme im Ring und erreicht in beiden Fällen ein Maximum nach 26,6 h (vgl. A-1.1). Durch den nahezu identischen Temperaturverlauf des Materials kann von einem vergleichbaren Hydratationsverlauf in beiden Prüfaufbauten ausgegangen werden. Damit ist ein direkter Übertrag des Zeitpunkts der

Spannungszunahme im Ring als *time zero* für die Verformungsmessungen im Schlauch möglich. Die nähere Betrachtung der Verformungscharakteristik zeigt, dass t_{Ring} zwischen dem Anstieg und dem Maximum der Verformungsgeschwindigkeit in den Schwindschläuchen liegt. Der Hochpunkt der Verformungsgeschwindigkeit tritt nach circa 24 h ein, womit t_{Ring} deutlich überschätzt wird. Stattdessen ergibt sich in unmittelbarer Nähe von t_{Ring} ein Hochpunkt in der Verformungsbeschleunigung. Das bedeutet, dass im Bereich der größten Änderung in der Schwindgeschwindigkeit auch der Zeitpunkt liegt, ab dem das Gefüge soweit erhärtet ist, dass erste Spannungen übertragen werden können. Weiterhin unterschätzt das ermittelte Erstarrungsende t_{Ring} um 0,5 h was unter Berücksichtigung möglicher Einflüsse aufgrund der separaten Versuchsdurchführung einer guten Übereinstimmung entspricht.

Spannungsentwicklung (t_{Ring})	14,00 h	ΔT : - 3,38 h	max. Beschleunigung (t_{Amax})
Erstarrungsende (t_{Vicat})	10,62 h		14,23 h
max. Temperatur	Schlauch	19,17 h	ΔT : 0,00 h
	Ring	19,17 h	
			15,91 h

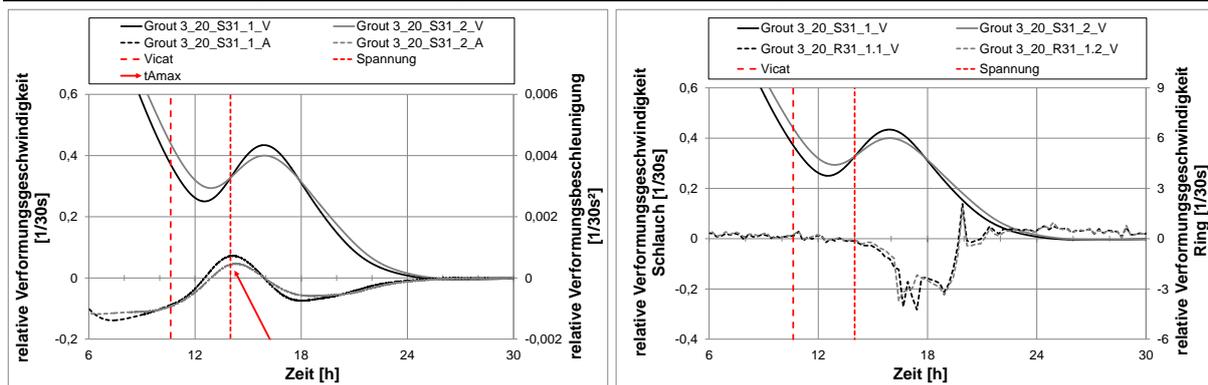


Abbildung 4-3: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von Grout 3

Bei Grout 3 ergibt sich die erste Spannungszunahme im Ring bereits nach 14,0 h (vgl. A-1.3). Diese liegt wiederum im Bereich der ansteigenden Verformungsgeschwindigkeit und dem dazugehörigen Maximum, wobei t_{Ring} und t_{Amax} lediglich noch um 0,2 h voneinander abweichen. Das ermittelte Erstarrungsende hingegen weicht deutlich von t_{Ring} ab und liegt etwa 3,3 h davor. Das Temperaturmaximum wird in beiden Prüfverfahren analog zu Grout 1 zum selben Zeitpunkt nach ca. 19,2 h erreicht, wodurch die direkte Anwendung der im Ring ermittelten Werte für die Auswertung der Ergebnisse aus dem Schwindschlauch genutzt werden können.

Darstellung und Auswertung der Untersuchungsergebnisse

Spannungsentwicklung (t_{Ring})		12,40 h	ΔT :	max. Beschleunigung (t_{Amax})
Erstarrungsende (t_{Vicat})		12,41 h	0,0 h	12,66 h
max. Temperatur	Schlauch	19,85 h	ΔT :	max. Geschwindigkeit (t_{Vmax})
	Ring	19,85 h	0,0 h	14,64 h

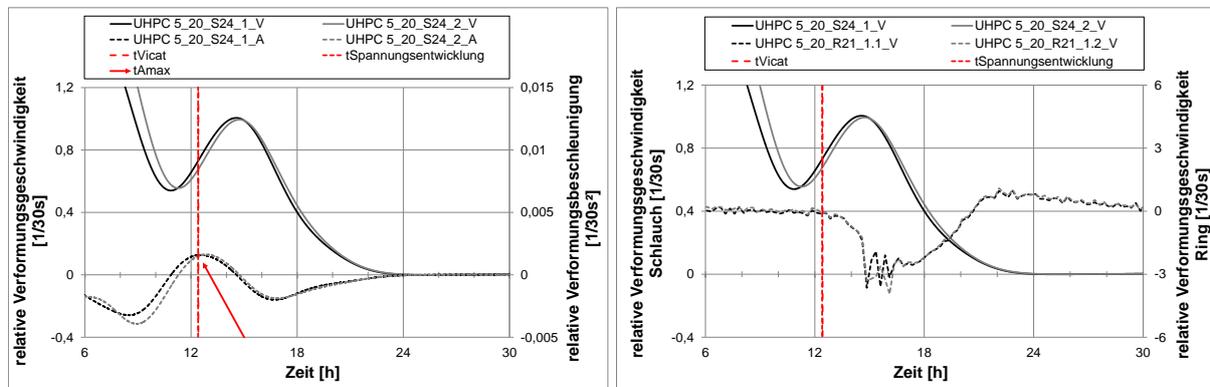


Abbildung 4-4: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von UHPC 5

Auch bei UHPC 5 treten die jeweiligen Temperaturmaxima in beiden Prüfaufbauten zur gleichen Zeit nach ca. 19,9 h auf. Die erste Spannungsentwicklung im Ring wird nach 12,4 h beobachtet und liegt damit lediglich 0,26 h vor der maximalen Verformungsbeschleunigung in der parallel durchgeführten Untersuchung mit dem Schwindschlauch (vgl. A-1.5). Das Erstarrungsende von UHPC 5 wird nach 12,4 h ermittelt und entspricht damit t_{Ring} .

Spannungsentwicklung (t_{Ring})		22,80 h	ΔT :	max. Beschleunigung (t_{Amax})
Erstarrungsende (t_{Vicat})		15,95 h	- 6,85 h	22,98 h
max. Temperatur	Schlauch	22,60 h	ΔT :	max. Geschwindigkeit (t_{Vmax})
	Ring	22,60 h	0,00 h	31,17 h

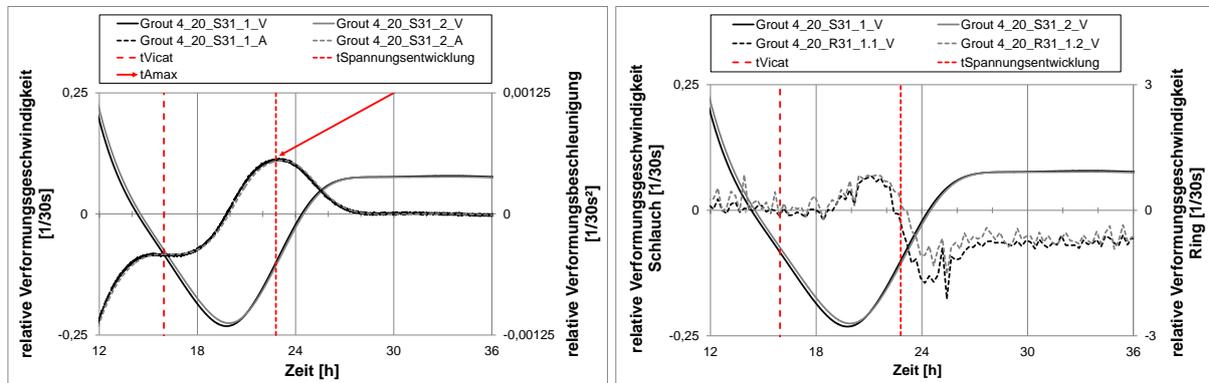


Abbildung 4-5: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von Grout 4

Grout 4 zeigt anders als die bisher betrachteten Materialien nicht den charakteristischen Verlauf der gemessenen Verformungen (vgl. A-1.4). Auf den anfänglichen Anstieg der Verformungen folgt ein leichtes Quellen über mehrere Stunden was dann wiederum in ein Schwinden übergeht. Durch den geäderten Verformungsverlauf ergibt sich statt des Hochpunktes nun ein eindeutiger Tiefpunkt in der Verformungsgeschwindigkeit, ab dem es zu einem ausgeprägten autogenen Schwinden kommt. Die maximale Beschleunigung in der Schwindphase wird nach ca. 23,0 h erreicht und überschätzt damit t_{Ring} um 0,18 h. Bei der Verformungsgeschwindigkeit der Schläuche hingegen ergibt sich kein eindeutiger Hochpunkt mehr, da sich die Verformungen nicht wie bisher einem Grenzwert nähern, sondern mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Ende der Untersuchung weiter ansteigen, wodurch sich kein markanter Hochpunkt in der Verformungsgeschwindigkeit erkennen lässt. Eine weitere Besonderheit von Grout 4 ist, dass das Temperaturmaximum zum Zeitpunkt der ersten Spannungszunahme im Schwindring nach ca. 22,6 h auftritt. Zwischen den Ergebnissen aus beiden Prüfaufbauten ist keine zeitliche Differenz im Hochpunkt der Temperatur zu erkennen. Das Erstarrungsende ist bereits nach 16,0 h erreicht und unterschätzt damit t_{Ring} um ca. 6,8 h.

Spannungsentwicklung (t_{Ring})		9,65 h	ΔT :	max. Beschleunigung (t_{Amax})
Erstarrungsende (t_{Vicat})		7,82 h	- 1,78 h	9,98 h
max. Temperatur	Schlauch	16,15 h	ΔT :	max. Geschwindigkeit (t_{Vmax})
	Ring	16,15 h	0,00 h	10,60 h

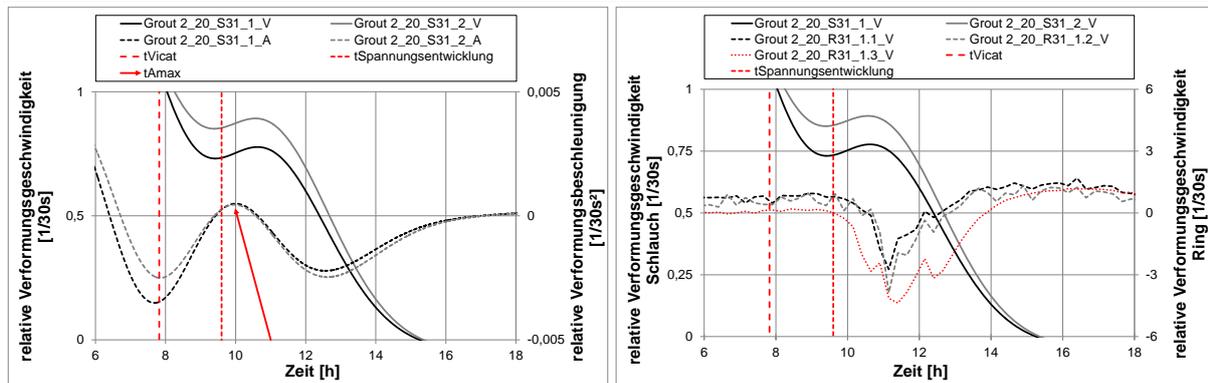


Abbildung 4-6: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von Grout 2

Grout 2 reagiert von allen untersuchten Materialien am schnellsten, da das Erstarrungsende bereits nach 7,8 h erreicht wird. Damit wird der Beginn der Spannungsentwicklung im Ring ($t_{\text{Ring}} = 9,7 \text{ h}$) um ca. 1,8 h unterschätzt. Die gemessenen Temperaturen erreichen sowohl im Schwindring als auch im Schwindschlauch erst nach ca. 16,1 h ihren Hochpunkt, wodurch von einem ähnlichen Hydratationsverlauf in beiden Prüfaufbauten ausgegangen werden kann (vgl. A-1.2). Der Beginn der Span-

nungsentwicklung im Schwindring musste hier aufgrund nicht eindeutiger Verformungswerte aus den DMS-Viertelbrücken mit Hilfe den Messwerten aus der Halbbrücke ermittelt werden. Der so ermittelte Wert wird von t_{Amax} um 0,3 h überschätzt.

Bewertung

Bei den parallel durchgeführten Untersuchungen im Schwindschlauch und im Schwindring wird die maximale Temperatur bei allen fünf Materialien jeweils zur gleichen Zeit festgestellt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass das Material in beiden Prüfaufbauten einem vergleichbaren Hydratationsverlauf unterliegt, wodurch, die direkte Verwendung des Zeitpunkts der ersten Spannungsentwicklung im Ring (t_{Ring}) als *time zero* für die Auswertung der freien autogenen Schwindverformungen möglich ist. Dieser Zeitpunkt dient ebenfalls als Referenz zur Ermittlung der zeitlichen Abweichungen der bisher in der Literatur verwendeten Zeitpunkte für die *time zero*.

Die Bestimmung des Erstarrungsendes mit dem Nadelpenetrationsverfahren nach [DIN480_2] wurde nicht parallel zu den Untersuchungen mit dem Schwindschlauch- und Schwindringverfahren durchgeführt. Tabelle 4-1 enthält neben dem Mittelwert aus vier ermittelten Erstarrungszeiten, die Standardabweichung mit dem zugehörigen Variationskoeffizienten. Im Vergleich zu den an reinem Zementleim ermittelten Erstarrungszeiten ergeben sich für die untersuchten Materialien mit Werten von 7,8 bis zu 20,9 h deutlich verzögernde Effekte. Zurückzuführen ist die Verzögerung zum einen auf die Anwesenheit der Gesteinskörnung, die verhindert, dass sich die langkettigen CSH-Phasen direkt vernadeln können und quasi um die einzelnen Gesteinskörner herum wachsen müssen. Ein weitaus größerer Einfluss resultiert aus den hohen Konzentrationen an PCE-Fließmitteln. Die Fließmittelmoleküle verhindern die Agglomeration der Zementkörner, wodurch die Hydratationsreaktion abhängig von der Ladungsdichte und dem Aufbau der Seitenketten verzögert wird [Sch15]. Der Variationskoeffizient bei der Bestimmung des Erstarrungsendes ist mit 6,1 % bei Grout 4 am größten und entspricht einer Standardabweichung von ca. 1,0 h.

Tabelle 4-1: Erstarrungszeiten nach [DIN480_2] bei 20 °C

Material	Erstarrungsende [h]	Standardabweichung [h]	Variationskoeffizient [%]
Grout 1	20,88	0,74	3,56
Grout 3	10,62	0,57	5,33
UHPC 5	12,41	0,15	1,23
Grout 4	15,95	0,97	6,06
Grout 2	7,82	0,26	3,32

Der Vergleich der ermittelten Erstarrungszeiten (t_{vicat}) mit dem Zeitpunkt t_{Ring} ergibt, dass der Abstand zwischen den beiden Zeitpunkten bei unterschiedlichen Materialien deutlichen Schwankungen unterliegt. Während das Erstarrungsende bei UHPC 5 nahezu mit dem Zeitpunkt des Beginns der Spannungsentwicklung übereinstimmt, liegt das Erstarrungsende bei Grout 4 knapp 6,9 h vor t_{Ring} . Bei Grout 1, Grout 2 und Grout 3 reduziert sich die Differenz auf 0,5, 1,8 bzw. 3,4 h. Somit ergibt sich kein eindeutiger Trend bei den jeweiligen Abweichungen, obwohl die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Materialien, festgestellt durch den Widerstand gegenüber dem Eindringen einer beschwerten Nadel, zum Zeitpunkt des Erstarrungsendes vergleichbar sein sollten.

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Zeitpunkte darstellen zu können, werden in Tabelle 4-2 die resultierenden Schwindwerte jeweils zum Untersuchungsende vergleichend gegenüber gestellt. Dabei gibt die Zahl in Klammern neben dem Material immer die Messdauer an. Die Pfeile jeweils links des Mittelwertes geben die prozentuale Abweichung des jeweiligen Mittelwertes im Verhältnis zu t_{Ring} an. Ein horizontaler Pfeil bedeutet dabei eine Abweichung von $\pm 5\%$, ein abfallender bzw. aufsteigender Pfeil von $\pm 10\%$ und ein vertikaler Pfeil eine Abweichung von größer $\pm 10\%$ vom Mittelwert der Referenz. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die einzelnen Mittelwerte, mit dem Zeitpunkt der Bestimmung nach der *time zero* in Klammern, dargestellt. Weiterhin aufgeführt sind die Standardabweichung und der dazugehörige Variationskoeffizient, wobei die Zuverlässigkeit dieser statistischen Auswertung aufgrund des sehr geringen Stichprobenumfangs (zwei Mittelwerte aus jeweils zwei Schläuchen) nicht repräsentativ ist. Da es sich hier um einen relativen Vergleich zwischen unterschiedlichen Startpunkten an je fünf verschiedenen Materialien handelt, können die sich ergebenden Tendenzen bei den einzelnen Endschwindwerten als durchaus repräsentativ eingestuft werden. Die Referenz ist jeweils der Mittelwert der Endschwindwerte, die sich nach der Auswertung mit dem Zeitpunkt der ersten Spannungsentwicklung im Ring ergeben. Durch die unterschiedlichen Zeitpunkte der *time zero* kommt es folgerichtig zu unterschiedlichen Endschwindwerten, wobei ein Startpunkt vor t_{Ring} zu höheren und ein Zeitpunkt nach t_{Ring} zu niedrigeren Endschwindwerten führt.

Abhängig vom Material und der Prüfdauer ergeben sich Endschwindwerte nach t_{Ring} von maximal $694 \mu\text{m/m}$ nach 71,4 h beim UHPC 5 und minimal $280 \mu\text{m/m}$ nach 67,6 h beim Grout 4. Der Variationskoeffizient beträgt innerhalb einer Prüfserie bestehend aus zwei Schläuchen bis zu $8,2\%$, wodurch sich schon bei der Auswertung der autogenen Schwindverformung einer einzelnen Untersuchung mit Verwendung der exakten *time zero* (t_{Ring}) eine gewisse Schwankungsbreite einstellt.

Die Endschwindwerte, die sich aus der Verwendung von t_{Vicat} ergeben, zeigen im Vergleich zu der Referenz tendenziell höhere Endschwindwerte. Durch die recht genaue Übereinstimmung von t_{Ring} und t_{Vicat} bei UHPC 5 und Grout 1 ergibt sich folgerichtig eine sehr geringe Abweichung von ca. 2,2 %. Deutlicher sind die Abweichungen bei Grout 2 und 3 mit bis zu 20 %, wobei das Maximum der Abweichung bei Grout 4 mit ca. 68 % festgestellt wird. Durch die hohe Schwankungsbreite und der maximalen Abweichung von 68 % kann kein Zusammenhang zwischen den Zeitpunkten t_{Ring} und t_{Vicat} abgeleitet werden. Daraus folgt, dass der Zeitpunkt des Erstarrungsendes bei einer Prüftemperatur von 20 °C nicht als Kriterium für einen verallgemeinerbaren Startpunkt der autogenen Schwindverformungen verwendet werden kann.

Tabelle 4-2: Zusammenstellung der ermittelten Endschwindwerte mit t_{Ring} bei 20 °C

	t_{Ring} ($t_{\text{R.}}$)	t_{Amax} ($t_{\text{A.}}$)	Vergleich ($t_{\text{R.}} + t_{\text{A.}}$)/2	Vergleich ($t_{\text{R.}} + t_{\text{Vicat}}$)/2	Vergleich ($t_{\text{R.}} + t_{\text{Vmax}}$)/2
Grout 1 (61,5 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	650,5	624,1	→ 637,3	→ 660,9	↓ 558,8
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	46,5	53,2	18,7 (40 h)	14,7 (40 h)	122,4 (38 h)
Variationskoeffizient	7,2 %	8,5 %	2,9 %	2,2 %	21,9 %
Grout 3 (65,6 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	302,6	292,5	→ 297,6	↑ 353,5	↓ 243,2
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	1,0	0,1	7,1 (52 h)	71,9 (52 h)	81,4 (50 h)
Variationskoeffizient	0,3 %	0,03 %	2,4 %	20,3 %	33,5 %
UHPC 5 (71,4 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	694,4	671,3	→ 682,8	→ 694,4	↓ 542,1
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	7,8	13,6	16,3 (60 h)	0,0 (60 h)	213,2 (58 h)
Variationskoeffizient	1,1 %	2,0 %	2,4 %	0,0 %	39,3 %
Grout 4 (67,6 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	280,1	282,9	→ 281,5	↓ 188,8	→ 266,1
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	6,3	5,7	2,0 (46 h)	129,1 (46 h)	2,8 (42 h)
Variationskoeffizient	2,2 %	2,0 %	0,7 %	68,4 %	1,1 %
Grout 2 (87,7 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	451,4	412,1	→ 431,7	↑ 504,1	↓ 373,9
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	37,2	34,3	27,8 (78 h)	74,5 (78 h)	109,7 (78 h)
Variationskoeffizient	8,2 %	8,3 %	6,5 %	14,8 %	29,3 %

Ein weiteres Verfahren wurde von [Fon06] vorgestellt, worin das Maximum der Verformungsgeschwindigkeit $t_{V_{max}}$ für Untersuchungen an Zementleimen als Startpunkt der autogenen Schwindverformungen verwendet wird. Entsprechen die gemessenen Verformungen der klassischen Charakteristik, ergibt sich nahezu immer eine ähnliche Geschwindigkeitskurve, die durch einen eindeutigen Hochpunkt gekennzeichnet ist. Mit Ausnahme von Grout 4, ergibt sich bei allen untersuchten Materialien ein ausgeprägtes Maximum, das zeitlich immer hinter t_{Ring} liegt, wodurch sich folglich kleinere autogene Endschwindwerte ergeben. Die Abweichungen zur Referenz müssten tendenziell größer ausfallen, da die Verformungsgeschwindigkeit im Bereich von $t_{V_{max}}$ am größten ist, mit der Folge, dass selbst kleine zeitliche Differenzen zu großen Unterschieden in den Endschwindwerten führen können.

So werden beim Vergleich mit der Referenz Abweichungen der Mittelwerte der autogenen Endschwindwerte zwischen 22 % bei Grout 1 nach 61,5 h und 39 % bei UHPC 5 nach 71,4 h erreicht. Die kleinste Abweichung von 1,1 % wird bei Grout 4 nach 67,6 h festgestellt. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse kann auch hier kein eindeutiger Zusammenhang zwischen t_{Ring} und $t_{V_{max}}$ hergestellt werden, da die Abweichungen nicht konstant sind, wodurch auch die Bestimmung eines einheitlichen Korrekturfaktors nicht möglich ist. Mit Anwendung von $t_{V_{max}}$ werden die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen generell unterschätzt. Weiterhin liegt der Zeitpunkt der maximalen Verformungsgeschwindigkeit zeitlich immer genau wie bei [Fon06] hinter dem jeweils festgestellten Erstarrungsende, weswegen sich auch hier kein Zusammenhang zwischen $t_{V_{max}}$ und $t_{V_{icat}}$ ergibt.

Festzuhalten bleibt, dass weder $t_{V_{icat}}$ noch $t_{V_{max}}$ für die Abschätzung des Beginns der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bei den hier untersuchten Vergussmaterialien geeignet sind. Dennoch ist zur anwendungsorientierten Messung der autogenen Verformungen die parallele Durchführung einer zusätzlichen Untersuchung im Schwindring bei jeder Messung sehr aufwändig. Deswegen wird eine Methode benötigt, mit der der Zeitpunkt t_{Ring} exakt abgeschätzt und ohne parallele Untersuchung ermittelt werden kann.

Da die spannungsinduzierenden Verformungen durch die Verwendung von $t_{V_{max}}$ bei sämtlichen Materialien unterschätzt werden, muss der Startpunkt der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen somit zeitlich vor dem Maximum der Verformungsgeschwindigkeit liegen. Wenn der klassische Verformungsverlauf unterstellt wird, liegt der Beginn der spannungsinduzierenden Verformungen immer im Bereich des Anstieges der Verformungsgeschwindigkeit. Der davor liegende Tiefpunkt im Verlauf der Geschwindigkeit lässt sich mit dem Anstieg der Festigkeit des Materials erklären, wodurch die rein auf dem chemischen Schwinden beruhenden äußerlich messbaren Verformungen aufgrund der Steifigkeitserhöhung des Gefüges

weitestgehend zum Erliegen kommen (vgl. Abbildung 4-7). Im Verlauf der gemessenen Verformungen lässt sich dieses am Abflachen der Kurve nach dem anfänglichen starken Anstieg der Verformungen erkennen.

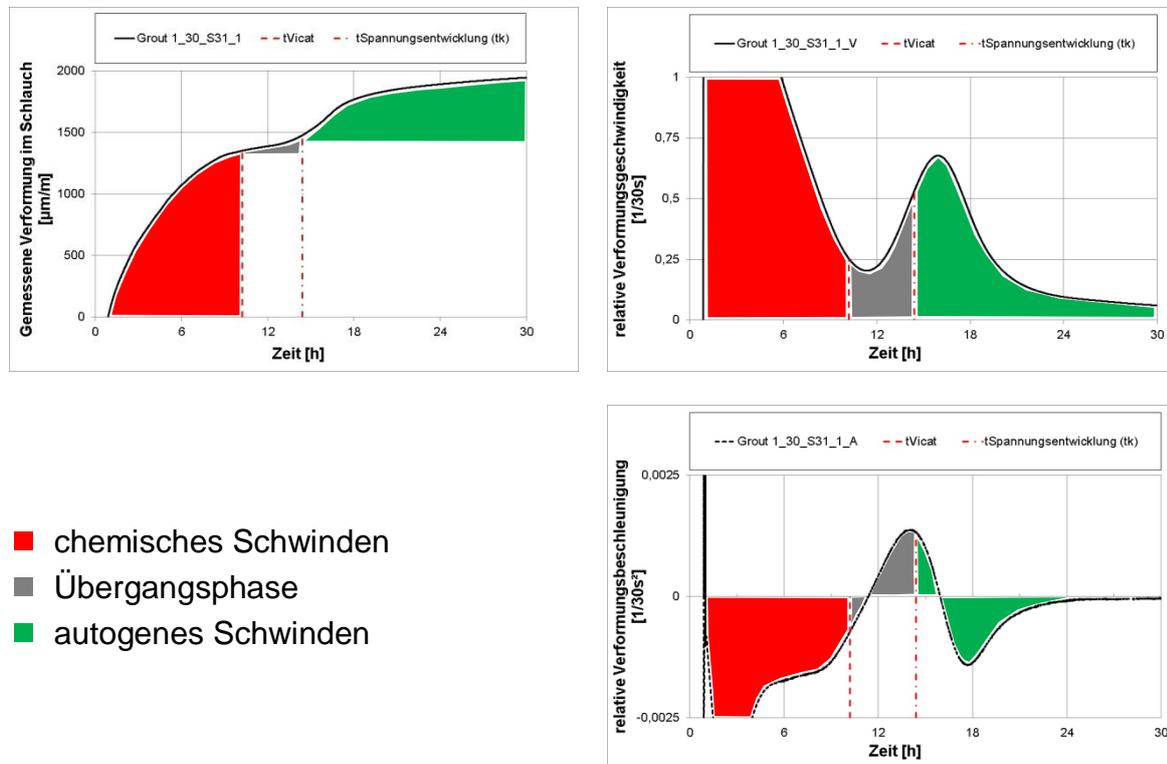


Abbildung 4-7: Unterteilung der gemessenen Verformung (links oben), der relativen Schwindgeschwindigkeit (rechts oben) und der Schwindbeschleunigung (rechts unten)

Da die Werte der Verformungsgeschwindigkeit im Tiefpunkt immer ungleich null sind, werden kontinuierlich weitere Schwindverformungen gemessen. In diesem Übergangsbereich, nehmen die äußerlich messbaren Verformungen in Folge des chemischen Schwindens zunehmend ab, wohingegen nun das autogene Schwinden eine Verkürzung des Probekörpers zur Folge hat. Obwohl das Erstarrungsende bei den meisten Materialien schon vor dem Übergangsbereich festgestellt wurde, ist die Steifigkeitsentwicklung des Zementsteins zum Zeitpunkt t_{Vicat} noch nicht soweit fortgeschritten, als dass die Verformungen im Gefüge übertragen werden können und somit im Schwindringverfahren detektierbar wären. Obwohl das Gefüge immer fester wird, steigt die Schwindgeschwindigkeit stetig an und führt kurz nach dem Tiefpunkt in der Verformungsgeschwindigkeit zu ersten Spannungen im Schwindring. Auffällig ist dabei, dass sich t_{Ring} immer zwischen aufsteigender und maximaler Verformungsgeschwindigkeit befindet und sich genau zu diesem Zeitpunkt auch ein Wendepunkt

im Verlauf der Geschwindigkeit ergibt, an dem die Verformungsbeschleunigung am größten ist. Das bedeutet, dass der Zuwachs in der Verformungsgeschwindigkeit maximal ist und daher die Schwindaktivität besonders hoch ist. Auch beim Material Grout 4, welches nicht den klassischen Schwindverlauf aufweist, kann zum Zeitpunkt t_{Ring} ein eindeutiger Hochpunkt in der Verformungsbeschleunigung detektiert werden. Da das chemische Schwinden bereits keine messbaren Verformungen mehr zur Folge hat, werden hier ausschließlich autogene Schwindverformungen gemessen. Daher ist mit dem Maximum der Verformungsbeschleunigung t_{Amax} (vgl. Abbildung 4-7, re. un.) ein Zeitpunkt festgelegt, ab dem die äußerlich messbaren Verformungen nach einer Übergangsphase wiederum ansteigen und es in der Regel zu hohen spannungsinduzierenden autogenen Schwindwerten kommt. Bei Auswertung der gemessenen Verformungen ergeben sich bei einer Prüftemperatur von 20 °C sehr geringe Abweichungen zwischen den Endschwindwerten ermittelt mit t_{Amax} und t_{Ring} . Bis zum Erreichen von t_{Vmax} können abhängig vom Material bereits bis zu 36 % der spannungsinduzierten Verformungen aufgetreten sein, was die Notwendigkeit der exakten Bestimmung der *time zero* abermals unterstreicht. Zudem ergeben sich bei der Bestimmung der Endschwindwerte mit t_{Amax} deutlich geringere prozentuale Abweichungen zu t_{Ring} , als bei der Verwendung von t_{Vicat} und t_{Vmax} . Der Variationskoeffizient schwankt zwischen 0,7 % bei Grout 4 und 6,5 % bei Grout 2. Die zufriedenstellende Genauigkeit bei insgesamt fünf unterschiedlichen Materialien rechtfertigt die Verwendung von t_{Amax} als verallgemeinerbare Auswertemethode bei einer Prüftemperatur von 20 °C, die die exakte *time zero* bei hochfließfähigen Vergussmaterialien sehr genau abschätzen kann. Ob diese Methode auch bei anderen Prüftemperaturen anwendbar ist, gilt es zu überprüfen.

4.2.3 Gegenüberstellung von Startzeitpunkten (*time zero*) und Verformungsverläufen bei einer Prüftemperatur von 30 °C

Sowohl das JCI [Taz00] als auch die [DIN480_2] sehen keine Prüftemperatur von 30 °C vor, wodurch die Untersuchungen bei dieser Prüftemperatur keinerlei normativen Bestimmungen folgen. Dennoch wird sowohl bei den Messungen der autogenen Schwindverformungen als auch bei der Bestimmung der Erstarrungszeiten nicht von der Vorgehensweise der Untersuchungen bei 20 °C abgewichen. Daher werden weder die verwendeten Ausgangsstoffe noch die benötigte Prüfeinrichtung vor dem Anmischen des Materials bei 30 °C vortemperiert. Die Messungen der autogenen Schwindverformungen selbst, werden nach dem Verfüllen in einem Klimaschrank bei einer Prüftemperatur von 30 °C durchgeführt. In Kapitel 4.4.3 wird auf die Beeinflussung der Endschwindwerte durch die unterschiedlichen Vorlagerungstemperaturen näher eingegangen. Beim Nadelpenetrationsversuch wurde die über die gesamte Prüfdauer im Klimaschrank bei 30 °C gelagerte Probe lediglich für die Dauer der Be-

stimmung des Nadeleindringwiderstandes aus dem Klimaschrank entnommen und der Umgebungstemperatur von ca. 20 °C ausgesetzt.

Grout 1

Die Verläufe der gemessenen Verformung im Schlauch und im Ring sind vergleichbar mit denen aus den Untersuchungen bei einer Prüftemperatur von 20 °C (vgl. A-1.1). Durch die Anhebung der Temperatur auf 30 °C erhöht sich erwartungsgemäß die Hydratationsgeschwindigkeit, was sich zum einen an dem ca. 8,0 h früheren Erreichen der maximalen Temperatur im Schwindschlauch und zum anderen an dem nahezu doppelt so schnellen Erreichen des Erstarrungsendes erkennen lässt.

Eine Besonderheit ergibt sich bei den Verläufen der Temperaturentwicklung des Materials im Schwindschlauch- und im Schwindringverfahren. Dabei wird der Hochpunkt der Temperatur im Schwindschlauch bereits nach 18,2 h und im Schwindring erst nach 18,6 h erreicht. Aufgrund der unterschiedlichen Geometrien und freien Oberflächen der beiden Prüfaufbauten und der daraus resultierenden abweichenden Abkühlungsrate durch unterschiedliche Wärmeübergänge zwischen Probekörper und der Umgebungsluft kommt es zu den variierenden Temperaturverläufen. Da jedoch die maximal erreichten Temperaturen nicht wesentlich voneinander abweichen (ca. 1,3 °C), wird eine vergleichbare Hydratationsreaktion unterstellt (vgl. Kapitel 4.2.1). Dabei wird davon ausgegangen, dass nicht die Schwindprozesse an sich unterschiedlich sind, sondern dass diese lediglich zeitlich versetzt ablaufen. Die Konsequenz für die Auswertung der im Schlauch gemessenen Verformungen, ist die Verschiebung des Zeitpunkts des Beginns der Spannungsentwicklung im Ring. Da das Temperaturmaximum im Schlauch ca. 0,4 h eher als im Ring auftritt, wird der Zeitpunkt t_{Ring} um die Differenz der Zeitpunkte beider Temperaturmaxima verschoben. Die zeitliche Richtung ergibt sich dabei aus der zeitlichen Reihenfolge in der die Temperaturmaxima festgestellt werden.

Der Verlauf der Verformungsgeschwindigkeit weist wie schon bei den Untersuchungen bei 20 °C einen eindeutigen Hochpunkt auf, wobei die Kurve hier schmaler und höher ausfällt. Das spricht für ein schnelleres autogenes Schwinden, wobei der Zeitpunkt t_{Ring} im Vergleich zu 20 °C in Richtung $t_{V_{\text{max}}}$ wandert und von $t_{A_{\text{max}}}$ um 0,4 h unterschätzt wird.

Grout 3

Auch bei Grout 3 ergeben sich ähnliche Verformungsverläufe wie bei der Untersuchung mit einer Prüftemperatur von 20 °C. Der Verlauf der Verformungsgeschwin-

digkeit bei 30 °C lässt wiederum eine eindeutige Bestimmung eines Hochpunktes zu und ist im Vergleich zu der niedrigeren Prüftemperatur gedrungener und erreicht einen höheren Maximalwert (vgl. A-1.3). Die Konsequenz ist eine höhere Schwindverformungsrate pro Zeiteinheit. Die zeitliche Differenz von t_{Vicat} und t_{Vmax} zu t_{Ring} verringern sich jeweils im Vergleich zu den Untersuchungen bei 20 °C.

Ähnlich wie bei Grout 1 ergibt sich beim Zeitpunkt der maximalen Temperatur in den beiden Prüfaufbauten eine Differenz, wonach t_{Ring} für die Auswertung der autogenen Schwindverformungen im Schlauch korrigiert werden muss. Da wiederum der Hochpunkt der Temperatur im Ring später auftritt als der Hochpunkt im Schlauch, muss die bereinigte t_{Ring} ca. 0,5 h in Richtung Mischbeginn verschoben werden. Mit dem ermittelten Beschleunigungsmaximum nach ca. 9,1 h lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus t_{Amax} und der bereinigten t_{Ring} feststellen.

UHPC 5

Auch die Verformungsgeschwindigkeit des UHPC 5 zeigt den charakteristischen Verlauf, die im Vergleich zu der Untersuchung bei 20 °C eher spitzer zuläuft und deutlich höhere Maximalwerte erreicht (vgl. A-1.5). Weiterhin wird die maximale Hydratations-temperatur im Schwinding später als im Schwindschlauch erreicht, weshalb t_{Ring} für die Auswertung der Verformungen korrigiert werden. Durch die Verschiebung von t_{Ring} um ca. 0,4 h unterschätzt der Zeitpunkt t_{Amax} mit 10,6 h die erste Spannungsentwicklung im Ring nur noch um 0,2 h. Das Erstarrungsende wird hier noch ca. 0,5 h vor t_{Amax} festgestellt.

Grout 4

Der Verformungsverlauf bei Grout 4 ähnelt dem Verlauf bei 20 °C und zeigt ebenfalls die bisher erwähnten Veränderungen durch die Erhöhung der Prüftemperatur (vgl. A-1.4). Hinzu kommt, dass der Quellprozess beschleunigt bzw. durch den gegenläufigen Effekt des Schwindens verkürzt wird, da der Quellvorgang bereits nach 13,5 h (30 °C) und nicht nach 20,0 h (20 °C) in ein Schwindvorgang übergeht. Im Bereich der ansteigenden Verformungsgeschwindigkeit tritt wiederum ein Hochpunkt in der Verformungsbeschleunigung auf, der sehr gut mit der bereinigten t_{Ring} korreliert. Die Differenz zwischen den Temperaturmaxima beträgt hier lediglich 0,24 h, wobei das Material im Schwinding wiederum schneller reagiert als im Schwindschlauch. Ebenfalls wird beobachtet, dass die Temperatur analog zur Untersuchung bei 20 °C bereits zum Zeitpunkt der ersten Spannungsentwicklung im Ring ihr Maximum erreicht.

Grout 2

Zu Beginn der Verformungsmessungen ergibt sich beim Grout 2 ein deutliches Quellen des Materials, das nach ca. drei Stunden in eine Schwindverformung übergeht (vgl. A-1.2). Die gemessenen Verformungen sind wiederum mit dem klassischen Schwindverlauf vergleichbar und zeigen im Gegensatz zu dem Verlauf bei 20 °C ein ausgeprägtes Maximum in der Verformungsbeschleunigung. Durch die Differenz zwischen den Zeitpunkten der maximalen Hydratationstemperaturen muss t_{Ring} um ca. 0,8 h in Richtung Mischbeginn verschoben werden, wodurch t_{Amax} nur noch ca. 0,3 h vor t_{Ring} liegt. Trotz der sehr frühen Spannungsentwicklung im Ring werden die Temperaturmaxima im Schwindschlauch und Schwindring erst ca. 4,5 h später erreicht.

Bewertung

Die Erhöhung der Prüftemperatur auf 30 °C führt, ausgenommen bei Grout 2, zu keinen wesentlichen Änderungen in der Charakteristik der gemessenen Verformungen. Aufgrund der höheren Prüftemperatur kommt es bei allen Materialien zu einer beschleunigten Hydratation, was an den früheren Zeitpunkten der Erstarrungszeiten und der Temperaturmaxima zu erkennen ist. Der Verlauf der Verformungsgeschwindigkeit ist meist schmaler und höher ausgeprägt, was auf beschleunigte autogene Schwindverformungen hinweist.

Auffällig ist, dass es bei allen fünf Materialien zu einem zeitlichen Versatz zwischen dem Zeitpunkt der maximalen Temperatur im Schwindring und in den Schwindschläuchen kommt.

Die ermittelten Erstarrungszeiten verringern sich aufgrund der Temperaturanhebung um bis zu 50 % bei Grout 1, wobei das früheste Erstarrungsende bei Grout 2 bereits nach 5,9 h erreicht wird. In Tabelle 4-3 sind die Mittelwerte aus vier Messungen dargestellt, wobei jeweils zwei davon aus einer Untersuchungsreihe stammen. Trotz zeitlicher Differenz zwischen den Untersuchungsreihen lassen sich bei 3 von 5 Materialien reproduzierbare Ergebnisse erzielen. Die geringe Anzahl der vorhandenen Werte lässt allerdings keine gesicherte Prognose über die Anwendbarkeit des Nadelpenetrationsversuchs bei einer Prüftemperatur von 30 °C zu. Die Variationskoeffizienten von bis zu 10,5 % zeigen, dass die Bestimmung des Erstarrungsendes höheren Schwankungen als bei einer Prüftemperatur von 20 °C unterliegt.

Tabelle 4-3: Erstarrungszeiten nach [DIN480_2] bei 30 °C

Material	Erstarrungsende [h]	Standardabweichung [h]	Variationskoeffizient [%]
Grout 1	10,21	1,07	10,5
Grout 3	7,48	0,11	1,4
UHPC 5	10,12	0,12	1,2
Grout 4	9,67	0,97	10,0
Grout 2	5,86	0,08	1,4

Analog zu den Untersuchungen bei 20 °C werden in Tabelle 4-4 die ermittelten Endschwindwerte, nach Auswertung mit den verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der *time zero*, vergleichend gegenübergestellt. Die Endschwindwerte nach t_{Ring} reichen von maximal 681 $\mu\text{m}/\text{m}$ nach 90,1 h bei Grout 1 bis hin zu 319 $\mu\text{m}/\text{m}$ nach 43,4 h bei Grout 4.

Auch bei 30 °C ergeben sich bei der Auswertung einer Untersuchungsreihe bestehend aus zwei Schläuchen unter Verwendung von t_{Ring} bereits Variationskoeffizienten von 0,2 % bis 7,7 %. Im Gegensatz zu den Untersuchungen bei 20 °C wird der höchste Wert nicht bei Grout 2 sondern bei Grout 3 erreicht. Daher treten die verhältnismäßig größeren Schwankungen unabhängig vom verwendeten Material auf. Um den versuchstechnischen Einfluss auf die Ergebnisse möglichst gering zu halten, wurden beide Schwindschläuche immer mit Material aus einer „Mischercharge“ unter Einhaltung einer genau festgelegten Vorgehensweise befüllt und stets in den selben Prüfaufbau eingebaut. Dennoch lässt sich eine gewisse Schwankungsbreite für eine parallele Messung zweier Schwindschläuche nicht verhindern, was verglichen mit Variationskoeffizienten bei Prüfung der Betondruckfestigkeit [Loc14] nicht untypisch ist und somit mit der Inhomogenität der einzelnen Materialproben begründet werden kann. Bei der Bestimmung des Trocknungsschwindens sind Variationskoeffizienten von bis zu 30 % möglich (vgl. [Str10]).

Tabelle 4-4: Zusammenstellung der ermittelten Endschwindwerte mit t_{Ring} bei 30 °C

	t_{Ring} (t_{R})	t_{Amax} (t_{A})	Vergleich ($t_{\text{R}} + t_{\text{A}}$)/2	Vergleich ($t_{\text{R}} + t_{\text{Vicat}}$)/2	Vergleich ($t_{\text{R}} + t_{\text{Vmax}}$)/2
Grout 1 (90,1 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	681,2	704,2	→ 692,7	↑ 742,3	↓ 595,6
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	19,3	12,7	17,4 (76 h)	86,5 (76 h)	116,0 (74 h)
Variationskoeffizient	2,8 %	1,8 %	2,5 %	11,7 %	19,5 %
Grout 3 (86,9 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	347,7	358,8	→ 353,2	↑ 386,3	↓ 299,8
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	26,8	42,6	7,9 (78 h)	54,7 (78 h)	64,3 (76 h)
Variationskoeffizient	7,7 %	12 %	2,2 %	14,2 %	21,5 %
UHPC 7 (40,0 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	560,6	585,7	→ 573,1	↗ 597,2	↓ 443,5
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	20,8	6,7	17,7 (30 h)	51,2 (30 h)	161,0 (28 h)
Variationskoeffizient	3,7 %	1,1 %	3,1 %	8,7 %	36,3 %
Grout 4 (43,4 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	318,8	321,6	→ 320,2	↓ 203,6	↓ 240,3
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	10,0	11,7	2,0 (28 h)	162,9 (28 h)	16,9 (20 h)
Variationskoeffizient	3,1 %	3,6 %	0,6 %	80,0 %	7,0 %
Grout 2 (60,5 h)					
Mittelwert [$\mu\text{m/m}$]	460,9	475,2	→ 468,0	→ 469,8	↓ 378,2
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	0,9	1,0	10,1 (54 h)	12,7 (54 h)	116,9 (54 h)
Variationskoeffizient	0,2 %	0,2 %	2,2 %	2,7 %	30,9 %

Die genaueste Übereinstimmung der Endschwindwerte im Vergleich mit der Referenz (t_{Ring}) ergeben sich bei der Verwendung von t_{Amax} . Der Vergleich der Endschwindwerte ergibt eine maximale Standardabweichung von 17,7 $\mu\text{m/m}$ mit einem Variationskoeffizienten von 3,1 %. Mit der Anwendung von t_{Vicat} werden die autogenen Verformungen deutlich überschätzt, wobei die Variationskoeffizienten zwischen 2,7 % und 80 % liegen. Durch die große Schwankungsbreite ist die Anwendung von t_{Vicat} bei einer Prüftemperatur von 30 °C nicht zielführend. In der Summe ergeben sich die größten Abweichungen bei der Auswertung der Endschwindwerte nach t_{Vmax} , wobei die spannungsinduzierenden Verformungen aufgrund des späteren Auftretens von t_{Vmax} alle unterschätzt werden. Die Größe der Abweichung ergibt sich aus der Tatsache, dass die Verformungsgeschwindigkeit zwischen t_{Ring} und t_{Vmax} noch weiter ansteigt. Die festgestellten Variationskoeffizienten reichen von 7,0 % bis zu 36,3 %.

wodurch auch dieses *time zero*-Kriterium bei 30 °C nicht als Ersatz für das Schwindringverfahren verwendet werden kann.

4.2.4 Gegenüberstellung von Startzeitpunkten (*time zero*) und Verformungsverläufen bei einer Prüftemperatur von 5 °C

Das JCI [Taz00] sieht die Messung der autogenen Schwindverformungen bei einer Prüftemperatur von 5 °C nicht vor, wohingegen diese Temperatur in der [DIN480_2] geregelt ist. Analog zu der Prüftemperatur von 30 °C wird sowohl bei den Messungen der autogenen Schwindverformungen als auch bei der Bestimmung der Erstarrungszeiten dennoch nicht von der Vorgehensweise der Untersuchungen bei 20 °C abgewichen. Daher werden weder die verwendeten Ausgangsstoffe noch die benötigte Prüfeinrichtung vor dem Anmischen des Materials bei 30 °C vortemperiert. Die Messungen der autogenen Schwindverformungen selbst, werden nach dem Verfüllen in einem Klimaschrank bei einer Prüftemperatur von 30 °C durchgeführt. In Kapitel 4.4.3 wird auf die Beeinflussung der Endschwindwerte durch die unterschiedlichen Vorlagerungstemperaturen näher eingegangen. Das Vorgehen beim Nadelpenetrationsversuch wird analog zur Prüftemperatur von 30 °C durchgeführt, wobei die Probe im Klimaschrank bei 5 °C temperiert wird.

Die Reduzierung der Prüftemperatur auf 5 °C hat eine erhebliche Verzögerung der Hydratation zur Folge. Deutlich wird dieses unter anderem an dem Erstarrungsende, welches bei allen untersuchten Materialien erst nach über 20 Stunden erreicht wird. Bei Grout 1 dringt die beschwerte Nadel erst nach 42,7 h weniger als 2,5 mm in den Probekörper ein (Tabelle 4-5). Die Standardabweichung beträgt bei zwei Untersuchungen mit jeweils zwei parallel geprüften Schwindschläuchen maximal 1,4 h, wobei die Variationskoeffizienten bei 5 °C im Vergleich zu den Prüftemperaturen von 20 °C und 30 °C die geringste Schwankungsbreite sowie den kleinsten Maximalwert (3,4 %) aufweisen.

Tabelle 4-5: Erstarrungszeiten nach [DIN480_2] bei 5 °C

Material	Erstarrungsende [h]	Standardabweichung [h]	Variationskoeffizient [%]
Grout 1	42,65	1,44	3,4
Grout 3	24,04	0,41	1,7
UHPC 5	20,38	0,12	0,6
Grout 4	25,50	0,73	2,9
Grout 2	22,28	0,73	3,3

Anhand der Abbildung 4-8 ist deutlich zu erkennen, dass das Erstarrungsende angenommen bei Grout 2 deutlich früher auftritt als die erste Spannungsentwicklung im Ringversuch, wobei die maximale Abweichung zu t_{Ring} bei Grout 4 ca. 31,7 h beträgt. Bei Grout 2 hingegen liegt das Erstarrungsende um 0,7 h hinter dem Zeitpunkt t_{Ring} . Daraus kann abgeleitet werden, dass zwischen dem gemessenen Erstarrungsende und dem Beginn der spannungsinduzierenden Schwindverformungen bei einer Prüftemperatur 5 °C kein eindeutiger Zusammenhang besteht und die Verwendung von t_{Vicat} bei der Auswertung der autogenen Schwindverformungen zu falschen Ergebnissen führen würde.

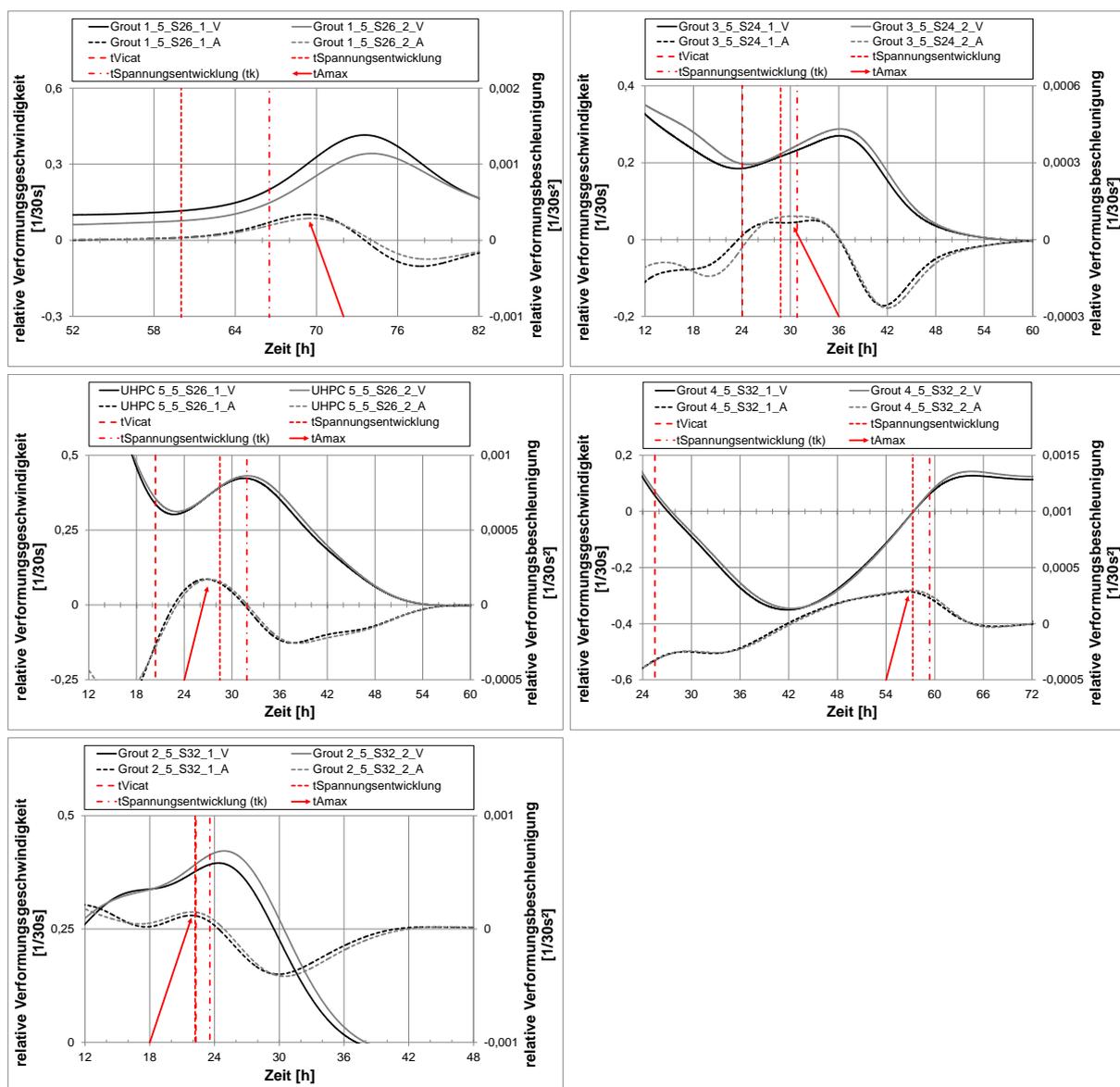


Abbildung 4-8: Zusammenstellung der Ergebnisse von Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung bei einer Prüftemperatur von 5 °C

Die Absenkung der Prüftemperatur hat keine grundlegende Änderung der Verformungscharakteristik der Geschwindigkeit und der Beschleunigung zur Folge. Der charakteristische Verlauf der Verformungsgeschwindigkeit ist lediglich flacher und breiter, weshalb die Schwindverformungen im Vergleich zu den Untersuchungen bei 20 °C über einen längeren Zeitraum hinweg ansteigen.

Beim Vergleich der Temperaturverläufe der jeweiligen Materialien im Schwindring- und Schwindschlauchverfahren fällt auf, dass die zeitlichen Differenzen der Temperaturmaxima deutlich weiter auseinanderliegen als bei den Untersuchungen bei 30 °C. Der größte Abstand wird bei Grout 1 gemessen und beträgt 6,5 h, wobei die jeweiligen Temperaturmaxima im Schwindschlauch später erreicht werden als im Schwindring. Bedingt durch das geringere Volumen und die größere Oberfläche des Schwindschlauches wird die Erwärmung des Probekörpers infolge der exothermen Reaktion der beginnenden Hydratation direkt durch die umgebende kalte Luft kompensiert. Somit verringert sich neben der Hydratationsgeschwindigkeit auch die maximale Probekörpertemperatur des Schwindschlauches um ca. 0,5 °C.

Daher sind die jeweiligen Zeitpunkte t_{Ring} für die Auswertung zeitlich alle nach rechts zu verschieben. Durch die Verschiebung liegen die Zeitpunkte t_{Ring} wiederum alle im Bereich zwischen anfänglichem Anstieg und dem folgendem Hochpunkt der Verformungsgeschwindigkeit. Dennoch bestehen mit Ausnahme von Grout 3 größere Differenzen zwischen t_{Amax} und t_{Ring} als bei 20 und 30 °C. Zudem lässt sich bzgl. der Lage von t_{Ring} und t_{Amax} keine eindeutige Tendenz erkennen, da die zeitliche Reihenfolge in Abhängigkeit des Materials variiert.

Bewertung

Die Verringerung der Prüftemperatur auf 5 °C bewirkt nicht nur eine deutliche Verzögerung des Startpunktes der spannungsinduzierenden Schwindverformungen (t_{Ring}), sondern auch eine Reduzierung der Hydratationsgeschwindigkeit. Es dauert bis zu 43 Stunden, bis eine nennenswerte Festigkeitsentwicklung mit Erreichen des Erstarrungsendes festgestellt werden kann. Die chemische Reaktion ist stark verlangsamt, wodurch auch die Verformungsgeschwindigkeit reduziert wird und die Abschätzung des Beginns der Spannungsentwicklung im Ring, mit Hilfe der Bestimmung der maximalen Verformungsbeschleunigung, nicht mehr so eindeutig ist.

Dennoch lässt sich bei den meisten Materialien eine mit den Untersuchungen bei 20 °C vergleichbare Verformungscharakteristik erkennen. Daraus kann geschlossen werden, dass die Verringerung der Temperatur zwar eine Verlangsamung der Verformungsvorgänge zur Folge hat, jedoch nicht zu einer signifikanten Änderung der

Schwindverformungen führt. Die Zusammenstellung der ermittelten Endschwindwerte sind in Tabelle 4-6 dargestellt.

Tabelle 4-6: Zusammenstellung der ermittelten Endschwindwerte mit t_{Ring} bei 5 °C

	t_{Ring} ($t_{\text{R.}}$)	t_{Amax} ($t_{\text{A.}}$)	Vergleich ($t_{\text{R.}} + t_{\text{A.}}$)/2	Vergleich ($t_{\text{R.}} + t_{\text{Vicat}}$)/2	Vergleich ($t_{\text{R.}} + t_{\text{Vmax}}$)/2
Grout 1 (167,6 h)					
Mittelwert	796,6	741,3	→ 768,9	↑ 917,9	↓ 664,9
Standardabweichung [$\mu\text{m/m}$]	53,4	55,1	38,8 (90 h)	171,6 (90 h)	186,3 (90 h)
Variationskoeffizient	6,7 %	7,4 %	5,1 %	18,7 %	28,0 %
Grout 3 (137,5 h)					
Mittelwert	406,0	418,0	→ 412,0	↑ 490,8	↓ 266,2
Standardabweichung	27,1	28,1	8,5 (96 h)	120,0 (96 h)	197,7 (96 h)
Variationskoeffizient	6,7 %	6,7 %	2,1 %	24,4 %	74,3 %
UHPC 5 (72,2 h)					
Mittelwert	503,8	760,7	↑ 632,2	↑ 740,0	↘ 461,0
Standardabweichung	19,3	4,5	181,6 (40 h)	334,0 (40 h)	61,0 (36 h)
Variationskoeffizient	3,8 %	0,6 %	28,7 %	45,1 %	13,2 %
Grout 4 (72,3 h)					
Mittelwert	213,0	169,5	↓ 191,2	↓ 10,4	→ 204,0
Standardabweichung	19,9	17,1	30,7 (12 h)	286,5 (12 h)	8,2 (11,8 h)
Variationskoeffizient	9,3 %	10,1%	16,1 %	2768 %	4,0 %
Grout 2 (73,3 h)					
Mittelwert	377,2	466,4	↑ 421,8	↗ 412,9	↓ 321,4
Standardabweichung	39,8	33,7	63,1 (48 h)	50,4 (48 h)	77,9 (46 h)
Variationskoeffizient	10,6%	7,2 %	15,0 %	12,2 %	24,3 %

Die festgestellten Endschwindwerte nach t_{Ring} reichen von 213 $\mu\text{m/m}$ nach 72,3 h bei Grout 4 bis hin zu 797 $\mu\text{m/m}$ nach 167,6 h bei Grout 1. Auffällig bei der Auswertung nach t_{Ring} (t_{k}) ist der hohe Variationskoeffizienten von bis zu 10,6 % innerhalb einer aus zwei Schwindschläuchen bestehenden Serie. Darüber hinaus ergeben sich auch bei den Vergleichen der einzelnen Verfahren zur Ermittlung der *time zero* mit t_{Ring} höhere Variationskoeffizienten als bei den Prüftemperaturen von 20 und 30 °C. Dennoch kommt es bei einer Prüftemperatur von 5 °C zu einer Überschätzung der spannungsinduzierenden Verformungen durch t_{Vicat} und zu einer Unterschätzung der

Schwindwerte durch die Auswertung nach t_{Vmax} . Mit der Ermittlung der *time zero* durch t_{Amax} ergeben sich im Vergleich zu der Auswertung nach t_{Ring} zwar die geringsten Abweichungen der einzelnen Schwindwerte, dennoch ist der maximale Variationskoeffizient von 28,7 % deutlich höher als bei den übrigen Prüftemperaturen. Dabei treten die maximalen Abweichungen zu den Endschwindwerten nach t_{Ring} in Abhängigkeit der Prüftemperaturen immer bei anderen Materialien auf. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass die untersuchten Materialien jeweils unterschiedlich auf die Veränderung der Prüftemperaturen reagieren und somit keine einheitliche Aussage über den Temperatureinfluss möglich ist.

4.2.5 Bewertung des Temperatureinflusses und Festlegung eines Referenzverfahrens zur Bestimmung der *time zero*

Ausgehend von den an den Verformungskurven ermittelten Startpunkten für die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen kann nun ein Vergleich zwischen den in dieser Arbeit ermittelten und den in der Literatur verwendeten Verfahren durchgeführt werden. Dabei werden die jeweiligen Startpunkt (t_{Amax} , t_{Vicat} und t_{Vmax}) jeweils mit der im Schwindring ermittelten t_{Ring} verglichen, um so die Anwendbarkeit zur Bestimmung des Startzeitpunkts der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen der einzelnen Verfahren überprüfen zu können.

In Abbildung 4-9 sind die einzelnen Startpunkte über den überprüften Temperaturbereich (5 °C, 20 °C und 30 °C) dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde eine Näherung der jeweiligen Messreihe mittels einer Potenzfunktion durchgeführt. Diese Funktion eignet sich für die Beschreibung der ermittelten Messwerte, da negative Zahlen und die Zahl Null nicht definiert sind. Bei Temperaturen von ≤ 0 °C wäre ein Anmischen des Materials nicht mehr möglich, da das zu verwendende Wasser gefrieren würde. Bei Temperaturen nahe 0 °C würde die Hydratation derart verlangsamt werden, dass der Zeitpunkt des Beginns der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen sehr stark ansteigen würde. Auf der anderen Seite steigt die Reaktionsgeschwindigkeit bei Erhöhung der Prüftemperaturen schnell an, wodurch die Dauer bis zum Erreichen des Startzeitpunkts immer kleiner wird. Ab ca. 100 °C ist weiterer Grenzzustand der Näherung erreicht, da bei dieser Temperatur das Wasser theoretisch nur noch in gasförmiger Form vorliegt und ein Anmischen des Materials wiederum nicht möglich wäre. Die beiden angesprochenen Grenzzustände finden in der Praxis keinerlei Anwendung und können daher als solche verwendet werden. Die Zwischenwerte innerhalb der Stützstellen wurden in dieser Arbeit nicht ermittelt, weswegen die skizzierten Verläufe lediglich der besseren Vergleichbarkeit dienen.

In Abbildung 4-9 auf der linken Seite ist zu erkennen, dass der Verlauf von t_{Amax} nahezu deckungsgleich mit t_{Ring} ist. Die Stützstellen von t_{Amax} liegen bei 5 °C und 20 °C minimal über denen von t_{Ring} , wohingegen sie bei 30 °C leicht unter der von t_{Ring} liegt. Diese geringen Abweichungen bei jeweils einer Untersuchungsreihe lassen auf eine hohe Übereinstimmung der beiden Parameter schließen, was die Anwendbarkeit des Zeitpunkts t_{Amax} als Ersatz für t_{Ring} beim Material Grout 1 bestätigt. Auf der rechten Seite der Abbildung 4-9 werden die Zeitpunkte t_{Vicat} und t_{Vmax} dem Zeitpunkt t_{Ring} gegenübergestellt.

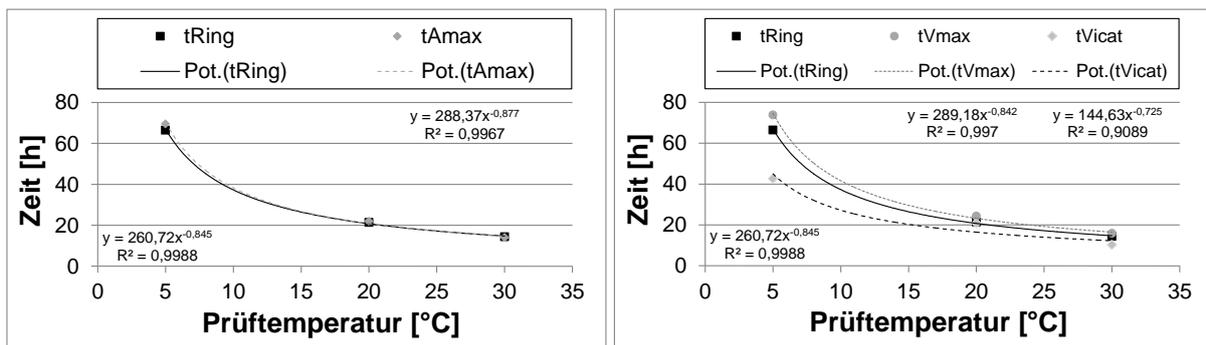


Abbildung 4-9: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von Grout 1

Da der Zeitpunkt der maximalen Verformungsgeschwindigkeit immer hinter dem Zeitpunkt der maximalen Verformungsbeschleunigung liegt, kommt es erwartungsgemäß zu einer Überschätzung von t_{Ring} durch t_{Vmax} . Der Abstand der Überschätzung steigt mit sinkender Prüftemperatur minimal an, kann dennoch über den untersuchten Temperaturbereich als nahezu konstant bezeichnet werden. Demgegenüber steht der Zeitpunkt t_{Vicat} , der t_{Ring} generell unterschätzt ohne dabei eine erkennbare Regelmäßigkeit in den jeweiligen zeitlichen Abständen aufzuweisen. Bei der Prüftemperatur von 5 °C beträgt die Differenz zu t_{Ring} ca. 24 h wohingegen bei 30 °C eine Abweichung von ca. 4 h und bei 20 °C von ca. 0,5 h festzustellen ist. Aufgrund der festgestellten Streuung über den gesamten Temperaturbereich ist eine zuverlässige Abschätzung von t_{Ring} durch die Ermittlung der Erstarrungszeiten nicht möglich. Lediglich bei einer Prüftemperatur von 20 °C kann der Beginn der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen durch den in der Literatur definierten Zeitpunkt des Erstarrungsendes nach [DIN196_3] abgeschätzt werden.

Ähnlich wie bei Grout 1 liegen die Zeitpunkte t_{Ring} und t_{Amax} über den untersuchten Temperaturbereich sehr dicht beieinander (vgl. Abbildung 4-10). Die größte Abweichung ergibt sich bei einer Prüftemperatur von 5 °C und beträgt ca. 60 Minuten. Damit ist auch bei Grout 2 eine gute Reproduzierbarkeit von t_{Ring} durch t_{Amax} nachgewiesen.

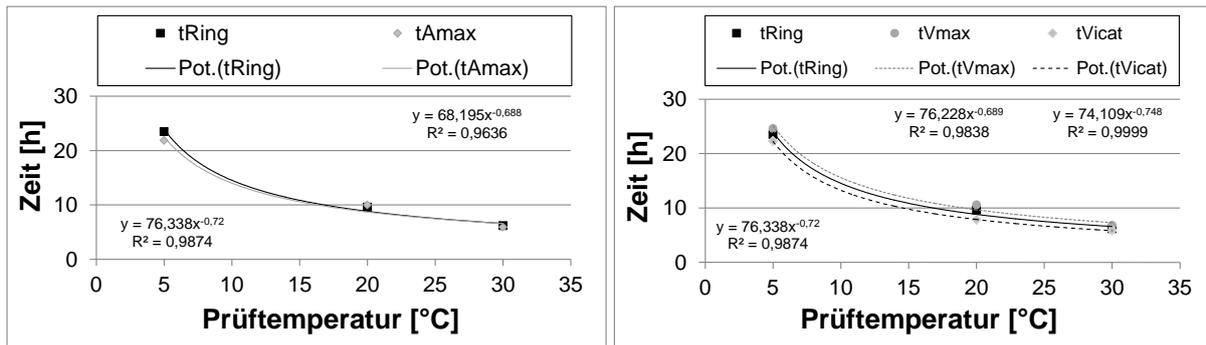


Abbildung 4-10: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von Grout 2

Weiterhin kommt es durch t_{Vmax} und t_{Vicat} zu einer Über- bzw. Unterschätzung von t_{Ring} . Über den untersuchten Temperaturbereich ergeben sich an den jeweiligen Stützstellen Differenzen, die jedoch geringer ausfallen als bei Grout 1. Insbesondere bei t_{Vicat} sind die Abweichungen zu t_{Ring} konstanter und nahezu unabhängig von der Prüftemperatur. Selbst bei einer Prüftemperatur von 5 °C wird t_{Ring} bereits nach ca. 24 Stunden erreicht, wodurch Grout 2 auch bei tiefen Temperaturen deutlich schneller reagiert als Grout 1. Die geringere Beeinflussung durch die Temperatur führt zur Verringerung der Schwankungsbreite von t_{Vicat} , wobei aufgrund der grundsätzlichen Unterschätzung von t_{Ring} dennoch eine erkennbare Überschätzung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen auftreten würde. Bei t_{Vmax} ergeben sich analog zu Grout 1 sehr geringe Abweichungen zu t_{Ring} , wobei die grundsätzliche Überschätzung der Zeitpunkte für den Beginn der Schwindverformungen wiederum zu einer Unterschätzung der Endschwindwerte führen würde.

Wie in Abbildung 4-11 zu erkennen ist, sind die Zeitpunkte t_{Ring} und t_{Amax} auch bei Grout 3 nahezu gleich. Im Gegensatz dazu lassen sich bei dem Vergleich von t_{Vmax} und t_{Vicat} mit t_{Ring} wiederum die grundsätzlichen Beobachtungen bzgl. der einzelnen Abweichungen machen. Die Überschätzung von t_{Vmax} bzw. die Unterschätzung von t_{Vicat} ergibt sich bei sämtlichen Prüftemperaturen und steigt mit fallender Temperatur an.

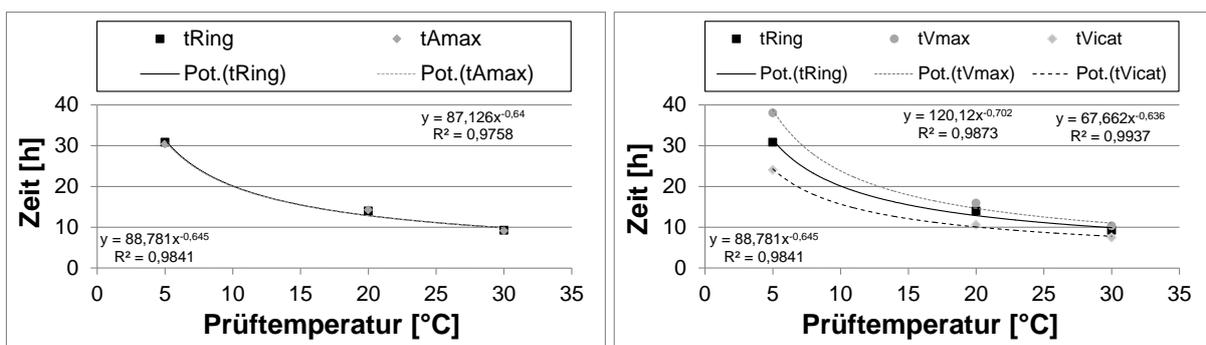


Abbildung 4-11: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von Grout 3

Die Startpunkte der autogenen Schwindverformungen t_{Ring} und t_{Amax} zeigen beim UHPC 5 die größten Differenzen von den in dieser Arbeit untersuchten Materialien (vgl. Abbildung 4-12). Während sich bei den Prüftemperaturen 20 °C und 30 °C noch sehr genaue Übereinstimmungen ergeben, weicht der Startpunkt bei der Prüftemperatur von 5 °C um ca. 6 h ab, wobei t_{Amax} den Zeitpunkt t_{Ring} dabei deutlich unterschätzt.

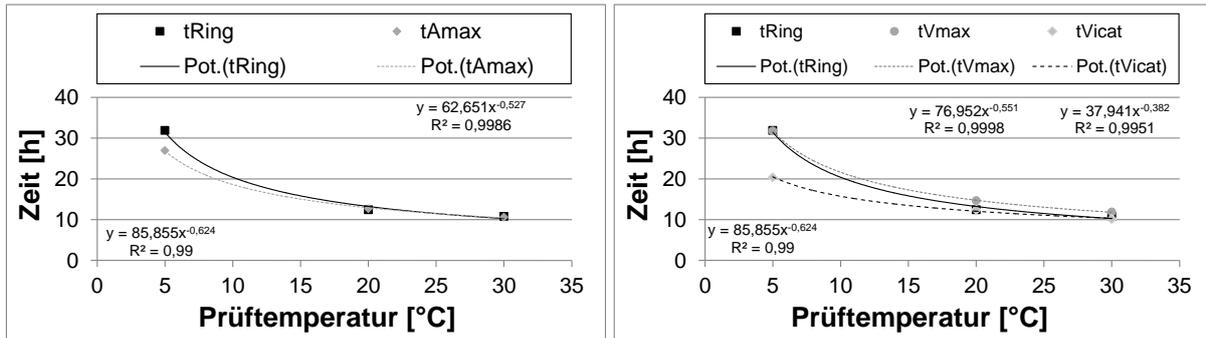


Abbildung 4-12: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von UHPC 5

Auf der anderen Seite ergeben sich bei den Zeitpunkten t_{Vicat} und t_{Vmax} ähnliche Zusammenhänge mit t_{Ring} wie bei den Untersuchungen von Grout 1. Bei einer Prüftemperatur von 20 °C und 30 °C werden geringe Abweichungen von t_{Ring} festgestellt, wobei es bei 5 °C zu einer deutlichen Unterschätzung (ca. 12 h) durch t_{Vicat} und zu einer annähernd genauen Übereinstimmung von t_{Vmax} und t_{Ring} kommt.

Die Zeitpunkte t_{Ring} und t_{Amax} sind bei Grout 4 über den gesamten Temperaturbereich nahezu identisch. Lediglich bei einer Prüftemperatur von 5 °C wird t_{Ring} durch t_{Amax} um ca. 2 Stunden unterschätzt. Auf der anderen Seite ergeben sich beim Vergleich von t_{Ring} mit t_{Vicat} und t_{Vmax} ähnliche Zusammenhänge wie bei UHPC 5. Während die Unterschätzung durch t_{Vicat} und die Überschätzung durch t_{Vmax} bei 20 °C und 30 °C mit jeweils ca. 5 Stunden noch recht konstant sind, ergibt sich bei 5 °C eine deutliche Unterschätzung von t_{Ring} durch t_{Vicat} (ca. 35 Stunden) und mit ca. einer Stunde eine minimale Überschätzung durch t_{Vmax} .

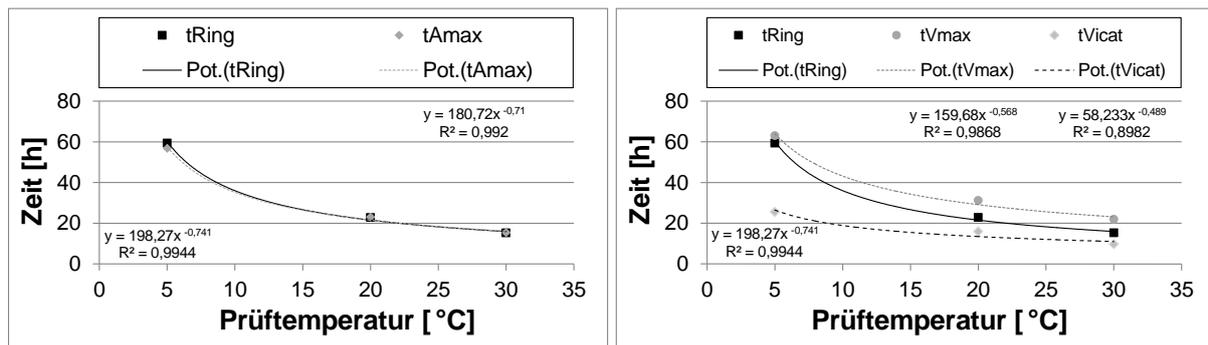


Abbildung 4-13: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von Grout 4

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich die größten Übereinstimmungen mit t_{Ring} durch den Zeitpunkt t_{Amax} ergeben. Dabei kommt es bei allen hier untersuchten Materialien bei den Prüftemperaturen von 20 und 30 °C zu einer nahezu exakten Übereinstimmung von t_{Ring} und t_{Amax} . Lediglich bei 5 °C sind teilweise Abweichungen zwischen den beiden Zeitpunkten festzustellen, die beim UHPC 5 am größten sind. Hier wird t_{Ring} um ca. 360 min von t_{Amax} unterschätzt. Da es sich bei der Prüftemperatur von 20 °C jedoch um die standardisierte Prüftemperatur für die Messung von autogenen Schwindverformungen handelt und hier bei sämtlichen Materialien ein kausaler Zusammenhang zwischen den beiden Zeitpunkten besteht, wird für sämtliche in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen der Zeitpunkt t_{Amax} als *time zero* für den Beginn der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen definiert. Dabei kann es lediglich bei einer Prüftemperatur von 5 °C zu einer fehlerhaften Bestimmung der *time zero* kommen, weswegen die resultierenden Schwindverformungen nicht ohne weiteres der Realität entsprechen. Die beiden anderen Zeitpunkte t_{Vicat} und t_{Vmax} kommen aufgrund der teilweise erheblichen Abweichungen und einer zusätzlichen nicht stringenten Über- oder Unterschätzung von t_{Ring} nicht als *time zero* für die Bestimmung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen in Frage.

4.3 Abschätzung des versuchstechnischen Einflusses auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen

4.3.1 Allgemeines

Um Aussagen über real auftretende spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen machen zu können, ist unter anderem die Kenntnis des versuchstechnischen Einflusses notwendig. Dazu werden im Folgenden die Ergebnisse aus unterschiedlichen Prüfverfahren gegenübergestellt, um so eventuelle Einflüsse detektieren zu können. Als Referenzverfahren gilt dabei immer das klassische Schwindschlauch-

verfahren, da sämtliche Anforderungen bzgl. der Durchführung von autogenen Schwindmessungen erfüllt sind. Die geriffelte Schlauchform begünstigt zum einen den reibungsarmen Kontakt zwischen Probekörper und Prüfaufbau und sorgt zum anderen durch die große Oberfläche für eine ausreichende Temperierung des hydratisierenden Vergussmaterials. Weiterhin belegen die Ergebnisse aus Kapitel 3.4 eine konservierende Lagerung des Probekörpers sowie eine sehr gleichmäßige Verformungscharakteristik.

Mit der Variation der Messrichtung beim Schwindschlauchverfahren in Bezug auf die Gravitation soll neben der grundsätzlichen Überprüfung der Messung der Verformungen an einem Ende des Schwindschlauches auch die Isotropie des autogenen Schwindens bestätigt werden. Weiterhin werden durch die vergleichende Untersuchungen mit dem Schwindschlauchverfahren und dem Schwindkegel- sowie Schwindrinnenverfahren weitere Erkenntnisse hinsichtlich des versuchstechnischen Einflusses auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen erwartet.

4.3.2 Varianten des Schwindschlauchverfahrens durch veränderte Lagerungsarten des Prüfaufbaus

Entgegen der standardisierten horizontalen Lagerung der Schwindschläuche soll mit der nahezu senkrechten Aufstellung des Prüfaufbaus der Einfluss der Messrichtung auf die Endschwindwerte detektiert werden. Durch die Ausrichtung der Probekörper und die Verformungsmessung in Richtung der Gravitation ist das Messprinzip mit dem aus dem Schwindkegelverfahren vergleichbar. Der Unterschied dabei ist jedoch, dass Entlüftungsvorgänge nicht zu einer vermeintlichen Schwindverformung des Schwindschlauches (geschlossenes System) führen und dass die Reibung zwischen Prüfkörper und Prüfaufbau vernachlässigt werden kann. In der zweiten Untersuchungsreihe wird der Schwindschlauch am oberen Ende in den Prüfaufbau gehängt und die Verformungen gegenüberliegend am unteren Ende mittels induktiven Wegaufnehmers aufgenommen. Inwieweit die Verformungsmessung entgegen der Gravitation sowie der Schwindverformungen die Verformungscharakteristik und die Endschwindwerte beeinflusst, ist bisher nicht bekannt. Durchgehende Risse im Probekörper orthogonal zur Schwindrichtung durch die hängende Lagerung werden aufgrund des geringen Eigengewichts und der geringen Länge des Prüfkörpers nicht erwartet.

Durch die Variation der Probekörperlagerung und der Anordnung der Messsensorik werden unterschiedliche Verformungscharakteristika erwartet. Mit Hilfe der Auswertung der gemessenen Verformungen können Abweichungen in den Endschwindwerten detektiert und so Rückschlüsse auf versuchstechnische Einflüsse gezogen wer-

den. Der Variantenvergleich wird repräsentativ bei einer Prüftemperatur von 20 °C und mit Grout 1 durchgeführt.

Messrichtung:

standardisiert (waagrecht) vs. in Richtung der Gravitation (geneigt)

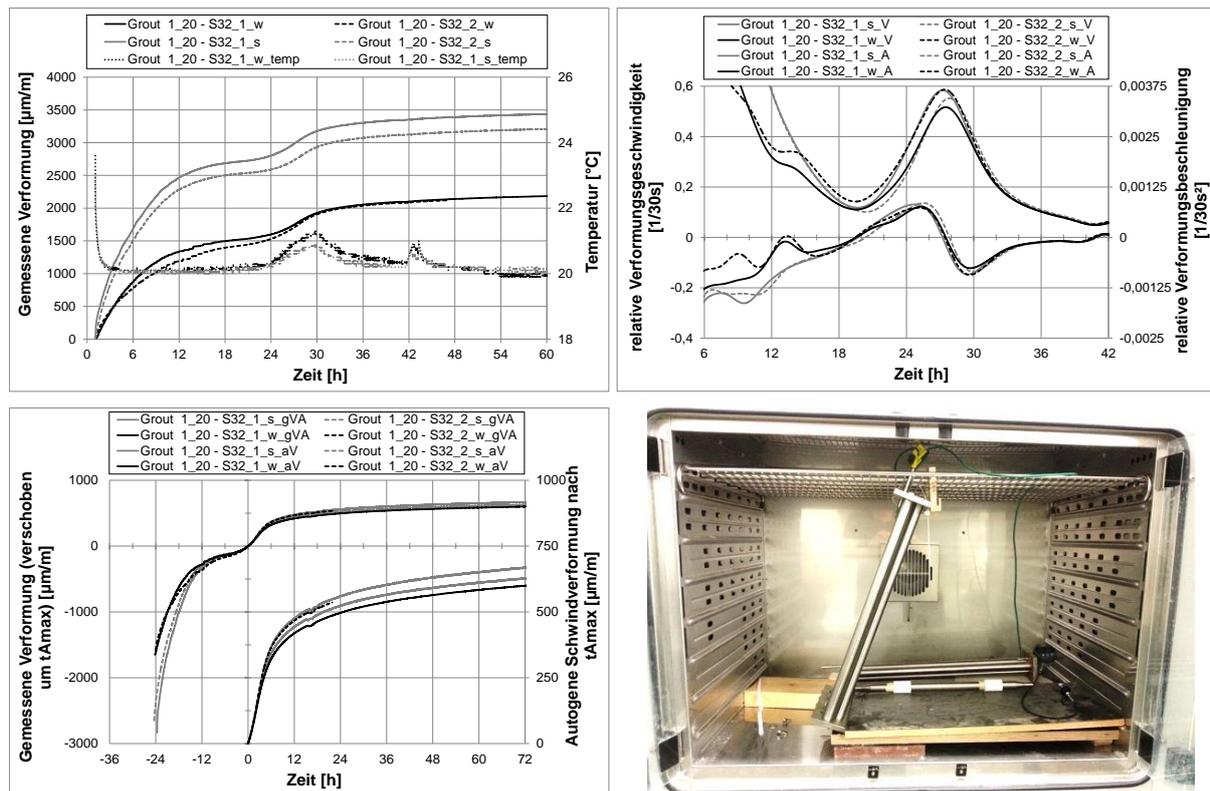


Abbildung 4-14: Grout 1 - Vergleich zwischen horizontaler und geneigter Lagerung der Schwindschläuche mit Verformungsmessung in Richtung der Gravitation

Der geneigte Prüfaufbau (ca. 70°) wird zur Gewährleistung einer konstanten Prüftemperatur von 20 °C in einem Klimaschrank gelagert (vgl. Abbildung 4-14). Zur Sicherstellung der Lagerung sowie zur Verhinderung des unkontrollierten Ausbeulens des noch plastischen Schwindschlauchs direkt nach dem Einbau wurde von einer exakten 90°-Lagerung abgesehen. Durch die Messwertaufnahme am oberen Ende des Schwindschlauchs kann dennoch von einer mit dem Schwindkegelverfahren vergleichbaren Messsituation (in Richtung der Gravitation) ausgegangen werden. Das Material stammt für alle vier Schwindschläuche aus einer Mischercharge und die Messung wird nach dem Einbau des letzten Schwindschlauches gestartet.

Erwartungsgemäß werden bei der geneigten Lagerung größere Verformungen gemessen als bei den horizontal gelagerten Schwindschläuchen (Abbildung 4-14).

Nach 18 h sind die gemessenen Verformungen um ca. 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ höher, wobei sich dennoch bei beiden Lagerungsarten eine ähnliche Kurvencharakteristik einstellt. Da es sich bei den Schwindschläuchen um ein geschlossenes System handelt, kann evtl. aufsteigende Luft nicht aus dem System entweichen. Dadurch können die Abweichungen in den Verläufen allein mit den unterschiedlichen Auswirkungen der Umlagerung- und Setzungsvorgängen innerhalb der Schwindschläuche erklärt werden. Bei den horizontal gelagerten Schläuchen wirkt sich ein Setzen des Materials nicht auf die gemessenen Werte aus, da lediglich der Füllstand in radialer Richtung sinkt und sich aufsteigende Luft im Bereich der oberen Rippen des Schwindschlauches sammelt. Werden die minimalen Druckunterschiede zwischen unterer und oberer Seite des Schlauches vernachlässigt, kommt es zu keinerlei messbaren Verformung des Schlauches. Beim geneigten Schwindschlauch hingegen führt eine Setzung des Materials zu einer Verkürzung des Schlauches und somit zu höheren Verformungswerten. Die aufsteigende Luft hat hier ebenfalls keinen Einfluss auf die Verformungsmessung, da sie sich wenn überhaupt ebenfalls in den einzelnen Rippen sammelt.

Aufgrund des identischen Temperaturverlaufs während der Hydratation können unterschiedliche chemische oder hygriische Prozesse innerhalb der einzelnen Schwindschläuche ausgeschlossen werden. Dieses wird auch durch die Verläufe der relativen Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung bestätigt. Hier zeigt sich für alle vier Schwindschläuche ab ca. 18 h nach Mischbeginn eine nahezu identische Schwindcharakteristik. Dabei liegen nicht nur die Zeitpunkte der jeweiligen Hochpunkte sondern auch die nominellen Werte der einzelnen Verformungsraten auf nahezu gleichem Niveau. Wie in Kapitel 4.2.5 festgelegt wird als *time zero* der Zeitpunkt $t_{A_{\max}}$ zum Vergleich der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen verwendet.

Nach 22 h ergibt sich für die horizontal gelagerten Schwindschläuche ein Mittelwert von 511 $\mu\text{m}/\text{m}$ und für die geneigten Schwindschläuche ein geringfügig höherer Wert von 531 $\mu\text{m}/\text{m}$. Der Variationskoeffizient beim Vergleich der einzelnen Werte liegt mit 5,4 % im Bereich der in Kapitel 4.2 ermittelten Variationen, weshalb hier von einer Streuung der Messwerte aufgrund der geringen Stichprobenanzahl und nicht von einem Anstieg der Verformungen durch die Änderung der Lagerungsart auszugehen ist. Dafür spricht neben demselben Temperaturverlauf auch die nahezu identische Verformungscharakteristik.

Messrichtung:

standardisiert (waagrecht) vs. entgegen der Richtung der Gravitation (geneigt)

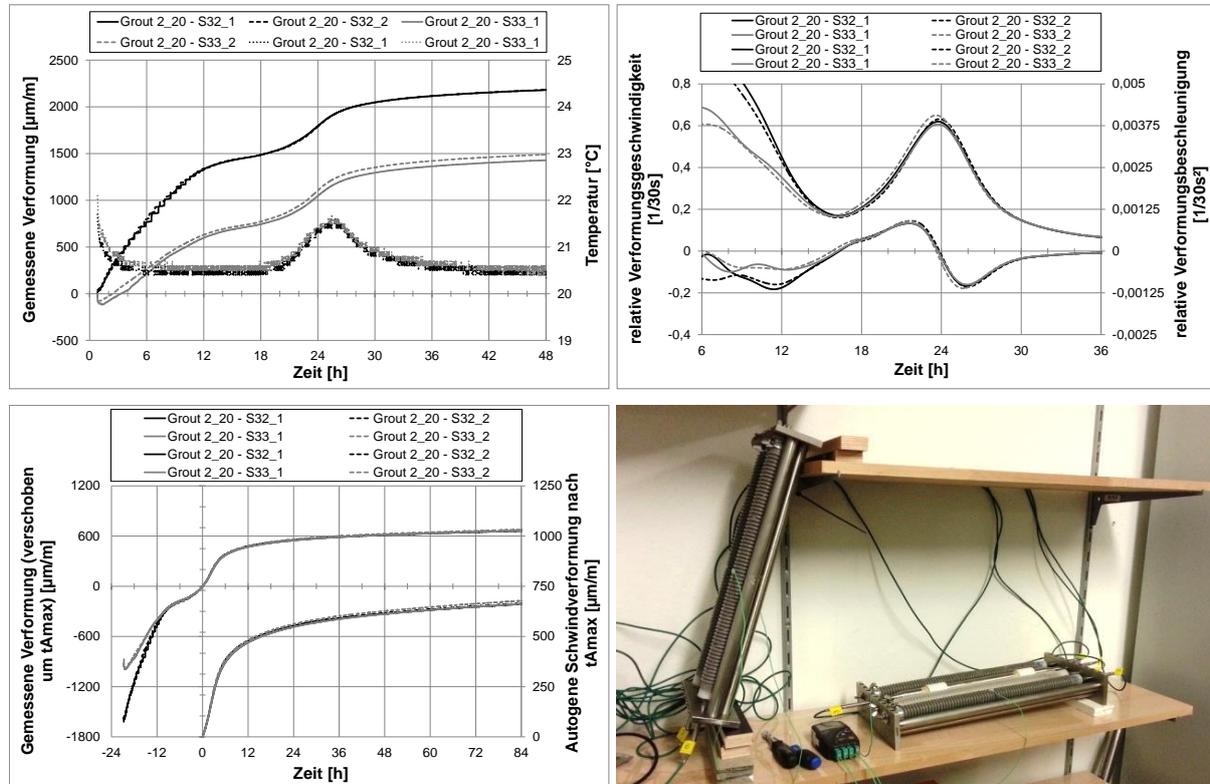


Abbildung 4-15: Grout 1 - Vergleich zwischen horizontaler und geneigter Lagerung der Schwindschläuche mit Verformungsmessung entgegen der Gravitation

Bei der zweiten Variante wurde die geneigte Lagerung des Prüfaufbaus beibehalten und die Messwertaufnahme vom oberen zum unteren Ende des Prüfaufbaus verlegt. Dazu muss der Schwindschlauch am oberen Ende des Prüfaufbaus befestigt werden, wodurch eine hängende Lagerung des Probekörpers gewährleistet ist. Aufgrund des stumpfen Aufstellwinkels (ca. 70°) liegt der Schwindschlauch aber dennoch vollständig in der Führung des Prüfaufbaus. Entgegen der vorherigen Untersuchung wird hier im geneigt gelagerten Schwindschlauch eine niedrigere Verformung der Probekörper zu Beginn der Untersuchung als im standardisiert gelagertem erwartet. Der Unterschied ist, dass das Eigengewicht entgegen der Richtung der Schwindrichtung wirkt.

Die Ergebnisse und die Auswertung der vergleichenden Untersuchung ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Die standardisiert gelagerten Schläuche zeigen eine größere Anfangsverformung und erreichen nach 18 h einen um 750 µm/m höheren Verformungswert als die geneigt gelagerten Schwindschläuche. Diese dehnen sich auf-

grund des Eigengewichtes direkt nach dem Einbau bis zu einem Wert von ca. $125 \mu\text{m}/\text{m}$ aus. Dadurch dass keine Luft von außen in den Schwindschlauch eindringen kann und die Steifigkeit in radialer Richtung ausreichend groß ist, ist die Ausdehnung des Schwindschlaches bereits nach einer Stunde wieder abgeschlossen. Trotz des noch plastischen Zustands von Grout 1 folgt im Anschluss eine Verkürzung des Schwindschlaches. Aufgrund der startenden chemischen Schwindprozesse entsteht infolge der Volumenverringerung des Materials im Schwindschlauch ein Unterdruck, der ein Zusammenziehen, also eine Verkürzung des Schwindschlaches bewirkt. Dieser Vorgang kommt zum Erliegen, wenn die Steifigkeit des Gefüges größer ist, als der Unterdruck aus dem chemischen Schwinden. Die gemessenen Schwindverformungen sind im Vergleich zu den horizontal gelagerten Schwindschläuchen geringer, da die anfängliche Ausdehnung der Schläuche ausgeglichen werden muss und das Eigengewicht der Probe dem Unterdruck aus dem chemischen Schwinden entgegen wirkt. Die anfängliche Differenz ist nach ca. 9,0 h nahezu gleich null, da die beiden Verformungsverläufe ab dann nahezu identisch sind. Bei der Messung in Richtung der Gravitation hingegen kann erst nach ca. 18,0 h eine Angleichung mit dem horizontal gemessenen Verformungsverlauf beobachtet werden.

Trotz der anfänglichen Unterschiede in den gemessenen Verformungen ergeben sich wiederum nahezu identische Verläufe in der Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung. Das Maximum der Verformungsbeschleunigung wird nach ca. 21,7 h detektiert, wonach alle zuvor ermittelten Verformung aus den Erfahrungen aus Kapitel 4.2 zu keinerlei Zwangsspannungen im Schwindring führen. Damit wird nochmal bestätigt, dass die anfänglichen Verformungen des geneigt gelagerten Schwindschlaches lediglich auf der Ausbildung eines Unterdrucks resultieren, da das Material zu diesem Zeitpunkt nicht in der Lage ist Zugkräfte zu übertragen.

Durch Auswertung der gemessenen Verformungen nach $t_{A_{\max}}$ ergeben sich unabhängig von der Lagerungsart quasi identische spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen. Nach 84 h wird in den standardisiert gelagerten Schwindschläuchen ein Endschwindwert von $663 \mu\text{m}/\text{m}$ und in den geneigt gelagerten ein Wert von $670 \mu\text{m}/\text{m}$ gemessen. Beim Vergleich der Mittelwerte beträgt der Variationskoeffizient 1,2 %.

Für Vergussmaterialien, die den klassischen Schwindverlauf aufweisen, können die Ergebnisse trotz der geringen Probenanzahl als repräsentativ angesehen werden, da bei drei unterschiedlichen Lagerungsarten nahezu identische Ergebnisse ermittelt werden. Ob dieses auch für Vergussmaterialien mit enthaltenden quellenden Zusätzen zutrifft, wurde in dieser Arbeit nicht weiter untersucht und kann daher nicht abgeschätzt werden.

4.3.3 Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindkegelverfahren

Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Auswertungskriteriums beim Schwindkegelverfahren ist ein Schwindverlauf, der mit dem aus dem Schwindschlauchverfahren vergleichbar ist. Durch die proportionale Beziehung zwischen Volumen, Radius und Höhe des Kegels lassen sich die gemessenen Werte direkt in Längenänderung pro Meter umrechnen und sind so direkt vergleichbar mit den Werten aus dem Schwindschlauchverfahren. Durch die geringere Höhe des Kegels im Vergleich zur Länge des Schlauchs (ca. 1:4) wirken sich Messungenauigkeiten durch die Normierung beim Kegelverfahren deutlich größer aus. In Abbildung 4-16 sind sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung der mit dem Schwindkegelverfahren ermittelten Verformungen von Grout 1 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich genau wie beim Schwindschlauchverfahren bei allen drei Prüftemperaturen ein charakteristisches Geschwindigkeitsmaximum ausbildet. Trotz gleichem Algorithmus zur Glättung der aufgezeichneten Rohwerte (vgl. Kapitel 3.5), ergeben sich beim Kegelverfahren abhängig von der Temperatur ungleichmäßigere Verläufe der Verformungsgeschwindigkeit. Gerade im Bereich der maximalen Geschwindigkeit sind Abschnitte zu erkennen, in denen ein Rückgang der Geschwindigkeit zu beobachten ist (vgl. Abbildung 4-16). Diese Besonderheit folgt keiner erkennbaren Gesetzmäßigkeit und tritt sowohl im aufsteigenden als auch im absteigenden Ast der charakteristischen Geschwindigkeitskurve auf. Es wird vermutet, dass die Ursache hierfür in der proportionalen Beziehung zwischen den geometrischen Kenngrößen des Kegels liegt. So ändert sich die Höhe des Kegels nur dann, wenn zeitgleich die gleiche prozentuale Änderung der Durchmesser des Kegelquerschnitts auftritt. Obwohl beim autogenen Schwinden von einem isotropen Materialverhalten ausgegangen werden kann (vgl. Kapitel 4.3.2), scheinen die Vorgänge im Kegelverfahren zeitlich nicht exakt parallel abzulaufen, mit der Folge von erkennbaren Schwankungen in der Verformungsgeschwindigkeit. Die vermeintlichen Abweichungen werden begünstigt durch ungleichmäßige Verteilung des Bindemittels und/oder der Gesteinskörnung, unterschiedliches Wasserangebot sowie geringe Temperaturunterschiede über den Kegelquerschnitt. Weiterhin ist eine Beeinflussung des Verlaufs durch eine temporäre Anhaftung des, in einer Teflonfolie befindlichen, Probekörpers an dem, aus Aluminium bestehendem, Prüfaufbau. Dieses würde allerdings eher zu sprunghaften Änderungen der Verformungsgeschwindigkeit führen und nicht wie hier teilweise festgestellt, über Zeiträume von bis zu 60 min.

Der mit dem Schwindschlauchverfahren ermittelte Geschwindigkeitsverlauf verläuft ab dem Erreichen einer gewissen Steifigkeit deutlich gleichmäßiger. Bedingt durch das hohe Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis sowie der höheren Steifigkeit des Well-

rohrs in radialer als in axialer Richtung und der geringeren Reibungsverluste zwischen Probekörper und Prüfaufbau, ergibt sich ein regelmäßiger Verformungsverlauf.

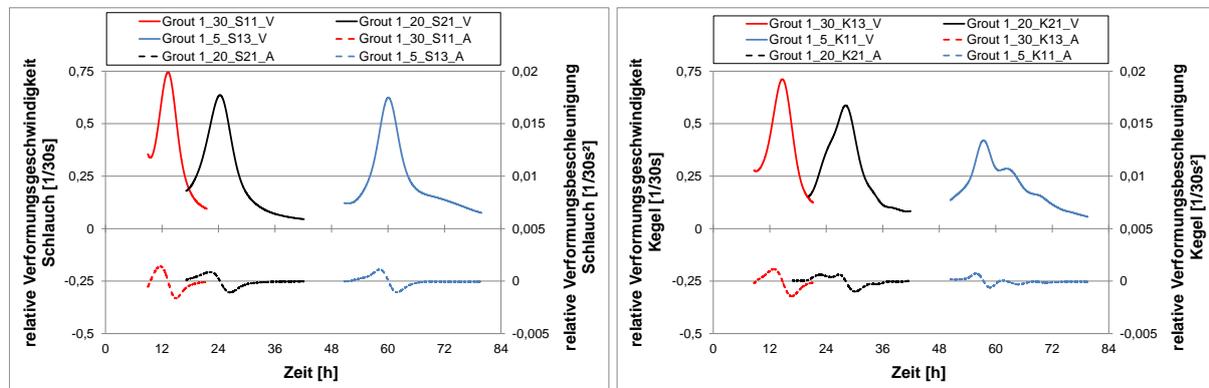


Abbildung 4-16: Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung aus dem Schwindschlauchverfahren (links) und dem Schwindkegelverfahren (rechts) von Grout 1 bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Die schwankenden Geschwindigkeitsverläufe aus dem Schwindkegelverfahren haben ebenfalls größere Schwankungen im Beschleunigungsverlauf zur Folge. Dabei führt ein Sprung in dem Geschwindigkeitsverlauf immer zu einer Umkehr der Beschleunigung und damit zu einem Nulldurchgang, wodurch die Bestimmung des Maximums der Verformungsbeschleunigung erschwert wird. Da sich aber auch im Schwindkegelverfahren immer ein eindeutiges Geschwindigkeitsmaximum ergibt, kann so der relevante Bereich eingegrenzt und t_{Amax} zielsicher ermittelt werden.

Zur Detektion des versuchstechnischen Einflusses wurden vergleichende Untersuchungen an einem Schwindkegel und zwei standardisiert gelagerten Schwindschläuchen durchgeführt. Das Material zum Herstellen der drei Probekörper stammte aus einer Mischercharge und die Verformungsmessungen wurden jeweils direkt nach dem Einbau gestartet. Abbildung 4-17 zeigt links die gemessenen Verformungen von Grout 1 bei einer Prüftemperatur von 20 °C. Qualitativ lässt sich bei den unterschiedlichen Prüfverfahren der charakteristische Schwindverlauf feststellen, der lediglich in der Höhe der Verformungen differiert. Innerhalb der ersten 12 Stunden nach Mischbeginn tritt ein Großteil der Abweichungen auf, wobei im Schwindkegel von Beginn an ca. 1,5-fach höhere Werte gemessen werden, als im Schwindschlauch.

Die Verformungsmessung im Schwindkegel wird etwa 21 min nach der Wasserzugabe gestartet, wohingegen die Messung der Schwindschläuche aufgrund des zeitintensiveren Einbaus erst ca. 54 min später startet. In diesem Zeitraum werden im Schwindkegel bereits Verformungen von 853 $\mu\text{m}/\text{m}$ gemessen. Mit dem Nullen der Verformungen aus dem Schwindkegelverfahren ab dem Start der Verformungsmes-

sung im Schwindschlauchverfahren werden in beiden Prüfverfahren Verformungen in vergleichbarer Größenordnung gemessen (vgl. Abbildung 4-17; rechts).

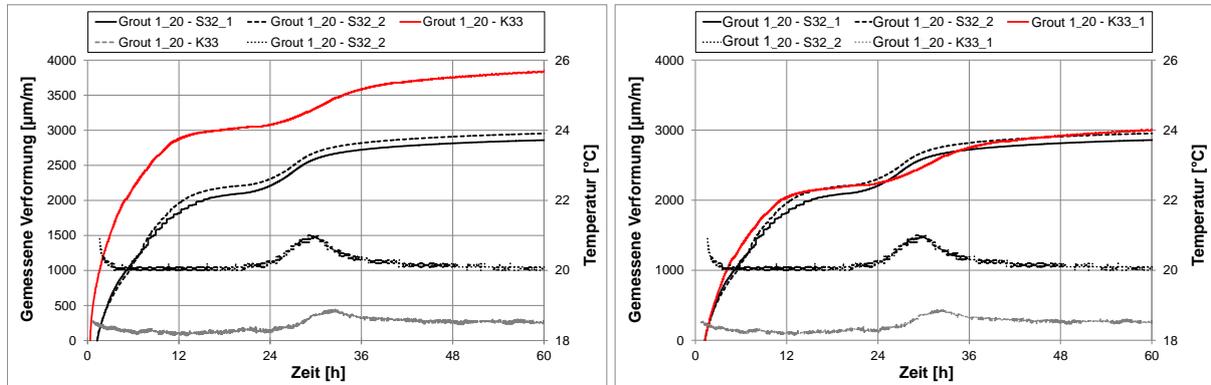


Abbildung 4-17: Grout 1 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindkegelverfahren; gemessene Verformungen

Im Schwindkegel werden vermeintlich geringere Temperaturen gemessen, was auf die unterschiedlichen Temperatur-Messgeräte im Schwindkegel und -schlauch zurückzuführen ist. Beim relativen Vergleich der Temperaturmaxima lässt sich bei beiden Probekörpern eine Temperaturerhöhung von ca. 1 °C feststellen. Anhand der Temperaturentwicklung lässt sich weiterhin erkennen, dass die Hydratationswärmeentwicklung im Schwindkegel ca. 2 h später als im Schwindschlauch ihr Maximum erreicht. Das bedeutet, dass die Hydratationsprozesse zeitlich versetzt sind und daher nicht identisch sind. Ähnliches zeichnet sich auch im Verlauf der relativen Verformungsgeschwindigkeit ab. Dabei ergibt sich in beiden Prüfverfahren ein eindeutiger Hochpunkt, wobei das Maximum im Schwindkegel erst ca. 3 h später als im Schwindschlauch auftritt (vgl. Abbildung 4-18). Zudem stellt sich im Schwindkegel eine geringere Verformungsrate ein, wohingegen der Zeitraum in dem es zu nennenswerten Änderungen der Verformungsgeschwindigkeit kommt, länger andauert. Das bedeutet, dass das Schwindverhalten im Schwindkegel von dem im Schwindschlauch abweicht und das obwohl auch bei diesem Prüfverfahren der charakteristische Verlauf sowohl in der gemessenen Verformung als auch in der Verformungsgeschwindigkeit festgestellt wird.

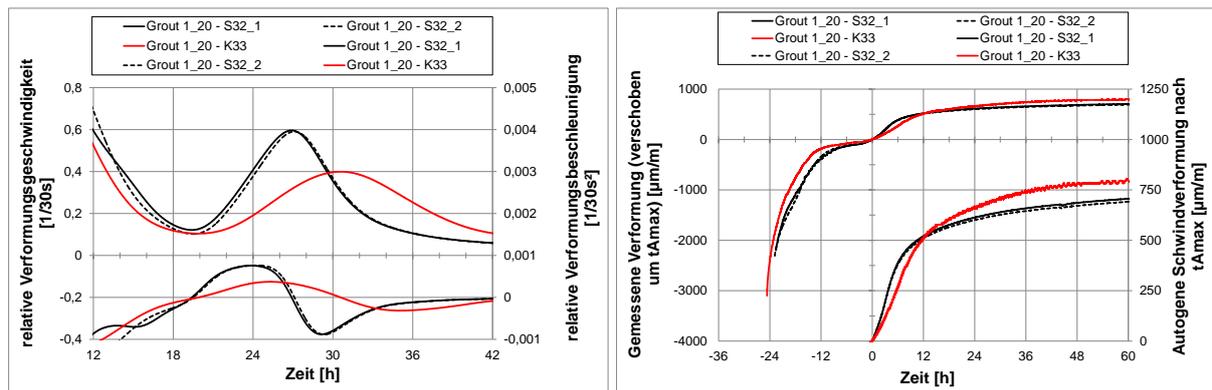


Abbildung 4-18: Grout 1 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindkegelverfahren; autogene Verformungen

Mit der Auswertung nach t_{Amax} stellt sich im Schwindkegel nach 60 h ein höherer spannungsinduzierender autogener Endschwindwert verglichen mit den Werten aus dem parallel durchgeführten Schwindschlauchverfahren ein. Da bei dieser Untersuchungsreihe jedoch sämtliche Probekörper mit demselben Material hergestellt wurden, können Unterschiede in der Zusammensetzung weitestgehend ausgeschlossen werden. Somit resultieren die Differenzen der Endschwindwerte aus einem rein versuchstechnischen Einfluss, der sich aus dem unterschiedlichen Messprinzipien ergibt.

Beim Vergleich der Verläufe der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen aus Abbildung 4-18 fällt auf, dass die autogenen Schwindverformungen ermittelt mit dem Schwindkegelverfahren zunächst kleiner sind als die mit dem Schwindschlauchverfahren. Ab ca. 12 h nach t_{Amax} kehrt sich diese Reihenfolge um und der Wert im Schwindkegel liegt über den Werten in den Schwindschläuchen. Zu diesem Zeitpunkt erhärtet das Material zunehmend, wodurch die Beeinflussung des Messergebnisses durch äußere Einflüsse (Entlüftung, Reibung, Messrichtung) gegen null geht (vgl. Ergebnisse aus Kapitel 4.2). Dennoch ergeben sich in diesem Zeitraum unterschiedliche Verformungen und das obwohl in beiden Prüfaufbauten das gleiche Material untersucht wurde.

Die Abweichungen werden auf drei grundlegende Unterschiede bei den verwendeten Prüfverfahren zurückgeführt. Dabei unterscheiden sich die Prüfaufbauten zum einen durch die Art der Probekörperlagerung und zum anderen durch die Ausrichtung der Messwertaufnehmer in Bezug auf die Gravitation. Weiterhin führt die Art der Probekörpertemperatur zu einer zeitlichen Verschiebung der Hydratationsreaktion.

Im Schwindkegelverfahren finden Umlagerungs- und Setzungsprozesse in Richtung der Gravitation statt und werden durch den in die gleiche Richtung messenden Laser

direkt aufgezeichnet. Beim Schwindkegelverfahren muss zwischen Volumen unterhalb des Reflektors und zwischen Volumen unterhalb der abdichtenden Folie unterschieden werden. Das Volumen unterhalb der Folie bleibt über die gesamte Untersuchungsdauer nahezu gleich, weswegen hier zwar von einer konservierenden Lagerung nicht jedoch von einem geschlossenen System gesprochen werden kann. Durch aufsteigende Luft (vgl. Abbildung 3-8) die sich an der Oberfläche des Schwindkegels unter der Folie sammelt, verringert sich das Volumen unterhalb des Reflektorplättchens. Dadurch erhöht sich der Anteil des schwindfähigen Materials unterhalb des Reflektors, was letztlich zu höheren spannungsinduzierenden Schwindverformungen führen kann.

Bei dem Schwindschlauchverfahren verringert sich der Anteil der Luft aufgrund des geringeren Probekörpervolumens im Vergleich zum Schwindkegelverfahren auf ca. ein Drittel. Daher ist der Einfluss der enthaltenden Luft bereits geringer, wobei diese immer im geschlossenen Schwindschlauch verbleibt und sich beim Aufsteigen in den einzelnen Rillen der Wellrohre sammelt. Dieser Vorgang führt ebenfalls zu einer Verdichtung des Gefüges jedoch zu keiner Volumenveränderung innerhalb des Schwindschlauchs und damit zu keiner Längenänderung in Messrichtung senkrecht zur wirkenden Schwerkraft.

Ein weiterer Unterschied ist die Art der Kühlung der beiden Prüfverfahren. Während beim Schwindkegelverfahren der Prüfaufbau kontinuierlich mit temperiertem Wasser durchflossen, also aktiv gekühlt wird, liegen die Schwindschläuche lediglich in einem auf 20 °C temperiertem Klimaschrank. Diese passive Kühlung funktioniert für den vorliegenden Anwendungsfall aufgrund des Verhältnisses zwischen großer Probekörperoberfläche und kleinem Probekörpervolumen der Schwindschläuche sehr gut. Dennoch wird der Verlauf der Hydratationswärmeentwicklung nicht wie beim Schwindkegel aktiv beeinflusst, was sich ebenfalls auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen auswirken kann.

Um den versuchstechnischen Einfluss beim Schwindkegel noch besser abschätzen zu können, werden in Kapitel 4.4.2 noch zusätzliche Untersuchungen mit Variation der Prüftemperatur und des untersuchten Materials durchgeführt.

4.3.4 Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren

Mit Verwendung der sogenannten Schwindrinne von der Firma Schleibinger soll abschließend eine Aussage über den versuchstechnischen Einfluss bei dem standardisierten Schwindschlauchverfahren getroffen werden. Dabei gilt es zu klären, ob der Zeitpunkt der Verankerung mit dem Zeitpunkt der ersten Spannungsentwicklung im Schwindring übereinstimmt. Zur Beurteilung des Einflusses der Temperaturentwick-

lung in der Schwindrinne, die vermutlich höher als Schwindschlauch sein wird, werden zusätzlich vergleichende Untersuchungen mit einem herkömmlichen und einem temperierten Prüfaufbau der Schwindrinne durchgeführt.

Um den Einfluss aus Materialinhomogenität möglichst gering zu halten, wurden wie bei den vergleichenden Untersuchungen unter Kapitel 4.3.2 Kapitel 4.3.3 sämtliche Probekörper mit Material aus einer Mischercharge hergestellt. Durch das gestiegene Probekörpervolumen der Schwindrinne musste ein Mischer mit höherem Fassungsvermögen, ein Eimermischer THB der Firma Beckel, verwendet werden. Der Einsatz von unterschiedlichen Mixern und deren mögliche Auswirkungen auf die autogenen Schwindverformungen werden hier nicht näher untersucht.

Die Ergebnisse der parallelen Untersuchung sind in Abbildung 4-19 dargestellt. Das Material im Schwindschlauch zeigt den in den vorangegangenen Untersuchungen festgestellten charakteristischen Verformungsverlauf. In der Schwindrinne zeigen sich erwartungsgemäß in den ersten ca. 18 h keine nennenswerten Verformungen. Erst danach wird eine Verkürzung der Probekörper beobachtet, wobei nach 30 h einen Wert von ca. 750 $\mu\text{m}/\text{m}$ gemessen wird. Weiterhin kommt es volumenbedingt sowohl in der temperierten als auch in der nicht-temperierten Schwindrinne zu einer im Vergleich zu den Schwindschläuchen deutlich erhöhten Temperaturentwicklung. Die maximale Temperatur in der nicht-temperierten Schwindrinne steigt auf ca. 26 °C, wohingegen die Wasserkühlung in der temperierten Schwindrinne eine Reduzierung der Maximaltemperatur um 2 °C bewirkt. Dennoch wird die Anforderung bzgl. der einzuhaltenden Prüftemperatur während der Messung der autogenen Schwindverformungen von [Taz00] in beiden Schwindrinnen nicht eingehalten.

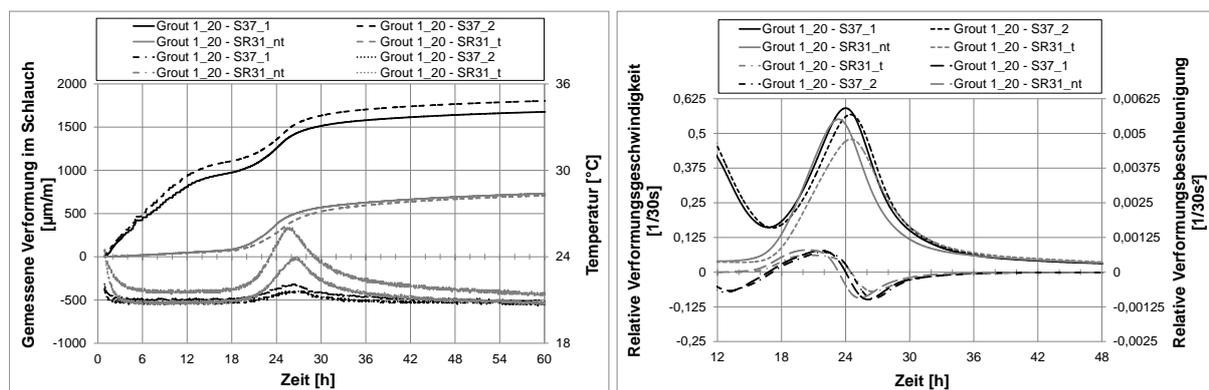


Abbildung 4-19: Grout 1 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren; gemessene Verformungen

Obwohl in den Schwindrinnen von Beginn an abweichende Schwindverläufe gemessen werden, ergeben sich bei der Auswertung der Verformungsgeschwindigkeit und -

beschleunigung die aus dem Schwindschlauchverfahren festgestellten charakteristischen Verläufe. Beim direkten Vergleich der Schwindrinnen fällt auf, dass das Maximum der Verformungsgeschwindigkeit in der nicht-temperierten nach 23,4 h und damit ca. 1,5 h früher als in der temperierten Schwindrinne erreicht wird. Mit steigender Hydratationswärmeentwicklung erhöht sich die Hydratationsgeschwindigkeit und folglich verringert sich die Dauer bis zum Erreichen des Maximalwerts der relativen Verformungsgeschwindigkeit. Dennoch liegt der Zeitpunkt des Hochpunkts der temperierten Schwindrinne im Bereich der Hochpunkte aus dem Schwindschlauchverfahren, wodurch trotz unterschiedlicher Temperaturmaxima ein vergleichbarer Schwindverlauf unterstellt werden kann.

Dabei unbeachtet bleibt die Tatsache, dass durch Überschreiten der festgelegten Temperaturgrenzen aus [Taz00], sowohl die Wärmeausdehnung des Prüfaufbaus als auch des Probekörpers selbst berücksichtigt werden müssen. Bei der Schwindrinne ergibt sich der Messfehler infolge der Temperaturdehnung aus der Differenz der Längenänderung des Prüfaufbaus und des Probekörpers. Das Ausdehnen des erstarrenden Probekörpers würde als vermeintliches Quellen aufgezeichnet und zu einer Unterschätzung der Schwindwerte führen. Die Ausdehnung des Prüfaufbaus hingegen würde dazu führen, dass sich der Abstand zwischen den beiden Enden der Schwindrinne vergrößert, was bei einer angenommenen Längenkonstanz des Probekörpers als vermeintliches Schwinden des Probekörpers gemessen werden würde.

Abhängig vom Wärmeausdehnungskoeffizienten α (WaK) ergibt sich ein vermeintliches Quellen oder Schwinden des Probekörpers, was bei der Auswertung der gemessenen Verformungen berücksichtigt werden muss. Der WaK des erstarrenden Materials ist jedoch nicht konstant und kann nur sehr aufwändig bestimmt werden. Im frischen Zustand ist der Wärmeausdehnungskoeffizient noch sehr hoch, da sich die Gesamtdehnung aus den Einzeldehnungen der einzelnen Bestandteile (Gesteinskörnung, Zement und Wasser) zusammensetzt und gerade Wasser (Raumausdehnungskoeffizient $\gamma = 0,207 \cdot 10^{-3} / \text{K}$) im Vergleich zu Festbeton einen hohen WaK besitzt. Mit fortschreitender Hydratation kommt es zu einer gegenseitigen Behinderung der Einzeldehnungen, wodurch die Wärmedehnzahl rasch abnimmt und sich dann recht zügig einem konstanten Wert nähert [Grü01]. Untersuchungen aus [Epp10] zeigen übereinstimmende Ergebnisse bei einem feinkörnigen ultrahochfesten Beton (UHPC), dessen Zusammensetzung mit der des hier untersuchten UHPCs vergleichbar ist. [Epp10] ermittelt nach etwa 18 Stunden einen nahezu konstanten Wärmeausdehnungskoeffizient von $11,5 \cdot 10^{-6} / \text{K}$, der nachfolgend für sämtliche verwendete Materialien angenommen wird. Weiterhin kann durch die sehr gute Korrelation vom Zeitpunkt t_{Amax} und dem Beginn der Spannungsentwicklung im Schwind-

ring von einem, vollkommen erstarrten und bereits erste Spannungen übertragendes, Material ausgegangen werden, was die Annahme eines konstanten $\text{W}\alpha\text{K}$ rechtfertigt.

Bauartbedingt lassen sich die Verformungen der Rinne durch die Erhöhung der Temperatur jedoch erst zu dem Zeitpunkt messen, ab dem das Material so weit erhärtet ist, dass eine Ankopplung mit der Verankerung am starr gelagerten Ende der Schwindrinne erfolgt ist und das Material erste Zugkräfte übertragen kann. Danach führt die Wärmedehnung aufgrund der Vergrößerung des Abstandes der beiden Enden der Schwindrinne zu einer vermeintlichen Schwindverformung des Probekörpers, sofern der Wärmeausdehnungskoeffizient des Materials kleiner ist als der $\text{W}\alpha\text{K}$ von der Schwindrinne selbst. Die Schwindrinne ist aus Edelstahl gefertigt, dessen $\text{W}\alpha\text{K}$ laut Hersteller $23 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ beträgt und damit höher ist als der tatsächliche $\text{W}\alpha\text{K}$ der untersuchten Materialien. Das Ausdehnen des Materials wird durch das gleichzeitige Ausdehnen der Rinne kompensiert und wird daher nicht von dem induktiven Wegaufnehmer aufgezeichnet. Das bedeutet, dass die gemessenen Verformungen die reinen Schwindverformungen immer etwas überschätzen, da die Ausdehnung des Materials immer kleiner ist als die Ausdehnung der Rinne. Besäße die Schwindrinne einen sehr geringen $\text{W}\alpha\text{K}$ (z.B. Invar), ließe sich die Wärmeausdehnung des Materials messen und müsste bei der Auswertung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen wiederum berücksichtigt werden.

Da die Temperaturmaxima bei sämtlichen untersuchten Materialien ausgenommen bei Grout 4 immer hinter dem Zeitpunkt der maximalen Verformungsbeschleunigung t_{Amax} liegen, kann die detaillierte Temperaturkompensation bei der Auswertung nach t_{Amax} vernachlässigt werden. Der komplette Rückgang des Temperaturanstiegs infolge der Hydratation würde lediglich zu einer Beeinflussung des Verlaufs der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen nicht jedoch zu einer Beeinflussung der Endschwindwerte führen.

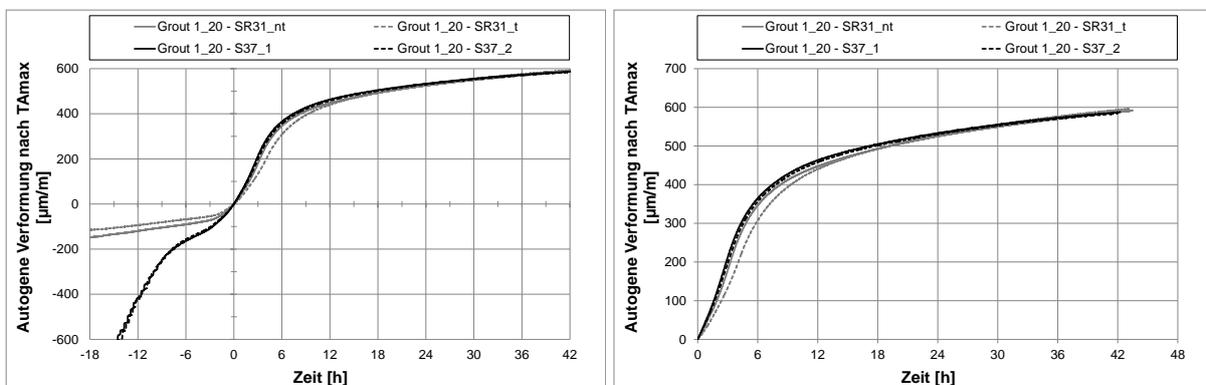


Abbildung 4-20: Grout 1 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren, autogene Verformungen

Bei Vernachlässigung der Temperaturdehnung des Materials in der Schwindrinne und Anwendung von t_{Amax} werden in beiden Prüfverfahren ein Endschwindwert von ca. 600 $\mu\text{m}/\text{m}$ nach 43 h ermittelt (vgl. Abbildung 4-20). Während die Verformungen in Schwindschlauch und -rinne vor dem Zeitpunkt t_{Amax} noch deutlich voneinander abweichen, ist der Schwindverlauf danach nahezu identisch.

Bei Grout 2 ergeben sich bei den gemessenen Verformungen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des verwendeten Prüfaufbaus (vgl. Abbildung 4-21). Wie zuvor werden mit dem Schwindrinnenverfahren zu Beginn keinen nennenswerten Verformungen gemessen, wobei hier bereits nach ca. 14 h ein Anstieg detektiert wird. Das Material in Schwindschlauch 1 (S1) zeigt zu Beginn der Messung ein Quellen wohingegen in Schwindschlauch 2 (S2), ähnlich wie in beiden Schwindrinnen, keine Verformung der einzelnen Probekörper gemessen wird. Bereits ca. 30 min nach Messbeginn wird in beiden Schwindschläuchen ausschließlich noch eine Verkürzung der Probekörper detektiert. Die festgestellte anfängliche Ausdehnung des Probekörpers S1 lässt sich ebenfalls bei jeder unter Kapitel 4.4.2 durchgeführten Messung mit dem Schwindkegelverfahren beobachten. Im Gegensatz zum Schwindschlauchverfahren kann sich das Material im Schwindkegel zwangsfrei ausdehnen. Im Schwindschlauch hingegen stehen dem Quellen von Grout 2 zum einen die Steifigkeit des Kunststoffschlauches und zum anderen die Reibung zwischen Prüfaufbau und aufliegendem Schwindschlauch gegenüber. Weiterhin kann es während des Verfüllvorgangs zu einer Streckung des Kunststoffschlauches kommen, was aufgrund des geschlossenen Systems in Kombination mit der Elastizität des geriffelten Kunststoffschlauches zu einem Unterdruck führen kann. Der Unterdruck wirkt dem Quellen des Materials entgegen, wodurch zu Beginn mit dem Schwindschlauchverfahren keinerlei Quellvorgänge zu beobachten sind. Wird das Material hingegen spannungsfrei verfüllt, kann es sich entgegen der Steifigkeit des Schlauches auch im noch frischen Zustand verformen. Durch den äußerlich nicht messbaren und damit quasi unterdrückten Quellvorgang werden bei Schwindschlauch 2 deutlich höhere Verformungen gemessen.

In der Schwindrinne ist das Material zwar nahezu konservierend gelagert, dennoch kann es sich nach oben hin frei ausdehnen, ohne dass diese Verformung vom induktiven Wegaufnehmer, der in axialer Richtung des Probekörpers misst, aufgezeichnet wird. Das bedeutet, dass das Quellen des Materials eine Bewegung in Richtung der freien Oberfläche bewirkt, wodurch bei Grout 2 in der Schwindrinne zu Beginn kein Quellen des Materials gemessen wird und erst nach ca. 15 h ein Anstieg beobachtet wird.

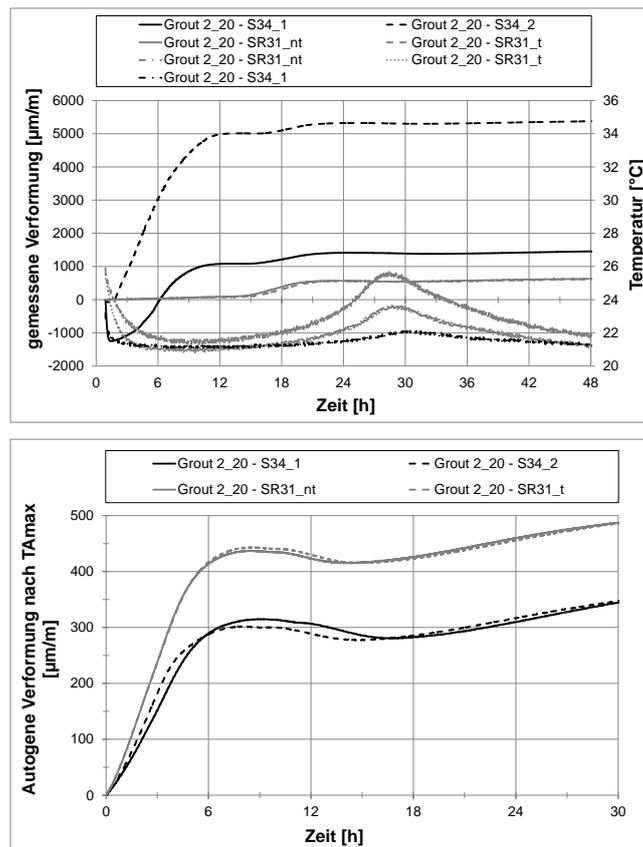


Abbildung 4-21: Grout 2 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren

Während bei Grout 1 die relative Verformungsgeschwindigkeit bei beiden Prüfverfahren noch vergleichbar waren, liegt der Hochpunkt bei Grout 2 im Schwindrinnenverfahren höher als im Schwindschlauchverfahren (vgl. A-2). Da der Hochpunkt der Geschwindigkeit zeitlich hinter dem Startpunkt der autogenen Schwindverformungen liegt, wird ein höherer Endschwindwert in der Schwindrinne erwartet. Nach 30 Stunden ergibt sich in den Schwindschläuchen ein Wert von ca. 350 µm/m und in den Schwindrinnen ein Wert von ca. 480 µm/m detektiert.

Festzuhalten dabei ist, dass beide Schwindverläufe nach t_{Amax} vergleichbar sind und augenscheinlich nur in der Höhe der Verformung variieren und das obwohl das Material in den Schwindrinnen eine deutlich höhere Hydratationswärme entwickelt als in den Schwindschläuchen. Weiterhin sind die autogenen Schwindverformungen jeweils nahezu identisch bei der temperierten und nicht-temperierten Schwindrinne und bei dem anfänglich quellenden und nicht-quellenden Schwindschlauch.

Im weiteren Verlauf der autogenen Schwindverformungen nach t_{Amax} können weitere Quellvorgänge beobachtet werden. Durch die bereits erreichte Festigkeit des Materials sind Zeitpunkt und Charakteristik des Quellens in beiden Prüfverfahren nahezu identisch. Daraus kann geschlossen werden, dass der Einfluss des Prüfverfahrens

und der daraus resultierenden Behinderung der Verformungen durch z.B. Reibung mit steigender Festigkeit des Materials abnehmen bzw. komplett vernachlässigt werden können.

Die Untersuchungsreihe mit dem Grout 3 konnte nicht durchgeführt werden, da zum Zeitpunkt der Untersuchungen lediglich ein Material mit erheblichen chargenbedingten Eigenschaftsänderungen zur Verfügung stand.

Das Material von Grout 4 zeigt wiederum eine zu Grout 1 und Grout 2 abweichende Verformungscharakteristik. Sowohl in den Schwindschläuchen als auch in den Schwindrinnen wird ab ca. 15 h nach dem Einbau der Probekörper und noch vor dem Erreichen von t_{Amax} ein Quellen des Materials beobachtet (vgl. Abbildung 4-22). Zu diesem Zeitpunkt kann bereits von einem fortgeschrittenen Erstarren des Materials ausgegangen werden. Somit dehnt sich das Material nicht wie bei Grout 2 nach oben in der Schwindrinne aus, sondern kann sich, ähnlich wie im festen Zustand, in alle drei Richtungen frei verformen. Daher ist der quellende Effekt in beiden Prüfaufbauten messbar, wodurch wiederum ein vergleichbarer Verlauf der autogenen Schwindverformungen erwartet wird. Der nahezu identische Verlauf von relativer Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung bekräftigt diese Annahme.

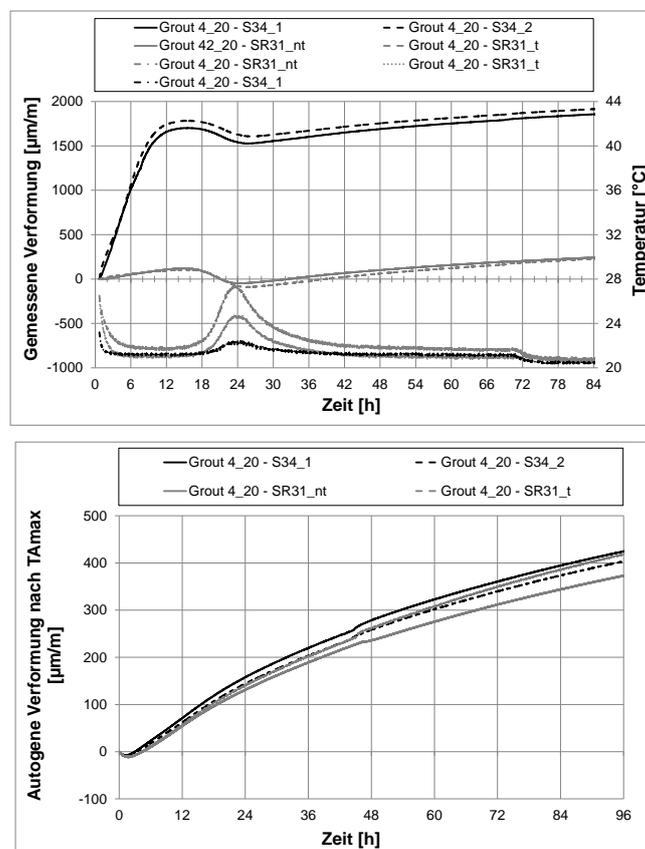


Abbildung 4-22: Grout 4 – Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren

Weiterhin fällt auf, dass die relative Verformungsgeschwindigkeit sich nach dem Hochpunkt bis zum Ende der Untersuchungsdauer nicht dem Wert null annähert und somit auch die autogenen Schwindverformungen weiter ansteigen (vgl. A-2). Nach 96 h ist in beiden Prüfverfahren ein Wert von ca. 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ erreicht und noch keine Annäherung an einen horizontalen Endschwindwert zu erkennen.

Bei UHPC 5 werden in beiden Schwindrinnen nahezu exakt die gleichen Verformungen gemessen. Ähnlich wie bei den vorherigen Untersuchungen liegen die gemessenen Verformungen trotz unterschiedlicher Hydratationswärmeentwicklung nahezu aufeinander, wobei erst nach ca. 14 h ein anfängliches Verkürzen der Probekörper beobachtet wird. Die Höhe der relativen Verformungsgeschwindigkeit ist in beiden Prüfaufbauten annähernd gleich (vgl. A-2). Dennoch ergeben sich nach 60 h Unterschiede im spannungsinduzierenden autogenen Endschwindmaß. Während das Material im Schwindschlauch um ca. 570 $\mu\text{m}/\text{m}$ schwindet wird in der Schwindrinne lediglich ein Wert von ca. 505 $\mu\text{m}/\text{m}$ erreicht. Diese Abweichung erscheint recht hoch, zumal durch die Verwendung von Material aus einer Mischercharge für sämtliche Probekörper beider Prüfaufbauten eine Materialungleichheit ausgeschlossen werden kann. Das Material UHPC 5 ist im Vergleich zu den hier untersuchten Groutmaterialien das viskoseste Material, welches zwar fließfähig dabei jedoch sehr zäh ist. Es lässt sich nur mit Erhöhung der Rüttelzeit in die Schwindschläuche einbringen, kann jedoch aufgrund der größeren Geometrie der Schwindrinne ohne Rüttelwirkung eingebaut werden. Daher ist der Luftgehalt vom Material in der Schwindrinne höher als im Schwindschlauch mit der Folge, dass der Anteil des schwindfähigen Materials pro cm Probekörperlänge geringer ist. Daraus resultiert in der Schwindrinne ein geringeres autogenes Schwindmaß vom UHPC 5.

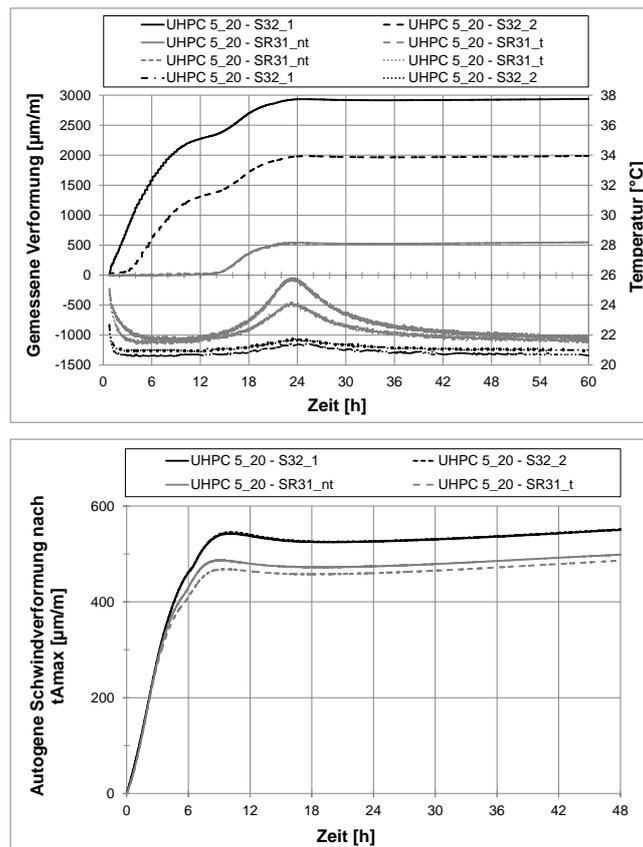


Abbildung 4-23: UHPC 5 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren

Vergleichbares beobachtet [Epp10b] der ebenfalls einen viskosen UHPC im Schwindschlauch mit zwei verschiedenen Einfülltechniken untersuchte. Dabei wurde ein Schwindschlauch herkömmlich durch leichte Rütteleinwirkung und der andere zusätzlich unter Zuhilfenahme einer Kartuschenpresse gefüllt. Das „Pressen“ des Materials hatte im Vergleich zu dem herkömmlich verfüllten Schwindschlauch einen höheren Endschwindwert zur Folge. Die Auswirkungen des Verfüllvorgangs auf die autogenen Schwindverformungen werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Bei den anderen hier untersuchten Materialien ist der Unterschied zwischen gerütteltem und nicht gerütteltem Einbringen gering, da diese eine hohe Fließfähigkeit besitzen und unter Gewährleistung eines ausreichenden Fließwegs nahezu selbstverdichtend sind.

4.4 Spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen unter variierenden quasi-isothermen Prüfbedingungen

4.4.1 Allgemeines

Durch die systematische Untersuchung der einzelnen Prüfverfahren konnten im vorherigen Kapitel grundlegende versuchstechnische Einflüsse identifiziert werden. Wie sich jedoch die Änderung der Prüftemperatur auf die Höhe der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformung auswirkt, ist bislang nicht bekannt. Weiterhin ist unklar, ob der Temperatureinfluss zu weiteren temperaturbedingten versuchstechnischen Einflüssen führt. Dazu werden die Verformungen aus dem Schwindkegel und dem Schwindschlauch vergleichend gegenübergestellt, wobei die untersuchte Temperaturspanne von 5 °C, 20 °C und 30 °C einen realen Temperaturbereich abdeckt. Ob sich aus der Verwendung unterschiedlicher Prüfverfahren und variierenden Prüftemperaturen weitere Effekte ergeben, die bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen, soll nachfolgend untersucht werden.

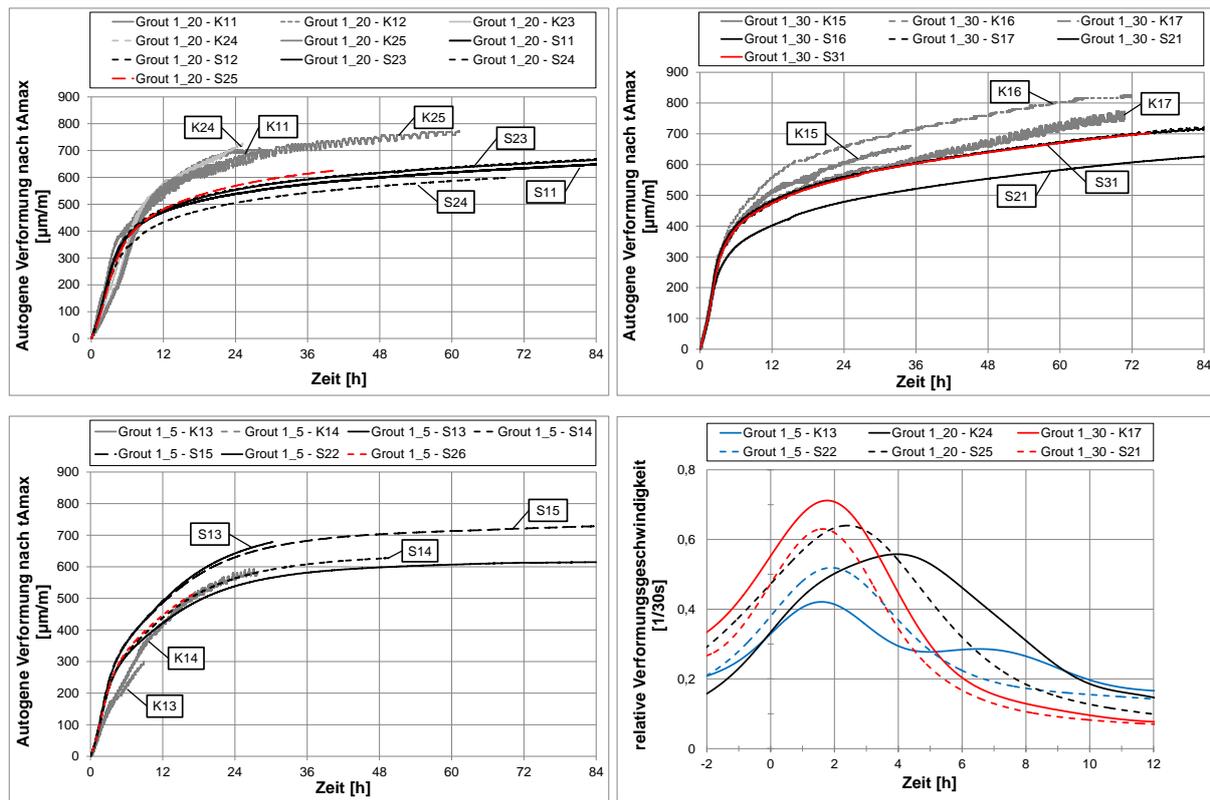
Darüber hinaus soll exemplarisch ermittelt werden, wie sich das Herstellen der Probekörper bei der jeweiligen Prüftemperatur auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen auswirkt. Dabei erfolgt die Herstellung der Schwindschläuche nicht, wie in allen anderen Untersuchungen dieser Arbeit, in einem Klimaraum bei 20 °C und 65 % - rel. Luftfeuchte, sondern wird abhängig von der Prüftemperatur in einem entsprechenden vortemperierten Raum durchgeführt. Durch die zusätzliche Vorlagerung sämtlicher für die Untersuchung benötigten Materialien ergeben sich geringere Temperaturdifferenzen zwischen dem angemischtem Material und der entsprechenden Prüftemperatur, die sich so auch unter realen Bedingungen ergeben würden.

Weitere Erkenntnisse zum Temperatureinfluss werden bei der Auswertung der Spannungsentwicklungen im Schwindring erwartet. Durch die Reduzierung des Behinderungsgrads des Schwindrings soll ein durchgehender Riss im Mörtelring verhindert und so eine komplette Aufzeichnung der sich entwickelnden Zwangsspannung ermöglicht werden. Wie sich die unterschiedlichen Prüftemperaturen auf die entstehenden Spannungen auswirken, ist bislang noch nicht bekannt. Da die *time zero* mit dem Schwindringverfahren ermittelt wird und somit direkt auf die Spannungsentwicklungen bei unterschiedlichen Prüftemperaturen angewendet werden kann, ist von einer hohen Genauigkeit beim Vergleich der einzelnen Verläufe auszugehen. Somit sollten sich hier festgestellte Unterschiede in den Spannungsentwicklungen grundlegend auch bei den spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen ergeben.

4.4.2 Identifizierung von temperaturbedingten versuchstechnischen Einflüssen

Die nachfolgenden Untersuchungen dienen zur Detektion des Einflusses unterschiedlicher Prüftemperaturen auf den Verlauf und die Höhe der resultierenden spannungsinduzierenden Schwindverformungen. Für die Parameterstudien werden die Materialien und die Prüftemperaturen 5 °C, 20 °C sowie 30 °C aus Kapitel 4.2 verwendet. Zur Absicherung der Ergebnisse bzw. zur Detektion von temperaturbedingten prüftechnischen Einflüssen werden vergleichende Untersuchungen mit dem Schwindschlauch- und Schwindkegelverfahren durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Messverfahren und der direkten Temperierung der Probe im Kegelverfahren kann es zu abweichenden Schwindverformungen kommen, die auf diese Weise detektiert und deren Ursache analysiert werden können. Da die Anwendbarkeit der Auswertemethode t_{Amax} auch beim Schwindkegelverfahren in Kapitel 4.3.3 bestätigt wurde, werden im Folgenden die jeweiligen spannungsinduzierenden Verformungen nach dem Zeitpunkt t_{Amax} vergleichend gegenübergestellt. Es werden immer mindestens zwei Ergebnisse aus einer Untersuchungsreihe dargestellt, wobei sich die Verläufe des Schwindschlauchverfahrens nun aus dem Mittel der beiden parallel gemessenen Schläuche zusammensetzen.

In Abbildung 4-24 sind die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen nach t_{Amax} ausgewertet und über die Zeit aufgetragen. Charakteristisch für die Verläufe bei 20 °C und 30 °C sind ein nahezu linearer Anstieg zu Beginn und ein nachfolgendes Abflachen der Kurve, wobei keine Annäherung an einen Grenzwert nach 84 Stunden zu beobachten ist. Die Steigung des linearen Anstiegs ist bei den Verläufen bei einer Prüftemperatur von 30 °C am größten und bei 5 °C am kleinsten. Diese Tendenzen lassen sich ebenfalls bei den nach t_{Amax} verschobenen Verformungsgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 4-24; unten rechts) erkennen. Die Kurve der Verformungsgeschwindigkeit bei 30 °C erreicht mit ca. 0,7 $\mu\text{m}/\text{m}/30\text{ s}$ den größten Wert. Die mit sinkender Prüftemperatur gedrungeneren Geschwindigkeitsverläufe erklären die unterschiedlich steilen Anstiege der spannungsinduzierenden Schwindverformungen.



	Schlauch		Kegel	
5 S1-S5; K1-K2	24 h: 611,8 (S1x)	24 h: 538,8 (S22)	24 h: 559,7 (K14)	24 h: -
20 S1-S5; K1-K5	24 h: 546,8 (S1x)	24 h: 542,3 (S2x)	24 h: 667,4 (K1x)	24 h: 691,8 (K2x)
30 S1-S4; K1-K3	24 h: 558,4 (S1x)	24 h: 479,0 (S2x)	24 h: 610,7 (K1x)	24 h: -

Abbildung 4-24: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von Grout 1 bei unterschiedlichen Temperaturen

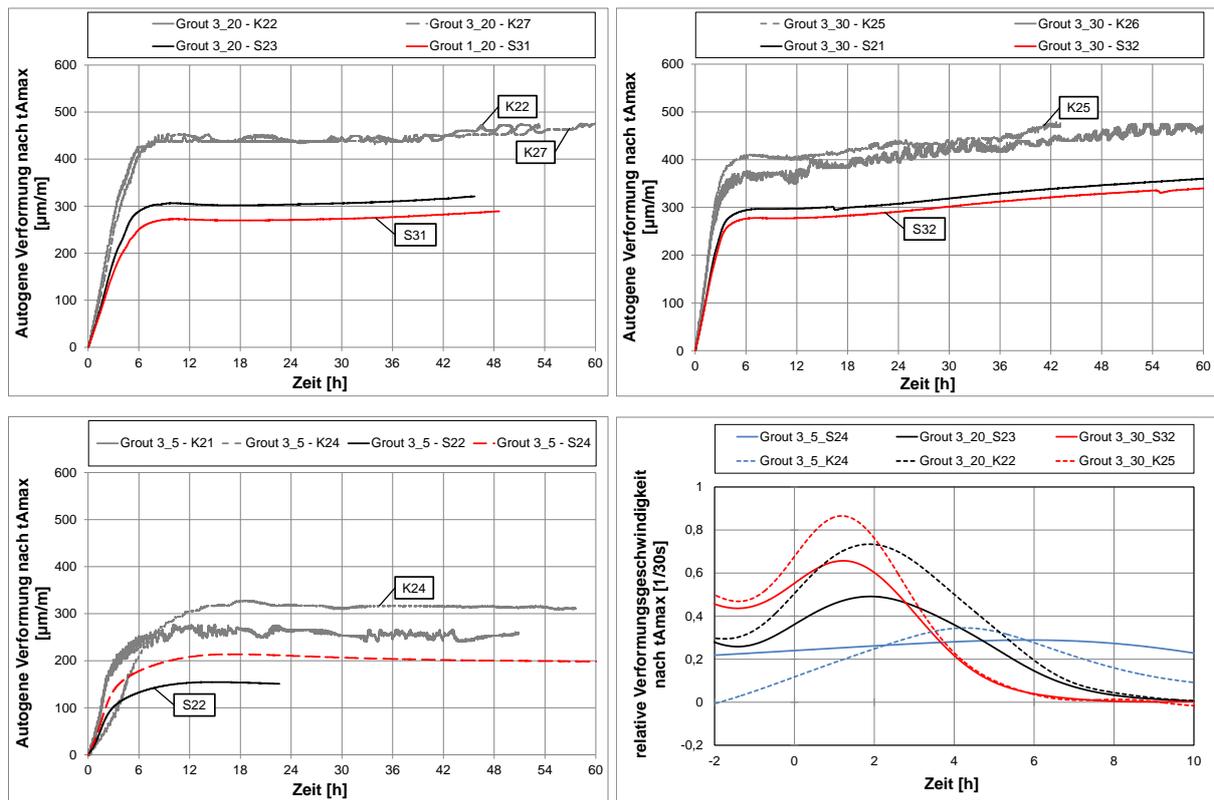
Um die Schwindwerte vergleichen zu können, werden Zeitpunkte nach t_{Amax} festgelegt an denen die Werte für die spannungsinduzierenden Schwindverformungen ermittelt werden. Aufgrund unterschiedlicher Dauern der Untersuchungen werden die Zeitpunkte so gewählt, dass möglichst viele einzelne Messungen berücksichtigt werden können. Durch die Vielzahl der Messungen war es nicht möglich immer die gleiche Charge der Ausgangsstoffe zu verwenden. Daher gibt die erste Zahl nach dem „S“ für Schwindschlauchverfahren oder dem „K“ für Schwindkegelverfahren die verwendete Charge und die zweite Zahl jeweils die zeitliche Abfolge der durchgeführten Untersuchungen mit gleicher Charge. Schon leichte Änderungen in der Zusammensetzung können durch veränderte Zement-, Microsilica- und/oder Fließmittelgehalte sowie unterschiedlichem Wasseranspruch der Gesteinskörnung und/oder der mehlkornfeinen Stoffe zu Änderungen des Endschwindmaßes führen. Durch die vorge-

nommene Unterteilung wird versucht, eventuelle Materialinhomogenitäten bei der weiteren Auswertung direkt zu berücksichtigen.

Es ergeben sich sowohl im Schwindschlauch- als auch im Schwindkegelverfahren Abweichungen in den autogenen Endschwindwerte bei der Verwendung von unterschiedlichen Chargen von Grout 1. Daraus lässt sich bereits ableiten, dass es einen Einfluss der Chargen auf die spannungsinduzierten Schwindverformungen gibt. Unabhängig davon kann bei den Prüftemperaturen 20 °C und 30 °C im Schwindkegelverfahren ein größerer autogener Endschwindwert als im Schwindschlauch festgestellt werden. Dieses trifft nicht auf die Endschwindwerte bei 5 °C zu, da hier im Schwindschlauch ein um ca. 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ größerer Wert als im Schwindkegel ermittelt wird. Der Wert aus dem Schwindkegelverfahren resultiert lediglich aus einer Messung, weswegen es sich hierbei auch um einen Ausreißer handeln kann. Eine einheitliche Reihenfolge der Endschwindwerte in Abhängigkeit der Prüftemperatur lässt sich aus diesen Ergebnissen nicht ableiten.

Bei Grout 3 werden mit dem Schwindkegelverfahren nach 30 h bei sämtlichen Prüftemperaturen größere Endschwindwerte ermittelt als mit Schwindschlauchverfahren (vgl. Abbildung 4-25). Es handelt sich dabei ausschließlich um Werte aus der 2er-Serie wodurch ein Chargeneinfluss ausgeschlossen werden kann. Generell ergeben sich bei den Prüftemperaturen von 20 °C und 30 °C innerhalb des verwendeten Prüfverfahrens nahezu identische Endschwindwerte. Die Werte bei 5 °C liegen jeweils darunter, wobei die fehlerhafte Bestimmung der *time zero* nicht ausgeschlossen werden kann. Der recht flache Verlauf der relativen Verformungsgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 4-25) führt dazu, dass die Bestimmung von $t_{A_{\max}}$ bei 5 °C nicht mehr eindeutig möglich ist, was sich direkt auf die resultierenden autogenen Schwindverformungen auswirkt.

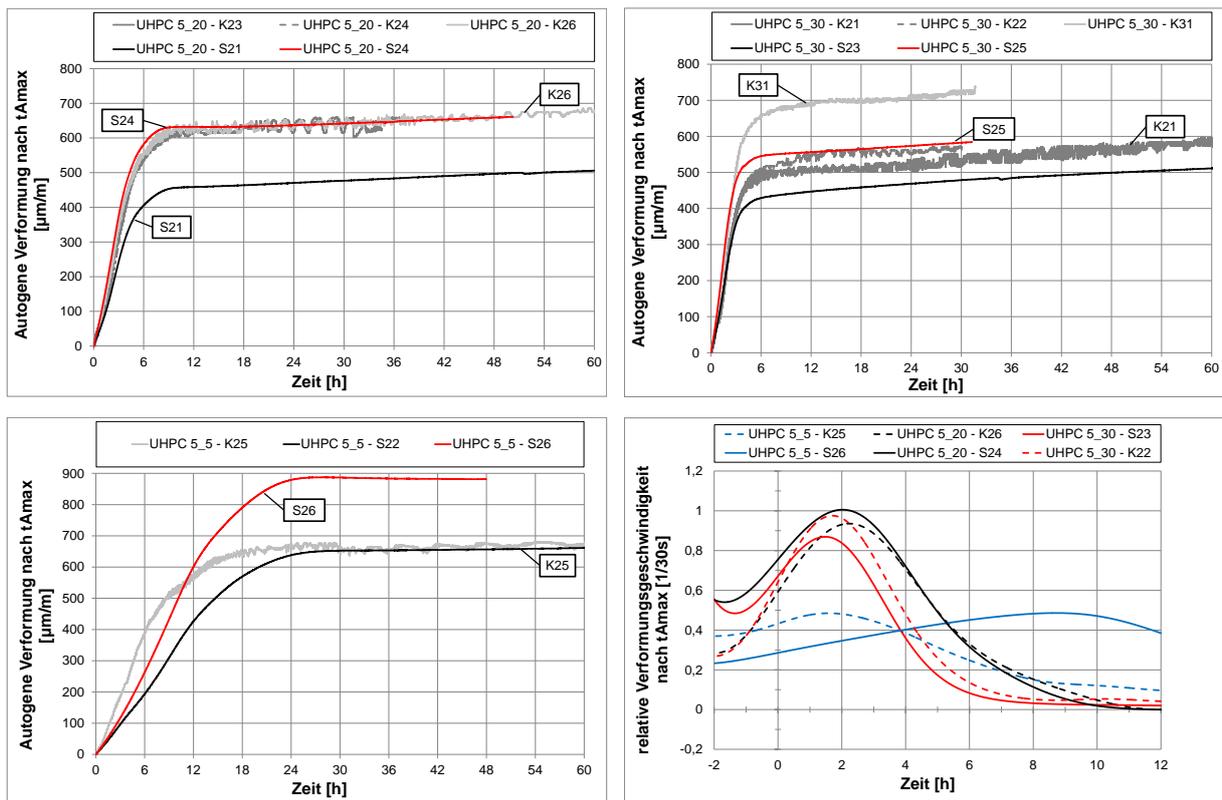
Darstellung und Auswertung der Untersuchungsergebnisse



	Schlauch		Kegel	
5 S1-S2; K1-K2	30 h: 206,9 (S24)	30 h: -	30 h: 283,1 (K2x)	30 h: -
20 S1-S2; K1-K2	30 h: 305,9 (S23)	30 h: 272,9 (S31)	30 h: 440,6 (K2x)	30 h: -
30 S1-S2; K1-K2	30 h: 310,3 (S2x)	30 h: -	30 h: 430,9 (K2x)	30 h: -

Abbildung 4-25: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von Grout 3 bei unterschiedlichen Temperaturen

Die vorgestellten Ergebnisse von Grout 3 lassen ebenfalls keine eindeutige Aussage über die Temperaturabhängigkeit der autogenen Endschwindwerte zu.



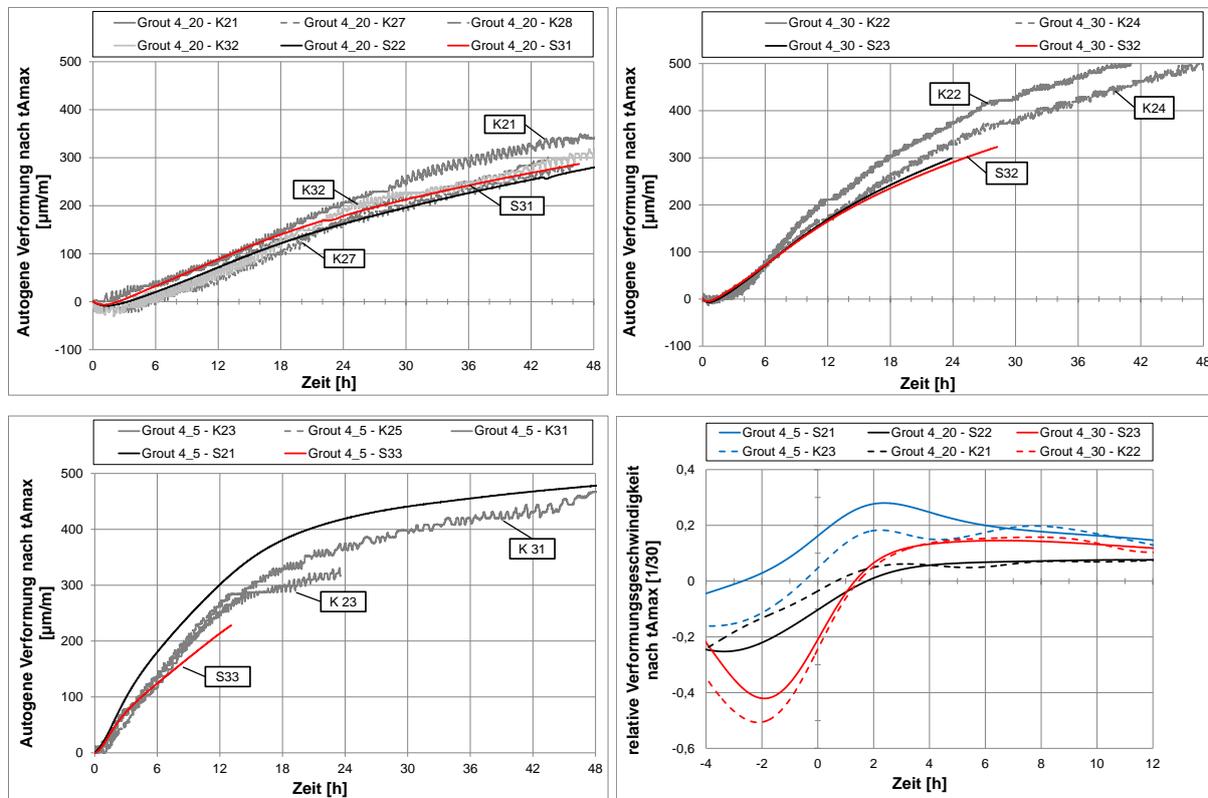
	Schlauch		Kegel	
5 S1-S2; K1-K2	30 h: 769,6 (S2x)	30 h: -	30 h: 655,2 (K25)	30 h: -
20 S1-S2; K1-K3	30 h: 559,3 (S2x)	30 h: -	30 h: 631,4 (K2x)	30 h: -
30 S1-S2; K1-K3	30 h: 530,4 (S2x)	30 h: -	30 h: 540,8 (K2x)	30 h: 724,7 (K31)

Abbildung 4-26: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von UHPC 5 bei unterschiedlichen Temperaturen

Bei dem Material UHPC 5 werden bei den Endschwindwerten, die mit dem Schwind-schlauchverfahren ermittelt wurden, die größten Abstände zwischen den einzelnen Serien (2+3) festgestellt (Abbildung 4-26). Dabei wird in der Serie 3 bei einer Prüf-temperatur von 30 °C ein um ca. 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ höherer Wert ermittelt. Obwohl es sich bei dem Material um das einzige handelt, bei dem sämtliche Komponenten einzeln abgewogen wurden, fällt der Unterschied so groß aus. Bei der Prüftemperatur von 5 °C ergibt sich, wie bei den Materialien zuvor, die geringste Steigung der Verformung zu Beginn und ein recht flacher Hochpunkt im Verlauf der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_{Amax} .

Die Reihenfolge der Endschwindwerte ist unabhängig vom verwendeten Prüfverfahren gleich. So ergeben sich bei einer Prüftemperatur von 5 °C die größten und bei

einer Prüftemperatur von 30 °C die kleinsten Werte. Daher führt eine Steigerung der Temperatur zu einer Verringerung der Endschwindwerte.



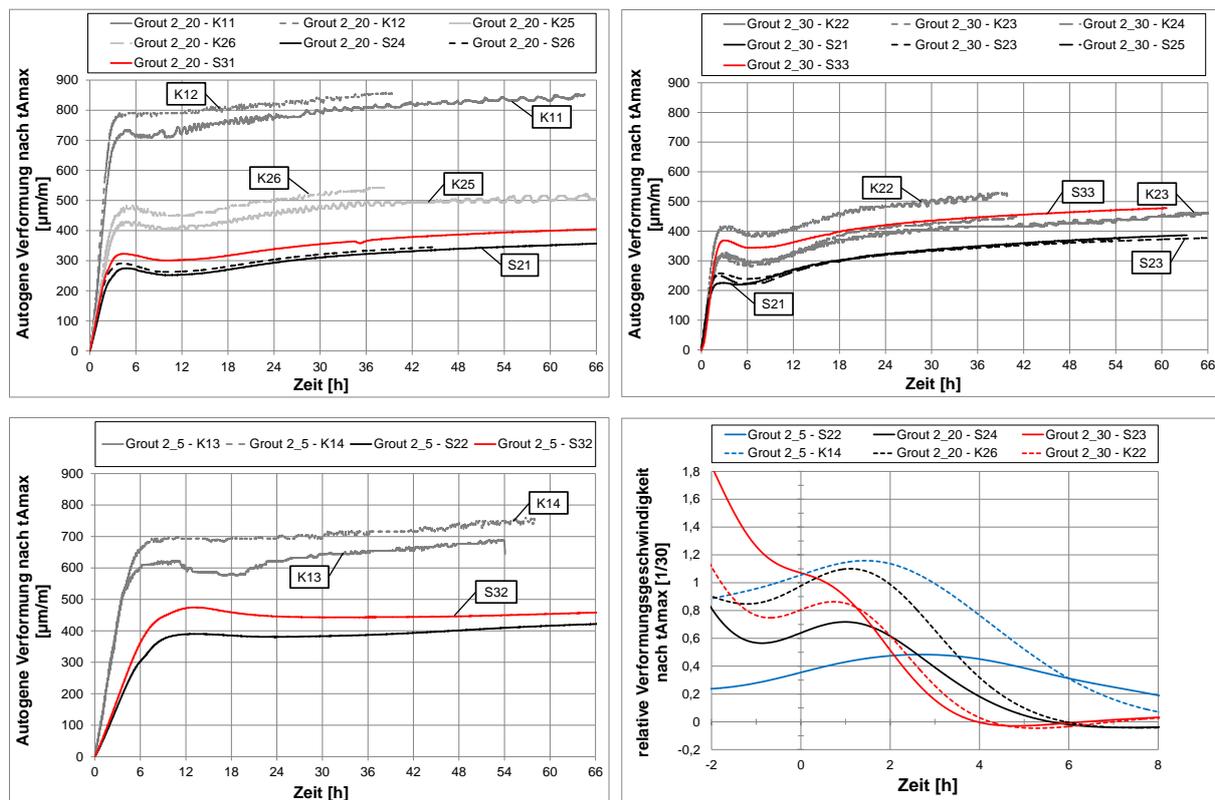
	Schlauch		Kegel	
5 S1-S2; K1-K3	22 h: 409,1 (S21)	22 h: -	22 h: 312,6 (K23)	22 h: 352,5 (K31)
20 S1-S2; K1-K4	22 h: 149,5 (S22)	22 h: 168,9 (S31)	22 h: 166,1 (K2x)	22 h: 170,9 (K32)
30 S1-S2; K1-K2	22 h: 281,9 (S23)	22 h: 273,4 (S32)	22 h: 327,8 (K2x)	22 h: -

Abbildung 4-27: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von Grout 4 bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Verläufe von Grout 4 zeigen bei 20 °C und 30 °C zum Zeitpunkt t_{Amax} noch ein leichtes Quellen, welches erst im Anschluss in ein autogenes Schwinden übergeht (vgl. Abbildung 4-27). Die Ergebnisse bei 5 °C weisen zum Zeitpunkt t_{Amax} keinerlei Quellverformungen mehr auf, was im Detail noch im Diagramm der Verformungsgeschwindigkeit zu erkennen ist (Abbildung 4-27; unten rechts). Dabei liegt die Kurve bei 5 °C als einzige zum Zeitpunkt der *time zero* oberhalb der Abszissenachse, was aufgrund des verwendeten Vorzeichenwechsels einer Schwindverformung gleichkommt. Weitere Besonderheit bei Grout 4 ist, dass selbst nach 12 h bei keiner Prüftemperatur eine Verringerung der Verformungsgeschwindigkeit auf einen Wert von

nahezu null beobachtet wird, was dazu führt, dass die autogenen Schwindverformungen weiter ansteigen und es selbst nach einer Prüfdauer von 48 Stunden zu keiner Annäherung an einen Grenzwert kommt.

Die höchsten Endschwindwerte nach 22 h werden bei einer Prüftemperatur von 5 °C erreicht. Bei 30 °C werden wiederum höhere Wert als bei der Standardtemperatur von 20 °C erreicht. Dieses gilt unabhängig von der Charge und ergibt sich bei beiden Prüfverfahren.



	Schlauch		Kegel	
5 S1-S2; K1-K2	36 h: 386,8 (S22)	36 h: 443,8 (S32)	36 h: 685,4 (K1x)	36 h: -
20 S1-S3; K1-K4	36 h: 327,5 (S2x)	36 h: 365,1 (S31)	36 h: 831,9 (K1x)	36 h: 513,9 (K2x)
30 S1-S4; K1-K3	36 h: 346,3 (S2x)	36 h: 444,6 (S33)	36 h: -	36 h: 469,3 (K2x)

Abbildung 4-28: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von Grout 2 bei unterschiedlichen Temperaturen

Bei Grout 2 liegen die Ergebnisse der Serie 1 ermittelt mit dem Kegelverfahren bei einer Prüftemperatur von 5 °C und 20 °C deutlich über den Werten der anderen Chargen (Abbildung 4-28). Auch die Endschwindwerte im Schwindkegel mit der Se-

rie 2 liegen bei 20 °C und 5 °C komplett, sowie bei 30 °C teilweise über den Verläufen der Ergebnisse die mit dem Schlauchverfahren ermittelt wurden. Auffällig ist weiterhin, dass bei sämtlichen Prüftemperaturen nach einem starken Anstieg ein leichtes Quellen beobachtet werden kann, welches bei 30 °C am größten ausfällt. Die Prüftemperatur beeinflusst dabei, wie lange der Quellvorgang andauert und wann das Quellen wieder in ein Schwinden übergeht.

Die Verteilung der Endschwindwerte, die mit dem Schlauchverfahren ermittelt wurden, zeigt bei 20 °C die geringsten Werte und bei 5 °C und 30 °C jeweils höhere Werte. Der Maximalwert kann nicht eindeutig einer Prüftemperatur zugeordnet werden. Durch die geringe Anzahl der Untersuchungen im Schwindkegel lassen sich dort keine sinnvolle Reihenfolge der Endschwindwerte festlegen.

4.4.3 Einfluss der Umgebungstemperatur bei der Herstellung der Probekörper

In Hinblick auf die praktische Umsetzung des Untersuchungsprogramms wurde das jeweilige Material zur Vereinfachung des Prüfablaufes in einem klimatisierten Labor (20 °C und 65 % - rel. Luftfeuchte) vorgelagert, dort angemischt und anschließend in die jeweiligen Probekörper eingebracht. Somit wurden sämtliche Probekörper erst mit Beginn der Messung den jeweiligen Prüftemperaturen von 5 °C und 30 °C ausgesetzt. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird dabei von der herkömmlichen Vorgehensweise gesprochen.

Ob die anfängliche Temperaturanpassung des Materials die Schwindcharakteristik beeinflusst oder sich veränderte Abläufe innerhalb des frischen Materials einstellen und damit die Höhe des Endschwindwerts beeinflussen, wird im Folgenden unter modifizierten Prüfbedingungen beurteilt. Um möglichst konstante Temperaturverhältnisse zu schaffen, wurde die Herstellung der Probekörper in eine Klimakammer verlagert. Dort konnten zudem sämtliche Utensilien zur Probekörperherstellung sowie das Material selbst mindestens 24 h vor der Prüfung bei einer Lufttemperatur von 5 °C bzw. 30 °C vorgelagert werden. Im Folgenden ist daher auch von der vortemperierten Vorgehensweise die Rede. Die Messungen selbst fanden wie in den vorangegangenen Untersuchungen im Klimaschrank statt.

Die geänderten Umgebungstemperaturen beim Anmischen wirken sich direkt auf die Konsistenz des Vergussmaterials Grout 1 aus. Dennoch ist das Befüllen der Schwindschläuche in beiden Fällen problemlos möglich und es werden keinerlei Entmischungen des Materials festgestellt. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der Auswertemethode nach t_{Amax} wurde neben zwei Schwindschläuchen auch ein Schwindring hergestellt, um so wiederum den Zeitpunkt der ersten Spannungsent-

wicklung im Schwindring mit dem Zeitpunkt $t_{A_{max}}$ aus dem Schwindschlauchverfahren vergleichen zu können.

In Abbildung 4-29 sind sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung der gemessenen Verformungen bei 5 °C dargestellt. Der Verlauf der herkömmlichen Vorgehensweise wird aus Kapitel 4.2.4 übernommen und ist vergleichend auf der linken Seite dargestellt. Die Ergebnisse der vortemperierten Vorgehensweise sind in der Abbildung auf der rechten Seite dargestellt. Es ergeben sich in beiden Fällen vergleichbare Verläufe mit den charakteristischen Hochpunkten in der relativen Verformungsgeschwindigkeit. Diese liegen allerdings ca. 14 h auseinander, was sich mit der Verwendung unterschiedlicher Chargen erklären lässt.

Durch die Vortemperierung ist die Temperatur des Materials zum Zeitpunkt des Einbaus nicht nur geringer sondern liegt auch dichter an der Prüftemperatur von 5 °C als bei der herkömmlichen Vorgehensweise. Dadurch verkürzt sich in beiden Prüfaufbauten die Dauer der Angleichung von der Kerntemperatur des einzelnen Probekörpers an die Prüftemperatur, wodurch sich die Reaktionsverläufe und damit auch die Zeitpunkte der Extrempunkte annähern.

Bei der herkömmlichen Vorgehensweise kühlt das Material aufgrund der kompakteren Bauform im Schwindring langsamer ab. Die Folge ist, dass das Material im Schwindring zu Beginn der Messungen über einen gewissen Zeitraum wärmer ist als das Material im Schwindschlauch. Dieses führt wiederum zu einer Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit, wodurch der Hydratationsgrad des Materials im Schwindring immer höher als im Schwindschlauch ist. Folglich kommt es zu einer zeitlichen Verschiebung der Hochpunkte im Temperaturverlauf, wobei das Maximum im Schwindring früher erreicht wird. Somit führt die vortemperierte Vorgehensweise zu einer Verkürzung der Temperaturanpassungsphase vom Material an die Prüftemperatur von 5 °C und damit zur Angleichung der Hydratationsverläufe in beiden Prüfverfahren. Der zeitliche Abstand von T_{max} zwischen Schwindring und Schwindschlauch beträgt bei der vortemperierten Vorgehensweise lediglich noch ca. 2 h im Vergleich zu ca. 6 h bei der herkömmlichen Vorgehensweise.

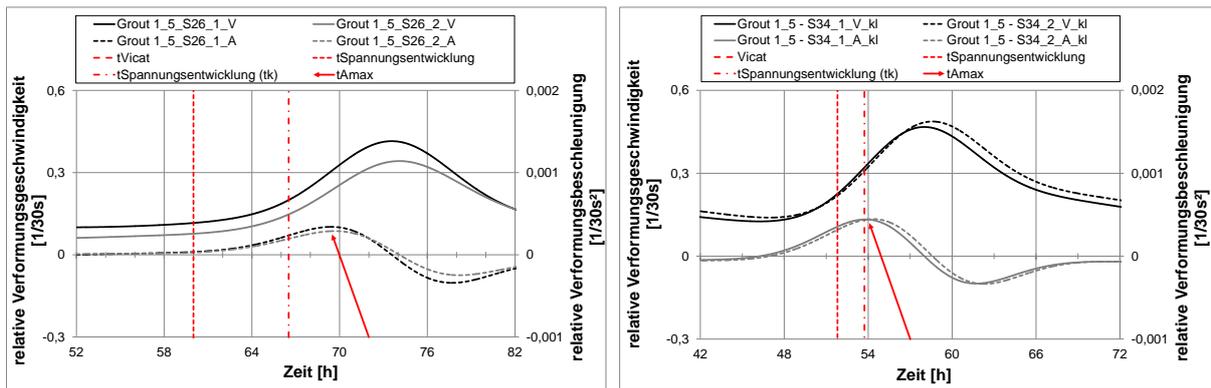


Abbildung 4-29: Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung von Grout 1 mit herkömmlicher (links) und vortemperierter (rechts) Vorgehensweise bei 5 °C

Analog zu der vortemperierten Vorgehensweise bei 5 °C wurde die Herstellung der Probekörper auch bei der Prüftemperatur von 30 °C im Klimaraum durchgeführt. Auffällig dabei ist, dass bei der vortemperierten Vorgehensweise die Zeitpunkte der der maximalen Probekörpertemperatur im Schwindring und im Schwindschlauch identisch sind (vgl. Abbildung 4-30). Daher hat die Vortemperierung des Materials einen nahezu identischen Hydratationsverlauf sowohl in beiden Prüfverfahren zur Folge. Bei der herkömmlichen Vorgehensweise drehen sich die Temperaturverhältnisse im Vergleich zu der Untersuchung bei 5 °C um. Da die Schwindschläuche eine gedrungene Form haben, gleicht sich die Kerntemperatur schneller der Prüftemperatur von 30 °C als im Schwindring an. Somit erfahren sie über einen längeren Zeitraum eine höhere Temperatur, wodurch die Hydratation im Schwindschlauch schneller abläuft. Der zeitliche Abstand bei der herkömmlichen Vorgehensweise ist im Vergleich zur Prüftemperatur von 5 °C grundsätzlich geringer, da die Differenz zwischen der Prüftemperatur und der Kerntemperatur des Materials zum Zeitpunkt des Einbaus bei 30 °C kleiner ist.

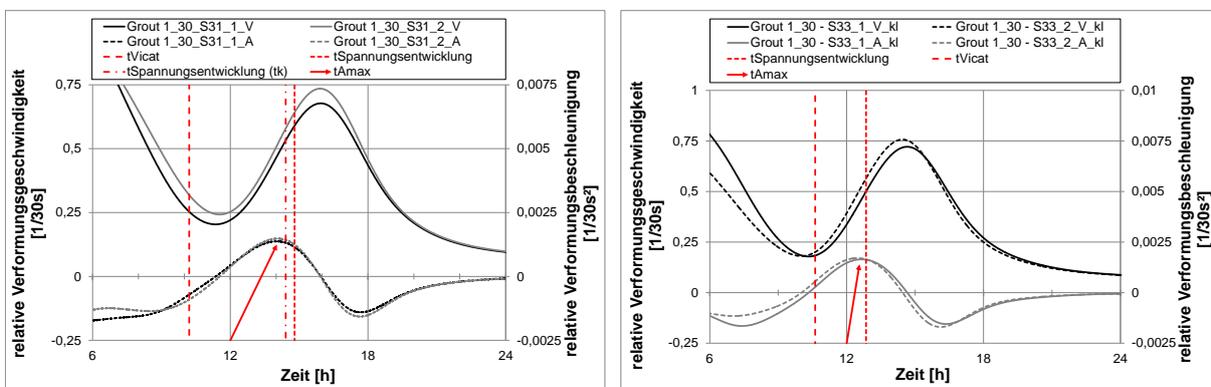


Abbildung 4-30: Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung von Grout 1 mit herkömmlicher (links) und vortemperierter (rechts) Vorgehensweise bei 30 °C

4.4.4 Entwicklung von Zwangsspannungen bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Der Beginn der spannungsinduzierenden Verformungen (t_{Ring}) lässt sich anhand der Verläufe der Zwangsspannungen im Schwindring bei den untersuchten Prüftemperaturen eindeutig bestimmen. Der Zeitpunkt, ab dem im Verlauf der Verformungsgeschwindigkeiten ein steiler Anstieg zu verzeichnen ist, deutet auf die ausreichende Festigkeit und die einsetzende Verkürzung des zu untersuchenden Materials hin. Wie sich die Zwangsspannungen in Abhängigkeit der Prüftemperatur nach t_{Ring} entwickeln, ist bislang nicht bekannt. Um die jeweiligen Spannungsverläufe besser vergleichen zu können, wurden diese ab dem Zeitpunkt t_{Ring} auf die Abszissenachse verschoben, da theoretisch erst danach Spannungen im Schwindring auftreten können. Alle zuvor gemessenen Verformungen können auf die Temperaturangleichung der DMS oder dem Wandern der Messwerte zurückgeführt werden. Durch die Bestimmung des Startpunkts und der Messung der Spannungsentwicklung in demselben Prüfaufbau, kann der Zeitpunkt t_{Ring} direkt bei der Auswertung der Verformungen im Schwindring verwendet werden. Somit ist ein exakter Vergleich der Verläufe über sämtliche Prüftemperaturen möglich. Hierbei auftretende grundlegende Unterschiede treten so auch in der Realität auf und sollten sich daher auch in den freien autogenen Schwindverformungen ermittelt mit dem Schwindschlauch ergeben.

Es kommt zu einer deutlichen Stauchung des Stahlrings durch den aufschumpfenden Grout 1, die mit einem starken Abfall der Verformungen einhergeht (vgl. Abbildung 4-31). Dabei weichen die Zeitpunkte ab denen die DMS auf der inneren Seite des Stahlrings erste Spannungen detektieren, abhängig von der Prüftemperatur zum Teil deutlich voneinander ab. Dieses ist auch bei den relativen Verformungsgeschwindigkeiten zu erkennen, bei denen sich analog zum Schwindschlauchverfahren deutlich versetzte Geschwindigkeitsmaxima über den Temperaturbereich einstellen. Dabei ist der Anstieg direkt nach t_{Ring} bei der Prüftemperatur von 5 °C am geringsten, wobei der Zeitraum, in der Verformungsgeschwindigkeiten größer null gemessen werden, am längsten ist. Bei 20 °C sowie 30 °C ist der Unterschied im Geschwindigkeitsverlauf nur noch sehr gering, wobei sich der Verlauf mit steigender Prüftemperatur von gedungen zu hoch und steil verändert. Daraus ergeben sich zwangsläufig auch unterschiedliche Verläufe der gemessenen Verformungen im Schwindring.

Wenige Stunden nach dem Startpunkt (t_{Ring}) kommt es im Schwindring zu einer deutlichen Abflachung der Verformungen, wobei sich auch hier bis zum Untersuchungsende bei keiner der drei Verläufen eine Annäherung der Messwerte an eine Horizontale feststellen lässt. Der größte Endschwindwert mit ca. 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ wird hier ver-

meintlich bei 30 °C nach ca. 96 h gemessen. Hierbei werden jedoch die in Abhängigkeit der Prüftemperaturen variierenden Zeitpunkte t_{Ring} vernachlässigt, wodurch die jeweiligen Endschwindwerte bei unterschiedlichen Gefügeständen in Abhängigkeit der Prüftemperatur verglichen werden.

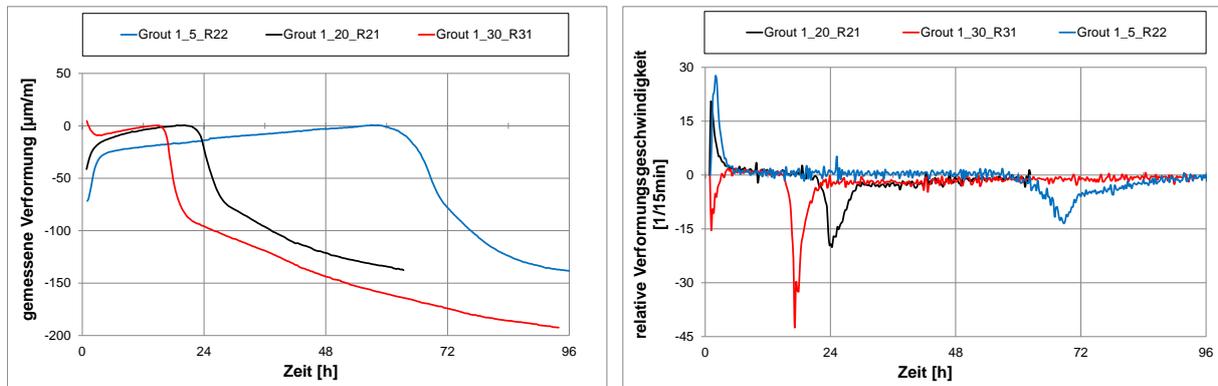


Abbildung 4-31: Grout 1 - Verformungsverhalten vom Schwindring bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Die Verläufe der Ringverformungen von Grout 3 zeigen nach t_{Ring} ebenfalls einen deutlichen Abfall der Verformungen, wobei der Maximalwert von 42 $\mu\text{m/m}$ bei einer Prüftemperatur von 5 °C erreicht wird (vgl. Abbildung 4-32). Darauf folgt ein Zeitraum in dem die Umschnürungswirkung des schwindenden Materials nachlässt und die Stauchungen des Stahlrings um 50 bis 75 % zurückgehen. Der Rückgang der Umschnürungswirkung des Betonrings kann mehrere Ursachen haben. Eine Möglichkeit ist, dass der Beton bei konstanter oder steigender Schwindverformung zur Relaxation neigt und so die Stauchung des Stahlrings abnimmt. Weiterhin kann ein Rückgang der autogenen Schwindverformungen oder gar ein Quellvorgang innerhalb des Materials zu einer Reduzierung der Stauchung des Stahlrings führen.

Bis zum Untersuchungsende wird bei den Prüftemperaturen von 20 °C und 30 °C im weiteren Verlauf eine erneute Stauchung des Schwindrings detektiert. Bei 5 °C hingegen ist bis 72 h nach t_{Ring} weiterhin eine Entspannung des Schwindrings zu beobachten.

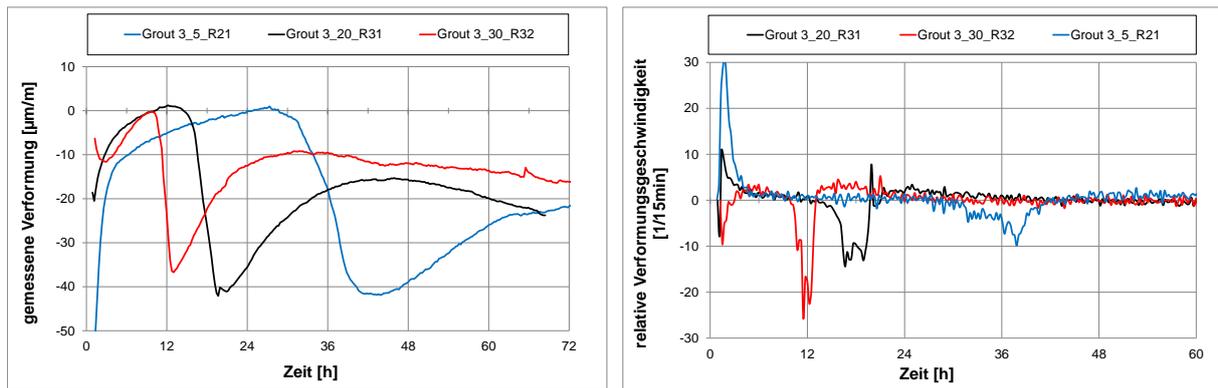


Abbildung 4-32: Grout 3 - Verformungsverhalten Schwindring bei unterschiedlichen Prüf-temperaturen

Im Stahlring lassen sich auch beim UHPC 5 nach dem Erreichen von t_{Ring} deutliche Verformungszunahmen beobachten (vgl. Abbildung 4-33). Die Steigung des Abfalls nimmt dabei mit fallender Prüftemperatur ab. Genau wie bei Grout 3 kommt es nach dem Erreichen eines Tiefpunkt (zwischen 40 und 50 $\mu\text{m}/\text{m}$) der Verformungen zu einer Entspannung des Stahlrings. Dabei ist die Stauchung des Stahlrings bei UHPC 5 insgesamt höher und die darauffolgende Entspannung insgesamt geringer als bei Grout 3.

Die Ergebnissen aus Kapitel 4.3 zeigen, dass die autogenen Schwindverformungen beim UHPC 5 nach dem charakteristischen Anstieg annähernd konstant sind und tendenziell zum Untersuchungsende hin weiter ansteigen. Somit kann die Ausdehnung des Stahlringes nicht durch ein Quellen des UHPCs erklärt werden, wodurch die Entspannung des Stahlringes lediglich auf das Relaxationsvermögen des UHPC 5 zurückzuführen ist.

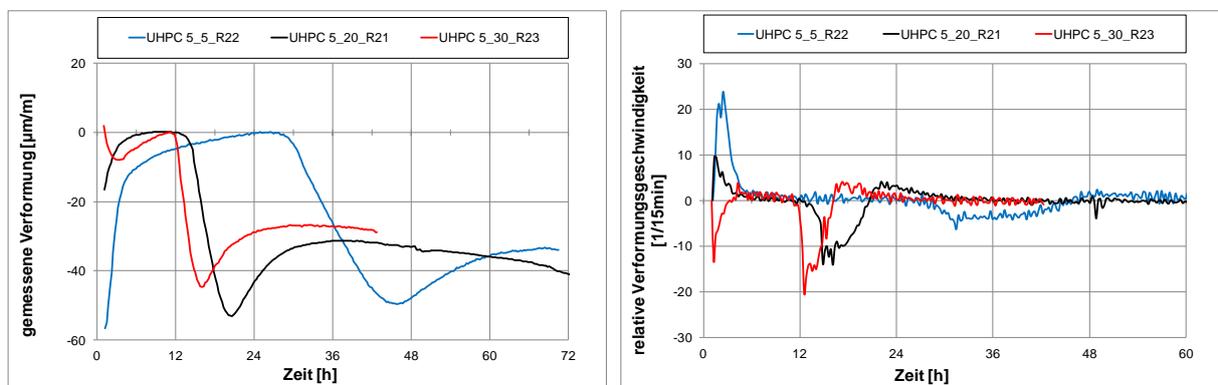


Abbildung 4-33: UHPC 5 - Verformungsverhalten Schwindring bei unterschiedlichen Prüf-temperaturen

Auch bei Grout 2 lassen sich die jeweiligen Startpunkte der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen durch eine deutliche Stauchung des Stahlringes beobachten, wobei die Steigung des Abfalls mit sinkender Prüftemperatur abnimmt (vgl. Abbildung 4-34). Ähnlich wie bei Grout 3 und UHPC 5 kann nach der Phase der Stauchung des Stahlringes ein deutlicher Rückgang der Umschnürungswirkung des Vergussmaterials beobachtet werden, mit der Besonderheit, dass die Ausdehnung des Stahlringes fast bis zum Erreichen der Ausgangsgröße anhält.

Grundsätzlich ist die Stauchung der Stahlringe mit Werten zwischen 15,0 und 23,0 $\mu\text{m}/\text{m}$ im Vergleich zu den anderen untersuchten Materialien am geringsten. Bei einer Prüftemperatur von 20 °C und 30 °C kommt es nach dem fast vollständigen Rückgang der Zwangsspannung im Stahlring, wiederum zu einer Stauchung des Schwindrings. Dabei ist die Steigung des Verlaufs geringer als die Steigung zu Beginn direkt nach t_{Ring} , verläuft sehr geradlinig und scheint bis über das Untersuchungsende hin anzudauern. Bei 30 °C wird mit einem Wert von 23 $\mu\text{m}/\text{m}$ der anfängliche Tiefpunkt bereits übertroffen.

Bei der Untersuchung mit einer Prüftemperatur von 5 °C kann selbst 72 Stunden nach dem Start der Messung keine erneute Stauchung des Stahlringes beobachtet werden. Weiterhin ist der erreichte Maximalwert der Ringverformung positiv also oberhalb der Abszissenachse und dem Verformungswert des Schwindrings zum Zeitpunkt t_{Ring} . Die Richtigkeit der aufgenommenen Messwerte vorausgesetzt würde das bedeuten, dass der Stahlring sich bei gleichbleibender Temperatur ausdehnen würde. Dieses wäre allerdings nur möglich, wenn der Ausgangsdurchmesser des außenliegenden Groutrings im Verlauf der Messungen größer werden würde und dabei durchgehend einen hundertprozentigen Verbund zum Stahlring besitzen würde. Zum einen ist der vollständige Verbund durch die Verwendung eines haftvermindernden Silikonöls in der Fuge zwischen Stahl- und Groutring unmöglich und zum anderen zeigen die Ergebnisse aus Kapitel 4.3 auch bei einer Prüftemperatur von 5 °C ein autogenes Endschwindmaß. Daher muss hierbei von einem Messfehler ausgegangen werden, wobei dabei lediglich die Höhe der Messwerte nicht jedoch der Verlauf der Verformungen angezweifelt werden.

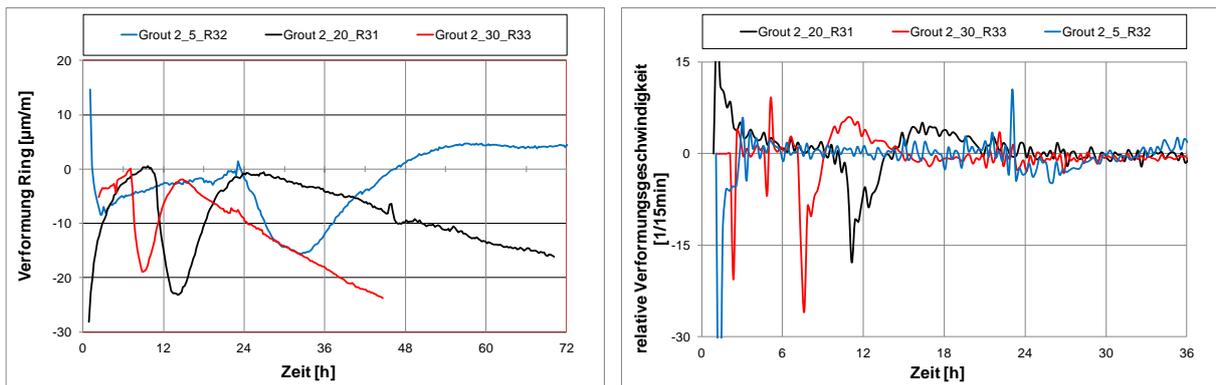


Abbildung 4-34: Grout 2 - Verformungsverhalten Schwindring bei unterschiedlichen Prüf-temperaturen

Der Verlauf der Spannungsentwicklung im Ring sowie die dazugehörige relative Verformungsgeschwindigkeit zeigen bei Grout 4 einige Besonderheiten (vgl. Abbildung 4-35). Bei sämtlichen Prüftemperaturen dehnt sich der Stahlring jeweils kurz vor dem Erreichen von t_{Ring} erkennbar aus. Da der umschließende Grout 4 zu diesem Zeitpunkt theoretisch noch plastisch verformbar ist, hat das Verformungsverhalten des Materials keinen Einfluss auf die Ausdehnung des Stahlrings. Die Temperaturaufzeichnung im Schwindring zeigt, dass die Temperatur zum Zeitpunkt t_{Ring} maximal ist, also genau bis zum Hochpunkt der Ringverformungen ansteigt und so die Temperaturdehnung des Stahlrings verursacht. Nach der Ausbildung des Hochpunktes kommt es bei allen drei Prüftemperaturen zu einer starken Stauchung des Stahlrings. Dabei fällt auf, dass die relative Verformungsgeschwindigkeit bei 5 °C im Bereich der Schwindringstauchung nahezu identisch, mit der bei 30 °C ermittelten Geschwindigkeit, ist. Im weiteren Verlauf schrumpft Grout 4 immer weiter auf den Stahlring auf, wodurch die Höhe der gemessenen Verformungen im Schwindring zum Ende der Untersuchung bis auf 120 µm/m ansteigt.

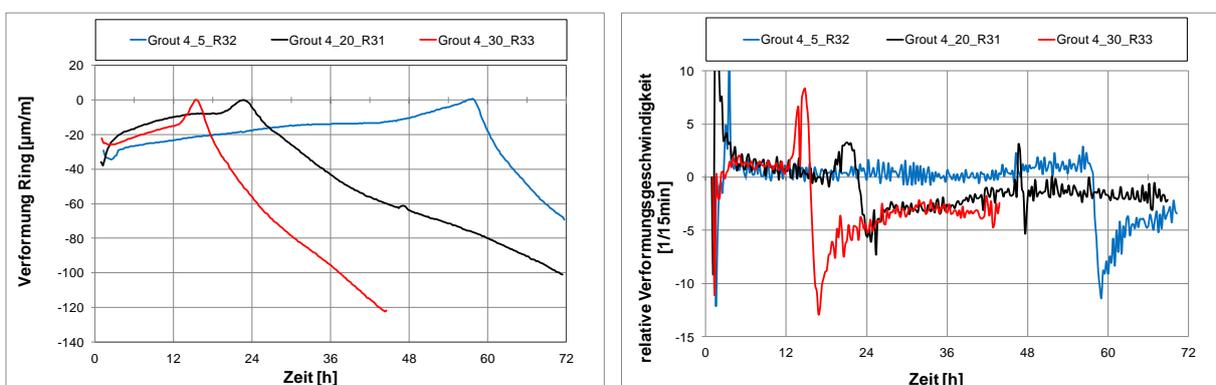


Abbildung 4-35: Grout 4 - Verformungsverhalten Schwindring bei unterschiedlichen Prüf-temperaturen

4.5 Spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen unter nicht-isothermen Prüfbedingungen

Die bisherigen Untersuchungen decken neben den in [Taz00] geforderten quasi-isothermen Prüfbedingungen bei 20 °C auch die aus [DAfStB06] übernommenen Prüftemperaturen von 5 °C und 30 °C ab. Damit ist eine Aussage über den Einfluss von unterschiedlichen Temperaturen auf die resultierenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen möglich. Wie sich gezeigt hat, ergeben sich dabei keine grundlegenden Abweichungen zwischen den einzelnen Prüftemperaturen, jedoch sind durchaus Unterschiede in der Höhe der Verformungen feststellbar. Um nun abschließend eine Aussage über tatsächlich auftretende Schwindverformungen treffen zu können, werden im Folgenden weitere Untersuchungen unter nicht-isothermen Bedingungen durchgeführt, die die Temperierung der schwindenden Probe unter real auftretenden Bauteilkerntemperaturen vorsieht. Der Vergleich mit den ermittelten Verformungsverläufen unter quasi-isothermen Bedingungen gibt dann Aufschluss über die Unterschiede der im Labor und der unter realen Bedingungen ermittelten spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen.

4.5.1 Verformungsermittlung mit dem Schwindkegelverfahren bei festgelegter Temperaturkurve

Wie sich real auftretenden Temperaturen im Bauwerkskern auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen auswirken ist bislang nicht bekannt. Zu diesem Zweck wurde exemplarisch die Wärmeentwicklung von Grout 1 während der Hydratation mithilfe eines Dewargefäßes ermittelt. Nach [Wes93] kann diese unter teil-adiabatischen Bedingungen ablaufende Untersuchung zur Beurteilung der Temperaturverhältnisse im Bauteilkern ausreichend genau simuliert werden. Dazu wurde eine handelsübliche Konservendose mit einem Liter des Materials gefüllt und geschlossen in das Dewargefäß gestellt. Der Temperaturfühler wurde mittig in der Dose platziert und über ein abgedichtetes Loch im Deckel nach außen geführt.

Die so ermittelte Temperaturkurve dient als Grundlage für die sich im Bauteilkern einstellenden Verhältnisse. Der Temperaturverlauf wird näherungsweise als Rampenfunktion im Kryostat des Schwindkegels einprogrammiert mit der Folge, dass das Material jetzt nicht mehr auf konstanten 20 °C temperiert wird, sondern bauteilkernähnliche Temperaturen erfährt. Daher wird hierbei auch von Untersuchungen unter nicht-isothermen Bedingungen gesprochen. Der Vergleich der direkt gemessenen und der temperaturbereinigten Verformungen soll eine weitere Aussage über temperaturbereinigte autogene Schwindverformungen ermöglichen.

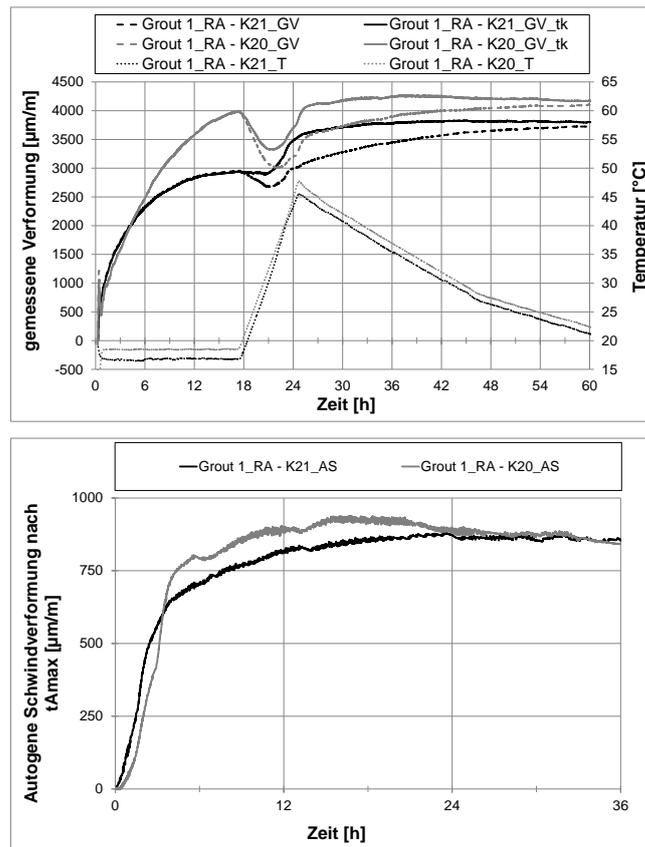


Abbildung 4-36: Verformungscharakteristik und Extrempunkte bei Grout 1 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen (Rampe)

Wie in Abbildung 4-36 zu erkennen, werden maximale Temperaturen von ca. 45°C im Schwindkegel erreicht. Diese Temperaturerhöhung hat ein Ausdehnen des Probekörpers zur Folge, wodurch der Verlauf der gemessenen Verformungen deutlich von dem charakteristischen Verlauf aus den vorangegangenen Kapiteln abweicht. Wie in Kapitel 4.2 bereits festgestellt, tritt die wesentliche Temperaturänderung nach dem Zeitpunkt t_{Ring} auf, ab dem das Gefüge bereits eine gewisse Steifigkeit besitzt und daher die Anwendung eines konstanten Wärmeausdehnungskoeffizienten möglich ist. Durch die Temperaturkompensation mit einem Wert von $11,5 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ lässt sich bei K21 der charakteristische Verlauf der gemessenen Verformungen erkennen. Bei K20 hingegen sind die Quellverformungen so groß, dass selbst nach der Kompensation durch die Temperatur ein erkennbares Ausdehnen des Probekörpers festgestellt wird. Trotz Unterschiede in den gemessenen Verformungen ergeben sich bei der Auswertung nach t_{Amax} nahezu identische Zeitpunkte für die maximale relative Verformungsbeschleunigung (vgl. A-3). Mit der Auswertung nach t_{Amax} ergeben sich bei beiden Schwindkegeln nach 36 h identische autogene Schwindverformungen.

Dadurch dass die Temperaturentwicklung, ähnlich wie bei der Bestimmung der *time zero* durch t_{Vicat} , an einer separaten Probe ermittelt wurde, ist es möglich, dass die Hydratationsverläufe zeitlich nicht übereinstimmen. Daraus resultiert die Möglichkeit, dass das Material bei der Verformungsmessung durch die externe Temperierung solchen Temperaturen ausgesetzt wird, die nicht mit dem Hydratationsverlauf der Probe im Schwindkegel übereinstimmen. Weiterhin verläuft die programmierte Temperaturkurve zwischen den einzelnen Stützstellen linear, wodurch der im Vorfeld ermittelte Temperaturverlauf teilweise über- bzw. unterschätzt wird. Somit kann nicht sicher davon ausgegangen werden, dass die Abbildung der real auftretenden Temperaturen im Bauteilinneren durch eine, im Vorfeld ermittelte und anschließend nachgefahrene, Temperaturkurve korrekt ist.

4.5.2 Verformungsermittlung mit dem Schwindkegelverfahren bei real-auftretenden Bauteiltemperaturen

Die Anschaffung eines neuen Kryostats ermöglichte durch die Sollwertnachführung mittels anschließbaren Temperaturfühlers (Pt100) die exakte Temperierung des Materials im Schwindkegel. Dazu wurde mit dem angemischten Material neben dem Schwindkegel auch eine Konservendose befüllt, wodurch eventuelle Materialinhomogenitäten zwischen schwindendem und wärmeentwickelndem Probekörper vernachlässigt werden können. Das Kryostat regelt dabei die Temperatur des Wassers, welches den Schwindkegel temperiert, nach dem gemessenen Wert im Volumenmittelpunkt der Konservendose. So erfährt das Material im Schwindkegel bauteilkernähnliche Temperaturen, deren Auswirkungen auf die resultierenden autogenen Schwindverformungen im Folgenden untersucht werden.

Neben der Kompensation der Temperatur analog zu der Untersuchung in Kapitel 4.5.1 wird die Temperaturdehnung des Prüfaufbaus berücksichtigt, der sich im Bereich zwischen Bodenplatte und Kegelspitze ausdehnt und den Schwindverformungen somit entgegenwirkt. Den Ergebnissen mit nicht-isothermem Temperaturverlauf werden Ergebnisse mit isothermen Temperaturbedingungen bei 20 °C gegenübergestellt. Somit kann ein direkter Vergleich der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen stattfinden und der Einfluss der geänderten Prüfbedingungen auf die Ergebnisse detektiert werden.

Bei Grout 1 stellt sich nach ca. 27 h eine maximale Kerntemperatur von ca. 43 °C ein. Durch die Temperaturerhöhung verändert sich im Vergleich zu den Untersuchungen unter quasi-isothermen Bedingungen erwartungsgemäß der Verlauf der gemessenen Verformungen. Auf den starken Anstieg zu Beginn und der darauffolgenden Ausbildung eines Plateaus stellt sich hier ein moderater Anstieg der Verformungen ein. Bei der quasi-isothermen Prüfbedingung ergibt sich nach dem Plateau wie-

derrum ein recht starker Anstieg der Verformungen, dem die Wärmeausdehnung des Materials, aufgrund des starken Temperaturanstiegs, hier entgegenwirkt. Erst nach der Temperaturkompensation ergibt sich bei den gemessenen Verformungen der charakteristische Schwindverlauf.

Trotz deutlichem Temperatureinflusses lassen sich nach der Auswertung der relativen Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung sowohl bei der nicht- als auch bei der temperaturkompensierten Variante die Extrempunkte wie in den vorangegangenen Untersuchungen detektieren (vgl. A-4). Dabei besteht nahezu kein zeitlicher Unterschied zwischen den einzelnen Hochpunkten, wohingegen die Ausprägung der ermittelten Punkte bedingt durch den Temperatureinfluss unterschiedlich hoch ist.

Die Auswertung der gemessenen Verformungen nach t_{Amax} ergibt nach 36 h einen spannungsinduzierenden autogenen Endschwindwert von $740 \mu\text{m/m}$ (vgl. Abbildung 4-37). Ohne Berücksichtigung der Temperaturkompensation ist die Auswertung ebenfalls möglich wobei der ermittelte Endschwindwert mit $750 \mu\text{m/m}$ nahezu identisch ist. Die Temperatur des Materials kühlt nach dem Durchlaufen des Maximums langsam wieder ab und erreicht nach ca. 40 h das Niveau des Ausgangswerts. Unter Annahme eines konstanten Wärmeausdehnungskoeffizienten sind die Temperaturverformungen daher komplett reversibel und haben keinen Einfluss auf den Endschwindwert. Das gilt allerdings nur wenn t_{Amax} zeitlich vor dem Temperaturanstieg liegt und der WAK als konstant angenommen werden kann.

Im Vergleich zu quasi-isotherm gelagerten Probekörper bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ aus Kapitel 4.4.2 ergeben sich nach 36 h nahezu identische spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen. Der Verlauf bis zum vermeintlichen Endschwindwert ist bei der nicht-isothermen Lagerung bedingt durch die höhere Temperatur steiler als beim quasi-isotherm gelagerten.

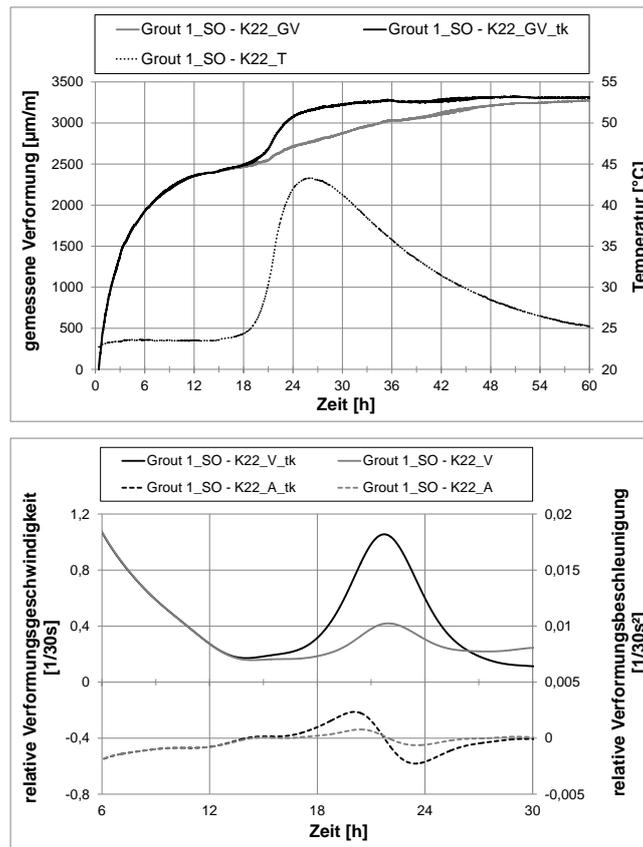


Abbildung 4-37: Verformungscharakteristik bei Grout 1 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

Beim UHPC 5 ergibt sich bedingt durch den Temperaturanstieg des schwindenden Probekörpers auf 43 °C ein quellender Effekt etwa 15 h nach Beginn der Messung (vgl. Abbildung 4-38). Das bedeutet, dass die bereits eingesetzte Schwindverformung zu diesem Zeitpunkt geringer ist als die reine Temperaturdehnung des Materials. Durch die Temperaturkompensation stellt sich wiederum der charakteristische Schwindverlauf ein. Die wesentliche Temperaturerhöhung wird erst nach t_{Amax} festgestellt und verändert damit zwar den Verlauf der autogenen Schwindverformungen nicht jedoch den Startpunkt der spannungsinduzierenden Verformungen. Dementsprechend werden bei beiden Verläufen die Hochpunkte der relativen Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung zum selben Zeitpunkt erreicht (vgl. A-4). Der Vergleich der autogenen Schwindverformungen mit den Untersuchungen bei einer konstanten Prüftemperatur von 20 °C zeigt auch beim UHPC 5 keine nennenswerten Unterschiede im Endschwindmaß. Die anfängliche Steigung der Verformungen der unterschiedlich gelagerten Probekörper ist nahezu identisch, wonach auf eine geringe Temperaturbeeinflussung des Materials UHPC 5 geschlossen werden kann.

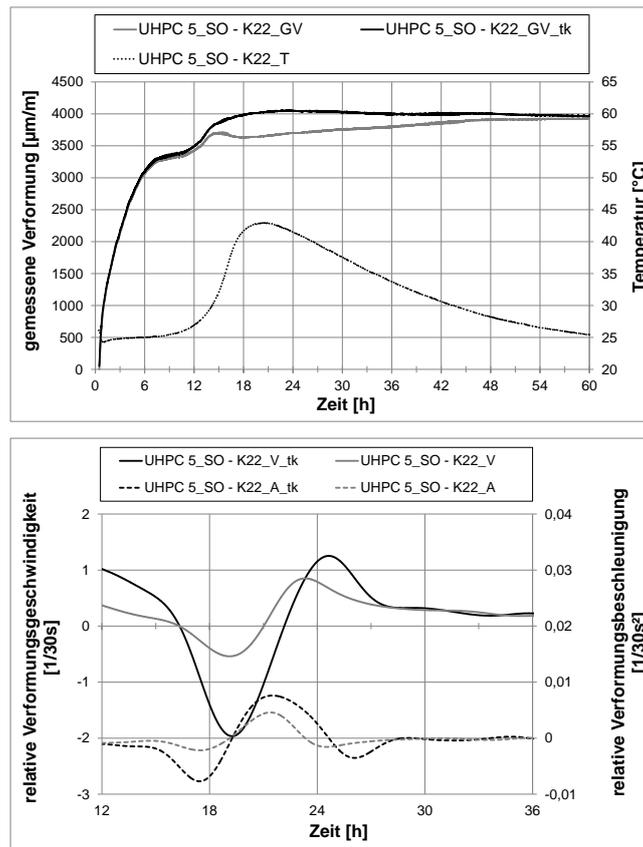


Abbildung 4-38: Verformungscharakteristik bei UHPC 5 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

Die Temperatur bei Grout 3 steigt nach 16 h auf ca. 44 °C an. Der Verlauf der gemessenen Verformungen nach der Temperaturkompensation weicht im Bereich zwischen dem ersten Anstieg und dem darauffolgenden Plateau von dem unter quasi-isothermen Bedingungen bei 20 °C gemessenen Verformungen ab. Weiterhin ist ein Hochpunkt in der relativen Verformungsgeschwindigkeit beim nicht-kompensierten Verlauf nur noch schwach ausgeprägt (vgl. A-4). Beides spricht dafür, dass bei Grout 3 der Beginn des Temperaturanstieges recht dicht am Zeitpunkt von t_{Amax} liegt. Durch den abgeschätzten Wärmeausdehnungskoeffizienten kann es zu einem Fehler in der Temperaturkompensation kommen, welcher sich allerdings nicht auf die autogenen Schwindverformungen nach t_{Amax} auswirkt. Hier ergibt sich nach 36 h ein nahezu identischer Endschwindwert verglichen mit den Untersuchungen unter quasi-isothermen Bedingungen.

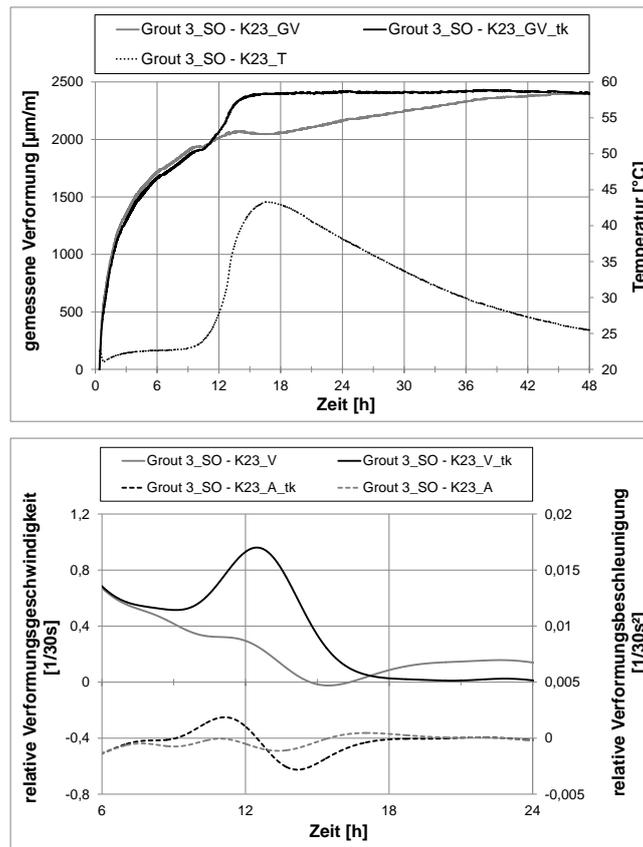


Abbildung 4-39: Verformungscharakteristik bei Grout 3 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

Das Material Grout 4 zeigt ähnlich wie bei den quasi-isothermen Lagerungsbedingungen von 20 °C ein ausgeprägtes Quellen nach dem anfänglichen starken Anstieg der gemessenen Verformungen (vgl. Abbildung 4-40). Eine weitere Besonderheit von Grout 4 ist, dass die Hydratationstemperatur sowohl bei der quasi-isothermen als auch der nicht-isothermen Prüfbedingung zum Zeitpunkt von t_{Amax} schon deutlich erhöht ist. Daher werden die gemessenen Verformungen im Bereich von t_{Amax} durch die Temperaturerhöhung beeinflusst, was wiederum zur Änderung der relativen Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung führt (vgl. A-4). Da kurz vor diesem Zeitpunkt auch der Wärmeausdehnungskoeffizient noch nicht konstant ist, ergibt sich ein weiterer Fehler bei der Bestimmung des Startpunkts der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen. Im weiteren Verlauf wird ebenfalls deutlich, dass der Wert für den WAK fehlerhaft ist, da nach der Temperaturkompensation das autogene Schwinden erst ansteigt und danach wieder abfällt. Dieses wurde so bei den quasi-isotherm gelagerten Untersuchungen bei 20 °C nicht festgestellt.

Hinzu kommt, dass in Kapitel 4.4.2 bereits Unterschiede im Schwindverhalten bei 5, 20 und 30 °C festgestellt wurden, die auf das vermutlich stark temperaturabhängige Quellmittel zurückzuführen sind.

Sämtliche aufgeführte Punkte führen bei der nicht-isothermen Lagerung zu unterschiedlichen Endschwindwerten und im Weiteren zu abweichenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen im Vergleich mit den Verläufen aus den quasi-isothermen Prüfbedingungen.

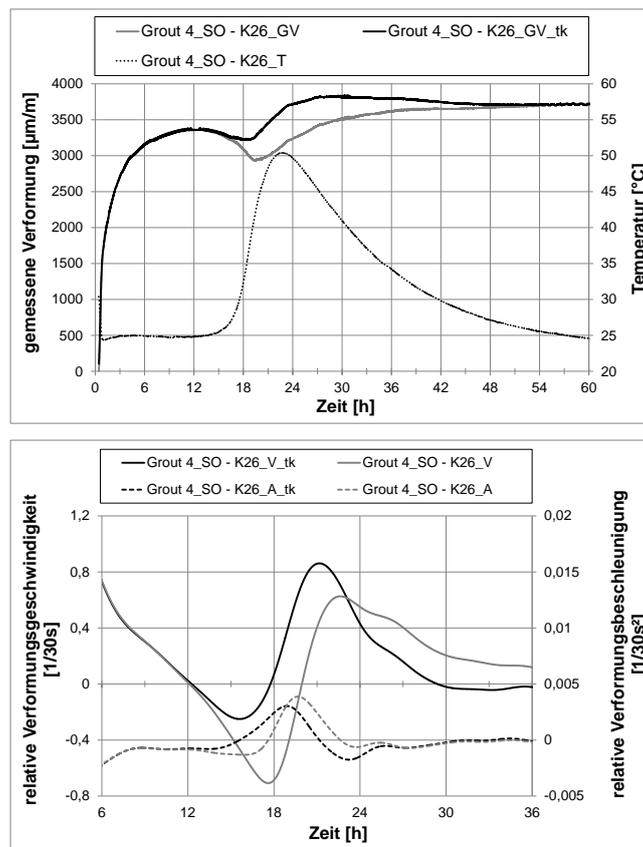


Abbildung 4-40: Verformungscharakteristik bei Grout 4 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

Das anfängliche Quellen bei Grout 2 ist mit einem Wert von ca. 3.000 µm/m deutlich höher als bei den quasi-isothermen Untersuchungen (vgl. Abbildung 4-41). Generell ist davon auszugehen, dass die gemessenen Verformungen, zumindest zu Beginn der Messungen, im Bereich der quasi-isothermen Untersuchungen liegen müssten, da die Temperatur des angemischten Materials mit ca. 27 °C zwischen 20 und 30 °C liegt. Die Kerntemperatur steigt ab ca. 8,5 h nach Messbeginn innerhalb von 6,0 h auf einen Wert von 55 °C, wobei der Zeitpunkt der maximalen Temperatur wiederum im Bereich der quasi-isothermen Prüfbedingungen liegt. Abweichend davon wird t_{Amax}

erst ca. 4,0 h später nach 13,6 h detektiert (vgl. A-4). Somit ist auch hier, ähnlich wie bei Grout 4, die Temperatur des Materials zum Zeitpunkt t_{Amax} schon deutlich erhöht, woraus sich ein ausgeprägter Temperatureinfluss ergibt. Der zu diesem Zeitpunkt noch nicht kontante Wärmeausdehnungskoeffizient von Grout 2 beeinflusst den Verlauf der gemessenen Verformungen und damit ebenfalls die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe.

Somit ergeben sich aus dem kompensierten und nicht-kompensierten Verlauf jeweils unterschiedliche spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen. Dabei ist die Charakteristik des temperaturkompensierten Verlaufs vergleichbar mit dem Verlauf aus den quasi-isotherm gelagerten Prüfbedingungen, während der nicht-kompensierte Verlauf bedingt durch die zusätzlich fallende Materialtemperatur weiter stark ansteigt und sich auch zum Ende der Messungen nicht an eine Horizontale annähert. Der Unterschied in der Höhe der Endschwindwerte beim temperaturkompensierten und quasi-isotherm festgestellten Verlauf ergibt sich größtenteils aus den hohen anfänglichen Quellverformungen, die gerade im Schwindkegelverfahren einen deutlichen Einfluss hat (vgl. Kapitel 4.3).

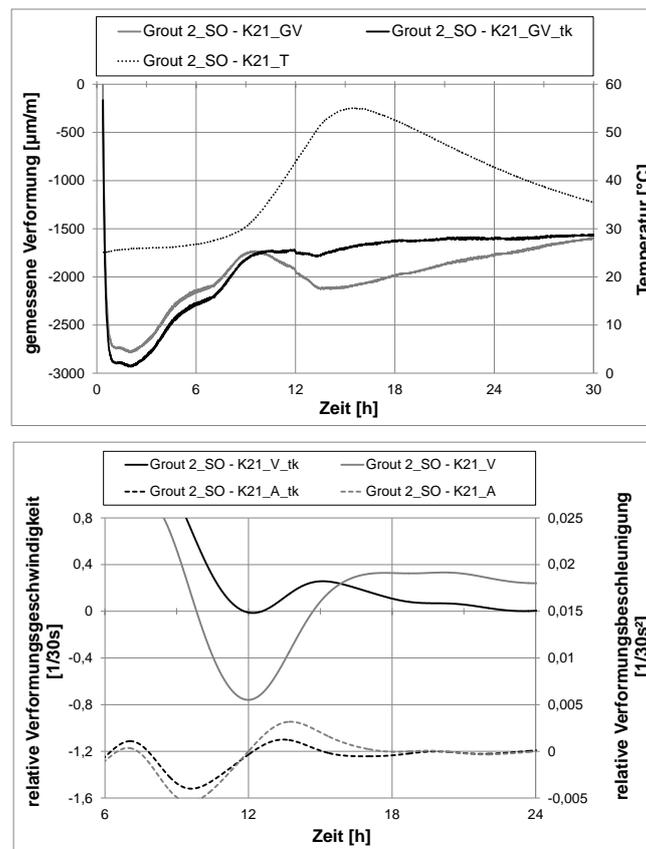


Abbildung 4-41: Verformungscharakteristik bei Grout 2 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

Kapitel 5

Bewertung der Prüfverfahren in Bezug auf die Anwendbarkeit als einheitliches Verfahren

5.1 Diskussion der versuchstechnischen Einflüsse

Es wird deutlich, dass die gemessenen und die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen abhängig vom verwendeten Prüfverfahren variieren können. Im Folgenden werden, auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen in Kapitel 4.3, verallgemeinerbare Aussagen über die versuchstechnischen Einflüsse bei den einzelnen Prüfverfahren formuliert.

Schwindschlauchverfahren

Das Schwindschlauchverfahren eignet sich als Referenzverfahren, da allen Forderungen zur Messung von autogenen Schwindverformungen entsprochen wird und zudem sämtliche Besonderheiten der hier untersuchten Materialien erfasst werden konnten. Es handelt sich um das einzige geschlossene System, der in dieser Arbeit verwendeten Prüfverfahren, welches ein Austausch von Luft mit der Umgebung verhindert. Zudem wirken sich Setzungs- und Umlagerungseffekte nicht auf die Verformungsmessung aus, da das Volumen des Systems konstant ist und außerdem senkrecht zur Gravitation gemessen wird. Darüber hinaus zeigen parallel mit dem Schwindschlauchverfahren durchgeführte Untersuchungen von Grout 2 (vgl. Kapitel 4.3.4), dass sich identische spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen zwischen dem quellenden und nicht-quellenden Schwindschlauch ergeben (vgl. Abbildung 4-21, rechts), selbst wenn das anfängliche Quellen des Materials in einem der Schwindschläuche nicht gemessen wird. Durch den äußerlich nicht messbaren und damit quasi unterdrückten Quellvorgang werden in dem nicht-quellenden Schwindschlauch zwar höhere Verformungen gemessen, jedoch sorgt der sich aufbauende Überdruck im quellenden Schwindschlauch nach Auswertung mit t_{Amax} wiederum für nahezu identische Werte.

In Kapitel 4.3.2 wurden Untersuchungen zum Einfluss der Messrichtung sowie zur Überprüfung der Isometrie des autogenen Schwindens durchgeführt. Dabei konnten die größten Verformungen bei der Ausrichtung des Messwertaufnehmers in Richtung der Gravitation und die kleinsten Verformungen bei der Messung entgegen der Gravitation gemessen werden. Trotz unterschiedlicher anfänglicher Verformungen ergeben sich nach Auswertung mit t_{Amax} bei allen drei Lagerungsarten nahezu identische Endschwindwerte. Daraus folgt, dass die Endschwindwerte unabhängig von der Höhe der anfänglichen Verformungen sind und somit die anfänglichen Setzungs- und Umlagerungseffekte keinen Einfluss auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen haben. Darüber hinaus spielt es keine Rolle wie die Probekörper gelagert (senkrecht oder waagrecht) und wie die Messwertaufnehmer positioniert (in oder entgegen der Richtung der Gravitation) werden. Somit kann die Isometrie der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bestätigt werden. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass es ausreichend ist, die Messung des autogenen Schwindens im standardisierten horizontal gelagerten Prüfaufbau durchzuführen.

Schwindkegelverfahren

Das Schwindkegelverfahren erfüllt ebenfalls sämtliche Forderungen zur Messung der autogenen Schwindverformungen, basiert allerdings im Vergleich zum Referenzverfahren auf einem anderen Messprinzip. Die Verformungen werden hier in Richtung der Gravitation gemessen. Durch den früheren Start der Messung ergeben sich im Schwindkegelverfahren höhere Gesamtverformungen als im Schwindschlauchverfahren. Das Gleichsetzen der Startpunkte der Messungen in beiden Prüfverfahren führt zu vergleichbaren Gesamtverformungen. Weiterhin kann im Schwindkegelverfahren zwar von einer konservierenden Lagerung der Probe gesprochen werden, dennoch ist das System des Schwindkegels nicht als geschlossen anzusehen. Während im Schwindschlauchverfahren aufsteigende Luft nicht aus dem System entweichen kann, sammelt sich die aufsteigende Luft im Schwindkegel unter der aufliegenden Kunststoffolie. Dadurch verringert sich das Volumen unterhalb des Reflektorplättchens, was bei hohem Luftgehalt und hochfließfähiger Zusammensetzung zu einer Erhöhung des Anteils des schwindfähigen Materials führen kann. Ein weiterer Unterschied ergibt sich bei den Verläufen der Hydratationswärmeentwicklung insofern, als dass die maximale Temperatur im Schwindkegelverfahren immer später auftritt als im Schwindschlauchverfahren. Die aktive Kühlung im Schwindkegel bewirkt zum einen eine Reduzierung der maximalen Hydratationstemperatur und zum anderen eine Kompensation der anfänglichen Temperaturentwicklung des Materials. Dadurch

kommt es zu einer direkten Beeinflussung des Reaktionsverlaufs und damit zu einer Verschiebung des Zeitpunkts der maximalen Temperatur.

Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen im Schwindkegelverfahren bei der Untersuchung des gleichen Materials geringfügig höher sind als im Schwindschlauchverfahren. Als Ursache dafür kommt lediglich die aktive Kühlung des Materials in Frage. Die Setzungs- und Umlagerungseffekte führen zwar zu einem Verdichten des Materials und dadurch zu höheren anfänglich gemessenen Verformungen, jedoch kann durch die Ergebnisse aus den Variationen im Schwindschlauchverfahren (vgl. Kapitel 4.3.2) eine Erhöhung der Endschwindwerte durch das Verdichten des Materials ausgeschlossen werden. Bei nahezu allen Proben wurden nach dem Ausbau des Probekörpers einige Luftporen detektiert. Die aufsteigende Luft führt zwangsläufig zu einer Erhöhung der gemessenen Verformung zu Beginn der Messungen. Anhand der vergleichenden Untersuchungen zwischen Schwindkegel- und Schwindschlauchverfahren in Kapitel 4.3.3 werden nach dem Gleichsetzen der Startpunkte Verformungen in vergleichbarer Größenordnung gemessen (vgl. Abbildung 4-17; rechts). Das bedeutet, dass nach ca. 54 min keinerlei Luftporen mehr an die Oberfläche steigen. Daher ist es durchaus denkbar, dass sich die Luftporen direkt nach dem Einfüllen des Materials an der Oberfläche sammeln und durch das Auflegen der Kunststoffolie aufplatzen. Durch die aufgestiegene Luft verringert sich das Volumen unterhalb des Reflektorplättchens was wiederum zu einer Erhöhung des schwindfähigen Materials führt. Da die Anzahl von den, an der Oberfläche befindlichen, Luftporen nicht exakt bestimmt wurde, ist eine Aussage über die Höhe der Volumenverringerng nicht direkt möglich. Aufgrund des geringen Volumens der aufgestiegenen Luftporen bezogen auf das Gesamtvolumen des Schwindkegels, sollte die Erhöhung des Anteils des schwindfähigen Materials und damit die Steigerung der autogenen Schwindverformungen nach Meinung des Autors sehr gering ausfallen.

Schwindrinnenverfahren

Mit dem Schwindrinnenverfahren ist das Messen von autogenen Schwindverformungen ebenfalls möglich. Hier wird der Probekörper genau wie im Referenzverfahren senkrecht zur Gravitation gemessen. Trotz konservierender Lagerung innerhalb der Schwindrinne handelt es sich analog zum Schwindkegelverfahren um ein nicht geschlossenes System. Die Besonderheit hier ist, dass die Setzungs- und Umlagerungseffekte sowie das Entlüften des Materials genau senkrecht zur Messrichtung wirken und daher in der Regel nicht aufgezeichnet werden. Der Unterschied in den

spannungsinduzierenden Verformungen zwischen Referenz- und Schwindrinnenverfahren lässt sich wiederum sehr gut beim Grout 2, wie im Kapitel 4.3.4 beschrieben, erkennen. In beiden Prüfaufbauten kommt es zu einem anfänglichen Quellen des Materials. Da es sich bei den Schwindschläuchen um ein geschlossenes System handelt, führt dieser Quellvorgang entweder zu einer axialen Ausdehnung des Schlauches, oder bei gleichbleibender Länge, zu einer Erhöhung des Druckes innerhalb des Schlauches. Ein gewisser Anteil der entgegen der Schwindverformung wirkender Längen- bzw. Drückänderungen kann nicht kompensiert werden und führt, im Vergleich zu den Messungen in den beiden Schwindrinnen, zu geringeren spannungsinduzierender autogener Endschwindwerte. Bei der nach oben offenen Schwindrinne wirken die Quellvorgänge nicht in Messrichtung, wodurch dem Schwindprozess keine entgegengesetzte Verformung gegenübersteht. Dies führt zu höheren Endschwindwerten im Vergleich zu den Messungen in den beiden Schwindschläuchen.

Daher besteht bei anfänglich zum Quellen neigenden Materialien eine Abhängigkeit zwischen spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen und dem verwendeten Prüfverfahren. Welches Prüfverfahren dabei die Realität exakter abbildet, wird in Kapitel 5.3 diskutiert.

5.2 Vor- und Nachteile der einzelnen Prüfverfahren

Neben den gelieferten Messwerten muss bei einem Prüfverfahren auch die Handhabbarkeit und der Aufwand des Einbaus der einzelnen Probekörper beurteilt werden. Grundsätzlich wird bei der Beurteilung davon ausgegangen, dass sämtliche Messwerte mittels induktiven Wegaufnehmers dauerhaft aufgezeichnet werden. Nur hierdurch kann gewährleistet werden, dass eine Auswertung der aufgenommenen Schwindverläufe überhaupt möglich und entsprechend genau ist.

Im Gegensatz zum in der [ASTM1698] geregelten Schwindlauchverfahren, bei dem die einzelnen Schwindschläuche jeweils nur in gewissen zeitlichen Abständen in den Prüfaufbau gelegt und anschließend vermessen werden, ist abzuraten da insgesamt nur sehr geringe Verformungen gemessen werden, die allein schon durch eine leichte Drehung des Probekörpers beeinflusst werden können. Zudem kann es durch Transport des Probekörpers im noch plastischen Zustand immer wieder zu Gefügestörungen kommen, die sich durchaus auf die autogenen Schwindverformungen auswirken können.

Zudem wird davon ausgegangen, dass sämtliche verbaute Materialien nahezu selbstverdichtende Eigenschaften besitzen, da ein nachträgliches Verdichten der Probekörper oder der Prüfaufbauten nicht möglich ist.

Schwindschlauchverfahren

Aufgrund des großen Oberflächen-zu-Volumenverhältnisses der Schwindschläuche kann der Forderung nach einer maximalen Temperaturerhöhung von 2 K [Ham06] während der Messung ohne den Einsatz einer aktiven Temperierung entsprochen werden. Der Prüfaufbau wird zwar in einer temperierten Umgebung gelagert, dennoch findet keine aktive Temperierung des Probekörpers statt. Durch die Lagerung des gesamten Prüfaufbaus in einem temperierten Paraffinölbad ist auch die Prüfung des autogenen Schwindens unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen möglich. Ein weiterer Vorteil des, in Abbildung 3-7 dargestellten, Prüfaufbaus ist der gleichzeitige Einbau von bis zu vier Probekörpern. So können entweder Wiederholversuche mit dem gleichen Material oder ein direkter Vergleich von zwei unterschiedlichen Materialien parallel durchgeführt werden. Der einzige Nachteil Schwindschlauchverfahrens ergibt sich aus der Geometrie des Schwindschlauches selbst. Dieser eignet sich grundsätzlich für den Einbau von hochfließfähigen, nahezu selbstverdichtenden Mörteln mit einem Größtkorn von 4 mm. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurde neben einem sehr viskosen UHPC auch ein Vergussbeton mit einem Größtkorn von 5 mm verbaut, wobei dieses nur unter Zuhilfenahme spezieller Einbautechniken möglich war.

Schwindkegelverfahren

Das Schwindkegelverfahren eignet sich aufgrund der Abmessung deutlicher besser für die Untersuchung von Materialien mit weniger fließfähigeren Konsistenzen und größerem Größtkorn als das Schwindschlauchverfahren. Zudem kann durch das Befüllen des Schwindkegels über eine Rutsche bei nahezu selbstverdichtenden Mörteln und Betone ein sachgerechter Einbau der Materialien gewährleistet werden. Mit dem Schwindkegelverfahren können alle Verformungen des eingebauten Materials direkt gemessen werden. Da es sich bei dem Prüfaufbau nicht um ein geschlossenes System handelt und zudem in Richtung der Gravitation gemessen wird, gibt es mehrere Faktoren die das Messergebnis beeinflussen können. Zum einen kann es bei hochfließfähigen Materialien mit hohen Luftgehalten bei anhaltender Entlüftung zu einer Verfälschung des Messergebnisses kommen (vgl. Kapitel 5.1). Zum anderen kann es

bei längeren Prüfzeiten durch die Verwendung einer handelsüblichen Kunststoffolie zu einer Verfälschung des Messergebnisses aufgrund von zusätzlichen Anteilen aus Trocknungsschwinden kommen. Die verwendete Folie ist nicht diffusionsdicht, wodurch die Oberfläche des Schwindkegels austrocknen und dadurch schwinden kann, was direkt durch ein Absinken des Reflektorplättchens detektiert wird.

Die aktive Temperierung mit angeschlossenem Kryostat ermöglicht sehr präzise Untersuchungen unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen (vgl. Kapitel 4.5.2). Die aktive Temperierung kann bei den Untersuchungen unter quasi-isothermen Temperaturbedingungen durchaus den Hydratationsverlauf beeinflussen, was sich direkt auf die autogenen Schwindverformungen auswirken würde.

Schwindrinnenverfahren

Das Schwindrinnenverfahren eignet sich aufgrund der Abmessung, genau wie das Schwindkegelverfahren, deutlicher besser für die Untersuchung von Materialien mit weniger fließfähigeren Konsistenzen und größerem Größtkorn als das Schwindschlauchverfahren. Aufgrund der Länge der Schwindrinne ist für das einseitige Einfüllen von nahezu selbstverdichtenden Materialien ein ausreichender Fließweg vorhanden, weswegen hier auf die Verwendung einer Rutsche beim Einbau verzichtet werden kann. Die Sicherstellung der konservierenden Lagerungsbedingung erfordert bei der Schwindrinne den höchsten Aufwand im Vergleich zu den anderen hier verwendeten Prüfverfahren und ist zudem noch am fehleranfälligen. Dennoch wirken sich kleinere Undichtigkeiten weit weniger stark auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformung aus als beim Schwindkegel. Zum einen wird senkrecht zur freien Oberfläche gemessen und zum anderen kann aufgrund der Probekörperlänge von 100 cm auf das Normieren der gemessenen Verformungen verzichtet werden.

Ein grundsätzlicher Nachteil ist sicherlich die Temperaturentwicklung im Probekörper infolge der Hydratation. Mit Lagerung des Prüfaufbaus in einem klimatisierten Raum kann aufgrund des hohen Volumens des Probekörpers der Forderung nach einer maximalen Temperaturerhöhung von 2 K [Ham06] während der Messung nicht entsprochen werden. Weiterhin kommt es bei anfänglich quellenden Materialien zu fehlerhaften spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen, da sich das Quellen senkrecht zur Messrichtung ausbreitet und sich aufgrund des nicht-geschlossenen Systems kein „Überdruck“ analog zum Schwindschlauch einstellt. Somit werden mit dem Schwindrinnenverfahren höhere Verformungen gemessen als mit dem Referenzverfahren.

5.3 Übertragbarkeit der einzelnen Prüfbedingungen auf reale Verhältnisse im Bauteil

Nach der Auswertung der Vor- und Nachteile der einzelnen Prüfverfahren stellt sich nun die Frage, ob real auftretende Verhältnisse im Bauteil durch die einzelnen Prüfbedingungen abgebildet werden können. Dabei existiert eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten, die lediglich mit dem Einsatz von hochfließfähigen nahezu selbstverdichtende Hochleistungsmörtel und -betone realisiert werden können. In Abhängigkeit des Anwendungsfalls variieren die Eigenschaften des Vergussmaterials, wobei die verwendeten Materialien, die nach [DAfStB06] klassifiziert werden, in der Regel sehr mehlkornreich und hochfest sind. Beides führt zu einer Erhöhung des autogenen Schwindens, welches nach der Richtlinie nicht gemessen wird, sondern über den Nachweis des Quellens des Materials nach 24 h ausgeschlossen wird. Da sämtliche, in dieser Arbeit untersuchten Materialien ausschließlich Schwindverformungen aufweisen, ist das Vorgehen der Richtlinie hier nicht ausreichend.

Für welchen Anwendungsfall nun welches Prüfverfahren möglichst aussagekräftige Ergebnisse erzielt, soll nachfolgend diskutiert werden.

Schwindschlauchverfahren

Durch die großen Abmessungen eines Grouted Joints bei einem Monopile mit einem angenommenen Durchmesser von 5,5 m, einer Übergreifungslänge von 8,0 m sowie einer Groutspaltdicke von 7,0 cm wird zum Verfüllen des Ringspalts ca. 5 m³ Material benötigt. Wird nun ein Teilstück in der Mitte des Grouted Joint betrachtet, kann wie im Schwindschlauch von einem geschlossenen System ausgegangen werden. Es kann unterstellt, dass die im Groutmaterial enthaltene Luft nach oben steigt und so das betrachtete Teilstück verlässt. Gleichzeitig steigt allerdings auch Luft aus dem Groutmaterial unterhalb des Teilstücks nach oben, wodurch der Anteil der Luft innerhalb des betrachteten Teilstücks immer gleich ist. Somit kann unterstellt werden, dass die enthaltene Luft nie das Teilstück verlässt und daher von einem geschlossenem System gesprochen werden kann. Darüber hinaus sorgt ein Quellen des Materials im noch frischen Zustand in Kombination mit den herrschenden Druckverhältnissen ähnlich wie in einem „blockierten“ Schwindschlauch zu einem Überdruck, der entgegen der folgenden Schwindverformungen wirkt und damit zu einer Reduzierung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen führt. Daher kann das Schwindverhalten vom Großteil des eingebauten Materials mit dem Schwindver-

halten im Schwindschlauch abgebildet werden. Ausgenommen davon sind jeweils die Bereiche an der Ober- und ggf. an der Unterkante des Grouted Joint.

Schwindkegelverfahren

Für das kraftschlüssige Vergießen von Stützenfüßen und/oder horizontaler Fugen ist die Kenntnis des Verformungsverhaltens der verwendeten Vergussmaterialien von entscheidender Bedeutung. Mit dem Schwindkegelverfahren lässt sich genau bestimmen in welcher Größenordnung und in welche Richtung sich die Oberfläche des eingebauten Materials bewegt. Dabei werden sowohl die Verformungen aus chemischem und autogenem Schwinden, als auch die Verringerung des Volumens durch aufsteigende Luft berücksichtigt. Falls im Gegensatz dazu, zu einem Ausdehnen des eingebauten Materials kommt, kann mit dem Schwindkegel das Quellen, abzüglich der Volumenverringerung, durch die evtl. aufsteigende Luft bestimmt werden. Somit kann in jedem Fall mit den Ergebnissen aus dem Schwindkegelverfahren eine präzise Aussage über eine sich einstellende Fuge oder dem kraftschlüssigen Verbund zwischen der Oberkante des Vergussmaterials und der Unterkante des aufgehenden Stahlbauteils getroffen werden.

Schwindrinnenverfahren

Aufgrund des großen Länge-zu-Höhenverhältnisses einer umlaufenden Vergussfuge am Turmfuß einer Onshore-Windenergieanlage sind bereits die geometrischen Randbedingungen mit denen aus dem Schwindrinnenverfahren vergleichbar. Hinzu kommt, dass sowohl die Vergussfuge, als auch die Schwindrinne nach oben hin offen sind. Somit wirken sich Setzungs- und Umlagerungseffekte sowie ein Entlüften des Materials nicht auf die Eigenschaften in Fugenrichtung bzw. Messrichtung bei der Schwindrinne aus. Zudem führt ein Quellen des Materials voraussichtlich zu einer leichten Anhebung der Oberfläche und nicht zu einem Überdruck in Umfangsrichtung der Vergussfuge und letztlich nicht zu einer Reduktion der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen. Somit können die realen Schwindbedingungen in der Vergussfuge sehr genau mit den Prüfbedingungen im Schwindrinnenverfahren abgebildet werden.

Kapitel 6

Bewertung des Temperatureinflusses auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen

6.1 Allgemein

In Kapitel 4.4 wurde der Temperatureinfluss sowohl auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen als auch auf die Entwicklung der Zwangsspannungen untersucht. Mit der Gegenüberstellung von freien und dehnungsbehinderten (Kapitel 0) Verformungen soll nun einerseits eine endgültige Aussage über den Temperatureinfluss auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen getroffen werden. Andererseits wird die Abschätzbarkeit der sich entwickelnden Zwangsspannungen anhand der freien autogenen Schwindverformungen geprüft.

Weiterhin stellt sich die Frage über welchen Zeitraum hinweg es zu einer Verformung des Probekörpers infolge des spannungsinduzierenden autogenen Schwindens kommt. Daher soll mit Hilfe der zeitlichen Entwicklung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen eine Empfehlung über die notwendige Dauer der Schwindmessungen in Abhängigkeit der Prüftemperatur abgegeben werden.

6.2 Gegenüberstellung der freien und dehnungsbehinderten autogenen Schwindverformungen

Aufgrund der sehr guten Übereinstimmung von t_{Amax} und t_{Ring} bei einer Prüftemperatur von 20 °C, 30 °C und teilweise bei 5 °C werden diese beiden Zeitpunkte als Startpunkte der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen im Schwind-schlauch- bzw. Schwindringverfahren verwendet. Somit werden beide Startpunkte direkt aus den jeweiligen gemessenen Verformungen bestimmt, was eine parallele Bestimmung der *time zero* überflüssig macht und somit mögliche Fehlerquellen durch Übertragungsfehler von vornherein ausschließt. Sämtliche in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse entstammen den Untersuchungen der vorherigen Kapitel allerdings hier mit dem Fokus auf den resultierenden Endschwindwerte bei variierenden

Prüftemperaturen. Durch Verschieben der gemessenen Verformungen auf der Abszisse um den jeweiligen Startpunkt t_{Ring} bzw. t_{Amax} zum Koordinatenursprung wird eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Verläufe bei unterschiedlicher Prüftemperatur erreicht. In den folgenden Abbildungen sind auf der linken Seite immer die Ergebnisse der freien und auf der rechten Seite immer die der dehnungsbehinderten autogenen Schwinduntersuchungen dargestellt.

Die relative Schwindgeschwindigkeit von Grout 1 ermittelt mit dem Schwindschlauchverfahren erreicht erwartungsgemäß bei 30 °C den größten und bei einer Prüftemperatur von 5 °C den kleinsten Wert (vgl. A-5). Die Dauer, in der eine Verformungsgeschwindigkeit größer null gemessen wird, ist hingegen bei 5 °C am längsten, wodurch sich die Geschwindigkeitsverläufe mit steigender Prüftemperatur von gedrungen zu hoch und steil verändern. Daraus ergibt sich ebenfalls, dass die einzelnen Hochpunkte der Verformungsgeschwindigkeit unterschiedliche Abstände zur maximalen Verformungsbeschleunigung haben und somit zeitlich voneinander abweichen. Nach ca. 12 h bzw. 24 h stellt sich eine merkliche Abflachung der Verläufe ein, die sich bis zum Untersuchungsende (84 h nach t_{Amax}) bei keiner untersuchten Prüftemperatur einer Horizontale annähern und somit weiterhin ein minimaler Anstieg der Schwindverformungen zu verzeichnen ist. Die angegebenen Endschwindwerte beziehen sich daher auf das Untersuchungsende und liegen bei allen drei Prüftemperaturen in einem Bereich von 700 bis 750 $\mu\text{m/m}$ (vgl. Abbildung 6-1). Somit ergeben sich sehr ähnliche Endschwindwerte, die bei einer Prüftemperatur von 5 °C am höchsten sind.

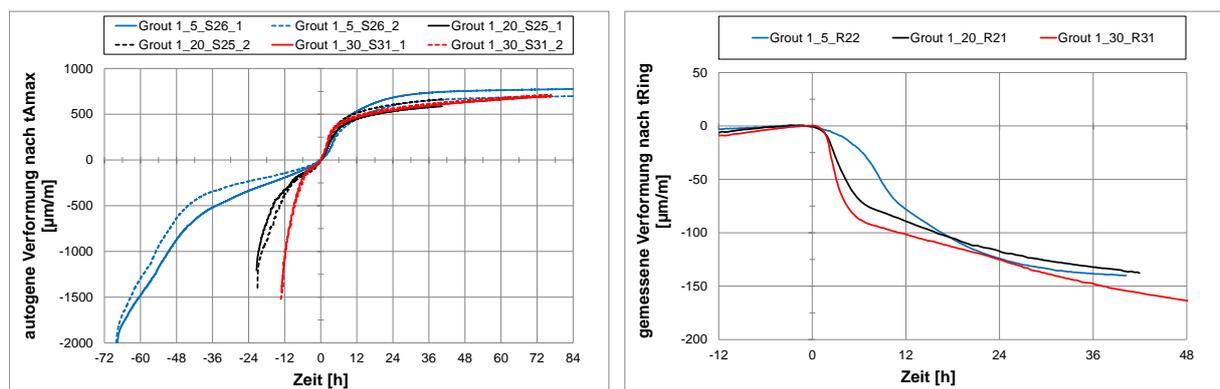


Abbildung 6-1: Grout 1 - Schwindverformung und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Sämtliche Beobachtungen wurden auch bei der Auswertung der Schwindringverformungen gemacht (vgl. Kapitel 4.4.4). Einziger Unterschied dabei ist, dass der Hoch-

punkt bei der Prüftemperatur von 5 °C erst ca. 10 h nach t_{Ring} und nicht wie im Schwindschlauchverfahren bereits ca. 6 h nach t_{Amax} erreicht wird, was auf die bereits festgestellten unterschiedlichen Hydratationsverläufe abhängig vom verwendeten Prüfverfahren hinweist. Bis zum Ende der Untersuchungen kann ebenfalls bei allen drei Prüftemperaturen keine Annäherung an einen Grenzwert festgestellt werden, wobei sich Verformungswerte von 125 bis 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ ergeben. Weiterhin lässt sich auch bei den dehnungsbehinderten Untersuchungen erkennen, dass unterschiedliche Prüftemperaturen lediglich in den ersten 12 bzw. 24 h zu gewissen Unterschieden in den autogenen Schwindverformungen führen, dabei jedoch die einzelnen Endschwindwerte nicht grundlegend beeinflussen. Da die Charakteristik der Verläufe in Abhängigkeit der unterschiedlichen Prüftemperaturen in beiden Prüfverfahren nahezu identisch ist, kann davon ausgegangen werden, dass das freie autogene Schwinden bei Grout 1 direkt spannungsinduzierend wirkt und das unabhängig von der Temperatur.

Sowohl die gemessenen (ca. 1800 $\mu\text{m}/\text{m}$) als auch die spannungsinduzierenden (ca. 500 $\mu\text{m}/\text{m}$) autogenen Schwindverformungen sind bei Grout 3 kleiner als bei Grout 1 (vgl. Abbildung 6-2, links). Der höchste Endschwindwert wird wiederum bei einer Prüftemperatur von 5 °C erreicht, wobei die Ergebnisse bei 20 und 30 °C nahezu identisch sind. Die Auswertung der Schwindgeschwindigkeit zeigt ein ähnliches Bild wie bei den Untersuchungen von Grout 1, mit vergleichbaren Zeitpunkten für t_{Vmax} bei 20 °C und 30 °C sowie einem zeitlich nach rechts verschobenem t_{Vmax} mit einem gedrungeneren Verlauf bei 5 °C (vgl. A-5).

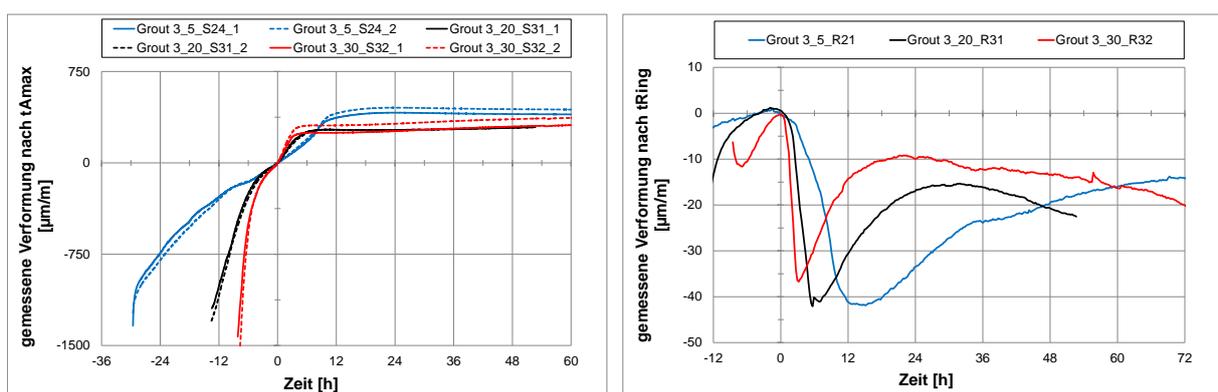


Abbildung 6-2: Grout 3 - Schwindverformung und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Auch bei den dehnungsbehinderten Messungen mit dem Schwindringverfahren werden mit ca. 40 $\mu\text{m}/\text{m}$ im Vergleich zu Grout 1 deutlich kleinere Stauchungen des

Stahlrings durch den aufschumpfenden Grout 3 gemessen. Dabei wird bei einer Prüftemperatur von 30 °C die geringste sowie bei 20 °C und 5 °C eine vergleichbare maximale Stauchung ermittelt. Im weiteren Verlauf kommt es bei allen drei Prüftemperaturen zu einem Rückgang der Stauchung des Stahlrings, was sich in den linear gemessenen autogenen Schwindverformungen durch einen leichten Rückgang der Verformungen nach dem charakteristischen starken Anstieg bereits vermuten lässt. So reduziert sich die gemessene Verformung im Schwindring um bis zu 75 % in einem Zeitraum von 12 bis 72 Stunden.

Bis zum Untersuchungsende werden bei den Prüftemperaturen von 20 °C und 30 °C im weiteren Verlauf wiederum ein leichter Anstieg der freien autogenen Schwindverformungen beobachtet, wodurch es ebenfalls zu einem erneuten Anstieg der Stauchungen des Stahlrings kommt. Bei 5 °C hingegen lässt sich zum Untersuchungsende (72 Stunden nach t_{Amax}) noch keine erneute Stauchung des Stahlrings detektieren.

Die Charakteristik der freien und dehnungsbehinderten autogenen Schwindverformung von UHPC 5 zeigen einige Parallelen zu den Verläufen bei Grout 3 (vgl. Abbildung 6-3). Als erstes fällt auf, dass die Werte in den Schwindschläuchen bei 20 und 30 °C recht dicht beieinander liegen und der Maximalwert wiederum bei einer Prüftemperatur von 5 °C erreicht wird. Insgesamt werden jedoch eher freie autogene Schwindverformungen in der Größenordnung von Grout 1 gemessen (bis zu 750 $\mu\text{m}/\text{m}$). Obwohl die Werte im Bereich von Grout 1 liegen, fallen die dehnungsbehinderten Verformungen ähnlich wie bei Grout 3 deutlich geringer aus. Zudem ist der Verlauf der Verformungen durch den recht steilen Anstieg zu Beginn und der folgenden Annäherung an eine Horizontale wiederum mit Grout 3 vergleichbar.

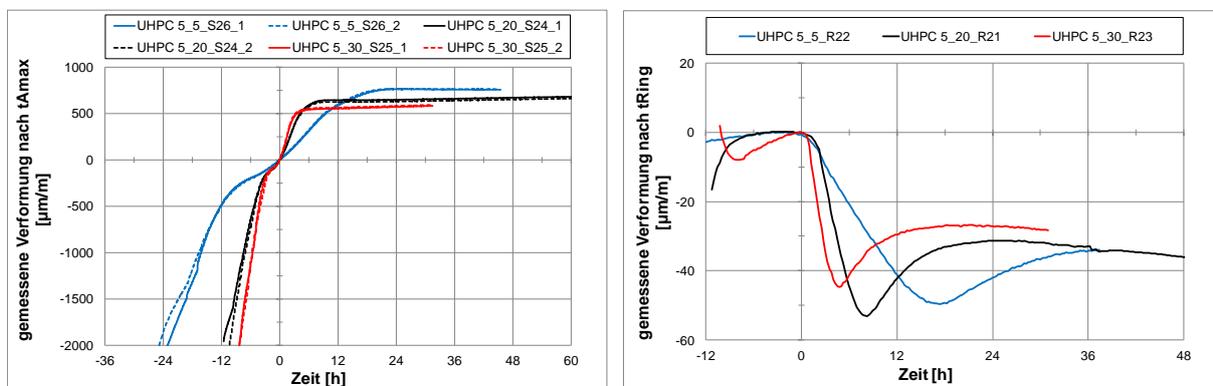


Abbildung 6-3: UHPC 5 - Schwindverformung und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Weiterhin ist bei den dehnungsbehinderten Verformungen nach Erreichen der Maximalwerte das Phänomen der Relaxation bei allen drei Prüftemperaturen zu beobachten. Vor dem Rückgang der Stauchung des Stahlrings wird bei 20 °C mit ca. 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ der größte und bei einer Prüftemperatur von 30 °C der kleinste Wert der dehnungsbehinderten Verformungen erreicht. Die Besonderheit hier ist, dass bei den linear gemessenen autogenen Schwindverformungen nach dem starken Anstieg der Verformungen keinerlei Quellvorgänge beobachtet werden können. Somit kann die Expansion des Stahlringes nicht durch ein Quellen des UHPCs erklärt werden, wodurch die Entspannung des Stahlringes allein auf die Relaxation des UHPC 5 zurückzuführen ist.

Die Relaxation von Beton beruht auf dessen Kriechvermögen. Typischerweise tritt die Relaxation bei konstanter Druckbeanspruchung auf und führt dazu, dass sich die resultierenden Spannungen durch Umlagerung des Gefüges in Abhängigkeit des Betonalters mit der Zeit verringern. Dieser Effekt ist auch bei konstanter Zugbeanspruchung zu beobachten, wobei es dabei laut [Weig40] noch zu einer größeren Verringerung der messbaren Spannungen innerhalb des Betongefüges kommt. Im Schwindringverfahren kommt es nicht direkt zu einer von außen aufgezwungenen Zugverformungen, sondern eher zu einer selbstinitiierenden Zugspannung in Umlaufrichtung des Betonrings, die aus dem autogenen Schwinden in Kombination mit dem innenliegenden dehnungsbehindernden Stahlring resultiert [Epp10]. Durch die stetige Festigkeitsentwicklung des jungen UHPC 5 kommt es zu Veränderung des Kriechvermögens, wodurch es im weiteren Verlauf bei sämtlichen Prüftemperaturen wiederum zu einer Stauchung des Schwindrings kommt.

Analog zu Grout 3 lassen sich bei den Prüftemperaturen 20 und 30 °C nach der Entspannung des Stahlrings eine erneute Stauchung beobachten, wohingegen bei 5 °C bis zum Ende der Untersuchung keine eindeutige Aussage möglich ist.

Die mit dem Schwindschlauchverfahren gemessenen Verläufe von Grout 2 unterscheiden sich insofern von den bereits diskutierten, als das zu Beginn der Messungen bei sämtlichen Prüftemperaturen ein Quellvorgang beobachtet wird (vgl. Abbildung 6-4). Dieser geht nach kurzer Zeit direkt in eine Schwindverformung über, die analog zu den anderen Materialien durch einen steilen Anstieg der Verformungen nach $t_{A_{\max}}$ gekennzeichnet sind. Dabei ist auch hier die Steigung bei 5 °C am geringsten und bei 30 °C am größten. Eine weitere Besonderheit von Grout 2 ist, dass bereits kurz nach Erreichen der maximalen spannungsinduzierenden Verformungen im Schwindschlauchverfahren wiederum ein leichtes Quellen beobachtet wird. Im Anschluss werden bei sämtlichen Prüftemperaturen weitere Schwindverfor-

Bewertung des Temperatureinflusses auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen

mungen detektiert, wobei die Dauer der Quellvorgänge mit steigender Temperatur geringer wird. Der größte Endschwindwert zum Ende der Untersuchung wird mit ca. 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ bei 5 °C erreicht.

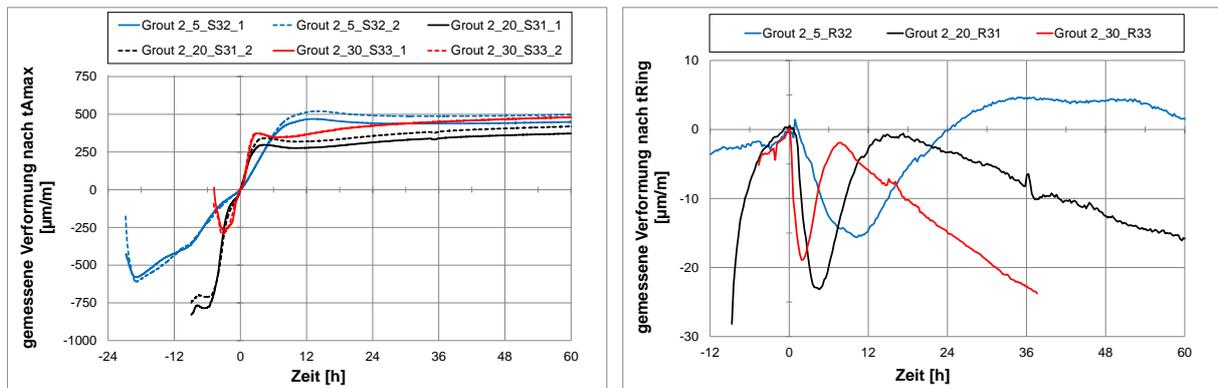


Abbildung 6-4: Grout 2 - Schwindverformungen und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Die Folge der erkennbaren Quellvorgänge im Verlauf der freien autogenen Schwindverformung ist ein deutlicher Rückgang der Umschnürungswirkung und damit die Entspannung des Schwindrings. Obwohl die Quellvorgänge im Schwind Schlauch vom Wert deutlich geringer als die anfänglichen Schwindverformungen sind, kommt es im Schwindring bei einer Prüftemperatur von 20 und 30 °C zu einem nahezu vollständigen Rückgang der Schwindringstauchung. Bei der Prüftemperatur von 5 °C werden sogar Verformungen über dem Wert zum Zeitpunkt t_{Ring} gemessen, was in Kapitel 0 bereits erläutert wurde. Der Vorgang der Relaxation kann hier ausgeschlossen werden, da nach der Entspannung des Schwindrings bis zum Untersuchungsende zumindest bei den Prüftemperaturen von 20 und 30 °C eine stetig linearer steigende Schwindverformung detektiert wird. Dabei wird nach 36 h und einer Prüftemperatur von 30 °C ein Schwindwert unterhalb des Minimalwertes direkt nach t_{Ring} erreicht. Im Vergleich dazu wird im Zeitraum vom Ende der Quellvorgänge im Schwind Schlauchverfahren bis zu 36 h nach t_{Ring} ein Zuwachs der Verformungen von ca. 370 auf 470 $\mu\text{m}/\text{m}$ festgestellt. So führen lediglich 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ gemessen im Schwind Schlauchverfahren zu höheren Verformungen im Schwindring als die bis zum Einsetzen des Quellens gemessenen 370 $\mu\text{m}/\text{m}$ im Schwind Schlauch. Bei einer Prüftemperatur von 5 °C lassen sich derartige Beobachtungen nicht machen, was allerdings auch mit dem Zeitpunkt des Untersuchungsendes zusammenhängt.

Die Verläufe von Grout 4 zeigen sowohl im Schwindschlauch- als auch im Schwindringverfahren einige Besonderheiten. Dabei kommt es bei den freien autogenen Schwindverformungen noch vor t_{Amax} bei allen Prüftemperaturen zu Quellvorgängen, die bei 5 °C den größten und bei 20 °C den geringsten Wert erreichen (vgl. Abbildung 6-5). Darauf folgen Schwindverformungen zum Zeitpunkt des Untersuchungsendes im Bereich von 300 $\mu\text{m}/\text{m}$. Hierbei kommt es nicht, wie bei den vorherigen Materialien, zu dem klassischen Schwindverlauf, sondern lediglich zu einem langsamen und stetigen Anstieg der Schwindverformungen. Zusätzlich lässt sich keine Annäherung an Horizontale beobachten, wobei die Höhe der Verformung bei 5 und 30 °C nahezu identisch und bei 20 °C etwas geringer ausfällt und das obwohl im Vorfeld deutlich unterschiedliche Quellverformungen festgestellt wurden.

Weiterhin lassen sich bei den relativen Schwindgeschwindigkeiten sowohl im Schwindschlauch als auch im Schwindring ab t_{Amax} bzw. t_{Ring} nahezu identische Verläufe (vgl. A-5) beobachten. Das bedeutet, dass sobald der Startpunkt des autogenen Schwindens erreicht ist, die Geschwindigkeit der Schwindverformungen unabhängig von der Temperatur nahezu gleich ist.

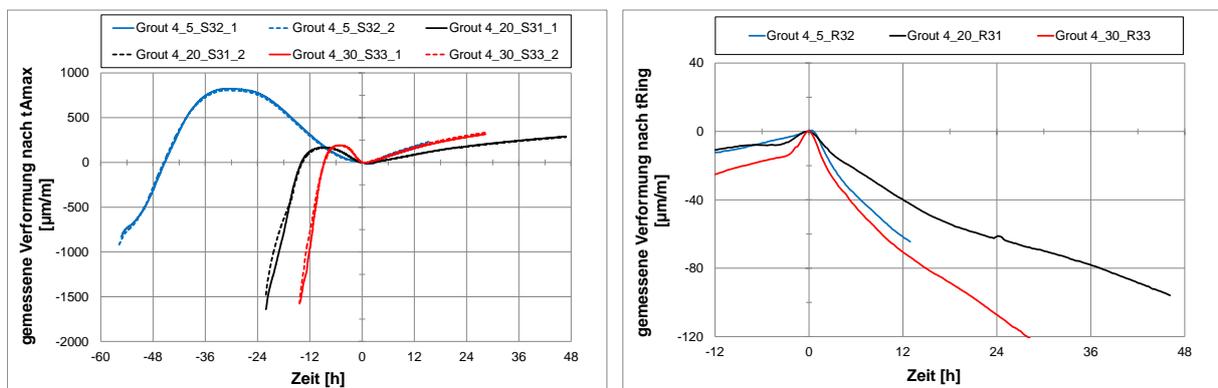


Abbildung 6-5: Grout 4 - Schwindverformungen und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen

Die Quellvorgänge im Schwindschlauch treten bei sämtlichen Prüftemperaturen jeweils vor dem Zeitpunkt t_{Amax} auf. Das Ausdehnen des Stahlrings kurz vor dem Zeitpunkt t_{Ring} ist unabhängig von den Quellvorgängen und resultiert aus dem zeitgleichen Auftreten der maximalen Hydratationstemperatur (vgl. A-1.4). Die Ringverformungen zeigen ähnlich wie bei Grout 1 keinerlei Entspannung des Schwindrings. Im Vergleich zu dem Verlauf bei Grout 1 ist die Steigung der Verformungen im Schwindring deutlich steiler und erreicht bei einer Prüftemperatur von 30 °C bereits 24 h nach t_{Ring} Werte von 120 $\mu\text{m}/\text{m}$. Demgegenüber stehen die freien autogenen Schwindverfor-

mungen, die mit ca. 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ deutlich geringer sind als die 750 $\mu\text{m}/\text{m}$ die mit dem Schwindschlauchverfahren bei Grout 1 gemessen wurden, wobei sich dort nach 36 h ein Wert von 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ ergibt. Da bei Grout 4 noch keine Annäherung an eine Horizontale erkennbar ist, kann sich das Verhältnis bei längeren Untersuchungszeiten ändern.

6.3 Spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen über die Zeit

Um eine Aussage über die notwendige Dauer der Verformungsmessungen machen zu können, ist die Entwicklung der Höhe der Schwindwerte über die Zeit zu ermitteln. Bei reinen Zementleimen ist davon auszugehen, dass ein Großteil der autogenen Schwindverformungen bereits in den ersten 24 bis 48 h abgeschlossen ist [u.a. Fon06]. Bei der Untersuchung von Hochleistungsmörtel und -betonen muss die verzögernde Wirkung des Fließmittels berücksichtigt werden, weshalb eine Messdauer von sieben Tagen nicht ungewöhnlich ist [Lur07]. Dabei ist der Einfluss der Temperatur noch nicht berücksichtigt. Die Reduzierung der Prüftemperatur führt zu einer Verlangsamung der Hydratation und damit auch zu einem verspäteten Startpunkt der autogenen Schwindverformungen.

Zur besseren Übersicht sind nachfolgend lediglich die Verformungen nach der jeweiligen *time zero* dargestellt. So beziehen sich die angegebenen Zeiten auf den Startpunkt der autogenen Messungen, wodurch die jeweiligen Dauer von Beginn der Verformungsmessung bis zur *time zero* vernachlässigt werden, weshalb hier nie von einer Gesamtdauer der Verformungsmessung gesprochen wird.

Die Ermittlung der notwendigen Dauer der Verformungsmessung erfolgt über den Vergleich der auftretenden Schwindwerte zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Dazu dient der Schwindwert, der 24 h nach t_{Amax} bzw. t_{Ring} bei einer Prüftemperatur von 20 °C ermittelt wird, als Referenzwert, der normiert den Wert 1 bzw. 100 % ergibt. Sämtliche übrigen Werte werden auf der Basis des Referenzwerts normiert und unterscheiden sich durch die entsprechende Prüftemperatur. Mit Hilfe des so ermittelten prozentualen Verlaufs, kann zu jedem Zeitpunkt angegeben werden, wie groß die Verformung im Verhältnis zum Referenzwert ist. So lässt sich zum einen abschätzen ab wann der Großteil der autogenen Schwindverformungen abgeschlossen ist und wie lange die Verformungsmessung mindestens dauern muss. Zum anderen sind Unterschiede in der Höhe und dem Verlauf der autogenen Schwindverformungen bei verschiedenen Prüftemperaturen sehr gut erkennbar.

Aufgrund von festgestellten Abweichungen bei einer Prüftemperatur von 5 °C zwischen t_{Ring} und t_{Amax} werden hier sowohl der Verformungsverlauf ab dem Zeitpunkt der maximalen Verformungsbeschleunigung (t_{Amax}) und der ersten Spannungsentwicklung im Schwindringverfahren (t_{Ring}) dargestellt.

Grundsätzlich lassen die Ergebnisse die Einordnung der Materialien in drei verschiedene Gruppen zu. Die erste Gruppe beinhaltet die Materialien, bei denen noch bis zum Ende der Untersuchungen leichte Verformungszuwächse zu beobachten sind, eine Annäherung an eine Horizontale jedoch bereits erkennbar ist. Die zweite Gruppe, die lediglich aus einem Material besteht, zeigt bereits nach 24 h bei sämtlichen Prüftemperaturen einen nahezu konstanten Schwindwert, weswegen dabei davon ausgegangen werden kann, dass die autogenen Schwindverformungen bereits abgeschlossen sind. Die dritte Gruppe beinhaltet wiederum ein Material, welches den Referenzwert nach 24 h deutlich überschreitet und bis zum Ende der Verformungsmessung keine Annäherung an eine Horizontale zeigt.

Nach 12 h sind die autogenen Schwindverformungen bei Grout 1 bereits auf circa 85 % des Referenzwertes angestiegen (Abbildung 6-6). Da sich die restlichen 15 % in den darauffolgenden 12 h ergeben, ist davon auszugehen, dass die Verformungen direkt nach t_{Amax} sehr hoch sind und bereits nach 12 h deutlich geringer ansteigen. Bei der Auswertung nach t_{Amax} ist kein wesentlicher Temperatureinfluss zu erkennen. Die autogenen Schwindwerte liegen nach 40 h bei 20 °C und 30 °C auf einem Niveau und unterscheiden sich bei 5 und 30 °C nach 76 h um 5 % bezogen auf den Referenzwert. Während bei 30 °C die Schwindwerte noch ansteigen, kommen diese bei 5 °C bereits zum Erliegen. Dennoch ist auch bei der Prüftemperatur von 30 °C eine Annäherung an eine Horizontale zu erahnen, da sich in den letzten 16 h nur noch eine Steigerung des autogenen Schwindwerts von 6 % ergibt. Da die Schwindverformungen bei beiden Temperaturen den Referenzwert überschreiten, wird auf Grundlage des letzten Wertes und dem erreichten Wert nach 24 h ein temperaturabhängiger Referenzwert ermittelt. Dieser ergibt sich bei 5 °C zu 87 % und bei 30 °C zu 78 % und gibt an welcher Anteil der gemessenen autogenen Schwindverformungen bereits nach 24 h aufgetreten ist. Da bei 30 °C jedoch ein Endschwindwert erreicht ist, liegt der exakte Wert noch darunter. Bei 20 °C wurde aufgrund des frühen Messendes auf die Neubestimmung des Referenzwertes verzichtet.

Durch die Abweichung von t_{Amax} und t_{Ring} (ca. 6 h) ergibt sich bei der Auswertung nach t_{Ring} folgerichtig ein anders Bild des Verformungsverlaufes (vgl. Abbildung 6-6). Die Werte bei 5 °C erreichen demnach nach 74 h 134 % bezogen auf den Referenzwert. Qualitativ liegen die Verläufe von 20 und 30 °C noch sehr dicht beieinander, wobei der Endwert bei 30 °C jetzt nur noch 116 % bezogen auf den Referenzwert

Bewertung des Temperatureinflusses auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen

beträgt. Anhand dieser Auswertung stellen sich bei einer Prüftemperatur von 5 °C die größten autogenen Schwindverformungen ein, während bei 20 und 30 °C kein eklatanter Unterschied existiert.

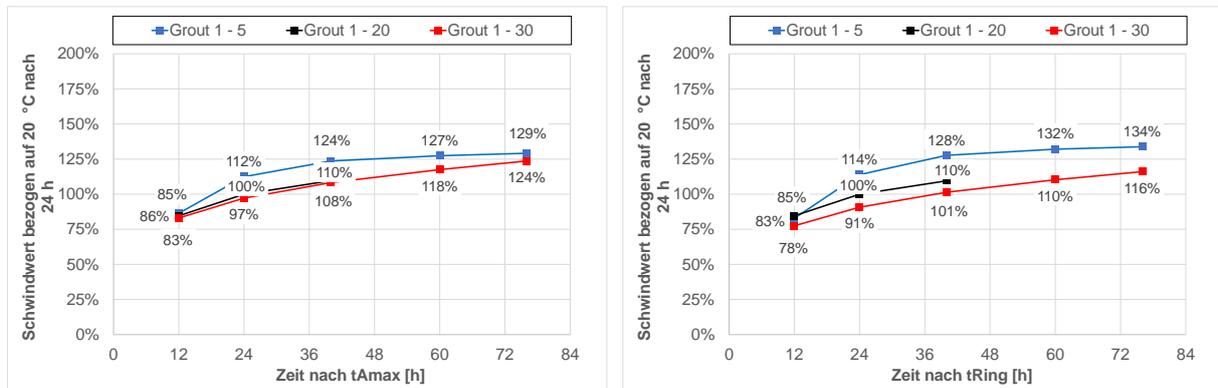


Abbildung 6-6: Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei Grout 1

Die Verläufe der Schwindwerte bei Grout 3 sind zumindest bei 20 und 30 °C vergleichbar mit den Verformungsverläufen von Grout 1. Einziger Unterschied dabei ist, dass nach 12 h bereits Werte in Höhe des Referenzwertes festgestellt werden. Erst nach 24 h steigen die Verformungen an und erreichen zum Untersuchungsende 107 % bei 20 und 124 % bei 30 °C. Der ermittelte temperaturabhängige Referenzwert bei 30 °C bezogen auf den Schwindwert nach 72 h ergibt, dass nach 24 h ca. 81 % der autogenen Verformungen erreicht werden, wobei bereits nach 12 h ein ähnlicher Wert erreicht wird. Das spricht wiederum dafür, dass ein Großteil der Verformungen in den ersten 12 bis 24 h auftreten.

Im Gegensatz zu Grout 1 ergibt sich bei Grout 3 mit einer Prüftemperatur von 5 °C ein im Vergleich zu den anderen beiden Temperaturen ein grundsätzlich anderer Schwindverlauf. Nach der Auswertung mit t_{Amax} ergeben sich zum einen deutlich höhere autogene Schwindverformungen mit Werten nach 96 h von 208 % bezogen auf den Referenzwert. Zum anderen steigen die autogenen Schwindverformungen nach 12 h innerhalb von weiteren 12 h nochmals um 80 % an und fallen dann sogar von 211 % auf die zuletzt gemessenen 208 %. Das bedeutet, dass die autogenen Schwindverformungen nach 24 h komplett abgeschlossen sind und dass es im Folgenden zu einem leichten Quellen des Materials kommt. Dieses lässt sich auch bei den übrigen Temperaturen beobachten, geht allerdings aus dem Diagramm nicht hervor, da dieser Vorgang zwischen 0 und 12 h sowie zwischen 12 und 24 h bei 20 °C auftritt. Das leichte Quellen geht dabei allerdings auch wieder in eine Schwind-

verformung über, was an dem Anstieg der Schwindverformungen im weiteren Verlauf zu erkennen ist.

Auch bei Grout 3 besteht bei 5 °C eine deutliche Differenz zwischen t_{Amax} und t_{Ring} . Da t_{Ring} später auftritt als t_{Amax} verringern sich die maximalen autogenen Schwindverformungen auf 150 % bezogen auf den Referenzwert (vgl. Abbildung 6-7). Die einzelnen Charakteristika der Verläufe verändern sich im Vergleich zu der Auswertung nach t_{Amax} bei sämtlichen Prüftemperaturen hingegen nicht. Auch hier ergibt sich bei 5 °C das höchste autogene Schwindmaß und dieses, unabhängig von der Auswertemethode.

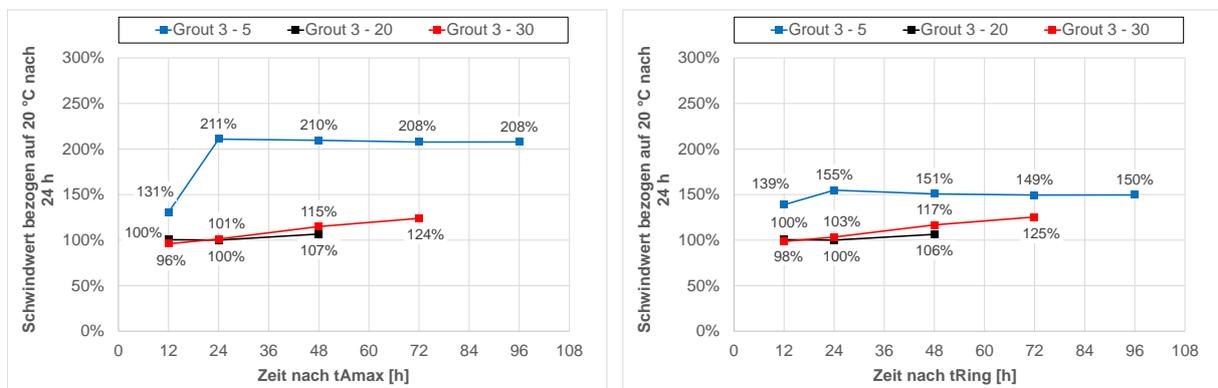


Abbildung 6-7: Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei Grout 3

Die Schwindverformungen von Grout 2 steigen ebenfalls bis zum Ende der Untersuchung an, wobei sich auch hier durch das Abnehmen der Steigerungsrate eine Annäherung an eine Horizontale erahnen lässt (vgl. Abbildung 6-8). Die Schwindverformungen erreichen auch hier bereits nach 12 h fast den Referenzwert und übersteigen diesen um 22 % nach 74 h. Die Ermittlung des temperaturabhängigen Referenzwerts ergibt einen Wert von ca. 82 %, was dafür spricht, dass ein Großteil der autogenen Schwindverformungen bereits in den ersten 12 bis 24 h auftreten.

Die Charakteristik des Verlaufs bei 30 °C ist wiederum mit dem bei 20 °C vergleichbar, wobei die Schwindwerte jeweils etwa ca. 30 % höher sind. Auch der temperaturabhängige Referenzwert nach 74 h ist mit 88 % höher als bei den Untersuchungen bei 20 °C. Nach bereits 12 h stellt sich bei einer Prüftemperatur von 5 °C mit 153 % der größte Schwindwert ein. Dieser Wert fällt dann nach weiteren 12 h ähnlich wie bei Grout 3 ab und fällt mit ca. 6 % deutlich höher aus. Das Quellen geht im folgenden Verlauf wiederum in eine Schwindverformung über. Ähnlich wie bei Grout 3 ist dieses auch bei den übrigen Prüftemperaturen zu beobachten, lässt sich aufgrund

Bewertung des Temperatureinflusses auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen

der gewählten Zeitschritte jedoch nicht in diesem Diagramm erkennen. Die Auswertung nach t_{Amax} ergibt das größte autogene Schwindmaß bei einer Prüftemperatur von 5 °C, wobei nach 60 h der Abstand zum Verlauf bei 30 °C nahezu null ist.

Obwohl bei diesem Material die Startpunkte t_{Amax} und t_{Ring} zeitlich über den gesamten Temperaturbereich nicht wesentlich differieren, kommt es bei der Auswertung nach t_{Ring} zu einer Verschiebung der maximalen autogenen Schwindverformung (vgl. Abbildung 6-8). Dabei sind die Verläufe weiterhin qualitativ mit denen aus t_{Amax} vergleichbar, jedoch springt der Verlauf bei 5 °C unter den von 20 °C. Somit wird der höchste autogene Schwindwert nun bei einer Prüftemperatur von 30 °C erreicht, wobei sich der Abstand zu dem Verlauf bei 20 °C verringert.

Hieran wird nochmal deutlich, wie stark das autogene Schwindmaß vom Zeitpunkt der *time zero* beeinflusst wird. Das hängt damit zusammen, dass die autogenen Verformungen im Bereich von der *time zero* sehr groß sind und selbst kleine zeitlichen Änderungen direkt zu andern resultierenden autogen Schwindwerten führt.

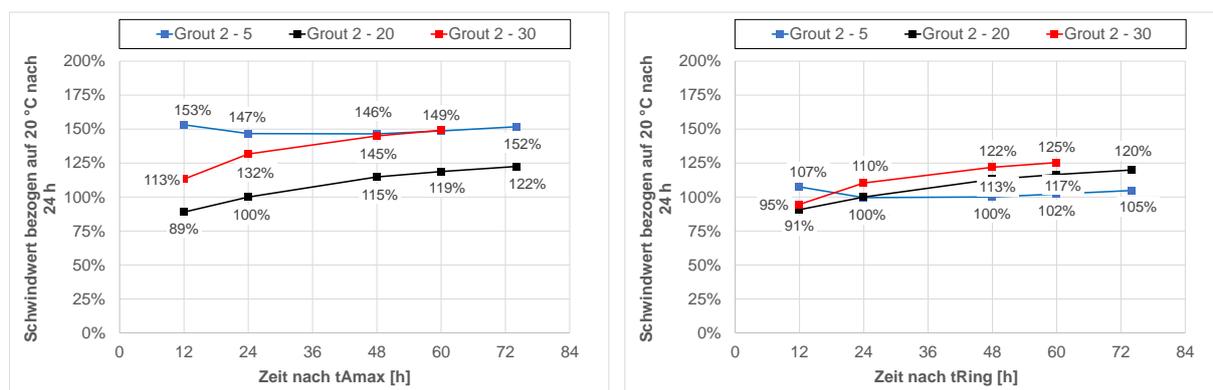


Abbildung 6-8: Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei Grout 2

Grout 4 ist das einzige Material, das bei sämtlichen Prüftemperaturen von Beginn an nicht den klassischen Schwindverlauf zeigt. So folgt dem anfänglichen Verkürzen des Probekörpers nicht ein Plateau sondern ein ausgiebiges Quellen des Materials, welches bei einer Prüftemperatur von 5 °C am größten ist. Dennoch kommt es ab dem Zeitpunkt der *time zero* zu autogenen Schwindverformungen, die in Bezug auf den Referenzwert nach 24 bis zum Untersuchungsende deutlich ansteigen. Nach nur 46 h Stunden erreicht der Schwindwert bei 20 °C einen Wert von 158 % bezogen auf den Referenzwert. Somit ergibt sich ein temperaturabhängiger Referenzwert von ca. 63 %, was dafür spricht, dass die autogenen Schwindverformungen noch weiter ansteigen werden.

Die Schwindwerte bei einer Temperatur von 30 °C sind wiederum höher als bei 20 °C. Auch hier ist das Schwindverhalten nicht mit den vorherigen Materialien vergleichbar, da hier durch die Steigerung der Schwindwerte keine Annäherung an eine Horizontale zu erahnen ist. Der anfänglich (12 h) höchste Schwindwert ergibt sich wiederum bei einer Prüftemperatur von 5 °C. Da hier die Zeit von Beginn der Messung und der *time zero* sehr hoch war (ca. 60 h) lässt sich der weitere Verlauf der Schwindverformungen leider nicht mehr darstellen. Abbildung 6-5 nach zur folgern, ist ein ähnlich großer Anstieg wie bei den beiden anderen Prüftemperaturen zu erwarten, wodurch sich wiederum der höchste autogene Schwindwert bei 5 °C ergibt.

Dieses gilt ebenfalls für die Auswertung nach t_{Ring} , wie in Abbildung 6-9 deutlich zu erkennen ist.

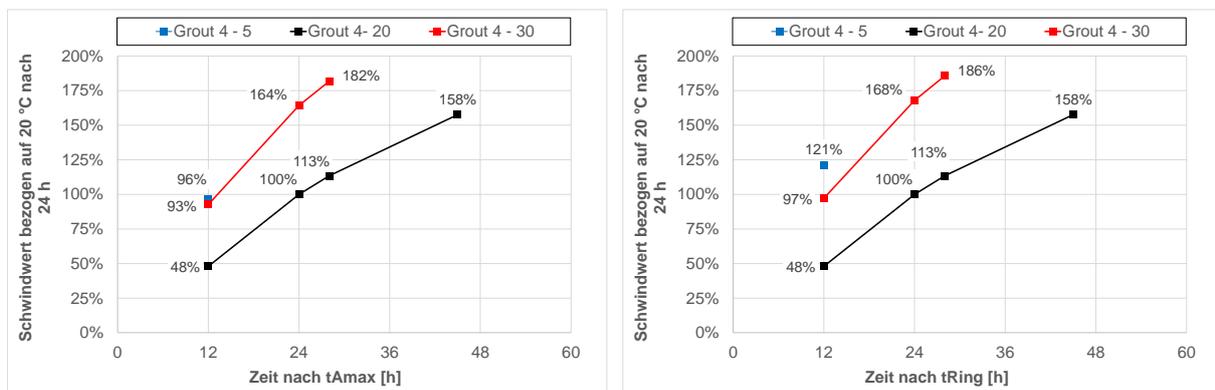


Abbildung 6-9: Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei Grout 4

Die Besonderheit von UHPC 5 ist, dass bereits nach 12 h der Großteil der autogenen Schwindverformungen abgeschlossen ist. So steigt bei einer Prüftemperatur von 20 °C der Schwindwert von 99 % nach 12 h auf 105 % nach 60 h bezogen auf den Referenzwert. Gleiches gilt für den Verlauf bei 30 °C, wobei die Schwindwerte ca. 7 % unterhalb von den Werten bei 20 °C liegen.

Der Verlauf bei 5 °C ist vergleichbar mit dem bei Grout 3, da auch hier eine deutliche Steigerung der Schwindverformung zwischen 12 und 24 h detektiert wird. Zum Ende der Untersuchung fällt dieser wiederum leicht auf 120 % bezogen auf den Referenzwert ab. Somit ergibt sich hier mit abfallender Prüftemperatur ein höheres autogenes Schwinden.

Durch die Differenzen zwischen t_{Amax} und t_{Ring} ergibt sich bei der Auswertung nach t_{Ring} eine andere Reihenfolge bzgl. des Einflusses der Prüftemperatur auf das autogene Schwindmaß. Wie in Abbildung 6-10 dargestellt, verringern sich die autogenen

Schwindwerte bei 5 °C, sodass sich hier ähnliche Verformungen ergeben, wie bei 30 °C. Somit wird das größte autogene Schwindmaß bei einer Prüftemperatur von 20 °C ermittelt.

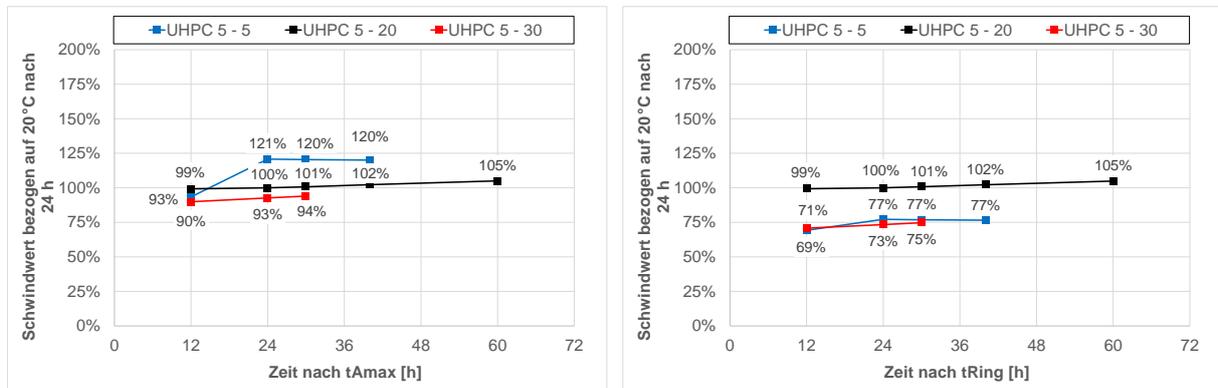


Abbildung 6-10: Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei UHPC 5

Generell lässt sich feststellen, dass bereits nach 12 h die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bei einer Prüftemperatur von 5 °C auf einem ähnlichen Niveau, wie die Verläufe bei den höheren Prüftemperaturen sind. Dabei spielt es keine Rolle wieviel Zeit zwischen dem Beginn der Messungen und dem Erreichen von t_{Amax} bzw. t_{Ring} vergangen ist. Die notwendige Prüfdauer für die Bestimmung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen kann anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht exakt bestimmt werden. So kommt es bei den unterschiedlichen Materialien bereits bei einer Prüftemperatur von 20 °C zu großen Schwankungen bei den prozentual ermittelten Schwindwerten nach 24 h bezogen auf den zum Untersuchungsende ermittelten Wert. Beim UHPC erreichen die Schwindwerte nach 24 h, bei einer Untersuchungsdauer von 60 h nach t_{Amax} , bereits einen Wert von 95 %. Bei Grout 4 hingegen werden nach 24 h erst 63 % der Schwindverformungen, die zum Untersuchungsende nach 46 h gemessen wurden, erreicht. Unter Berücksichtigung des Zeitraums zwischen Beginn der Verformungsmessung und dem Erreichen der time zero wird bei einer Temperatur von 20 °C eine minimale Prüfdauer von 7 Tagen empfohlen.

6.4 Fazit

Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen an fünf unterschiedlichen Materialien lässt sich kein wesentlicher Einfluss der Prüftemperatur auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen feststellen. Obwohl die gemessenen Verformungen mit dem Schwindschlauchverfahren über den untersuchten Temperatur-

bereich (5 °C, 20 °C und 30 °C) teilweise erheblich voneinander abweichen, ergeben sich vergleichbare spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen.

Bei einer Prüftemperatur von 5 °C ergeben sich nach der Auswertung der gemessenen Verformungen mit t_{Amax} bei sämtlichen Materialien die höchsten Endschwindwerte, wobei die spannungsinduzierenden autogenen Schwindwerte bei den anderen beiden Prüftemperaturen (20 °C und 30 °C) immer sehr dicht beieinander liegen. Demgegenüber stehen die Ergebnisse der Auswertung der gemessenen Verformungen mit t_{Ring} , die keine einheitliche Reihenfolge der Endschwindwerte zulassen (vgl. Kapitel 6.3). Da der Zeitpunkt t_{Ring} bei einer Prüftemperatur von 5 °C immer hinter dem Zeitpunkt t_{Amax} liegt (vgl. Kapitel 4.2.4), ergeben sich durch das spätere Nullen der gemessenen Verformungen zwangsläufig geringere Endschwindwerte bei der Auswertung nach t_{Ring} . Daher verändert sich im Vergleich zu der Auswertung mit t_{Amax} die Höhe der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bei einer Prüftemperatur von 5 °C. Bei den anderen beiden Prüftemperaturen lassen sich hingegen keine Abweichungen in der Reihenfolge beim Vergleich der beiden Auswertzeitpunkten (t_{Ring} und t_{Amax}) feststellen, wodurch sich lediglich die Position der Endschwindwerte bei 5 °C ändert. Somit ergeben sich bei der Auswertung der gemessenen Verformungen mit t_{Ring} unterschiedliche Reihenfolgen bei der Höhe der Endschwindwerte in Abhängigkeit der Prüftemperatur. Da der Zeitpunkt t_{Ring} genau der Zeitpunkt ist ab dem die autogenen Schwindverformungen spannungsinduzierend wirken, kann bei den hier untersuchten Materialien kein grundlegender Temperatureinfluss auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen festgestellt werden.

Darüber hinaus lässt sich aus den Ergebnissen der dehnungsbehinderten Verformungsmessungen ebenfalls kein wesentlicher Temperatureinfluss ableiten. Bei der Entwicklung der Zwangsspannungen direkt nach t_{Ring} ergibt sich ein vergleichbares Bild wie bei den freien autogenen Schwindmessungen. Dabei sind die Verläufe direkt nach t_{Ring} im Schwindringverfahren direkt mit den anfänglichen Verformungen nach t_{Amax} im Schwindschlauchverfahren vergleichbar, woraus geschlossen werden kann, dass die Verformungen nach der time zero direkt spannungsinduzierend wirken. Im weiteren Verlauf der Messungen nimmt der direkte Zusammenhang zwischen freien und dehnungsbehinderten Verformungen zunehmend ab. Während bei den freien autogenen Schwindmessungen noch weitere Steigerungen bei sämtlichen Materialien zu messen sind, kann dieses im Schwindringverfahren lediglich noch bei zwei Materialien (Grout 1 und Grout 4) beobachtet werden. Bei den restlichen Materialien kommt es nach dem Erreichen eines Maximalwertes zu einer Entspannung des Stahlrings, was auf mehrere Ursachen zurückzuführen ist. Neben den in Kapitel 6.2

festgestellten Quellverformungen im Verlauf der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen (Grout 2 und Grout 3) und der beschriebenen Relaxation (UHPC 5) kommt es aufgrund der voranschreitenden Hydratation zur Steigerung der Steifigkeits- und Festigkeitswerte der einzelnen Materialien. Diese sind beeinflusst von der Temperatur und führen zu unterschiedlichen Verläufen und stärker variierenden Werten bei den dehnungsbehinderten Verformungsmessungen. Zudem führt der für die Untersuchungen ausgewählte Behinderungsgrad des Schwindrings zum einen zu keinem Riss im Mörtelring und zum anderen zu Verformungen des Mörtelrings, die durch die Anpassung des Behinderungsgrades durchaus variieren würden. Daher kann mit den zur Verfügung stehenden Untersuchungsergebnissen ab einem gewissen Zeitpunkt kein sinnvoller Zusammenhang mehr zwischen den freien und dehnungsbehinderten Schwindverformungen hergestellt werden. Dazu wären genauere Kenntnisse über die Entwicklung der Zugfestigkeit und des Kriechens bei unterschiedlichen Prüftemperaturen erforderlich. Am deutlichsten wird dieses bei dem Vergleich der freien und dehnungsbehinderten Verformungen von Grout 1 und Grout 4. So wird bei Grout 1 im Schwindring nach 36 h ein Wert von 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ und bei Grout 3 nach 24 h ein Wert von 120 $\mu\text{m}/\text{m}$ ermittelt. Demgegenüber stehen die freien autogenen Schwindverformungen, die bei Grout 4 mit ca. 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ deutlich geringer sind als die 750 $\mu\text{m}/\text{m}$ die mit dem Schwindschlauchverfahren bei Grout 1 gemessen wurden. Somit kann auf Grundlage der freien spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen nicht auf die dehnungsbehinderten autogenen Verformungen geschlossen werden.

Der in [Lur01] festgestellte Temperatureinfluss auf die autogenen Schwindverformungen, der über die einzelnen Prüftemperaturen weder symmetrisch noch linear verläuft, konnte wie oben beschrieben bei den hier untersuchten Materialien nicht festgestellt werden. Dieses wurde anhand der durchgeführten Untersuchungen in drei unterschiedlichen Prüfaufbauten bestätigt. Dennoch kommt es bei der tiefen Prüftemperatur von 5 °C auch hier zu abweichenden Verläufen vor und nach dem Zeitpunkt der *time zero*. Dabei werden zwischen Beginn der Messung und dem Startpunkt der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen Zeiträume von maximal 72 h (Grout 1) und von minimal 24 h (UHPC 5) beobachtet. Im Vergleich dazu dauert es bei der Prüftemperatur von 30 °C bei keinem Material länger als 12 h bis erste spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen gemessen werden können. Danach ist bei einer Prüftemperatur von 5 °C generell ein im Vergleich zu den höheren Prüftemperaturen nicht so steiler Anstieg der Verformungen zu beobachten. Im weiteren Verlauf weichen die Verformungsverläufe spätestens 12 h nach der *time zero* nicht mehr wesentlich von den Verläufen der höheren Prüftemperaturen ab und das unabhängig von der Zeit, die bis zur *time zero* ver-

gangen ist. Durch die großen zeitlichen Differenzen zwischen dem Zeitraum vor der time zero und Zeitraum bis zur Angleichung der Verformungen bei unterschiedlichen Prüftemperaturen kann ein Zusammenhang zwischen der Entwicklung spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen und dem Hydratationsverlauf ausgeschlossen werden, was auch bereits in [Jen99] festgestellt wurde.

Weiterhin konnte bei keinen der untersuchten Materialien bei Variation der Prüftemperatur ein Zusammenhang zwischen t_{Ring} und T_{max} festgestellt werden. So veränderte sich der Zeitraum zwischen den einzelnen Zeitpunkten t_{Ring} nie in einem gleichen Verhältnis wie bei den einzelnen Zeitpunkten T_{max} . Dabei ergibt sich bei UHPC 5 die größte Differenz zwischen der Veränderung von t_{Ring} und T_{max} , mit 7,1 % bei Erhöhung der Prüftemperatur von 5 °C auf 20 °C und -8,5 % beim Temperatursprung von 20 °C auf 30 °C. Dieses spricht dafür, dass die temperaturbedingte Beschleunigung der Hydratation, die gemessen an den Zeitpunkten T_{max} nicht zu einer verhältnismäßigen Änderung von t_{Ring} führt, wodurch der Beginn der autogenen Schwindverformungen nicht mit dem Hydratationsverlauf verknüpft werden kann.

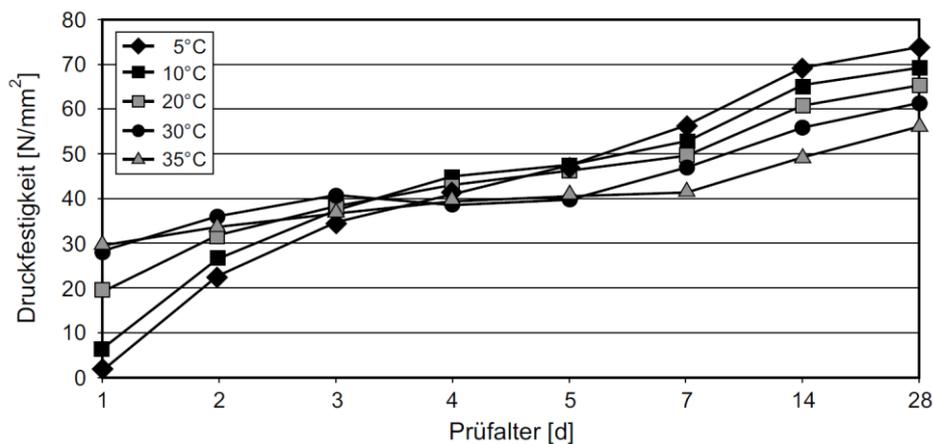


Abbildung 6-11: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur bei Herstellung aus [Wih03]

Dennoch stellt sich die Frage nach der Ursache für die bereits nach ca. 12 h vergleichbaren Verläufe der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bei 5 °C und den beiden höheren Prüftemperaturen. [Wih03] konnte nachweisen, dass sich lediglich aufgrund verschiedener Temperaturen bei der Herstellung der Probekörper unterschiedlich hohe Druckfestigkeiten nach 28 d ergeben. Dabei stellen sich bei der Herstellungstemperatur von 5 °C und einer nachfolgenden Klimalaagerung (20 °C und 65 % rel. LF) die höchsten Druckfestigkeiten ein, wobei die Werte

bei 5 °C bereits nach 4 d das Niveau der Druckfestigkeiten bei einer Herstellungstemperatur von 35 °C erreichen (vgl. Abbildung 6-11). Somit ergibt sich lediglich aus der tieferen Temperatur beim Anmischen des zu untersuchenden Materials eine Erhöhung des Hydratationsgrads. Durch die, im Vergleich zur nachfolgenden Klimalaagerung, geringeren Temperatur bei der Herstellung erfährt der Probekörper über einen längeren Zeitraum eine Temperatur ≤ 20 °C als bei der Herstellungstemperatur von 35 °C, bei der der Probekörper ausschließlich Temperaturen ≥ 20 °C ausgesetzt ist. Daher scheinen ein recht früher und ein im Vergleich zu 28 d recht kurzer Zeitraum, in dem der Probekörper geringere Temperaturen erfährt, die letztliche Entwicklung der Festigkeit entscheidend zu beeinflussen. Dieses könnte auch der Grund für das recht schnelle Angleichen der Schwindverläufe bei 5 °C an die Verläufe der höheren Prüftemperaturen bei den hier durchgeführten Untersuchungen unter quasi-isothermen Prüfbedingungen sein.

Kapitel 7

Anwendungsbeispiel mit der entwickelten Auswertemethode zur Bestimmung spannungsinduzierender autogener Schwindverformungen

7.1 Vorstellung der Prüf- und Auswertemethode

Beschreibung des Vorgehens

Die Prüfung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen wird mit dem Schwindschlauchverfahren unter quasi-isothermen Temperaturbedingungen bei einer Prüftemperatur von 20 °C durchgeführt. Das zu untersuchende Material sollte hochfließfähig sein, nahezu selbstverdichtende Eigenschaften besitzen und der Durchmesser des Größtkorns sollte ≤ 4 mm sein.

Vor der Befüllung wird die Länge des leeren Schwindschlauchs ermittelt. Danach wird dieser einseitig mit einem Stopfen verschlossen und in eine Halterung gestellt, die wiederum auf einem Rütteltisch steht. Das angemischte Material wird mit Hilfe eines Trichters und einem Schlauch in den Probekörper eingefüllt. Beim Erreichen der Hälfte des Füllstands wird das Verfüllen des Schwindschlauches kurz unterbrochen und der Probekörper durch das Einschalten des Rütteltisches für 10 s leicht verdichtet. Danach wird der Schwindschlauch bis 1,5 cm unterhalb der Oberkante verfüllt und anschließend wiederholt für 10 s leicht verdichtet. Zum Verschließen des Schwindschlauches wird wiederum ein Stopfen verwendet, der zum Entweichen der Luft beim Eindrücken ein Loch hat welches von der Ober- zur Unterkante reicht. Durch Fixierung des Schwindschlauches an der ersten Rille in Kombination mit dem Loch im Stopfen kann ein spannungsfreies Verschließen des Schlauches gewährleistet werden. Das Loch wird nun mit einer Knetmasse luftdicht verschlossen. Die Halterung wird vorsichtig umgekippt und der Schwindschlauch auf ein Wellblech zwischengelagert um weitere Schwindschläuche zu befüllen. zur Überprüfung des spannungsfreien Verfüllens wird erneut die Länge des Schwindschlauches ermittelt.

Danach wird dieser für die Dokumentation des Wasserverlustes vor dem Einbau gewogen.

Der Prüfstand wird einseitig leicht geneigt in einem Klimaschrank gelagert, der eine konstante Prüftemperatur von 20 °C gewährleisten kann. Die befüllten Schwindschläuche werden vom Wellblech erschütterungsarm im Prüfaufbau positioniert. Der zuerst installierte Stopfen besitzt ein Gewinde, wodurch der Schwindschlauch einseitig in den Prüfaufbau verschraubt werden kann. Vor der Befestigung wird zur Verhinderung des Ablösens des Schwindschlauches von dem im Prüfaufbau verschraubten Stopfen eine Schlauchschelle über den Bereich des Stopfens geschoben und fest angezogen. Nach der Fixierung der einzelnen Schwindschläuche wird in der Mitte eines jeden Probekörpers ein Temperatursensor installiert und mit Knetmasse gegenüber den Umgebungstemperaturen abgeschirmt. Danach werden die induktiven Wegaufnehmer jeweils so positioniert, dass sowohl Quell- als auch Schwindverformungen aufgenommen werden können.

Nach dem Schließen des Klimaschranks wird die Messung gestartet, wobei darauf zu achten ist, dass der Klimaschrank während der laufenden Messung erschütterungsfrei steht und dass er nicht geöffnet wird. Als Dauer der Messung werden 7 Tage mit einer Messwertaufnahme in einem Intervall von 15 min vorgeschlagen. Nach Ablauf der Messdauer werden die aufgenommenen Werte gespeichert und der Schwindschlauch ausgebaut. Im Anschluss sollten die Länge und das Gewicht des Probekörpers bestimmt werden. Dabei wird die gesamte Länge des Probekörpers gemessen und die Länge der beiden Stopfen im Nachgang abgezogen.

Auswertung der gemessenen Verformung

Die Rohwerte der Messung werden in die Auswertetabelle importiert und der letzte gemessene Wert notiert. Durch die Subtraktion der nach dem Ausbau gemessenen Länge des Schwindschlauches und dem letzten ermittelten Wert, lässt sich die Ausgangslänge des Probekörpers zum Beginn der Messung bestimmen, mit der die Rohwerte normiert werden. Im Anschluss werden die gemessenen Verformungen geglättet. Dazu wird eine die Methode „smooth“ des Shareware-Programms Matlab 2012a angewendet. Dabei wird die Spanne der Mittelwertbildung mit dem Wert 5 und die Methode 20-mal wiederholt durchgeführt. So ergibt sich ein guter Kompromiss zwischen einer genauen Abbildung des gemessenen Verformungsverlaufs und verwertbaren relativen Verformungsgeschwindigkeits- und Verformungsbeschleunigungsverläufen. Mit Hilfe der partiellen Ableitungen lassen sich im Anschluss die Extrempunkte bestimmen und die *time zero* anhand des Maximums der Verformungs-

beschleunigung t_{Amax} bestimmen. Mit dem Nullen der gemessenen Verformungen zum Zeitpunkt t_{Amax} ergeben sich die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen.

7.2 Anwendungsbeispiel mit SAP- und SRA-modifizierten Hochleistungsmörteln

Die Anwendbarkeit der unter Kapitel 7.1 vorgestellten Prüf- und Auswertemethode wurde unter Verwendung von schwindreduzierenden Zusätzen überprüft. Dazu wurde die Zusammensetzung von Grout 1 mit der Zugabe von einem Super-Absorbent-Polymer (SAP) und einem Shrinkage-Reducing-Agent (SRA) modifiziert. Die Prüfung wurde unter Anwendung sämtliche Empfehlungen aus Kapitel 7.1 durchgeführt.

Die schwindreduzierenden Zusätze wurden analog zu den Herstellerangaben dosiert und ohne zusätzliches Wasser der Referenzzusammensetzung von Grout 1 zugegeben. Bei der Zugabe vom SAP konnte eine deutliche Erhöhung der Konsistenz festgestellt werden, was jedoch aufgrund der hochfließfähigen Referenzzusammensetzung keinen wesentlichen Einfluss auf den Verfüllprozess der Schwindschläuche hatte.

Die gemessenen Verformungen sind in Abbildung 7-1 dargestellt. Bei der Referenzmischung und der mit SRA modifizierten Zusammensetzung kann der klassische Schwindverlauf beobachtet werden. Der Verlauf der SAP-modifizierten Zusammensetzung zeigt nach dem typischen Anstieg der gemessenen Verformungen ein deutliches Quellen, was auf die Expansion der SAP-Partikel zurückzuführen ist. Die maximale Temperatur wird mit 21,3 °C bei der Referenzzusammensetzung festgestellt und entspricht einer Erwärmung des Probekörpers von 1,3 °C. Anhand der Temperaturentwicklung lässt sich bereits ein veränderter Hydratationsverlauf bei der SRA-modifizierten Zusammensetzung beobachtet. Dieses bestätigt sich ebenfalls in bei der ausgewerteten relativen Verformungsgeschwindigkeit durch den nach rechts verschobenen Hochpunkt (vgl. A-6). Bei der SAP-modifizierten kommt es aufgrund des Quellens zu einer veränderten Geschwindigkeitskurve, mit einem weniger ausgeprägten Hochpunkt.

Zur Auswertung der aufgenommenen Verformungen wird die Auswertemethode nach t_{Amax} verwendet. Bei allen drei Zusammensetzungen lässt sich ein eindeutiger Hochpunkt in der Verformungsbeschleunigung detektieren und der Zeitpunkt der time zero damit bestimmen. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der schwindreduzierenden Zusätze. Während bei der Referenzzusammensetzung nach 120 h ein Wert für die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen von

700 $\mu\text{m/m}$ erreicht wird, halbiert sich dieser durch die Modifikation durch die Zugabe vom SRA. Der kleinste Wert wird mit ca. 100 $\mu\text{m/m}$ bei der SAP-modifizierten Zusammensetzung festgestellt. Diese Ergebnisse decken sich mit denen aus der Literatur vgl. [Mec11].

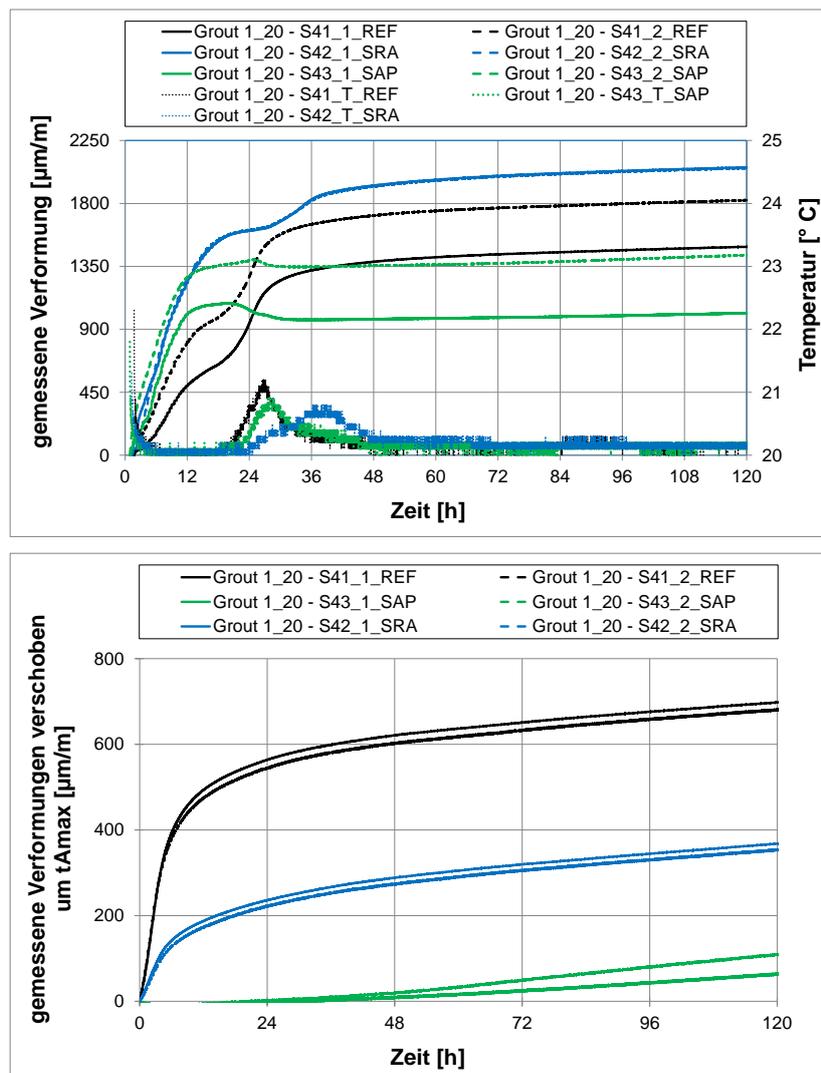


Abbildung 7-1: Gemessene und spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen von Grout 1 mit Modifizierung durch schwindreduzierenden Zusätze

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Mittlerweile existiert in der Baupraxis eine Vielzahl an Anwendungsfällen, die ohne die Verwendung von hochfesten (HPC) oder ultrahochfesten (UHPC) Betonen nicht realisierbar wären. Für die Bemessung dieser Bauteile werden in der Regel die Druck- und Ermüdungsfestigkeit des Materials benötigt, wohingegen die auftretenden spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bislang nicht bzw. nicht ausreichend berücksichtigt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass auch für die Messung von autogenen Schwindverformungen bislang lediglich auf ein Prüfverfahren aus den USA [ASTM1698] zurückgegriffen werden kann. Neben einem geeigneten Messverfahren wird für die Auswertung der gemessenen Verformungen ein Startpunkt der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen, die sogenannte *time zero*, benötigt.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine für den praktischen Einsatz geeignete Prüfmethode zur Ermittlung der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen entwickelt. Dabei erfolgt die Bestimmung der *time zero* direkt anhand der gemessenen Verformungen der Schwindmessung, wodurch die Ermittlung des Startpunkts des autogenen Schwindens in einem parallelen Versuch überflüssig wird und somit mögliche Übertragungsfehler ausgeschlossen werden können. Neben der Ermittlung der versuchstechnischen Einflüsse derzeit verwendeter Prüfverfahren wurde der Einfluss offshore-typischer Temperaturen auf die Höhe der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen untersucht.

Zunächst wurden die in der Literatur dokumentierten Grundlagen und Erkenntnisse zum autogenen Schwinden von Hochleistungsmörteln und -betonen zusammengestellt und diskutiert. Hierbei wurden die Hydratationsvorgänge und die in der frühen Phase auftretende Verformungen näher beschrieben, um die einzelnen Schwindarten klar voneinander trennen zu können. Weiterhin wurden die existierenden Quellen bzgl. des Temperatureinflusses ausgewertet, mit der Erkenntnis, dass bisherige Untersuchungsergebnisse überwiegend auf einen unsystematischen und nichtlinearen Einfluss der Temperatur auf die autogenen Endschwindwerte hindeuten. Daher wurde der Temperatureinfluss auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen systematisch untersucht. Hierzu erfolgte zunächst die Auswahl eines ge-

eigneten Verfahrens zur Bestimmung der *time zero* unter Variation der Prüftemperatur (5 °C, 20 °C und 30 °C). Die Gegenüberstellung der Startpunkte aus den dehnungsbehinderten Untersuchungen im Schwindring und aus den in der Literatur verwendeten Prüfverfahren zeigten zum Teil erhebliche Diskrepanzen, die sich über den gesamten untersuchten Temperaturbereich ergaben. Mit Auswertung der aufgenommenen Verformungskurven bei fünf unterschiedlichen Materialien konnte mit der maximalen relativen Verformungsbeschleunigung $t_{A_{max}}$ ein Zeitpunkt identifiziert werden, der den Beginn der ersten Spannungsentwicklung im Schwindring (t_{Ring}) bei einer Prüftemperatur von 20 °C und 30 °C sehr gut abbildet. Bei einer Prüftemperatur von 5 °C konnte nicht bei allen Materialien ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Zeitpunkten $t_{A_{max}}$ und t_{Ring} festgestellt werden, wobei t_{Ring} in den entsprechenden Fällen von $t_{A_{max}}$ immer unterschätzt wurde. Durch unterschiedliche Geometrien und Oberflächen der Probekörper vom Schwindschlauch- und Schwindringverfahren kommt es zu einem leichten Versatz im Hydratationsverlauf, was anhand des Zeitpunktes von T_{max} festgestellt wurde. Innerhalb der gleichen Prüftemperatur verschiebt sich der Zeitpunkt t_{Ring} im gleichen Verhältnis wie der Zeitpunkt T_{max} , wodurch es bei der Verwendung von t_{Ring} als *time zero* für das Schwindschlauchverfahren zu keinem Übertragungsfehler kommt.

Durch die Festlegung eines Referenzverfahrens zur Bestimmung der *time zero* konnte die Anwendbarkeit bei den anderen Prüfverfahren geprüft und die versuchstechnischen Einflüsse auf die Messung der spannungsinduzierenden Schwindverformungen ausgewertet werden. Bei den verwendeten Prüfverfahren (Schwindschlauch, Schwindkegel, Schwindrinne und Schwindring) ergeben sich durch unterschiedliche Geometrien und Messprinzipien einige Besonderheiten, die bei der Plausibilitätskontrolle berücksichtigt werden müssen. Gerade bei quellenden oder stark entlüftenden Materialien kommt es bei den nach oben offenen Prüfverfahren (Schwindkegel und Schwindrinne) zu fehlerhaften spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen. Mit dem Schwindschlauchverfahren lässt sich das autogene Schwinden innerhalb eines geschlossenen Bereiches realitätsnah und reproduzierbar messen. Bei den anderen beiden Prüfverfahren ist unter Berücksichtigung der jeweiligen Prüfbedingungen ebenfalls eine Übertragbarkeit auf reale Bedingungen in bestimmten Bauteilen möglich.

Bei der Überprüfung der temperaturbedingten versuchstechnischen Einflüsse wurden die geringfügig höheren spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen im Schwindkegelverfahren im Vergleich zu dem Schwindschlauchverfahren bestätigt. Beim leicht veränderten Hydratationsverlauf im Schwindkegelverfahren wird die Ursache in der aktiven Temperierung des Probekörpers vermutet.

Im Anschluss daran wurde der Temperatureinfluss unter quasi-isothermen und nicht-isothermen Prüfbedingungen untersucht. Obwohl die gemessenen Verformungen mit dem Schwindschlauchverfahren über den untersuchten Temperaturbereich (5 °C, 20 °C und 30 °C) teilweise erheblich voneinander abweichen, ergeben sich bei den spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen vergleichbare Werte. Dabei wird bei der Auswertung der gemessenen Verformungen mit t_{Amax} bei sämtlichen Materialien bei einer Prüftemperatur von 5 °C der höchste Endschwindwert ermittelt, wobei die Werte bei den Prüftemperaturen von 20 °C und 30 °C immer sehr dicht beieinander liegen. Da der Zeitpunkt t_{Amax} den Zeitpunkt t_{Ring} bei 5 °C jedoch immer unterschätzt, ergeben sich durch das frühere Nullen der gemessenen Verformungen zwangsläufig höhere Endschwindwerte. Durch die Auswertung der gemessenen Verformungen mit t_{Ring} verändert sich die Reihenfolge der höchsten Endschwindwerte in Abhängigkeit der Prüftemperatur bei sämtlichen Materialien, insofern als dass die Reihenfolge bei 20°C und 30 °C im Vergleich zu der Auswertung mit t_{Amax} unverändert bleibt und sich lediglich die Position der Endschwindwerte bei 5 °C ändert. Da der Zeitpunkt t_{Ring} den exakten Startpunkt der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen darstellt, bilden die so ermittelten Werte die Realität genauer ab. Daher ergeben sich bei den fünf unterschiedlichen Materialien verschiedene Reihenfolgen bei der Höhe der Endschwindwerte, wodurch sich anhand der Erkenntnisse aus dieser Arbeit kein wesentlicher Einfluss der Prüftemperatur auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen feststellen lässt. Dieses kann anhand der dehnungsbehinderten Untersuchungen im Schwindring anhand der sich direkt nach t_{Ring} einstellenden Verformungen des Stahlrings bestätigt werden.

Mit den Untersuchungen unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen sollten real auftretende Bauteiltemperaturen simuliert und der Einfluss auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bestimmt werden. Bei den Materialien, bei denen innerhalb der freien Schwindmessungen keine Quellvorgänge beobachtet werden konnten, stellen sich vergleichbare spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen wie unter quasi-isothermen Temperaturbedingungen ein, wodurch kein erkennbarer Einfluss festgestellt werden kann. Die autogenen Schwindverformungen von zum Quellen neigenden Materialien weichen teilweise erheblich von den Verformungen unter quasi-isothermen Temperaturbedingungen ab. Dabei verändert sich nicht nur die Höhe, sondern auch die Charakteristik der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen.

Das Anmischen des Materials unter realen Temperaturbedingungen führte bei den Prüftemperaturen von 5 und 30 °C zu einer Angleichung der Materialtemperaturen zum Zeitpunkt des Einbaus und der jeweiligen Prüftemperatur. Daraus ergab sich

wiederrum eine Angleichung der Hydratationsverläufe im Schwindschlauch- und Schwindringverfahren mit der Folge der exakteren Übereinstimmung sowohl von T_{\max} als auch von $t_{A_{\max}}$ und t_{Ring} .

Bei den freien und dehnungsbehinderten autogenen Schwindverformungen kommt es direkt nach der time zero zu jeweils starken Anstiegen der Verformungen. Im weiteren Verlauf der Messungen nimmt der direkte Zusammenhang zwischen freien und dehnungsbehinderten Verformungen bei allen untersuchten Materialien zunehmend ab. Während bei den freien autogenen Schwindmessungen noch ein Anstieg der Werte zu messen sind, lassen sich bei den dehnungsbehinderten Messungen mit dem Schwindringverfahren teilweise abweichende Verformungscharakteristika beobachten. Durch Quell- und Relaxationsvorgänge kommt es bei manchen Materialien zu einer deutlichen Entspannung des Stahlrings, was bedingt durch verschiedenen Prüftemperaturen zu unterschiedlichen Verläufen und stärker variierenden Werten bei den dehnungsbehinderten Verformungsmessungen führt. Durch die Reduzierung des Behinderungsgrades des Schwindrings, mit der Intention einen Riss im Mörtelring zu verhindern, können so Verformungen gemessen werden, die nicht in der Realität auftreten würden. Daher kann mit den zur Verfügung stehenden Untersuchungsergebnissen ab einem gewissen Zeitpunkt kein sinnvoller Zusammenhang mehr zwischen den freien und dehnungsbehinderten Schwindverformungen hergestellt werden.

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen und der Tatsache, dass die hier verwendeten Materialien ein sehr unterschiedliches Verformungsverhalten aufweisen, lässt sich keine allgemein gültige Messdauer für spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen angeben. Die Berücksichtigung von unterschiedlichen Prüftemperaturen führt gerade bei geringen Temperaturen zu einer weiteren Verlängerung der notwendigen Prüfdauern. Die empfohlene Prüfdauer bei einer Temperatur von 20 °C beträgt daher mindestens sieben Tage.

Beim Anwendungsbeispiel der Prüf- und Auswertemethode, die eine Messung der Schwindverformung mit dem Schwindschlauchverfahren bei einer Prüftemperatur von 20 °C und die Auswertung der gemessenen Verformung mit dem Zeitpunkt $t_{A_{\max}}$ vorsieht, konnte zum einen die Anwendbarkeit auch bei, mit schwindreduzierenden Zusätzen, modifizierten Zusammensetzungen bestätigt werden. Zum anderen wurde bei einer Prüftemperatur von 20 °C ein erheblicher Einfluss auf die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen, durch die Modifikation mit quellenden Zusätzen festgestellt.

8.2 Ausblick

Üblicherweise erfolgt die Zulassung, der bei der Aufstellung einer Offshore-Windenergieanlage verwendeten Vergussmaterialien über eine Zustimmung im Einzelfall. Dabei wird unter anderem das autogene Schwinden des Materials unter Angabe des Prüfverfahrens und dem Verfahren zur Ermittlung der time zero ermittelt. Basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit, ist der Vergleich von autogenen Schwindwerten auf Grundlage unterschiedlicher Prüfverfahren und Startzeitpunkt nicht möglich. Mit der vom Autor entwickelten Prüf- und Auswertmethode steht der Praxis nun ein Verfahren zur Verfügung mit dem die spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen bei quasi-isothermen Prüfbedingungen bei einer Prüftemperatur von 20 °C exakt und reproduzierbar ermittelt werden können. Die im Entwurf vorliegende DIN 18088-5_2017-12 orientiert sich bei der Bestimmung des autogenen Schwindens wiederum an dem Vorgehen bei der Zustimmung im Einzelfall, wodurch die Angabe eines belastbaren und realitätsnahen autogenen Schwindwerts nicht möglich ist.

Zur Anwendung der vorgestellten Prüf- und Auswertmethode auch bei Materialien, bei denen das Temperaturmaximum nicht nach sondern während der time zero auftritt, ist es erforderlich die Temperaturdehnung des Materials im frühen Stadium der Hydratation zu kennen. Dazu müsste im ersten Schritt der Einfluss der aktiven (Schwindkegel) und der passiven (Schwindschlauch) näher verifiziert werden. Mit dem Vergleich von Untersuchungen mit dem herkömmlich im Klimaschrank gelagerten Schwindschlauchverfahren und der Lagerung des Prüfaufbaus in einem Paraffinölbad könnten die Unterschiede in der Höhe der spannungsinduzierenden autogenen Schwindverformungen ermittelt werden. In einem zweiten Schritt könnte dann die Temperaturdehnung zu beliebigen Zeiten mit Hilfe nicht-isothermer Temperaturbedingungen mit dem Schwindkegelverfahren bestimmt werden. Somit wäre dann der Vergleich des temperaturkompensierten Zeitpunktes t_{Amax} mit dem ebenfalls temperaturkompensierten Zeitpunkt t_{Ring} aus dem Schwindring möglich.

Literaturverzeichnis

- [Ada06] Adam, T.: *Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt*, Darmstadt, 2006
- [Bea92] Beaudoin, J. J. & Brown, P. W.: *Die Struktur der erhärteten Zementpaste (engl.)*, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, Neu Dehli, National Council for Cement and Building Materials, S. 485-525, 1992
- [Bec96] Bechtold, R. & Wagner, J.-P.: *Verwendung von Silikatzusätzen im Beton*, beton, S. 216-221, 1996
- [Ben01] Bentur, A., Igarashi, S. & Kovler, K.: *Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates*, Cement and Concrete Research, S. 1587-1591, 31 2001
- [Bjø06] Bjøntegaard, Ø. & Hammer, T. A.: *RILEM Technical Committee 195-DTD: Motive and technical content*, International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, S. 357-366, 2006
- [Boi99] Boivin, S. A.: *Experimental Assessment of Chemical Shrinkage of Hydrating Cement Pastes*, Autogenous Shrinkage of Concrete, Tazawa, E.-I., S. 81-91, London, 1999
- [Bon66] Bonzel, J. & Dahms, J.: *Der Einfluß des Zements, des Wasserzementwertes und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung des Betons*, beton, S. 299–305; 341–342, 7; 8 1966
- [Bro04] Brouwers, H.: *The work of Powers and Brownyard revisited: Part 1*, Cement and Concrete Research Vol. 34, S. 1697-1716, 2004
- [Bun19] Bundesamt für Naturschutz: <https://www.bfn.de/themen/awz-zulassungen-in-nord-und-ostsee/offshore-windparks.html#c214742l>, Zugriff auf die Website: 06.07.2019
- [Cop56] Copeland, L.: *Spezifisches Volumen von verdampfbarem Wasser in erhärteten Portlandzement-Pasten*, 52, American Concrete Institute Procedure, S. 863-874, 1956

- [Cop68a] Copeland, L. & Kantro, D.: *Hydration of Portland Cement*, Proceedings of the 5th ISCC Vol. II, Tokio, S. 387-421, 1968
- [Daa16] von Daake, H.-F.: *Möglichkeiten zur Optimierung der Wirkungsweise bauchemischer Zusatzmittel durch Mechanismen der kontrollierten Wirkstofffreisetzung*, Dissertation, Kassel, kassel university press GmbH, 2016
- [Del00] Dela, B. F.: *Eigenstresses in hardening concrete*, Department of Structural Engineering and Materials, Lyngby, Denmark, The Technical University of Denmark, 2000
- [deV98] de Vree, R. T., Tegelaar & A., R.: *Gewichtete Reife des Betons*, beton, S. 674-678, 11 1998
- [Duc08] Duckheim, C.: *Hygrische Eigenschaften des Zementsteins*, Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Göttingen, Cuvillier-Verlag, 2008
- [Dud16] Dudziak, L.: *Mitigating autogenous shrinkage of Ultra-High Performance Concrete by means of internal curing using superabsorbent polymers*, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2016
- [Epp09a] Eppers, S. & Müller, C.: *Autogenous shrinkage and time-zero of UHPC determined with the shrinkage cone*, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, al., T. e., S. 709-714, London, Taylor & Francis Group, 2009
- [Epp09b] Eppers, S. & Müller, C.: *Zur Prüfung der autogenen Schwindrissneigung mit dem Ring-Test unter besonderer Berücksichtigung von Temperatureinflüssen - Teil 1*, beton Vol. 5, S. 2009
- [Epp09c] Eppers, S. & Müller, C.: *Zur Prüfung der autogenen Schwindrissneigung mit dem Ring-Test unter besonderer Berücksichtigung von Temperatureinflüssen - Teil 2*, beton Vol. 6, S. 2009
- [Epp10] Eppers, S.: *Assessing the autogenous shrinkage cracking propensity of concrete by means of the restrained ring test*, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2010
- [Epp10b] Eppers, S. & Müller, C.: *The Shrinkage Cone Method for Measuring The Autogenous Shrinkage - An Alternative to the Corrugated Tube Method*, International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete, Lyngby, Denmark, S. 67 - 76, 2010

- [Fon06] Fontana, P.: *Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen*, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2006
- [Gei83] Geiker, M.: *Measurements of Chemical Shrinkage and a Systematic Evaluation of Hydration Curves by means of the Dispersion Model*, Dissertation, Technical University of Denmark, 1983
- [Grü01] Grübl, P., Weigler, H. & Karl, S.: *Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften*, 2. Auflage, Berlin, Ernst & Sohn, 2001
- [Gru91] Grube, H.: *Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile.*, Schriftenreihe der Zementindustrie - Heft 52, Düsseldorf, Beton-Verlag, 1991
- [Ham02] Hammer, T., Bjontgaard, O. & E.J., S.: *Measurement methods for testing of early age autogenous strain*, Technical Committee 181-EAS, Early Age Cracking in Cementitious Systems, Bentur, A., S. 234-245, Cachan, RILEM, 2002
- [Ham06] Hammer, T. & Bjöntegaard, Ö.: *Testing of autogenous deformation (AD) and thermal dilation (TD) of early age mortar and concrete - recommended test procedure*, International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Lyngby, Denmark, S. 2006
- [Han70] Hansen, T.: *Physical Composition of Hardened Portland cement Paste*, ACI Journal, S. 404-407, 1970
- [Hof87] Hoffmann, K.: *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*, 1. Auflage, Darmstadt, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987
- [Hol01] Holt, E.: *Early age autogenous shrinkage of concrete*, Dissertation, Technical Research Centre of Finland, 2001
- [Hos04] Hossain, A. B. & Weiss, J.: *Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens*, Cement & Concrete Composites, S. 531-540, 26 2004
- [Hos06] Hossaina A. B., W. J.: *The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test*, Cement and Concrete Research, S. 189-199, 36 2006

- [Iga06] Igarashi, S. & Watanabe, A.: *Experimental study on prevention of autogenous deformation by internal curing using super-absorbent polymer particles*, Proceedings of international RILEM conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Lyngby, Denmark, Jensen, O. M.; Lura, P.; Kovler, K., S. 77-86, 2006
- [Jen01] Jensen, O. M. & Hansen, P. F.: *Water-entrained cement-based materials - I. Principles and theoretical background*, Cement and Concrete Research, S. 647-654, 31 2001
- [Jen01a] Jensen, O. & Hansen, P.: *Autogenous deformation and RH-change in perspective*, Cement and Concrete Research Vol. 31 No. 12, S. 1859-1865, 2001
- [Jen02] Jensen, O. & Hansen, P.: *Water-entrained cement-based materials - II. Experimental observations*, Cement and Concrete Research, S. 973-978, 2002
- [Jen95] Jensen, O. & Hansen, P.: *A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste*, Materials and Structures, Vol. 28, S. 406-409, 1995
- [Jen96a] Jensen, O. & Hansen, P.: *Autogenous Deformation and Change of the Relative Humidity in Silica Fume-Modified Cement Paste*, ACI Materials Journal Vol. 93 No.6, S. 539-543, 1996
- [Jen99] Jensen, O. & Hansen, P.: *Influence of temperature on autogenous deformation and relative humidity change in hardening cement paste*, Cement and Concrete Research Vol. 29, S. 567-575, 1999
- [Jia05] Jiang, Z., Sun, Z. & Wang, P.: *Autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance cement pastes*, Cement and Concrete Research Vol. 35, S. 1539-1545, 2005
- [Loc00] Locher, F.: *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung*, Düsseldorf, Verlag Bau + Technik, 2000
- [Loc14] Loch, M.: *Beitrag zur Bestimmung von charakteristischen Werkstofffestigkeiten in Bestandstragwerken aus Stahlbeton*, D 386, Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, 2014

- [Lou00] Loukili, A., Chopin, D., Khelikj, A. & Le Touzo, J.-Y.: *A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history*, Cement and Concrete Research Vol. 30, S. 915-922, 2000
- [Lou99] Loukili, A., Khelidj, A. & Richard, P.: *Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete*, Cement and Concrete Research Vol. 29, S. 577-584, 1999
- [Lur01] Lura, P., van Breugel, K. & Maruyama, I.: *Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete*, Cement and Concrete Research Vol. 31, S. 1867-1872, 2001
- [Lur03a] Lura, P.: *Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete*, Dissertation, Technische Universiteit Delft, Netherlands, 2003
- [Lur03b] Lura, P., Jensen, O. & van Breugel, K.: *Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms*, Cement and Concrete Research Vol. 33, S. 223-232, 2003
- [Lur07] Lura, P. & Jensen, O. M.: *Measuring techniques for autogenous strain of cement paste*, Materials and Structures, S. 431-440, 40 2007
- [Mec11] Mechtcherine, V., Dudziak, L., Brüdern, A.-E., Hempel, S. & Schröfl, C.: *Superabsorbierende Polymere (SAP): Innovative multifunktionale Betonzusatzmittel*, 3/2011, beton, 2011
- [Mec12] Mechtcherine, V. & Reinhardt, H.-W.: *Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction*, Heidelberg, Springer, 2012
- [Mön09] Mönig, S.: *Superabsorbing additions in concrete - applications, modelling and comparison of different internal water sources*, Stuttgart, 2009
- [Naw04] Nawa, T. & Horita, T.: *Autogenous shrinkage of high-performance concrete*, Proceedings of the International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures, Sapporo, Japan, S. 2004
- [Nev28] Neville, H. A. & Jones, H.: *The study of hydration changes by a volume-change method*, Colloid Symposium Memographs, Washington, D.C., National research council, S. 309-318, 1928
- [Not07] Nothnagel, R.: *Hydratations- und Strukturmodell für Zementstein*, Dissertation, Technischen Universität Braunschweig, 2007

- [Pow47] Powers, T. & Brownyard, T.: *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*, Journal of the American Concrete Institute Vol. 43 No. 9, S. 933-992, 1947
- [Pow47z] Powers, T.: *A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete*, Proceedings of the Highway Research Board 27, S. 178 ff., 1947
- [Pow85] Powers, T.: *Absorption of Water by Portland Cement during the Hardening Process*, Industrial and Engineering Chemistry, S. 1985
- [Ric69] Richartz, W.: *Über die Gefüge- und Festigkeitsentwicklung des Zementsteins - Teil 1*, beton Vol. 5, S. 203-207, 1969
- [Ril97] 119-TCE, R. T.: *Recommendations of TC 119-TCE: Avoidance of thermal cracking in concrete at early ages*, Materials and Structures, Vol. 30, S. 451-464, 1997
- [Röß06] Rößler, C.: *Hydratation, Fließfähigkeit und Festigkeitsentwicklung von Portlandzement – Einfluss von Fließmitteln, Alkalisulfaten und des Abbindereglers*, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2006
- [San06] Sant, G., Lura, P. & Weiss, J.: *Measurement of Volume Change in Cementitious Materials at Early Ages: Review of Testing Protocols and Interpretation of Results*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1979, S. 21-29, 2006
- [San09] Sant, G., Dehadrai, M., Bentz, D., Lura, P., Ferraris, C., Bullard, J. & Weiss, J.: *Detecting the Fluid-to-Solid Transition in Cement Pastes - Comparing experimental and numerical techniques*, Concrete international, S. 53-58, 2009
- [San12] Sant, G.: *The Influence of temperature on autogenous volume changes in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures*, Cement & Concrete Composites, S. 855-865, 34 2012
- [Sch00] Schießl, P., Plannerer, M. & Brandes, C.: *Influence of binders and admixtures on autogenous shrinkage of high performance concrete*, International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, Paris, RILEM Publications SARL, S. 179 - 190, 2000
- [Sch07a] Schäffel, P. & Rickert, J.: *Einfluss von schwindreduzierenden Zusatzmitteln auf das Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein, Teil 1*, beton, S. 289-295, 6 2007

- [Sch07b] Schäffel, P. & Rickert, J.: *Einfluss von schwindreduzierenden Zusatzmitteln auf das Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein, Teil 2*, beton, S. 359-365, 7+8 2007
- [Sch15] Schmidt, W.: *Wirkungsweise verschiedener Fließmittel*, BWI – BetonWerk International, S. 44-48, 3 2015
- [Sch18] Systems, S. T.: *www.schleibinger.com*, 2018
- [Spr88] Springenschmid, R., Breitenbücher, R. & Ballardini, P.: *Vergleich zwischen Berechnungen und Messungen von Zwangspannungen in jungem Beton*, Beton- und Stahlbetonbau Vol. 83 Heft 4, S. 1988
- [Str10] Strohbusch, J.: *Beitrag zur Verformungsberechnung im Stahlbetonbau mit kritischer Bewertung bestehender Regelungen*, Universität Siegen, Siegen, 2010
- [Taz00] Tazawa, E., Sato, R., Sakai, E. & Miyazawa, S.: *Work of JCI Committee on autogenous shrinkage*, International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, Baroghel-Bouny, V. a., S. 21-40, RILEM Publications SARL, 2000
- [Taz95z] Tazawa, E. & Miyazawa, S.: *Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste*, Cement and Concrete Research Vol. 25 No.2, S. 281-287, 1995
- [vBr99] van Breugel, K. & de Vries, J.: *Mixture optimization of HPC in view of autogenous shrinkage*, Proceedings of 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Sandefjord, S. 1041–1050, 1999
- [vBre01] van Breugel, K.: *Numerical modelling of volume changes at early ages- Potential, pitfalls and challenges*, Materials and Structures, Vol. 34, S. 293-301, 2001
- [VDZ02] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: *Zement-Taschenbuch*, 50. Auflage, Düsseldorf, Bau+Technik, 2002
- [Wei02a] Weiss, J.: *Experimental Determination of the 'Time-Zero' t_0 (Maturity-Zero M_0)*, Early Age Cracking in Cementitious Systems - RILEM TC 181-EAS: Final Report, S. 195-206, RILEM Publications SARL, 2002

- [Weig40] Weigler, H. & Karl, S.: *Junger Beton. Beanspruchung - Festigkeit - Verformung*, Betonwerk + Fertigteil - Technik, S. S. 392-401 und S. 481-484, Heft 6 und Heft 7 1974 (40)
- [Wes93] Wesche, K.: *Baustoffe für tragende Bauteile*, Band 2: Beton, Mauerwerk, Wiebaden und Berlin, Bauverlag GmbH, 1993
- [Wih03] Wihler, H.-D.: *Der Einfluss der Temperatur auf die Festigkeitsentwicklung bei Mörteln und BEtonen*, beton, S. 240-242, Heft 5 2003

Normen und Richtlinien

- [ASTM1698] ASTM C1698-09, *Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar*, ASTM International, 2009
- [ASTMC191] ASTM C191-13, *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, ASTM International, 2013
- [ASTMC807] ASTM C807-13, *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle*, ASTM International, 2013
- [DAfStB06] DAfStb-Richtlinie, *Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2006
- [DIN196_1] DIN EN 196-1, *Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*, Deutsches Institut für Normung e.V., 2012
- [DIN196_3] DIN EN 196-3, *Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und Raumbeständigkeit*, Deutsches Institut für Normung e.V., 2008
- [DIN1992] DIN EN 1992-1-1, *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für den Hochbau*, Deutsches Institut für Normung e.V., 2011
- [DIN480_2] DIN EN 480-2, *Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel-Prüfverfahren - Teil 2: Bestimmung der Erstarrungszeit*, Deutsches Institut für Normung e.V., 2006
- [DNV14] DNVGL-ST-0126, *Support structures for wind turbines*, DNV GL, 2014-04

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Autogene Schwindwerte eines Rundrobintests aus [Bj06].....	3
Abbildung 1-2:	Autogene Schwindwerte bei unterschiedlichen Prüftemperaturen aus [Lur01] (links) und aus [Jen99] (rechts)	4
Abbildung 2-1:	Schematische Darstellung von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zementleim aus [VDZ02].....	8
Abbildung 2-2:	Volumenanteile bei Lagerung unter Wasser (links) und Lagerung an der Luft (rechts) bei jeweils unterschiedlichen Hydratationsgraden aus [Loc00]	12
Abbildung 2-3:	Übersicht über das chemische und das autogene Schwinden aus [Taz95z]	13
Abbildung 2-4:	Effect of cement type on the free autogenous shrinkage aus [Sch00]; Autogenous deformation of Mix B (BFS cement) cured at different temperatures aus [Lur03a]	15
Abbildung 2-5:	Relative Luftfeuchte und autogene Verformungen eines Zementleims mit w/c = 0,3 und unterschiedlichen Microsilicagehalten bei einer Prüftemperatur von 30 °C aus [Jen96a]	16
Abbildung 2-6:	Autogenous deformation of ordinary cement pastes (links) and silica fume-containing cement pastes (rechts) both with different amounts of SAP aus [Iga06].....	19
Abbildung 2-7:	Autogene Schwindverformungen ab dem Erstarrungsende von Zementleim (links) und Zementleim mit SRA (rechts) gelagert bei unterschiedlichen Temperaturen aus [San12]	21
Abbildung 2-8:	Versuchsaufbau zur Bestimmung des chemischen Schwindens aus [San06]	25
Abbildung 2-9:	Vergleich zwischen chemischen und autogenem Schwindwerten umgerechnet auf lineare Schwindverformungen aus [San06].....	32
Abbildung 2-10:	Ergebnisse aus einem Ringversuch, Längenänderung (links) und Temperaturerhöhung (rechts) aus [Bj06].....	36
Abbildung 3-1:	Untersuchungsprogramm.....	40
Abbildung 3-2:	Vorgehen bei der Auswahl des Verfahrens zur Bestimmung der <i>time zero</i>	41
Abbildung 3-3:	Ausbreitfließmaße von Grout 1 und UHPC 5.....	45
Abbildung 3-4:	Vibrationstisch mit Halterung (links) zum Verfüllen der Schwindschläuche mit Hilfe eines Trichters (rechts).....	47
Abbildung 3-5:	Aufgeschnittene Sedimentationsrohre von Grout 4	48
Abbildung 3-6:	Befüllen des Kegels mit Hilfe einer Rutsche (links), Plexiglaskubus zum Schutz vor Temperaturschwankungen im Raum (rechts)	50
Abbildung 3-7:	Stopfen (herkömmlich, mit Entlüftungsloch und mit Gewindestab) (links), Prüfaufbau für drei Schwindschläuche ohne einseitige Erhöhung (rechts).....	51
Abbildung 3-8:	Ansammlung von Luftporen unter der Folie des Schwindkegels (links) und in den Lamellen des Schwindschlauches (rechts)	52
Abbildung 3-9:	herkömmliche Schwindrinne (links), mit Kühlsystem ausgestattete Schwindrinne (rechts).....	53

Abbildung 3-10: Schwindring mit installierter Messsensorik (links), Anordnung zweier Schwindringe im Klimaschrank (rechts).....	54
Abbildung 3-11: Verformungsentwicklung im Schwindringverfahren mit unterschiedlichen Behinderungsgraden	56
Abbildung 3-12: Vergleich zwischen den gemessenen Verformungen und einem Polynom 18-ten Grades von Grout 1	59
Abbildung 3-13: Vergleich zwischen gemessenen und geglätteten Verformungen von Grout 1	61
Abbildung 4-1: Veränderung der Zeitpunkte T_{max} und t_{Ring} im Schwindring unter temperierten und nicht-temperierten Bedingungen.....	67
Abbildung 4-2: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von Grout 1.....	68
Abbildung 4-3: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von Grout 3.....	69
Abbildung 4-4: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von UHPC 5.....	70
Abbildung 4-5: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von Grout 4.....	70
Abbildung 4-6: Verformungscharakteristik und Extrempunkte von Grout 2.....	71
Abbildung 4-7: Unterteilung der gemessenen Verformung (links oben), der relativen Schwindgeschwindigkeit (rechts oben) und der Schwindbeschleunigung (rechts unten).....	76
Abbildung 4-8: Zusammenstellung der Ergebnisse von Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung bei einer Prüftemperatur von 5 °C	84
Abbildung 4-9: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von Grout 1	88
Abbildung 4-10: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von Grout 2.....	89
Abbildung 4-11: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von Grout 3.....	89
Abbildung 4-12: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von UHPC 5.....	90
Abbildung 4-13: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Startpunkte mit t_{Ring} von Grout 4.....	91
Abbildung 4-14: Grout 1 - Vergleich zwischen horizontaler und geneigter Lagerung der Schwindschläuche mit Verformungsmessung in Richtung der Gravitation.....	93
Abbildung 4-15: Grout 1 - Vergleich zwischen horizontaler und geneigter Lagerung der Schwindschläuche mit Verformungsmessung entgegen der Gravitation....	95
Abbildung 4-16: Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung aus dem Schwindschlauchverfahren (links) und dem Schwindkegelverfahren (rechts) von Grout 1 bei unterschiedlichen Prüftemperaturen	98
Abbildung 4-17: Grout 1 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindkegelverfahren; gemessene Verformungen	99
Abbildung 4-18: Grout 1 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindkegelverfahren; autogene Verformungen.....	100
Abbildung 4-19: Grout 1 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren; gemessene Verformungen	102
Abbildung 4-20: Grout 1 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren, autogene Verformungen.....	104

Abbildung 4-21: Grout 2 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren	106
Abbildung 4-22: Grout 4 – Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren.....	107
Abbildung 4-23: UHPC 5 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren.....	109
Abbildung 4-24: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von Grout 1 bei unterschiedlichen Temperaturen	112
Abbildung 4-25: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von Grout 3 bei unterschiedlichen Temperaturen	114
Abbildung 4-26: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von UHPC 5 bei unterschiedlichen Temperaturen	115
Abbildung 4-27: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von Grout 4 bei unterschiedlichen Temperaturen	116
Abbildung 4-28: Autogene Schwindverformungen und Endschwindwerte von Grout 2 bei unterschiedlichen Temperaturen	117
Abbildung 4-29: Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung von Grout 1 mit herkömmlicher (links) und vortemperierter (rechts) Vorgehensweise bei 5 °C	120
Abbildung 4-30: Verformungsgeschwindigkeit und -beschleunigung von Grout 1 mit herkömmlicher (links) und vortemperierter (rechts) Vorgehensweise bei 30 °C	120
Abbildung 4-31: Grout 1 - Verformungsverhalten vom Schwindring bei unterschiedlichen Prüftemperaturen	122
Abbildung 4-32: Grout 3 - Verformungsverhalten Schwindring bei unterschiedlichen Prüftemperaturen	123
Abbildung 4-33: UHPC 5 - Verformungsverhalten Schwindring bei unterschiedlichen Prüftemperaturen	123
Abbildung 4-34: Grout 2 - Verformungsverhalten Schwindring bei unterschiedlichen Prüftemperaturen	125
Abbildung 4-35: Grout 4 - Verformungsverhalten Schwindring bei unterschiedlichen Prüftemperaturen	125
Abbildung 4-36: Verformungscharakteristik und Extrempunkte bei Grout 1 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen (Rampe).....	127
Abbildung 4-37: Verformungscharakteristik bei Grout 1 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen	130
Abbildung 4-38: Verformungscharakteristik bei UHPC 5 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen	131
Abbildung 4-39: Verformungscharakteristik bei Grout 3 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen	132
Abbildung 4-40: Verformungscharakteristik bei Grout 4 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen	133
Abbildung 4-41: Verformungscharakteristik bei Grout 2 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen	134
Abbildung 6-1: Grout 1 - Schwindverformung und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen.....	144
Abbildung 6-2: Grout 3 - Schwindverformung und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen.....	145

Abbildung 6-3:	UHPC 5 - Schwindverformung und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen.....	146
Abbildung 6-4:	Grout 2 - Schwindverformungen und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen.....	148
Abbildung 6-5:	Grout 4 - Schwindverformungen und Spannungsentwicklung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen.....	149
Abbildung 6-6:	Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei Grout 1.....	152
Abbildung 6-7:	Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei Grout 3.....	153
Abbildung 6-8:	Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei Grout 2.....	154
Abbildung 6-9:	Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei Grout 4.....	155
Abbildung 6-10:	Entwicklung der Schwindwerte über die Zeit nach t_{Amax} und t_{Ring} bei UHPC 5.....	156
Abbildung 6-11:	Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur bei Herstellung aus [Wih03].....	159
Abbildung 7-1:	Gemessene und spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen von Grout 1 mit Modifizierung durch schwindreduzierenden Zusätze.....	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Chemisches Schwinden der einzelnen Klinkerphasen aus [Pow85].....	11
Tabelle 3-1: Frisch- und Festmörteleigenschaften	44
Tabelle 3-2: Mischregime	45
Tabelle 3-3: Ergebnisse der Diffusionsdichtheitsprüfung bei 35 °C.....	49
Tabelle 3-4: Bewertung des Zusammenhangs in Abhängigkeit des Korrelationsfaktors	59
Tabelle 4-1: Erstarrungszeiten nach [DIN480_2] bei 20 °C.....	72
Tabelle 4-2: Zusammenstellung der ermittelten Endschwindwerte mit t_{Ring} bei 20 °C.....	74
Tabelle 4-3: Erstarrungszeiten nach [DIN480_2] bei 30 °C.....	81
Tabelle 4-4: Zusammenstellung der ermittelten Endschwindwerte mit t_{Ring} bei 30 °C.....	82
Tabelle 4-5: Erstarrungszeiten nach [DIN480_2] bei 5 °C.....	83
Tabelle 4-6: Zusammenstellung der ermittelten Endschwindwerte mit t_{Ring} bei 5 °C	86

Anhang

A-1 Schwindverlauf und Spannungsentwicklung

A-1.1 Grout 1

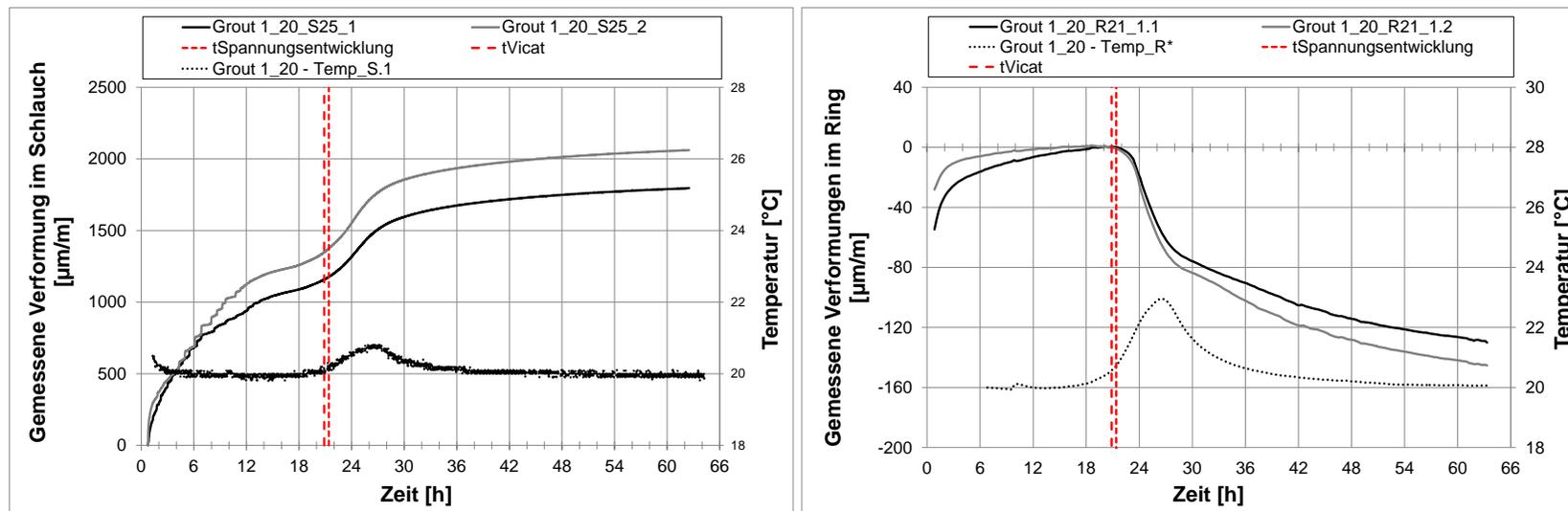


Abbildung A - 1-1: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 1 - 20 °C

Spannungsentwicklung (tk)		14,42 h	ΔT : - 4,21 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		10,21 h		14,03 h
Max. Temperatur	Schlauch	18,22 h	ΔT : - 0,38 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	18,60 h		15,92 h

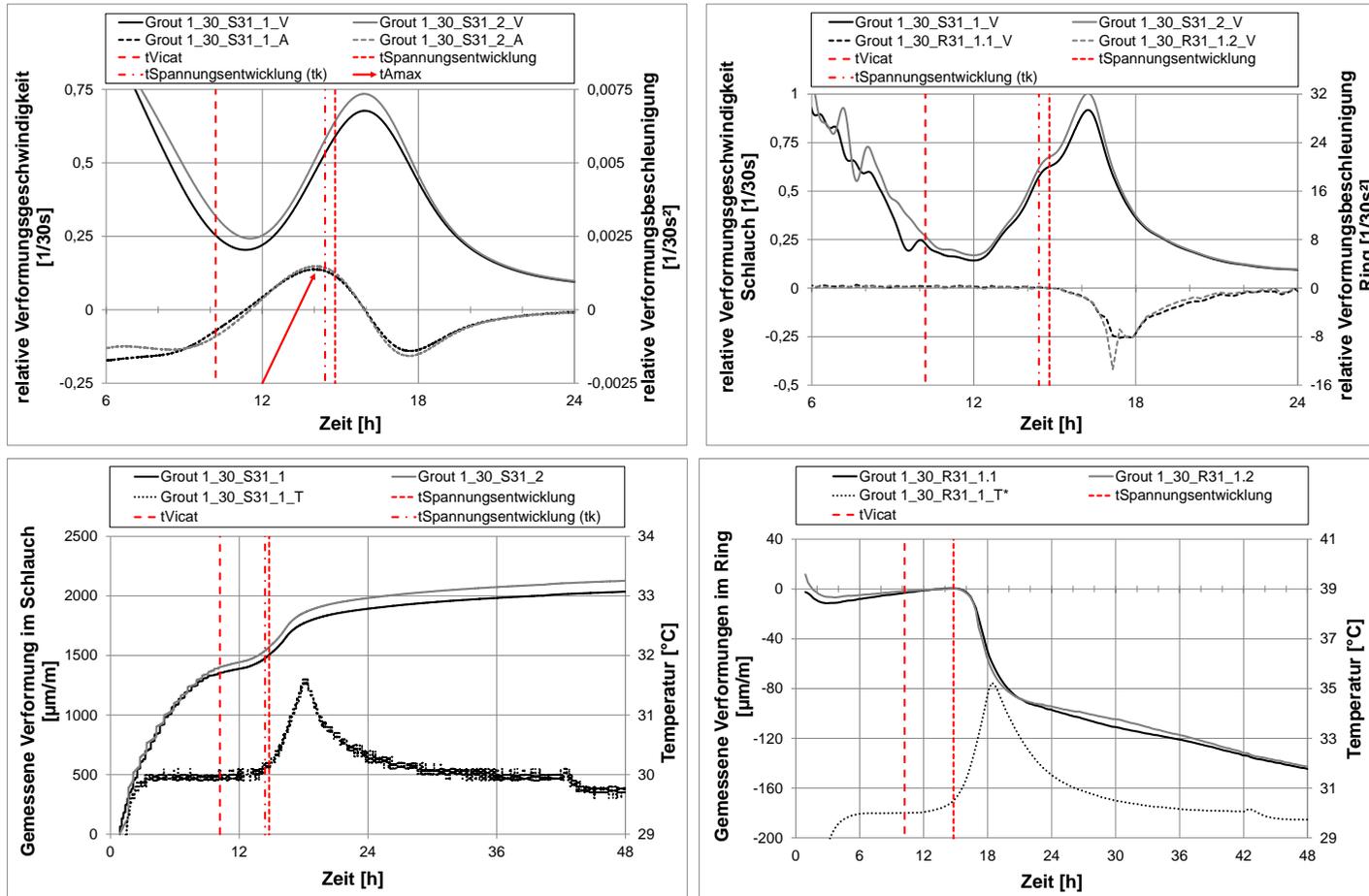
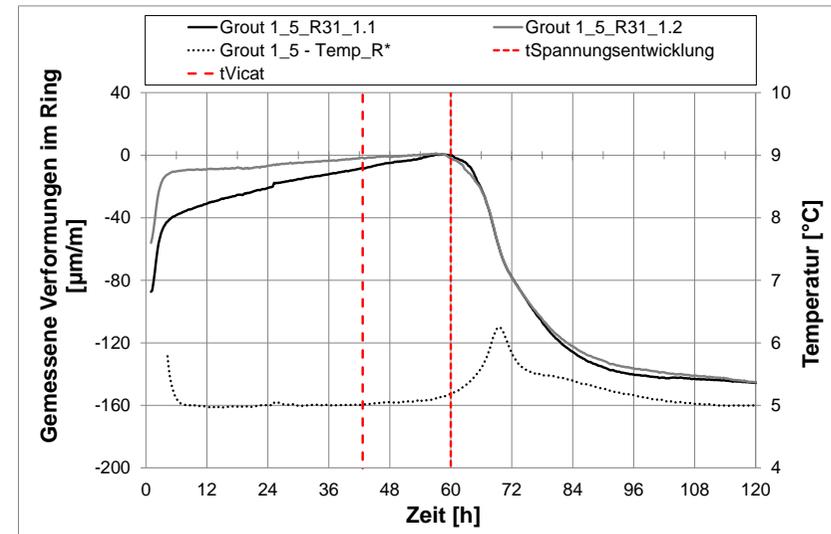
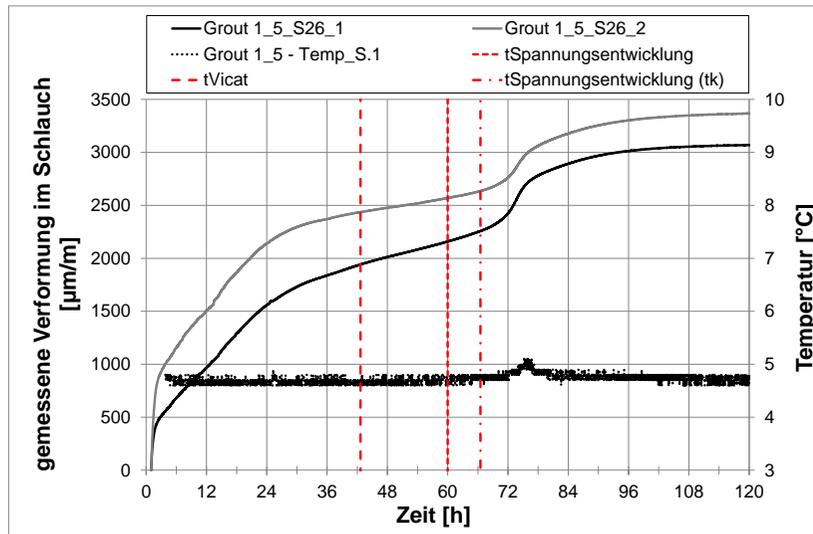


Abbildung A - 1-2: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 1 - 30 °C

Spannungsentwicklung (tk)		66,50 h	ΔT : 23,85 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		42,65 h		69,48 h
Max. Temperatur	Schlauch	76,00 h	ΔT : 6,52 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	69,48 h		73,83 h

Abbildung A - 1-3: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 1 - 5 $^{\circ}\text{C}$

A-1.2 Grout 2

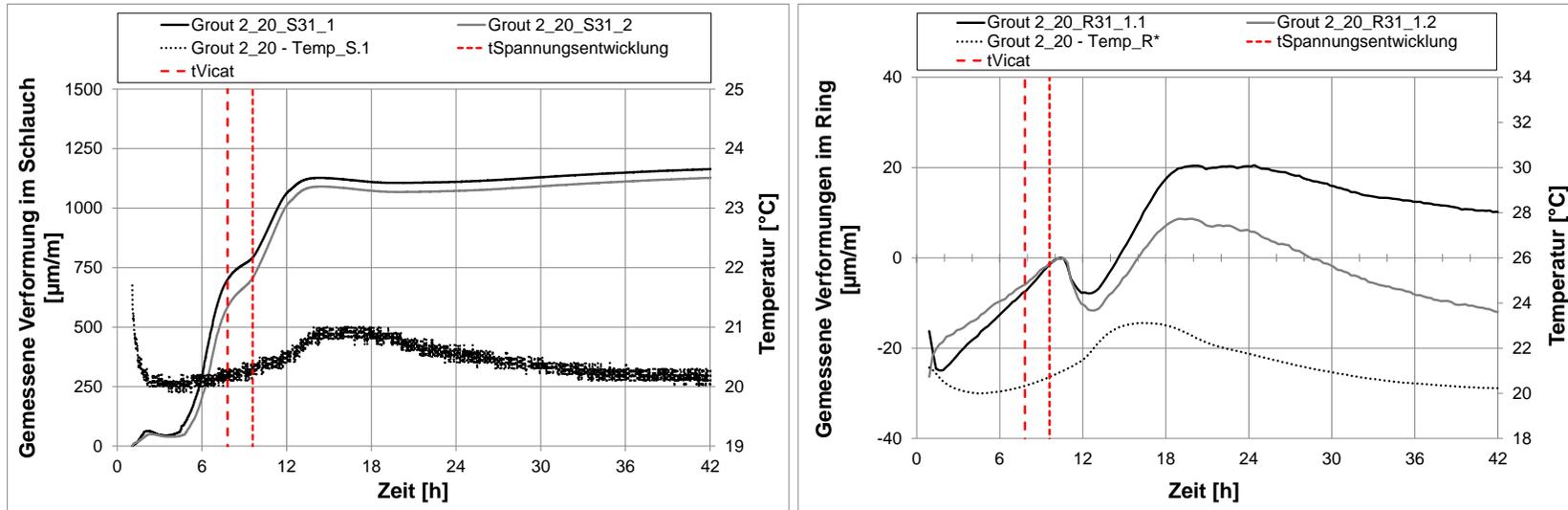


Abbildung A - 1-4: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 2 - 20 °C

Spannungsentwicklung (tk)		6,18 h	ΔT : - 1,14 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		5,86 h		5,91 h
Max. Temperatur	Schlauch	10,51 h	ΔT : - 0,82 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	11,33 h		6,81 h

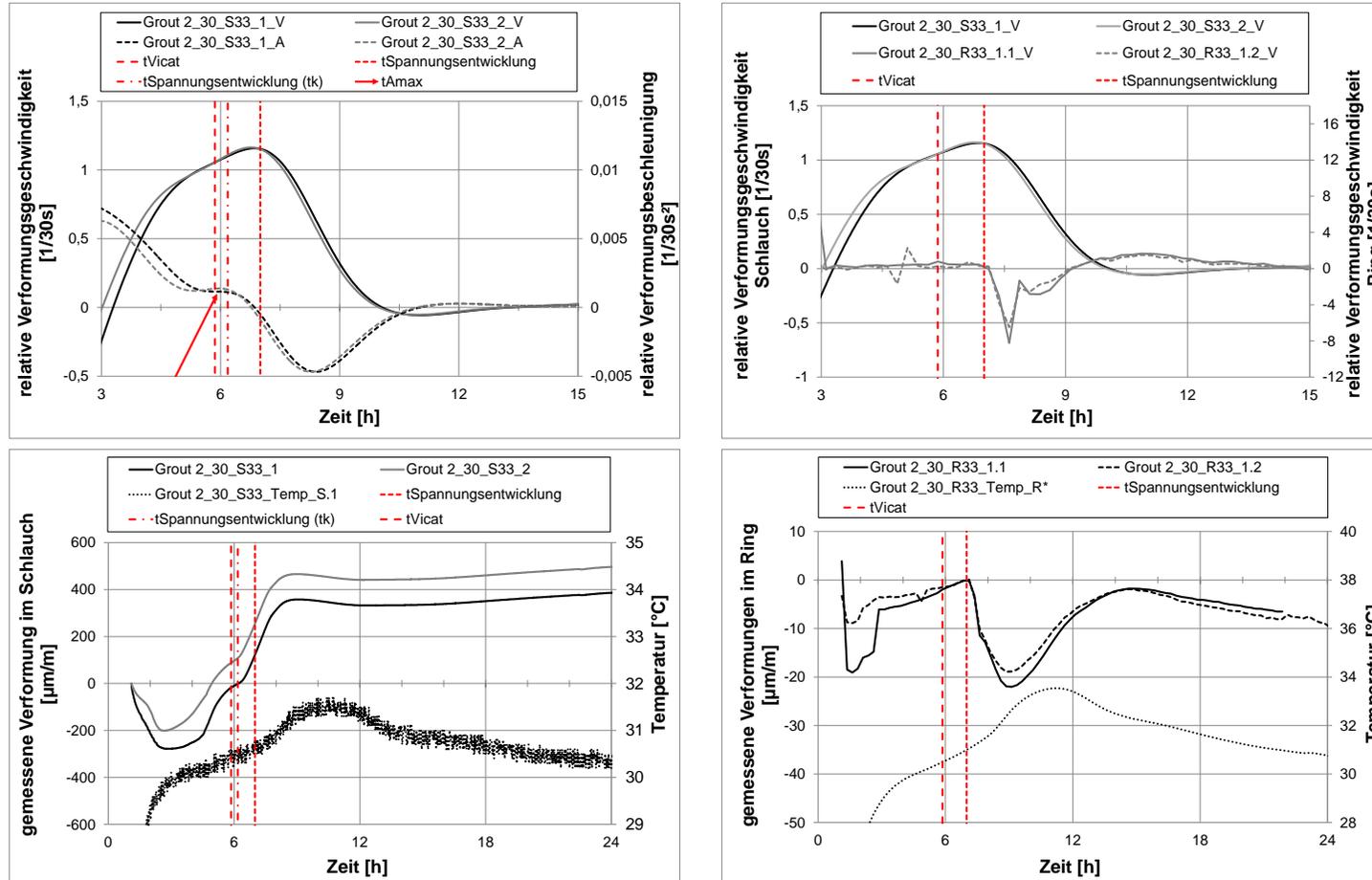


Abbildung A - 1-5: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 2 - 30 °C

Spannungsentwicklung (tk)		23,50 h	ΔT : 1,22 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		22,28 h		21,86 h
Max. Temperatur	Schlauch	37,20 h	ΔT : 1,37 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	35,83 h		24,63 h

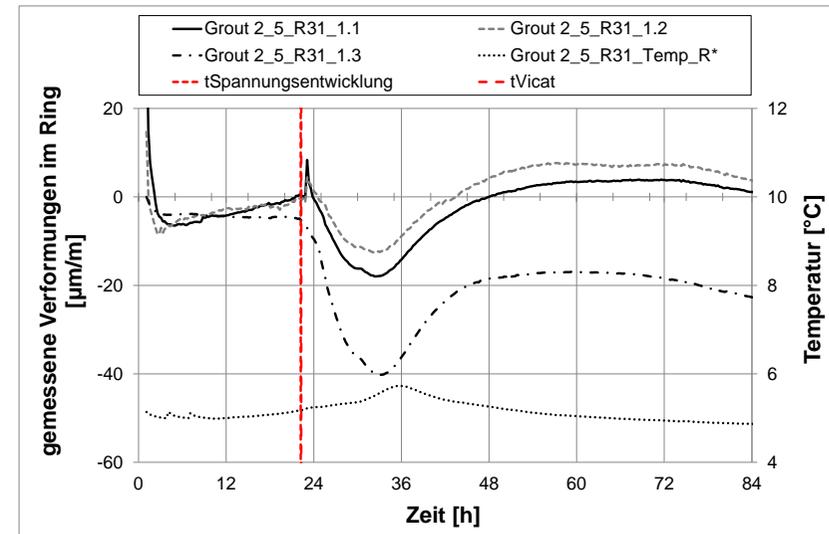
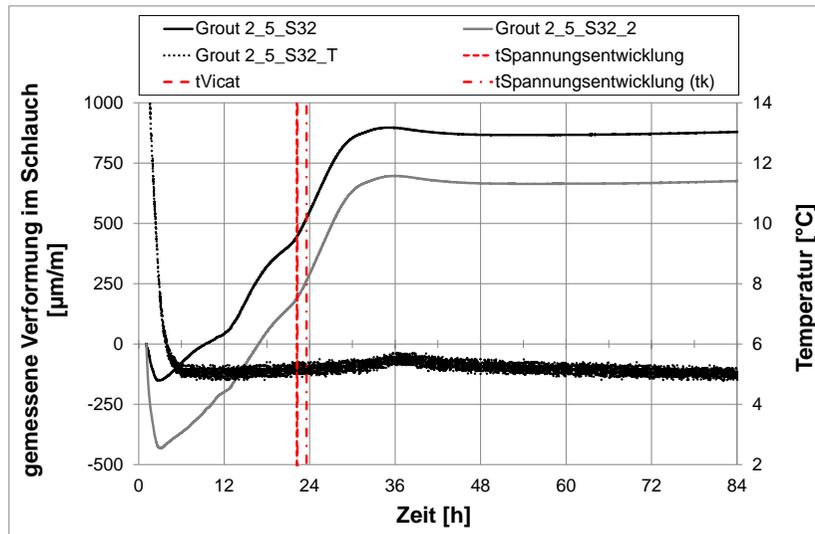


Abbildung A - 1-6: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 2 - 5 °C

A-1.3 Grout 3

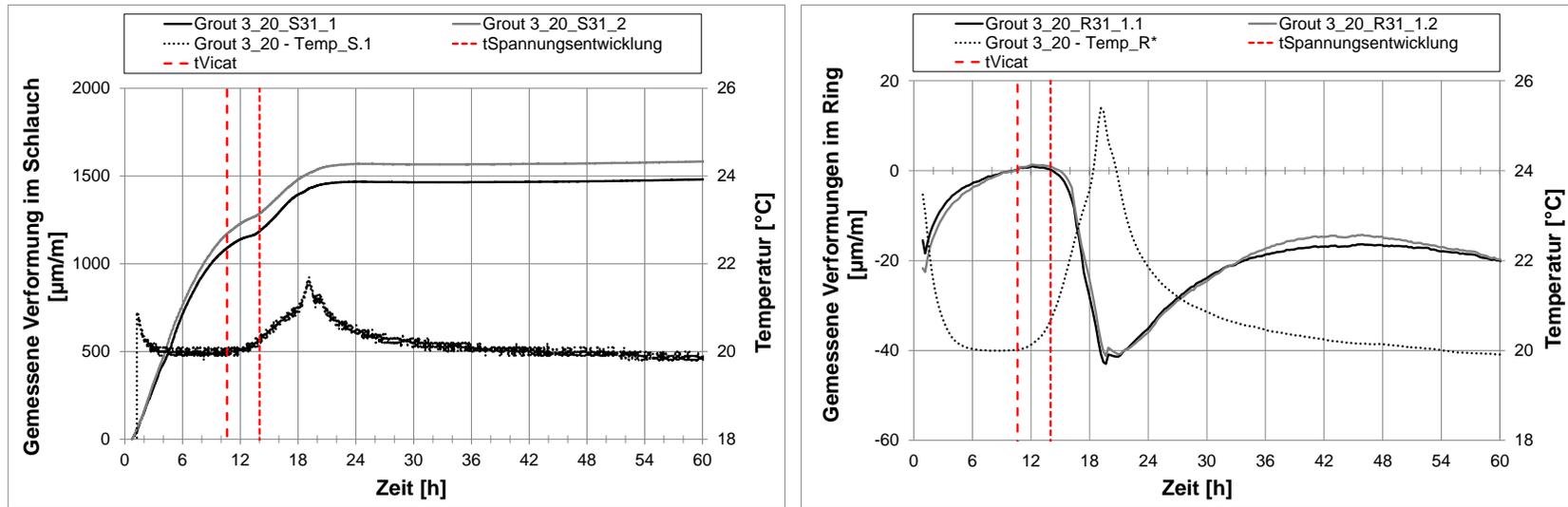


Abbildung A - 1-7: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 3 - 20 °C

Spannungsentwicklung (tk)		9,27 h	ΔT : - 1,79 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		7,48 h		9,13 h
Max. Temperatur	Schlauch	11,96 h	ΔT : - 0,54 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	12,50 h		10,33 h

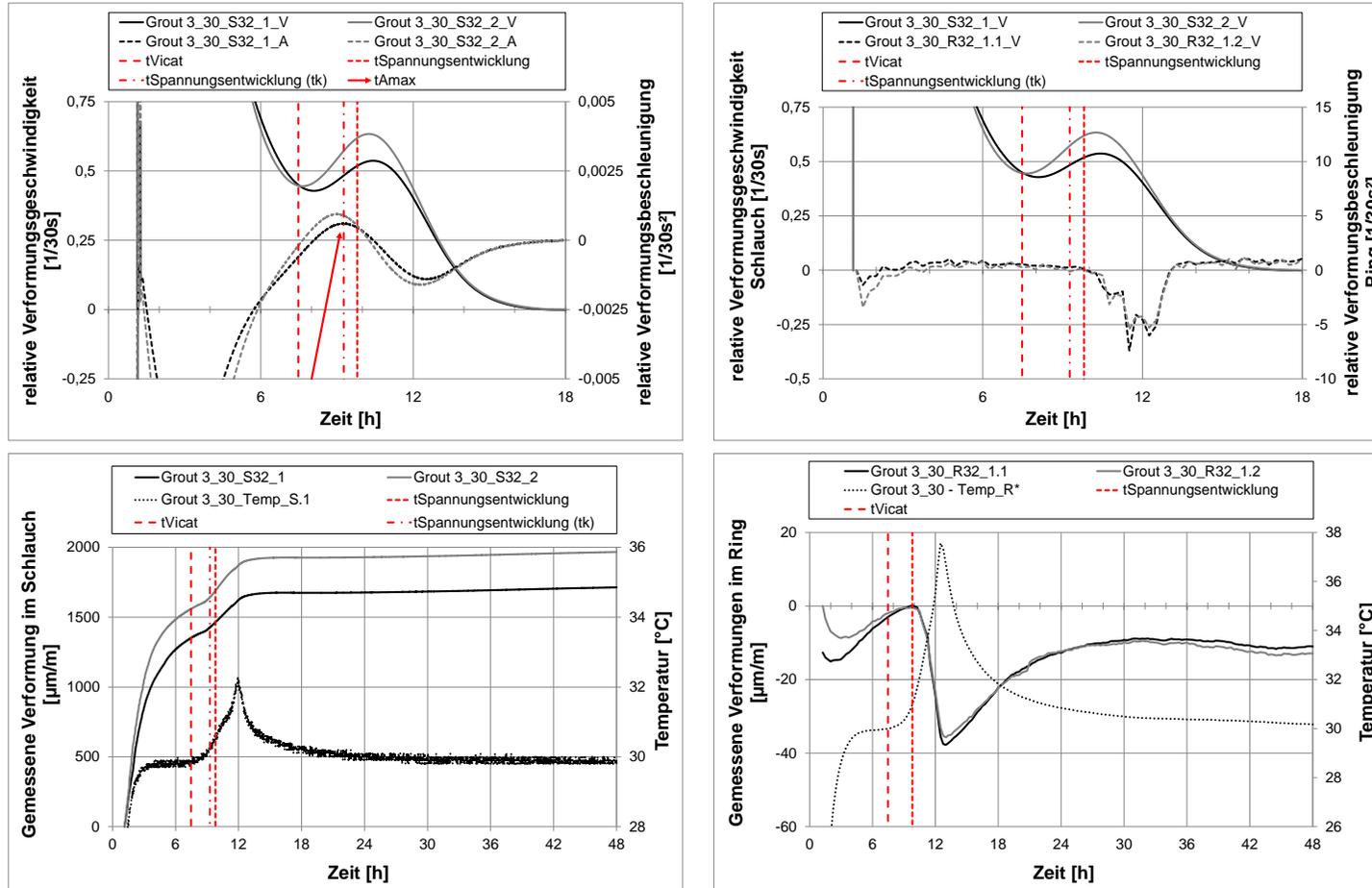


Abbildung A - 1-8: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 3 - 30 °C

Spannungsentwicklung (tk)		30,85 h	ΔT : 6,81 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		24,04 h		30,40 h
Max. Temperatur	Schlauch	39,96 h	ΔT : 1,88 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	38,08 h		38,06 h

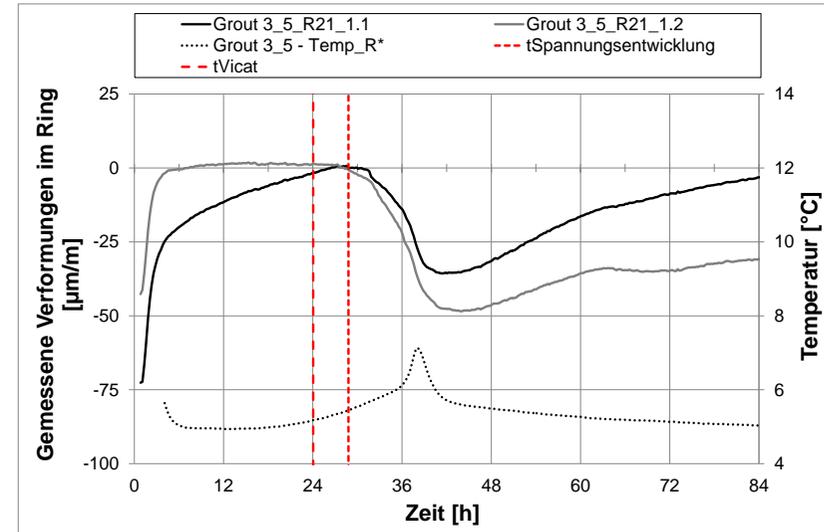
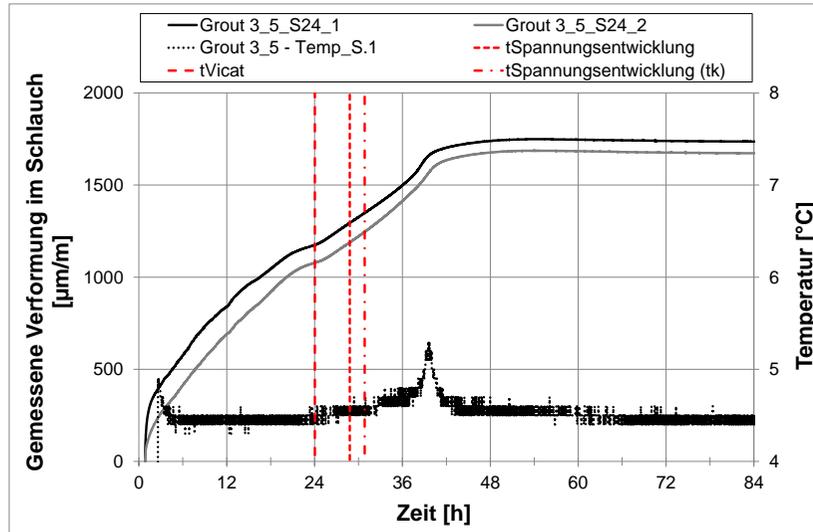


Abbildung A - 1-9: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 3 - 5 °C

A-1.4 Grout 4

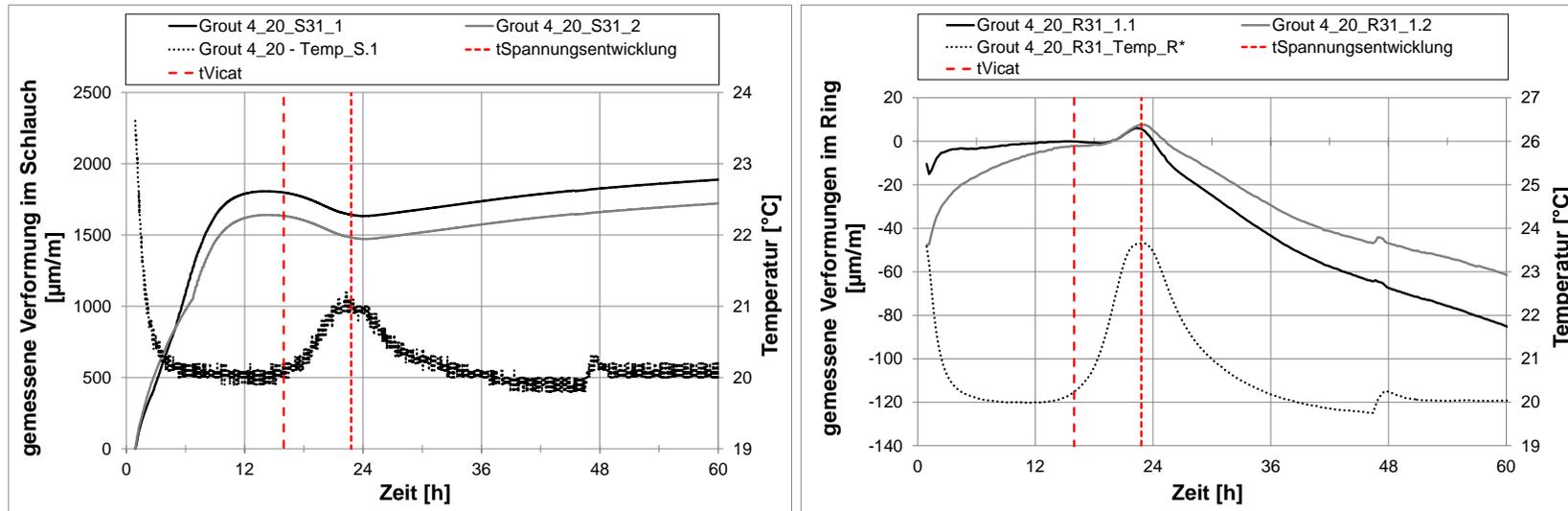


Abbildung A - 1-10: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 4 - 20 °C

Spannungsentwicklung (tk)		15,53 h	ΔT : - 5,86 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		9,67 h		15,33 h
Max. Temperatur	Schlauch	15,48 h	ΔT : - 0,24 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	15,72 h		21,95 h

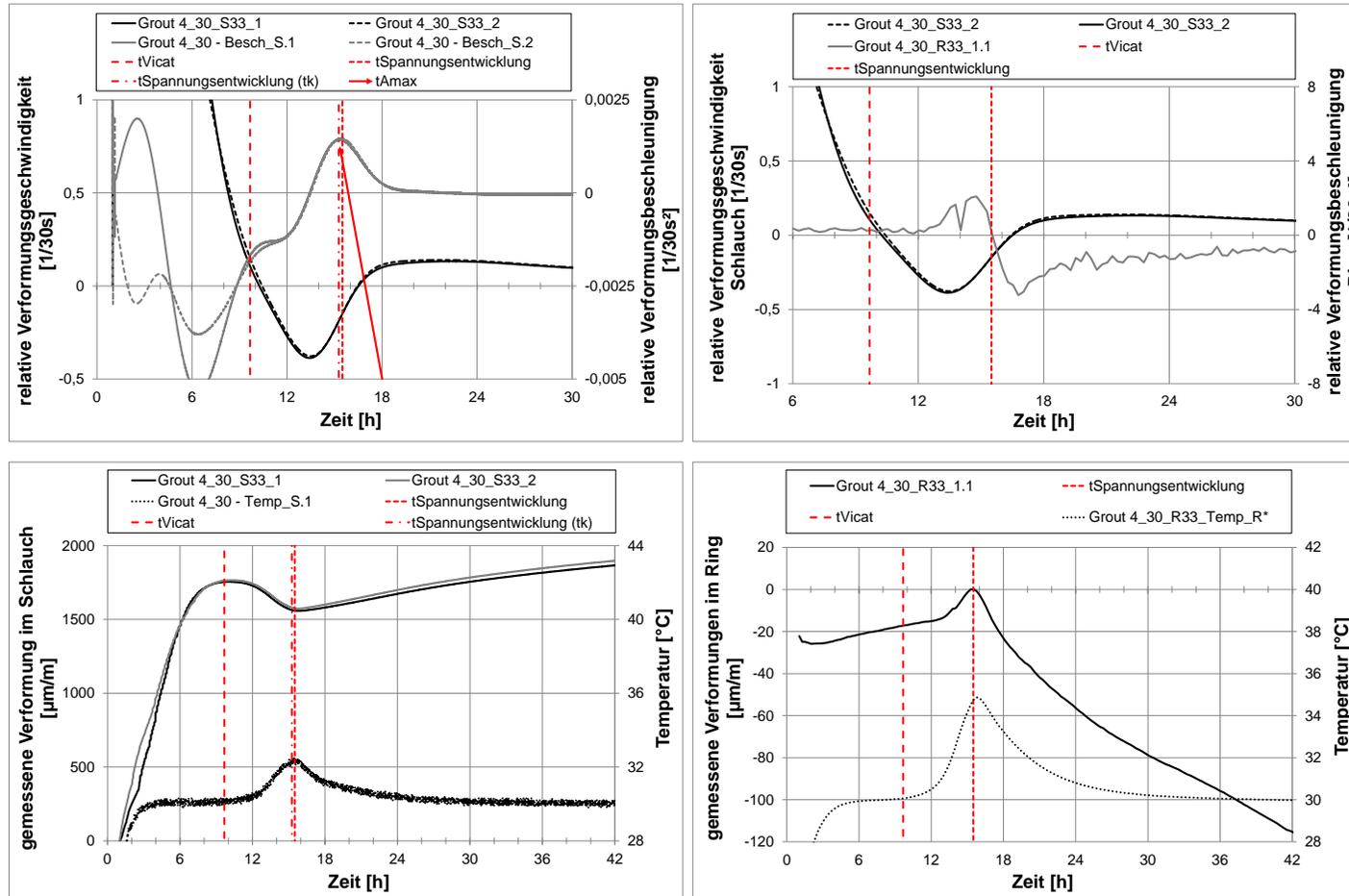


Abbildung A - 1-11: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 4 - 30 °C

Spannungsentwicklung (tk)		59,38 h	ΔT : 33,88 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		25,50 h		56,75 h
Max. Temperatur	Schlauch	60,50 h	ΔT : 2,08 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	58,42 h		63,03 h

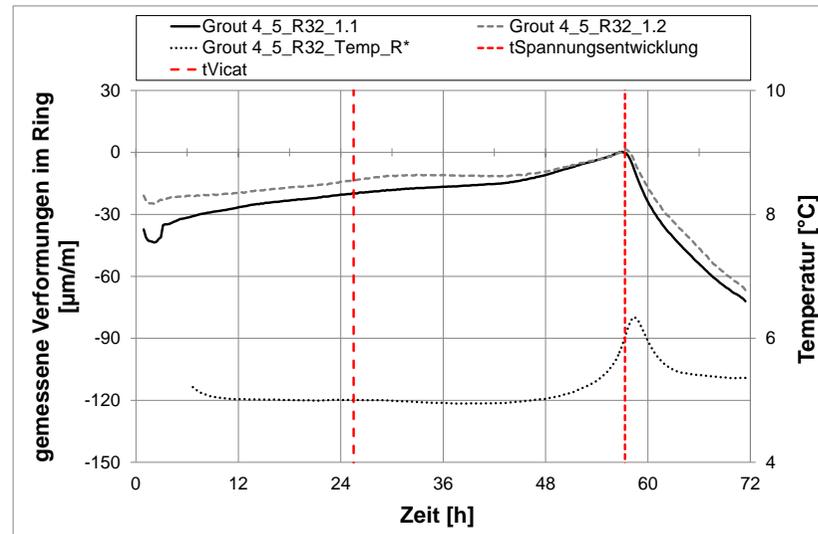
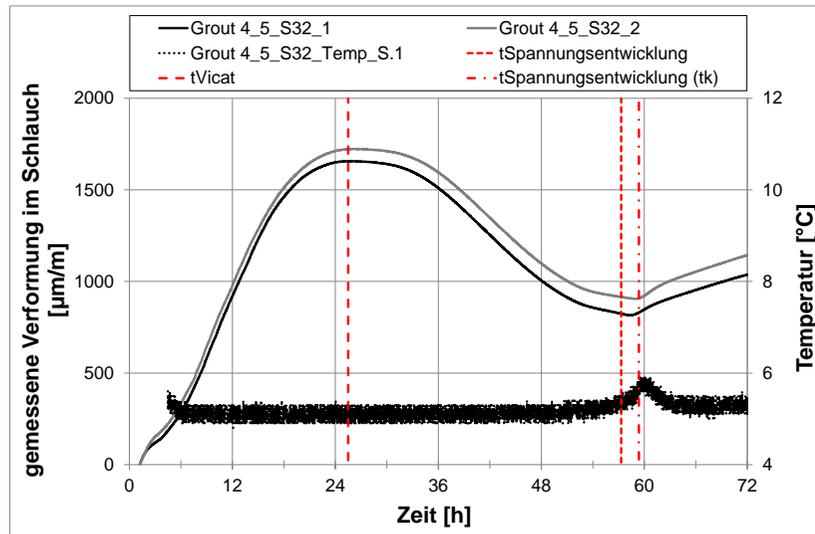
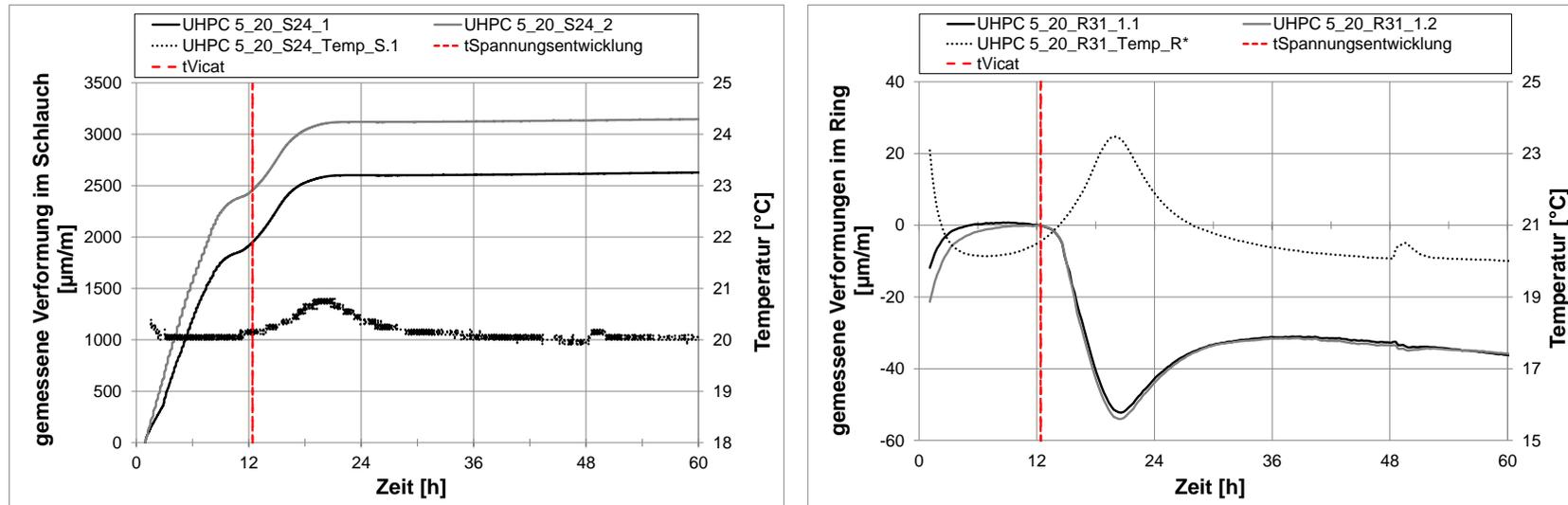


Abbildung A - 1-12: Ergebnisse der Verformungsmessungen_Grout 4 - 5 °C

A-1.5 UHPC 5

Abbildung A - 1-13: Ergebnisse der Verformungsmessungen_UHPC 5 - 20 $^{\circ}\text{C}$

Spannungsentwicklung (tk)		11,28 h	ΔT : - 0,70 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		10,12 h		10,60 h
Max. Temperatur	Schlauch	15,40 h	ΔT : - 0,38 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	15,78 h		11,88 h

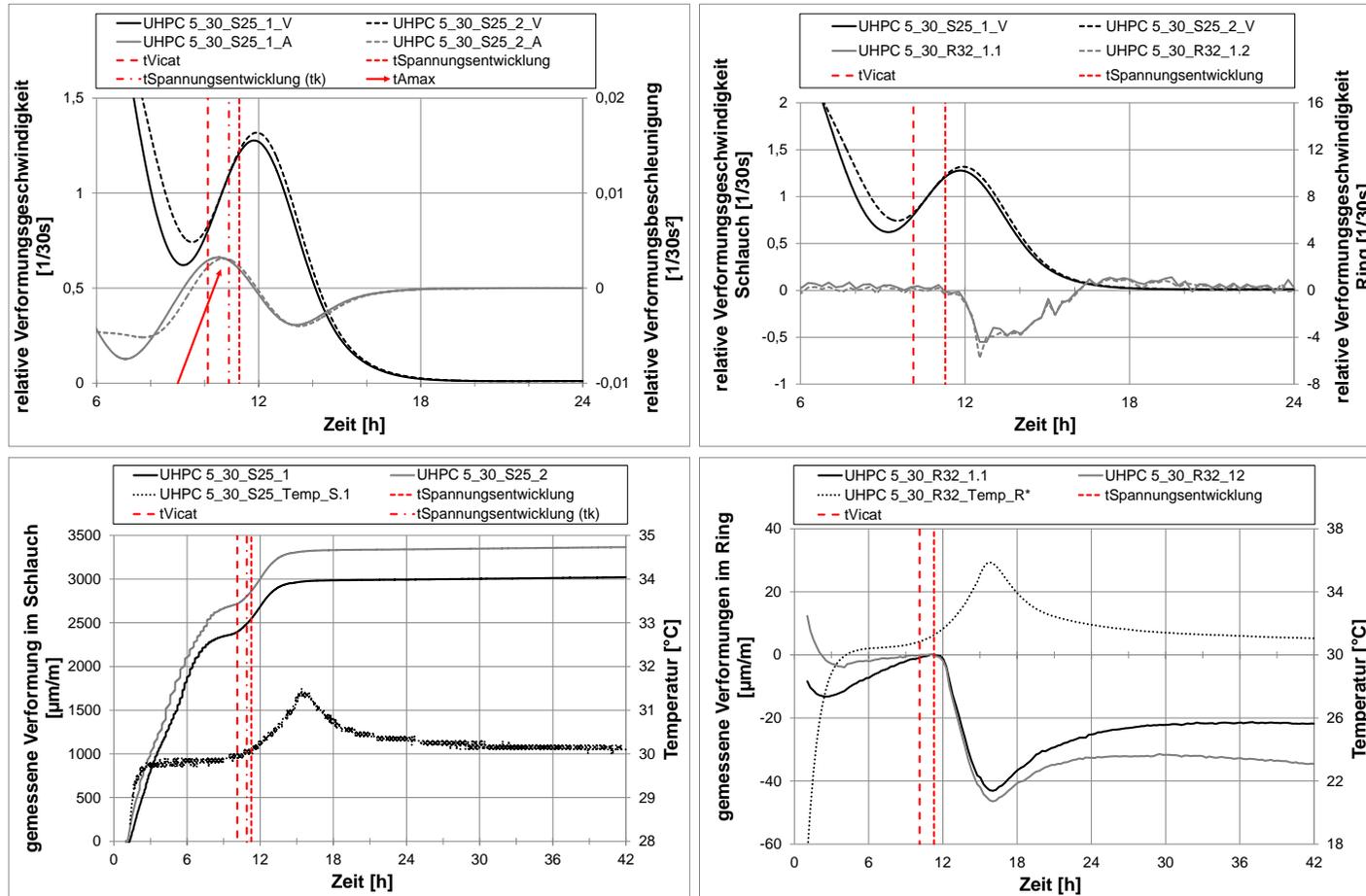


Abbildung A - 1-14: Ergebnisse der Verformungsmessungen_UHPC 5 - 30 °C

Spannungsentwicklung (tk)		31,90 h	ΔT : 11,52 h	max. Beschleunigung
Erstarrungsende		20,38 h		26,95 h
Max. Temperatur	Schlauch	46,60 h	ΔT : 3,38 h	max. Geschwindigkeit
	Ring	43,22 h		31,75 h

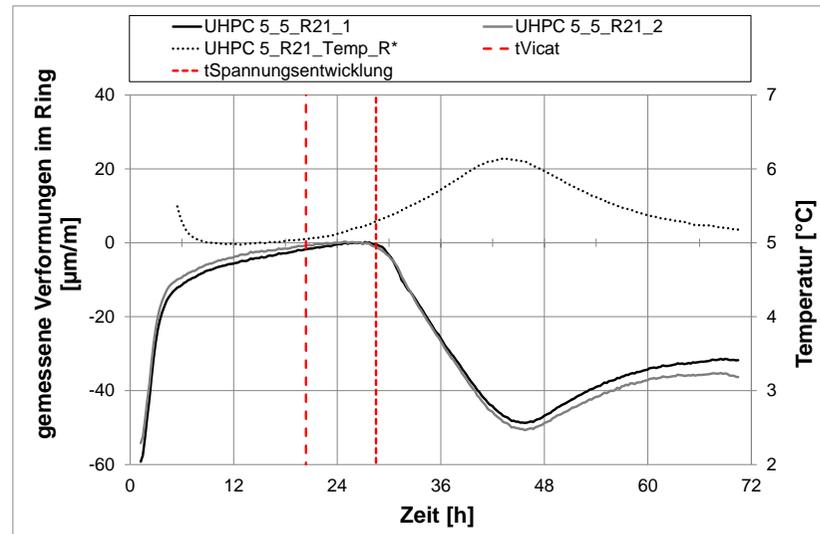
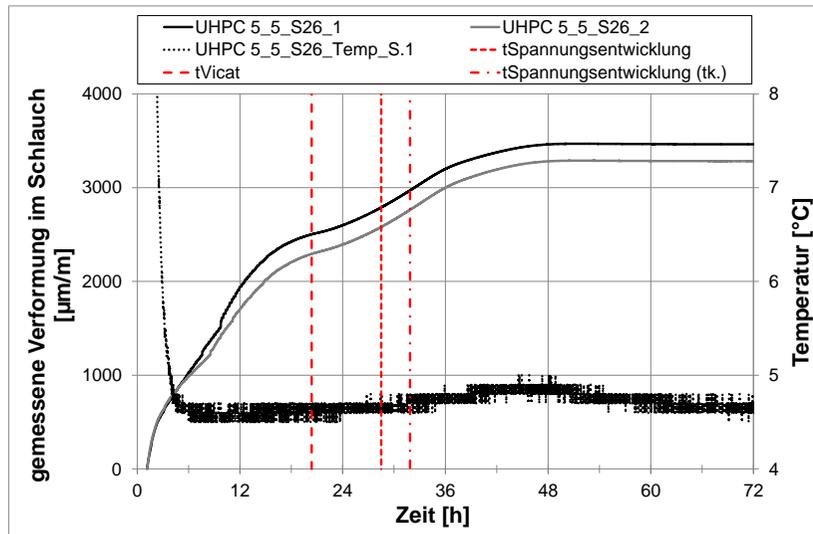


Abbildung A - 1-15: Ergebnisse der Verformungsmessungen_UHPC 5 - 5 °C

A-2 Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren

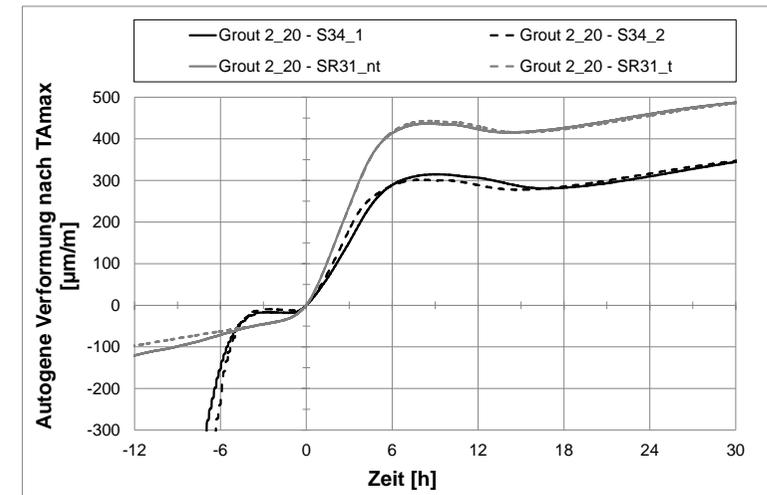
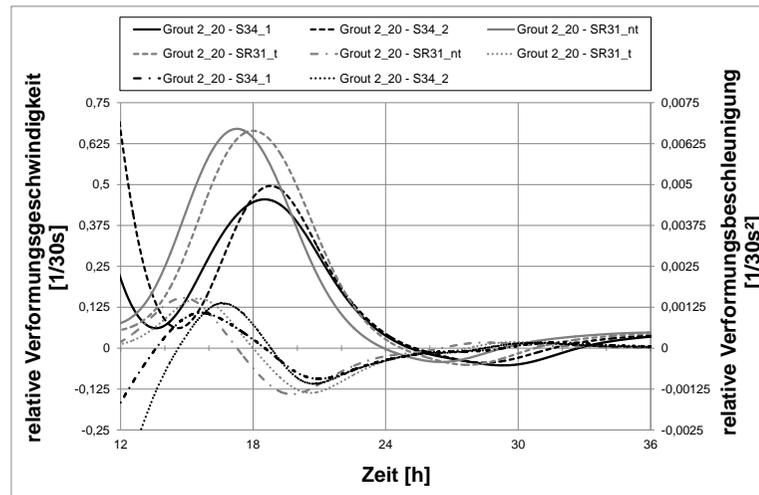


Abbildung A - 2-1: Grout 2 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren

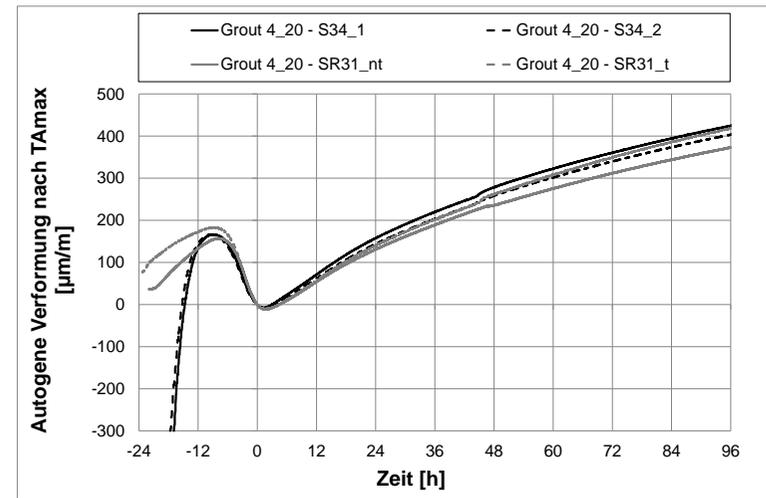
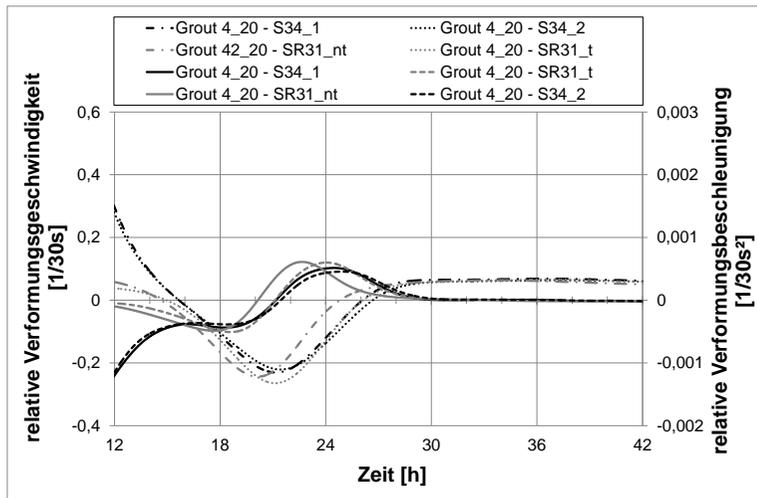


Abbildung A - 2-2: Grout 4 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren

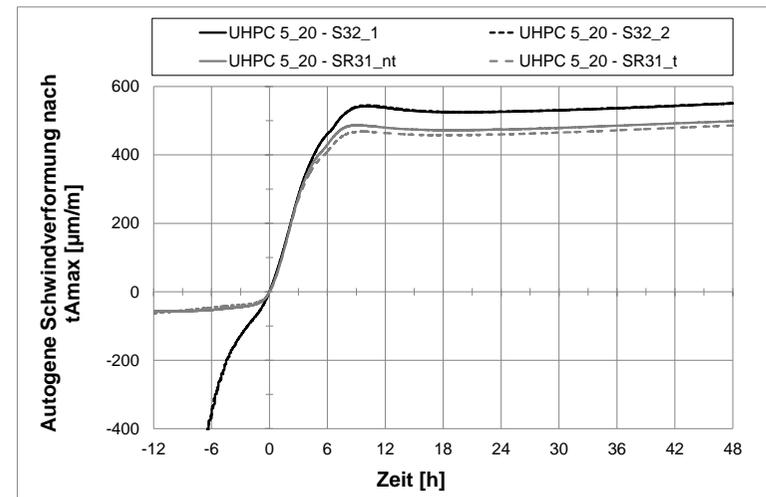
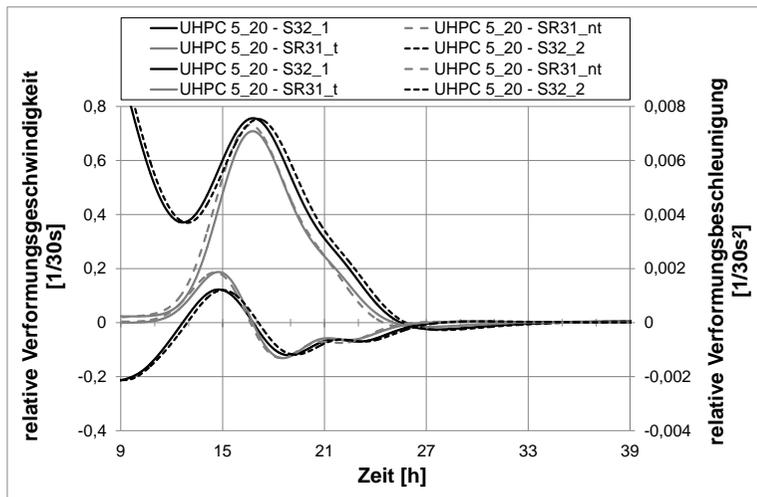


Abbildung A - 2-3: UHPC 5 - Vergleich von Schwindschlauch- und Schwindrinnenverfahren

A-3 Verformungsermittlung mit dem Schwindkegelverfahren (Rampe)

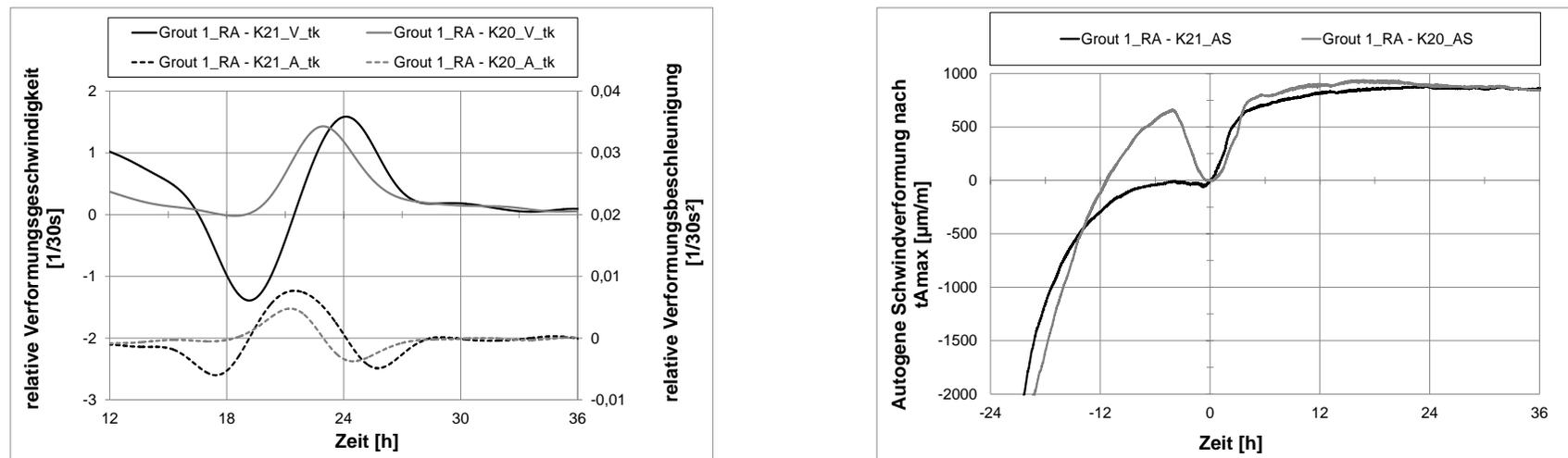


Abbildung A - 3-1: Verformungscharakteristik und Extrempunkte bei Grout 1 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen (Rampe)

A-4 Verformungsermittlung mit dem Schwindkegelverfahren

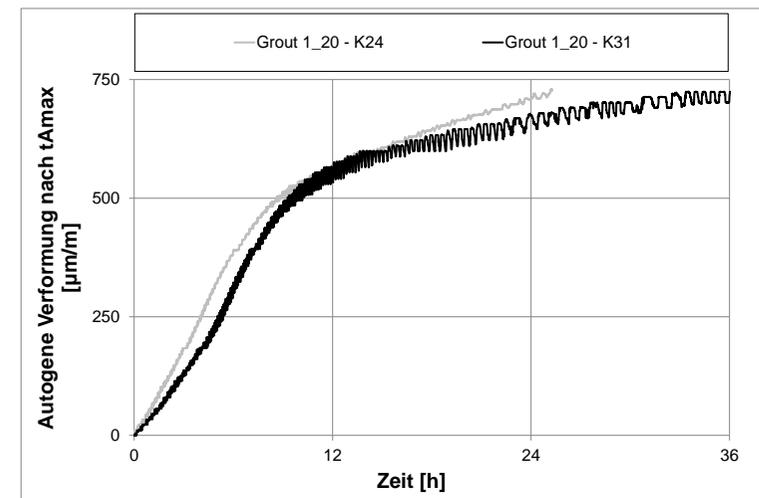
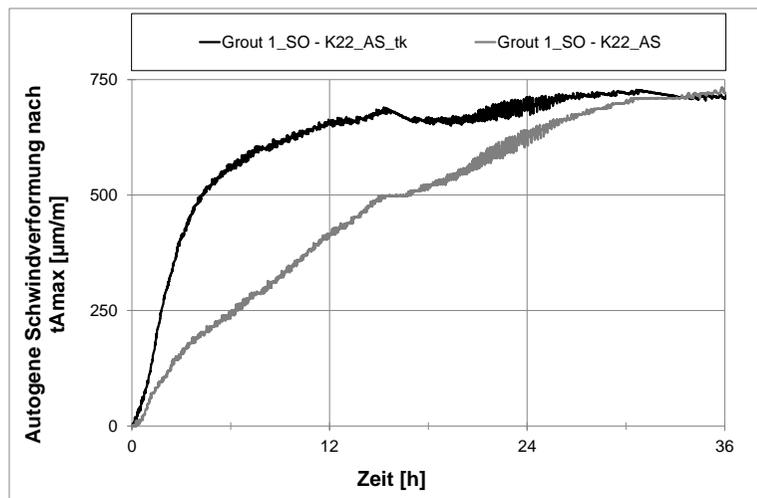


Abbildung A - 4-1: Verformungscharakteristik und Extrempunkte bei Grout 1 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

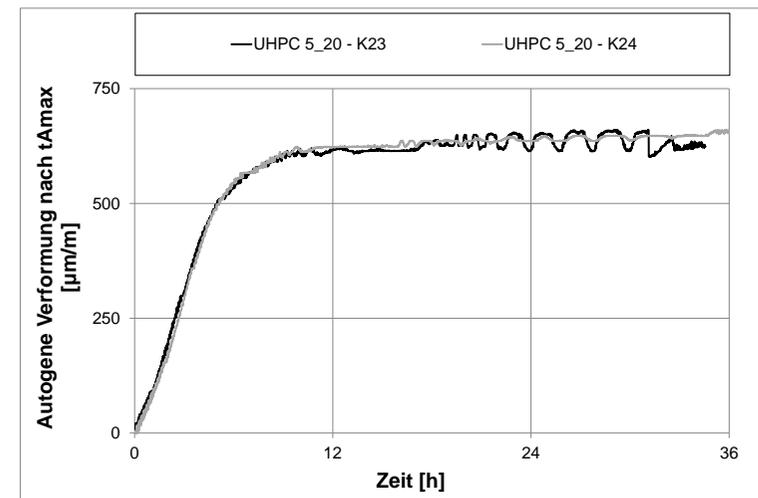
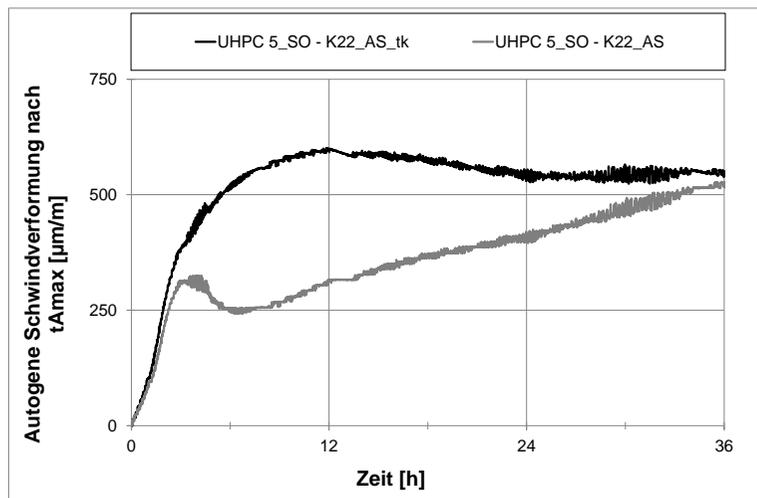


Abbildung A - 4-2: Verformungscharakteristik und Extrempunkte bei UHPC 5 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

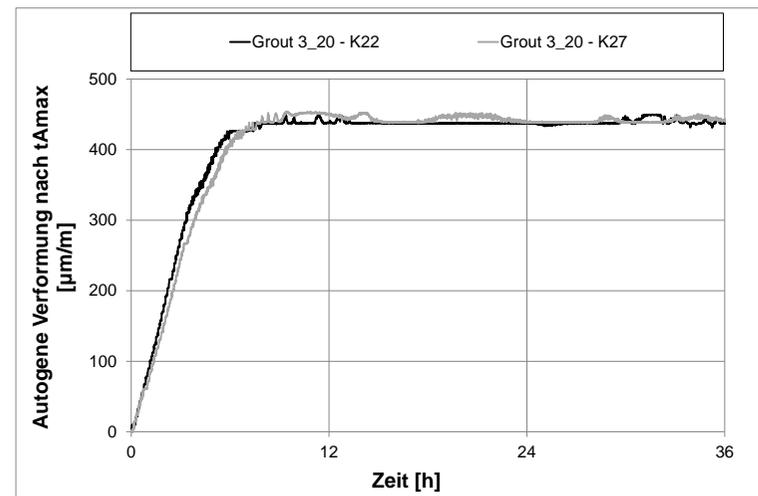
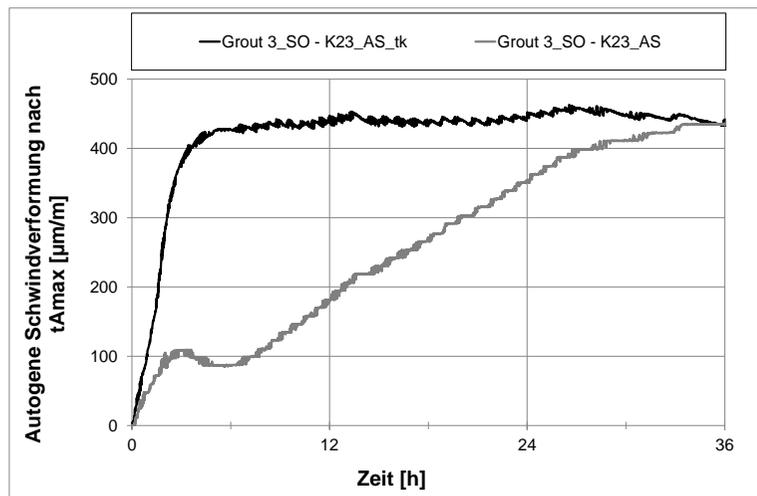


Abbildung A - 4-3: Verformungscharakteristik und Extrempunkte bei Grout 3 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

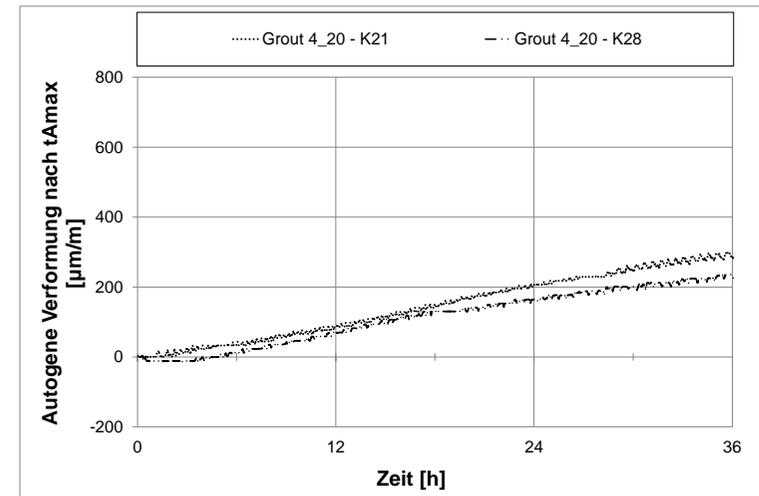
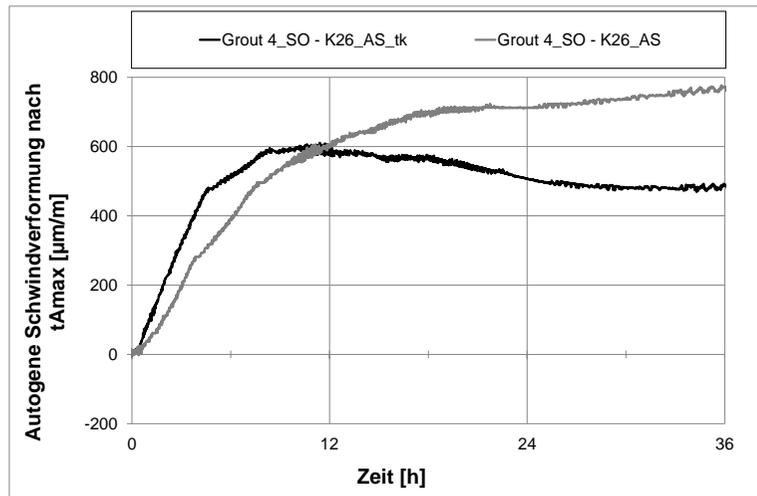


Abbildung A - 4-4: Verformungscharakteristik und Extrempunkte bei Grout 4 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

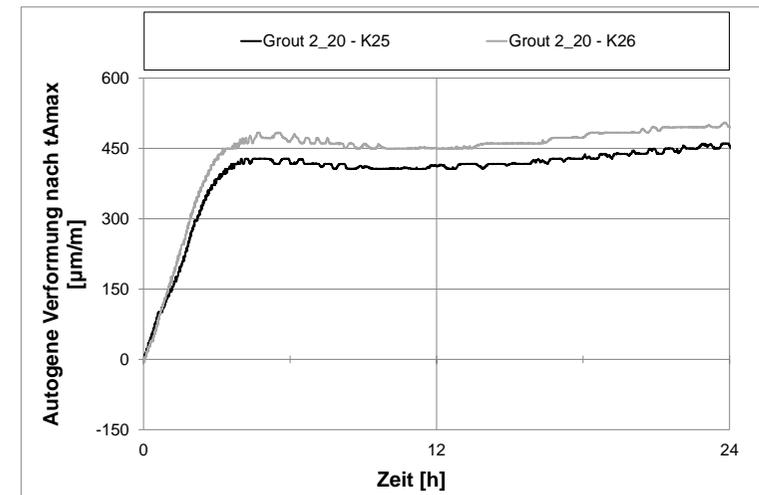
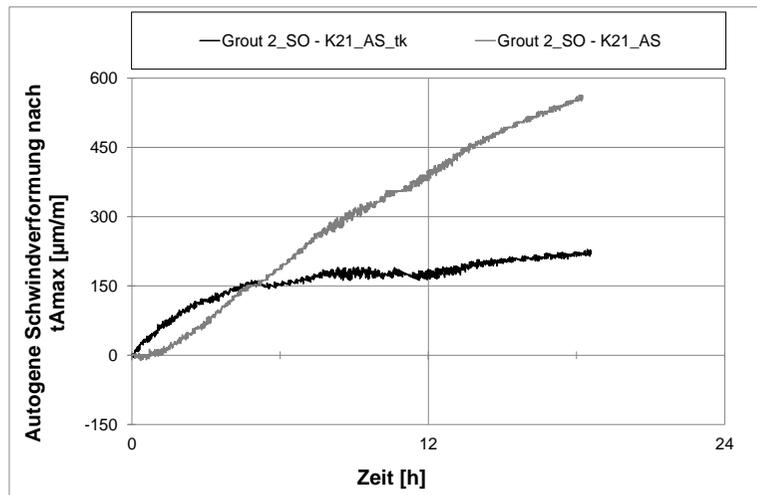


Abbildung A - 4-5: Verformungscharakteristik und Extrempunkte bei Grout 2 unter nicht-isothermen Temperaturbedingungen

A-5 Freies und dehnungsbehindertes Schwinden

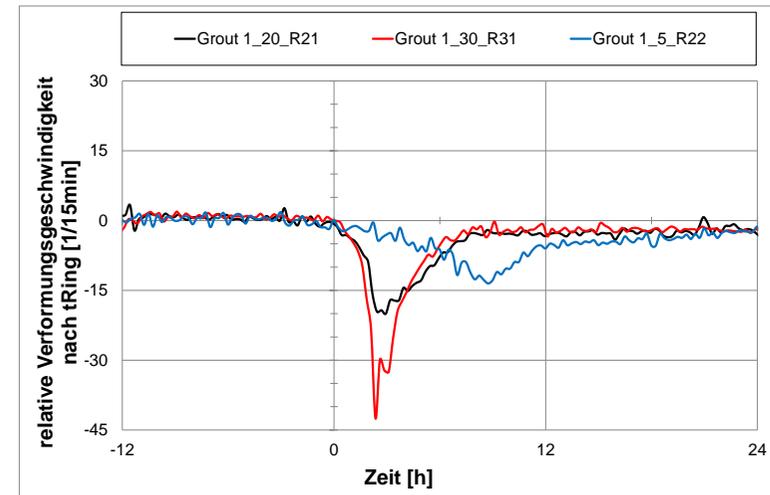
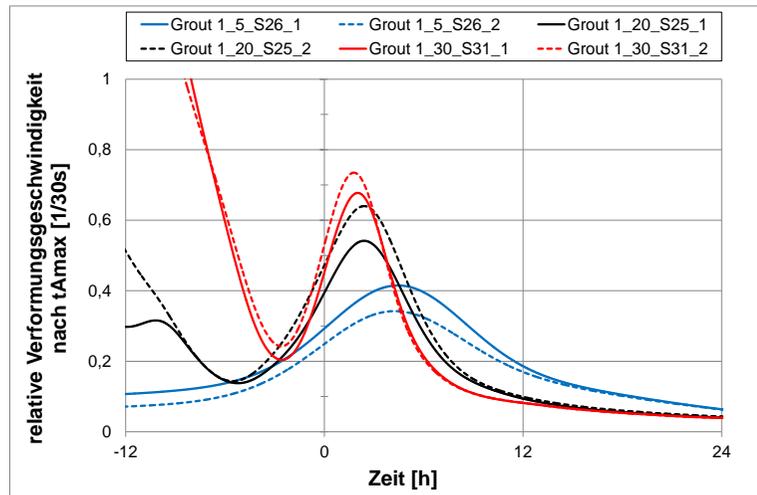


Abbildung A - 5-1: Grout 1 - relative Verformungsgeschwindigkeiten im Schwind Schlauch- (links) und Schwindringverfahren (rechts)

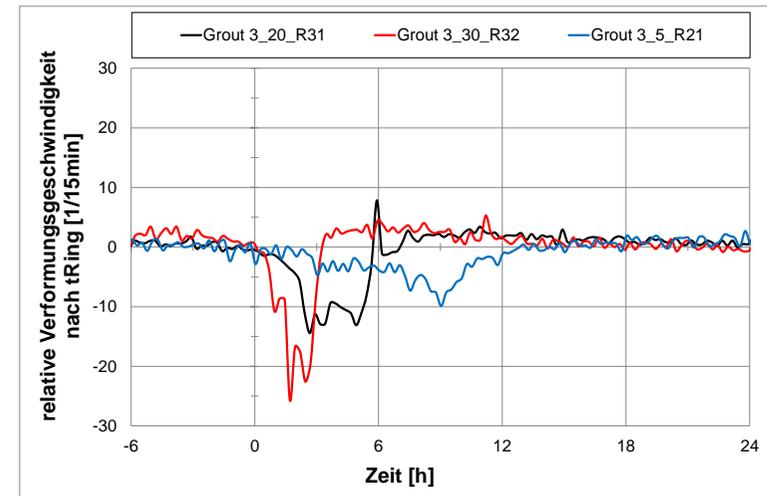
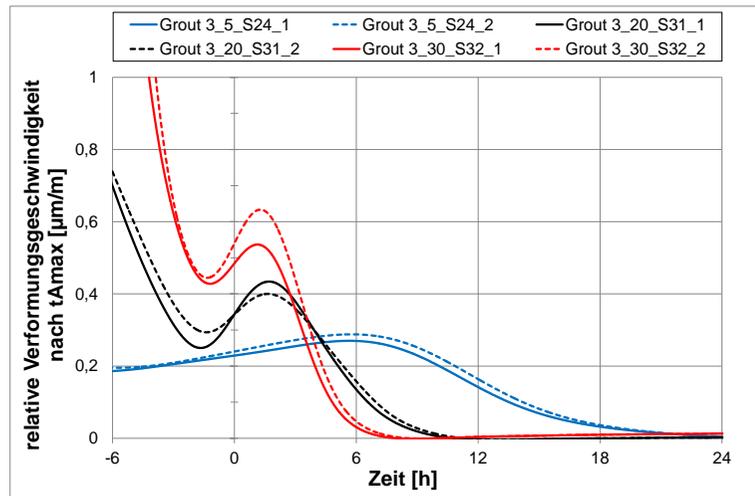


Abbildung A - 5-2: Grout 3 - relative Verformungsgeschwindigkeiten im Schwindschlauch- (links) und Schwindringverfahren (rechts)

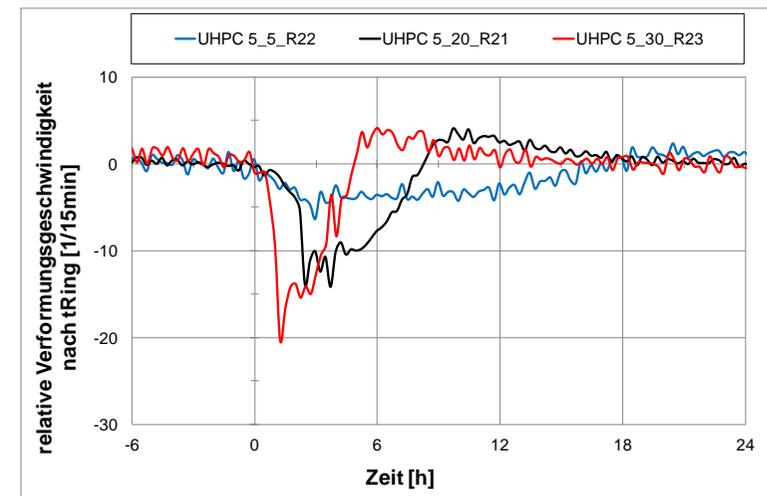
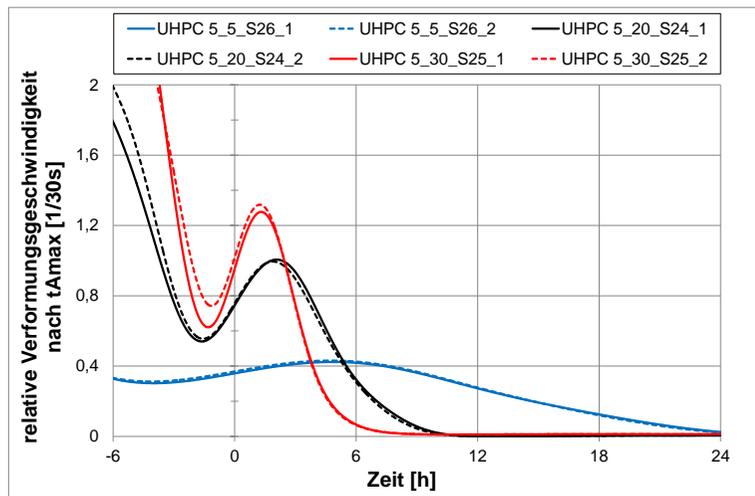


Abbildung A - 5-3: UHPC 5 - relative Verformungsgeschwindigkeiten im Schwindschlauch- (links) und Schwindringverfahren (rechts)

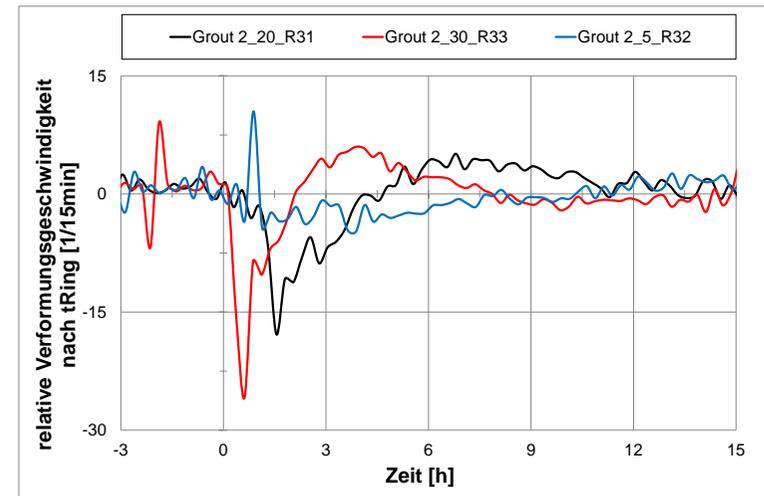
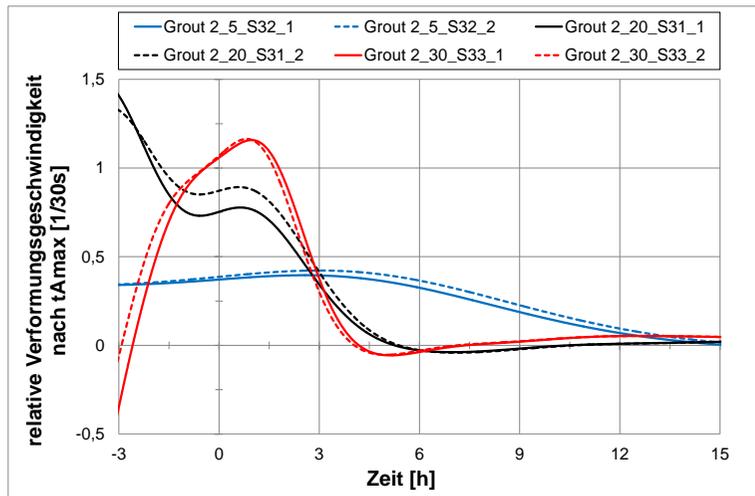


Abbildung A - 5-4: Grout 2 - relative Verformungsgeschwindigkeiten im Schwindschlauch- (links) und Schwindringverfahren (rechts)

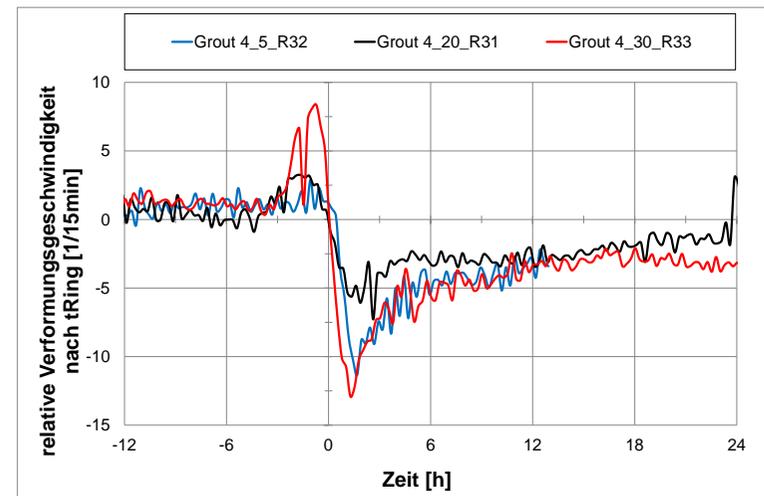
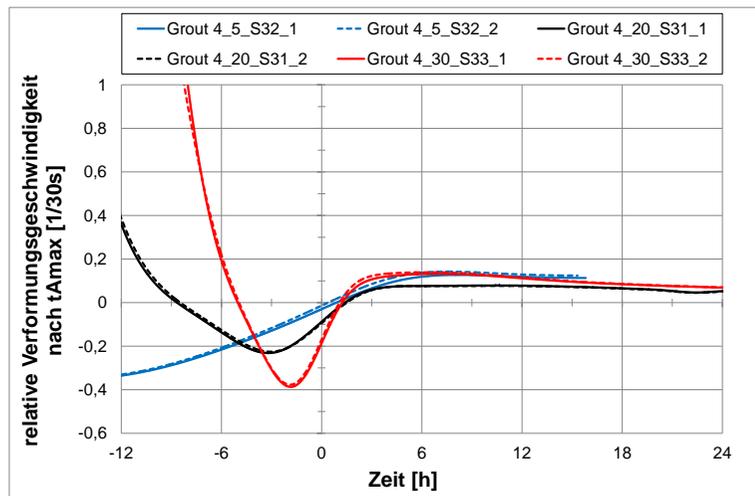


Abbildung A - 5-5: Grout 4 - relative Verformungsgeschwindigkeiten im Schwindschlauch- (links) und Schwindringverfahren (rechts)

A-6 Freies autogenes Schwinden mit schwindreduzierenden Zusätzen

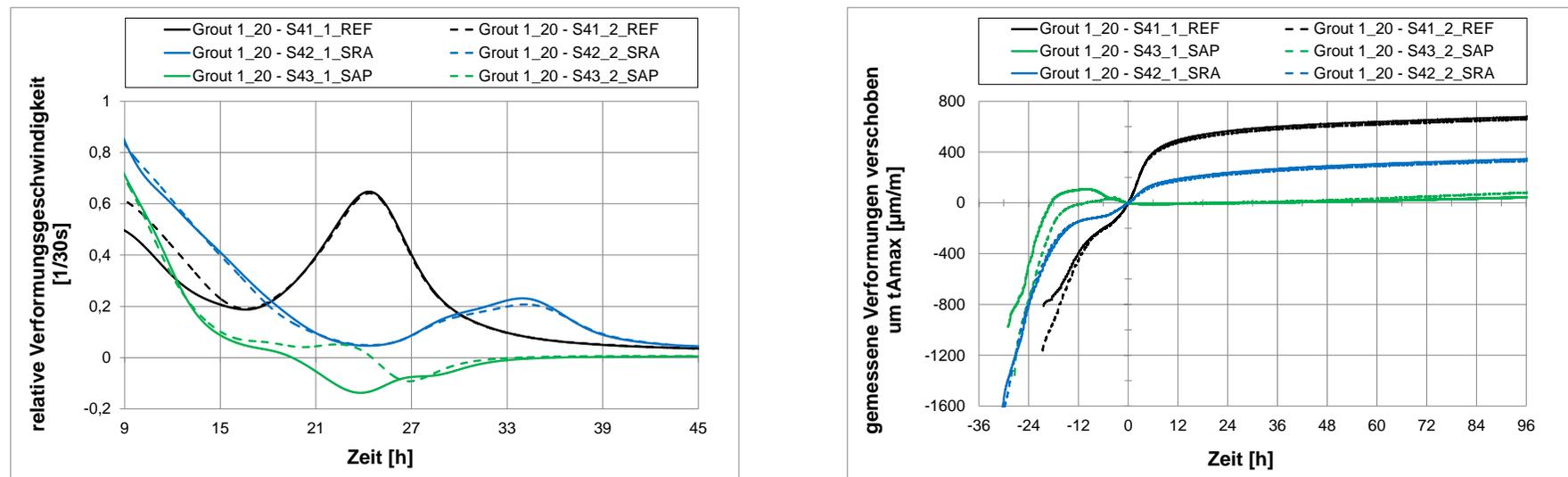


Abbildung A - 6-1: Gemessene und spannungsinduzierende autogene Schwindverformungen von Grout 1 mit Modifizierung durch schwindreduzierenden Zusätze

Wissenschaftlicher Werdegang

Name: Hannes Weicken

geboren am: 01.04.1980

Ausbildung:

1992 - 2000 Käthe-Kollwitz-Gymnasium Hannover,
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

2000 - 2001 Zivildienst beim Deutschen Roten Kreuz

2001 - 2003 Ausbildung zum Beton- und Stahlbetonbauer,
GP Papenburg Baugesellschaft mbH
Abschluss: Geselle

Akademische Ausbildung:

2003 - 2008 Studium des Bauingenieurwesens,
Fachrichtung: Bauwerksplanung und -konstruktion,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover,
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Beruflicher Werdegang:

2008 - 2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

seit 2015 Niederlassungsleiter Hamburg, IBOS GmbH

Berichte aus dem Institut für Baustoffe

Bisher in dieser Schriftenreihe erschienene Hefte:

- Heft 1: Thomas Freimann: „Einfluß von Steinkohlenflugaschen auf das rheologische Verhalten von Zementleimen und -mörteln“, 2002.
- Heft 2: Susanne Thoke-Weidlich: „Alkaliionendiffusion in carbonatisierte und nicht carbonatisierte Betone“, 2002
- Heft 3: Lasse Petersen: „Einfluss baustofflicher Schädigungsprozesse auf das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen“, 2003
- Heft 4: Holger Höveling: „Robustheit von Selbstverdichtendem Beton (SVB)“, 2006
- Heft 5: Jens Uwe Pott: „Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume“, 2006
- Heft 6: Steffen Anders: „Betontechnologische Einflüsse auf das Tragverhalten von Grouted Joints“, 2008
- Heft 7: Maik Wefer: „Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung“, 2010
- Heft 8: Fongjan Yirasit: „Chemical, Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Cement“, 2010
- Heft 9: Ludger Lohaus; Thomas Steinborn: „Fortschritte in der Baustofftechnik: Festschrift 10 Jahre Institut für Baustoffe“, Leibniz Universität Hannover und 70 Jahre Harald Schorn, 2011
- Heft 10: Nick Lindschulte: „Drucktragverhalten von Rohren aus Ultrahochfestem Beton mit Stahlblechummantelung“, 2013
- Heft 11: Karen Fischer: „Betontechnische Einflüsse auf das Erscheinungsbild von Sichtbetonflächen bei Zementleimleckagen“, 2014
- Heft 12: Thomas Steinborn (Hrsg.): „Festschrift Ludger Lohaus zur Vollendung des sechzigsten Lebensjahres“, 2014
- Heft 13: Nadja Oneschkow: „Analyse des Ermüdungsverhaltens von Beton anhand der Dehnungsentwicklung“, 2014
- Heft 14: Yared Assefa Abebe: „Flowable and Stable Concrete: Design, Characterization and Performance Evaluation“, 2017
- Heft 15: Michael Werner: „Realitätsnahe Materialeigenschaften von hochfesten Feinkornbetonen in Grouted Joints“, 2017

- Heft 16: Jesko Gerlach: „Ein performance-basiertes Konzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung chemisch beanspruchter Betonbauteile“, 2017
- Heft 17: Thomas Gläser: „Optimierung der Wassereffizienz von Mörtelzusammensetzungen als Basis für den Entwurf von Hochleistungsbetonen“, 2017
- Heft 18: Julian Hümme: „Ermüdungsverhalten von hochfestem Beton unter Wasser“, 2018
- Heft 19: Kerstin Elsmeier: „Einfluss der Probekörpererwärmung auf den Ermüdungswiderstand von hochfestem Vergussbeton“, 2019
- Heft 20: Hannes Weicken: „Experimentelle Methodik zur Bestimmung des autogenen Schwindverhaltens von Hochleistungsbetonen“, 2019

Mitteilungen des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung

Die Hefte der bis 1995 laufenden Schriftenreihe „Mitteilungen des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung“ können ebenfalls über das Institut für Baustoffe der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover bezogen werden.

Institut für Baustoffe
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Appelstr. 9a
30167 Hannover

Tel.: 0511 / 762-3722

Fax: 0511 / 762-4736

<http://www.baustoff.uni-hannover.de>