

Zur experimentellen Bestimmung der Schwindverformungen von Zementstein

Kooperationsprojekt zwischen dem
Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum und dem
Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft der Universität Duisburg-Essen

Dissertation
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Fakultät für Bauingenieurwesen
der
Ruhr-Universität Bochum

von
Hussein Alawieh
Bochum

Bochum 2006

Kurzfassung

Die Bestimmung der Schwindverformungen von Zementstein stellt seit den ersten experimentellen Untersuchungen eine besondere Herausforderung dar. Ein Vergleich von Ergebnissen verschiedener Quellen führt oft zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen, was den Verlauf sowie die Größenordnung der Schwindverformungen von Zementstein anbelangt. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Messverfahren mit entsprechender Auswertemethodik entwickelt, das es erlaubt, das Trocknungsschwinden von Zementstein in kürzester Zeit und in kleinen Feuchteschritten zu erfassen. Das entwickelte Messverfahren basiert auf der berührungslosen, lasergestützten Messung der Verformungen speziell präparierter filigraner Proben und zeichnet sich durch eine hohe Auflösung aus. Mit den durchgeführten Schwindmessungen konnten die Reproduzierbarkeit des Messverfahrens bestätigt und tendenzielle Aussagen hinsichtlich der Größenordnung und Verlauf der Schwindverformungen von Zementsteinen angestellt werden.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der Fakultät für Bauingenieurwesen als Dissertation angenommen.

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines Kooperationsprojektes zwischen dem Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum und dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft der Universität Duisburg-Essen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher danke ich sehr herzlich für sein großes Interesse an dieser Arbeit, für die äußerst wertvollen Ratschläge und seine stete Diskussionsbereitschaft. Trotz der arbeitsintensiven Phase nach seiner Berufung an die Ruhr-Universität Bochum gab er mir stets Gelegenheit, meine Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Max J. Setzer, der mir in der vakanten Phase des Lehrstuhls in Bochum die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit an seinem Institut durchzuführen, für das mir entgegen gebrachte Vertrauen sowie die intensive wissenschaftliche Betreuung. Seine wohlwollende Unterstützung trug wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Bauphysik und Materialwissenschaft und des Lehrstuhls für Baustofftechnik für die sehr gute und konstruktive Zusammenarbeit. Besonderer Dank gebührt Herrn Patrick Dubray und Herrn Dipl.-Ing. Christian Duckheim. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Phys. Peter Kury für seine tatkräftige Unterstützung bei der Verwendung von SSIOD und bei Herrn Dr.-Ing. Erol Erdem für seine stete Diskussionsbereitschaft herzlich bedanken.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern und meiner Frau Shana. Sie gaben mir stets die nötige Kraft und den Rückhalt, um diese Arbeit abzuschließen.

Bochum, im Juni 2006

Hussein Alawieh

Referenten:

Dissertation eingereicht am 18.05.2005

Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Mündliche Prüfung am 10.08.2005

Prof. Dr.-Ing. habil. Max J. Setzer

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....	1
1.1	EINLEITUNG	1
1.2	ZIELSETZUNG.....	2
2	ZEMENTSTEINSTRUKTUR UND WASSERMODIFIKATIONEN	3
2.1	ZEMENTGELBILDUNG.....	3
2.2	PORENRAUM UND INNERE OBERFLÄCHE	4
2.3	WASSERMODIFIKATIONEN IM ZEMENTSTEIN	7
2.4	SORPTIONSVERHALTEN VON ZEMENTSTEIN	8
3	GRUNDLAGEN ZUM SCHWINDEN UND QUELLEN.....	11
3.1	ALLGEMEIN	11
3.2	VERLAUF UND GRÖßENORDNUNG DES TROCKNUNGSSCHWINDENS	12
3.2.1	<i>Verhältnis zwischen Schwinddehnung und Masseverlust.....</i>	<i>12</i>
3.2.2	<i>Verhältnis zwischen Schwinddehnung und Gleichgewichtsfeuchtigkeit. 15</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>Reversible und irreversible Schwindverformungen.....</i>	<i>18</i>
3.3	WEITERE SCHWINDARTEN VON ZEMENTSTEIN	20
3.3.1	<i>Kapillarschwinden.....</i>	<i>20</i>
3.3.2	<i>Chemisches Schwinden.....</i>	<i>21</i>
3.3.3	<i>Carbonatisierungsschwinden.....</i>	<i>22</i>
3.4	EINFLUSSGRÖßEN.....	23
3.5	PRAKTISCHE BEDEUTUNG UND EMPIRISCHE BERECHNUNGSANSÄTZE	26
3.5.1	<i>Zwang- und Eigenspannung infolge Bauteilaustrocknung.....</i>	<i>26</i>
3.5.2	<i>Empirische Berechnungsmodelle.....</i>	<i>27</i>
4	PHYSIKALISCHE STRUKTURMODELLE UND SCHWINDMECHANISMEN.....	30
4.1	MIKROSTRUKTURELLE ZEMENTSTEINMODELLE	30
4.2	MECHANISMEN ZUR BESCHREIBUNG DER HYGRISCHEN VERFORMUNGEN	33
4.2.1	<i>Ansätze nach Powers</i>	<i>33</i>
4.2.2	<i>Mechanismen im Münchner Modell</i>	<i>36</i>
4.3	ERWEITERUNG DES MÜNCHNER MODELLS NACH SETZER.....	38

5	EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG DES TROCKNUNGSSCHWINDENS VON ZEMENTSTEIN	42
5.1	FEUCHTEGRADIENT.....	42
5.2	EINFLUSS DES FEUCHTEGRADIENTEN AUF DIE SCHWINDMESSUNG	43
5.3	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGSMETHODEN	47
5.3.1	<i>Überblick</i>	<i>47</i>
5.3.2	<i>Probekörper.....</i>	<i>48</i>
5.3.3	<i>Messaufbau und -instrumente.....</i>	<i>51</i>
5.3.4	<i>Umgebungsfeuchtigkeit.....</i>	<i>54</i>
6	MESSVERFAHREN ZUR EXPERIMENTELLEN BESTIMMUNG DER FREIEN SCHWINDDEHNUNGEN VON ZEMENTSTEIN.....	56
6.1	AUSGANGSSITUATION.....	56
6.2	GRUNDLAGEN UND MESSPRINZIP	57
6.3	PROBEKÖRPER	58
6.3.1	<i>Konzept</i>	<i>58</i>
6.3.2	<i>Dicken- und Steifigkeitsverhältnis</i>	<i>60</i>
6.3.3	<i>Vorversuche zur Festlegung der Parameter für die Schichten (Z) und (S)</i>	<i>62</i>
6.3.4	<i>Herstellungs- und Präparationsmethode.....</i>	<i>63</i>
6.4	KOMPONENTEN DES MESSAUFBAUS	66
6.4.1	<i>Laser und optische Komponenten.....</i>	<i>66</i>
6.4.2	<i>Positionssensible Detektoren.....</i>	<i>67</i>
6.4.3	<i>Messkammer und Feuchtegenerator.....</i>	<i>70</i>
6.4.4	<i>Geometrische Anordnung des Versuchsaufbaus.....</i>	<i>72</i>
6.5	AUSWERTEMETHODE	75
6.5.1	<i>Allgemein</i>	<i>75</i>
6.5.2	<i>Experimentelle Ermittlung des Krümmungsradius.....</i>	<i>75</i>
6.5.3	<i>Berechnung der Schwinddehnungen.....</i>	<i>79</i>
6.5.4	<i>Bestimmung des E-Moduls.....</i>	<i>81</i>
6.5.5	<i>Einfluss der Klebeschicht.....</i>	<i>82</i>
6.6	GEOMETRISCHER VERGRÖßERUNGSFAKTOR	84
6.7	FEHLERBETRACHTUNG	85
6.7.1	<i>Krümmungsradius.....</i>	<i>85</i>
6.7.2	<i>Schwinddehnung</i>	<i>88</i>
6.8	HERSTELLUNGSMETHODE FÜR DÜNNWANDIGE HOHLZYLINDER AUS ZEMENTSTEIN	91
6.8.1	<i>Überblick</i>	<i>91</i>
6.8.2	<i>Herstellungsmethode</i>	<i>91</i>

7	ANWENDUNG DES ENTWICKELTEN MESSVERFAHRENS.....	94
7.1	ÜBERBLICK.....	94
7.2	VERLAUF DER PSD-SIGNALE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ZEIT	94
7.3	PSD-SIGNALE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER GLEICHGEWICHTSFEUCHTIGKEIT .	97
7.4	BESTIMMUNG DES KRÜMMUNGSRADIUS.....	99
7.5	BERECHNUNG DER SCHWINDDEHNUNGEN	100
7.6	ÜBERPRÜFUNG DER REPRODUZIERBARKEIT.....	101
7.7	DISKUSSION DER GEMESSENEN SCHWINDDEHNUNGEN	102
7.7.1	<i>Größenordnung und Verlauf.....</i>	<i>102</i>
7.7.2	<i>Korrelation zwischen Schwinddehnung (ε_h) und chemischem Potential (μ)</i>	<i>104</i>
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	108
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	110
10	ANHANG.....	120

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Bei den Ursachen für Formänderung von Beton kann im Allgemeinen zwischen lastabhängigen und lastunabhängigen Verformungen unterschieden werden. Zusätzlich kann eine Einteilung darüber erfolgen, ob sich die Verformungen mit der Zeit verändern oder konstant bleiben, also zeitabhängig oder zeitunabhängig sind. Bleiben die durch die Belastung erzeugten Deformationen nach der Entlastung im Material gespeichert, so spricht man von irreversiblen, ansonsten von reversiblen Verformungen.

Bauteile aus Beton stehen in ständiger Wechselwirkung mit ihren klimatischen Umgebungsbedingungen. Neben den mechanischen Belastungen verursachen thermische und hygrische Einwirkungen (lastunabhängige) Deformationen im beanspruchten Betonbauteil. Deformationen, die ausschließlich auf eine Veränderung des Feuchtehaushaltes im Beton zurückzuführen sind, werden als Schwind- bzw. Quellverformungen bezeichnet. Nimmt die Feuchtigkeit des mikroporösen Baustoffes Beton zu, so geht damit eine *Volumenexpansion* einher, das *Quellen*. Gibt dieser Feuchtigkeit ab, findet eine *Volumenkontraktion* statt, die als *Schwinden* bezeichnet wird. Für das hygrische Verhalten von Beton ist der Zementstein verantwortlich.

Für Zementstein liegen in der Literatur zahlreiche Arbeiten vor, die sich mit der experimentellen Erfassung oder der modellhaften Beschreibung der hygrischen Verformungen beschäftigen. Beide Themengebiete wurden in der Vergangenheit intensiv und teilweise kontrovers diskutiert. Trotz der Vielzahl der auf diesem Gebiet durchgeführten Forschungsarbeiten sind bis heute noch wichtige Fragen offen geblieben. Ein Vergleich von Ergebnissen verschiedener experimenteller Untersuchungen führt oft zu unterschiedlichen Schlussfolgerungen, insbesondere was den funktionalen Verlauf der Schwindverformungen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit bzw. Masseänderung betrifft. Auch zur Größenordnung der zu erwartenden Schwindverformungen von Zementstein liegen stellenweise unterschiedliche Ergebnisse vor.

Als Ursache für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachtete Schwindart, das *Trocknungsschwinden*, werden insgesamt 4 unterschiedliche Mechanismen zugrunde gelegt. Eine experimentelle Basis, um die zugehörigen Modellvorstellungen zu verifizieren, fehlt teilweise bis heute noch. Erforderliche Messungen der Schwindverformungen, die einen weiten Feuchtebereich über kleine Feuchteschritte abdecken und/oder verschiedene Zementsteinstrukturen berücksichtigen, liegen nur vereinzelt vor. Die Mehrzahl der veröffentlichten Schwinduntersuchungen zielt allein auf die Bestimmung eines Endschwindmaßes unter Einstellung einer einzelnen Umgebungsfeuchtigkeit ab. Versuchsparameter wie z.B. Probenalter, -geometrie und -lagerung sowie Trocknungsregime (Feuchtgradient und daraus resultierende Risse in der Probe) können einen ent-

scheidenden Einfluss auf das Ergebnis von Schwindmessungen haben und lassen einen Vergleich verschiedener Quellen kaum zu.

Die genaue Bestimmung der unbehinderten Schwind- und Quellverformungen von Zementstein (unrestrained shrinkage) stellt seit den ersten experimentellen Untersuchungen auf diesem Gebiet eine besondere Herausforderung dar. Je nach Versuchsdurchführung und Probekörpergeometrie können im Messsignal, neben dem reinen Materialverhalten infolge Feuchtewechsel, Effekte aus Feuchtegradientenbildung auftreten, die eine Auswertung der Messergebnisse erschweren und oft zu nicht unerheblichen Diskrepanzen bei der Bewertung der Ergebnisse führen können. Zusätzlich sind Schwinduntersuchungen im Allgemeinen zeitintensive Versuche.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll ein Ansatz zur experimentellen Bestimmung der unbehinderten Schwindverformungen von Zementstein erarbeitet werden. Dabei soll zunächst eine zweckmäßige Probengeometrie festgelegt und eine entsprechende Herstellungsmethode vorgeschlagen sowie eine geeignete Messmethodik entwickelt werden. Ziel dieser Arbeit ist es somit, ein Messverfahren zu entwickeln, das es erlaubt, das Trocknungsschwinden und Quellen von Zementstein berührungslos, in kürzester Zeit und über einen weiten Feuchtebereich in kleinen Feuchteschritten zu erfassen. Mit diesem Messverfahren soll eine Grundlage gegeben werden, Informationen über den Verlauf und die Größenordnung der unbehinderten Schwindverformungen im Gleichgewichtszustand unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzungen zu erhalten.

2 Zementsteinstruktur und Wassermodifikationen

2.1 Zementgelbildung

Die Eigenschaften des Betons werden vom Zeitpunkt des Mischprozesses bis zum erhärteten Zustand durch Gehalt und Eigenschaften seiner Ausgangskomponenten bestimmt. Die Struktur des erhärteten Betons ist sehr komplex und lässt sich, wie z.B. von Wittmann angegeben, auf unterschiedlichen Ebenen darstellen [113]. Auf der Makroebene kann Beton zunächst als homogener Werkstoff betrachtet werden, d.h. jeder Punkt im Material hat identische Eigenschaften. Auf der Mesoebene wird dagegen zwischen Zementstein, Gesteinskörnung, Poren und ungebundenem Wasser differenziert, wobei die Eigenschaften dieser Phasen jeweils als homogen idealisiert werden können. Auf der Mikroebene werden die genannten Phasen der Betonstruktur selbst als heterogene Gebilde betrachtet. Die Zementsteinmatrix besteht dabei aus den Hydratationsprodukten des Zementes, Poren, Wasser mit unterschiedlichen Bindungsverhältnissen sowie aus unhydratisierten Zementpartikeln. Für das hygrische Verhalten von Beton ist im Wesentlichen der Zementstein verantwortlich, welcher selbst eine heterogene und komplexe Struktur besitzt [83] [113].

Wird Zement mit Wasser vermischt, ergibt sich daraus zunächst Zementleim mit einer je nach Mischungsverhältnis erdfeuchten bis dünnflüssigen Konsistenz. Das Mischungsverhältnis wird Wasserzementwert (w/z-Wert) genannt und besitzt einen dominanten Einfluss auf die Zementstein- und damit auch auf die Betoneigenschaften. Der Vorgang, bei dem aus Zementleim Zementstein entsteht, wird als Hydratation bezeichnet. Bei den deutschen Normzementen ist Portlandzementklinker der wichtigste hydraulisch reagierende Hauptbestandteil und setzt sich im Wesentlichen aus den vier Klinkerphasen Tricalciumsilikat, Dicalciumsilicat, Tricalciumaluminat und Tetracalciumaluminatferrit zusammen, die beim Brennen der Ausgangsstoffe entstehen. Der Anteil der einzelnen Klinkerphasen im Zement wird über die verwendeten Rohstoffe und die Randbedingungen während des Brennvorgangs gesteuert. Entsprechend ihrer ungleichen Reaktionsgeschwindigkeiten und chemischen Zusammensetzung leisten sie einen unterschiedlichen Beitrag bei der Bildung des Zementsteins während der Hydratation [32] [118].

Der gesamte Hydratationsprozess wird in die aufeinander folgenden Stufen Ansteifen, Erstarren und schließlich das Erhärten des Gemisches eingeteilt. Die ersten Hydratationsreaktionen beginnen unmittelbar nach der Wasserzugabe. Als Hydratationsprodukte werden vorwiegend Calciumsilikathydrate (CSH-Phasen), Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und in geringen Mengen Tri- und Monosulfat gebildet. Mit fortschreitender Hydratation wird zunehmend Wasser in die Reaktionsprodukte eingebunden. Die entstandenen Reaktionsprodukte, auch als Zementgel bezeichnet, dringen in die Räume zwischen den

bereits vorhandenen Hydratphasen bzw. den unhydratisierten Zementpartikeln ein. Aufgrund ihrer nadelartigen Form verwachsen sie ineinander netzartig und bilden dabei ein Grundgefüge, das sich mit der Zeit zunehmend verdichtet, bis schließlich ein stabiler Gefügestand erreicht wird (Bild 2.1) [118]. Die CSH-Phasen nehmen mit etwa zwei Dritteln den größten Raum im Zementstein ein und bilden eine zusammenhängende, kontinuierliche Matrix. In diese sind die weiteren Hydratationsprodukte eingebettet, die jedoch auf das hygrische Verhalten der Zementsteinstruktur keinen bedeutsamen Einfluss und zudem nur einen vergleichsweise geringen Volumenanteil besitzen [21] [75] [116]. Der zweitgrößte Volumenanteil im Zementstein wird durch die Zementsteinporen gebildet. Diese sind für anstehende Stoffe je nach Porengröße und -form unterschiedlich zugänglich und besitzen einen dominanten Einfluss auf die Zementstein- bzw. Betoneigenschaften.

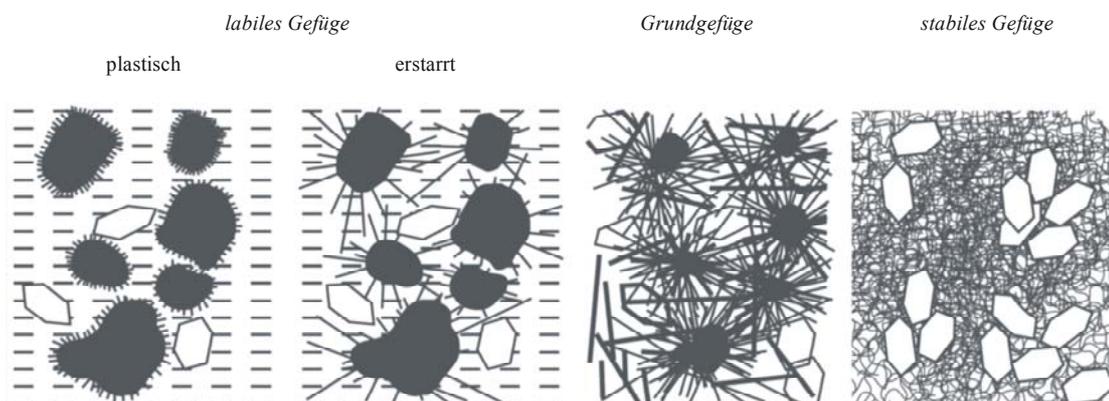


Bild 2.1: Schematische Darstellung der Gefügeentwicklung während der Zementhydratation [118]

2.2 Porenraum und innere Oberfläche

Bei einer vollständigen Hydratation des Zementes werden ca. 25 % seiner Masse an Wasser chemisch in den Hydratphasen gebunden. Eine vollständige Hydratation ist jedoch nur dann möglich, wenn dem Zement eine deutlich höhere Wassermenge zur Verfügung gestellt wird, die etwa 40 % seiner Masse entspricht. Das zusätzliche Wasser wird während der Hydratation physikalisch an den freien Oberflächen im Zementgel gebunden. Die Zwischenräume werden als Gelporen und der physikalisch gebundene Anteil des Wassers im Zementstein als Gelwasser bezeichnet [32]. Die Beweglichkeit der Wassermoleküle wird durch die physikalische Bindung eingeschränkt, so dass in dieser Phase ein Verlassen der Feststoffoberfläche nicht möglich ist [113]. Das Gelwasser steht damit für eine chemische Reaktion mit den bis dahin noch unhydratisierten Zementpartikeln nicht zur Verfügung.

Wird dem Zement mehr als 40 % seiner Masse an Wasser zugegeben, das entspricht einem w/z-Wert größer 0,40, verbleibt der darüber hinausgehende Wasseranteil auch nach einer vollständigen Hydratation im Zementstein ungebunden. Der dadurch gebil-

dete wassergefüllte Raum wird als Kapillarporenraum bezeichnet. Während der fortschreitenden Hydratation nimmt der Kapillarporengehalt durch die gebildeten Reaktionsprodukte ab, bis schließlich der gesamte Zement hydratisiert ist. Im Gegensatz zu den Gelporen ist der Gehalt an Kapillarporen vom w/z-Wert abhängig. Kapillarporen stehen untereinander in Verbindung und bilden im Zementstein ein netzartiges Kanalsystem, das von der Oberfläche bis zum Inneren der Struktur verläuft. Je höher der w/z-Wert ist, desto höher ist der Kapillarporengehalt und damit steigt auch der Grad der Vernetzung dieser Poren untereinander.

Bei einem w/z-Wert kleiner 0,40 steht dem Zement nicht ausreichend Wasser zur vollständigen Hydratation zur Verfügung. Die Konsequenz daraus ist, dass im Zementstein neben dem Zementgel auch unhydratisierte Zementpartikel vorliegen. In diesem Fall bilden sich theoretisch auch keine Kapillarporen aus.

In Bild 2.2 werden unter Annahme einer vollständigen Hydratation, in Abhängigkeit vom w/z-Wert, die einzelnen Volumenanteile des Zementsteins aufgeteilt in Zementgel, unhydratisierten Zement, Gelporen und Kapillarporen, angegeben. Daraus wird deutlich, dass ein porenfreier Zementstein auch unter optimalen Randbedingungen für die Zementgelbildung nicht möglich ist. Für den üblichen w/z-Wert-Bereich zwischen 0,40 und 0,60 ergibt sich nach Bild 2.2 ein Gesamtporenvolumen von ca. 30 bis 45 Vol.-%.

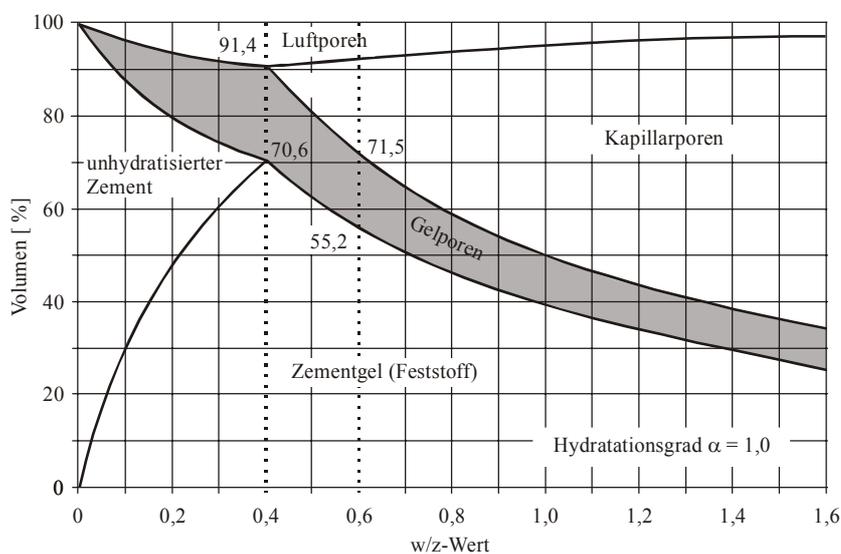


Bild 2.2: Volumenanteile im Zementstein in Abhängigkeit vom w/z-Wert [32]

Der mittlere Gelporendurchmesser liegt in der Größenordnung von einigen 10^{-9} m (1 nm) und entspricht etwa der Größenordnung der Gelpartikel selbst [32] [118]. Im Vergleich dazu weisen Kapillarporen einen mittleren Porendurchmesser auf, der etwa das Tausendfache beträgt (Bild 2.3). Eine scharfe Abgrenzung zwischen den beiden Porenarten kann aufgrund eines fließenden Übergangs in der Porengröße nicht angegeben werden, da z.B. der Porenradius der gröberen Gelporen in etwa dem der feineren

Kapillarporen entspricht. Unter Berücksichtigung der Poren, die zum einen auch bei einer sorgfältigen Verdichtung im Beton verbleiben und zum anderen gezielt durch Verwendung eines Luftporenbildners künstlich eingeführt werden, erstreckt sich der Durchmesser der luft- und/oder wassergefüllten Poren im Zementstein insgesamt über ca. sieben Zehnerpotenzen (Bild 2.3).

Zur Charakterisierung der Zementsteinstruktur werden direkte und indirekte Untersuchungsmethoden herangezogen, mit deren Hilfe die Porenradienverteilung, d.h. der Volumenanteil der Poren in Abhängigkeit von ihrer Größe, bestimmt wird [24] [70] [104]. Die jeweils geeignete Untersuchungsmethode richtet sich nach der Größe der zu bestimmenden Poren (Bild 2.3). Für die Bestimmung der Luftporenverteilung genügt die Lichtmikroskopie. Kapillarporen lassen sich damit nicht mehr erfassen. Für diesen Porengrößenbereich ist die hochauflösende Elektronenmikroskopie eher geeignet. Für die Bestimmung der feinen Kapillarporen und Gelporen werden zumeist indirekte Methoden eingesetzt [94].

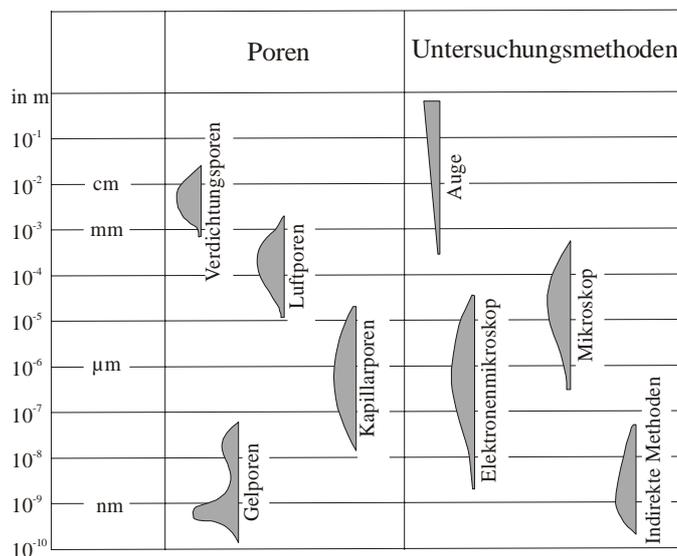


Bild 2.3: Porenradialbereich unterschiedlicher Porenarten im Beton und Zementstein [94]

Aufgrund der hohen Porosität entsteht während der Hydratation eine sehr große innere Oberfläche im Zementstein, daher besitzt Zementstein charakteristische Eigenschaften kolloidaler Stoffe [113]. Je größer die innere Oberfläche im Zementstein ist, desto größer wird der Einfluss oberflächenphysikalischer Mechanismen auf die physikalisch-technischen Eigenschaften des Zementsteins [94] [113]. Die innere Oberfläche steht in engem Zusammenhang mit den wichtigsten Eigenschaften, wie z.B. Druckfestigkeit, Schwindverhalten oder Permeabilität und stellt eine hilfreiche Kenngröße für die Beschreibung der Zementsteinstruktur dar [81] [94] [113]. Als Einflussparameter auf die Größe der inneren Oberfläche können Randbedingungen, wie z.B. Zementeigenschaften, Hydratationsgrad, Herstelltemperatur und w/z-Wert genannt werden, die in erster Linie die Gesamtporosität und die Gelporenbildung beeinflussen [104]. Im Ver-

gleich zu Portlandzement der Festigkeitsklasse 32,5, der im Mittel eine massenbezogene Oberfläche von ca. $0,3 \text{ m}^2 / \text{g}$ besitzt [70], verfügt Zementstein über eine innere Oberfläche von ca. $100 \text{ m}^2 / \text{g}$ [76] [95] [98]. Teilweise werden Werte von bis zu $1000 \text{ m}^2 / \text{g}$ angegeben [116]. Als Mittelwert wird die Zunahme der wasserdampfzugänglichen Oberfläche während der Hydratation im Vergleich zum Zementpulver auf etwa das Tausendfache angenommen [32]. Je größer die innere Oberfläche ist, desto stärker ist die physikalische Wechselwirkung des Zementsteins mit den anstehenden Wasserdampfmolekülen.

Thomas, Jennings und Allen stellten einige in der Literatur angegebene Durchschnittswerte für die innere Oberfläche von Zementstein zusammen, die mit Hilfe verschiedener Analysetechniken gewonnen wurden [104]. Dabei ergab sich bis auf wenige Ausnahmen ein Wertebereich zwischen 80 und $280 \text{ m}^2/\text{g}$. In diesem Wertebereich waren u.a. die oben genannten Einflussgrößen auf die innere Oberfläche bereits berücksichtigt worden. Besonders hohe Werte lieferten analytische Verfahren, wie z.B. Röntgen-Kleinwinkel-Streuung (SAXS) und Nuklearmagnetische Resonanz-Spektroskopie (NMR). Kleinere innere Oberflächen resultierten zumeist aus der Stickstoffsorption und der Quecksilberdruckporosimetrie (MIP) [70] [104] [106].

Die genannten Untersuchungsmethoden beruhen alle auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien. Die Ergebnisse fielen daher in der Regel auch unterschiedlich aus [70] [76] [104] [113]. Der Einfluss der verwendeten Analysetechnik auf die resultierende innere Oberfläche des Zementsteins überstieg an mancher Stelle den Einfluss der oben genannten Herstellungsbedingungen bei weitem. Die am häufigsten angewendeten indirekten Verfahren sind die Quecksilberdruckporosimetrie und die Sorptionsverfahren [76] [104].

2.3 Wassermodifikationen im Zementstein

Aus der Beschreibung der Hydratationsprozesse kann im Zementstein zwischen Kristallwasser, Gelwasser und Kapillarwasser unterschieden werden. Das Kristallwasser liegt als unmittelbarer Bestandteil der CSH-Phasen vor und ist durch Hauptvalenzen chemisch gebunden. Das in den gröberen Kapillarporen befindliche Wasser besitzt weitestgehend makroskopische Eigenschaften, d.h. es verhält sich quasi wie freies Wasser und wird bei einer Trocknung als erstes abgegeben. Je kleiner der Porendurchmesser ist, desto stärker wird die physikalische Wechselwirkung zwischen den Wassermolekülen und der Zementsteinoberfläche (Wasserstoffbrückenbindung und Van der Waals'sche Kräfte) [63] [95]. In den feinen Gelporen wird das Wasser an den Porenwänden adsorptiv gebunden und besitzt im Vergleich zum freien Wasser eine eingeschränkte Bewegungsfreiheit [113].

Eine klare Trennung zwischen Kristallwasser (chemisch gebunden), Gelwasser (physikalisch gebunden) und Kapillarwasser (frei) ist bei der Bestimmung des Wassergehaltes von Zementstein nicht möglich. Ein Grund dafür ist, dass Wassermoleküle teilweise in

so feinen Gelporen angelagert sind, dass ihre Bindungsenergie in der Größenordnung der Bindungsenergie des Kristallwassers liegt [70] [116]. Durch z.B. eine thermische Behandlung des Zementsteins wird somit simultan physikalisch gebundenes Gelwasser, aber auch chemisch gebundenes Wasser aus einigen Hydratationsprodukten entfernt [32] [63] [70] [81] [116]. Des weiteren wird ein Teil des „freien“ Wassers als geordnetes Zwischenschichtwasser angesehen und gehört somit zum Feststoff, ähnlich wie das chemisch gebundene Wasser, das jedoch sehr leicht ausgetrieben werden kann [118]. Schließlich überlagern sich die Porendurchmesser der Gel- und Kapillarporen, so dass auch hier keine scharfe Trennung zwischen Gelwasser und Kapillarwasser möglich ist.

In den ersten Arbeiten von Powers zum Studium der physikalischen Eigenschaften der Zementsteinstruktur wurde bereits darauf hingewiesen, dass die oben genannte Einteilung nur bedingt brauchbar ist. Stattdessen wurde vorgeschlagen, die Differenzierung der im Zementstein befindlichen Wassermodifikationen über ihre Flüchtigkeit bzw. Verdampfbarkeit durchzuführen. Wasser, das bei einem bestimmten Trocknungsregime im Zementstein verbleibt, wurde als „nicht verdampfbares“ Wasser bezeichnet. Der Rest wurde als „verdampfbares“ Wasser bezeichnet. Verdampfbares Wasser setzt sich zum größten Teil aus Gel- und Kapillarwasser zusammen. Nicht verdampfbares Wasser besteht dagegen ausschließlich aus Kristallwasser, wobei einige Hydratationsprodukte bereits vorher Wasser als „verdampfbares Wasser“ abgeben [81].

Eine neuere Einteilung der Wassermodifikationen im Zementstein wurde von Setzer vorgeschlagen [95]. In diese wurden jedoch nur das freie und das physikalisch gebundene Porenwasser aufgenommen, die in der Wechselwirkung mit der Zementsteinoberfläche involviert sind und somit in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte die Zementsteineigenschaften beeinflussen. Es wurde zwischen makroskopisch freiem Wasser, vorstrukturiertem Kondensat und strukturiertem Oberflächenwasser unterschieden. Das freie Wasser liegt in den Kapillarporen vor, wobei hier je nach Transportfähigkeit der Poren zwischen Makrokapillaren (2 mm bis 50 μm), Mesokapillaren (50 μm bis 2 μm) und Mikrokapillaren (2 μm bis 50 nm) unterschieden wird. In den Mesoporen (50 nm bis 2 nm) liegt das vorstrukturierte Wasser vor, das bereits gewissermaßen unter der Einwirkung von Oberflächenkräften steht und sich somit vom makroskopischen Wasser unterscheidet. In den Mesoporen findet der Übergang vom makroskopischen Verhalten des Wassers zum Verhalten unter dominanter Einwirkung oberflächenphysikalischer Kräfte statt. Der letztgenannte Bereich umfasst das strukturierte Oberflächenwasser, das in den kleinsten Poren bis zu einem Porenradius von 2 nm vorliegt.

2.4 Sorptionsverhalten von Zementstein

Der erhärtete Zementstein besitzt eine Porenstruktur, die für den anstehenden Wasserdampf der Umgebung zugänglich ist. Bei der Feuchtigkeitseinwirkung aus der Umgebung treten im Zementstein zwei Effekte auf, die diese Interaktion steuern. Zum einen werden Wasserdampfmodule an den Porenwänden adsorbiert und andererseits kommt

es zur Kondensation des Wasserdampfes im Porenraum. Das Sorptionsverhalten mikroporöser, hygroskopischer Strukturen wird durch den Verlauf ihrer Sorptionsisotherme charakterisiert. Eine Sorptionsisotherme gibt den funktionalen Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung und der in der Struktur angelagerten Wassermenge bei konstanter Temperatur an. Für Zementstein besitzt die Sorptionsisotherme typischerweise einen s-förmigen Verlauf, der zwischen Feuchtaufnahme und -abgabe (Adsorption und Desorption) eine Hysterese aufweist [49] [58] [64] [66] [94] [113]. Die Hysterese wird als Folge unterschiedlicher Benetzungseigenschaften bei Adsorption und Desorption oder anderer durch die Porenraumgeometrie hervorgerufener Effekte angesehen [66] [94]. Ein typischer Verlauf einer Sorptionsisotherme für zementgebundene Baustoffe ist in Bild 2.4 dargestellt.

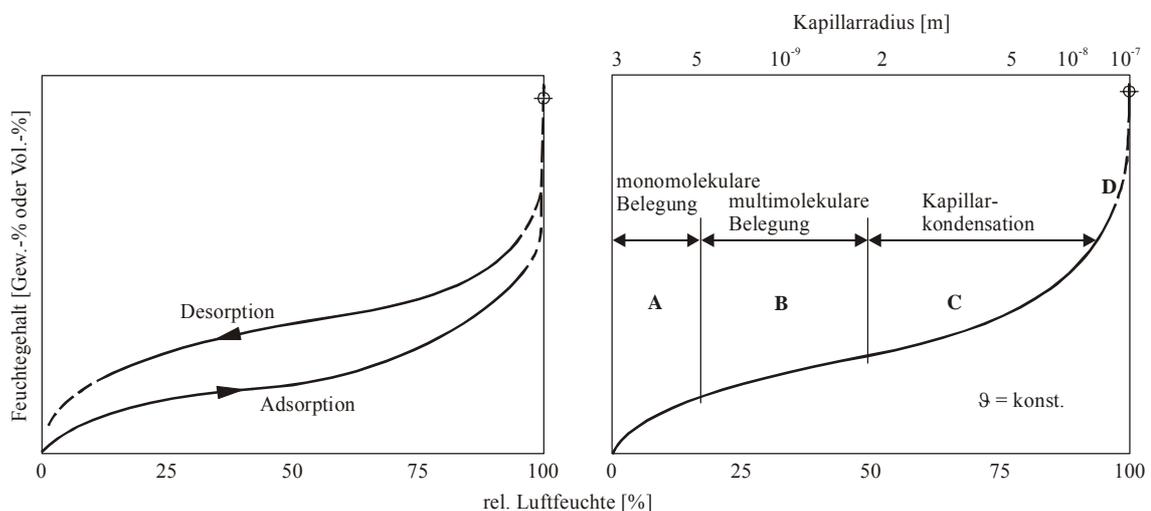


Bild 2.4: Typischer Verlauf einer Sorptionsisotherme von mikroporösen Baustoffen [66]

Geht man von einer trockenen Zementsteinprobe aus, so kommt es während der Adsorption bei sukzessiver Erhöhung der rel. Luftfeuchtigkeit zu einer Anreicherung von Wasserdampfmolekülen auf der inneren Oberfläche bis zum Aufbau einer Monoschicht (Filmkondensat). Diese monomolekulare Belegung wird im Mittel bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 20 und 40 % erreicht [94] [113] [117]. Daraus kann in diesem Feuchtebereich mit Hilfe der vielbeachteten BET-Theorie die innere Oberfläche ermittelt werden [66] [83] [97] [104] [116].

Wird die Feuchtigkeit darüber hinaus weiter gesteigert, wird eine multimolekulare Belegung der inneren Oberflächen aufgebaut. Hierbei nimmt der anfänglich steile Anstieg des Feuchtegehalts ab. Von Badmann, Stockhausen, und Setzer wurde ein funktionaler Zusammenhang zwischen statistischer Filmdicke (Quotient aus adsorbiertem Volumen und BET-Oberfläche) und relativer Luftfeuchtigkeit abgeleitet [8].

Ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 50 % kommt es in den feinen Mikroporen zur Kapillarkondensation. In diesem Feuchtebereich nimmt der Massezuwachs durch Wasseraufnahme einen progressiven Verlauf an. Die Kondensationserscheinung ist auf

eine Erniedrigung des Sättigungsdampfdruckes über konkav gekrümmten Menisken zurückzuführen [66]. Unter Annahme eines sphärischen Meniskus in einer zylinderförmigen Pore erhält man die häufig verwendete Kelvingleichung [66]. Mit der Kelvingleichung, die in Kapitel 4.2.1 näher behandelt wird, kann für eine gegebene Umgebungsfeuchtigkeit ein Grenzporendurchmesser berechnet werden. Für Poren, die einen kleineren Durchmesser besitzen, kann ein gefüllter Zustand durch Kapillarkondensation angenommen werden [10] [24] [31] [99]. Auf der Basis der Kelvingleichung wurde von Barrett, Joyner und Hallenda die sogenannte BJH-Methode entwickelt, mit deren Hilfe aus Sorptionsmessungen heute standardmäßig die Porenradienverteilung im Zementstein bestimmt werden kann [12].

Mit weiterer Steigerung der Feuchtigkeit werden zunehmend die feinen Poren gefüllt und in den größeren Poren kommt es zur Kapillarkondensation [66] [94] [113] [117]. Eine schematische Darstellung der Porenfüllung im Zementstein für die oben dargestellten Bereiche während der Adsorption ist in Bild 2.5 angegeben. Während der Desorption werden in umgekehrter Abfolge zunächst die größeren Poren entleert und danach erst die feinen Poren.

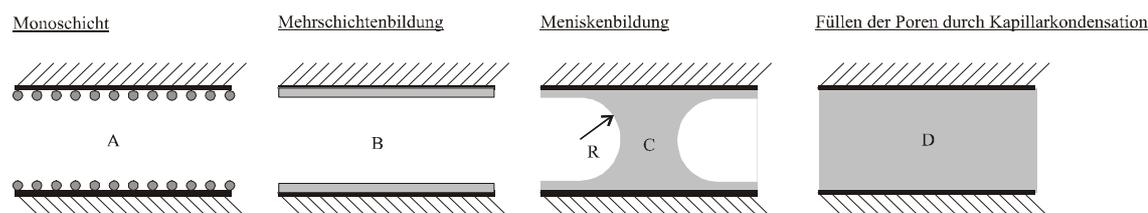


Bild 2.5: Schematische Darstellung der Mikroporenfüllung im Zementstein (Adsorption) [66]

3 Grundlagen zum Schwinden und Quellen

3.1 Allgemein

Mit dem Begriff Trocknungsschwinden wird eine Volumenkontraktion des Festbetons bezeichnet, die bei einer Austrocknung durch Wasserabgabe an die Umgebung verursacht wird. Dabei findet ein Feuchtetransport vom Betoninneren nach außen statt. Demgegenüber wird durch eine Feuchteaufnahme des Festbetons eine Volumenexpansion verursacht, die als Quellen bezeichnet wird. Die hygrischen Verformungen des erhärteten Betons treten folglich gleichzeitig mit dem Sorptionsverhalten seiner porösen Mikrostruktur auf.

Zunächst kann grob angenommen werden, dass das Schwindverhalten von Beton sich aus dem Schwindverhalten seiner Hauptbestandteile Zementstein und Gesteinskörnung zusammensetzt. Werden z.B. dichte quarzitisches Gesteinskörnungen verwendet, stellt der Zementstein allein die schwindende Phase im Beton dar. Mit der Angabe des w/z -Wertes und der Zementart sind die stofflichen Randbedingungen für einen Zementstein im Wesentlichen definiert. Für einen Beton kommt zusätzlich der Einfluss aus Gehalt und Kornaufbau der Gesteinskörnungen hinzu [28]. Nicht schwindende Gesteinskörnungen verschiedener Korngröße können als innere Verformungsbehinderung betrachtet werden. Das Schwindmaß eines Zementsteins reduziert sich nach Grube bei Verwendung von für Mörtel bzw. Beton üblichen Mengen an quarzitisches Gesteinskörnungen und unter sonst gleichen Randbedingungen auf etwa ein Fünftel [52]. Die maßgebenden Einflussgrößen auf das hygrische Verhalten von Beton werden in Kapitel 3.4 näher behandelt. Im Rahmen dieser Arbeit werden Deformationen aus Schwinden und Quellen als Dehnungen mit der Dimension mm/m angegeben. Schwinddehnungen besitzen ein negatives und Quelldehnungen demgegenüber ein positives Vorzeichen.

Die Veränderung des Wasserhaushalts im Zementstein, die dem hygrischen Verhalten zugrunde liegt, muss nicht zwangsläufig durch eine Wechselwirkung mit der Umgebung, z.B. durch Abgabe bzw. Aufnahme von Feuchtigkeit einhergehen. Auch eine Umverteilung der innerhalb der Zementsteinstruktur vorhandenen Wassermenge durch physikalische oder chemische Prozesse kann zu makroskopisch messbaren Deformationen führen. Daher findet eine Differenzierung in insgesamt 4 Schwindarten statt [52] [74]. Diese unterscheiden sich durch ihre Ursachen bzw. Auftrittszeitpunkte.

Im Rahmen dieser Arbeit ist das Trocknungsschwinden Gegenstand der weiteren Ausführungen. Dennoch wird zur deutlichen Abgrenzung in Kapitel 3.3 kurz auf die weiteren drei Schwindarten eingegangen. Daraus lassen sich die im weiteren Verlauf der Arbeit als notwendig betrachteten Maßnahmen bei Probenherstellung, -lagerung und -präparation sowie Vorrichtungen im Messaufbau erklären (Kapitel 6.3).

3.2 Verlauf und Größenordnung des Trocknungsschwindens

3.2.1 Verhältnis zwischen Schwinddehnung und Masseverlust

Czernin wertete Versuchsergebnisse von Alexandrovsky aus, bei denen die Schwinddehnungen von Betonprismen verschiedenen Alters in Abhängigkeit vom Wasserverlust bestimmt wurden (Bild 3.1) [33]. Proben mit niedrigerem Hydratationsgrad gaben bis zum Erreichen einer bestimmten Schwinddehnung deutlich mehr Wasser ab als Proben gleicher Zusammensetzung, jedoch mit einem höheren Hydratationsgrad.

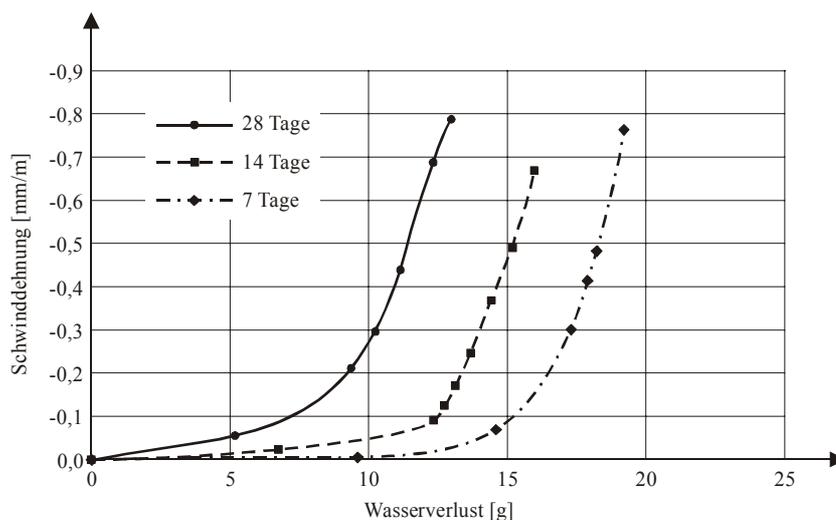


Bild 3.1: Schwinddehnungen von Betonprismen in Abhängigkeit vom Wasserverlust [33]

Diesen Unterschied führte Czernin vor allem auf die Abnahme des Gehaltes an größeren Kapillarporen der Proben mit zunehmender Hydratation zurück. Anfänglich wurden größere Kapillarporen entleert, die vergleichsweise viel Wasser enthielten, jedoch kaum „schwindwirksam“ waren. Je älter die Betonproben zum Zeitpunkt der Trocknungslagerung waren, desto niedriger war ihr Anteil an noch ungebundenen Wasser. Nach einem anfänglich unterschiedlichen Wasserverlust wiesen alle Proben zum Ende hin parallele Verläufe auf. Es wurde angenommen, dass nun nur noch „schwindwirksame“ Poren entleert werden.

In Bild 3.2 ist ein typischer Verlauf der Verformungen einer Mörtelprobe dargestellt, die durch Trocknungsschwinden verursacht wurden. Wurde die Umgebungsfeuchtigkeit während der Trocknung konstant gehalten, nahmen die Verformungen mit der Zeit stetig zu. Je weiter sich die Probe dem hygrischen Gleichgewichtszustand annäherte, desto geringer wurde der Verformungszuwachs, bis sich schließlich ein Endwert für die Verformungen (Endschwindmaß) einstellte.

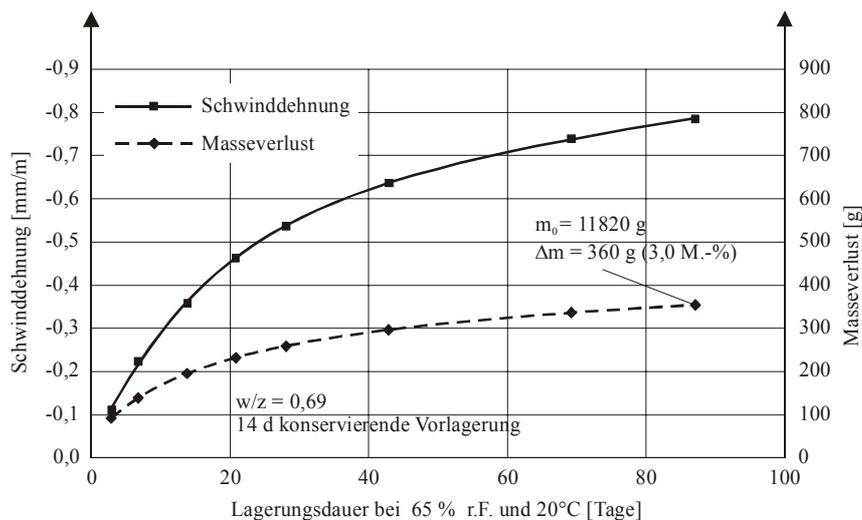


Bild 3.2: Schwinddehnungen und Masseverlust von Mörtelprismen infolge Austrocknung [89]

Die Dauer bis zum Erreichen des Gleichgewichtes hängt i. A. maßgeblich von der Struktur (Porenradienverteilung), den Abmessungen des Bauteils oder Probekörpers und den Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur, Luftbewegung) ab. Der Masseverlust infolge Austrocknung verlief jeweils affin zu den korrespondierenden Schwinddehnungen (Bild 3.2). Für Zementstein erhielt Grube unter Variation von Zementart, w/z-Wert und Lagerungsbedingungen grundsätzlich ähnliche Verläufe wie die in Bild 3.2 für Mörtel dargestellten [52]. Die Größenordnung der gemessenen Schwinddehnungen und zugehörigen Masseverluste waren dabei jedoch deutlich höher.

Hilsdorf berichtete über Untersuchungen von Verbeck, bei denen unter Berücksichtigung verschiedener Umgebungsfeuchtigkeiten das Schwinden und die zugehörigen Masseverluste einer Zementsteinprobe bestimmt wurden [56]. Als Ergebnis wurde ein bilinearer Verlauf der Schwinddehnungen in Abhängigkeit vom Wasserverlust angegeben (Bild 3.3). Die Schwinddehnungen waren als Endschwindmaße bei den angegebenen Feuchtigkeiten bestimmt worden und stellten somit Gleichgewichtszustände dar. Für eine Umgebungsfeuchtigkeit von 65 % r.F. ergab sich eine Schwinddehnung von ca. 3,5 mm/m und ein Masseverlust von etwa 3,3 M.-%. Auch wenn nicht sämtliche Randbedingungen während der Versuchsdurchführung miteinander übereinstimmten, konnte damit der Größenordnungsunterschied zwischen Mörtel (Bild 3.2) bzw. Beton und Zementstein verdeutlicht werden.

Der erste lineare Bereich in Bild 3.3 erstreckte sich von 100 bis ca. 30 % r.F. und besaß im Vergleich zum darauf folgenden Abschnitt einen kleineren Gradienten. Hilsdorf gab an, dass im ersten Bereich zunächst das Wasser aus den Kapillarporen entzogen wurde, woraus noch relativ moderate Kapillarspannungen entsanden, die die Volumenänderung bewirkten. Das stärkere Schwinden unterhalb von 30 % r.F. wurde dagegen darauf zurückgeführt, dass in diesem Bereich Gelwasser ausgetrieben wurde und aufgrund der kleineren Gelporengröße und größeren Oberflächenkräften auch deutlich größere Spannungen und Verformungen entstehen konnten. Grube wies in diesem Zusammen-

hang darauf hin, dass bei den Messungen von Verbeck ein Teil des Wassers bereits während der Vorlagerung bei 100 % r.F. entweichen konnte, ohne nennenswerte Schwindverformungen zu erzeugen [52].

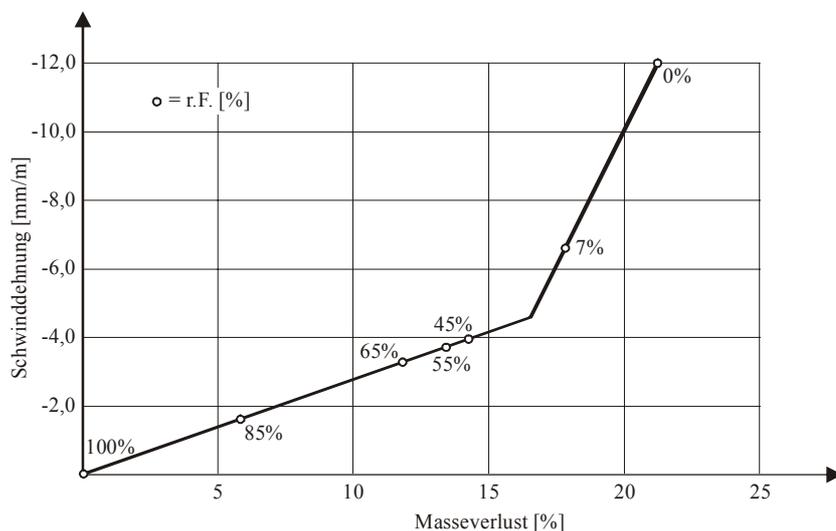


Bild 3.3: Beziehung zwischen Masseverlust und Schwinddehnung an Zementsteinproben [56]

An Zementsteinproben mit einem w/z-Wert von 0,35 bzw. 0,50 untersuchte auch Roper die Beziehung zwischen Masseverlust und Schwinddehnung [85]. In der Darstellung seiner Ergebnisse in Bild 3.4 war die große Anzahl der gemessenen Gleichgewichtszustände besonders auffällig. Verglichen damit hat Verbeck nur sechs Messpunkte bestimmt. Die Umgebungsfeuchtigkeit in diesen Versuchen wurde ebenfalls solange konstant gehalten, bis keine Masse- und Verformungsänderungen zu beobachten waren. Die Versuchsdauer je Feuchteschritt war daher von der Größe der eingestellten Feuchteschritte sowie vom w/z-Wert der Zementsteinprobe abhängig.

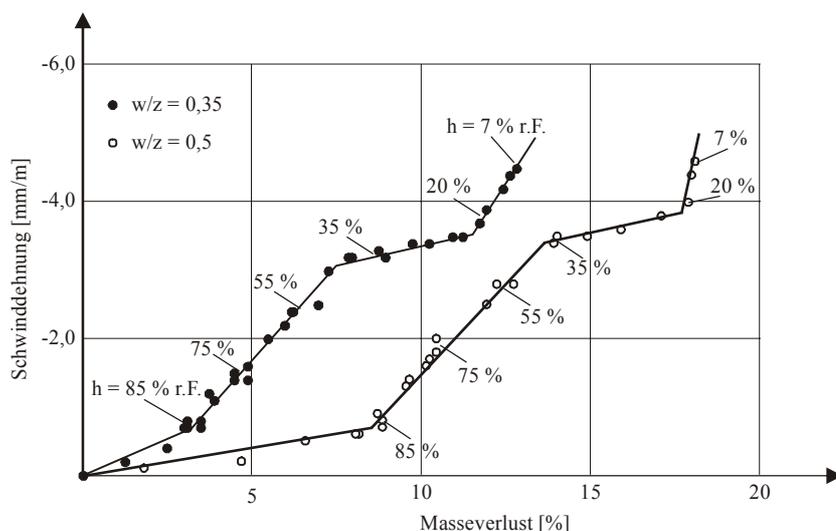


Bild 3.4: Beziehung zwischen Masseverlust und Schwinddehnung nach Roper [85]

Der von Verbeck und anderen Forschern (aus Fleischer [46]) angegebene bilineare Verlauf konnte mit den Ergebnissen von Roper nicht bestätigt werden. Die Messungen von Roper erlaubten für den Feuchtebereich zwischen 100 und 20 % r.F. eine detailliertere Betrachtung, woraus an dieser Stelle drei aufeinander folgende Bereiche abgelesen werden konnten. Damit ergaben sich insgesamt vier lineare Bereiche. Im ersten Bereich, der sich bis etwa 85 % r.F. erstreckte, wurden nach Roper Makroporen entleert, die auf das Schwinden kaum einen Einfluss ausübten. Der zweite Bereich entsprach dem Kapillarbereich, in dem aufgrund der Meniskenbildung in den Kapillarporen Kapillarspannungen entstanden, die nennenswerte Schwinddehnungen verursachten. Zwischen 40 % r.F. und 20 % r.F. entstanden kaum zusätzliche Schwinddehnungen, da in diesem Bereich Menisken nicht weiter existieren konnten (Kapitel 4.2.1). Im letzten Bereich wurden adsorbiertes Wasser und Kristallwasser abgegeben, was wiederum zu weiteren Schwinddehnungen führte.

Aktuelle Messungen an Zementsteinproben mit zwei unterschiedlichen w/z-Werten ($w/z = 0,19$ und $0,35$) wurden von Baroghel-Bouny und Godin durchgeführt. Diese verfügten über sechs bzw. acht Messpunkte je Zementstein (Feuchtebereich von 100 bis 3 % r.F.). Aufgrund der erzielten Untersuchungsergebnisse wurden für beide w/z-Werte „mehrere“ Bereiche mit linearem Verlauf angegeben [9].

3.2.2 Verhältnis zwischen Schwinddehnung und Gleichgewichtsfeuchtigkeit

Der funktionale Zusammenhang zwischen Umgebungsfeuchtigkeit und Trocknungsschwinden im Gleichgewichtszustand ist für die Erklärung der verantwortlichen Mechanismen und für die Modellierung sowie Prognose dieses Materialverhaltens von großer Bedeutung. Jedoch liegen hierzu nur wenige verwertbare Untersuchungsergebnisse vor. Die meisten dokumentierten Schwindmessungen berücksichtigen, wie in Bild 3.2 dargestellt, nur eine einzelne Gleichgewichtsfeuchtigkeit [9] [35] [52]. Einige Untersuchungen betrachten zwar zum Teil den gesamten Feuchtebereich von (0 bis 100 % r.F.), beschränken sich jedoch aufgrund des experimentellen Aufwandes nur auf wenige Zwischenpunkte und lassen somit eine zuverlässige Aussage über den funktionalen Verlauf kaum zu [46] [59].

Hobbs und Parrott fassten Ergebnisse mehrerer Forschungsarbeiten zusammen, in denen das Schwindverhalten in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchtigkeit zwischen 100 % r.F. und 20 % r.F. untersucht wurde [57]. Sie stellten zwei Bereiche mit unterschiedlichem Verformungsverhalten fest. Im Bereich zwischen 100 % r.F. und 70 % r.F. waren die Schwindverformungen deutlich größer als im darauf folgenden Bereich bis 20 % r.F.. Das Verhältnis zwischen den Verformungen aus Trocknungsschwinden und der Umgebungsfeuchtigkeit war jedoch über den gesamten untersuchten Feuchtebereich nicht linear [46]. Feldman und Swenson gaben für einen Zementstein mit einem w/z-Wert von 0,50 den in Bild 3.5 dargestellten Verlauf der Schwind- und Quelldehnungen (1. und 2. Schwinden sowie 1. Quellen) in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchtigkeit an [44]. Für die bis ca. 20 % r.F. bestimmten Schwinddehnungen beim ersten

Schwinden konnten ebenfalls zwei Bereiche, jedoch mit linearen Verläufen beobachtet werden. Der Übergang vom ersten zum zweiten Bereich lag hier bei ca. 55 % r.F.. Das erste Quellen zwischen ca. 16 % r.F. und 98 % r.F. konnte durch drei Geraden angenähert werden. Bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 20 % konnte das 2. Schwinden durch einen bilinearen Verlauf dargestellt werden. In Bereichen niedrigerer relativer Luftfeuchtigkeit nahmen die Schwinddehnungen einen gekrümmten Verlauf mit progressivem Anstieg an.

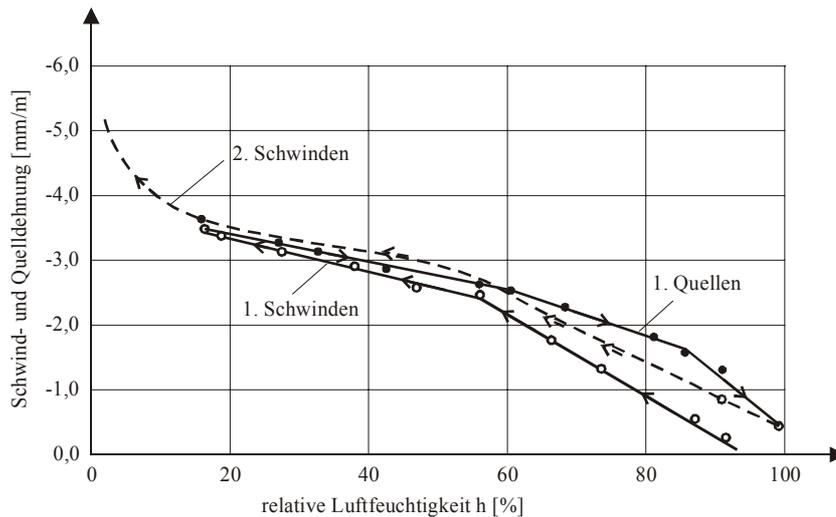


Bild 3.5: Schwinden und Quellen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit [44]

An prismatischen Mörtelproben, die 2 Jahre lang konserviert vorgelagert wurden, untersuchte Pihlajavaara das Trocknungsschwinden zwischen 100 % r.F. und 0 % r.F. über einen Zeitraum von insgesamt 3 Jahren. Aus seinen Ergebnissen ließen sich für einen w/z-Wert von 0,50 drei unterschiedliche Bereiche darstellen, die durch Geraden mit unterschiedlichen Steigungen angenähert werden konnten (Bild 3.6).

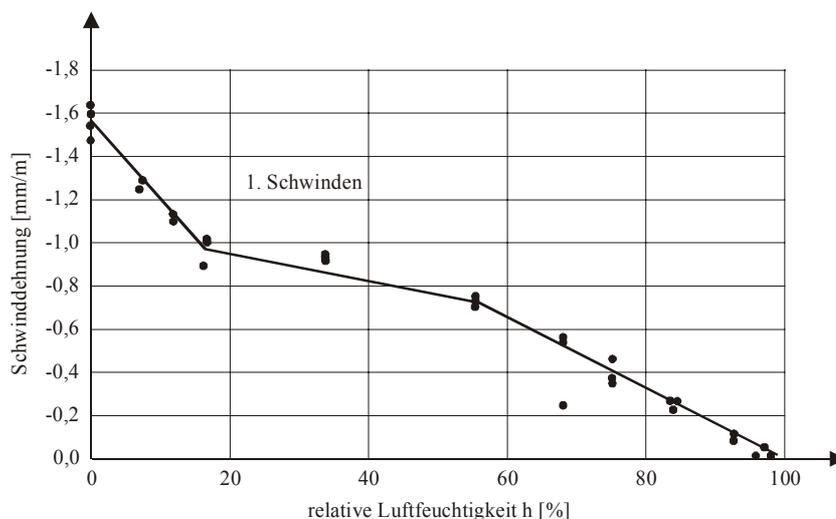


Bild 3.6: Schwinddehnungen eines Mörtels in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit [78]

Der erste Knick im Verlauf der Schwinddehnungen ergab sich auch hier bei ca. 55 % r.F. [78]. Baroghel-Bouny und Godin bestimmten an Zementsteinproben den Verlauf des ersten Schwindens bis zu einer Umgebungsfeuchtigkeit von 3 % r.F. [9]. Die Ergebnisse zeigten für beide betrachteten w/z-Werte (w/z = 0,19 und 0,35) jeweils einen linearen Verlauf der Schwinddehnungen in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchtigkeit. Diese erstreckten sich über den gesamten betrachteten Feuchtebereich.

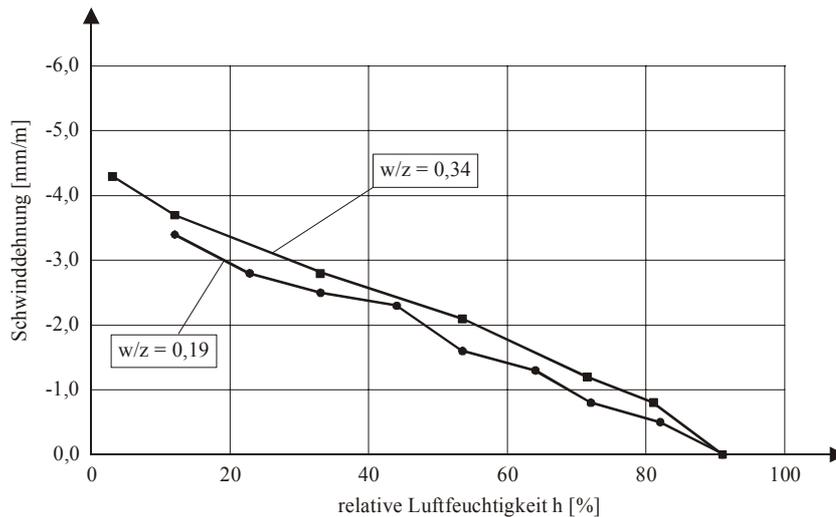


Bild 3.7: 1. Schwinden zweier Zementsteinproben in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit [9]

Klug bestimmte für einen Zementstein mit einem w/z-Wert von 0,40, der vor Messbeginn bei 105°C vorgetrocknet wurde, das erste Quellen bis 98 % r.F. sowie im Anschluss daran den Verlauf des 2. Schwindens [65]. Zwischen einer Feuchtigkeit von 10 % r.F. und 90 % r.F. wurde - im Gegensatz zu den Ergebnissen in Bild 3.5 - für den Schwind- und Quellverlauf ein ausgeprägt lineares Verhalten festgestellt (Bild 3.8).

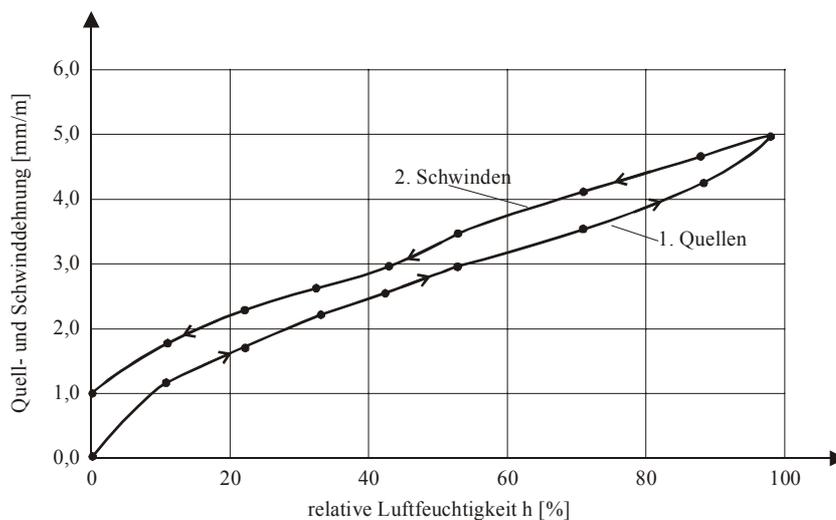


Bild 3.8: Quellen und Rückschwinden eines Zementsteins in Abh. von der rel. Luftfeuchtigkeit [65]

3.2.3 Reversible und irreversible Schwindverformungen

Die bei der ersten Trocknung entstandenen Schwindverformungen gehen bei einer anschließenden Wiederbefeuchtung nicht vollständig zurück. Ein Teil verbleibt im Material als irreversible Deformationen. Nach Czernin beträgt der reversible Anteil der Schwindverformungen von Zementstein nach dem ersten Trocknen und Wiederbefeuchten etwa 50 bis 65 % der irreversiblen Schwindverformungen und nimmt nach weiteren Feuchtezyklen noch weiter ab [32]. Eine aussagefähige Gegenüberstellung verschiedener Forschungsergebnisse hinsichtlich der absoluten Größenordnung der Schwinddehnungen ist nur sehr schwer durchführbar, da im Einzelfall sowohl stoffliche als auch versuchstechnische Randbedingungen das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. In Kapitel 3.4 wird auf den Einfluss einiger Parameter eingegangen. Die versuchstechnischen Randbedingungen werden in Kapitel 5 ausführlich diskutiert.

Day und Illston erhielten je nach Trocknungsgeschwindigkeit (bis 53 % r.F.) und Probekörpergeometrie für einen Zementstein mit einem w/z-Wert von 0,47 für den irreversiblen Anteil einen Betrag zwischen 30 und 50 % der reversiblen Schwinddehnungen [35]. Für einen Zementstein mit ebenfalls einem w/z-Wert von 0,47 bestimmten Sabri und Illston das in Bild 3.11 dargestellte erste Schwinden und Quellen [90]. Etwa 50 % der gesamten irreversiblen Schwinddehnungen waren allein im Feuchtebereich zwischen 0 und ca. 15 % r.F. entstanden. Daraus folgte, dass keine gleichmäßige Verteilung der irreversiblen Schwinddehnungen über den gesamten Feuchtebereich vorliegt, vielmehr kam es darauf an, unter welcher Feuchtigkeit der Zementstein getrocknet und anschließend wiederbefeuchtet wurde.

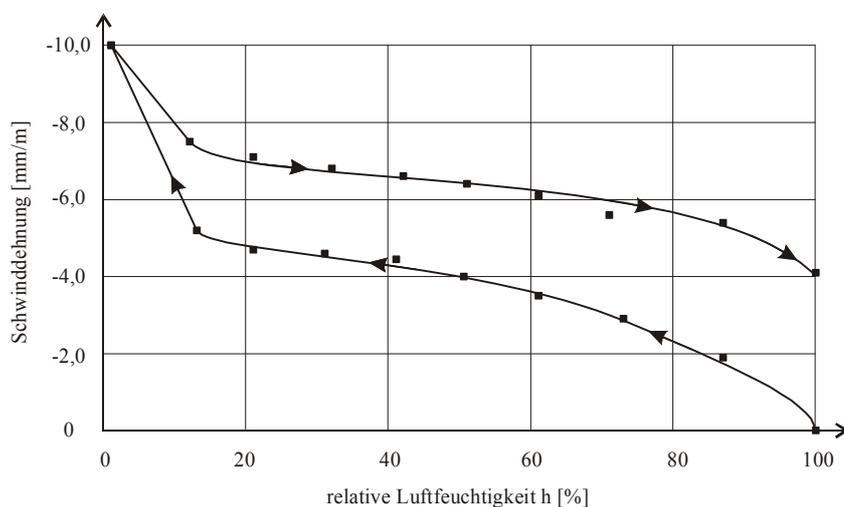


Bild 3.9: Schwinden und Quellen eines Zementsteins in Abh. von der rel. Luftfeuchtigkeit nach [90]

Al-Alusi et al. bestimmten Schwind- und Quellverformungen von Betonproben, die mehreren Feuchtezyklen ausgesetzt wurden [4]. Nach dem ersten Zyklus (100 % r.F. → 50 % r.F. → 100 % r.F.) betrug der reversible Anteil mehr als das dreifache der irreversiblen Verformungen (Bild 3.10). Die irreversiblen Verformungen nahmen bei den dar-

auffolgenden Zyklen zwar insgesamt etwas zu, blieben aber deutlich geringer als die dort bestimmten reversiblen Verformungen.

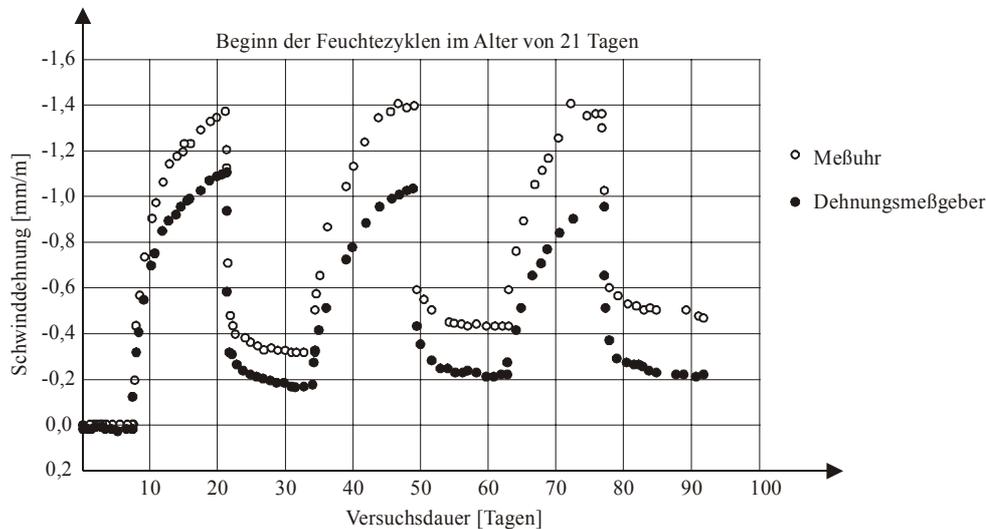


Bild 3.10: Schwinden und Quellen von Beton (zykl. Feuchtelagerung zwischen 100 und 50 % r.F.) [4]

Nach Locher erzeugten an das erste Schwinden und Wiederbefeuchten anschließende Trocknungsprozesse ausschließlich reversible Schwindverformungen. Dies galt jedoch nur solange, wie die beim ersten Trocknen erreichte niedrigste Feuchtestufe später nicht unterschritten wurde [70].

Untersuchungen von Helmuth und Turk, bei denen Zementsteinproben beim ersten Schwinden bis auf 47 % r.F. getrocknet wurden, haben gezeigt, dass besonders der irreversible Anteil der Schwindverformungen von der Porosität des Zementsteins abhängig waren [55]. Mit steigender Porosität nahm auch der Wert des ersten Trocknungsschwindens zu (Bild 3.11).

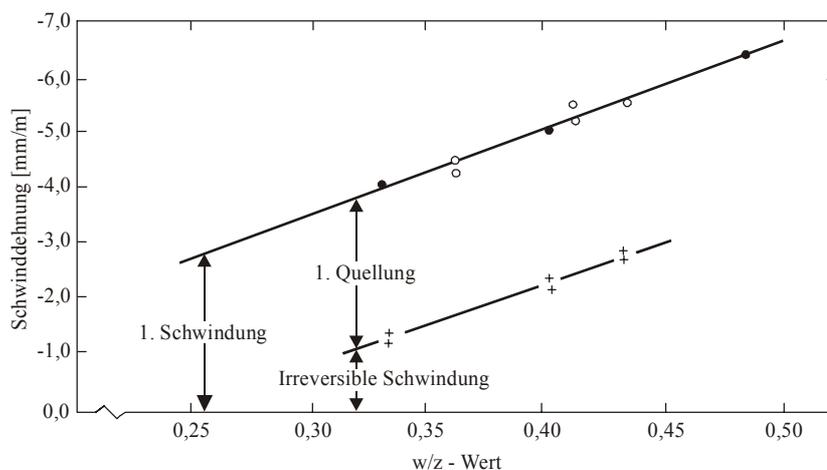


Bild 3.11: Reversible und irreversible Schwinddehnungen von Zementstein in Abh. von der Porosität [55]

Das Quellen bei der ersten Wiederbefeuchtung war dagegen von der Porosität unabhängig. Bei einem Vergleich der reversiblen und irreversiblen Verformungsanteile stimmten die in Bild 3.11 dargestellten Ergebnisse mit denen von Day und Illston insofern überein, dass die bleibenden Verformungen einen kleineren Betrag besaßen.

Parrott berichtete über Untersuchungen von Hunt, Tomes und Blaine, aus denen hervorging, dass der Feuchtezustand im Zementstein nicht vereinfacht als wassergefüllte Poren in einer rigiden Struktur abgebildet werden konnte. Dies wurde damit erklärt, dass sich während der ersten Trocknung die Zementsteinstruktur teilweise bleibend veränderte. Die Gesamtporosität und innere Oberfläche nahmen ab, die Porenstruktur wurde gröber [77]. Zum Teil wurden anfangs mit Wasser gefüllte Poren geleert und quasi isoliert, so dass sie während einer anschließenden Adsorption für Wasser und andere Stoffe nicht mehr zugänglich waren.

Juenger und Jennings untersuchten die Beziehung zwischen den Strukturkenngößen innere Oberfläche bzw. Porenvolumen und dem Anteil der reversiblen und irreversiblen Verformungen am Gesamtschwinden [61]. Sie stellten ebenfalls - wie Helmuth und Turk - fest, dass das reversible Schwinden von den über die Stickstoffsorption ermittelbaren Strukturkenngößen (Innere Oberfläche und Porenradienverteilung) quasi unabhängig war. Dagegen korrespondierte stets ein großer Anteil an irreversibler Schwindverformung mit einer großen inneren Oberfläche bzw. großem Porenvolumen.

Setzer erklärte das irreversible Verhalten damit, dass sich nicht nur das Gefüge beim Trocknen zusammenzieht, sondern auch neue Verbindungen zwischen den CSH-Partikeln entstehen konnten, die bei der Wiederbefeuchtung nicht mehr gelöst wurden [94]. Bentur u.a. stellten einen Überblick zu den unterschiedlichen Erklärungen zum irreversiblen Schwinden zusammen [21] [22]. Aufgrund ihrer eigenen Untersuchungen hatten sie zusätzlich darauf hingewiesen, dass hinsichtlich der irreversiblen Verformungen zwischen jungem und erhärtetem Zementstein in höherem Alter unterschieden werden musste. Bei jungen Zementsteinproben wurde eine Abnahme des Gehaltes an Poren mit einem Durchmesser zwischen 4 und 10 nm festgestellt. Eine Zunahme der Kontaktstellen zwischen den Silikaten wurde bei den älteren Zementsteinproben als steuernde Größe für das Verhältnis der reversiblen zu den irreversiblen Schwindverformungen angegeben.

3.3 Weitere Schwindarten von Zementstein

3.3.1 Kapillarschwinden

Verformungen aus Kapillarschwinden entstehen im frischen und noch plastisch verformbaren Beton, d.h. zu einem relativ frühen Zeitpunkt. Für dieses Phänomen werden auch weitere Bezeichnungen verwendet, wie plastisches Schwinden oder Frühschwinden. Als Ursache dafür gilt ein zwischen der frischen Betonoberfläche und der anstehenden Umgebungsluft resultierender Feuchtegradient, der zu einem Wasserver-

lust an der Oberfläche führt. Dabei können bei ausreichender Feinheit und dichter Lagerung der Feststoffpartikel Kapillarkräfte entstehen, die aufgrund von Meniskenbildung zwischen den benachbarten Partikeln einen Unterdruck erzeugen. Dadurch erfährt der Beton eine Kontraktion, die auf einer dichteren Lagerung der Feststoffpartikel beruht [53] [114].

In diesem Zusammenhang wird oft ein weiteres Phänomen diskutiert, das zu einem zusätzlichen Volumenverlust im Frischbeton führt. Neigt ein Beton zum Bluten, so macht sich dies durch eine große Menge abgesondertes Wasser bemerkbar, das sich zunächst an der Betonoberfläche sammelt. Verdunstet das Wasser anschließend vollständig von der Betonoberfläche, geht damit ein Volumenverlust des Bauteils einher [52]. Dieses Verhalten ist in erster Linie vom Wasserrückhaltevermögen des Betons abhängig. Wassersaugende Gesteinskörnungen können ebenfalls durch Wasserentzug aus dem frischen Beton Kapillarschwinden verursachen.

Das Kapillarschwinden kann durch eine geeignete Mischungszusammensetzung und eine ordnungsgemäße Nachbehandlung vermieden werden [23] [41] [74]. Sobald der Beton eine Druckfestigkeit größer als 1 N/mm^2 besitzt, ist mit einem Stillstand der Formänderung aus Kapillarschwinden zu rechnen [110]. Bei fehlender Nachbehandlung kann das Kapillarschwinden zu Dehnungen von bis zu ca. 4 mm/m und zu Rissbreiten zwischen $0,5$ und 2 mm führen [52]. Bei verzögerten Betonen, denen man durch Zugabe eines Betonverzögerers eine längere Verarbeitbarkeitsdauer verleiht, wurden sogar Dehnungen von 6 mm/m bestimmt [110].

3.3.2 Chemisches Schwinden

Während der Hydratation gebildete Reaktionsprodukte besitzen ein kleineres Volumen als das Gesamtvolumen der Ausgangsprodukte Wasser und Zement. Diese Volumenkontraktion führt in der Regel zur Entstehung von Schrumpfporen im Zementstein. Dieser Vorgang wird auch als Schrumpfen oder chemisches Schrumpfen bezeichnet [101]. Das äußere Volumen des erhärtenden Zementsteins wird dadurch nicht beeinflusst, solange bei einer konservierenden Lagerung (kein Austausch von Feuchtigkeit mit der Umgebung) die relative Luftfeuchtigkeit im Inneren des Zementsteins nicht unter 100% absinkt. Daher blieb dieses Phänomen für übliche Normalbetone (w/z -Wert $> 0,5$) lange Zeit bei der Betrachtung der Formänderung des Betons praktisch ohne Bedeutung.

Bei hochfesten Betonen bzw. Zementsteinstrukturen, die u.a. mit deutlich niedrigeren Wasserzementwerten hergestellt werden (w/z -Wert $< 0,40$), kommt es zu einer inneren Austrocknung (Selbstaustrocknung), die zu einer Herabsetzung der inneren Feuchtigkeit und Entstehung eines Unterdruckes in den sich bildenden Poren führt. Je niedriger der w/z -Wert ist, desto weniger Entspannungsräume (z.B. größere Kapillarporen) für den gebildeten Unterdruck stehen zur Verfügung. Damit verbunden treten von außen messbare Verformungen auf, die oft als autogenes Schwinden bezeichnet werden.

Eindeutige und allgemeingültige Definitionen der Begriffe chemisches und autogenes Schwinden liegen nicht vor. Teilweise werden beide Begriffe für das gleiche Phänomen verwendet. An anderer Stelle wird unterschieden, ob von außen messbare Längenänderung entstehen oder nicht [5] [52] [62] [101]. Tazawa u.a. gehen aufgrund der wachsenden Bedeutung dieser Schwindart mit dem zunehmenden Einsatz hochfester Betone besonders auf die Begrifflichkeiten ein [103]. Demnach beschreibt das autogene Schwinden den Teil des chemischen Schwindens, dem die von außen messbaren Verformungen zugeschrieben werden. Der restliche Anteil des chemischen Schwindens führt zur Bildung von Schrumpfporen im Zementsteingefüge (Bild 3.12).

Die Größenordnung der Dehnungen aus autogenem Schwinden für hochfeste Betone liegt etwa zwischen 0,15 und 0,25 mm/m [118]. Als Referenzzeitpunkt für die Bestimmung des Verlaufes des chemischen Schwindens wird der Beginn der Erstarrung verwendet, um unterschiedliche quantitative Aussagen miteinander vergleichen zu können (Bild 3.12, links).

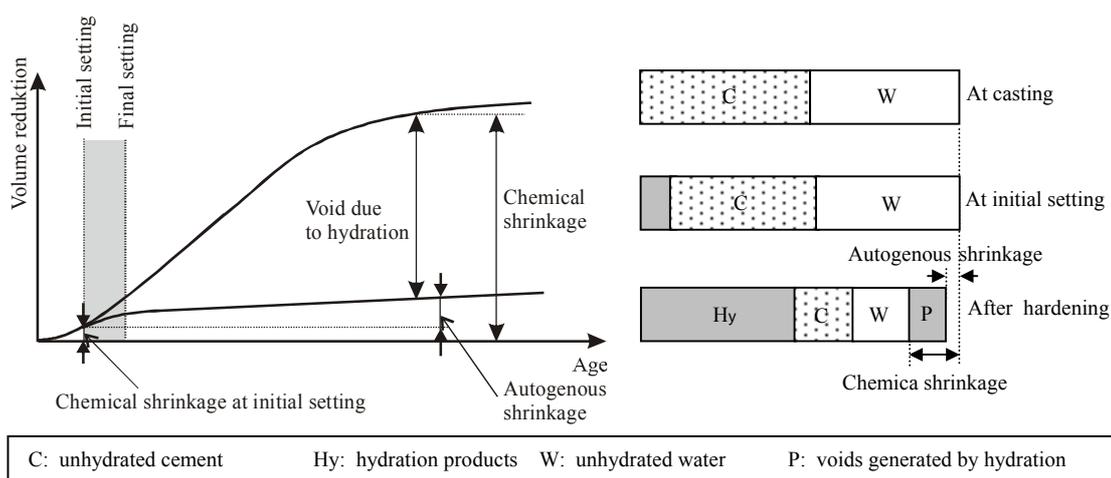


Bild 3.12: Definition des chemischen Schwindens und des autogenen Schwindens nach [103]

3.3.3 Carbonatisierungsschwinden

Als Carbonatisierung wird die Reaktion von Kohlendioxid (CO_2) aus der Luft mit dem bei der Hydratation des Zements entstandenem Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bezeichnet. Als Reaktionsprodukte entstehen Calciumcarbonat (CaCO_3) und freies Wasser, das zuvor molekular gebunden war [32] [118]. Die Freisetzung dieses Wassers führt zu einer Volumenverminderung, die als Carbonatisierungsschwinden bezeichnet wird. Carbonatisierung und auch das damit verbundene Carbonatisierungsschwinden laufen bevorzugt bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 50 und 70 % ab. Als Anhaltswert für die Größenordnung von Dehnungen aus Carbonatisierungsschwinden kann nach Grube bis zu rd. 50 % der Verformungen aus Trocknungsschwinden angesetzt werden [52]. Berücksichtigt man jedoch, dass die Carbonatisierung nur in der Randzone

von Betonbauteilen auftritt, hat das Carbonatisierungsschwinden praktisch keinen Einfluss auf die Formänderung eines Bauteils. Bei sehr dünnen Fassadenelementen können jedoch Risse aus Zwangzugspannung infolge Carbonatisierungsschwinden entstehen [52].

3.4 Einflussgrößen

Bei einem Vergleich von Untersuchungsergebnissen zum Schwindverhalten von Beton, Mörtel und Zementstein sind entsprechend den vier Schwindarten besonders bei der Fragestellung nach den Einflussgrößen die bei der Versuchsdurchführung zugrunde gelegten Randbedingungen zu berücksichtigen. Die Herstellungs- und Lagerungsbedingungen der verwendeten Proben sowie der Zeitpunkt des Beginns der Verformungsmessung sind dabei von großer Bedeutung. Ohne Beachtung dieser Randbedingungen können widersprüchliche Ergebnisse entstehen. Für die Klärung praxisrelevanter Fragen wird oft das Schwindverhalten des untersuchten Betons als Ganzes betrachtet, d.h. dass beispielsweise nicht zwischen autogenem Schwinden und Trocknungsschwinden differenziert wird, da sich diese Verformungsanteile unter Praxisbedingungen überlagern. Einen Überblick über die in der Literatur untersuchten Einflussgrößen auf das Schwindverhalten von Beton wird in Bild 3.13 gegeben.

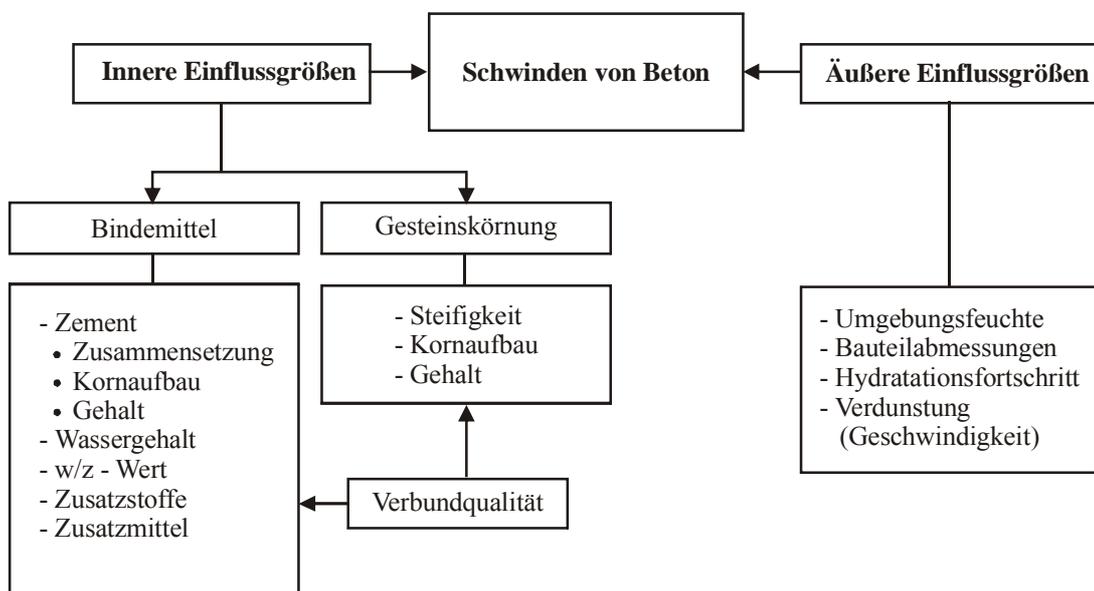


Bild 3.13: Einflussgrößen auf das Trocknungsschwinden von Beton

Bei den dargestellten Einflussfaktoren kann für Beton zwischen „inneren“ und „äußeren“ Parameter differenziert werden. Die inneren Parameter können nochmals unterteilt werden, nach Größen, die direkt die Interaktion der Zementsteinmatrix mit der Feuchtigkeit beeinflussen und andere, die von innen heraus in erster Linie den Schwindverformungen einen Widerstand entgegensetzen. In gleicher Weise unterschei-

det Grube zwischen „auslösenden“ und „regulierenden“ Größen [52]. Als auslösende Einflussgrößen werden diejenigen Parameter bezeichnet, die das Schwindverhalten des Zementleims oder Zementssteins „ursächlich“ beeinflussen (Zementart, Wasserzementwert und Lagerungsklima). Dagegen werden Größen, die eine Verminderung der Schwindverformungen des Zementsteins verursachen, als regulierend bezeichnet (Zementgehalt, Wassergehalt, Zementleimgehalt, Gesteinskörnung, usw.). Im Folgenden wird auf den Einfluss der Parameter Wassergehalt, Zementgehalt und Zementeigenschaften näher eingegangen, da diese sowohl für Beton als auch für Zementstein maßgebend sind. Für eine ausführlichere Diskussion sämtlicher Einflussgrößen wird auf die einschlägige Literatur verwiesen ([41] [46] [52] [70] [83]).

Der Wassergehalt besitzt nach Weigler den größten Einfluss auf das Schwindverhalten von Beton [110]. Übereinstimmende Ergebnisse findet man z.B. von Mears und Hobbs [71] sowie Rostasy [88]. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass mit einem reduzierten Wassergehalt die Möglichkeit besteht, das Endschwindmaß gezielt herabzusetzen [46]. Der Einfluss von Wassergehalt, Zementgehalt und w/z-Wert auf das Endschwindmaß von Beton und Mörtel ist in Bild 3.14 dargestellt [32].

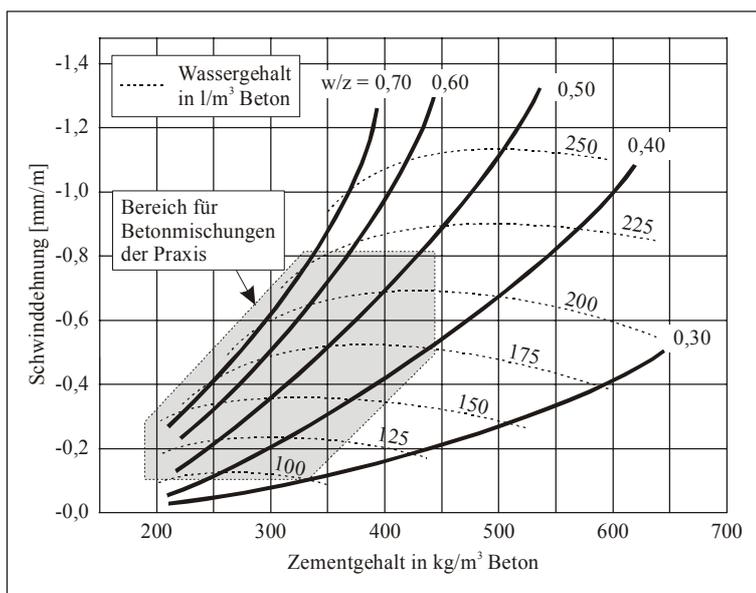


Bild 3.14: Einfluss des Zementgehaltes, des Wassergehaltes und des Wasserzementwertes auf das Endschwindmaß von Beton [32]

Zur Abschätzung der Größenordnung der Schwinddehnungen von Beton wurde dort der praktisch relevante Bereich eingegrenzt. Aus der Darstellung kann man den erwähnten dominanten Einfluss des Wassergehaltes deutlich erkennen, wohingegen der Zementgehalt im Vergleich dazu von untergeordneter Bedeutung ist. Dieser ausgeprägte Einfluss des Wassergehaltes wird darauf zurückgeführt, dass zum einen mit zunehmendem Wassergehalt bei der Betonherstellung später mehr Feuchtigkeit aus dem erhärteten Beton verdunsten kann, und zum anderen der Gehalt an schwindfähigem Zementstein im

Beton zunimmt [46]. Das Schwindmaß nimmt bei gleichbleibendem Wassergehalt und zunehmendem Zementgehalt - von geringeren Zementgehalten ausgehend - zunächst geringfügig zu. Wird der Zementgehalt bei konstantem Wassergehalt noch weiter gesteigert (Verringerung des w/z-Wertes), so kehrt sich das Verhalten um und das Schwindmaß nimmt ab. Dies wird darauf zurückgeführt, dass bei hohen Zementgehalten ein Teil des Zements unhydratisiert im Beton verbleibt und somit eine behindernde Wirkung auf den Schwindprozess ausübt, ähnlich wie die Gesteinskörnung. Eine ausführliche Diskussion dazu wurde z.B. von Czernin und Grube angestellt [32] [52].

Der Wassergehalt und der Zementgehalt bzw. deren Verhältnis besitzen auf das Schwindverhalten von Zementstein den maßgeblichen Einfluss. Für Beton ist in diesem Zusammenhang auch das Gesamtbindemittelvolumen zu betrachten. Helmuth und Turk stellten bei Untersuchungen des Schwindverhaltens von Zementsteinproben eine eindeutige Zunahme der Schwindverformungen mit zunehmendem w/z-Wert fest (Bild 3.11) [55]. Übereinstimmende Ergebnisse konnten aus den Untersuchungen von Baroghel-Bouny, Grube und Roper abgeleitet werden [52] [85]. Stark gibt für Zementstein sogar einen linearen Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Endschwindmaß bei einer Umgebungsfeuchtigkeit von 65 % r.F. an [101]. Die für Zementstein gewonnenen Ergebnisse können in der Tendenz auch auf Beton übertragen werden.

Einen Einfluss der Zementeigenschaften auf das Schwindverhalten von Beton, Mörtel oder Zementstein kann einerseits aus der mineralogischen Zusammensetzung und weiterhin aus dem granulometrischen Aufbau hervorgehen. Die einschlägigen Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet wurden von Fleischer [52] zusammengefasst und ausführlich diskutiert. Dort wurde u.a. auf den Gehalt der einzelnen Klinkerminerale, den Gehalt an Alkalien bzw. Sulfat und der Korngrößenverteilung des Zementes eingegangen.

Grube berichtete über Untersuchungen von Graf und Walz [50] [109], bei denen keine eindeutigen Abhängigkeiten zwischen der Zementart bzw. den Zementeigenschaften und dem Schwindverhalten erkennbar waren [52]. Diese Meinung wurde ebenfalls von Czernin vertreten [33] (aus [46]). Dagegen wurde an mehreren Stellen besonders über den signifikanten Einfluss des C₃A-Gehaltes auf das Schwindverhalten berichtet [40] [87] [107]. Nach der Auswertung einer Vielzahl von Ergebnissen verschiedener Forscher kam Fleischer zum Ergebnis, dass mit steigendem C₃A-Gehalt das Schwindmaß größer wird [46]. Die von Grube angestellten Untersuchungen bestätigen tendenziell die diesbezüglichen Angaben aus der Literatur, wobei gleichzeitig auf die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen hingewiesen wurde [52]. Kühl vertrat dagegen die Auffassung, dass ein stärkeres Schwinden eher mit steigendem Gehalt an C₃S bzw. C₂S zu erwarten ist [67].

Bei der Betrachtung des Einflusses der Mahlfeinheit auf das Schwindverhalten kann zunächst davon ausgegangen werden, dass feiner gemahlene Zemente größere Schwindverformungen verursachen [67]. Mit zunehmendem Alter nehmen die Unterschiede zwischen fein und grob gemahlenden Zementen jedoch stetig ab, so dass der

anfängliche Unterschied bei höherem Alter an Bedeutung verliert [50]. Nach Wischers wird der Einfluss der Mahlfineinheit generell überschätzt [112]. Die Feinheit des Zementes besitzt demnach nur eine untergeordnete Rolle auf das Schwindverhalten. Feiner gemahlene Zemente führen nach Weigler zu etwas stärkerem Schwinden des Mörtels, aber ein gesicherter Zusammenhang zwischen Mörtel und Beton besteht jedoch nicht [110]. Als groben Anhalt gab Fleischer an, dass es bei Verwendung von Portlandzement im Vergleich zu Hochofenzement zu kleineren Schwindverformungen kommt und dass das Schwinden von Portlandhüttenzement zwischen diesen beiden anzusiedeln ist [46]. Statistische Untersuchungen von Blaine führten ebenfalls zur Schlussfolgerung, dass aufgrund der Komplexität der Verhältnisse in technischen Zementen eine zuverlässige Prognose des Schwindverhaltens u.a. aus den Parametern C_3A -Gehalt und Mahlfineinheit nicht möglich war [25] (aus [52]).

3.5 Praktische Bedeutung und empirische Berechnungsansätze

3.5.1 Zwang- und Eigenspannung infolge Bauteilaustrocknung

Das hygrische Verhalten (zeitliche Entwicklung und Endschwindmaß) des erhärteten Zementsteins und damit auch des Betons ist eine richtungsunabhängige Eigenschaft. Der Schwindprozess verursacht in jeder Achsrichtung eine Längenänderung, die als Schwinddehnung bzw. Schwindmaß aus dem Quotienten der absoluten Längenänderung und der Ausgangslänge des Bauteils oder Probe in der betrachteten Richtung angegeben wird (Gl. 3.1).

$$\varepsilon_s = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

ε_s : Schwinddehnung l_1 : Länge nach Schwindverformungen [m]
 l_0 : Ausgangslänge [m] Δl : Längenänderung [m]

Verformungen aus Trocknungsschwinden sind in der Praxis besonders von Bedeutung, wenn die Verformungen des Bauteils behindert werden (Zwang). In [52] wird zwischen „innerem“ und „äußerem“ Zwang unterschieden. In dicken Bauteilen verläuft die Austrocknung ungleichmäßig. Der sich dadurch bildende Feuchtegradient ist an dieser Stelle die Ursache für inneren Zwang und führt zu einem Eigenspannungszustand (Bild 3.15). Als äußerer Zwang werden Verformungsbehinderungen bezeichnet, die aufgrund der Konstruktion auftreten, wie im Falle eines an beiden Enden fest eingespannten Balkens. Im Gegensatz zum Eigenspannungszustand steht bei äußerem Zwang der Querschnitt vollständig unter Zwangzugspannungen, die bei Überschreitung der Zugfestigkeit zu Trennrissen im Beton führen (Bild 3.16). Risse aus Eigenspannungen treten entsprechend der Spannungsverteilung im Querschnitt nur in dem unter Zugspannung stehenden Randbereich auf (Bild 3.15).

Durch die beschriebenen Risse kann die Funktionalität eines Bauteils eingeschränkt oder sogar aufgehoben werden. Zudem kann über die erzeugten Risse das Eindringen von betonangreifenden Stoffen ins Betoninnere beschleunigt werden, so dass dadurch die Dauerhaftigkeit eines Bauteils beeinträchtigt wird.

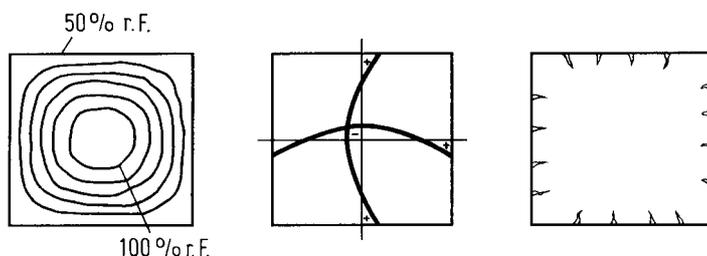


Bild 3.15: Eigenspannung und Rissbildung im Beton aus Feuchtegradient [84] aus [52]

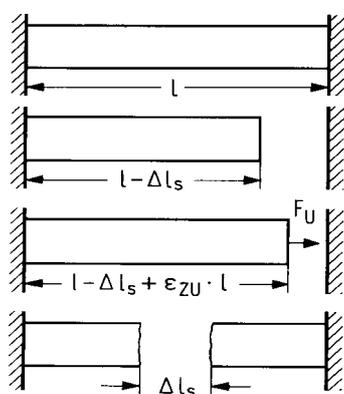


Bild 3.16: Verformungsbehinderung und Rissbildung aus Zwang [52]

3.5.2 Empirische Berechnungsmodelle

Für eine Prognose der zu erwartenden Schwinddehnungen existieren in der Praxis verschiedene Berechnungsmodelle, die aus empirisch ermittelten mathematischen Zusammenhängen abgeleitet wurden, ohne die maßgebenden Mechanismen zu berücksichtigen. Dies hat zur Folge, dass parallel zu den Weiterentwicklungen in der Biontechnologie die empirischen Ansätze u.a. für anders zusammengesetzte Betone, wie zum Beispiel hochfeste oder selbstverdichtende Betone, überprüft und unter Umständen auch angepasst werden müssen [108]. Die noch bis vor kurzem gültige Spannbetonnorm DIN 4227 enthielt einen Ansatz in graphischer und tabellarischer Form zur Abschätzung der Schwindverformungen eines Bauteils [38]. Dieser galt jedoch u.a. aufgrund seiner Vorhersagegenauigkeit hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung des Schwindens und der Endschwindmaße als wenig befriedigend [38] [74].

Die neue Betonnorm DIN 1045 (Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton) gibt im Teil 1 (Bemessung und Konstruktion) einen analytischen Ansatz zur Bestimmung der Schwinddehnungen an. Mit diesem Ansatz wird das Schwindmaß in Abhängigkeit

von Bauteilabmessungen, Betondruckfestigkeit, Zementfestigkeitsklasse und Umgebungsbedingungen ermittelt [37]. Die Beziehungen des neuen Schwindansatzes wurden durch mathematische Formulierungen angegeben, so dass sie für numerische Analysen geeignet sind.

Mit der Einführung der Betondruckfestigkeit als Eingangsparameter für die Berechnung der zu erwartenden Schwinddehnungen soll im Berechnungsansatz der neuen Betonnorm DIN 1045 die Betonzusammensetzung berücksichtigt werden. Damit können zwei bedeutsame Entwicklungen der letzten Jahrzehnte in die Norm aufgenommen werden [74]. Erstens sind bei der Betonherstellung verflüssigende Betonzusatzmittel nicht mehr aus der Produktion wegzudenken. Demzufolge kann nicht mehr allein aus der Konsistenz des Frischbetons sein Wassergehalt und damit die Schwindneigung ausreichend genau abgeschätzt werden. Zweitens schließt der neue Ansatz der DIN 1045 hochfeste Betone mit ein, so dass das chemische Schwinden ebenfalls berücksichtigt wird. Zur Illustration dieses Ansatzes sind für den in Bild 3.17 dargestellten Querschnitt die zu erwartenden Endschwinddehnungen dargestellt. Dabei werden Betondruckfestigkeit, Umgebungsbedingungen und Zementfestigkeitsklasse variiert. Mit diesem Ansatz können für die Bestimmung der zu erwartenden gesamten hygrischen Verformungen die zwei bedeutsamen Anteile, das Trocknungsschwinden und das autogene Schwinden (Kapitel 3.3.2), genauer in Rechnung gestellt werden.

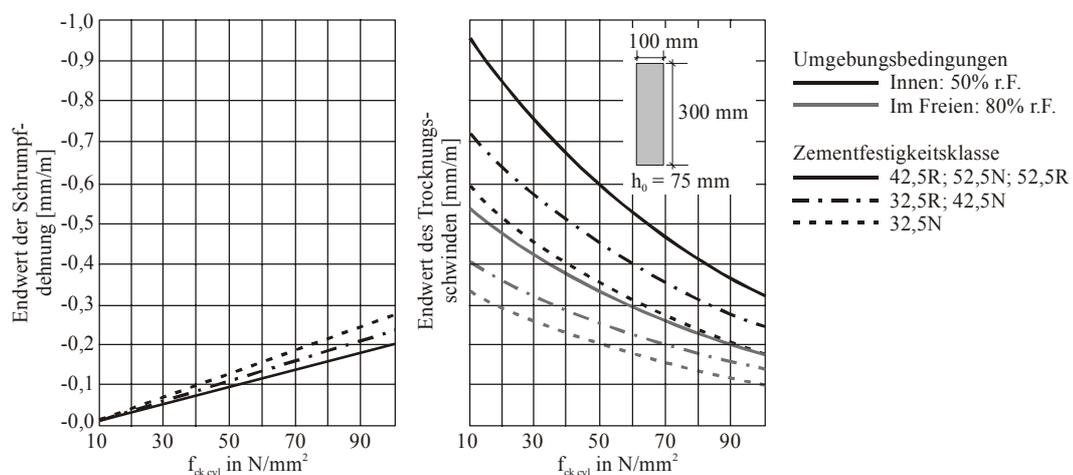


Bild 3.17: Endwerte der Schrumpfdehnung und des Trocknungsschwindens nach DIN 1045 Teil 1 [118]

Barr, Hoseinian und Beygi untersuchten das Schwindverhalten von Betonprismen und -zylindern unterschiedlicher Druckfestigkeit, die über einen Zeitraum von einem Jahr den klimatischen Bedingungen im Freien ausgesetzt wurden [11]. Mit dem Ziel, die Vorhersagegenauigkeit des Modells ACI 209 zu beurteilen, wurden gemessene und berechnete Schwinddehnung einander gegenübergestellt [1]. Das Modell nach ACI 209 konnte für normalfeste Betone eine hinreichende Zuverlässigkeit erreichen. Ab einer Betonfestigkeit von etwa 45 N/mm² nahm die Korrelation zwischen Modell und Experiment jedoch signifikant ab.

Weitaus umfangreichere Untersuchungen dazu wurden von Videla, Covarrubias und Masana durchgeführt [108]. Unter Laborbedingungen ermittelte Schwindverformungen wurden mit insgesamt sechs einschlägigen Prognosemodellen verglichen. Neben ACI 209 [1] wurden bei diesen Untersuchungen die Modelle nach CEB-FIB [26], Bažant [14], Gardner und Zhou [47], Gardner und Lockman [48] und schließlich das Sakata-Modell [91] berücksichtigt. Alle betrachteten Modellansätze konnten die Schwindverformungen der untersuchten Betone nicht adäquat wiedergeben. Die experimentell bestimmten Schwindverformungen wurden von allen Modellen unterschätzt. Aufgrund ihrer Ergebnisse schlugen die Autoren die Einführung von Korrekturgrößen vor, die die örtlichen Verhältnisse eines Landes oder einer Region berücksichtigen sollen. In gleicher Weise und unter Betrachtung der selben Prognosemodelle befassten sich Mokarem, Meyerson und Weyers mit der Übertragbarkeit der Modellaussagen auf die Verhältnisse in U.S.A [73].

Für einen üblichen Praxisfall, z.B. die Bestimmung der zu erwartenden Spannkraftverluste infolge Schwinden, stellt das neue Konzept der DIN 1045 hinsichtlich der realitätsnahen Betrachtung und der erzielbaren Prognosegenauigkeit in jedem Fall einen technischen Fortschritt dar. In einigen Fällen, bei denen z.B. die Kenntnis über die Spannungsverteilung aus Zwang und Eigenspannung zu unterschiedlichen Zeitpunkten von Interesse ist, kann die Berechnungsmethode der Norm aufgrund ihres empirischen Charakters nicht angewendet werden. In diesem Fall sind numerische Berechnungskonzepte eher geeignet. Diese setzen eine adäquate Beschreibung des Materialverhaltens als Eingangsinformation voraus. Wie in Kapitel 3.2 vorgestellte Untersuchungen unterschiedlicher Forscher zeigen, liegen hinsichtlich Größenordnung und Verlauf der Schwindverformungen von Zementstein, der bekanntlich die maßgeblich schwindende Phase im Beton darstellt, stark differierende Ergebnisse vor.

4 Physikalische Strukturmodelle und Schwindmechanismen

4.1 Mikrostrukturelle Zementsteinmodelle

Die physikalisch-technischen Eigenschaften des Zementsteins sind von seiner Struktur, dem in der Struktur befindlichen Wasser und von dessen Bindung an die Hydratationsprodukte abhängig. Empirische Ansätze, wie z.B. in Kapitel 3.5.2 erläutert, stellen in aller Regel für eine Prognose der zu erwartenden hygrischen Verformungen einfach durchzuführende Berechnungen dar. Sie sind jedoch nicht in der Lage, z.B. die zeitliche Entwicklung der hygrischen Verformungen oder die damit korrespondierenden Spannungen adäquat wiederzugeben.

Zur Erklärung des Einflusses der Feuchtigkeit auf die Zementsteineigenschaften und damit auf sein Schwindverhalten wurden in der Vergangenheit mehrere sehr unterschiedliche Strukturmodelle vorgeschlagen. Diese basierten vor allem auf Ergebnissen von Sorptionsmessungen, die u.a. die Materialantwort des Zementsteins auf verschiedene Sorbate berücksichtigten [63] [70] [113]. Für die Sorption selbst wurden ebenfalls zahlreiche Theorien entwickelt, auf die in Kapitel 2.4 sehr begrenzt eingegangen wurde. Eine ausführliche Darstellung diesbezüglich wurde z.B. von Adolphs angegeben [2].

Für die Beschreibung der Zementsteineigenschaften mit Hilfe der postulierten Strukturmodelle wurde eine Reihe von Mechanismen abgeleitet. Eine einheitliche Darstellung der einzelnen Mechanismen fehlt bisher, so dass diese zwar in den meisten physikalischen Modellen berücksichtigt wurden, ihre Bedeutung aber je nach betrachtetem Modell variierte.

In den anfänglichen Arbeiten von Powers wurden die Hydratationsprodukte noch durch eine kugelförmige Gestalt abgebildet (Bild 4.1, links). Aufgrund der späteren Möglichkeiten mit Hilfe elektronenmikroskopischer Untersuchungsmethoden änderte sich diese Modellvorstellung und ging in eine Betrachtung der Hydratationsprodukte als faserige, plattige und geschichtete Einheiten über, die selbst aus zwei bis drei Elementarschichten bestanden (Bild 4.1, rechts) [63] [113]. Wassermoleküle konnten demnach zwischen den Elementarschichten eingebaut, auf den Oberflächen der Einzelpartikel adsorbiert und zwischen den Einzelpartikeln eingelagert werden, wobei Zwischenschichtwasser laut Powers nur bei sehr niedrigen Feuchtigkeitswerten vorlag und somit einen geringen Einfluss auf die Zementsteineigenschaften besaß. Mit diesem Modell wurde das Kriechen und Schwinden von Zementstein erklärt [79] [81] [80].

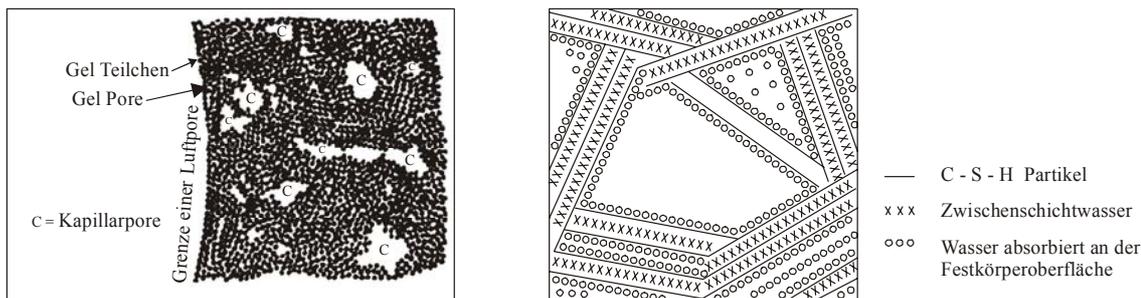


Bild 4.1: Zementsteinmodelle nach Powers; links: kugelförmige Partikel [78]
rechts: geschichtete Struktur [147]

Feldman und Sereda gingen bei ihrem Zementsteinmodell ebenfalls von einer geschichteten Struktur aus, wobei in diesem Modell das Zwischenschichtwasser einen dominanten Einfluss auf die Zementsteineigenschaften besaß (Bild 4.2).

In diesem Modell wurde streng zwischen adsorbiertem Wasser und Zwischenschichtwasser unterschieden [42] [43]. Diese wurden bei der Wasseraufnahme des Zementsteins simultan in die Struktur eingebaut und ihr Einbau erfolgte dabei nicht nur bei niedrigen Feuchtigkeiten. Im Gegensatz zu Powers gingen Feldman und Sereda weiterhin davon aus, dass Zwischenschichtwasser nicht nur irreversible Änderungen der Zementsteinstruktur bewirkte, sondern dass damit auch reversible Anteile der hygri-schen Verformungen erklärt werden konnten.

Setzer wies darauf hin, dass der Einbau von Zwischenschichtwasser zwar in einigen Hydraten der reinen Klinkerphasen beobachtet werden konnte, aber an Zementstein noch nicht direkt nachgewiesen wurde [94].

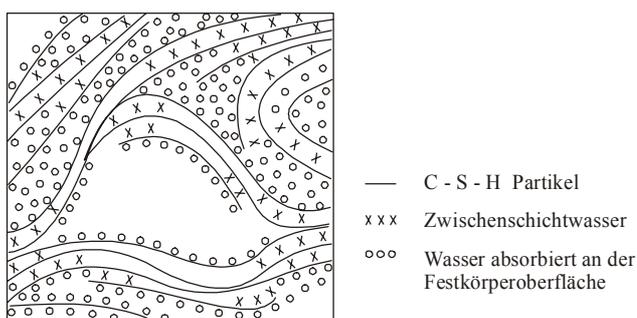


Bild 4.2: Zementsteinmodell nach Feldman und Sereda [116]

Im Münchner Modell nach Wittmann und Setzer, das aus Ergebnissen zahlreicher Forschungsarbeiten entwickelt wurde, wurde der Zementstein als Xerogel betrachtet. Die einzelnen Partikel standen miteinander in Verbindung über primäre (chemische) und sekundäre Bindungen (van der Waals-Kräfte) [94] [113].

Durch Anlagerung von Wasserdampfmolekülen auf den inneren Oberflächen nahm nach dem Münchner Modell der Kompressionszustand der Partikel signifikant ab und daraus resultierte eine Volumenexpansion der einzelnen Partikel. In Bild 4.3 ist diese

als Längenänderung Δl_0 dargestellt. Dieser Vorgang wurde vornehmlich dem unteren Feuchtebereich bis ca. 50 % r.F. zugeschrieben. Bei höheren Feuchtigkeiten nahm die Anziehungskraft der sekundären Bindungen ab. Man ging davon aus, dass durch die weitere Feuchtigkeitszunahme der Abstand der einzelnen Partikel untereinander anwuchs und es so zu einer weiteren Ausdehnung (Δl_π) der Gesamtstruktur kam [95] [97] [98].

Im Gegensatz zu den erstgenannten Modellen trat hier Zwischenschichtwasser nicht auf. Irreversible Verformungen wurden ebenfalls von diesem Modell nicht wiedergegeben, da zeitabhängige bzw. durch die Trocknung induzierte Veränderungen der Struktur nicht berücksichtigt wurden [83] [116].

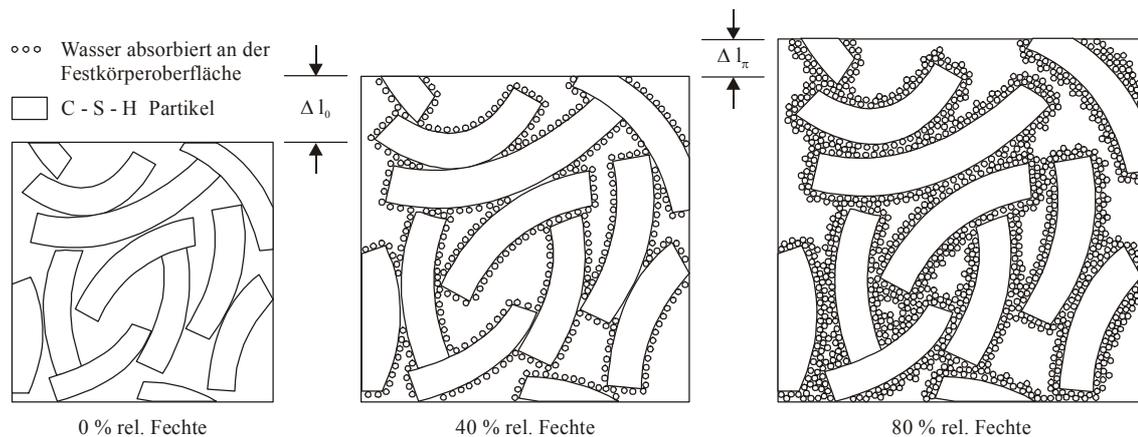


Bild 4.3: Strukturmodell nach Wittmann und Setzer (Münchner Modell)

Jüngere Untersuchungen von Jennings zur Beschreibung der Zementsteinstruktur basierten auf einer Gegenüberstellung von Messung aus Wasserdampf- und Stickstoffsorption und führten zu dem Ansatz, dass zwei C-S-H Typen mit verschiedenen Dichten im Zementstein angenommen werden konnten [60]. Dazu wurde vorausgesetzt, dass Wasserdampfmoleküle zu allen inneren Oberflächen vordringen können, wohingegen Stickstoff nur zu den Oberflächen der Anteile mit kleinerer Dichte Zugang besitzt (Bild 4.4).

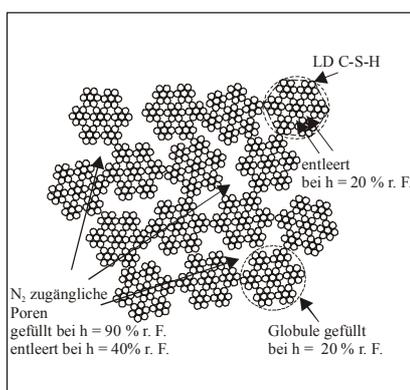


Bild 4.4: Strukturmodell nach Jennings [60]

Die als kugelig angenommenen, kolloidalen Partikel agglomerieren zu sogenannten Globules, aus denen sich die LD-C-S-H (Typ mit kleinerer Dichte) formten. Beim Trocknen wurde eine dichtere Packung der Globules eingestellt und somit wurden die Zementsteineigenschaften beeinflusst. Interessant war bei diesem Modell die Ähnlichkeit mit der von Powers ursprünglich gewählten Darstellung der Zementsteinstruktur (Bild 4.1).

4.2 Mechanismen zur Beschreibung der hygrischen Verformungen

Von den oben genannten Modellen geben das Münchner Modell und das Modell nach Powers mathematische Beziehungen zwischen Verformungen des Zementsteins und seiner Mikrostruktur an. Beide Modelle sind in der Lage, neben dem hygrischen Verhalten auch andere physikalische Zementsteineigenschaften zu erklären, auf die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht eingegangen wird.

Powers stellte schon sehr früh fest, dass Trocknungsschwinden und Quellen nicht direkt aus der Änderung der Wassermenge im Zementstein resultierten. Das in der Struktur verbleibende Wasser geht mit dem Zementstein durch Spannungsänderungen in einen neuen mechanischen Gleichgewichtszustand über [79] [80]. Als wesentliche Mechanismen nannte Powers den Kapillarkrafteffekt, die Spaltdruckwirkung und die Änderung der freien Oberflächenenergie. Dem Zwischenschichtwasser kam, wie bereits erwähnt, in beiden Modellen keine bzw. keine besondere Bedeutung zu.

4.2.1 Ansätze nach Powers

Zur Erklärung der Schwindverformungen im oberen Feuchtebereich verwendete Powers zunächst den Ansatz von Kapillarkräften. Diese entstanden in der Zementsteinstruktur durch Wasserverlust aus den feinen Poren bei gleichzeitiger Meniskusbildung. An der gekrümmten Grenzfläche Gas - Flüssigkeit entstand ein Druckunterschied, der auf die Porenwände übertragen wurde und dort Zugspannungen erzeugte. Diese bewirkten eine Annäherung der Porenwände zueinander.

In welchen Poren, d.h. bei welcher Porengröße sich ein Meniskus bei gegebener relativer Luftfeuchtigkeit ausbildete und welche Poren bis dahin bereits vollständig entleert wurden, konnte mit Hilfe der Kelvingleichung abgeschätzt werden (Gl. 4.1). Die Größenordnung der Kapillarspannungen konnte über die Gibbs-Laplace-Gleichung bestimmt werden (Gl. 4.2). Unter Annahme einer zylindrischen Porengeometrie ($r_1 = r_2$) lassen sich diese Beziehungen etwas vereinfachen [81].

Kelvingleichung

$$\ln(h) = \frac{M_v}{\rho \cdot R \cdot T} \cdot \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \text{ für zylindrische Porengeometrie folgt:} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

$$\ln(h) = \frac{2 \cdot M_v}{\rho \cdot R \cdot T \cdot r} \cdot \gamma$$

Gibbs-Laplace-Gleichung

$$\sigma = \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \rightarrow \text{zylindrische Porengeometrie: } \sigma = \frac{2 \cdot \gamma}{r} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

h : rel. Luftfeuchtigkeit

M_v : Molare Masse

ρ : Rohdichte

r : Radius

R : Allgemeine Gaskonstante

T : Temperatur

γ : Oberflächenspannung

σ : Kapillarspannung

Auf dem Konzept der Kapillarspannung aufbauend gab Powers für das Verhältnis zwischen Volumenänderung und relativer Luftfeuchtigkeit folgende Beziehung an:

$$\text{Volumenänderung } \frac{\Delta V}{V} = A \cdot \left(\frac{R \cdot T}{M_v \cdot V_w} \right) \cdot \ln(h) \quad (\text{Gl. 4.3})$$

A : Flächenfaktor

V_w : Molares Volumen

Mit abnehmender Feuchtigkeit stiegen demnach die Kapillarspannungen im Zementstein an, da die simultan entleerten spannungswirksamen Poren einen kleineren Porendurchmesser besaßen (vgl. (Gl. 4.1) und (Gl. 4.2)). Folglich kam es zu einer stärkeren Kontraktion.

In der verwendeten Kelvingleichung waren implizit mehrere Annahmen eingebaut, die z.B. aufgrund der breiten Porenradienverteilung, der Porenform und der Vernetzung der Poren untereinander auf Zementstein nicht übertragbar waren [79] [83] [94] [99] [113] [116]. Dennoch basierten vor allem in jüngerer Vergangenheit entwickelte numerische Modellansätze zur Berechnung der hygrischen Verformungen im Wesentlichen auf diesem Konzept [9] [30] [31] [99]. Dies lag daran, dass zum einen die Kapillarporosität eine der am meisten verstandenen mikrostrukturellen Eigenschaften des Zementsteins darstellt und dass zum anderen mit den oben genannten Beziehungen notwendige mathematische Formulierung vorgelegen haben [60].

Granger, Torrenti und Acker gingen zum Beispiel davon aus, dass die an den Porenwänden erzeugten Kapillarzugspannungen unter makroskopischer Betrachtung durch eine auf das Gesamtgerüst einwirkende Druckbeanspruchung ersetzt werden konnten [51]. Unter weiteren Vereinfachungen führt dies zu Gleichung (Gl. 4.4). Die Zementsteinstruktur wurde durch die konstant angenommene Porosität ϕ und dem Anteil an gefüllten Poren ϕ^l berücksichtigt.

$$\text{Schwinddehnung } \varepsilon = \phi^l \cdot \frac{3 \cdot \rho^l \cdot R \cdot T}{M_v \cdot (1 - \phi) \cdot K^s} \cdot \ln(h) \quad (\text{Gl. 4.4})$$

ϕ : Porosität

K^S : Kompressionsmodul

ϕ^l : Anteil an gefüllten Poren

ρ^l : Rohdichte der flüssigen Phase

Shimomura und Maekawa verwendeten eine mathematische Beschreibung der Porenradialverteilung im Beton und differenzierten mit Hilfe der Kelvingleichung (Gl. 4.1) in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchtigkeit zwischen luftgefüllten und wassergefüllten Poren [99]. Kapillarspannungen konnten während der Trocknung nur in zuvor wassergefüllten Poren entstehen. Ihre Größenordnung wurde durch Gleichung (Gl. 4.2) angegeben. Die spannungswirksame Fläche wurde proportional zum wassergefüllten Porenraum gesetzt.

Nach der Kelvingleichung (Gl. 4.1) wurden beim Erreichen einer Feuchtigkeit zwischen 40 % r.F. und 50 % r.F. Poren mit einem Porenradius von etwa 2,5 nm entleert. An dieser Stelle gab Powers eine Grenze für die Gültigkeit dieses Ansatzes an, denn in so kleinen Poren konnten Menisken nicht weiter existieren [79]. Dies hatte gleichzeitig zur Folge, dass die während der Trocknung zunehmend bis dahin aufgebauten Spannungen schlagartig verloren gingen und damit auch eine Rückverformung (Quellen) einhergehen müsste [113]. Ein solches Verhalten wurde für Zementstein jedoch bisher experimentell nicht beobachtet. Young führte dies auf das viskoelastische und irreversible Verhalten von Zementstein zurück [116].

Mit dem Ansatz der Kapillarkraft allein konnte Powers die gemessenen Verformungen im oberen Feuchtebereich nicht beschreiben, denn diese überschritten die theoretisch ermittelten Werte. Er führte daher eine zusätzliche Kraftkomponente ein, den sogenannten Spaltdruck. Erklärt wurde der Spaltdruck nach Powers durch die Wirkung von Wassereinbau in einem keilförmigen Spalt (Bild 4.5). Er entstand dort, wo sich zwei gegenüberliegende, adsorbierte Filme nicht voll bis zur Spaltspitze ausbilden konnten und führte zu einer repulsiven Wirkung auf das Gefüge [79]. Der maximale Spaltdruck lag im gesättigten Zustand vor und nahm mit sinkender Luftfeuchtigkeit ab (Gl. 4.5). Die thermodynamische Grundlage für dieses Konzept wurde später von Bažant weiterentwickelt (Thermodynamics of hindered adsorption) [16].

$$\text{Volumenänderung } \frac{\Delta V}{V} = \beta \cdot f(w_a) \cdot \frac{R \cdot T}{M_v \cdot V_w} \cdot \ln(h) \quad (\text{Gl. 4.5})$$

$f(w_a)$: Spannungswirksamer Flächenanteil

β : Konstantante

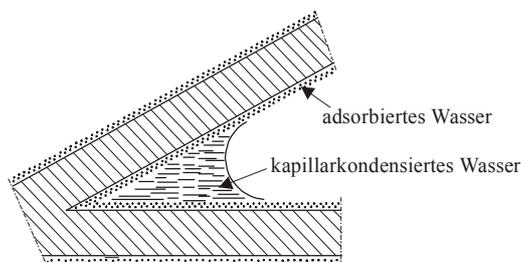


Bild 4.5: Keilförmiger Spalt mit adsorbiertem und kapillarkondensiertem Wasser nach Powers

Aufgrund ihrer kolloidalen Eigenschaften stehen Zementsteinpartikel unter einem hydrostatischen Druck, der eine Kontraktion der Partikel bewirkt. Durch Adsorption von Wassermolekülen auf der Partikeloberfläche wird eine Änderung der Oberflächenenergie bewirkt, die zu einer Abnahme des hydrostatischen Druckes und zu einer damit verbundenen Expansion führt (Gl. 4.6). Dieser Effekt besitzt nach Powers besonders im unteren Feuchtebereich einen dominanten Einfluss auf das hygrische Verhalten.

$$\text{Volumenänderung } \frac{\Delta V}{V} = \frac{R \cdot T}{M_V} \cdot \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot \int_{h_1}^{h_2} \frac{W_a}{V_S} \cdot d \ln(h) \quad (\text{Gl. 4.6})$$

α : Materialkonstante W_a : adsorbierte Wassermasse

4.2.2 Mechanismen im Münchner Modell

Im unteren Feuchtebereich wurde nach dem Münchner Modell, ähnlich wie von Powers beschrieben, die Änderung der Oberflächenenergie als dominanter Mechanismus für die hygrischen Verformungen verantwortlich gemacht [94] [113]. In diesem Feuchtebereich wurde für die Erklärung der Schwindverformungen auf die als Bangham-Beziehung bekannte Gleichung zurückgegriffen (Gl. 4.7). Diese gibt einen proportionalen Zusammenhang zwischen der Partikelverformung und der Änderung der Oberflächenenergie an. Diese Beziehung konnte für poröses Glas und Kohlepartikel verifiziert werden [94].

$$\text{Längeänderung } \frac{\Delta l}{l} = \lambda \cdot \Delta F \quad (\text{Gl. 4.7})$$

λ : Proportionalitätskonstante ΔF : Oberflächenenergieänderung

Mit der von Setzer aufgestellten „Thermodynamischen Näherung“ konnte u.a. die Oberflächenenergieänderung berechnet und die Bangham-Beziehung direkt geprüft werden [94] [97]. Aus Messungen von Feldman [42], die Schwindverformungen und zugehörige Sorptionsdaten wiedergaben, konnte damit für Zementstein ein proportionaler Zusammenhang gefunden werden, der im unteren Feuchtebereich bis ca. 50 % r.F. Gültigkeit besaß (Bild 4.6). Über diesen Feuchtebereich hinausgehende Verformungen ließen sich damit allein nicht erklären. Im oberen Feuchtebereich (> 50 % r.F.) wirkte nach dem Münchner Modell ebenfalls - wie von Powers angesetzt - ein Spaltdruck π , der für den überproportionalen Anstieg der Verformungen verantwortlich gemacht wurde.

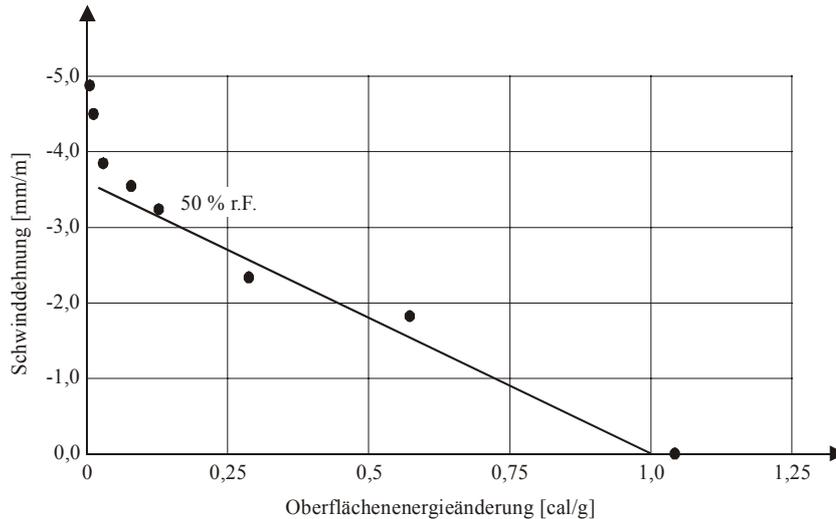


Bild 4.6: Schwinddehnungen in Abhängigkeit von der Oberflächenenergieänderung [94]

Im Gegensatz zum Modell von Powers stellte dieser in diesem Feuchtebereich den alleinigen Mechanismus dar. Es wurde davon ausgegangen, dass Kapillarspannungen für die Berechnung der hygrischen Verformungen von Zementstein keine Bedeutung besaßen [95] [113]. Ferraris und Wittmann gaben eine Näherungsbeziehung für die Berechnung der Kapillarkraft an, die von der Feuchtigkeit unabhängig war [45].

Der Spaltdruck in diesem Modell beruhte auf der Theorie von Derjaguin und Churaev und setzte sich aus drei verschiedenen Anteilen zusammen [36] (Gl. 4.8).

$$\pi_0 = \pi_{vdw} + \pi_{el} + \pi_{str} \quad (\text{Gl. 4.8})$$

Die erste Komponente (π_{vdw}) stellte eine von der Van der Waals-Kraft abhängige Anziehungskraft dar [100]. Die zweite Komponente (π_{el}) beruhte auf der elektrostatischen Abstoßung sich gegenüberliegender elektrischer Doppelschichten bei zunehmender Überlappung bzw. Annäherung [102]. Im Einflussbereich von Festkörperoberflächen besitzt Wasser andere Eigenschaften als freies Wasser. Die Überlappung strukturierter Wasserfilme bei der Annäherung zweier Festkörperoberflächen führt zu einer abstoßenden Kraft, die die dritte Komponente des Spaltdruckes (π_{str}) ausmachte [36] [95] [102]. Im Gegensatz zu dieser Komponente existierten für die elektrostatischen und van der Waals'schen Wechselwirkungen theoretisch fundierte wie auch experimentell abgesicherte Erkenntnisse [36] [93] [102] [116].

Die Gesamtverformungen des Zementsteins konnten mit Hilfe der Thermodynamischen Näherung entsprechend ihren Ursachen aufgeteilt werden. Damit war im Münchner Modell ein mathematischer Ansatz eingebettet, der es erlaubte die kombinierte Wirkung von Oberflächenenergieänderung und Spaltdruck zu separieren (Bild 4.7).

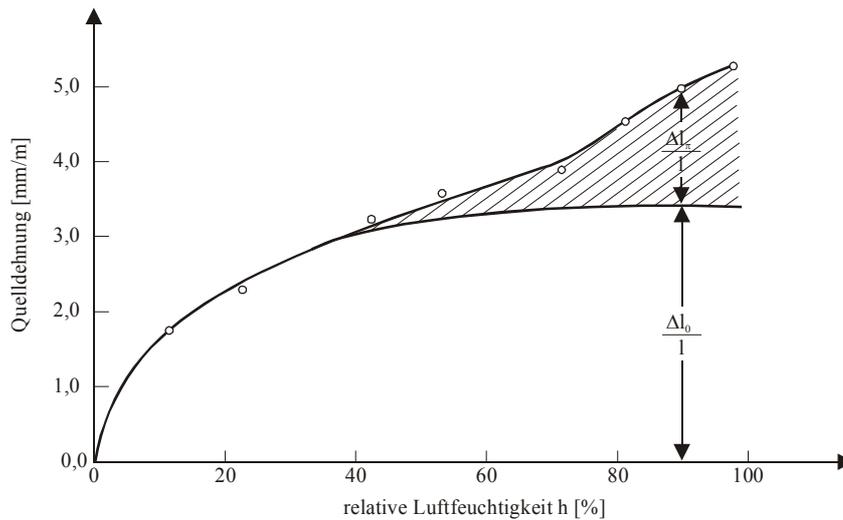


Bild 4.7: Aufteilung der Quellverformungen nach ihren Ursachen

Die Verformungsanteile aus Spaltdruckwirkung (Δl_{π}) erhält man durch Subtraktion der zur Änderung der Oberflächenenergie proportionalen Schwindverformungen (Δl_0) von den Gesamtverformungen.

4.3 Erweiterung des Münchner Modells nach Setzer

Die Wirkung des Spaltdruckes in einer Struktur wie die des Zementsteins direkt zu erfassen ist sehr schwierig. Von Ferraris und Wittmann wurden daher Experimente an einem vereinfachten Ersatzsystem durchgeführt, das aus zwei sich gegenüberliegenden sphärischen Quarzflächen bestand [45]. Eine der beiden Quarzflächen war beweglich und wurde mit einer definierten Kraft auf die in ihrer Position fixierten zweiten Fläche gepresst. Nach sukzessiver Steigerung der Umgebungsfeuchtigkeit konnte der Betrag bestimmt werden, bei dem sich die bewegliche Quarzfläche aus der anfänglichen Position abrupt entfernte. Je größer die anfängliche Auflast eingestellt wurde, desto höher war die benötigte Umgebungsfeuchtigkeit, um diese durch den aufgebauten Spaltdruck zu überbrücken und folglich beide Quarzflächen zu separieren (Bild 4.8). Durch Gleichsetzung bestimmten Ferraris und Wittmann den Betrag des Spaltdruckes zum Zeitpunkt des Abhebens aus der Anfangspressung.

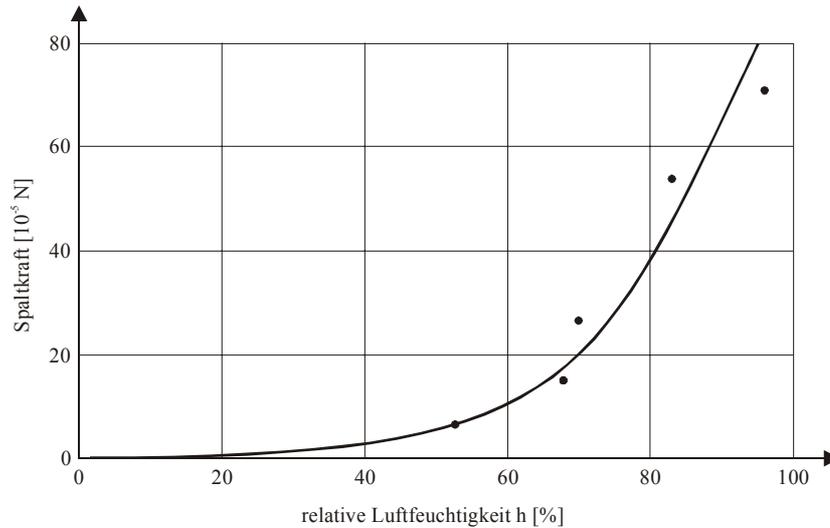


Bild 4.8: Spaltkraft zwischen zwei Quarzflächen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit [45]

Eine Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf Zementstein und Formulierung einer mathematischen Grundlage für die Beschreibung des Spaltdruckes im Zementstein wurde später von Setzer angestellt [95]. Dazu verwendete er das chemische Potential μ als thermodynamische Größe (Gl. 4.9), von der die Wechselwirkungen zwischen Wasser und Feststoffoberfläche abhängig sind.

$$\Delta\mu = R \cdot T \cdot \ln(\Delta h) \quad \mu: \text{chemisches Potential} \quad (\text{Gl. 4.9})$$

Trägt man nach Setzer die Kraft aus Bild 4.8 über das korrespondierende chemische Potential auf (Gl. 4.9), so erhält man für das Ersatzsystem den in Bild 4.9 dargestellten linearen Zusammenhang [95].

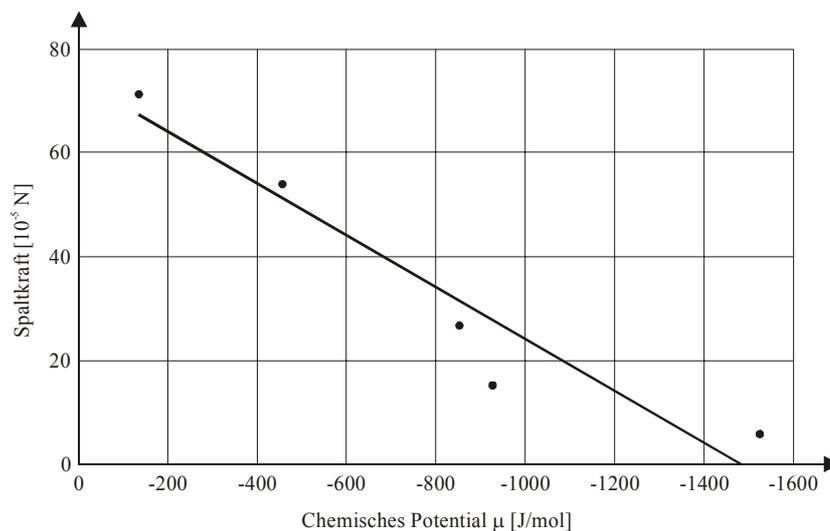


Bild 4.9: Spaltkraft zwischen zwei Quarzflächen in Abhängigkeit vom chemischen Potential [95]

Als Modellvorstellung für die Spaltdruckwirkung wurde der zwischen 2 Feststoffoberflächen mit konstantem Abstand D vorhandene Spalt verwendet (Bild 4.10).

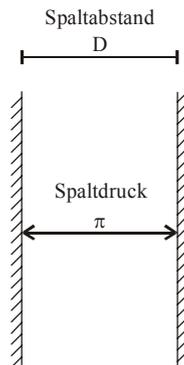


Bild 4.10: Spaltmodell zwischen 2 Feststoffoberflächen

Der Spaltdruck wird mit der folgenden Definition in Abhängigkeit von μ ausgedrückt :

$$\text{Spaltdruck: } \pi(D) = \frac{\mu}{V_w} \quad (\text{Gl. 4.10})$$

Wie in Kapitel 2.2 und 2.3 bereits erläutert, besitzt Zementstein eine sich über mehrere Zehnerpotenzen erstreckende Porenradienverteilung. Wird für Zementstein ein repräsentativer Mittelwert für den Porendurchmesser bestimmt, so kann, wie in (Gl. 4.10) angegeben, die Zunahme des Spaltdruckes proportional zur Änderung des chemischen Potentials angenommen werden. Setzer grenzte den Porendurchmesserbereich durch die Forderung ein, in dem er postuliert, dass der Spaltdruck in den Mesoporen (2 bis 50 nm) aktiv ist und infolgedessen hauptsächlich mit dem vorstrukturiertem Wasser gekoppelt ist [95]. Der Ansatz einer proportionalen Beziehung zwischen π und μ wird zusätzlich dadurch bekräftigt, wenn man berücksichtigt, dass bei einer Änderung der Umgebungsfeuchtigkeit um Δh die Änderung von ΔD im Vergleich zu $\Delta \mu$ vernachlässigbar klein ist [96]. Der Spaltabstand D kann somit in erster Näherung als konstant angenommen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur Berücksichtigung der Porenradienverteilung eines Zementsteins in Gleichung (Gl. 4.10) der Faktor C_g eingeführt. Damit soll der Ansatz des in Bild 4.9 dargestellten Verhaltens für das Ersatzsystem auch auf Zementstein Anwendung finden.

$$\text{Spaltdruck: } \pi = \frac{\mu}{V_w} = \frac{\mu}{V_w} \cdot C_g \quad (\text{Gl. 4.11})$$

C_g : Faktor zur Berücksichtigung der Porenradienverteilung

Als exemplarische Überprüfung der o.g. proportionalen Beziehung am Zementstein verwendete Setzer Ergebnisse aus Schwinduntersuchungen von Feldman [42]. Im oberen Feuchtebereich (50 % r.F. bis 100 % r.F.) wurden die gefundenen Verformungen in Abhängigkeit von μ aufgetragen (Bild 4.11). Die lineare Beziehung lässt sich mit den

Versuchsergebnissen für Zementstein darstellen (Feuchtebereich von 50 % r.F. bis 100 % r.F.). Für eine systematische Untersuchung und Verallgemeinerung dieser Beziehung fehlten die dazu notwendigen Messungen, die u.a. verschiedene Zementsteinstrukturen berücksichtigen.

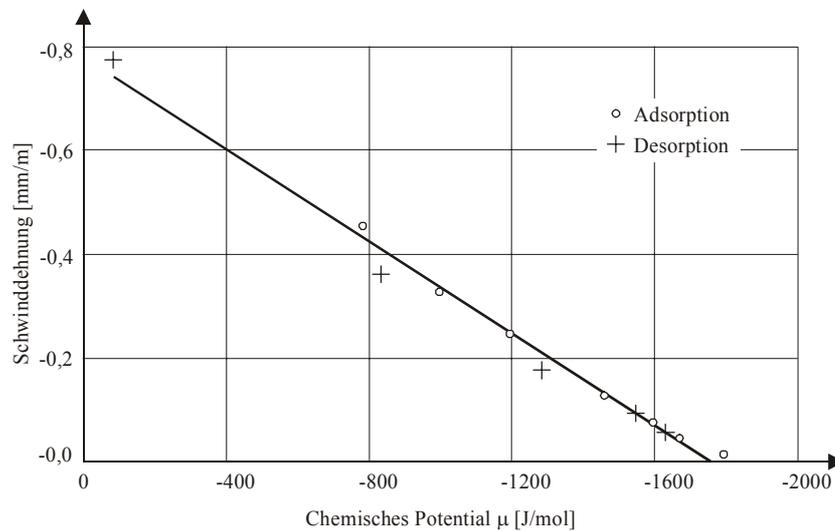


Bild 4.11: Schwinddehnungen in Abhängigkeit vom chemischen Potential nach Setzer[95] (Messdaten aus[42])

5 Experimentelle Bestimmung des Trocknungsschwindens von Zementstein

5.1 Feuchtegradient

Bei den in Kapitel 2.4 und 3.2 erläuterten Beziehungen zwischen Umgebungsfeuchtigkeit und Massenänderung bzw. Schwindverformungen wurde stets von einem Gleichgewichtszustand ausgegangen. Bis zum Erreichen des hygri-schen Gleichgewichtes durchläuft der Probenquerschnitt jedoch in Abhängigkeit von der Zeit verschiedene Feuchtezustände. Der Randbereich gibt seine Feuchtigkeit relativ schnell ab (Austrocknung) bzw. nimmt Feuchtigkeit aus der Umgebung zügig auf (Befeuchtung), während der Kern (je nach Querschnittsabmessungen) langsamer auf die Feuchtigkeitsänderung der Außenluft reagiert. Das bedeutet, dass während der Austrocknung / Befeuchtung zunächst keine gleichmäßige Feuchteverteilung in der Probe vorherrscht, sondern vielmehr von einem Feuchtegradienten auszugehen ist. Mit zunehmender Austrocknungs- bzw. Befeuchtungszeit nimmt der Feuchtegradient stetig ab, bis sich schließlich eine gleichmäßige Feuchteverteilung im gesamten Querschnitt einstellt. Die zeitabhängige, nichtlineare Feuchteverteilung kann nach Bažant, wie in Bild 5.1 für den Austrocknungsfall dargestellt, angenommen werden [115]. Für den Befeuchtungsfall ergibt sich ein umgekehrter Gradientenverlauf.

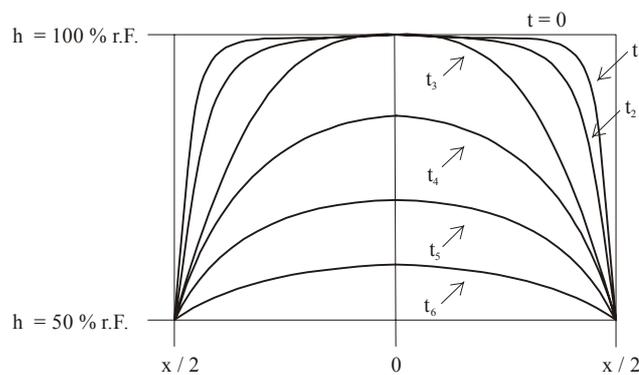


Bild 5.1: Feuchteverteilung im Querschnitt für verschiedene Betrachtungszeitpunkte [115]

Geht man gedanklich davon aus, dass der angegebene Querschnitt aus einzelnen freigeschnittene Streifen besteht, die jeweils eine konstante Feuchtigkeit besitzen und sich unabhängig voneinander verformen können, so ergibt sich zu einem beliebigen Zeitpunkt, der in Bild 5.2 dargestellte Verformungszustand. Die Randstreifen erfahren aufgrund ihrer niedrigeren Feuchtigkeit eine deutlich größere Verkürzung als die Streifen in Kernnähe.

Unter Berücksichtigung der Verformungskompatibilität (Bernoullische Annahme) wird das Schwinden der einzelnen Streifen durch benachbarte Streifen eingeschränkt. Durch diese „innere“ Einschränkung und das unterschiedliche Verformungsvermögen der einzelnen (benachbarten) Streifen werden Spannungen aufgebaut, die als Eigenspannung bezeichnet werden. Im Kernbereich liegen Druckspannungen und im Randbereich Zugspannungen vor (Bild 5.3, links). Die o.g. Verhältnisse werden umgekehrt, wenn es sich um eine Befeuchtung handelt, da die Streifen im Randbereich eine deutlich größere Längenzunahme als die Streifen in Kernnähe erfahren.

Überschreiten im Falle einer Austrocknung die Zugspannungen die Zugfestigkeit, entstehen Risse in der Randzone (Bild 5.3, rechts). Durch die Rissbildung wird der Spannungszustand beeinflusst und damit ändert sich ebenfalls der Verformungszustand [19] [27] [43] [45]. Der Betrag der Spannungen nimmt deutlich ab und gleichzeitig wandern die Randspannungen in Richtung des Querschnittskernes. Weiterhin wirken sich die durch das ungleichmäßige Trocknen verursachten Risse auf das weitere Trocknungsverhalten der Struktur aus [19]. Durch die neuen (Riss-)Oberflächen erfolgt die Feuchtigkeitsabgabe des Zementsteins schneller.

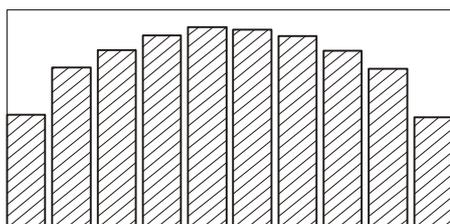


Bild 5.2: Freies Schwinden der einzelnen Querschnittselemente [115]

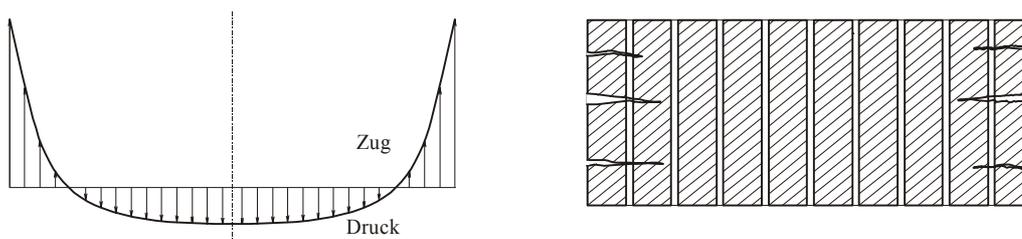


Bild 5.3: Spannungsverteilung und resultierende Risse aus behinderter Schwindverformung [115]

5.2 Einfluss des Feuchtegradienten auf die Schwindmessung

Zur Bedeutung der ungleichmäßigen Feuchteverteilung im Probenquerschnitt auf die Aussagefähigkeit experimenteller Untersuchungsmethoden des Schwindverhaltens liegen in der Literatur verschiedene Untersuchungsergebnisse vor.

Eine experimentelle Bestimmung der ungestörten Materialantwort im Falle von Zementstein ist nach Bažant nur dann möglich, wenn der Feuchtegradient bzw. die dar-

aus aufgebauten Eigenspannungen während der Versuchsdurchführung hinreichend klein gehalten werden, so dass der Querschnitt ungerissen bleibt [15] [115]. Voraussetzungen dafür sind einerseits die Wahl einer sehr dünnen Probe und andererseits die Einstellung einer langsamen und graduellen Änderung der Umgebungsfeuchtigkeit. Rissbildung infolge Feuchtegradient führt nach Bažant und Raftshol zu einer Abnahme der von außen messbaren Schwindverformungen um etwa 33 % im Vergleich zu ungerissenen Zementsteinproben [19]. Nach diesen analytischen Betrachtungen muss die Probendicke auf max. 1 mm beschränkt werden, um Risse zu vermeiden. Weiterhin ist in entsprechenden Experimenten darauf zu achten, dass eine Änderung der Umgebungsfeuchtigkeit von ca. 2 % r.F nicht überschritten werden sollte. Eine sprunghafte Änderung der Umgebungsfeuchtigkeit erfordert ihrer Ansicht nach sogar eine Probendicke, die kleiner als 0,1 mm beträgt, was aus praktischer Sicht kaum realisierbar ist.

Unabhängig von Art und Weise, wie die makroskopischen Schwindverformungen von Zementsteinproben bestimmt werden, stellt das Trocknungsschwinden nach Chatterji kein reines Materialverhalten dar, wie z.B. die elektrische Leitfähigkeit oder die Wärmeausdehnung [27] [28]. Nach Chatterji, Thaulow und Christensen kann auch bei dünnen Proben nicht ohne Weiteres davon ausgegangen werden, dass Risse ausbleiben [29]. Aus mikroskopischen Untersuchungen stellten sie an kreisförmige Scheiben aus Zementstein mit einer Dicke von 1,5 mm und einem Durchmesser von 25 mm sehr feine Mikrorisse fest, die mit Hilfe konventioneller Methoden nicht einfach detektiert werden konnten (Bild 5.4). Daher war ihrer Ansicht nach die maximale Probendicke, ab der Eigenspannungen u. U. vernachlässigt werden konnten, sogar deutlich kleiner als 1 mm.

An den vorgefundenen Radialrissen, die vom Rand her in Richtung Mittelpunkt der kreisförmigen Probe verliefen, konnte zusätzlich der Einfluss der Probenform aufgezeigt werden, wenn ein Feuchtegradient vorlag. Die von Chatterji, Thaulow und Christensen gewählte harsche Trocknung der Proben über Silikagel (ca. 0 % r.F.) nach vorangegangener Wasserlagerung erzeugt auch bei dünnen Proben einen Feuchtegradienten. Geht man in gleicher Weise vor, wie in Bild 5.2 dargestellt und zerlegt die kreisförmige Probe (Scheiben) in einzelne Streifen, so ergeben sich Kreisringe mit zum Zentrum hin abnehmendem mittlerem Umfang (Bild 5.4).

Die Ergebnisse von Chatterji wurden von Bentur u.a. allein auf die Bildung eines Feuchtegradienten zurückgeführt, der bei hinreichend dünnen Proben und langsamer Trocknung nicht aufgetaucht wäre [21]. Folglich stellte das Trocknungsschwinden eine Materialeigenschaft dar. Aufgrund der im Verhältnis zur Gesamtoberfläche der Kreis-scheibe noch nennenswerten Mantelfläche wurde über diese ebenfalls ein Anteil an Feuchtigkeit abgegeben, so dass sich in radialer Richtung ein Feuchtegradient ergab. Als Folge schwindete der äußere Ring auf den inneren Ring (Kern) auf, wodurch seine Verformungsfähigkeit eingeschränkt wurde und Zugspannungen in tangentialer Richtung aufgebaut wurden, die bei entsprechender Größe schließlich zu den beobachteten Rissen geführt haben.

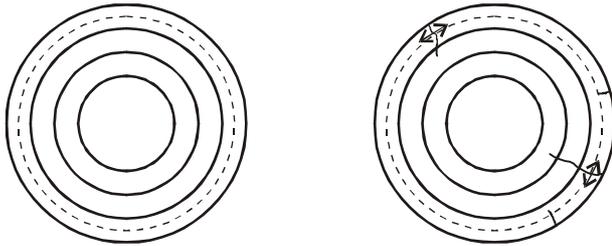


Bild 5.4: Rissbildung durch Feuchtegradient in 1,5 mm dicken Zementsteinscheiben ($D=25\text{ mm}$)

Day und Illston gingen ebenfalls den Fragen nach, ob auch in kleinen Proben der Spannungsgradient hinreichend groß werden konnte, um das Schwindverhalten zu beeinflussen und inwieweit Zugspannungen aus dem Feuchtegradienten diese Risse verursachen können [35]. Bei ihren Untersuchungen verwendeten sie kleine Zementsteinproben mit unterschiedlichem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, die von 100 bis auf 53 % r.F. stufenlos getrocknet wurden. Ferner wurde die Geschwindigkeit, mit der die Umgebungsfeuchtigkeit verändert wurde, zwischen „langsam“ und „schnell“ variiert. Übereinstimmend mit Schlussfolgerungen von Helmuth und Turk [55] gaben Day und Illston an, dass die Größenordnung der Schwindverformungen im betrachteten Feuchtebereich unabhängig von der Trocknungsrate war. Man konnte dennoch nicht davon ausgehen, dass der Feuchtegradient generell keinen signifikanten Einfluss auf das Endschwindmaß besaß. Mikrorisse konnten zwar entstehen, aber solange der Probenkern ungerissen blieb, beschränkte sich nach Day und Illston der wesentliche Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Verformungen. Auf den Betrag des Schwindens bei Erreichen des Gleichgewichts besaßen die Risse dagegen nur geringe Bedeutung. Sowohl Helmuth und Turk als auch Day und Illston kamen somit zum Ergebnis, dass mit kleinen Proben das freie Schwinden des Zementsteins bestimmt werden kann.

Klug bestimmte das Trocknungsschwinden unterschiedlich dicker Zementsteinplatten ($l/b/d: 100/50/0,5 - 5,0\text{ mm}^3$) und stellte einen Einfluss der Probendicke auf das Endschwindmaß fest [65]. Dieses Verhalten wurde im unteren (0 bis 11 % r.F.), mittleren (33 bis 42,5 % r.F.) und oberen (90 bis 98 % r.F.) Feuchtebereich bestätigt (Bild 5.5). Mit abnehmender Probendicke nahm nach den Ergebnissen von Klug die Schwinddehnung signifikant zu. Mit Hilfe der Schwinddehnungen für die verschiedenen Dicken (5 bis 0,5 mm) wurde das freie Schwinden einer Zementsteinprobe mit der Dicke „Null“ durch Extrapolation angegeben (Bild 5.5).

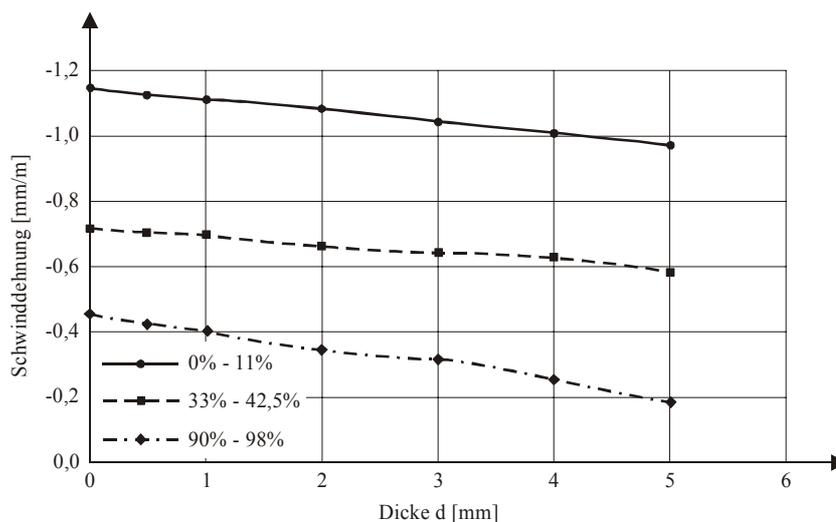


Bild 5.5: Schwinddehnungen von Zementstein in Abhängigkeit von der Probendicke [65]

Der Einfluss der Probendicke auf Verlauf und Größenordnung der Schwinddehnungen von Zementstein wurde ebenfalls von Hwang und Young untersucht [59]. Dabei wurden Zementsteinproben mit der Dicken von 1 und 3 mm verwendet, die von 100 % r.F. auf jeweils 20, 40, 60 und 80 % r.F. getrocknet wurden. Die bestimmten Verläufe der Schwinddehnungen sind in Bild 5.6 zusammengestellt. Hwang und Young folgerten auf Basis ihrer eigenen Ergebnisse, dass die Verwendung dünner Zementsteinproben (ca. 2 mm) es erlaubte, das freie Schwinden zu erfassen. Die gefundenen Unterschiede in den Schwinddehnungen (im Gleichgewichtszustand) bewerteten sie als vernachlässigbar. Die beobachteten Oberflächenrisse aus Feuchtegradientenbildung bei Beginn der Trocknung hatten keinen signifikanten Einfluss auf die ermittelten Endschwindmaße. Bei einer sorgfältigen Betrachtung der Verläufe fällt nach Chatterji dennoch auf, dass die Schwinddehnungen der 1 mm dicken Proben stets höher waren als die korrespondierenden 3 mm dicken Proben [27]. Weiterhin machte Chatterji darauf aufmerksam, dass der Unterschied in den Schwinddehnungen besonders bei der niedrigsten betrachteten Feuchtigkeit von 20 % r.F. auffallend war. Unter Berücksichtigung der von Bažant und Raftshol angegebenen Restriktionen hinsichtlich der Trocknungsrate ist dieses Ergebnis auch bei sehr dünnen Proben nicht weiter verwunderlich. Neben der Probendicke ist die gewählte Trocknung von besonderer Bedeutung.

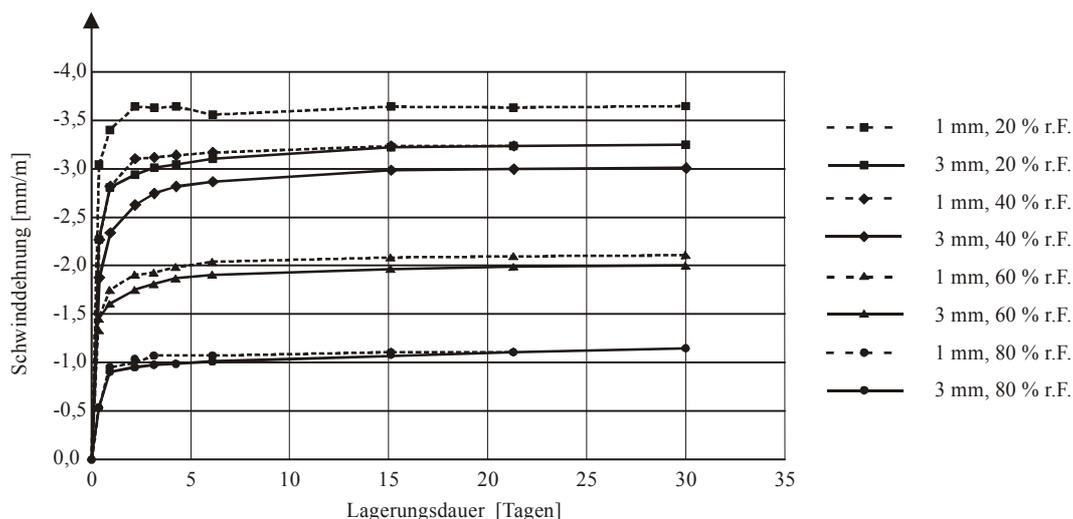


Bild 5.6: Einfluss der Probendicke auf den zeitlichen Verlauf und Größenordnung der Schwinddehnungen für verschiedene Umgebungsfeuchtigkeiten [59]

5.3 Experimentelle Untersuchungsmethoden

5.3.1 Überblick

Für die experimentelle Bestimmung der hygri-schen Verformungen von Zementstein sind in der Literatur mehrere Verfahren beschrieben, die sich durch die gewählten Messprinzipien und Probekörpergeometrien unterscheiden. Die meisten dieser Untersuchungen wurden als Längenänderungsmessungen durchgeführt.

In Tabelle 5.1 sind die bisher gängigsten Messmethoden zusammengestellt. Die dargestellten Methoden unterscheiden sich u.a. durch folgende Spezifikationen:

- Probenherstellung
- Probekörpergeometrie
- Messprinzip (Messgröße)
- Ankopplung an Probekörper

Tabelle 5.1: Überblick zu unterschiedlichen Messmethoden

<i>Quelle</i>	<i>Probekörpergeometrie</i>	<i>Messprinzip</i>
Feldman & Sereda [43]	Zementsteinscheiben: $l/b/d = 28,6/9,5/1,6 \text{ mm}^3$ Compacts: $\varnothing = 32 \text{ mm}; d=1,6 \text{ mm}$	modified Tuckerman optical extensometer ($4 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm}$)
Baroghel-Bouny & Godin [9]	Zementsteinscheiben: $\varnothing = 100 \text{ mm}; d=2-3 \text{ mm}$	Messuhr ($1 \mu\text{m}$)
Helmuth & Turk [55]	Zementstreifen: $l/b/d = 80/15/0,5-3 \text{ mm}^3$	Mikroskop (30 X) mit (Mikrometer-)Messtisch ($3 \mu\text{m}$)
Roper [85]	Zementsteinprismen: $l/b/d = 152,4/6,35/6,35 \text{ mm}^3$	Linear variable differential transformer (Wegaufnehmer) ($0,025 \text{ mm}$)
Bažant u.a. [17]	Zementstein – Hohlzylinder: $l/\varnothing_d/d = 92/15/0,71 \text{ mm}$	Messuhr ($2,5 \mu\text{m}$)
Junger & Jennings [61]	Zementsteinprismen: $l/b/d = 250/25/25 \text{ mm}^3$	Schwindrahmen mit Messuhr ($2 \mu\text{m}$)
Fleischer [46]	Zement-Feinmörtel – Hohlzylinder: $l/\varnothing_d/d = 70/30/2,5 \text{ mm}$	Wegaufnehmer ($0,1 \mu\text{m}$)
Grube [52]	Zementsteinprismen: $l/b/d = 250/25/25 \text{ mm}^3$	Schwindrahmen mit Messuhr ($1 \mu\text{m}$)
Neubauer u.a. [75]	Bruchstücke aus Zementstein: $\text{Fläche} \approx 1,0 \text{ cm}^2; d = 1,0 \text{ mm}$	ESEM (1000 X bis 5000 X)
Hwang und Young [59]	Zementstreifen: $l/b/d = 100/11,5/1-3 \text{ mm}^3$	Schwindrahmen mit Messuhr ($5 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm}$)

5.3.2 Probekörper

Aus den in Kapitel 5.2 diskutierten Restriktionen an Probengeometrie und Trocknungsrate ergeben sich weitere Anforderungen an die gesamte Messmethode. An erster Stelle steht die zielsichere Herstellung der notwendigen filigranen Zementsteinproben. Es muss weiterhin sichergestellt sein, dass die Proben homogen und ungestört aufgebaut sind.

Aufgrund ihrer vergleichsweise einfachen Herstellung bieten sich in vielen Fällen dünne Platten als Probekörper an. Die Zementsteinplatten können konventionell in Schalungen mit entsprechenden Abmessungen hergestellt werden. Ein Nachteil dabei ist, dass aufgrund der Sedimentationsneigung nur Zementleime mit niedrigem w/z-Wert verwendet werden können [44] [65]. Klug untersuchte das Schwinden und Quellen von

Zementstein, in dem er die Längenänderung von 3 nebeneinander aufgestellten und sich gegenseitig stützenden Platten bestimmte [65].

Baroghel-Bouny und Godin führten Schwindmessungen an dünnen kreisförmigen Scheiben durch [9] [43]. Bei diesen Proben wurde die Änderung des Probendurchmessers infolge einer Änderung der Umgebungsfeuchtigkeit bestimmt. Aus der Längenänderung konnte auf die Schwinddehnung zurück geschlossen werden. Eine Möglichkeit z.B. kreisförmige Scheiben mit definierter Dicke herzustellen, war diese in aus Vollzylinderförmigen Proben herauszusägen. Die zylindrischen Ausgangsproben konnten, wie Zementsteinplatten, ebenfalls konventionell hergestellt werden.

Von versuchstechnischen Vorteil, aber gleichzeitig besonders schwierig herzustellen, sind Probekörper aus Zementstein mit einer Hohlzylindergeometrie. Von Bažant u. a. wurde für diesen Zweck eine aufwendige Schalung vorgeschlagen. Sie machten ferner strikte Angaben zum Einbringen des Leims und zum Entformen der Hohlzylinder [18].

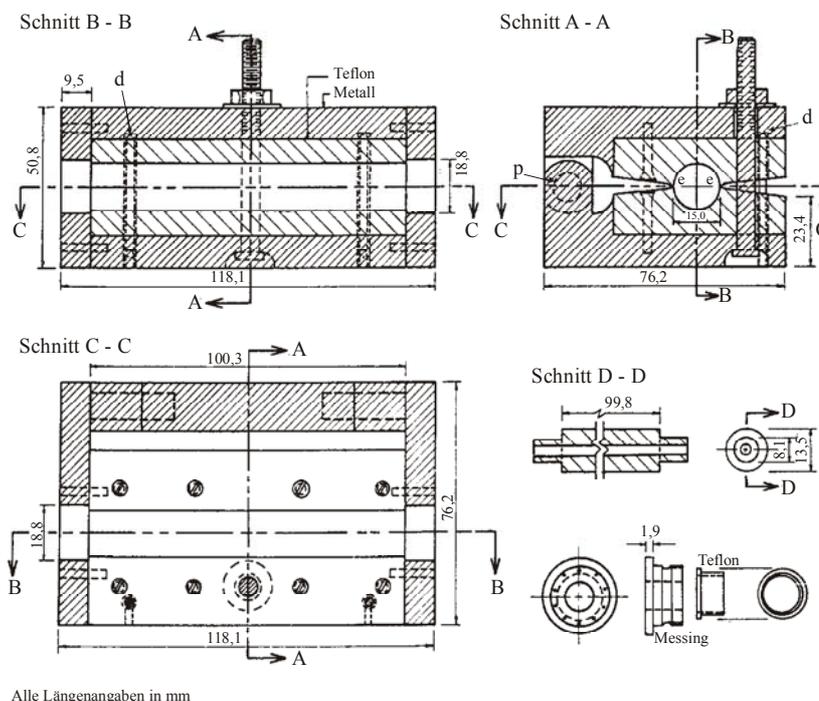


Bild 5.7: Schalung für die Herstellung von Hohlzylinder aus Zementstein nach Bažant [18]

Die Außenhaut der Schalform bestand aus Teflon mit Aluminiumverstärkung und die innenseitige Schalung wurde durch einen ebenfalls aus Teflon gefertigten Kern realisiert (Bild 5.7). Zum Lösen der Probe aus der Schalung wurde u.a. auf das unterschiedliche thermische Verhalten von Zementstein und Teflon zurückgegriffen.

Torroja und de la Peña berichteten über ein Verfahren zur Herstellung von Hohlzylindern, bei dem der Leim allein auf die Außenschalung von der Innenseite her aufgespritzt wurde [105] (aus [18]). Der Vorteil bei dieser Methode war, dass auf den aufwändigen Innernern der Schalung verzichtet werden konnte. Dadurch wurde die

Erzielung einer gleichmäßigen Wanddicke jedoch sehr schwierig. Ein weiterer Nachteil waren große Schwankungen im w/z-Wert während des Spritzvorgangs. Die gezielte Variation des w/z-Werts war verfahrensbedingt stark eingeschränkt.

Die Gefahr einer Entmischung des noch frischen Zementleims hängt wesentlich vom w/z-Wert ab. Je höher dieser ist, desto größer wird das Bluten bzw. Sedimentieren ausfallen. Dies erklärt u. U. auch die Feststellung, dass sehr häufig bei an Zementsteinproben durchgeführten Schwinduntersuchungen ein w/z-Wert kleiner 0,50 verwendet wurde. Die Entmischungsgefahr wurde stellenweise damit überwunden, dass der Zementleim zunächst in einer dichten Schalung eingebracht wurde. Die Schalung wurde allseitig verschlossen und anschließend eine gewisse Zeit (meist 24 h) unter langsamer Rotation in einem Probenwender eingesetzt. Damit sollte verhindert werden, dass sich Wasser bevorzugt an einer Stelle anlagerte und daraus ein inhomogenes Mischungsverhältnis innerhalb der gesamten Probe resultierte [20] [35] [59] [75]. Fleischer fügte zum Zementleim zusätzlich feuergetrockneten Kristallquarzsand mit 0,4 mm Größtkorn hinzu, um Entmischungserscheinungen zu minimieren [46]. Dies hatte jedoch zur Folge, dass im Grunde dadurch die Schwindverformungen eines Mörtels bestimmt wurden und nicht die eines Zementsteins.

In Bild 5.8 ist das von Hwang und Young vorgeschlagene Verfahren zur Herstellung homogener Zementsteinproben und die dabei gewählte Probekörperform dargestellt [59]. Diese Vorgehensweise stimmte mit der von Helmuth und Turk verwendeten Methode überein [55].

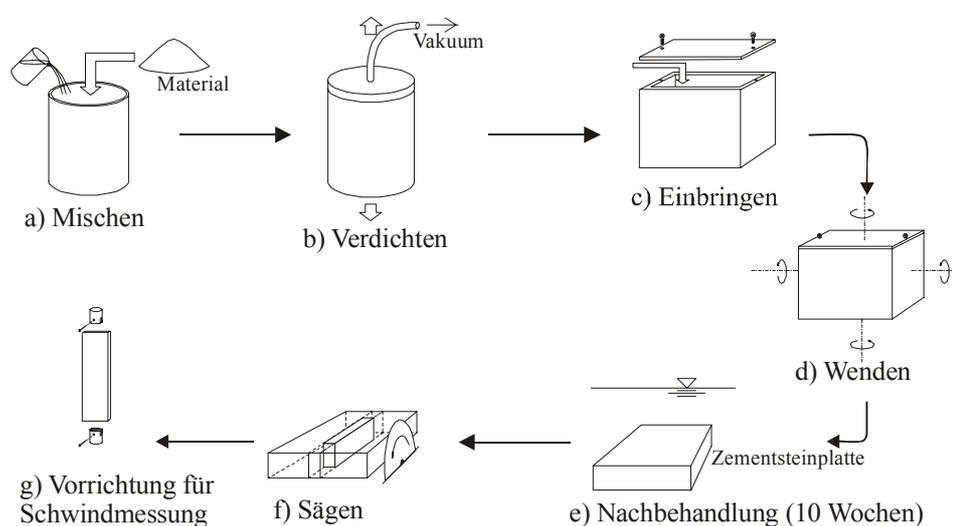


Bild 5.8: Herstellungsweise prismatischer Zementsteinproben nach Hwang und Young [59]

Der Zementleim wurde in einem Vakuummischer hergestellt und erhärtete nach dem Einbringen in eine allseitig abgeschlossenen Schalung für 24 h unter ständiger Rotation. Im Anschluss an einer Wasserlagerung wurden die so gewonnenen Zementsteinplatten auf das gewünschte Maß abgelängt.

Feldman und Sereda verwendeten bei ihren Untersuchungen sogenannte „flaschenhydratisierte“ Zementsteinproben [42] [43]. Der Zementleim wurde dabei mit einem ungewohnt hohen Wassergehalt (w/z -Wert = 5,0) hergestellt. Nach einer Erhärtungsphase unter ständiger Rotation wurde der entstandene hochporöse „Zementstein“ getrocknet, so dass der hydratisierte Zement nahezu pulverförmig vorlag. Abschließend wurde das Pulver in einer Metallschale unter hohem Druck zu sogenannten „Compacts“ geformt, an denen die Schwindverformungen bestimmt werden konnten.

Durch die Wahl sehr dünner Proben und einer ausgewogenen Trocknung bzw. Befeuchtung kann der Einfluss eines Feuchtegradienten kontrolliert werden. Ein weiterer Vorteil filigraner Proben ist die bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes benötigte kurze Versuchsdauer. Inwiefern die Probendicke auch bei verhältnismäßig dünnen Proben (Dicke bis 3 mm) das Schwindverhalten beeinflusst, ist bislang noch nicht eindeutig geklärt. Hierzu liegen, wie bereits dargestellt, einander widersprechende Messergebnisse vor.

Bei der Wahl einer Geometrie für die filigranen Zementsteinproben ist die praktische Umsetzbarkeit bei der Herstellung und während der Messung zu berücksichtigen. Schließlich müssen die Proben einerseits für das zu untersuchende Material repräsentativ (homogen) und andererseits in den Messaufbau ungestört (Risse) einbaubar sein.

5.3.3 Messaufbau und -instrumente

Je filigraner die Schwindproben waren, desto schwieriger wird es, die im allgemeinen sehr kleinen Verformungen zuverlässig zu messen. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Messinstrumente nehmen erheblich zu. Weiterhin ist die Ankopplung zwischen Messinstrument und der filigranen und damit zerbrechlichen Zementsteinproben so vorzusehen, dass diese sich durchgehend ungestört verformen kann.

Al-Alusi, Bertero und Polivka führten Schwindmessungen an schlanken Vollzylinderproben durch und verwendeten für die Verformungsmessung parallel elektrische Dehnungsmessgeber und mechanische Messuhren. Sie erhielten durchgehend signifikante Unterschiede in den aufgezeichneten Verformungsentwicklungen der beiden Messaufnehmer [4].

Bei Verwendung einer mechanischen Messuhr sind Ankopplungsmarken an der Probe vorzusehen, die in Kombination mit der Federsteifigkeit der Messuhr u.U. besonders bei filigranen Proben die Schwindverformungen undefiniert behindern können. Induktive Wegaufnehmer (WA) mit Tauchanker sind an dieser Stelle eher geeignet, da bei diesem System keine Rückstellfeder benötigt wird. Eine höhere Messgenauigkeit ist im allgemeinen mit Dehnungsmessstreifen (DMS) erzielbar. Am Applikationsort wird im Vergleich zu den übrigen Bereichen der Probe die Austrocknung jedoch behindert. Zusätzlich beschränkt sich hierbei die Messlänge auf diesen gestörten Probenbereich, was eine zuverlässige Messung erschwert. Bei Verwendung von WA und DMS ist auf ihre Feuchteempfindlichkeit zu achten. Sind Feuchtezyklen während der Schwindmes-

sung vorgesehen, kann die Messgenauigkeit bei einem Wechsel der Verformungsrichtung zusätzlich abnehmen.

Neben den o.g. schlanken Geometrien stellen prismatische Probekörper unterschiedlicher Querschnittsabmessungen den häufigsten Fall dar [52] [61] [72] [78] [85] [90]. Ein Abweichen von einer Minimierung der Probendicke wird im Hinblick auf eine einfachere Umsetzbarkeit in Kauf genommen. Daher sind neuere Untersuchungen zum Schwinden von Zementstein aus dem In- und Ausland oft in Anlehnung an ASTM C 596-01 und ASTM C490 – 00a (American Society for Testing and Materials) durchgeführt worden [6] [7] [61]. Vergleichbare nationale Vorgaben für Schwindmessungen am Zementstein sind nicht verfügbar. In der Norm DIN 52 450 (1985) wird die Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern, im Wesentlichen aus Mörtel behandelt [39]. Es werden drei unterschiedliche Messgeräte vorgeschlagen, die sich in ihrem grundlegenden Aufbau kaum unterscheiden (Bild 5.9). Als Probekörper sind Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm vorgesehen.

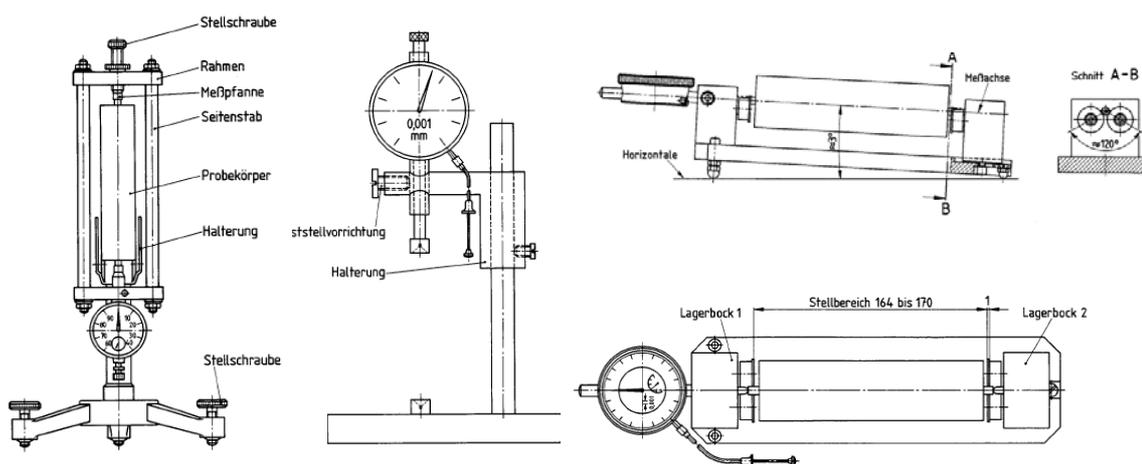


Bild 5.9: Messgeräte A, B und C zur Bestimmung des Trocknungsschwindens nach DIN 52 450 [39]

In Bild 5.10 ist der von Bažant, Asghari und Schmidt zur Bestimmung der Schwindverformungen von Hohlzylindern aus Zementstein angegebene Messaufbau dargestellt, der bedingt durch die Robustheit der diskutierten dünnwandigen Proben zunächst durch seine Unkompliziertheit überzeugt [17]. Auch bei Verwendung moderner Messinstrumente, wie z.B. Wegaufnehmer mit automatisierter Messdatenerfassung, bleibt die Herstellung der benötigten Zementsteinproben als Einsatzhindernis über.

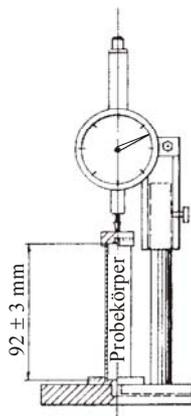


Bild 5.10: Messaufbau für Schwindmessungen mit Hohlzylinderproben nach Bažant [17]

Roper und Bryden verwendeten dagegen ein deutlich komplexeres System [86]. Mit dem Bild 5.11 dargestellten Messaufbau konnten die Längen- und Masseänderungen von prismatischen Zementsteinproben gleichzeitig bestimmt werden. Für die Längenänderungsmessung wurde ein induktiver Wegaufnehmer (LVDT) verwendet. Der quadratische Probenquerschnitt besaß in diesen Messungen eine Kantenlänge von 6,4 mm und benötigte damit eine vergleichsweise lange Auslagerungsdauer, bis die jeweilige Gleichgewichtsfeuchtigkeit erreicht wurde.

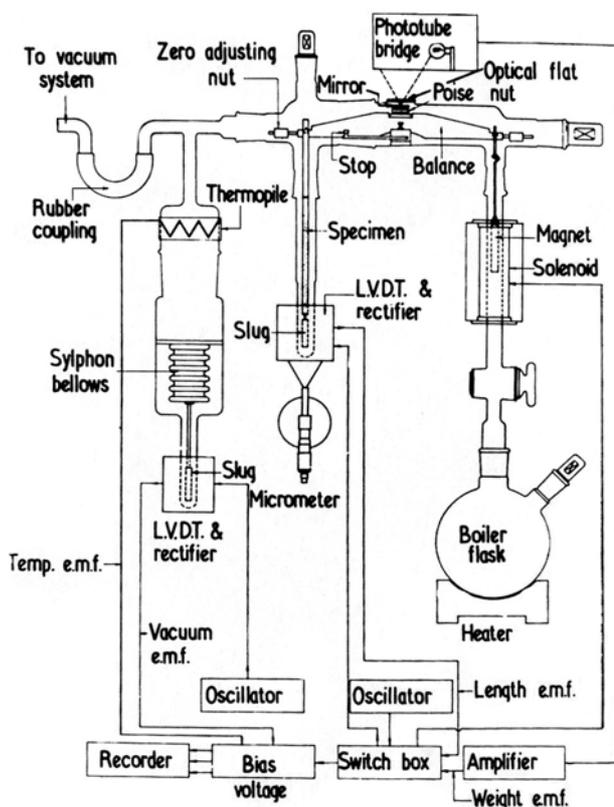


Bild 5.11: Messaufbau zur Bestimmung der Schwindverformungen und des zugehörigen Sorptionsverlaufes nach Roper und Bryden [86]

Neubauer u.a. machten sich die Neuentwicklung der letzten Jahre auf dem Gebiet der Rasterelektronenmikroskopie zu Nutze und untersuchten das Schwindverhalten von Zementstein berührungslos unter Verwendung eines „Environmental Scanning Electron Mikroskop“ (*ESEM*) [75]. Die verwendeten Zementsteinproben wurden in gleicher Weise, wie von Hwang und Young vorgeschlagen (Bild 5.8), unter langsamer Rotation in einer dichten Schalung hergestellt. Die Proben wurden in eine klimatisierbare Mikroskopkammer (Temperatur und Feuchtigkeit) eingelegt. Als Proben kamen Bruchstücke mit einer Fläche von ca. 1 cm² und einer Dicke von 1 mm zum Einsatz, die aus Zementsteinplatten gewonnenen wurden. Mit Hilfe einer speziellen Bildauswertetechnik gaben sie, bei einer 5000-fachen Vergrößerung, Schwinddehnungen für Zementstein im Alter von 7, 14 und 28 Tagen an, die als „Partikelschwinden“ bezeichnet wurden. Damit sollte das ungestörte Schwindverhalten einzelner CSH-Partikel in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte ausgedrückt werden. Bei einer 1000-fachen Vergrößerung und sonst gleicher Vorgehensweise gaben sie Schwinddehnungen an, die als „Arealschwinden“ charakterisiert wurden. Den wesentlichen Unterschied zum „Partikelschwinden“ sahen Neubauer u.a. in der Verformungseinschränkung der CSH-Partikel, die z.B. durch kristallines Calciumhydroxid hervorgerufen wurde.

Berührende Messprinzipien stellen spätestens dann ein Hindernis dar, sobald die Schwindmessungen in einer abgeschlossenen Kammer durchgeführt werden sollen. Dies ist besonders dann elementar, wenn filigrane Zementsteinproben verwendet werden, da bei diesen aufgrund der großen Oberfläche das Carbonatisierungsschwinden einen nicht vernachlässigbaren Anteil am Gesamtschwinden ausmachen kann [52]. Aber auch allein bei Betrachtung unterschiedlicher und definierter Feuchtestufen ist eine abgeschlossene Messkammer notwendig. Der Einbau des gesamten Messaufbaus in einer abgeschlossenen Messkammer, die z.B. eine kohlendioxidfreie Atmosphäre aufweist, ist zwar im Prinzip denkbar, jedoch ergeben sich dabei u.U. Nachteile hinsichtlich der Feuchteempfindlichkeit der verwendeten Messaufnehmer.

5.3.4 Umgebungsfeuchtigkeit

Eine zielsichere und stufenweise Einstellung einer Gleichgewichtsfeuchtigkeit in vertretbarer Zeit und geringer Schwankungen erfordert ebenfalls einen abgeschlossenen Messraum, mit möglichst kleinen Abmessungen. Die am meisten verbreitete Methode unterschiedliche Feuchtestufen einzustellen, ist die Verwendung verschiedener Salzlösungen [3]. In Tabelle 5.2 sind einige Salzlösungen und die daraus resultierenden relativen Luftfechtigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur zusammengestellt. Nach Roper und Bryden hat diese Vorgehensweise die Nachteile, dass einerseits bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes viel Zeit benötigt wird und andererseits nur grobe Feuchteschritte realisiert werden können [86]. Ferraris und Wittmann verwendeten zur Einstellung der Feuchtigkeit ein Peltier- Element, das die Temperatur eines an die Messkammer angeschlossenen Wasserreservoirs regelte. Mit diesem System konnte die Feuchtigkeit zwischen 0,5 % r.F. und 99 % r.F. beliebig eingestellt werden [45].

Tabelle 5.2: Relative Luftfeuchtigkeit über Salzlösungen bei verschiedenen Temperaturen und einem Streubereich bis zu $\pm 2\%$ (nach DIN 50 008)

<i>Gesättigte Salzlösung</i>		<i>Relative Luftfeuchtigkeit in % bei T •C</i>				
<i>Name</i>	<i>chemische Bezeichnung</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>20</i>	<i>23</i>	<i>25</i>
Kaliumhydrogenphosphat	KH_2PO_4	-	-	96	96	96
Kaliumnitrat	KNO_3	96	95	94	93	93
Bariumchlorid	BaCl_2	93	92	91	90	90
Kaliumchlorid	KCl	87	86	86	85	85
Natriumchlorid	NaCl	75	75	75	75	75
Natriumnitrit	NaNO_2	-	-	66	65	64
Magnesiumnitrat	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	57	56	54	53	53
Kaliumcarbonat	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	45	44	44	43	43
Magnesiumchlorid	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	34	34	33	33	33
Kaliumacetat	CH_3COOK	24	24	23	22	22
Lithiumchlorid	$\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$	12	12	12	12	12

Neubauer u.a. führten Schwindmessungen in einem ESEM durch, das standardmäßig über einen klimatisierten Messraum verfügt. Sie führen in ihren Untersuchungen stufenweise die Feuchtigkeiten 5, 20, 40, 60 und 80 % r.F. an. Durch eine Temperaturkontrolle in der Messkammer konnten diesbezügliche Schwankungen in der Umgebungsfeuchtigkeit minimiert werden (Tabelle 5.2).

6 Messverfahren zur experimentellen Bestimmung der freien Schwinddehnungen von Zementstein

6.1 Ausgangssituation

In Kapitel 5 wurde ein Überblick zu diversen Messmethoden und zu den wichtigsten Restriktionen gegeben, die für eine aussagefähige experimentelle Bestimmung der freien Schwinddehnungen (*unrestrained shrinkage*) von Zementstein aus theoretischen und experimentellen Untersuchungen formuliert wurden. Fasst man die wesentlichen Erkenntnisse zusammen, so ergeben sich daraus folgende Anforderungen an ein geeignetes Messverfahren:

- a) **Feuchtegradient, Messdauer:** Einstellung einer schonenden Trocknungsrate und Verwendung homogener und dünnwandiger Zementsteinproben zur Erfassung möglichst freier Schwinddehnungen in kürzester Zeit
- b) **Ankopplung:** Ausschließung undefinierter Störungen der Schwinddehnungen der dünnwandigen Zementsteinproben durch Verwendung eines geeigneten Messprinzips / Messinstruments

Die o.g. Anforderungen können jedoch nicht unabhängig von einander betrachtet werden. Wird z.B. mit einer abnehmenden Probendicke versucht den Anforderungen aus Punkt a) nachzukommen, erhöhen sich damit gleichzeitig die Anforderungen in Punkt b). Hier liegen die wesentlichen Unzulänglichkeiten in den bisherigen Untersuchungsmethoden begründet. Aus einem Teil der bisherigen Verfahren (Tabelle 5.1) kann zunächst eine Tendenz zu dünnwandigeren Proben gezeigt werden. Mit Kantenlängen von z.B. 12,7 und 6,35 mm sind diese Proben im Vergleich zu den oft eingesetzten Prismen nach ASTM C 596 – 01 (Kantenlänge von 25 mm) deutlich dünner, bleiben jedoch weit oberhalb der geforderten Dicke von 1 bis 3 mm, um einen Einfluss aus Feuchtegradientenbildung auf die Schwindverformungen zu vermeiden. Bei Messungen, die mit dünnen Zementsteinscheiben als Probekörper durchgeführt wurden, konnten Probendicken von 3 bis 0,5 mm realisiert werden (Tabelle 5.1). Die Ankopplung an einen Messaufnehmer und die Stabilität der Messanordnung wurde z.T. durch die Wahl hoher Breiten- zu Dickenverhältnisse (z.B. 6, 11,5 und 100) erreicht. Bei diesen Verfahren wurde davon ausgegangen, dass das gesamte Messsignal einer eindimensionalen Längenänderung in Messrichtung zugeordnet werden kann. Effekte aus Verdrillung der Zementsteinscheibe (infolge ungleichmäßiger Verformung über die gesamte Probe) bzw. Verformungen quer zur Messrichtung lassen sich damit nicht vermeiden.

Als Probekörper lassen sich dünne Zementstreifen oder dünnwandige Hohlzylinder einsetzen. Für die Verformungserfassung sind in diesen Fällen berührungslose Mess-

prinzipien, wie z.B. elektrische (kapazitive Sensoren), elektromagnetische (induktive Sensoren) oder optische Komponenten (Lasertechnik) besonders geeignet.

Dünnwandige Hohlzylinder aus Zementstein sind im Vergleich zu anderen Probekörpergeometrien gleicher Dicke (wie z.B. Streifen) besonders robust. Bei deren Verwendung eignen sich daher grundsätzlich alle o.g. Messprinzipien, um die Längenänderungen zu erfassen. Aber auch berührende Messinstrumente sind hier denkbar. Durch die Wahl einer hinreichenden Hohlzylinderhöhe kann das eindimensionale Schwinden mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Die in Kapitel 5.3.2 erläuterten Probleme, die in den bisher vorgeschlagenen Herstellungsmethoden für Hohlzylinder vorhanden sind, gilt es jedoch vorher zu lösen.

Filigrane Zementstreifen können prinzipiell in fast beliebigen Abmessungen hergestellt werden. Ein dafür geeignetes Verfahren ist z.B. in Bild 5.8 dargestellt. Für dünne Zementstreifen fehlt jedoch bisher eine adäquate Messtechnik mit hinreichender Messgenauigkeit, die in Kombination mit den genannten Proben ein aussagefähiges und robustes Messverfahren ergibt. Hierzu erscheint das von Schell-Sorokin und Tromp vorgestellte Messprinzip „surface-stress-induced optical deflection“ (SSIOD) zur Bestimmung von Oberflächenverspannungen dünner Siliziumproben als Grundlage zweckmäßig zu sein.

6.2 Grundlagen und Messprinzip

Das Messprinzip „surface-stress-induced optical deflection“ (SSIOD) wurde entwickelt, um Oberflächenspannungen - über die daraus resultierenden Verzerrungen - zu bestimmen [69] [92]. In vereinfachter Darstellung kann der zugehörige, in Bild 6.1 abgebildete Messaufbau, wie folgt beschrieben werden: durch auf dünne Siliziumproben ($d = 0,1$ mm) aufgedampfte Germaniummoleküle werden Oberflächenspannungen aufgebaut, die eine Verbiegung der einseitig eingespannten Siliziumprobe bewirken. Vor der Bedampfung werden auf die hochpolierte Siliziumprobe zwei Laserstrahlen ausgerichtet, die von dort aus reflektiert über zwei Umlenkspiegel zu einem Detektor gelangen. Durch die Verbiegung der Siliziumprobe wird der Laserstrahlengang umgelenkt (Bild 6.1, A-A).

Durch die damit einhergehende Positionsänderung der beiden Laserpunkte auf dem Detektor ergibt sich die Möglichkeit, über geometrische Beziehungen den Krümmungsradius der verformten Siliziumschicht zu berechnen. Mit den elastischen Materialkennwerten und der Probekörpergeometrie kann mit Kenntnis des Krümmungsradius der vorhandene Spannungszustand im Querschnitt bestimmt werden.

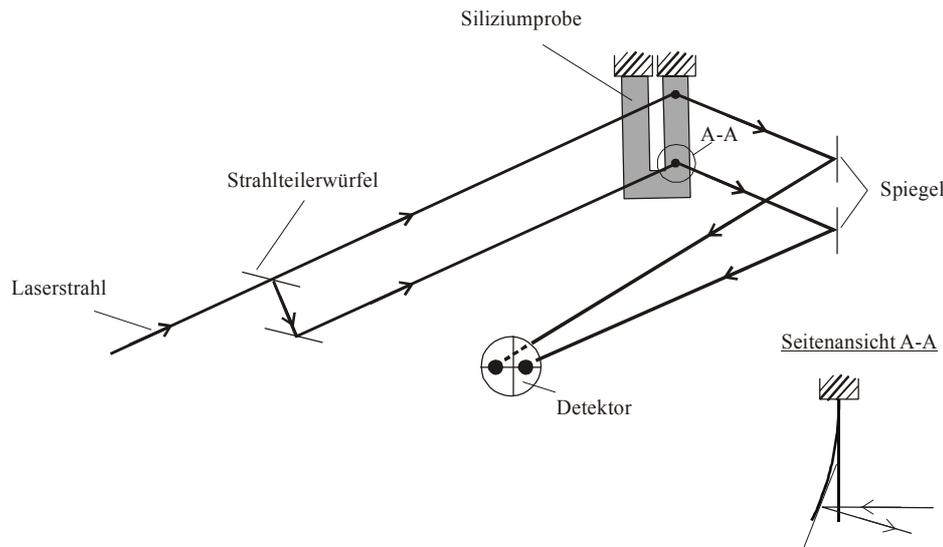


Bild 6.1: Messprinzip „surface-stress-induced optical deflection“ SSIOD [92]

Für den hier vorgesehenen Einsatzbereich besitzt dieses Messprinzip die wesentlichen Vorteile, dass die Messungen berührungslos und mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden können. Damit kann die gesamte Messausrüstung von der Probenkammer bzw. von der Probe selbst getrennt werden. Die hohe Genauigkeit wird hier vor allem durch eine rein geometrische Vergrößerung des Messsignals erreicht. Die Verkrümmung der Probenoberfläche verursacht eine Neigungsänderung der Tangentialebene im Reflexionspunkt (Bild 6.1, A-A). Je größer der Abstand zwischen Probenoberfläche und Detektor ist, desto größer fällt die Positionsänderung der Laserstrahlen entlang der aktiven Detektorfelder aus.

Das Messprinzip SSIOD kann jedoch nicht ohne Weiteres direkt auf Zementsteinproben angewendet werden. Dazu sind im Vorfeld folgende Entwicklungsschritte notwendig:

- geeignete Präparation „messbarer“ Proben aus Zementstein
- Erweiterung des Messbereichs auf die Größenordnung der infolge Schwinden zu erwartenden Verformungen
- auf die speziellen Proben und den neuen Messaufbau optimierte Auswertemethode
- Überprüfung der Messgenauigkeit und der Reproduzierbarkeit

6.3 Probekörper

6.3.1 Konzept

Als Ausgangspunkt wird zunächst auf das Verformungsprinzip eines Bimetallstreifens zurückgegriffen (Bild 6.2). Ein Bimetallstreifen besteht aus zwei Metallschichten, die sich vor allem durch ihre Temperaturendeckungskoeffizienten (α_T) unterscheiden.

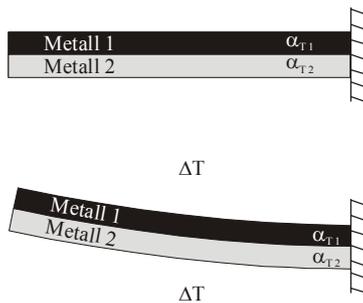


Bild 6.2: Aufbau und Verformungsfigur eines Bimetallstreifens

Der benötigte Verbund zwischen den beiden Schichten wird durch Walzen oder Lötens sichergestellt. Bei einer Änderung der Umgebungstemperatur (ΔT) erfahren beide Metallstreifen unterschiedliche Längenänderungen. Aufgrund des Verbundes untereinander führt dies zu einer Verkrümmung des gesamten Verbundwerkstoffes.

Analog zum Bimetallstreifen setzen sich die zur Bestimmung der Schwinddehnungen verwendeten Proben aus dem zu untersuchenden Zementstein (Z) und einer zweiten darauf angebrachten nicht-schwindenden Schicht (S) zusammen (Bild 6.3).

In weiteren Entwicklungsschritten sind bezüglich der Verbundprobe noch Fragen hinsichtlich:

- Eigenschaften der Schicht (S) (Dicke t_s , Material)
- Abmessungen der Zementsteinschicht (Z)
- Sicherstellung des Verbundes zwischen beiden Schichten (Z) und (S)

zu klären.

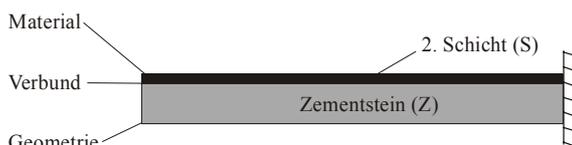


Bild 6.3: Grundkonzept für die entwickelten Proben in Analogie zu Bimetallstreifen

Die Schicht (S) hat die Aufgaben, zum einen nach dem o.g. Verformungsprinzip aus einer Längenänderung des Zementsteins eine Verkrümmung der gesamten Probe zu erzwingen und andererseits die auf ihre Oberfläche ausgerichteten Laserstrahlen durch Reflektion an die nachlaufenden optischen Komponenten (Kapitel 6.4) weiterzuleiten. Nur dadurch werden bei einer Änderung der Umgebungsfeuchtigkeit Verformungen erzeugt, die mit dem Messprinzip SSIOD erfasst werden können.

Die Probe wird an einem Ende fest eingespannt, so dass für die Auswertemethode das statische System definiert ist. In Bild 6.4 ist das Verformungsverhalten der Verbundproben bei einer Zunahme bzw. Abnahme der Umgebungsfeuchtigkeit dargestellt. Durch eine Änderung der Umgebungsfeuchtigkeit wird eine Längenänderung im

Zementstein verursacht. Diese wird jedoch in der Grenzfläche durch die nicht-schwindende Schicht behindert, was schließlich zu einer Verkrümmung der gesamten Verbundprobe führt. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass zwischen den beiden Schichten ein kraftschlüssiger Verbund besteht. Quellverformungen des Zementsteins führen zu einer Umlenkung des Laserstrahlenganges nach unten, wohingegen beim Schwinden dieser nach oben umgelenkt wird.

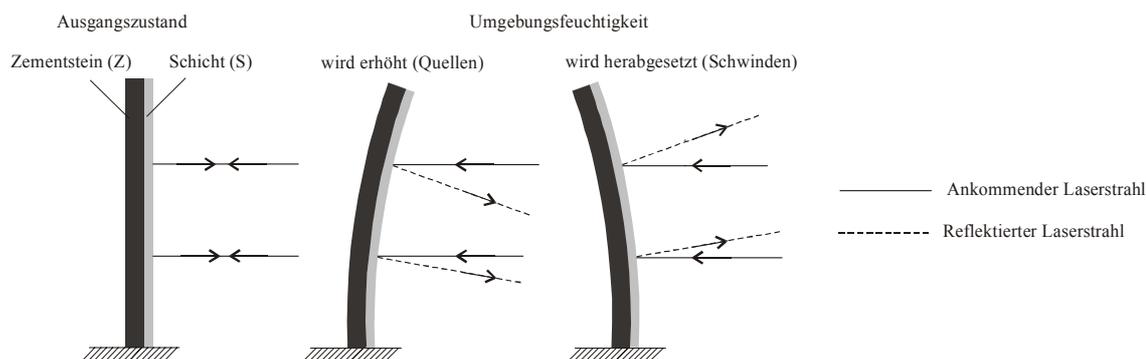


Bild 6.4: Verformungen der Verbundprobe bei entsprechender Änderung der Umgebungsfeuchtigkeit

6.3.2 Dicken- und Steifigkeitsverhältnis

Länge und Breite der Schicht (S) werden durch die Abmessungen der Zementsteinschicht (Z) festgelegt. Lediglich ihre Dicke (t_s) ist noch auf die vorliegenden Gegebenheiten zu optimieren. Bei der Wahl einer Dicke (t_s) ist einerseits auf die zu erwartenden Spannungen und andererseits auf die Größenordnung der bei sonst gleichen Verhältnissen resultierenden Kopfverschiebungen zu achten. Aufgrund des formulierten Zieles, freies Schwinden zu bestimmen, liegt der Schwerpunkt der Optimierung auf einer Minimierung der Normalspannungen im Zementsteinquerschnitt.

Mit Hilfe der in Kapitel 6.4.4 entwickelten Auswertemethode kann der Dickeneinfluss z.B. auf die an der Grenzschicht resultierende Normalspannung im Zementstein (σ_A) und der korrespondierenden Kopfverschiebung der gesamten Probe (w_K) abgeschätzt werden. In Bild 6.5 sind entsprechende Beziehungen in Abhängigkeit vom Dickenverhältnis (t_s/t_Z) unter Variation von t_s exemplarisch dargestellt. Sie sind auf das Dickenverhältnis $t_s/t_Z = 1$ normiert und werden als bezogene Spannung (bez. σ_A) bzw. bezogene Kopfverschiebung (bez. w_K) ausgedrückt. Daraus ist zu erkennen, dass Dickenverhältnisse größer 1,0 in diesem Fall sehr ungeeignet sind (geringere Verformungen bei höherer Beanspruchung).

Um vordergründig die Beanspruchung des Zementsteins zu minimieren, eignen sich hier eher besonders kleine Dickenverhältnisse ($t_s/t_Z < 0,1$). Die damit u.U. korrespondierende nachteilige Reduzierung der Kopfverschiebung fällt vergleichsweise moderat aus und ist aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit (Kapitel 6.6) hinsichtlich der Aussagefähigkeit des gesamten Messverfahrens von geringer Bedeutung.

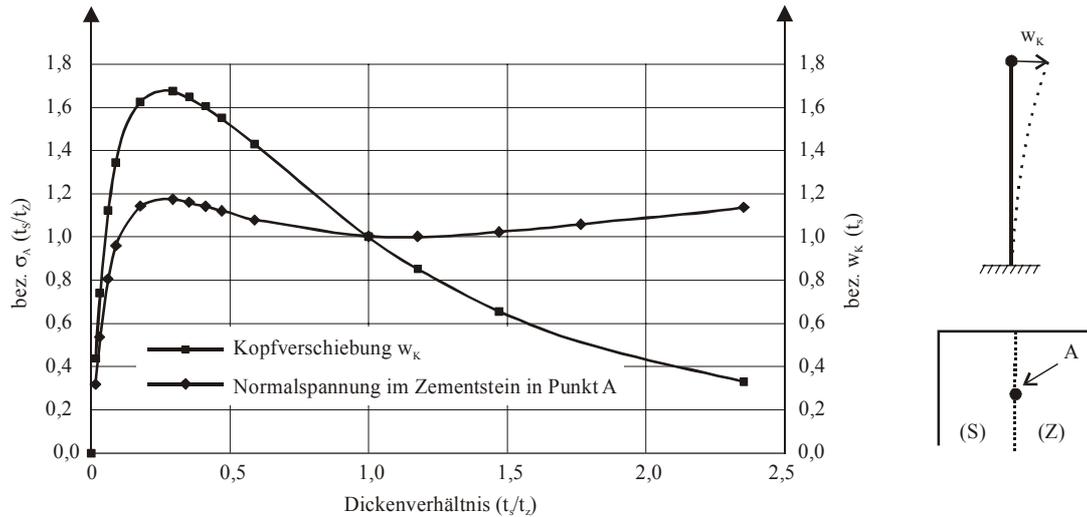


Bild 6.5: Einfluss des Dickenverhältnisses auf die bez. Normalspannung im Zementstein (σ_A) und der bez. Kopfverschiebung (w_K)

Für die Minimierung der Zementsteinbeanspruchung ist weiterhin das Steifigkeitsverhältnis (E_S/E_Z) von großer Bedeutung. Je höher das Steifigkeitsverhältnis (E_S/E_Z) gewählt wird, desto größer werden die im Zementstein durch die Behinderung der freien Verformungen der gesamten Probe erzeugten Normalspannungen. Wird dabei die Zugfestigkeit des untersuchten Zementsteins überschritten, treten Risse in der Probe auf. Gleichzeitig nimmt bei sonst gleichen Randbedingungen der Betrag der Kopfverschiebung ab, was mit einer Zunahme des Krümmungsradius einhergeht. In Bild 6.6 ist ein Verlauf der Normalspannung (σ_A) in Abhängigkeit vom Steifigkeitsverhältnis (E_S/E_Z) dargestellt.

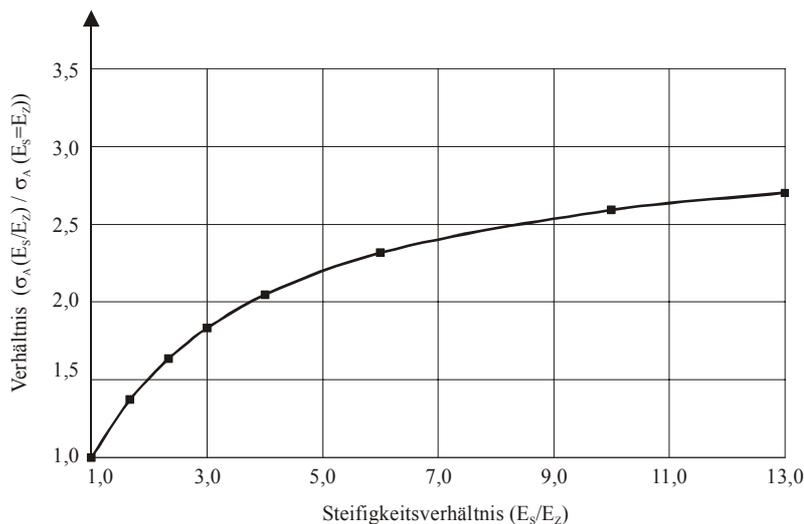


Bild 6.6: Normalspannung im Punkt A (σ_A) in Abhängigkeit vom Steifigkeitsverhältnisses E_S / E_Z

Bei der Ermittlung des Verlaufes wurden ein Dickenverhältnis (t_s/t_z) von 0,10 und ein E_Z von 15.000 N/mm² angenommen. Die Ordinatenwerte werden hier als Quotient aus

σ_A (E_S) und der Bezugsgröße σ_A ($E_S=E_Z$) angegeben. Aus dem Verlauf ist zu erkennen, dass bei sonst gleichen Randbedingungen mit zunehmendem Steifigkeitsverhältnis die Normalspannung σ_A ansteigt. Ein Steifigkeitsverhältnis von etwa 13 ergibt sich, wenn zum Beispiel als Schicht (S) ein Stahlblech zum Einsatz kommt. Ein günstigeres Verhältnis ist bei Verwendung von Quarzglas zu erzielen. Hier ergibt sich ein Steifigkeitsverhältnis (E_S/E_Z) von etwa 4. Dies äußert sich mit einer Abnahme der bezogenen Normalspannung in der Grenzschicht um ca. 25 %.

6.3.3 Vorversuche zur Festlegung der Parameter für die Schichten (Z) und (S)

Bei der Konzeption von Zementsteinproben, die mit SSIOD messbar sind, müssen die in Kapitel 5 diskutierten Anforderungen stets Berücksichtigung finden, d.h. vor allem die Wahl einer möglichst kleinen Dicke t_Z . Gleichzeitig muss die Handhabbarkeit der Zementsteinproben hinsichtlich Herstellung und Präparation sichergestellt sein. Aus entsprechenden Experimenten im Vorfeld resultierten für den Zementstein die Abmessungen $l / b / t_Z : 50 / 5 / 1,7$ mm.

In den ersten Experimenten wurden für die Schicht (S) Blechstreifen aus Edelstahl verwendet. Ihre Dicke t_S variierte zwischen 0,05 und 0,15 mm, d.h. ein t_S/t_Z -Verhältnis zwischen 0,03 und 0,09. Der Verbund zum Zementstein wurde zunächst dadurch erreicht, dass das Edelstahlblech unterseitig als Schalungsuntergrund für den frischen Zementleim diente. Durch vorheriges Anrauen der Blechoberfläche sollte die Verbundwirkung zusätzlich gesteigert werden. Für geringe Beanspruchungen war der erzielte Verbund ausreichend. Bei höheren Beanspruchungen löste sich das Blech vom Zementstreifen ab.

Zur Steigerung des Verbundes zwischen Edelstahlblech und Zementstein wurden in weiteren Untersuchungen die beiden Schichten (Edahlblech und Zementstein) miteinander verklebt. Als Klebemittel wurde zunächst ein Zweikomponentenkleber auf Epoxydharzbasis (EP) verwendet. Damit konnte schließlich ein ausreichender Verbund sichergestellt werden. Dieser wurde jedoch später durch ein Klebemittel auf Polyurethanharzbasis (PUR) ausgetauscht, das aufgrund einer deutlich kürzeren Aushärtungszeit eine schnellere Verarbeitung der Probe ermöglicht. Der Einfluss der PUR-Schicht auf das Verformungsverhalten der Verbundprobe, die nunmehr einen 3-schichtigen Querschnitt besitzt, wird in Kapitel 6.5.5 behandelt.

Unregelmäßigkeiten in der Oberflächenbeschaffenheit schränkten die Verwendung des Stahlbleches stark ein, da die für das Messprinzip notwendige Reflektivität des Bleches zunächst nicht ausreichend war. In diesem Zusammenhang wirken sich Oberflächenrauigkeit, Welligkeit und Formfehler auf die Reflektivität grundsätzlich nachteilig aus [54]. Durch mechanisches Polieren der luftseitigen Blechoberfläche vor dem Bekleben konnte die Reflektivität deutlich gesteigert werden. Zum Polieren wurden verschiedene Diamantsuspensionen mit abgestufter Obergrenze für die Korngröße (Grob- bis Feinpolierung) verwendet. Der intensive Präparationsaufwand und die z.T. weiterhin auftre-

tenden undefinierten Auslenkungen der Laserstrahlen durch die Oberflächenwelligkeit des Bleches stellten unpraktikable Randbedingungen dar.

Anstelle des Stahlbleches (Vorstudie) wurden im weiteren Verlauf für die Schicht (S) Spiegelfolien verwendet. Das Trägermaterial für die Spiegelfolien wurde mit den gewünschten Abmessungen aus Glasplatten mit einer Nenndicke von 150 μm gewonnen. Die benötigte Reflektivität wurde anschließend gezielt auf die vorhandene Wellenlänge des verwendeten Lasers optimiert. Dazu wurden mehrere Moleküllagen Hafnium- und Siliziumoxid schichtweise und abwechselnd auf die Oberflächen der gewonnenen Glasplättchen aufgedampft. In Bild 6.7 sind zum einen die verwendeten Glasfolien mit der bereits aufgetragenen Bedampfungsschicht und andererseits die o.g. filigranen Zementstreifen dargestellt, aus denen letztendlich die entwickelten und eingesetzten Verbundproben realisiert wurden, wie im folgenden Abschnitt erläutert wird. Der Verbund wurde durch den o.g. PUR-Kleber sichergestellt.

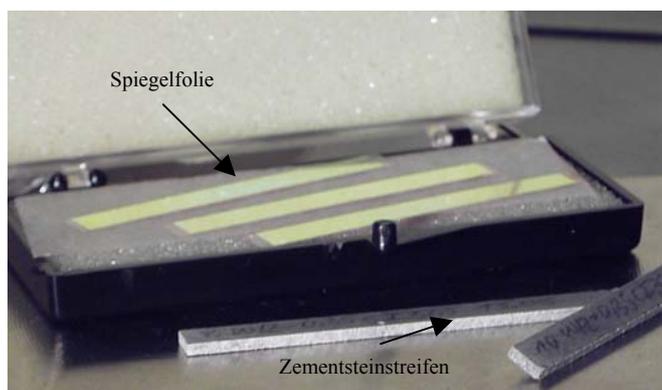


Bild 6.7: Für die Realisierung der Verbundproben verwendete Zementstreifen und Glasfolien

6.3.4 Herstellungs- und Präparationsmethode

Die Zementstreifen mit den Abmessungen 50 x 5 x 1,7 mm³ wurden aus Zementsteinplatten mit den Abmessungen 120 x 50 x 5 mm³ gewonnen. Die Zementsteinplatten wurden in allseitig verschlossenen und dichten Schalungen hergestellt. Die innenseitigen Schalungsflächen wurden mit Teflon eingesprüht, um ein Anhaften des Zementsteins zu minimieren. Die Proben wurden erst nach ca. 24 bis 48 Stunden ausgeschalt, um z.B. verfahrensbedingte Rissbildungen in den Proben in diesem Arbeitsschritt zu vermeiden. Der Zeitpunkt richtete sich nach dem Erhärtungsverlauf des Zementsteins, der vom w/z-Wert und der Zementart abhängig ist. Zementsteinproben mit einem w/z-Wert von 0,50 wurden bereits nach 24 h ausgeschalt. Wohingegen Proben mit einem w/z-Wert von 0,60 für 48 h in Schalung belassen wurden. Nach dem Ausschalen erfuhren die Zementsteinplatten eine Wasserlagerung (T = 20 °C).

Nach der Wasserlagerung der Proben wurden die Zementsteinplatten aus dem Wasser entnommen, um daraus die benötigten Zementstreifen zu gewinnen. Um Randeinflüsse auf das Zementsteingefüge zu minimieren, wurden die Zementstreifen ausschließlich aus dem mittleren Probenbereich der Zementsteinplatte entnommen. Dieser konnte als ungestört angenommen werden. Die Ränder der Platten wurden umseitig auf einer Breite vom 25 mm mit einer konventionellen Laborsäge entfernt (Nasssägen). Anschließend wurden die Zementstreifen mit Hilfe einer Niedertourensäge mit Diamantsägeblatt unter ständiger Nässung herausgesägt. Die gewünschte Probendicke von 1,7 mm konnte mittels einer an der Säge angebrachten Mikrometerschraube eingestellt werden. Die auf dieser Weise erhaltenen Zementstreifen wurden bis unmittelbar vor der Messung unter definierten Randbedingungen (Wasserlagerung bei $T\ 20^{\circ}\text{C}$) vorgelagert. Um Effekte aus autogenem Schwinden (Kapitel 3.3.2) bei der Bestimmung des Trocknungsschwindens zu vermeiden, wurden die Proben für 12 Monate vorgelagert.

Erst unmittelbar vor Messbeginn wurde ein Zementstreifen aus der Vorlagerung entnommen und anschließend präpariert. In Bild 6.8 sind die wichtigsten Arbeitsschritte der Herstellungs- und der anschließenden Präparationsmethode schematisch dargestellt.

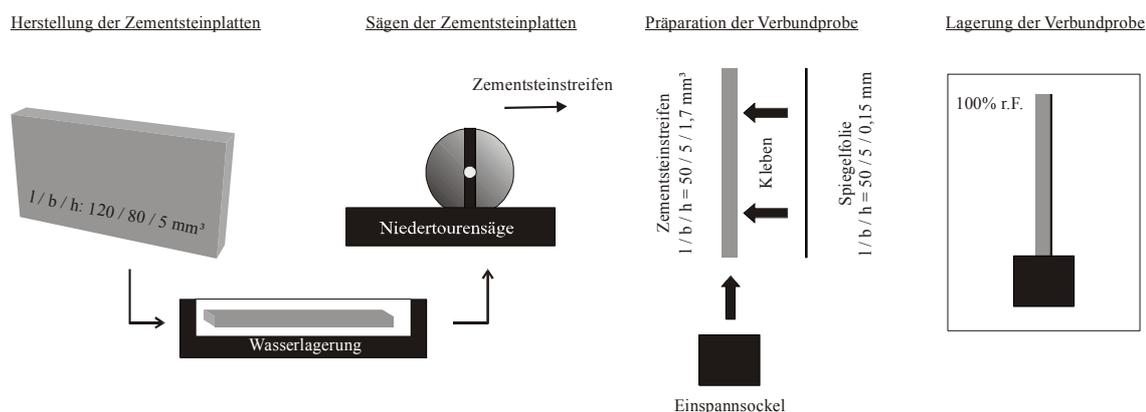


Bild 6.8: Herstellungs- und Präparationsmethode für die verwendeten Verbundproben

Bei der Präparation wurde im ersten Schritt die Oberflächenfeuchte der Probe mit einem Tuch abgetupft, um eine dadurch bedingte Abminderung der Klebewirkung zu vermeiden. Anschließend wurde eine Klebeschicht aufgetragen, die mit einem Stahllineal gleichmäßig verteilt und auf eine minimale Dicke ($< 20\ \mu\text{m}$) abgestrichen wurde. Auf dieser wurde schließlich die Spiegelrolle aufgelegt. Die Spiegelrolle wurde etwa 5 Minuten lang unter einem geringem Anpressdruck gehalten, bis sie durch den Kleber fixiert wurde. Im letzten Präparationsschritt wurde die Probe an einem Ende lotrecht in einen Einspannsockel aus Acrylglas über eine Länge von 10 mm eingeklebt. Die aus dem Einspannsockel herausragende Länge des somit einseitig fest eingespannten Verbundbalkens betrug 40 mm. Der Einfluss der Einspannung auf das Verformungsverhalten des eingespannten Balkens konnte vernachlässigt werden, wenn die Bestimmung

der Verkrümmung in einer Entfernung von der Einspannstelle vorgenommen wurde, die mindestens das doppelte der Probenbreite betrug [34].

Nach Fertigstellung wurde die Verbundprobe, falls sie nicht unmittelbar danach in den Messaufbau eingesetzt wurde, bis zum Messbeginn bei der gewünschten Umgebungfeuchtigkeit gelagert (hier 100 % r.F.). Weiterhin war bei dem verwendeten Klebemittel (PUR) zu beachten, dass während der Lagerung die Verbundprobe nicht in dauerndem und direktem Kontakt mit Wasser stehen darf. In solchen Fällen wurde an einigen Stellen der Verbundzone die in Bild 6.9 dargestellte Verseifung des Klebers beobachtet. Bei diesen Proben löste sich stellenweise die Glasfolie vom Zementstein ab. Der Verbund wurde dadurch an diesen Stellen aufgehoben. Damit waren dies Proben für eine Messung der Schwindverformungen nicht mehr geeignet.

Die Dauer der Präparation betrug etwa 15 Minuten. Da die Proben aufgrund ihrer filigranen Geometrie auch in dieser kurzen Zeit eine nennenswerte Menge an Feuchtigkeit abgeben können, wurde eine stete Befeuchtung während dieser Phase vorgesehen. Dies konnte relativ einfach mit Hilfe eines wassergetränkten Tuches durchgeführt werden. Ansonsten bestand die Gefahr, dass ein Teil der zu messenden Schwindverformungen bereits in dieser Phase einsetzte und folglich bei den anschließenden Messungen unberücksichtigt blieb.

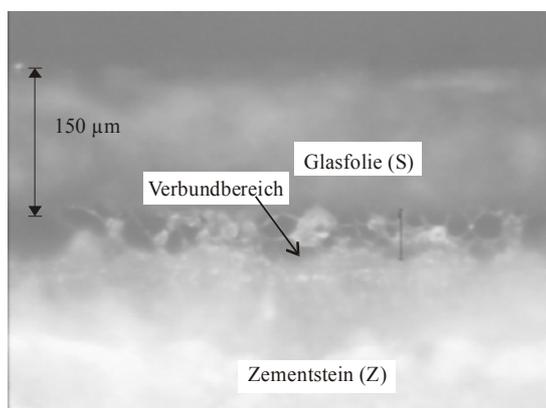


Bild 6.9: Lichtmikroskopische Aufnahme in der Grenzschicht nach permanentem Wasserkontakt

Mit der vorgestellten Herstellungs- und Präparationsmethode war es möglich, die benötigten Proben zielsicher zu gewinnen. In Bild 6.10 sind lichtmikroskopische Aufnahmen einer Verbundprobe mit den Schichten (S) und (Z) und deren Dicken (t_s) und (t_z) dargestellt. Auch bei einer 100-fachen Vergrößerung (rechts) konnten an mehreren untersuchten Proben (Bruchstücke) entlang der Grenzschicht keine nennenswerten Fehlstellen beobachtet werden.

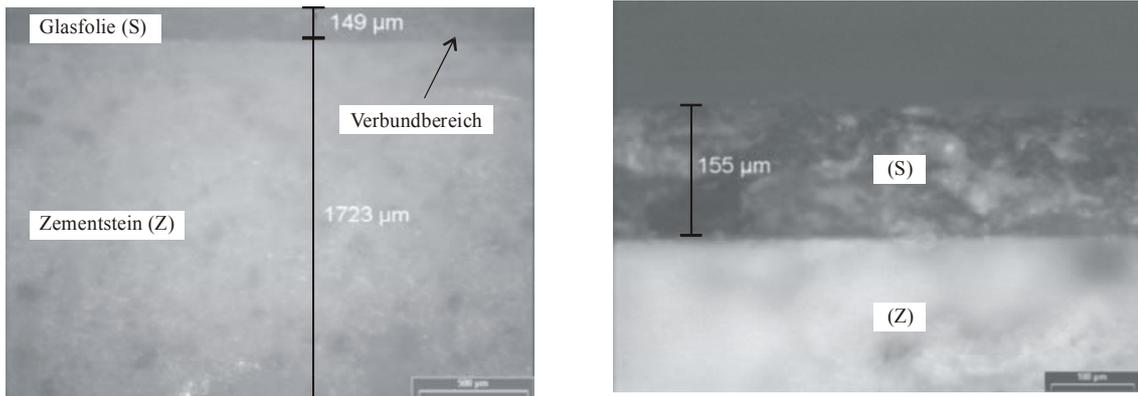


Bild 6.10: Lichtmikroskopische Aufnahmen des Querschnittes einer fertigen Verbundprobe
links: gesamte Querschnittshöhe rechts: Übergang Zementstein-Glasfolie

6.4 Komponenten des Messaufbaus

6.4.1 Laser und optische Komponenten

Der Aufbau der optischen Komponenten ist in Bild 6.11 schematisch dargestellt. Als Laserquelle wurde ein Helium-Neon-Laser mit einer Leistung von 2 mW verwendet. Der daraus erzeugte Laserstrahl besitzt einen Durchmesser von 0,8 mm, seine Wellenlänge beträgt 632,8 nm.

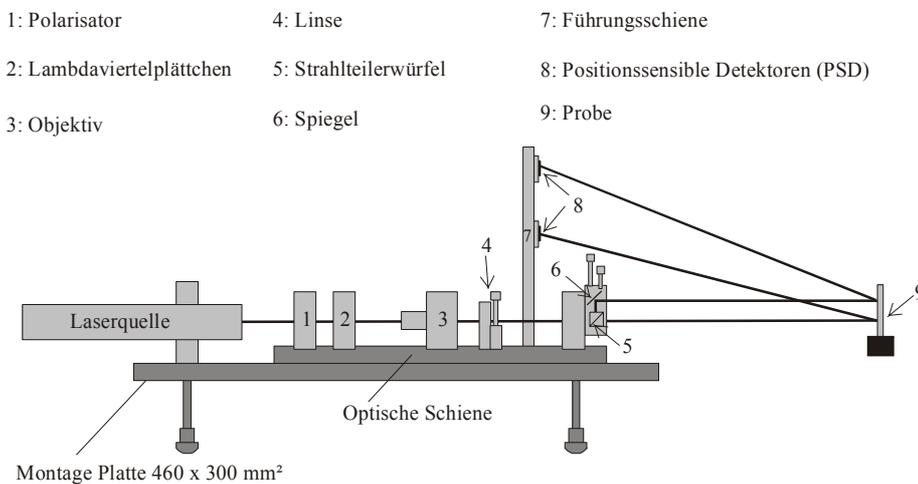


Bild 6.11: Aufbau der optischen Komponenten

Nach dem Verlassen der Laserquelle durchläuft der Strahl zunächst eine „optische Diode“, bestehend aus einem Polarisator (1) und einem Lambdaviertelplättchen (2) [68]. Diese besitzt die Aufgabe Rückreflektionen des Laserstrahles zu unterbinden. Die nächste optische Einheit dient zur Fokussierung des Laserstrahles auf die in einem bestimmten Abstand positionierte Probe und wird aus einem Objektiv (3) und einer Bikonvexlinse (4) gebildet (Teleskop) [68]. Vor dem Verlassen der optischen Schiene,

auf der sämtliche optische Komponenten angeordnet sind, wird der Laserstrahl durch einen Strahlteilerwürfel (5) in zwei Teilstrahlen zerlegt. Einer der Teilstrahlen behält die ursprüngliche Achse, wohingegen der andere zunächst senkrecht dazu verläuft und erst im Anschluss über einen Spiegel (6) parallel zum ersten Teilstrahl umgelenkt wird. Zur Reduktion von Streuungen an den optischen Komponenten sind diverse Hilfskonstruktionen schwarz eloxiert. In Bild 6.12 sind die verwendeten optischen Komponenten dargestellt. Die optische Schiene und eine Führungsschiene (7) für beide PSD (8) sind auf einer metallischen Untergrundplatte montiert. An dieser kann über angeordnete höhenverstellbare Gewindefüße der Laserstrahlengang auf die gegenüberliegende Messkammer grob ausgerichtet werden. Die beiden Laserstrahlen verlassen die optische Schiene und treffen auf die reflektierende Oberfläche der Probe. Von dort aus werden sie umgelenkt und treffen auf die PSD.

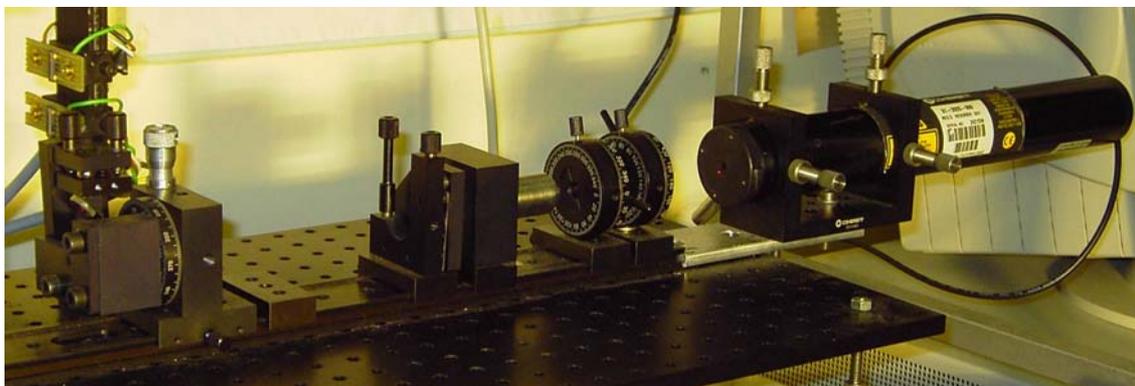


Bild 6.12: Optische Komponenten des Versuchsaufbaus

6.4.2 Positionssensible Detektoren

Kury, Zahl und Horn-von Hoegen greifen bei ihren Untersuchungen auf das Messprinzip SSIOD zurück [68] [69]. Sie weisen auf die besondere Notwendigkeit einer Kalibrierkurve vor und nach jeder Messaufgabe hin, wenn Vierquadranten-Dioden eingesetzt werden, wie es auch in den meisten Fällen typisch ist (Bild 6.1).

Jeder Teilstrahl trifft jeweils auf zwei benachbarte Quadranten auf (Q_1 / Q_2 und Q_3 / Q_4) und wird über deren Grenzlinie im Ausgangszustand wiederum in zwei gleich große Laserteilflächen aufgeteilt (Bild 6.13). Die Größe der laserbedeckten Teilfläche ist, unter Annahme einer gleichmäßigen Intensitätsverteilung des Ausgangsstrahles, proportional zum erzeugten elektrischen Strom (I) im betreffenden Quadranten. In dem in Bild 6.13 dargestellten Beispiel verschieben sich beide Laserpunkte im verformten Zustand um die selbe Strecke Δx nach rechts. Die messbare Stromstärke nimmt daher in den zur Verschiebung hin gerichteten Quadranten Q_2 und Q_4 zu, wohingegen sie in den anderen Quadranten Q_1 und Q_3 abnimmt.

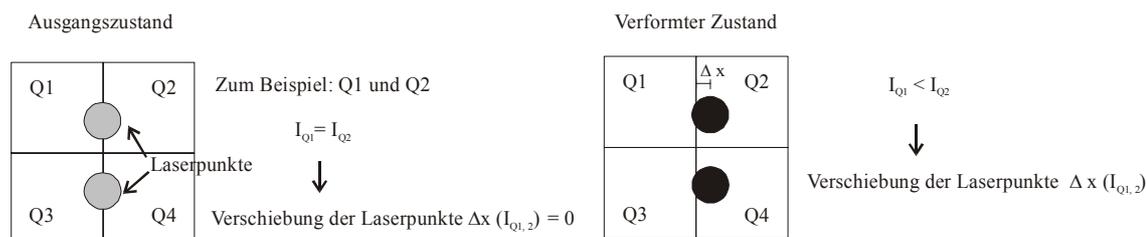


Bild 6.13: Schematische Darstellung: Vierquadranten Diode (Detektor) und prinzipielle Funktionsweise

Das Messsignal hängt u.a. von der Form und Intensität des auf den Detektor auftreffenden Laserstrahls ab. Durch Singularitäten der Probenoberfläche und Ungleichmäßigkeiten im Laserstrahl können diese Einflussgrößen weiterhin für beide Teilstrahlen unterschiedlich ausfallen. Daher ist eine Kalibrierung von Vierquadranten-Dioden unverzichtbar. Die o.g. Autoren schlagen für die Kalibrierung des beschriebenen Detektors vor, einen feinstufigen Schrittmotor ($\Delta x = 0,0488 \mu\text{m}$ pro Schritt) zu verwenden, der allein die Position des Detektors manipuliert. Als Ergebnis erhält man eine linearisierte Beziehung zwischen Positionsänderung des Laserpunktes auf der Diode und zugehörigem Ausgangssignal des Messverstärkers, die jedoch nur für kleine Positionsänderungen Gültigkeit besitzt.

Die o.g. Kalibrierung des Detektors vor und nach jedem Feuchteschritt und die Voreinstellung der Laserstrahlen in die Ausgangssituation (Bild 6.13) sind für Schwindmessungen sehr aufwendig. Eine überschlägige Berechnung der zu erwartenden Verschiebung des Laserpunkts beträgt für die in Bild 6.17 gewählte Anordnung im Mittel etwa $1000 \mu\text{m}$ je 1 % Feuchtigkeitsänderung. Wie in Bild 6.13 erkennbar ist, wird der Messbereich vom Durchmesser des Laserpunkts vorgegeben. Der Messbereich der Dioden beträgt ca. $\pm 30 \mu\text{m}$ [69]. Um die Verformungen des Zementsteins aus der o.g. Feuchtigkeitsänderung messen zu können, müsste der Abstand zwischen Probenoberfläche und Detektor deutlich reduziert werden (Bild 6.11), was jedoch gleichzeitig eine starke Abnahme der Messgenauigkeit zur Folge hätte. Gerade die zunehmende geometrische Vergrößerung der kleinen Probenverformungen mit größer werdendem Abstand zwischen Probe und Diode, zeichnet die Leistungsfähigkeit des Messprinzips aus. Des Weiteren kann ein Laserpunkt während einer Messung in die für den zweiten Strahl vorgesehenen Quadranten wandern und somit das Ergebnis verfälschen.

Unter Berücksichtigung der o.g. Nachteile von Vierquadranten-Dioden wurde an dieser Stelle eine Modifikation von SSIOD eingeführt, die den Einsatz dieses Messprinzips in Kombination mit den entwickelten Verbundproben (Kapitel 6.3) zur Bestimmung der Schwinddehnungen von Zementstein ermöglichte. Die Vierquadranten-Diode wurde durch eindimensionale positionssensible Detektoren (PSD) ersetzt [82]. Ein eindimensionaler PSD besteht aus einer monolithischen PIN-Diode mit einem konstanten Oberflächenwiderstand in einer Dimensionsrichtung. PSD erlauben eine kontinuierliche Positionsbestimmung eines Laserpunkts entlang einer Achse. Aufbau und Funktionsweise sind in Bild 6.14 schematisch dargestellt.

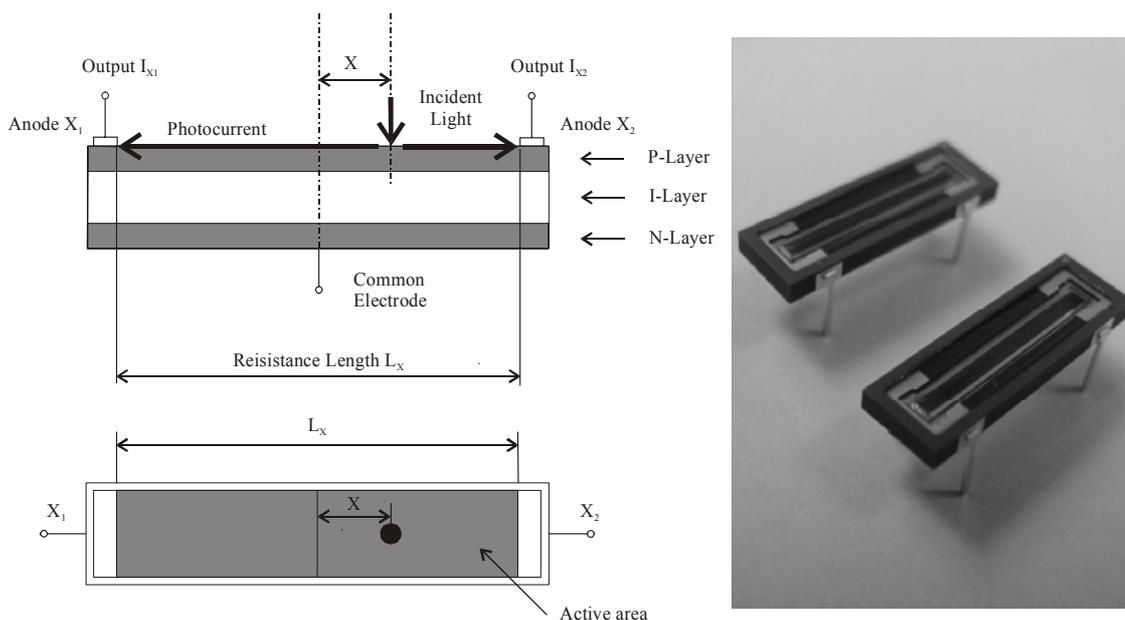


Bild 6.14: Aufbau und Funktionsweise eines eindimensionalen positionssensiblen Detektors (PSD)

Ein auf das aktive Feld auftreffender Laserpunkt erzeugt einen Photostrom, der in Richtung der angeordneten elektrischen Kontakte (Anoden X_1 und X_2) abfließt. In Abhängigkeit von der aktuellen Position des Laserpunkts wird der Photostrom auf die elektrischen Kontakte anteilmäßig aufgeteilt (I_{X1} , I_{X2}). Der auf einen Kontakt anfallende Anteil verhält sich dabei umgekehrt proportional zu dessen Abstand zum Laserpunkt. Der Mittelpunkt der aktiven Länge (L_X) wird für die Positionsangabe als Referenzpunkt verwendet. Als Messergebnis wird demnach der Abstand x zwischen Referenzpunkt und Zentrum des Laserpunkts angegeben. Die Position ermittelt man durch die Verhältnisse der Stromstärken I_{X1} und I_{X2} der zwei gegenüberliegenden Kontakte. Durch Normierung auf den erzeugten Gesamtstrom wird die Position unabhängig von Größe und Intensität des einfallenden Laserstrahls bestimmt.

Die Position ergibt sich aus:

$$\text{Laserpunktposition: } x = \frac{L_X}{2} \cdot \frac{I_{X2} - I_{X1}}{I_{X1} + I_{X2}} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

L_X : aktive Länge

I_X : Photostrom

Die gewählten PSD besitzen eine aktive Messlänge von $\pm 6,0$ mm. Um die Positionsänderungen infolge der aufeinander folgenden Feuchtestufen der Probe zu erfassen, wurden die PSD auf verfahrbare Schlitten angeordnet, die unabhängig von einander entlang einer Führungsschiene (Bild 6.11, (7)) an beliebiger Position fixiert werden konnten (Bild 6.17). Näherte sich die Position eines Laserstrahls dem Ende der aktiven Messlänge des zugehörigen PSD an, so konnte dessen Schlitten vor der Umstellung auf die nächste Feuchtestufe definiert umpositioniert und fixiert werden.

Im Gegensatz zu den Vierquadranten-Dioden benötigt man für einen PSD lediglich einen einzigen Kalibriervorgang, bei dem die Beziehung zwischen Messsignal und absoluter Position des Laserpunktzentrums bestimmt wird. Diese können für alle mit diesem PSD durchgeführten Messungen angesetzt werden. Die Kalibrierung der verwendeten PSD erfolgt mit Hilfe einer Mikrometerschraube. Der PSD wird dabei über diese um eine definierte Strecke bewegt und das daraus folgende Messsignal aufgezeichnet. Die Position der Laserquelle bleibt dabei unverändert. In Bild 6.15 ist eine typische Kalibrierkurve für einen eindimensionalen PSD dargestellt, aus der die sich über den gesamten Messbereich erstreckende hohe Linearität ersichtlich ist.

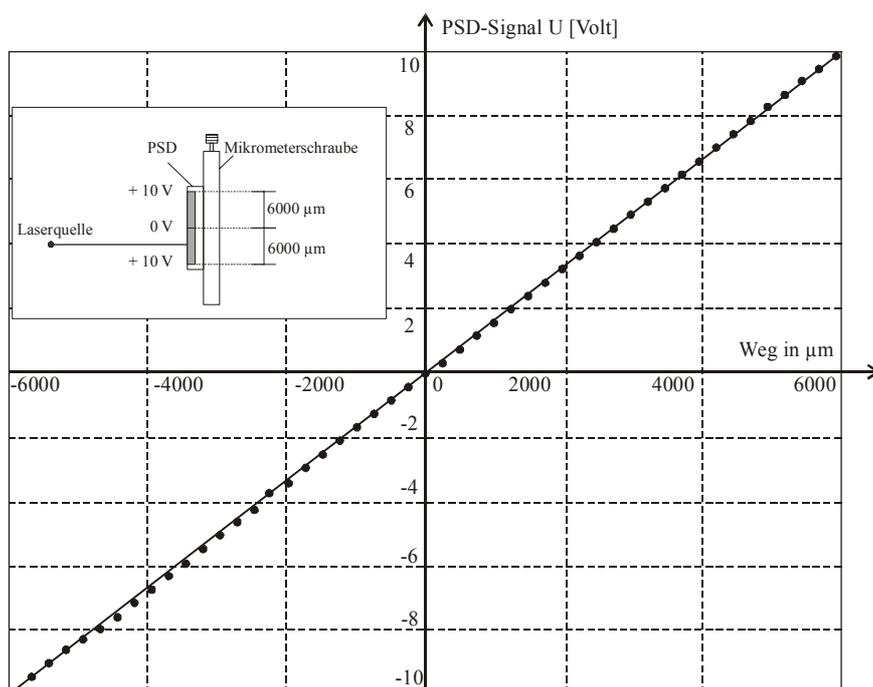


Bild 6.15: Kalibrierkurve eines eindimensionalen PSD mit einer Messlänge von $\pm 6,0$ mm

6.4.3 Messkammer und Feuchtgenerator

Die Probenkammer wurde aus miteinander dicht verklebten Acrylglasplatten hergestellt. Lediglich bei dem Deckel wurde eine verschraubte Verbindung vorgesehen, um den Ein- und Ausbau der Proben zu ermöglichen. Der abnehmbare Deckel ist zusätzlich mit einem Dichtungsband versehen. Der Messraum ist auf einem Stahltisch mit höhenverstellbaren Füßen montiert (Bild 6.16).

Im Auftreffbereich der Laserstrahlen auf die Frontfläche der Messkammer wurde eine Aussparung vorgesehen. Anstelle des Acrylglases wurde an dieser Stelle eine Glasscheibe (Dicke 1,0 mm) eingebaut. Damit konnte der Durchgang der Laserstrahlen in und aus der Messkammer ungestört und ohne nennenswerte Intensitätsverluste verlaufen.

Innerhalb der Messkammer wurde ein Probenhalter auf einer fest montierten Trägerplatte angeordnet. Der Probenhalter diente in erster Linie zum Fixieren der Probe. Dieser verfügte jedoch auch über einen Kippmechanismus, so dass die von der Probenoberfläche reflektierten Laserstrahlen in vertikaler Richtung auf die Ausgangsposition der gegenüber liegenden PSD ausgerichtet werden konnten (Bild 6.17). Für die horizontale Ausrichtung konnte das unterhalb des Messraums angeordnete Gelenk verwendet werden (Bild 6.16).

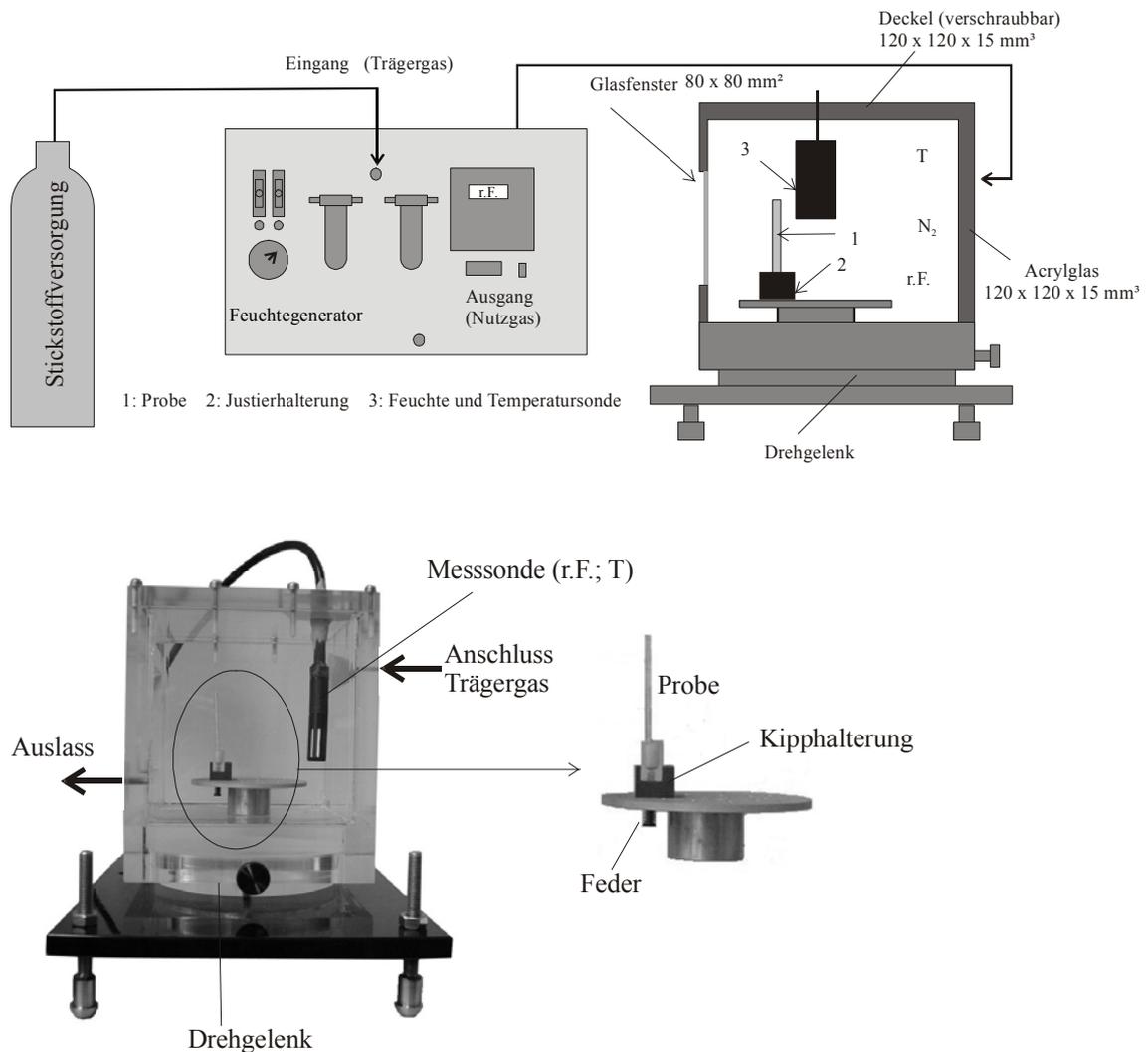


Bild 6.16: Messkammer, Feuchtegenerator und Probenhalterung

Um die Messungen nicht durch ein häufiges Öffnen der Probenkammer vor jeder Feuchtestufe zu stören, was bei Verwendung von Salzlösung der Fall wäre (Kapitel 5.3.3), wurde die Feuchtigkeit innerhalb des Messraums über einen externen Feuchtegenerator eingestellt (Bild 6.16). Für die Zuführung des definiert befeuchteten Trägergases aus dem Feuchtegenerator in die Messkammer wurde an einer Seitenfläche ein entsprechender Anschluss angeordnet. Da der Gasstrom aus dem Feuchtegenerator kontinuierlich anstand, war auf der gegenüberliegenden Seitenfläche ein zweiter

Anschluss angebracht worden, aus dem das aus der Messkammer verdrängte Gas hinaus gelangen konnte.

Da im Rahmen dieser Arbeit nur das Trocknungsschwinden von Zementstein erfasst werden soll, das CO₂ der Luft bei den filigranen Proben aber ein starkes Carbonatisierungsschwinden auslösen würde (Kapitel 3.3.3), wurde als Trägergas Stickstoff (N₂) verwendet.

Die aktuellen Werte für Feuchtigkeit und Temperatur wurden während einer Messung kontinuierlich mit Hilfe einer Messsonde, die innerhalb der Messkammer installiert war, aufgezeichnet. Der Feuchtegenerator ermöglichte eine regelbare Befeuchtung des Gases über einen Feuchteausaustausch zwischen zwei Gasphasen durch eine rohrförmige Nafion-Membrane. Mit dem Feuchtegenerator konnte das Trägergas sowohl trocknen als auch bis annähernd 100 % r.F. befeuchtet werden. Eine Temperierung des Gases wurde dabei ebenfalls durchgeführt. Nach einer Umstellung der Feuchtigkeit am Generator wurde der Gasstrom durch einen Nebenauslass geführt, bis sich die Feuchtigkeit im Gleichgewicht befand. Erst danach wurde die Verbindung zwischen Generatorausgang und Messkammereingang freigegeben.

6.4.4 Geometrische Anordnung des Versuchsaufbaus

Der entwickelte Messaufbau kann aufgrund des angewendeten berührungslosen Messprinzips als in zwei von einander unabhängige Teile getrennt betrachtet werden. Der erste Teil umfasst die optischen Komponenten zur Erzeugung der benötigten Laserstrahlen, die dahinter geschaltete Elektronik sowie die zwischen diesen beiden interagierenden Detektoren. Der zweite Teil des Messaufbaus umfasst die Messkammer inklusive der Probenhalterung und dem verwendeten Feuchtegenerator. Der gemeinsame Wägetisch stellt die einzige berührende Verbindung zwischen den beiden Teilen im gesamten Messaufbau dar.

In Bild 6.17 ist der auf Basis des Messprinzips SSIOD entwickelte Messaufbau schematisch dargestellt. Sämtliche optische Komponenten wurden auf einer Trägerplatte montiert. Diese wurde um einen kleinen Winkel in der Horizontalen versetzt und gegenüber der Messkammer angeordnet. Der in die Berechnung des Krümmungsradius eingehende horizontale Abstand zwischen den PSD und der Probenoberfläche wurde zu $L = 450$ mm festgelegt. Je größer der Betrag von L gewählt wird, desto größer wird die damit erreichbare geometrische Vergrößerung der Laserstrahlenbewegung. Damit nimmt gleichzeitig der Betrag der kleinsten detektierbaren Probenbewegung ab (höhere Messauflösung). Als weitere geometrische Größe ging bei der o.g. Berechnung der gegenseitige Abstand der beiden Teilstrahlen ein, der zu $a = 22$ mm gewählt wurde. Bei einer freien Probenlänge von 40 mm konnte damit einerseits der geforderte Mindestabstand (2-fache Probendicke = 3,4 mm) zur Einspannstelle eingehalten werden und andererseits verbleibt ein ausreichender Abstand zum freien Probenende. Am freien Ende der Probe ist die Auslenkung der Laserstrahlen am größten, was zunächst sehr positiv ist. Damit wächst jedoch auch die Gefahr, dass die Umlenkung des oberen Laserstrahls

so groß wird, dass die aktive Länge des oberen PSD bei der gewählten Geometrie auch bei kleinen Feuchteschritten schnell verlassen wird. Die Folge wäre, dass weitere Verschiebungen nicht mehr detektiert werden können. Die gleichen Verhältnisse gelten auch bei einem zu hoch gewählten Betrag für den Abstand L . Die verwendeten PSD verfügen über eine aktive Messlänge von $L_X = 12$ mm. Als Gegenmaßnahme kann die Frequenz, mit der die Position der PSD entlang der Führungsschiene korrigiert wird, erhöht werden.

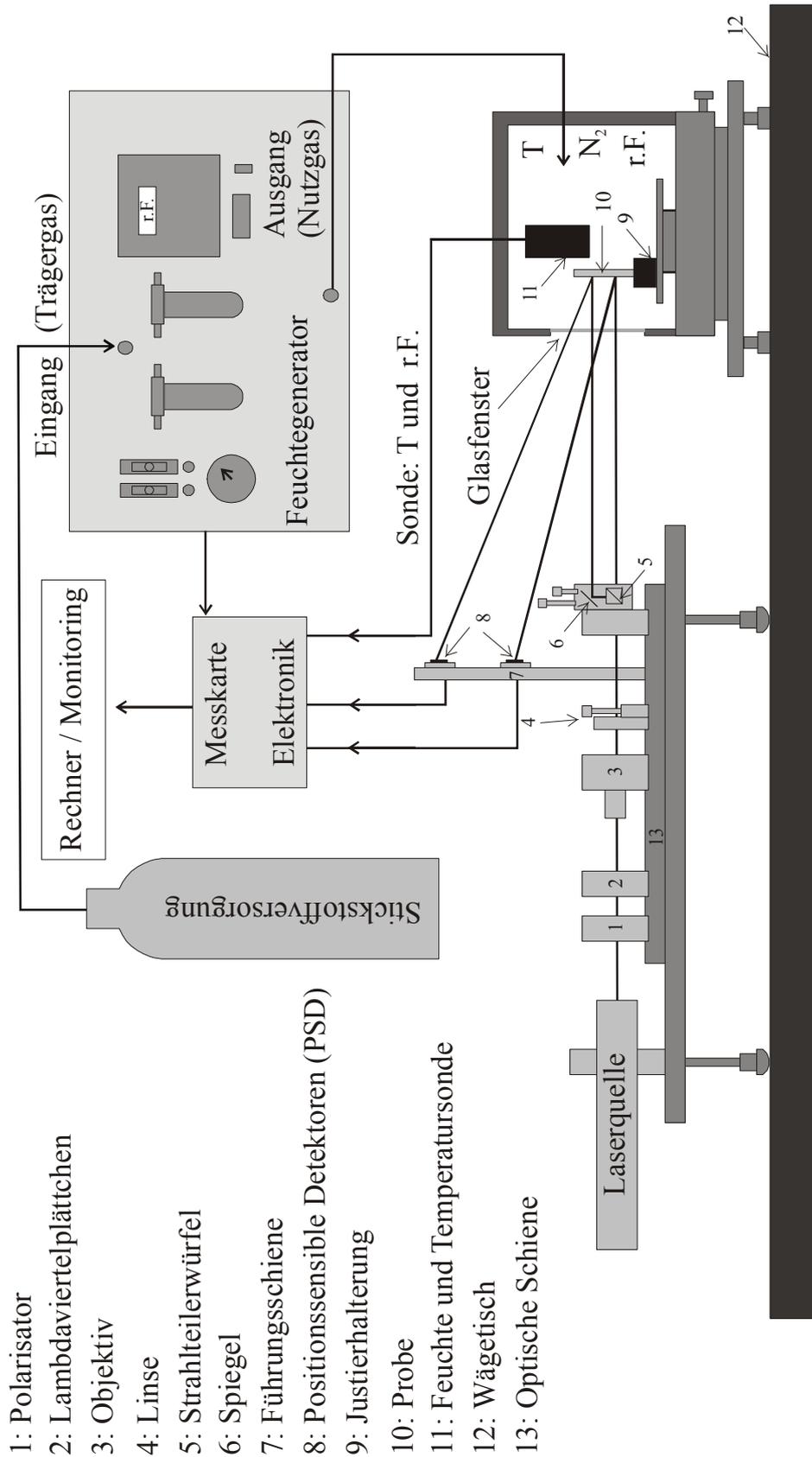


Bild 6.17: Gesamter Messaufbau

6.5 Auswertemethode

6.5.1 Allgemein

Die nachfolgend hergeleitete Auswertemethode besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Rechenschritten. Im ersten Schritt werden die während einer Messung gewonnenen Daten dazu verwendet, den korrespondierenden Krümmungsradius der Probe zu bestimmen. Dieser hängt von der gewählten Geometrie des Versuchsaufbaus und von den gemessenen Positionsänderungen der beiden Laserstrahlen ab. Der darauf folgende Rechenschritt ergibt in Abhängigkeit vom ermittelten Krümmungsradius, der geometrischen und elastischen Eigenschaften der untersuchten Verbundprobe die Schwinddehnung des Zementsteins. Die bei der Berechnung angesetzten Annahmen und Vereinfachungen werden an den entsprechenden Stellen erläutert.

6.5.2 Experimentelle Ermittlung des Krümmungsradius

Wird die Feuchtigkeit innerhalb der Probenkammer verändert, stellt sich in der Verbundprobe eine Verkrümmung mit einem Krümmungsradius R ein (Kapitel 6.3). Der Krümmungsradius wird dabei über weite Bereiche der Probenlänge als konstant angenommen (Kapitel 6.3.4). Die Verkrümmung der Probe setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Der erste Anteil basiert auf einer Behinderung der Längenänderung des Zementsteins durch die nicht-schwindende Glasfolie. Der zweite Anteil beruht auf dem zeitweisen Aufbau eines Feuchtegradienten in der Zementsteinschicht. Dieser wird durch die einseitige Versiegelung der Zementsteinschicht mit einer Glasfolie verstärkt. Der Einfluss des Feuchtegradienten macht sich besonders zu Beginn einer neuen Feuchtestufe bemerkbar, da zu diesem Zeitpunkt die größte Feuchtedifferenz zwischen versiegelter und freier Oberfläche vorhanden ist. Sobald sich ein Gleichgewichtszustand im Probenquerschnitt einstellt (Ausgleichsfeuchte), gehen der Feuchtegradient und damit auch sein Verformungsanteile zurück. Für die Bestimmung des Krümmungsradius im Gleichgewichtszustand ist somit der erstgenannte Anteil allein maßgebend.

Die auf die Probenoberfläche ausgerichteten und von dort aus reflektierten Laserstrahlen wandern entsprechend der Krümmungsradienänderung entlang der aktiven Länge der PSD, bis ein Gleichgewichtszustand mit der Umgebungsfeuchtigkeit erreicht wird. Die Positionsänderungen entlang der PSD sind proportional zur Neigungsänderung der beiden Laserstrahlen, mit denen der gesuchte Krümmungsradius berechnet werden kann. In Bild 6.18 sind die geometrischen Zusammenhänge dargestellt.

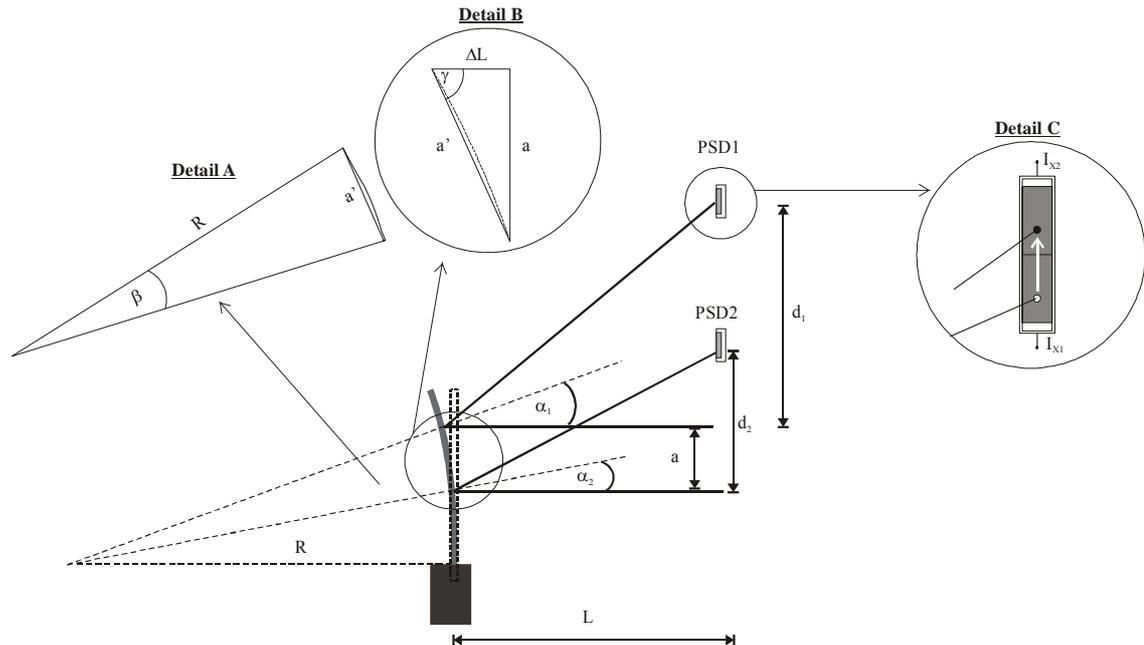


Bild 6.18: Geometrische Zusammenhänge für die Bestimmung des Krümmungsradius R

Der Krümmungsradius R lässt sich entsprechend dem Detail A aus Bild 6.18 mit Gleichung (Gl. 6.2) ausdrücken [13].

$$R = \frac{a'}{2 \cdot \sin \frac{\beta}{2}} \quad (\text{Gl. 6.2})$$

R : Krümmungsradius a' : Länge der Sehne β : Zentriwinkel

Der Zentriwinkel β ergibt sich als Differenz zwischen den Neigungswinkeln α_1 und α_2 der beiden Kreisschenkel zur Horizontalen (Gl. 6.3). Die Kreisschenkel stehen an den Auftreffstellen der Laserstrahlen senkrecht zur Probenoberfläche. Die Neigungswinkel (α_i) stellen Differenzbeträge aus den Neigungen zwischen zwei Gleichgewichtszuständen dar.

$$\beta = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (\text{Gl. 6.3})$$

α_i : Neigungswinkel von Laserstrahl i

Die Länge der Sehne a' kann entsprechend dem Detail B aus Bild 6.18 zu

$$a' = \frac{a}{\sin \gamma} \quad (\text{Gl. 6.4})$$

a : Gegenseitiger Abstand der Laserstrahlen γ : Winkel (vgl. Bild 6.18)

berechnet werden.

Der Abstand der beiden Laserstrahlen zueinander (a) wird bei der Justierung des Messaufbaus eingestellt und während der gesamten Messung konstant gehalten. Der Winkel γ kann mit Hilfe der Gleichung (Gl. 6.5) berechnet werden (vgl. Bild 6.18, Detail B).

$$\gamma = 90 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad (\text{Gl. 6.5})$$

α_i : Winkel (vgl. Bild 6.18)

Setzt man die aus den Gleichungen (Gl. 6.3) bis (Gl. 6.5) gewonnenen Informationen in Gleichung (Gl. 6.2) ein, so lässt sich die zwischen den Strahlenneigungen (α_1, α_2) und dem gesuchten Krümmungsradius R bestehende Korrelation darstellen (Gl. 6.6).

$$R = \frac{a}{2} \cdot \frac{l}{\sin\left(90 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right)} \quad (\text{Gl. 6.6})$$

Mit Hilfe von goniometrischen Beziehungen lässt sich Gleichung (Gl. 6.6) wie folgt vereinfachen:

$$R = \frac{a}{2} \cdot \frac{l}{\cos\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right)} = \frac{a}{\sin(\alpha_1) - \sin(\alpha_2)} \quad (\text{Gl. 6.7})$$

Die Strahlenneigungen α_1 und α_2 lassen sich nur durch eine entsprechende Messung erfassen. Eine Kopplung der geometrischen Verhältnisse mit der Messung der Positionsänderungen der Laserstrahlen entlang der PSD-Flächen (vgl. Bild 6.18, Detail C) ist durch die folgenden Gleichungen gegeben:

$$\tan \alpha_1 = \frac{l}{2} \cdot \frac{d_1}{L} \quad d_i: \text{Positionsänderung des Lasersstrahls } i \quad (\text{Gl. 6.8})$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{l}{2} \cdot \frac{d_2}{L} \quad L: \text{Abstand zwischen Probe und PSD} \quad (\text{Gl. 6.9})$$

Für große Krümmungsradien bzw. für kleine Winkel können höhere Potenzen in der Reihenentwicklung der trigonometrischen Funktionen vernachlässigt werden [13]. Damit können Gleichungen (Gl. 6.8) und (Gl. 6.9) wie folgt vereinfacht werden:

$$\alpha_1 = \frac{d_1}{2 \cdot L} \text{ und } \alpha_2 = \frac{d_2}{2 \cdot L} \quad (\text{Gl. 6.10})$$

Wird abschließend Gleichung (Gl. 6.10) in Gleichung (Gl. 6.7) eingesetzt, erhält man für die Berechnung des Krümmungsradius folgende Näherungsformel:

$$R = \frac{2 \cdot L \cdot a}{d_1 - d_2} \quad (\text{Gl. 6.11})$$

In Bild 6.19 ist ein Beispiel für einen typischen Verlauf der PSD-Signale dargestellt. Die Differenz der Messwerte vor und nach Einleitung einer neuen Feuchtestufe wird für jeden PSD getrennt erfasst. Mit Hilfe der jeweiligen Kalibrierkurve kann aus der Signaldifferenz der entsprechende Betrag für die Positionsänderung (d_1) und (d_2) des zugehörigen Laserstrahls ermittelt werden. Die Änderung der Laserposition d_1 ist dabei betragsmäßig stets größer als d_2 .

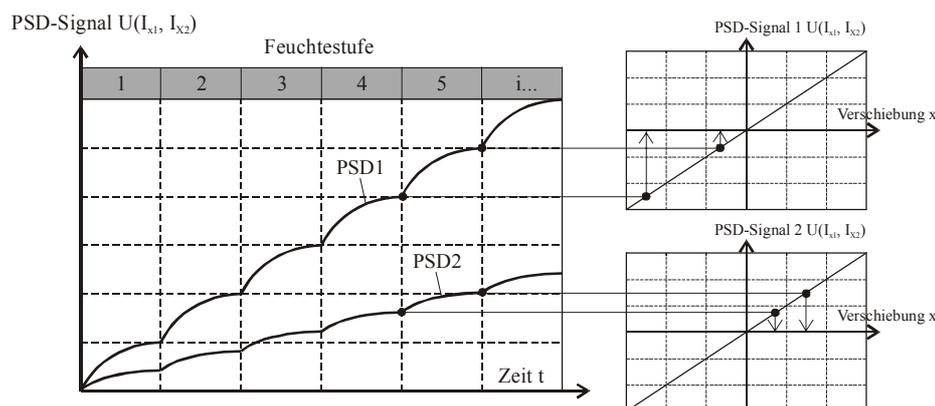


Bild 6.19: Beispiel für einen Verlauf der Messsignale von PSD1 und PSD2 sowie deren Kalibrierkurven

Das Vorzeichen von R ergibt sich durch die Bewegungsrichtung der Laserstrahlen auf den PSD. Nimmt die Feuchtigkeit innerhalb der Messkammer beispielsweise ab, so bewegen sich beide Strahlen, wie in Bild 6.18 (Detail C) dargestellt ist, nach oben. Dies entspricht nach Bild 6.19 einer Bewegung in Richtung positiver Signalachse. Die Differenzbildung der Positionen am Anfang und am Ende einer Feuchtestufe ergibt für d_1 und d_2 jeweils ein negatives Vorzeichen. In Gleichung (Gl. 6.11) eingesetzt, erhält man damit für eine Schwindverformungen einen negativen Krümmungsradius. Liegen dagegen Quellverformungen vor, so kehrt sich dieses Verhältnis um und man erhält einen positiven Krümmungsradius.

Für einen Krümmungsradius von beispielsweise $R = 18.500$ mm, das entspricht für die Winkel α_1 bzw. α_2 einem Betrag von $1,36^\circ$ bzw. $0,02^\circ$, besteht zwischen der Näherungsformel und der exakten Berechnung ein minimaler und zu vernachlässigender Unterschied, der sich in der zweiten Nachkommastelle ausdrückt. Sogar bei einem Betrag von $R = 450$ mm, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit einen besonders kleinen Krümmungsradius darstellt, ist der o.g. Unterschied weiterhin sehr gering. Bei solch einer außerordentlich starken Verkrümmung der Verbundprobe nehmen die Beträge der beiden Winkel zwar deutlich zu ($\alpha_1 = 3,65^\circ$ und $\alpha_2 = 0,84^\circ$), schränken die Verwendung der Näherungsformel für aussagefähige Genauigkeiten jedoch nicht ein. Die Differenz der Krümmungsradien beträgt in diesem Fall $\Delta R = 1,3$ mm und bedeutet bei einem Krümmungsradius von $R = 450$ mm einen relativen Fehler von etwa $f_{\Delta R} = 0,3$ %.

In Gleichung (Gl. 6.11) ist weiterhin eine Vereinfachung hinsichtlich des Abstandes zwischen Probenoberfläche und PSD getroffen worden. Diese Größe (L) wird bei den Berechnungen als konstant angenommen, d.h. die zugehörige Längenänderung ΔL wird vernachlässigt (vg. Bild 6.18; Detail B). Die Längenänderung ΔL ist durch folgende geometrische Beziehung gegeben:

$$\tan(\gamma) = \frac{a}{\Delta L} \quad (\text{Gl. 6.12})$$

Bei dem o.g. Krümmungsradius von $R = 450$ mm ergibt sich rechnerisch ein ΔL von 0,86 mm. Bezogen auf die Ausgangslänge $L = 450$ mm erhält man einen relativen Fehler von lediglich $f_{\Delta L} = 0,20$ %.

Für die folgenden Berechnungen des Krümmungsradius wird demnach die o.g. Näherungsbeziehung (Gl. 6.11) verwendet .

6.5.3 Berechnung der Schwinddehnungen

Im folgenden Abschnitt wird eine Beziehung zwischen dem Krümmungsradius R und der korrespondierenden Schwinddehnung ε_h des Zementsteins hergeleitet, die für die Verkrümmung der Verbundprobe ursächlich verantwortlich ist. Der mathematische Ansatz basiert auf den bekannten Gleichungen, die bei einer thermisch-induzierten, querkraftfreien Biegung eines Bimetallstabes angesetzt werden [111]. Dazu werden folgende Annahmen getroffen:

- Es liegen nur vernachlässigbar kleine Verzerrungen quer zur Längsachse der Verbundprobe vor.
- Die Querschnittsabmessungen bleiben über die gesamte Probenlänge konstant.
- Es herrscht ein kraftschlüssiger Verbund zwischen der Schicht (S) und (Z).
- Es wird ein linear-elastisches Materialverhalten in beiden Schichten vorausgesetzt.

In Bild 6.20 sind die betrachtete Verbundprobe im Ausgangszustand und im verformten Zustand, der zugehörige Querschnitt und das gewählte Koordinatensystem abgebildet. Aus der Theorie der Balkenbiegung erhält man für die Dehnungsverteilung in Probenlängsachse in Abhängigkeit von der z -Koordinate folgende Beziehung:

$$\text{Dehnung: } \varepsilon_{xx}(z) = \frac{z}{R} \quad R: \text{ Krümmungsradius} \quad (\text{Gl. 6.13})$$

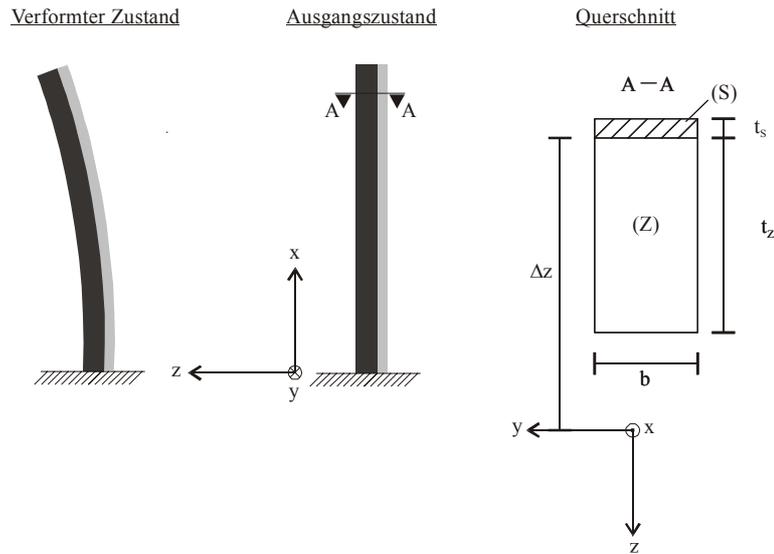


Bild 6.20: Betrachtete Verbundprobe mit zugehörigem Querschnitt und Koordinatensystem

Für die Dehnungsverteilung kann weiterhin die Beziehung:

$$\varepsilon_{xx}(z) = \frac{I}{E_i} \cdot \sigma_{xxi}(z) + \varepsilon_{h,i} \quad (\text{Gl. 6.14})$$

$\varepsilon_{h,i}$: Schwinddehnung der Schicht i

σ_{xxi} : Spannung aus Dehnungsbehinderung

E_i : E -Modul der Schicht i

angesetzt werden, so dass über $\varepsilon_{xx}(z)$ der Krümmungsradius R mit der gesuchten Schwinddehnung der Schicht Z ($\varepsilon_{h, z}$) in Beziehung gesetzt werden kann.

Im Gleichgewichtszustand ist die Summe der Normalkräfte und der Momente im Querschnitt gleich Null. Daraus lassen sich die folgende Gleichungen aufstellen:

$$\frac{I}{R} \cdot \sum_i E_i \cdot A_i \cdot z_{SAi} - \sum_i E_i \cdot A_i \cdot \varepsilon_{h,i} = 0 \quad \text{Gleichgewicht der Normalkräfte} \quad (\text{Gl. 6.15})$$

$$\frac{I}{R} \cdot \sum_i E_i \cdot I_{yyi} - \sum_i E_i \cdot A_i \cdot \varepsilon_{h,i} \cdot z_{SAi} = 0 \quad \text{Gleichgewicht der Momente}$$

$$A_i: \text{Fläche der Schicht } i \quad (\text{Gl. 6.16})$$

z_{SAi} : Teilflächenschwerpunkt der Schicht i

I_{yyi} : Teilflächenträgheitsmoment 2. Ordnung der Schicht i

Werden beide Gleichungen (Gl. 6.15) und (Gl. 6.16) nach $1/R$ umgeformt und gleichgesetzt, erhält man die Beziehung:

$$\frac{\sum_i E_i \cdot A_i \cdot \varepsilon_{h,i}}{\sum_i E_i \cdot A_i \cdot z_{SAi}} = \frac{\sum_i E_i \cdot A_i \cdot \varepsilon_{h,i} \cdot z_{SAi}}{\sum_i E_i \cdot I_{yyi}} \quad (\text{Gl. 6.17})$$

Löst man Gleichung (Gl. 6.17) auf, so erhält man eine Beziehung für die geometrische Konstante Δz , die ausschließlich von den Abmessungen und den E-Moduli der beteiligten Schichten abhängig ist (Gl. 6.18). Die Größe Δz gibt die Entfernung des Koordinatenursprungs zur Grenzschicht an (Bild 6.20). Diese wird für die Ermittlung der Flächenträgheitsmomente und der Lage der Teilflächenschwerpunkte benötigt. Wird berücksichtigt, dass der vorliegende Querschnitt aus zwei Schichten besteht und das hygri-sche Verhalten der Schicht (S) gleich Null gesetzt werden kann, erhält man für Δz folgende Berechnungsformel:

$$\Delta z = - \frac{3 \cdot t_s \cdot t_z + 4 \cdot t_s^2 + \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s}}{6 \cdot (t_s + t_z)} \quad (\text{Gl. 6.18})$$

Mit dieser Information und weiterem Umstellen und Auflösen der o.g. Gleichungen erhält man schließlich für die Berechnung der Schwinddehnung in der Schicht (Z) folgende Beziehung:

$$\varepsilon_{h,z} = \frac{4 \cdot (t_s + t_z)^2 - 2 \cdot t_s \cdot t_z + \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z \cdot t_z} + \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s}}{6 \cdot (t_s + t_z) \cdot R} \quad (\text{Gl. 6.19})$$

Dazu werden der zugehörige Krümmungsradius, die Dicken sowie E-Moduli der beiden Schichten in (Gl. 6.19) eingesetzt. Da der E-Modul von der Zementsteinzusammensetzung abhängig ist, muss dieser experimentell bestimmt werden. Der dazu konzipierte Messaufbau wird im folgenden erläutert.

6.5.4 Bestimmung des E-Moduls

Der Messaufbau für die Bestimmung des E-Moduls für Zementstein ist in Bild 6.21 dargestellt. Wird der abgebildete Einfeldträger mit einer Einzellast in Feldmitte belastet, so stellt sich unter der Belastung eine Durchbiegung (w) ein. Diese wurde mit einem induktiven Wegaufnehmer (WA) erfasst. Die Last wurde durch eine definierte Masse von 45 g eingestellt, die über eine Kunststoffschur ($\varnothing = 0,30 \text{ mm}$) eingeleitet wurde. Der verwendete WA (Digital Probe DP/5/S; Solartron Metrology) verfügte über eine Genauigkeit von $\pm 1,0 \mu\text{m}$. Durch die Federeindrückung des WA-Tasters wirkte vor Lastaufbringung bereits eine Rückstellkraft auf die Probe. Diese lag bei max. 5 % der planmäßigen Last. Bei der Bestimmung des E-Moduls hatte dieser Aspekt jedoch keinen Einfluss, da die Durchbiegung in Feldmitte als Differenzbetrag aus der Verformungsmessung vor und nach der Lastaufbringung definiert wurde.

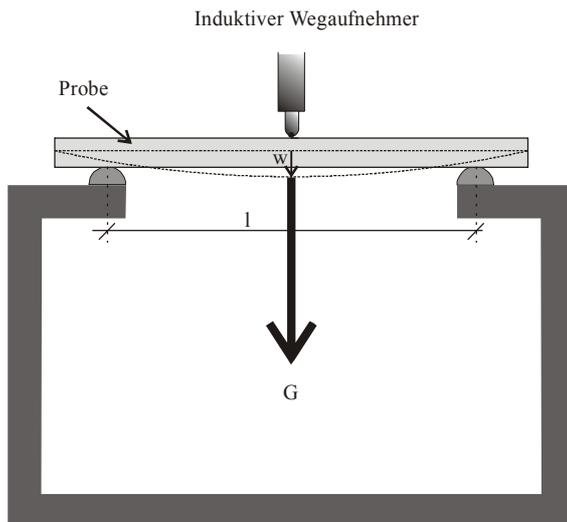


Bild 6.21: Messaufbau zur Bestimmung des E-Moduls von Zementstein

Mit der Kenntnis des statischen Systems, dem Betrag und Position der Last sowie der Querschnittsabmessungen konnte aus der gemessenen Durchbiegung der E-Modul berechnet werden. Dies wurde mit Hilfe einer einfachen Beziehung aus der Balkentheorie durchgeführt (Gl. 6.20).

$$E(w) = \frac{G \cdot l^3}{48 \cdot w} \quad (\text{Gl. 6.20})$$

G : Gewichtskraft

l : Stützweite

w = gemessene Durchbiegung in Feldmitte

Die parallel zu den Schwindproben hier untersuchten Proben besaßen die gleichen Abmessungen wie die o.g. filigranen Zementstreifen. Dies hatte den Vorteil, dass Einflüsse aus Probekörpergeometrie bei der Übertragung der Messergebnisse auf die Schwindproben ausgeschlossen werden konnten. Für einen w/z -Wert von 0,50 bzw. 0,60 ergaben die Messungen einen E-Modul von 15.000 N/mm² bzw. 13.200 N/mm².

6.5.5 Einfluss der Klebschicht

Bei der Berechnung der Schwinddehnungen wurde vereinfachend von einem zweiseichtigen Aufbau der Verbundprobe ausgegangen. Tatsächlich befand sich zwischen dem Zementstein und der Glasfolie jedoch eine Klebschicht. Bei der geringen Beanspruchung der Grenzschicht konnte die Nachgiebigkeit des PUR-Klebers vernachlässigt werden, so dass von einem kraftschlüssigen Verbund ausgegangen werden konnte.

Die Dicke der Klebschicht variierte über die Probenlänge, blieb jedoch betragsmäßig deutlich niedriger als die übrigen Schichtdicken. In Bild 6.22 ist eine lichtmikroskopische Aufnahme einer solchen Grenzfläche abgebildet. Die maximale Schichtdicke des Klebers konnte auf etwa 20 μm begrenzt werden. Die Klebschichtdicke konnte im Vergleich zu den Schichtdicken des Zementstreifens (1.700 μm) und der Glasfolie

(150 μm) vernachlässigt und somit der Querschnitt insgesamt auf zwei Schichten vereinfacht werden.

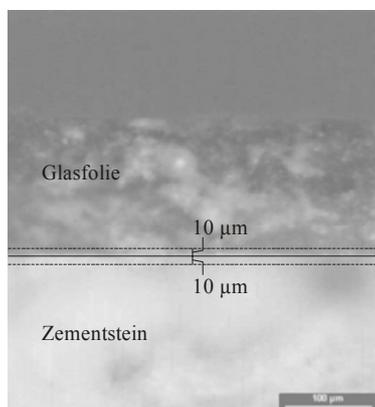


Bild 6.22: Lichtmikroskopische Aufnahme zur Eingrenzung der Klebeschichtdicke

Der Einfluss dieser Vereinfachung auf die Ergebnisse der Schwinddehnungen kann experimentell nicht erfasst werden, da ohne eine Klebung der notwendige Verbund zwischen Zementstein und Glasfolie fehlt. Mit Hilfe des Finite Elemente (FE)-Programms *FEMAS – Lyra 5.0*) wurde in einer Vorstudie der Verbundquerschnitt mit einem dreischichtigen Aufbau, bestehend aus dem Zementstreifen, der Glasfolie und der Klebeschicht, diskretisiert. Mit diesem wurden Berechnungen unter Variation von Dicke (t_{Kleber}) und E-Modul (E_{Kleber}) der Klebeschicht durchgeführt und unter sonst identischen Randbedingungen mit Ergebnissen für den oben genannten zweischichtigen Querschnitt verglichen. Für die Berechnung wurde die freie Längenänderung des Zementsteins vorgegeben und daraus die Verformungsfigur der gesamten Probe bestimmt. Als Einwirkung wurde aus praktischen Gründen eine gleichmäßige Temperaturänderung des Querschnitts eingestellt. Dem Zementstein wurde ein theoretischer Wärmeausdehnungskoeffizient zugeordnet, der mit der aufgetragenen Temperatureinwirkung eine Einheitsdehnung des Zementsteins von -1 mm/m ergab. Für die Glasfolie und die Klebeschicht wurde ein theoretischer Wärmeausdehnungskoeffizient mit dem Betrag Null zugeordnet.

An den berechneten Kopfauslenkungen gemessen, resultierten aus den Berechnungsergebnissen unter Variation von E_{Kleber} zwischen 2.500 und 10.000 N/mm^2 , nur geringfügige Differenzen (Bild 6.23). Auf die unter Annahme eines 2-Schichtigen Aufbaus der Probe ($E_{\text{Kleber}} = 0$) berechnete Kopfauslenkung bezogen, ergaben sich für die Grenzwerte $E_{\text{Kleber}} = 2.500 \text{ N/mm}^2$ bzw. $E_{\text{Kleber}} = 10.000 \text{ N/mm}^2$ relative Fehler von lediglich $1,5 \%$ bzw. $4,5 \%$ (Bild 6.23, links). Eine Variation der Schichtdicke des Klebers bis $t_{\text{Kleber}} = 0,1 \text{ mm}$ zeigte in der Tendenz die gleichen Verhältnisse (Bild 6.23, mitte). Schließlich wurde zur Überprüfung der hergeleiteten Auswertemethode (Kapitel 6.5.3) ein Vergleich mit der FEM-Berechnung durchgeführt. Es ergaben sich mit beiden

Berechnungsverfahren identische Ergebnisse für die gesamte Verformungsfigur (Bild 6.23, rechts).

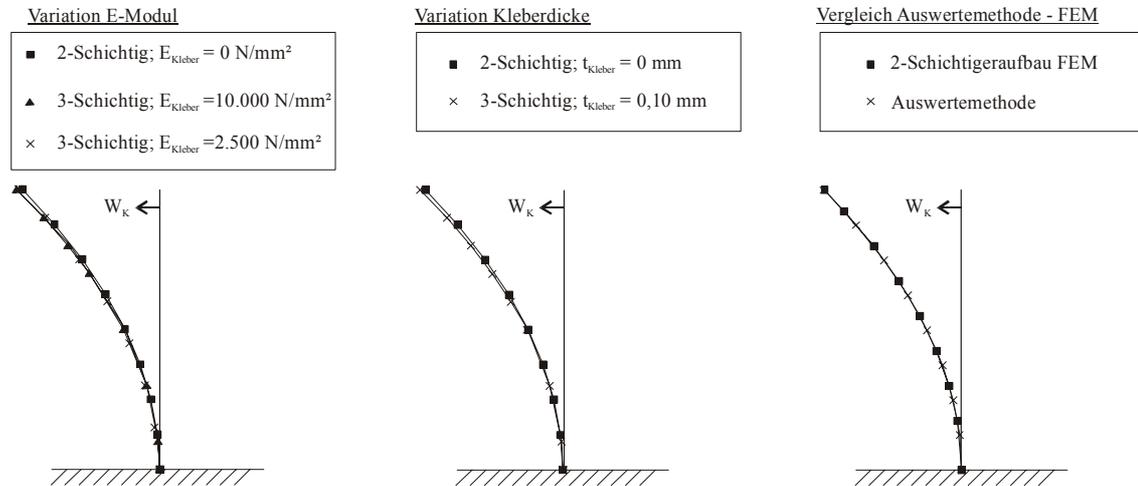


Bild 6.23: Ergebnisse der FE-Berechnung unter Variation von E-Modul und Dicke der Klebeschicht

6.6 Geometrischer Vergrößerungsfaktor

Als eine Kenngröße für die Leistungsfähigkeit des entwickelten Messaufbaus kann der geometrische Vergrößerungsfaktor (η) angegeben werden. Dieser drückt das Verhältnis zwischen der Längenänderung des Zementsteins Δl infolge Schwinden oder Quellen und den korrespondierenden Positionsänderungen der Laserstrahlen an den zugehörigen PSD d_1 und d_2 bzw. deren Differenz Δd aus (Gl. 6.21).

$$\Delta d = \Delta l \cdot \eta \quad (\text{Gl. 6.21})$$

$$\Delta d = d_1 - d_2 \quad \Delta l: \text{Längenänderung} \quad \eta: \text{Vergrößerungsfaktor}$$

Aus Gleichung (Gl. 6.11) erhält man zunächst:

$$R = \frac{2 \cdot L \cdot a}{\Delta d} \quad (\text{Gl. 6.22})$$

Bei der Bestimmung der Schwinddehnungen gehen in (Gl. 6.19) für die jeweilige Probe konstante Kenngrößen (Dicken und E-Moduli der Materialien) in die Berechnungen ein. Lediglich der Krümmungsradius bleibt als Variable über, so dass sich für den jeweiligen Versuch zusammengefasst folgende Beziehung ergibt:

$$\varepsilon_h = \frac{4 \cdot (t_s + t_z)^2 - 2 \cdot t_s \cdot t_z + \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z \cdot t_z} + \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s}}{6 \cdot (t_s + t_z) \cdot R} = c \cdot \frac{1}{R} \quad (\text{Gl. 6.23})$$

Die Längenänderung Δl ergibt sich aus der Dehnung und der zugehörigen Messlänge. Die Längenänderung der Probe Δl und die Differenz der Positionsänderungen Δd sind direkt proportional zueinander. Die Proportionalitätskonstante η hängt von den oben genannten konstanten Kenngrößen ab und drückt somit die Verstärkungswirkung des Messverfahrens aus.

Setzt man Gleichung (Gl. 6.22) und (Gl. 6.23) in (Gl. 6.24) ein, erhält man die Beziehung.

$$\Delta l = \varepsilon_h \cdot a = c \cdot \frac{l}{R} \cdot a = c \cdot a \cdot \frac{\Delta d}{2 \cdot L \cdot a} = \frac{l}{\eta} \cdot \Delta d \rightarrow \Delta d = \eta \cdot \Delta l \quad (\text{Gl. 6.24})$$

Für η erhält man damit die Gleichung:

$$\eta = \frac{12 \cdot L \cdot (t_s + t_z)}{4 \cdot (t_s + t_z)^2 - 2 \cdot t_s \cdot t_z + \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z \cdot t_z} + \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s}} \quad (\text{Gl. 6.25})$$

Für eine Probe mit den unten angegebenen Eigenschaften für Zementsteinschicht und Glasfolie erhält man für η einen Betrag von:

$$\begin{aligned} t_s &= 0,15 \text{ mm} & t_z &= 1,7 \text{ mm} \\ E_s &= 60.000 \text{ N/mm}^2 & E_z &= 15.000 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{12 \cdot L \cdot (t_s + t_z)}{4 \cdot (t_s + t_z)^2 - 2 \cdot t_s \cdot t_z + \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z \cdot t_z} + \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s}} \cong 460$$

6.7 Fehlerbetrachtung

6.7.1 Krümmungsradius

Nach Gleichung (Gl. 6.11) hängt der Krümmungsradius R von den geometrischen Kenngrößen a und L sowie von den Messgrößen d_1 und d_2 ab. Die Bestimmung dieser Eingangsgrößen unterliegt selbst gewissen Streuungen, so dass der daraus gewonnene Schätzwert der Ergebnisgröße ebenfalls mit einem Fehler behaftet ist. Dieser kann mit Hilfe der statistischen Größe der Standardabweichung ausgedrückt werden. Für die Berechnung der Standardabweichung von R ist in diesem Fall das Fehlerfortpflanzungsgesetz anzuwenden, wodurch die Streuungen der Eingangsgrößen mit berücksichtigt werden. Durch Mehrfachmessungen konnte für a eine Standardabweichung von $\sigma_a = \pm 0,5 \text{ mm}$ und für L ein $\sigma_L = \pm 5 \text{ mm}$ bestimmt werden.

Für den Einsatz der gewählten positionssensiblen Detektoren ist die Kenntnis von Auflösung und Genauigkeit (der absoluten Positionsangabe) vordergründig. Der Hersteller (Hamamatsu) gibt für den verwendeten Typ (S3932) eine Auflösung von $0,3 \mu\text{m}$ an.

Dies stellt die minimal detektierbare Verschiebung des Laserfleckzentrums dar. In der Mitte des PSD liegt der Koordinatenursprung für die Positionsangabe. Trifft der Laserpunkt an einer beliebigen Stelle auf die aktive Länge auf, so kann seine absolute Entfernung vom Ursprung mit einer Genauigkeit von $\pm 60 \mu\text{m}$ angegeben werden.

Bei der Bestimmung der Messgrößen d_1 und d_2 geht es jedoch weniger um die absolute Position der Laserpunkte, sondern vielmehr um ihre mit einer beliebigen Feuchteänderung korrespondierenden Positionsänderungen. Für die Fehlerbetrachtung ist es daher zweckmäßig, die Streuung des PSD-Signals unter den gegebenen Randbedingungen zu bestimmen und diese anstelle der Herstellerangaben anzusetzen. Fehlerquellen können dabei aus Raumtemperatur, Gebäudeschwingung, Messelektronik sowie der Laserstrahlqualität hervorgehen.

Um die zeitliche Entwicklung der Signalstreuungen der PSD zu bestimmen, wird anstelle einer Probe ein Optikspiegel in die Messkammer eingebaut. Die Bewegung der beiden Laserstrahlen, die von der Spiegeloberfläche aus auf die gegenüberliegenden PSD ausgerichtet werden, können damit aufgezeichnet werden. Ohne die Randbedingungen zu verändern, wurden auf dieser Weise über einen Zeitraum von 10 Stunden die Verläufe der PSD aufgezeichnet. In Bild 6.24 ist ein solcher Verlauf dargestellt. Die Standardabweichung beträgt $\sigma_{\text{PSD}} = \pm 0,02$ Volt. Der bei einer Feuchtestufe gemessene Betrag der Signaländerung der PSD liegt demgegenüber im Mittel etwa bei $\Delta U = 2,5$ Volt.

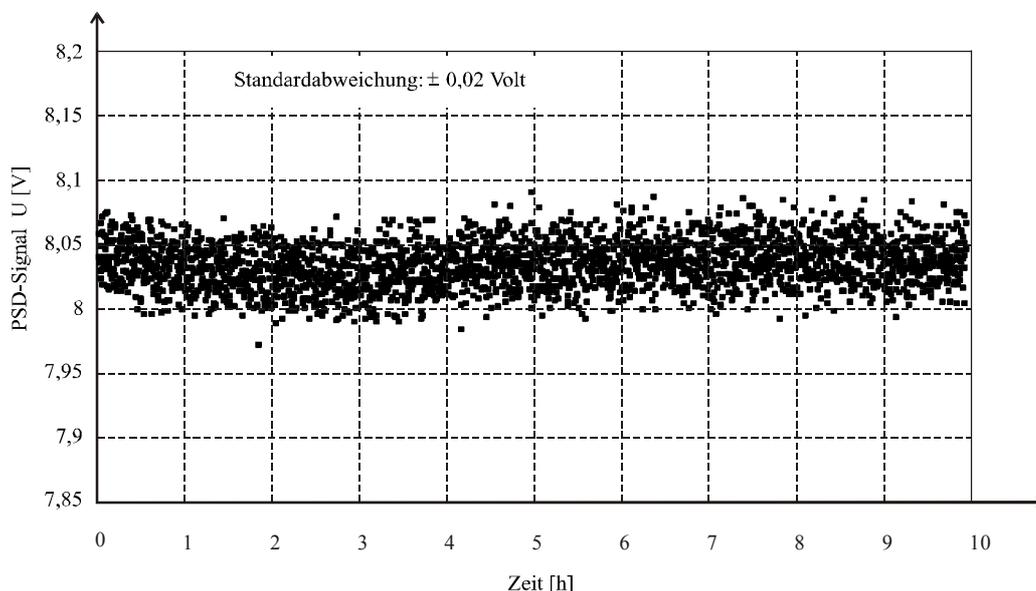


Bild 6.24: Streuung eines PSD-Signals über einen Zeitraum von 10 Stunden

Der gesamte Messbereich eines PSD beträgt ± 10 Volt bei einer aktiven Messlänge von $\pm 6000 \mu\text{m}$. Unter Berücksichtigung der über den gesamten Messbereich ansetzbaren Linearität kann entsprechend der Kalibrierkurve in Bild 6.15 ein Proportionalitätsfaktor (k) zwischen Δd und ΔU angegeben werden.

$$\Delta d = \Delta U \cdot k \quad (\text{Gl. 6.26})$$

$$\text{Proportionalitätsfaktor } k = 0,6 \frac{\mu\text{m}}{\text{mV}}$$

Daraus kann für d_1 und d_2 eine Standardabweichung von $\sigma_d = \pm 12 \mu\text{m}$ berechnet werden, die deutlich größer ist als die vom Hersteller angegebene Auflösung.

Die Variablen d_1 und d_2 erhält man jeweils durch Subtraktion des PSD-Signals am Ende einer Feuchtestufen vom Startwert (Bild 6.19). Unter Beachtung des linearen Fehlerfortpflanzungsgesetzes ergibt sich damit schließlich ein $\sigma_d = \pm 17 \mu\text{m}$.

Mit den o.g. Informationen und Gleichung (Gl. 6.11) kann die Berechnung der Standardabweichung für R erfolgen.

Zunächst werden die partiellen Ableitungen der Gleichung (Gl. 6.11) gebildet (totales Differential):

$$\frac{\partial R}{\partial L} = \frac{2 \cdot a}{(d_1 - d_2)} \quad (\text{Gl. 6.27})$$

$$\frac{\partial R}{\partial a} = \frac{2 \cdot L}{(d_1 - d_2)} \quad (\text{Gl. 6.28})$$

$$\frac{\partial R}{\partial d_1} = -\frac{2 \cdot a \cdot L}{(d_1 - d_2)^2} \quad (\text{Gl. 6.29})$$

$$\frac{\partial R}{\partial d_2} = \frac{2 \cdot a \cdot L}{(d_1 - d_2)^2} \quad (\text{Gl. 6.30})$$

Aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich anschließend folgende Gleichung (Gl. 6.31) für die Standardabweichung von R (σ_R):

$$\sigma_R = \pm \sqrt{\frac{4 \cdot a^2}{(d_1 - d_2)^2} \cdot \sigma_L^2 + \frac{4 \cdot L^2}{(d_1 - d_2)^2} \cdot \sigma_a^2 + \frac{4 \cdot a^2 \cdot L^2}{(d_1 - d_2)^4} \cdot \sigma_{d_1}^2 + \frac{4 \cdot a^2 \cdot L^2}{(d_1 - d_2)^4} \cdot \sigma_{d_2}^2} \quad (\text{Gl. 6.31})$$

Die in Kapitel 6.5.2 bereits exemplarisch angegebenen Krümmungsradien grenzen im Grunde den hier berücksichtigten Bereich ab. Setzt man für die Variablen in Gleichung (Gl. 6.31) die jeweils zugehörigen Beträge ein, erhält man als Standardabweichung für einen besonders großen Krümmungsradius (kleines $\varepsilon_h \rightarrow$ großes $(d_1 - d_2)$):

$$R = 18.850 \text{ mm} \pm 630 \text{ mm}$$

$$\text{Variationskoeffizient} = \frac{\pm 630}{18.500} = \pm 3,4 \% \quad (\text{Gl. 6.32})$$

und für einen besonders kleinen Krümmungsradius:

$$R = 450 \text{ mm} \pm 11 \text{ mm}$$

$$\text{Variationskoeffizient} = \frac{\pm 11}{450} = \pm 2,5 \% \quad (\text{Gl. 6.33})$$

Der absolute Betrag der Standardabweichung hängt somit vom Schätzwert der Ergebnisgröße ab, der aus Gleichung (Gl. 6.11) mit den Schätzwerten der Eingangsparametern berechnet wird. Daher ist die Angabe der Messunsicherheit in Form eines auf den Schätzwert der Ergebnisgröße bezogenen relativen Fehlers zweckmäßig. Für besonders große Krümmungsradien resultiert ein betragsmäßig etwas größere relativer Fehler. Ab einem Krümmungsradius von etwa 3.000 mm kann mit einem mittleren relativen Fehler von etwa 2,5 % gerechnet werden (Bild 6.25).

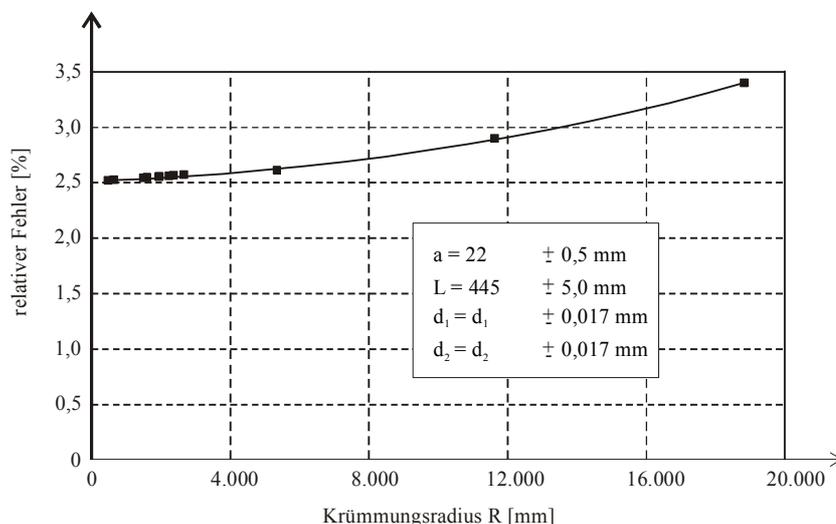


Bild 6.25: Abnahme des relativen Fehlers mit abnehmendem Krümmungsradius

6.7.2 Schwinddehnung

Für die Rechengröße der Schwinddehnung ε_h wurde die Standardabweichung ebenfalls bestimmt. In dieser Berechnung fließen jedoch Eigenschaften der Glasfolie ein, für die eine explizite bzw. hinreichend genaue Bestimmung ihrer Größen und Messunsicherheit nicht durchgeführt werden konnte. Für den E-Modul dieser Schicht wurde zunächst ein durchschnittlicher Wert von 60.000 N/mm² angenommen. Die Dicke der Glasfolien wurde anhand lichtmikroskopischer Aufnahmen vermessen. Dabei ergab sich ein Mittelwert von etwa $t_s = 0,15$ mm. Unter Variation der Standardabweichung für E-Modul und Dicke der Glasfolie wird später die Bedeutung der getroffenen Annahmen auf das Rechenergebnis untersucht. Die Dicke der Zementsteinprobe t_z konnte auf ca. $\pm 0,01$ mm genau bestimmt werden. Die Standardabweichung des E-Moduls dieser Schicht wurde durch mehrfaches Messen mit dem vorgestellten Messaufbau an repräsentativen Proben zu etwa ± 1.000 N/mm² bestimmt (Kapitel 6.5.4). Für die Standard-

abweichung des Krümmungsradius wird auf die vorangegangene Berechnung in Kapitel 6.7.1 zurückgegriffen.

Die Schwinddehnung kann durch folgende Gleichung berechnet werden (Gl. 6.19).

$$\varepsilon_h = \frac{4 \cdot (t_s + t_z)^2 - 2 \cdot t_s \cdot t_z + \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z \cdot t_z} + \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s}}{6 \cdot (t_s + t_z) \cdot R}$$

Die partiellen Ableitungen sind durch folgende Gleichungen gegeben:

$$\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial E_z} = \frac{\frac{t_z^3}{E_s \cdot t_s} - \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z^2 \cdot t_z}}{6 \cdot R \cdot (t_s + t_z)} \quad (\text{Gl. 6.34})$$

$$\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial E_s} = \frac{\frac{t_s^3}{E_z \cdot t_z} - \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s^2 \cdot t_s}}{6 \cdot R \cdot (t_s + t_z)} \quad (\text{Gl. 6.35})$$

$$\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial t_z} = \frac{8 \cdot (t_s + t_z) - 2 \cdot t_s - \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z \cdot t_z^2} + \frac{3 \cdot E_z \cdot t_z^2}{E_s \cdot t_s}}{6 \cdot R \cdot (t_s + t_z)} - \frac{4 \cdot (t_s + t_z)^2 + \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z \cdot t_z} - 2 \cdot t_s \cdot t_z + \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s}}{6 \cdot R \cdot (t_s + t_z)^2}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial t_s} = \frac{8 \cdot (t_s + t_z) - 2 \cdot t_z - \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s^2} + \frac{3 \cdot E_s \cdot t_s^2}{E_z \cdot t_z}}{6 \cdot R \cdot (t_s + t_z)} - \frac{4 \cdot (t_s + t_z)^2 + \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z \cdot t_z} - 2 \cdot t_s \cdot t_z + \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s}}{6 \cdot R \cdot (t_s + t_z)^2}$$

$$\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial R} = - \frac{4 \cdot (t_s + t_z)^2 - 2 \cdot t_s \cdot t_z + \frac{E_s \cdot t_s^3}{E_z \cdot t_z} + \frac{E_z \cdot t_z^3}{E_s \cdot t_s}}{6 \cdot R^2 \cdot (t_s + t_z)} \quad (\text{Gl. 6.37})$$

Setzt man die o.g. Gleichungen in folgende Beziehung ein, kann daraus die Standardabweichung für ε_h berechnet werden.

$$\sigma_{\varepsilon_h} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial R}\right)^2 \cdot \sigma_R^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial E_z}\right)^2 \cdot \sigma_{E_z}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial E_s}\right)^2 \cdot \sigma_{E_s}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial t_z}\right)^2 \cdot \sigma_{t_z}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_h}{\partial t_s}\right)^2 \cdot \sigma_{t_s}^2} \quad (\text{Gl. 6.38})$$

Agrund fehlender näherer Informationen wurden zunächst für den E-Modul und Dicke der Glasfolie näherungsweise die gleichen Messunsicherheiten wie für die Zementsteinschicht zugrunde gelegt. Damit ergab sich aus (Gl. 6.38) für den gesamten Messbereich ein auf den Schätzwert der Ergebnisgröße bezogener relativer Fehler von 4,5 %.

Für die Eingangsgrößen der Glasfolie (E_s und t_s) wurden zusätzlich die jeweiligen Standardabweichungen in weiten Grenzen variiert. Die Streuung jeder Eingangsgröße wurde dabei separat betrachtet (Bild 6.26).

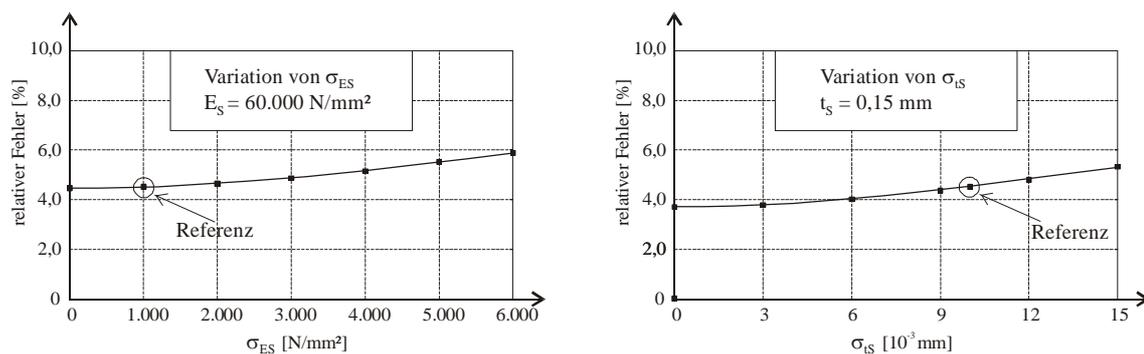


Bild 6.26: Entwicklung des relativen Fehlers von ε_h in Abhängigkeit von der Standardabweichung der Eingangsgrößen E_S und t_S

Für die Berechnung des Schätzwertes der Ergebnisgröße selbst wurde ein Durchschnittswert für E_S von 60.000 N/mm² angesetzt. Der Betrag von E_S liegt erwartungsgemäß zwischen 50.000 N/mm² und 70.000 N/mm² und wurde daher in diesen Grenzen variiert. In Bild 6.27 ist der Einfluss von E_S auf die Schwinddehnung dargestellt. Die hier ermittelten Schwinddehnungen sind aufgrund des angenommenen Betrages für E_S von 60.000 N/mm² mit einem Rechenfehler von max. 7,5 % (bei $E_S = 50.000$ N/mm²) behaftet. Durch eine entsprechende Messung von E_S kann dieser Fehler jedoch eliminiert werden.

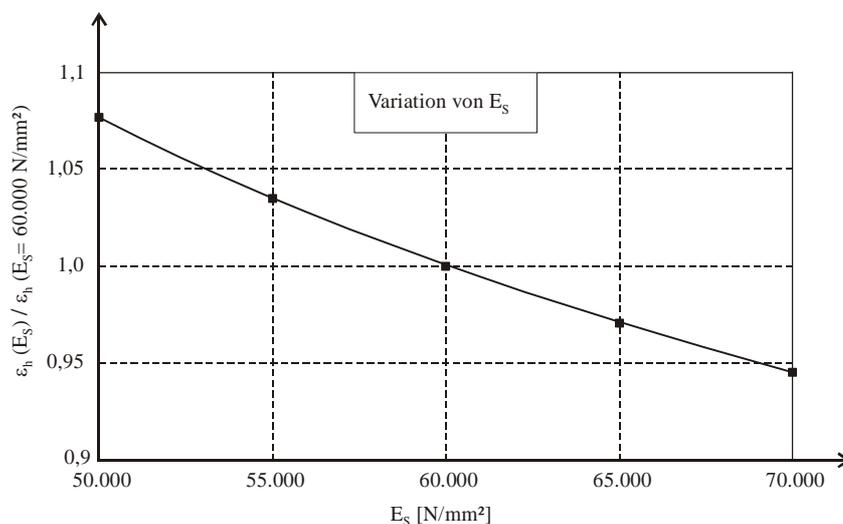


Bild 6.27: Einfluss der Variation von E_S auf das Ergebnis der Schwinddehnung

Auf der Grundlage der angestellten Fehlerbetrachtung bezüglich Krümmungsradius und Schwinddehnung zeichnet sich das hier vorgestellte Messverfahren durch eine vergleichsweise geringe Messunsicherheit aus. Die Leistungsfähigkeit wird zusätzlich dadurch gesteigert, dass mit der verfügbaren Verstärkungswirkung der Verformungen auch besonders kleine Schwinddehnungen mit hoher Genauigkeit erfasst werden können.

6.8 Herstellungsmethode für dünnwandige Hohlzylinder aus Zementstein

6.8.1 Überblick

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde zunächst die Verwendung von filigranen Zementstreifen und von dünnwandigen Hohlzylindern für Schwindmessungen parallel betrachtet. Wie vorangegangen erläutert, sind im Rahmen dieser Arbeit allein filigrane Zementstreifen in den durchgeführten Schwindmessungen verwendet worden. Für die Herstellung homogener, dünnwandiger Hohlzylinder aus Zementstein soll dennoch in diesem Kapitel eine neue Herstellungsmethode vorgestellt werden. Schwindmessungen an Hohlzylindern aus Zementstein stellen somit eine alternative Möglichkeit dar.

6.8.2 Herstellungsmethode

Die Herstellung dünnwandiger Hohlzylinder aus Zementstein ist in zwei Arbeitsschritte aufgeteilt. Im ersten Schritt werden homogene vollzylindrische Probekörper hergestellt, die im erhärtenden Zustand in einem zweiten Bearbeitungsschritt zu Hohlzylindern präpariert werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Verfahrensweise ist, dass einerseits eine aufwändige Schalung entbehrlich wird und zudem auf arbeitsintensives Einbringen des Zementleims verzichtet werden kann. Andererseits können beliebige Zementsteinstrukturen auch ohne Feinstsand hergestellt werden, ohne verfahrensbedingten Einschränkungen hinsichtlich des w/z -Wertes zu unterliegen.

In Bild 6.28 ist die verwendete Schalung für die Herstellung der vollzylindrischen Proben dargestellt. Für einen Zementleim mit steifer bis plastischer Konsistenz (w/z – Wert $< 0,40$) wird der Zementleim in die Schalung eingebracht und verdichtet. Die freie Stirnfläche der Proben werden anschließend durch eine Kunststoffolie gegen Austrocknung geschützt. Die geschalteten Proben werden stehend bei gelagert. Nach 24 Stunden werden Kunststoffolie und Plexiglassockel entfernt und es folgte eine Wasserlagerung (inkl. Mantelschalung).

Wird der Zementleim mit einem höheren w/z -Wert als 0,40 hergestellt, wird bei sonst gleicher Vorgehensweise anstelle der stehenden Lagerung eine langsame Rotation der versiegelten Probe für 24 Stunden vorgesehen. Damit werden Sedimentationserscheinungen vermieden, ähnlich wie bei der Herstellung der Zementstreifen. Nach einer gewissen Vorlagerungsdauer werden die Proben einzeln aus dem Wasserbad entnommen und unter mechanischer Präparation zu Hohlzylindern verarbeitet.

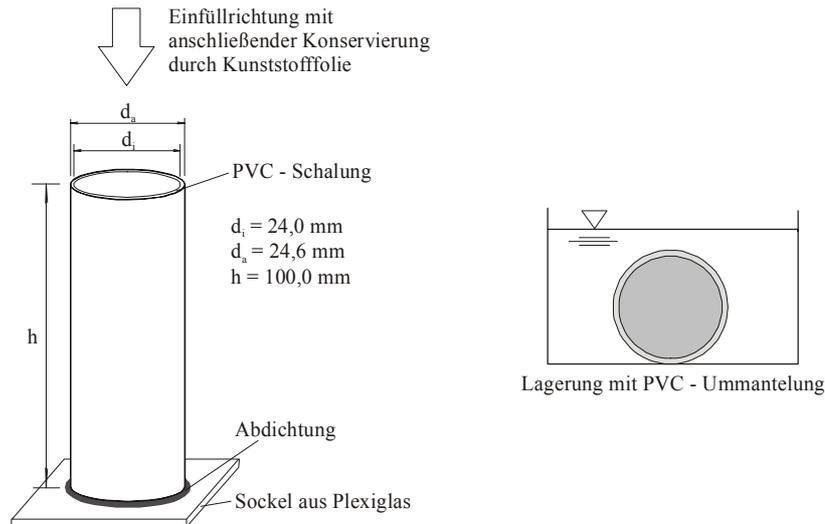


Bild 6.28: Herstellung und Lagerung der Vollzylinder (1. Schritt)

Dazu werden die Proben samt anhaftender Kunststoffschalung in das Maschinenfutter einer Drehbank eingespannt. Als Erstes wird durch zentrisches Bohren über mehrere Zwischenschritte (Bohrerdurchmesser) der gewünschte Innendurchmesser der Probe eingestellt (Bild 6.29 (a)). Mit einer Schneide wird anschließend unter langsamer Rotation und von außen beginnend zunächst die Schalung und nachfolgend der Zementstein abgefräst, bis der gewünschte Außendurchmesser erreicht wird (Bild 6.29 (b)). Abschließend werden beide Enden auf das gewünschte Maß abgelängt (Bild 6.29 (c)). Während der gesamten Präparation wird die Probe durch Aufsprühen von Wasser nass gehalten. Gleichzeitig wird damit die bei der Probenbearbeitung entwickelte Wärme abgeführt.

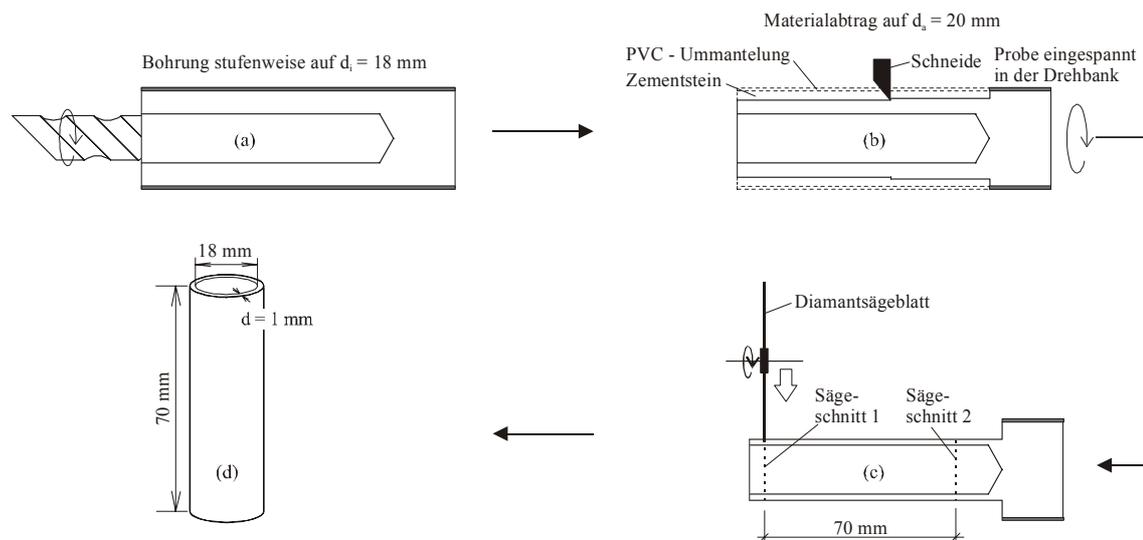


Bild 6.29: Präparation des Vollzylinders zum Hohlzylinder (2. Schritt)

Die Vorlagerungszeit bis zum Beginn der Präparation und die zur Verfügung stehende Präparationsdauer selbst hängen wesentlich vom w/z-Wert und dem verwendeten Zement ab. Das für die Präparation zur Verfügung stehende Zeitfenster wird einerseits dadurch abgegrenzt, dass der noch erhärtende Zementstein die anstehenden (Scher-) Beanspruchungen nicht aufnehmen kann. Andererseits darf die Steifigkeitsentwicklung nicht soweit vorangeschritten sein, dass aufgrund der Oberflächenbeanspruchungen ein spröder Bruch resultiert (Bild 6.30).

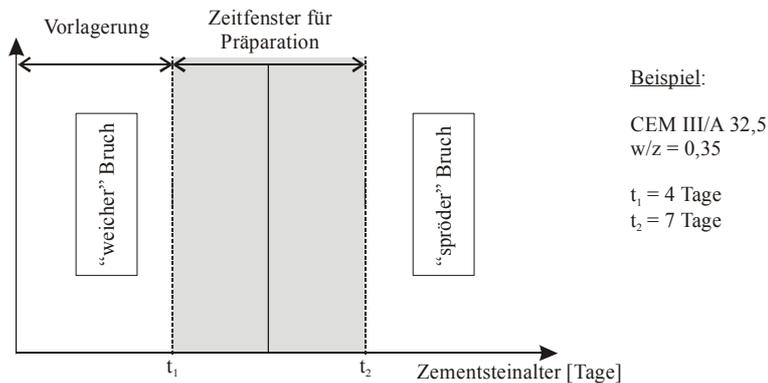


Bild 6.30: Zeitfenster für die Präparation der Proben zu Hohlzylindern

Das im Hinblick auf die Präparation günstige Zementsteinalter kann durch Vorversuche bestimmt werden. Mit dieser Herstellungsmethode können Hohlzylinder aus Zementstein homogen und zielsicher hergestellt werden. In Bild 6.31 sind mit der entwickelten Methode hergestellte Hohlzylinder exemplarisch dargestellt.

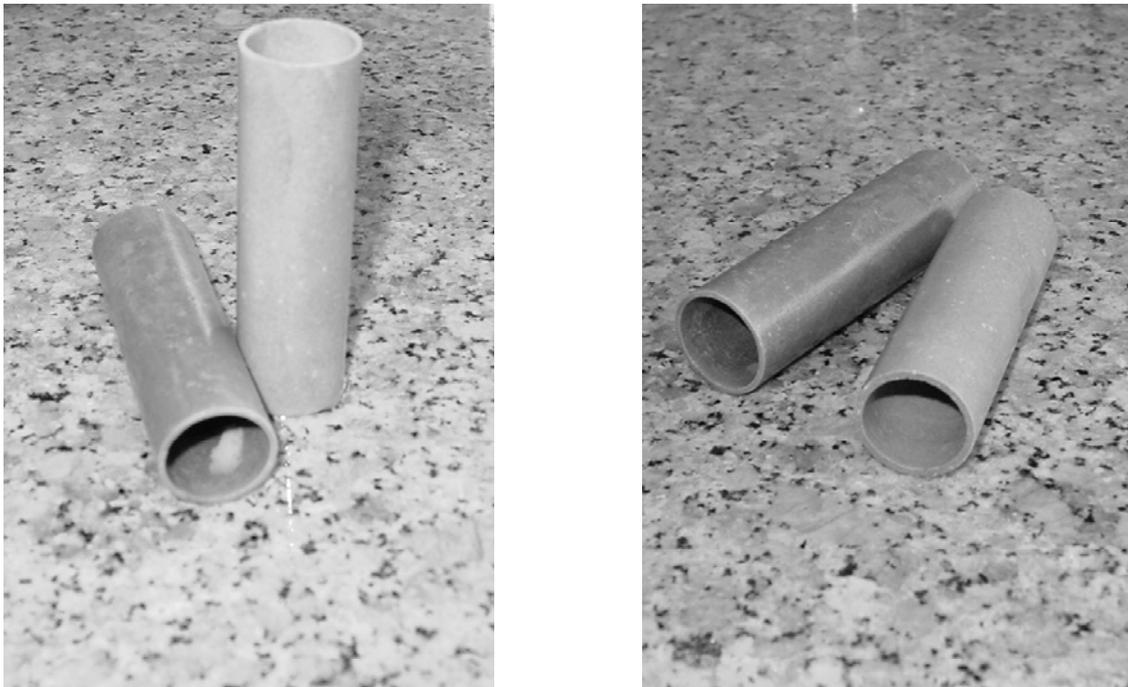


Bild 6.31: Mit der entwickelten Methode zielsicher hergestellte Hohlzylinder aus Zementstein

7 Anwendung des entwickelten Messverfahrens

7.1 Überblick

In Kapitel 6 wurden das Messprinzip, der Messaufbau und die Herstellung der speziellen Proben beschrieben. Mit den in diesem Kapitel erläuterten Untersuchungen soll die Anwendbarkeit des gesamten Messverfahrens und der Auswertungsmethode im Einzelnen aufgezeigt werden. Anhand von Messergebnissen sollen Leistungsmerkmale und Anwendungsgrenzen des Messverfahrens dargelegt und getroffene Annahmen sowie die Reproduzierbarkeit überprüft werden. Die in diesem Kapitel beschriebenen Schwinddehnungen erlauben hinsichtlich der Bewertung des Materialverhaltens jedoch nur tendenzielle Aussagen, da der Untersuchungsumfang nur Einzelmessungen umfasst.

Im Rahmen der Untersuchungen kamen drei unterschiedliche Zementsteinproben zum Einsatz (Tabelle 7.1). Alle Proben wurden mit dem selben Zement (CEM I 32,5 R) hergestellt. Es wurden zwei w/z-Werte betrachtet (0,50 und 0,60).

Tabelle 7.1: *Versuchsvarianten*

<i>Probe</i>	<i>Zement</i>	<i>W/z-Wert</i>	<i>Versuchsziel</i>
Probe 1	CEM I 32,5 R	0,60	Bestimmung des 1. Schwindens und 1. Quellens
Probe 2		0,50	Bestimmung des 1. Schwindens und 1. Quellens Bestimmung des 2. Schwindens und 2. Quellens
Probe 3		0,60	Bestimmung des 1. Quellens und Betrachtung der Reproduzierbarkeit (Probe 1)

7.2 Verlauf der PSD-Signale in Abhängigkeit von der Zeit

Nach dem Probeneinbau wurde die Feuchtigkeit in der Messkammer über den angeschlossenen Feuchtgenerator eingestellt. Jede Änderung in der Umgebungsfeuchtigkeit führte zu einer unmittelbaren Reaktion der Probe in Form einer Verkrümmung. Dies konnte über die parallel dazu kontinuierlich aufgezeichneten PSD-Signale verfolgt werden (Kapitel 6.4). Die Feuchtigkeit in der Messkammer wurde solange konstant gehalten, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellte.

Die im Folgenden erläuterte Messung wurde mit der Probe 1 durchgeführt. In Bild 7.1 sind exemplarische Verläufe der Messsignale für beide PSD in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt, die während der angegebenen stufenartigen Trocknung aufgezeichnet wurden. Weiterhin sind in diesem Bild die aktuell gemessene Umgebungsfeuchtigkeit in

der Messkammer (Ist-Feuchte) sowie die am Feuchtegenerator eingestellte Soll-Feuchte angegeben. Der gezeigte Ausschnitt aus der Gesamtmessung wurde deshalb gewählt, da an diesem parallel mehrere wichtige Merkmale des Messverfahrens demonstriert werden können.

Ausgehend von einer Umgebungsfeuchtigkeit von 100 % r.F. bei Versuchsbeginn erreichte der obere PSD (PSD 1) durch die Probenverformung bei einer Gleichgewichtsfeuchtigkeit von 90 % r.F. eine Spannung von ca. $U = 16,00$ Volt. Der untere PSD (PSD 2) konnte parallel dazu eine geringere Spannung von $U = 3,42$ Volt aufweisen. Beide PSD-Signale wurden vor Messbeginn auf den Wert Null zurückgestellt. Die unterschiedliche Größenordnung der jeweiligen Signaländerung von PSD 1 und PSD 2 stimmt mit den theoretischen Überlegungen überein. Das Verhältnis zwischen den beiden Signalen beträgt zu diesem Zeitpunkt 4,67. Dieser Kennwert besitzt für die Beurteilung des Messverfahrens eine maßgebliche Bedeutung und wird daher an anderer Stelle näher behandelt (vgl. Kapitel 7.3). Wurde die Feuchtigkeit bei 90 % r.F. konstant gehalten, blieben beide PSD-Signale ebenfalls mit zunehmender Versuchsdauer unverändert.

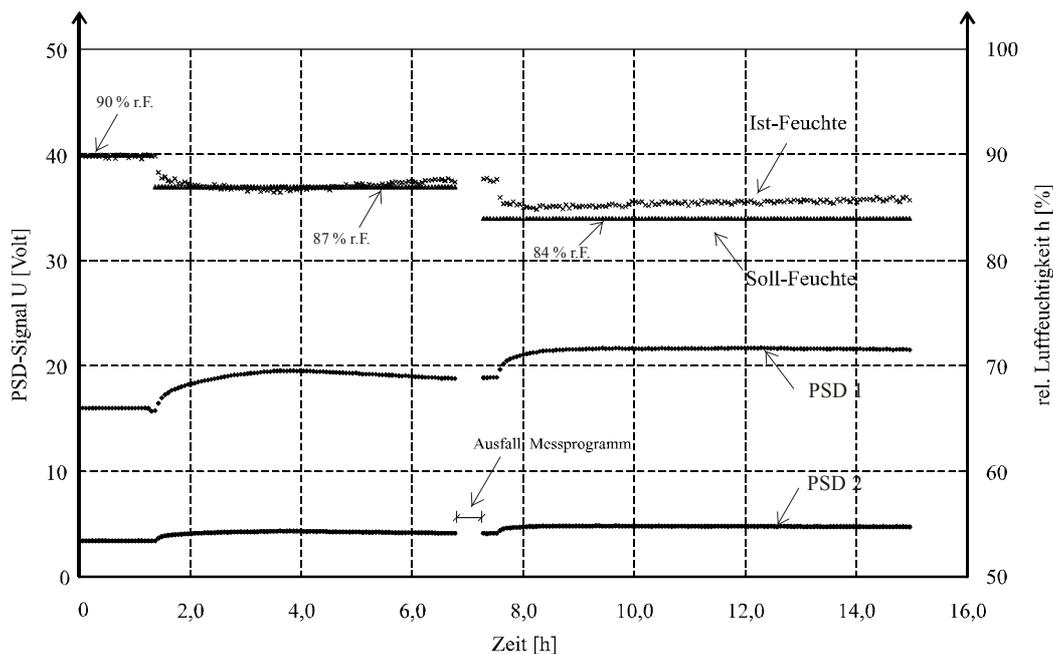


Bild 7.1: Verlauf der PSD-Signale über die Zeit bei abnehmender Umgebungsfeuchtigkeit (Schwinden)

Im nächsten Schritt wurde die Umgebungsfeuchtigkeit um $\Delta h = 3$ % r.F. auf 87 % r.F. abgesenkt. Diese wurde aufgrund der gewählten kleinen Abmessungen der Probenkammer nach kurzer Zeit erreicht. Die Probe reagierte unmittelbar auf diese Änderung, was sich in einer zeitnahen Veränderung der PSD-Signale bemerkbar machte. Während der Auslagerungsdauer bei einer Soll-Feuchte von 87 % r.F. trat zum Ende hin eine Zunahme in der Ist-Feuchte in der Größenordnung von max. 0,5 % r.F. auf. Diese geringe Feuchteänderung führte zu messbaren Abnahmen beider PSD-Signale. Dies

weist auf die außerordentlich hohe Auflösung des Messverfahrens hin, die vor allem mit dem geometrischen Vergrößerungsfaktor zusammenhängt (Kapitel 6.6).

Zum Ende dieser Feuchtestufe trat unerwartet ein Ausfall des Messprogramms ein. Für die Messung selbst hatte dies jedoch keine Bedeutung. Solange an der Geometrie des Messaufbaus keine Veränderungen vorgenommen werden, ist sogar ein planmäßiges Ausschalten der Laserquelle während einer Phase mit konstanter Soll-Feuchte möglich und problemlos durchführbar. Für die Auswertung selbst sind lediglich die Signale im Gleichgewichtszustand von Bedeutung, die von der anfänglichen und aktuellen Verkrümmung der Probe abhängig sind, welche wiederum allein von der Feuchtigkeit abhängt. Die kontinuierliche Aufzeichnung der PSD-Signale hatte den wesentlichen Vorteil, dass z.B. unplanmäßige Ereignisse, wie z.B. Erschütterung des gesamten Messaufbaus, Rissbildung in der Probe oder Verlust des Verbundes zwischen den Schichten (S) und (Z), detektiert werden können. Für das Materialverhalten untypische Messergebnisse können folglich mit dieser zeitgleich ablaufenden Kontrolle erklärt werden.

Für beide in Bild 7.1 dargestellten planmäßigen Feuchteänderungen um $\Delta h = 3 \% \text{ r.F.}$ ging unmittelbar mit der Feuchteabnahme eine Änderung beider PSD-Signale einher. Nach kurzer Zeit nahm der Zuwachs deutlich ab und beide PSD-Signale strebten jeweils einem Endwert zu. Für die gewählten Feuchtestufen von $\Delta h = 3 \% \text{ r.F.}$ war bei dem vorliegenden Zementstein eine vergleichsweise kurze Messdauer zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes von ca. 6 Stunden ausreichend.

Während einer Messung kann durch die induzierte Längenänderung des Zementsteins der Fall auftreten, dass z.B. aufgrund von Inhomogenitäten in der Verbundprobe eine Verdrillung um die Probenlängsachse entsteht. Dies hätte die unmittelbare Folge, dass die Laserstrahlen in horizontaler Richtung ausgelenkt werden. Im extremen Fall können sogar beide Laserpunkte die aktive Messlänge des zugehörigen PSD's seitlich verlassen. Die Signalintensität eines Laserpunktes ist proportional zu seiner Fläche, die innerhalb der aktiven Messlänge auftritt und damit „signalwirksam“ ist. Mit dieser Messgröße ist somit eine weitere Kontrollgröße für einen einwandfreien Messverlauf gegeben.

In Bild 7.2 sind die Verläufe für beide PSD-Signale und der zugehörigen Signalintensität (SI) dargestellt. SI kann Werte zwischen 0 und + 10 Volt annehmen, wobei für eine zuverlässige Messung SI einen Wert von 2,0 stets überschreiten muss. In der dargestellten Messung blieben beide Signalintensitäten über den gesamten Zeitraum weitestgehend unverändert. Die in Bild 7.2 gezeigten geringen Schwankungen in beiden Intensitätsverläufen haben auf die Zuverlässigkeit der Messung keinen Einfluss. Diese sind u.a. auf zeitliche Änderungen in Laserpunktform und Leistung der Laserquelle zurückzuführen.

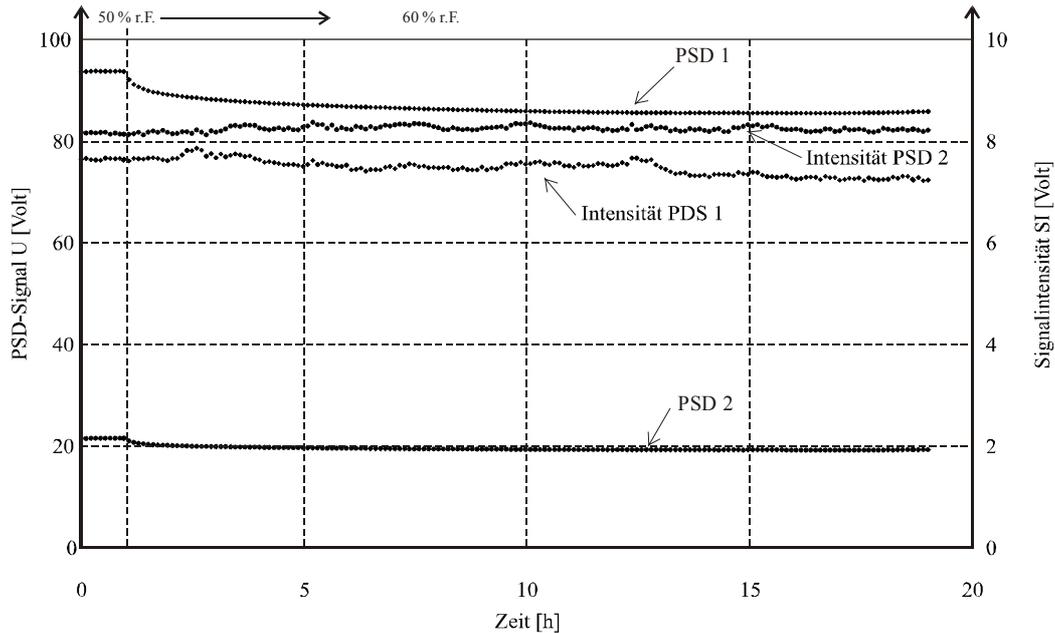


Bild 7.2: Verlauf der PSD-Signale über die Zeit bei zunehmender Umgebungsfeuchtigkeit (Quellen)

In Bild 7.2 wurde im Gegensatz zu Bild 7.1 die Feuchtigkeit in der Messkammer planmäßig erhöht. Beide PSD-Signale nahmen daher mit zunehmender Messdauer betragsmäßig ab. Durch die Bewegungsrichtung der PSD-Signale kann somit stets die Verformungsrichtung des Zementsteins abgelesen werden, d.h. ob es sich um Schwind- oder Quellverformungen handelt.

7.3 PSD-Signale in Abhängigkeit von der Gleichgewichtsfeuchtigkeit

Aus dem in Kapitel 7.2 auszugsweise dargestellten zeitlichen Verlauf der gemessenen PSD-Signale für Probe 1 und den übrigen Feuchtestufen wurden die zugehörigen Gleichgewichtszustände ermittelt. Jeder Gleichgewichtszustand besteht aus den 3 Angaben: Gleichgewichtsfeuchtigkeit und den beiden zugehörigen PSD-Signalen. Für den Desorptionsbereich der Probe 1 resultierten die in Bild 7.3 angegebenen Verläufe für PSD 1 und PSD 2 in Abhängigkeit von der Gleichgewichtsfeuchtigkeit. Mit abnehmender Gleichgewichtsfeuchtigkeit nahmen – ausgehend von 100 % r.F. - beide PSD-Signale und die absolute Differenz zwischen ihnen überproportional zu.

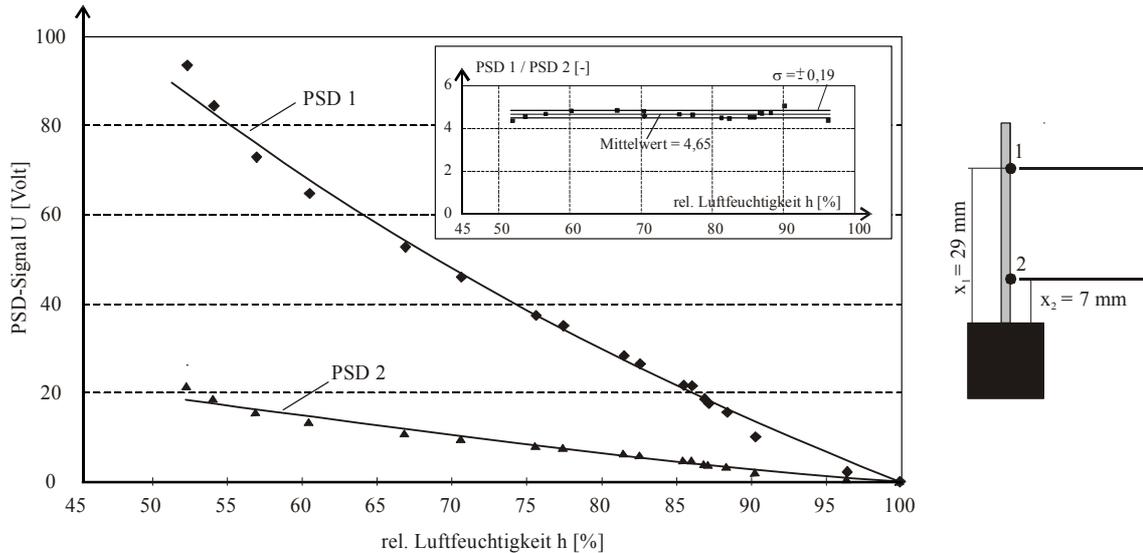


Bild 7.3: Verlauf der PSD-Signale PSD 1 und PSD 2 in Abhängigkeit von der Gleichgewichtsfeuchtigkeit sowie Darstellung des Verhältnisses PSD 1 / PSD 2

Unter der Annahme eines konstanten Krümmungsradius erhält man für die Biegelinie des Verbundprobekörpers folgende Gleichung:

$$\frac{d^2W(x)}{dx^2} = -\frac{l}{R} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Setzt man nach zweifacher Integration die Randbedingungen für das gewählte statische System ein, erhält man nach der Balkentheorie als Ergebnis:

$$W(x) = -\frac{l}{2 \cdot R} \cdot x^2 \quad 0 \leq x \leq l \quad (\text{Gl. 7.2})$$

Der Zuwachs eines PSD-Signals ist proportional zu der Neigungsänderung der Tangente an seinem Auftreffort mit der Koordinate x . Damit kann für den Zuwachs der beiden Signale folgende Beziehung aufgestellt werden:

$$\frac{\frac{dW(x_1)}{dx}}{\frac{dW(x_2)}{dx}} = \frac{-\frac{x_1}{R}}{-\frac{x_2}{R}} = \frac{x_1}{x_2} \quad (\text{Gl. 7.3})$$

Daraus folgt, dass die Zunahmen der beiden PSD-Signale innerhalb eines beliebigen Feuchteschrittes und zu jeder Zeit zueinander in einen definierten Verhältnis stehen müssen, wenn die Grundannahme eines konstanten Krümmungsradius erfüllt ist. Dieses Verhältnis ist allein von den Koordinaten x_1 und x_2 abhängig.

In Bild 7.3 ist für die gezeigten Messergebnisse dieses Verhältnis angegeben. Als Mittelwert hat sich ein Betrag von 4,65 bei einer Standardabweichung von $\pm 0,19$ ergeben. Das theoretisch erwartete Verhältnis, das sich aus x_1 und x_2 berechnen lässt, beträgt 4,15 und weicht vergleichsweise geringfügig vom experimentell bestimmten

Betrag ab. Für den Adsorptionsbereich ergab sich unter sonst gleichen Randbedingungen ein Mittelwert von 4,29 und eine wie oben vergleichbar geringe Standardabweichung von $\pm 0,22$.

Darauf basierend kann anhand dieser Messung die Richtigkeit der Annahme eines konstanten Krümmungsradius bestätigt werden.

Des Weiteren konnte aus dieser Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass unter den beschriebenen Umständen die Annahme eines hinreichenden Verbunds zwischen den Schichten (Z) und (S) ebenfalls erfüllt sein muss. Die Folge wäre ansonsten, dass beide Laserstrahlen sich von einander weitestgehend unabhängig bewegen müssten.

7.4 Bestimmung des Krümmungsradius

Für die Berechnung des Krümmungsradius nach Gleichung (Gl. 6.11) werden die Eingangsparameter d_1 und d_2 bzw. deren Differenz Δd benötigt. Dazu wird für jeden Gleichgewichtszustand getrennt die Differenz aus beiden PSD-Signalen $U_1(h)$ und $U_2(h)$ (z.B. aus Bild 7.3) gebildet und mit dem Proportionalitätsfaktor (k) multipliziert (Kapitel 6.7). Als Ergebnis erhält man den in Bild 7.4 dargestellten Verlauf von Δd , in dem bereits alle Messpunkte (Desorption und Adsorption) der betrachteten Probe 1 ($w/z = 0,6$) aufgenommen worden sind.

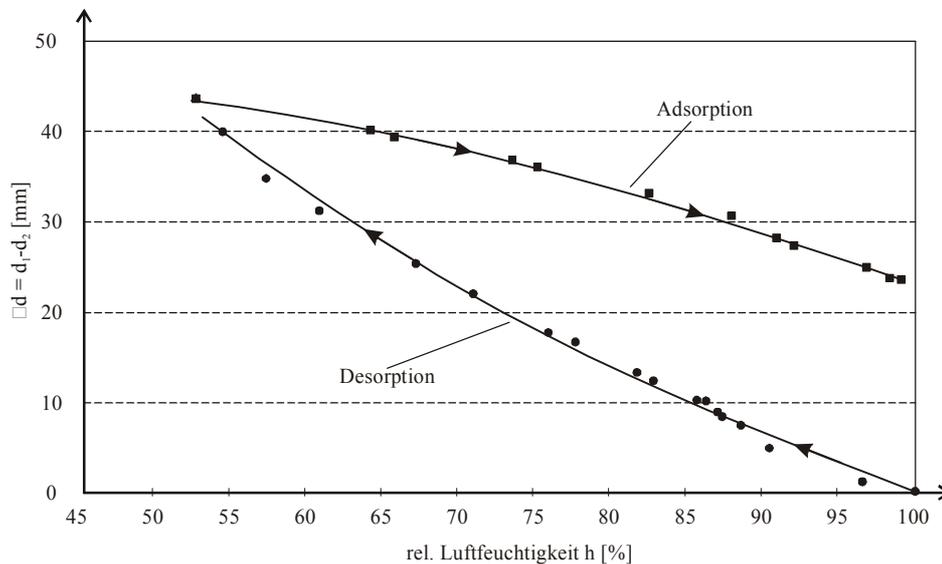


Bild 7.4: Verlauf von Δd während der Desorption und anschließender Adsorption

Daraus und mit den gewählten geometrischen Größen $a = 22$ mm und $L = 443$ mm wurde die Abnahme des Krümmungsradius während der Desorption berechnet und in Bild 7.5 graphisch dargestellt. Wie zu erwarten ist, genügt eine geringe Abnahme der rel. Luftfeuchtigkeit, um den Krümmungsradius merklich zu verringern. Der zu unendlich angenommene Anfangskrümmungsradius wurde mit Hilfe der geometrische

Größe a (Abstand der beiden Laserstrahlen untereinander) in der Weise überprüft, dass a vor dem Auftreffen der Laserstrahlen auf die Probenoberfläche und nach deren Reflexion den gleichen Betrag besaß.

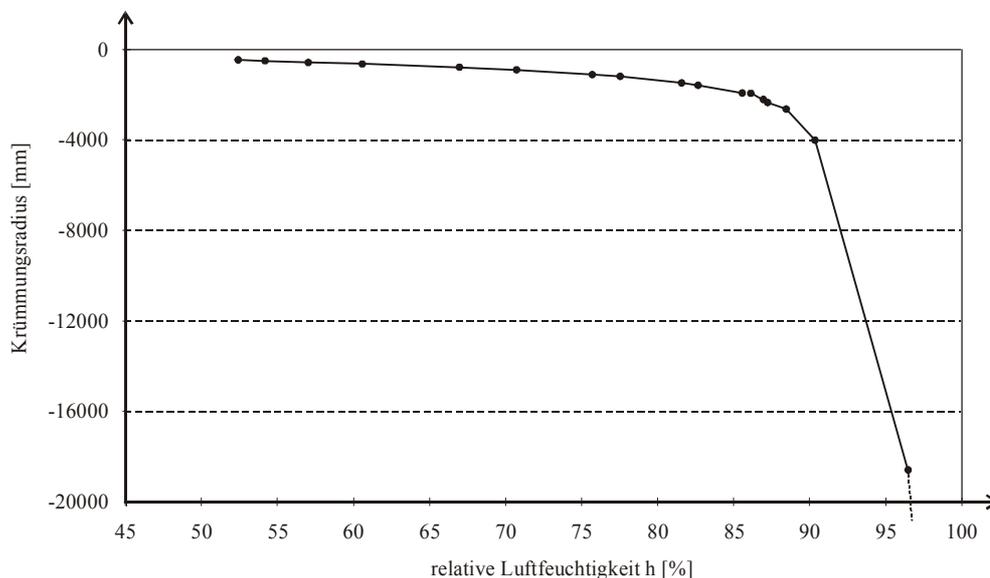


Bild 7.5: Abnahme des Krümmungsradius während der Desorption

Bei den ersten Versuchen mit dem Messverfahren versagten einzelne Verbundproben während der Messung. Dabei löste sich der Verbund zwischen Zementstein und Spiegelfolie oder es bildete sich ein durchgehender Riss in einer dieser Schichten. Versagen von Verbundproben trat während der ersten Desorption bei Umgebungsfeuchtigkeiten geringer als ca. 45 % r.F. auf. Korrespondierend dazu ergab sich aus Voruntersuchungen und den in Tabelle 7.1 angegebenen Versuchsvarianten ein kritischer Krümmungsradius von ca. $R = 450$ mm, der für die Verbundprobe bereits eine sehr starke Verkrümmung bedeutete. Der o.g. Krümmungsradius stellte eine Grenze für die zuverlässige Anwendbarkeit des entwickelten Messverfahrens dar.

Für die Berechnung des Krümmungsradius werden zwei Messpunkte benötigt. Es ist jedoch auch denkbar, dass die Berechnung mit nur einem Laserstrahl bzw. PSD-Signal durchgeführt wird und anstelle des zweiten Messpunktes die Einspannstelle angesetzt wird. Diese geht dann mit konstantem $U = 0$ Volt in die Berechnung ein. Im nächsten Abschnitt wird bei der Berechnung der Schwinddehnungen auf diese Möglichkeit näher eingegangen.

7.5 Berechnung der Schwinddehnungen

Aus dem zuvor bestimmten Verlauf des Krümmungsradius in Abhängigkeit von der rel. Luftfeuchtigkeit konnten mit Gleichung (Gl. 6.19) für Probe 1 die korrespondierenden Schwinddehnungen berechnet werden. In Bild 7.6 sind für die drei dargestellten Fälle die daraus resultierenden Schwinddehnungen aufgetragen. Wurde anstelle des unteren

Laserstrahls die Einspannstelle als Messpunkt verwendet (Fall 2), so resultiert im Vergleich zum Fall 1 (vgl. Bild 7.6) hinsichtlich der berechneten Schwindverläufe lediglich ein geringer Unterschied. Dagegen trat, wie zu erwarten war, im Fall 3 eine deutlichere Abweichung im Schwindverlauf zu den übrigen Fällen auf. Aufgrund der geringen Entfernung des oberen Laserstrahls zur Einspannstelle war die von dort ausgehende Störung nicht vernachlässigbar.

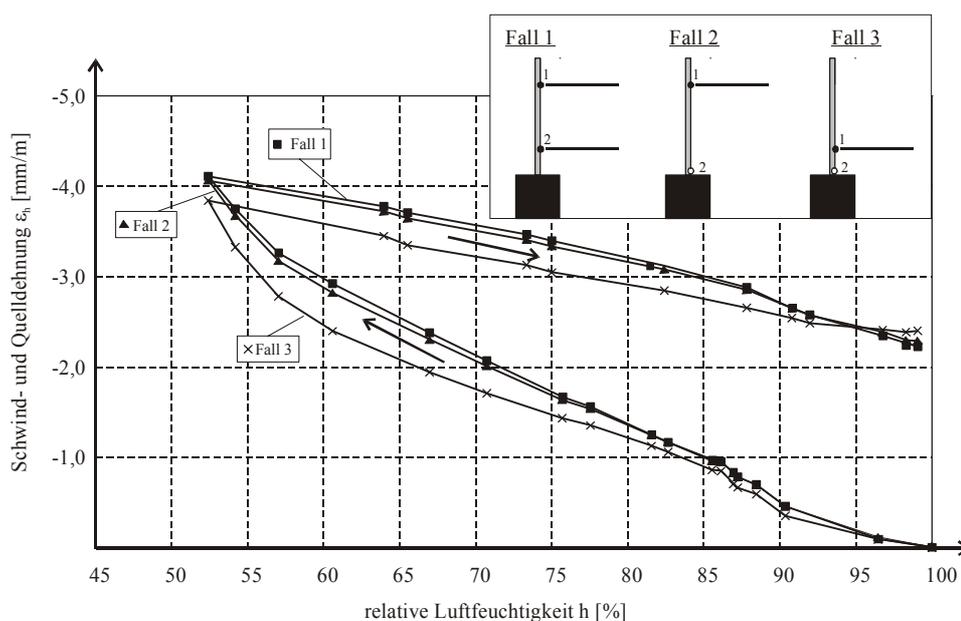


Bild 7.6: Verlauf der Schwind- und Quelldehnungen von Probe 1 ($w/z = 0,60$)

Auch wenn im Fall 2 nur geringfügige Abweichungen zum Fall 1 resultierten, sollten aufgrund der bereits erläuterten Vorteile stets zwei Laserstrahlen verwendet werden. Die Messpunkte sollten weiterhin in ausreichender Entfernung von der Einspannstelle vorgesehen werden (Kapitel 6.4.4).

7.6 Überprüfung der Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit des entwickelten Messverfahrens wurde anhand der gemessenen Quelldehnungen der Proben 1 und 3 untersucht. Diese Proben wurden aus der selben Zementsteinplatte hergestellt ($w/z=0,60$). Probe 3 wurde nach ihrer Präparation zunächst stufenweise bis zu einer Feuchtigkeit von 50 % vorgetrocknet. Im Anschluss an die Vorlagerung wurde die Probe bei höheren Feuchten untersucht. Im Feuchtebereich zwischen ca. 50 und 95 % r.F. wurde das 1. Quellen für beide Proben betrachtet. In Bild 7.7 sind die zugehörigen Messergebnisse zusammengestellt. Bis zu einer Umgebungsfeuchtigkeit von 80 % r.F. lagen beide Dehnungsverläufe sehr eng zusammen. Im Bereich zwischen 80 und 90 % r.F. war eine geringfügige Differenz von 0,15 mm/m vorhanden. Diese machte etwa eine 13 %-ige Abweichung bezogen auf Probe 1 aus ($\epsilon_1(h=86 \% \text{ r.F.}) = 1,15 \text{ mm/m}$). Mit weiterer Zunahme der Feuchtigkeit

nahm diese Differenz wieder deutlich ab. Mit dem entwickelten Messverfahren konnten somit reproduzierbare Ergebnisse beobachtet werden.

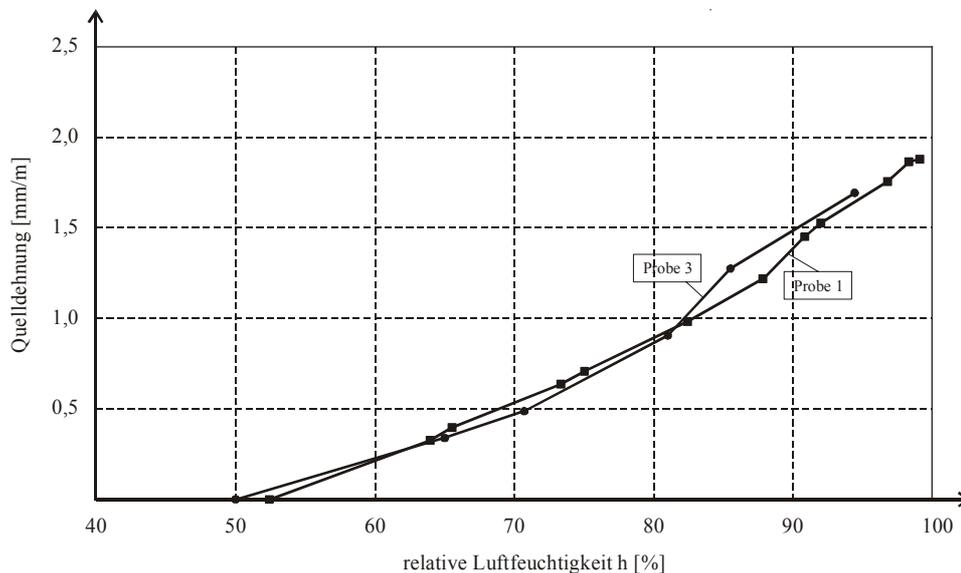


Bild 7.7: Quelldehnung der Proben 1 und 3 ($w/z = 0,60$)

7.7 Diskussion der gemessenen Schwinddehnungen

7.7.1 Größenordnung und Verlauf

In Bild 7.8 sind die ermittelten Schwindverläufe für einen w/z -Wert von 0,60 (Probe 1) und 0,50 (Probe 2) dargestellt. Der Verlauf für das erste Schwinden war für beide w/z -Werte nicht linear. Besonders im Anfangsbereich bis etwa $h = 85$ % r.F. ergaben sich überproportionale Zuwächse bezüglich der Schwinddehnungen. Das Rückschwinden (Quelldehnungen) verlief dagegen weitestgehend linear. Für einen w/z -Wert von 0,50 stellte sich ab einer rel. Luftfeuchtigkeit von 95 % jedoch ein überproportionaler Anstieg der Quellverformungen ein.

Die Schwinddehnungen für den Zementstein mit niedrigerem w/z -Wert lagen durchgehend etwas niedriger. Zwischen 60 und 50 % r.F. nahmen die Schwinddehnungen bei dem höheren w/z -Wert stark zu. Ein tendenziell ähnliches Verhalten konnte in Bild 3.8 ebenfalls beobachtet werden. Pihlajavaara [78] (Bild 3.6) sowie Day und Illston [35] (Bild 3.9) geben dagegen in diesem Feuchtebereich eine besonders geringe Schwinddehnungszunahme an.

Bei einem Vergleich der Größenordnung der Schwinddehnungen mit Literaturangaben findet man z.B. für den oft berücksichtigten w/z -Wert von 0,50 und einer Umgebungfeuchtigkeit von 65 % Angaben für ϵ_h , die u.a. von 1,9 mm/m (aus [44]) bis 3,4 mm/m (aus [90]) gehen. Der hier gemessene Betrag für ϵ_h von 2,20 mm/m lag zwischen den o.g. Werten.

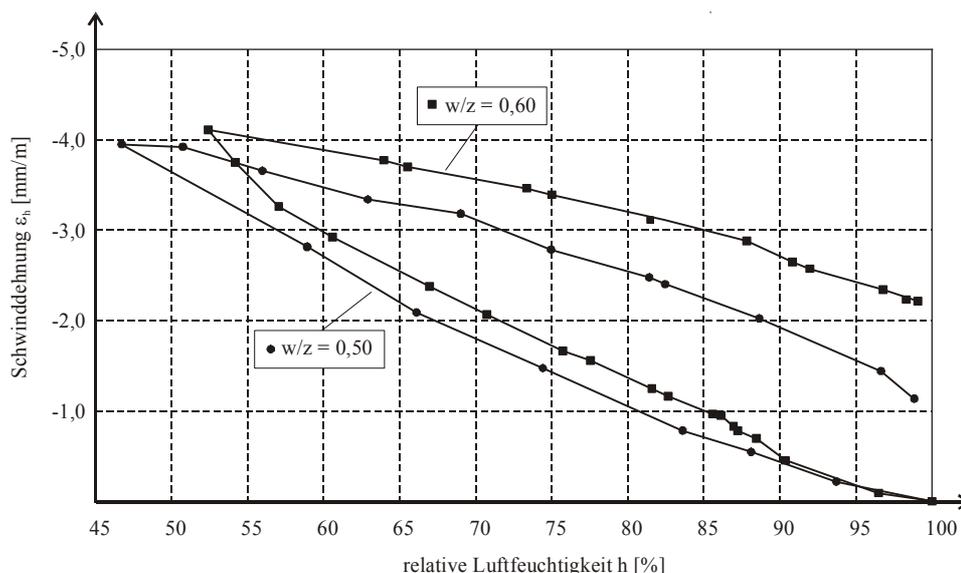


Bild 7.8: Verlauf der Schwinddehnungen bei $w/z = 0,60$ (Probe 1) und $0,50$ (Probe 2)

Der Verlauf beider Zementsteine entsprach im betrachteten Feuchtebereich einer offenen Hysterese. Daraus konnte auf einen nennenswerten Anteil irreversibler Schwinddehnungen zurückgeschlossen werden. Der irreversible Anteil der Schwinddehnungen war bei dem Zementstein mit größerem w/z -Wert deutlich ausgeprägter. Dies bestätigte zunächst die grundsätzliche Tendenz der Ergebnisse von Helmuth und Turk [55] (Bild 3.11). Allerdings waren bei diesen die irreversiblen Schwinddehnungen bei vergleichbaren Randbedingungen ($w/z = 0,5$ und $h = 47\%$) absolut betrachtet dreimal so hoch wie hier.

In Bild 7.9 sind für Probe 2 die Schwind- und Quelldehnungen infolge des ersten und zweiten Trocknungs- und Wiederbefeuchtungsprozesses dargestellt. Die qualitativen Verläufe in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchtigkeit für das erste und zweite Schwinden wiesen unterschiedliche Formen auf. Der Verlauf des zweiten Schwindens konnte mit einer linearen Beziehung angenähert werden, wohingegen das erste Schwinden einen gekrümmten Verlauf besaß. Die Quelldehnungen während der ersten und zweiten Wiederbefeuchtung verliefen dagegen über den betrachteten Feuchtebereich fast parallel. Die gewonnenen Ergebnisse zeigten auch nach dem zweiten Feuchtezyklus einen signifikanten Anteil an irreversiblen Schwinddehnungen, was die Ergebnisse von Czernin bestätigte [32]. Das von Locher angegebene Ausbleiben von irreversiblen Schwinddehnungen ab dem zweiten Feuchtezyklus konnte somit nicht bestätigt werden.

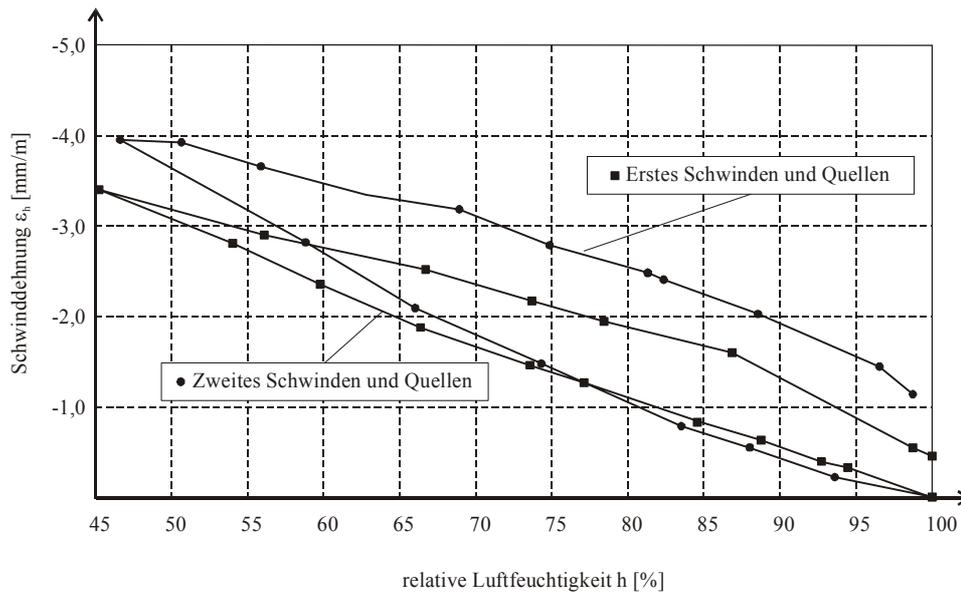


Bild 7.9: Erstes und zweites Schwinden bzw. Quellen von Zementstein ($w/z = 0,50$)

7.7.2 Korrelation zwischen Schwinddehnung (ϵ_h) und chemischem Potential (μ)

Das Münchner Modell unterscheidet bei der Betrachtung der Ursachen für Schwinden und Quellen zwischen unterem (0 bis 50 % r.F.) und oberem (50 bis 100 % r.F.) Feuchtebereich. Für den unteren Feuchtebereich wird die Änderung der freien Oberflächenenergie als maßgebender Mechanismus betrachtet. Dieser Ansatz wurde mathematisch formuliert und mit Hilfe experimenteller Ergebnisse verifiziert.

Ab einer Feuchtigkeit von 50 % r.F. wird die Spaltdruckwirkung dominant. In einer ergänzenden Arbeit zum Münchner Modell wird zwischen dem Spaltdruck und dem chemischen Potential ein proportionaler Zusammenhang postuliert (Kapitel 4.3). Dieser Ansatz führt unter bestimmten Bedingungen zu der Annahme, dass die Schwind- und Quelldehnungen von Zementstein ebenfalls proportional zum chemischen Potential gesetzt werden können. Eine Verifizierung dieses Ansatzes für unterschiedliche Zementsteinstrukturen ist bisher nicht erfolgt. An dieser Stelle sollen die gewonnenen Schwindverläufe mit dem in Kapitel 4.3 vorgestellten Ansatz diskutiert werden.

Trägt man die experimentell gewonnenen Schwinddehnungen über dem chemischen Potential auf, so resultieren für einen w/z -Wert von 0,60 die in Bild 7.10 dargestellten Zusammenhänge. Für das Schwinden erhält man eine lineare und für das Quellen eine bilineare Beziehung. Auch wenn es sich hier zunächst um Einzelmessungen handelt, wurde dieses Verhalten von dem Zementstein mit einem w/z -Wert von 0,50 ebenso bestätigt (Bild 7.11).

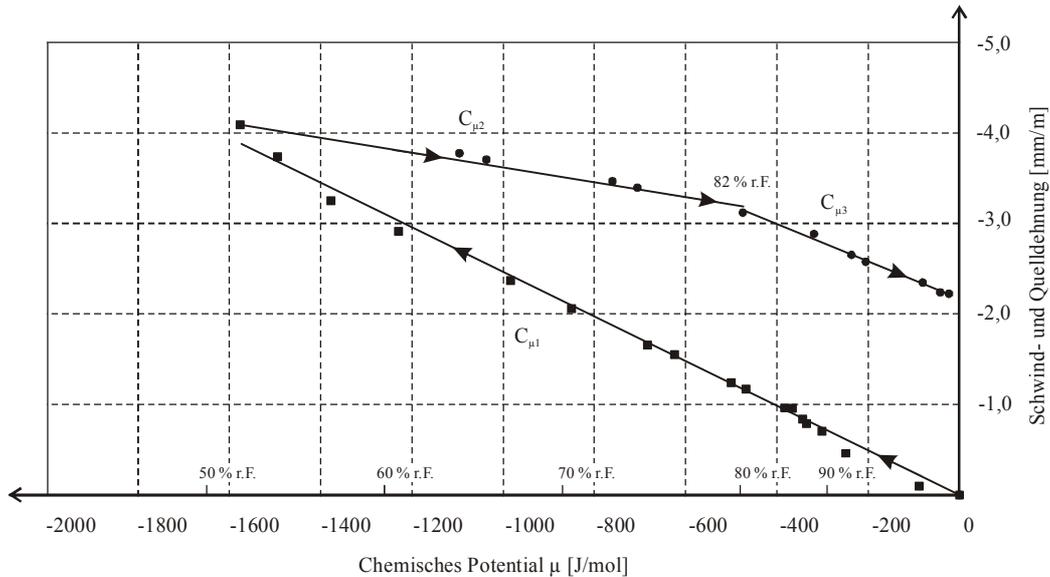


Bild 7.10: Schwind- und Quelldehnung in Abhängigkeit vom chemischen Potential Probe 1 ($w/z = 0,60$)

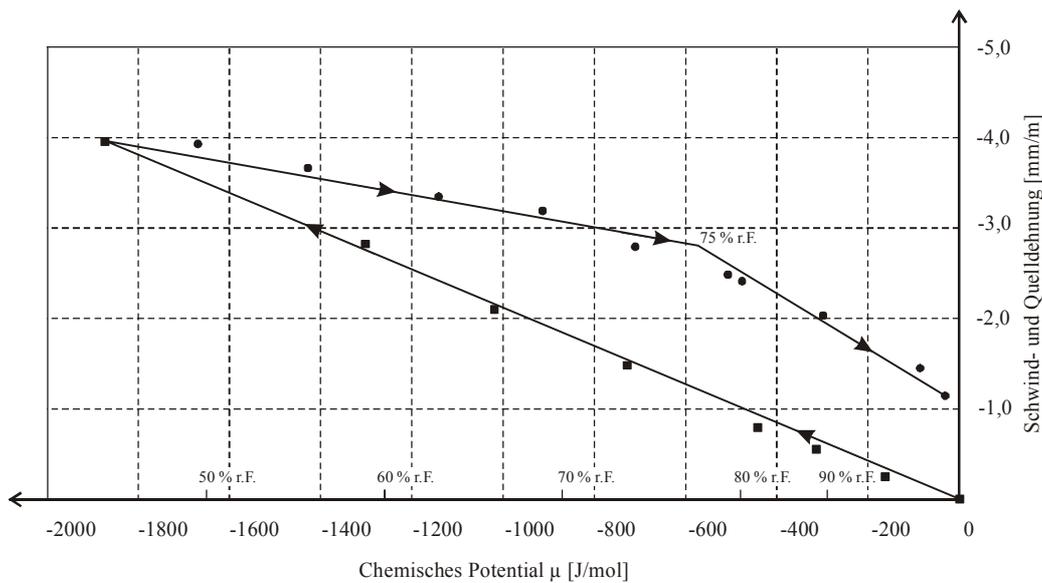


Bild 7.11: Schwind- und Quelldehnung in Abhängigkeit vom chemischen Potential Probe 2 ($w/z = 0,50$)

In Kapitel 4.3 wurde gezeigt, dass zwischen dem Spaltdruck und dem chemischen Potential ein proportionaler Zusammenhang angenommen werden kann:

$$\Delta\pi \sim \Delta\mu \quad (\text{Gl. 7.4})$$

Mit den hier dargestellten Versuchsergebnissen konnte bereichsweise ebenfalls ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Schwinddehnung und dem chemischen Potential nachgewiesen werden:

$$\Delta\mu \sim \Delta\varepsilon \quad (\text{Gl. 7.5})$$

Für die elastischen Dehnungen im Material kann allgemein folgende Beziehung angegeben werden:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (\text{Gl. 7.6})$$

Setzt man die o.g. Beziehungen in Gleichung (Gl. 4.11) ein, so ergibt sich Gleichung (Gl. 7.7):

$$\varepsilon_h = \frac{l}{E \cdot V_w} \cdot C_g \cdot \mu = C_\mu \cdot \mu \quad (\text{Gl. 7.7})$$

Der lineare Verlauf der Schwinddehnung kann somit durch einen einzelnen Proportionalitätsfaktor (C_{μ_1}) beschrieben werden (vgl. Bild 7.10 und Bild 7.11). Für die untersuchten Zementsteine ist der zugehörige Faktor in Tabelle 7.2 angegeben. Mit den durchgeführten Schwinduntersuchungen kann die Gültigkeit von C_{μ_1} für Probe 1 bzw. Probe 2 für den Feuchtebereich zwischen 100 % r.F. und ca. 50 % r.F. bzw. 45 % r.F. angegeben werden. Der bilineare Verlauf der Quelldehnungen wird dagegen mit zwei Proportionalitätsfaktoren (C_{μ_2} und C_{μ_3}) beschrieben. Der Übergang von C_{μ_2} auf C_{μ_3} erfolgte für Probe 1 bzw. Probe 2 bei ca. 82 % r.F. bzw. 75 % r.F..

Aus der in Bild 4.11 dargestellten Beziehung ist sowohl für das erste Quellen als auch für das zweite Schwinden ein linearer Verlauf der Schwinddehnungen in Abhängigkeit vom chemischem Potential ersichtlich. Die dort untersuchte Zementsteinprobe ($w/z = 0,50$) wurde vor Beginn der Schwinduntersuchung bei 85°C vorgetrocknet. Verformungen aus Schwinden und Quellen konnten mit derselben Ausgleichsgeraden angenähert werden. Im Bereich zwischen etwa 100 und 1700 J/mol resultierte für C_μ ein Betrag von $0,45 \cdot 10^{-6}$ mol/J. Die hier ermittelten Beträge für Probe 2 ($w/z = 0,50$) lagen beim ersten als auch beim zweiten Schwinden deutlich höher. Eine Ursache dafür kann u.a. in der o.g. Vorbehandlung des Zementsteins liegen.

Tabelle 7.2: Proportionalitätskonstante C_μ

w/z-Wert	$C_{\mu_1} [10^{-6} \text{ mol/J}]$	$C_{\mu_2} [10^{-6} \text{ mol/J}]$	$C_{\mu_3} [10^{-6} \text{ mol/J}]$	Beschreibung
0,60	2,5	0,9	2,1	1. Schwinden 1.Quellen
0,50	2,1	1,1	2,7	1. Schwinden 1.Quellen
0,50	1,8	1,0	2,3	2. Schwinden 2.Quellen

Aus dem jeweils ermittelten C_μ -Wert kann der zugehörige Betrag für C_g berechnet werden (Tabelle 7.3). Mit der Konstanten C_g wurde, wie in Kapitel 4.3 bereits erläutert, die Zementsteinstruktur berücksichtigt und kann in diesem Zusammenhang zur Beurteilung der schwindwirksamen hygrischen Spannungen im Zementstein herangezogen

werden. Besonders beim ersten Schwinden verursachen die in der Mikrostruktur des Zementsteins erzeugten Spannungen nur zum Teil von „außen“ messbare Deformationen. Ein wesentlicher Anteil führt zu einer gegenseitigen „inneren“ Verschiebung der CSH-Partikel, was bekanntlich zu Änderungen in den Strukturkenngößen (Oberfläche, Porenradienverteilung) führt.

Der durch das Schwinden erzeugte Spannungszustand („Kompressionszustand“) in der Zementsteinstruktur wird während des Quellens wieder abgebaut. Aus den in Tabelle 7.3 angegebenen Beträgen kann zwischen C_{g2} und C_{g3} ein deutlicher Unterschied festgestellt werden (Rückquellen). Der Übergang von C_{g2} auf C_{g3} erfolgte in den betrachteten Messungen natürlich bei den Gleichgewichtsfeuchtigkeiten der korrespondierenden C_{μ} -Werte. Aus dem deutlichen Anstieg von C_{g3} ab einer Gleichgewichtsfeuchtigkeit von 75 % r.F. bzw. 82 % r.F. kann auf eine Zunahme der Spaltdruckwirkung geschlossen werden.

Tabelle 7.3: Proportionalitätskonstante C_g

<i>w/z-Wert</i>	<i>C_{g1} [-]</i>	<i>C_{g2} [-]</i>	<i>C_{g3} [-]</i>	<i>Beschreibung</i>
0,60	0,60	0,21	0,50	1. Schwinden 1.Quellen
0,50	0,57	0,30	0,73	1. Schwinden 1.Quellen
0,50	0,67	0,40	0,99	2. Schwinden 2.Quellen

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das hygrische Verformungsverhalten stellt in der Praxis eine der wichtigsten nicht-mechanischen Materialeigenschaften von Beton dar. Die Bedeutung der hygrischen Verformungen wird dann besonders deutlich, wenn eine Verformungsbehinderung vorliegt und es dadurch zu Rissbildungen kommt. Schwindrisse können die mechanischen Eigenschaften des Betons herabsetzen und die Dauerhaftigkeit eines Betonbauteils nachhaltig beeinflussen.

Zur Berechnung der Schwinddehnungen von Beton existieren für den üblichen Praxisfall diverse empirische Berechnungsmodelle. In Fällen, bei denen z.B. die Kenntnis über die Spannungsverteilung aus Zwang und Eigenspannung zu unterschiedlichen Zeitpunkten von Interesse ist, wie es zum Beispiel bei der Bemessung von Kühlturmschalen der Fall ist, sind numerische Berechnungskonzepte vorzuziehen. Diese setzen jedoch eine adäquate Beschreibung des Materialverhaltens voraus. Hinsichtlich Größenordnung und Verlauf der Schwinddehnungen liegen in der Literatur stark differierende Untersuchungsergebnisse vor. Bei der experimentellen Bestimmung der freien Schwinddehnungen von Zementstein (unrestrained shrinkage) werden zudem hohe Anforderungen an Messmethode und Versuchsdurchführung gestellt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Überblick zu diversen Messmethoden und zu den wichtigsten Restriktionen gegeben, die bei einer aussagefähigen experimentellen Bestimmung der freien Schwinddehnungen von Zementstein einzuhalten sind. Die Verwendung homogener und filigraner Zementsteinproben und Ausschließung undefinierter Störstellen durch die Wahl eines geeigneten Messprinzips bzw. Messinstruments sind in diesem Zusammenhang besonders wichtig. Als Probekörper können demnach dünne Zementstreifen oder dünnwandige Hohlzylinder verwendet werden. Dünnwandige Hohlzylinder aus Zementstein sind im Vergleich zu anderen Probekörpergeometrien gleicher Dicke besonders robust, jedoch i.d.R. nur unter großem Aufwand herstellbar. Für eine zielsichere Herstellung dieser Proben wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt und vorgestellt.

Filigrane Zementstreifen können prinzipiell problemlos hergestellt werden. Hier fehlte es bislang an einer adäquaten Messtechnik mit hinreichender Messgenauigkeit, die in Kombination mit solchen Proben ein aussagefähiges und robustes Messverfahren ergibt. Auf der Grundlage der Messtechnik SSIOD wurde ein neuartiges, auf dünnwandige Zementsteinproben anwendbares und berührungsloses Messverfahren entwickelt. Die wesentlichen Entwicklungsschritte und Modifikationen zur Realisierung einer zielsicheren Anwendung des o.g. lasergestützten Messverfahrens wurden hinsichtlich Probenkonzeption, Messsignalerfassung und Gesamtmessaufbau angestellt.

Die konzipierten Proben besaßen einen Verbundquerschnitt aus dem zu untersuchenden Zementstein und einer darauf aufgeklebten dünnen Glasfolie (Prinzip Bimetallstab).

Schwind- und Quellverformungen des Zementsteins führten zu einer Verkrümmung der Verbundprobe. Durch zwei auf die Glasfolienoberfläche ausgerichtete und von dort aus reflektierte Laserstrahlen konnte der aktuelle Krümmungsradius bestimmt werden. Mit Hilfe der entwickelten Auswertemethode konnten aus den Messgrößen die gesuchten Schwindverformungen berechnet werden. Das entwickelte Messverfahren zeichnete sich durch eine hohe Auflösung und eine geringe Messunsicherheit aus. Durch das berührungslose Messprinzip ergab sich ein wesentlicher Vorteil in der strikten Trennung von Probekörper und Messtechnik.

Mit den damit exemplarisch durchgeführten Schwindversuchen konnten an dieser Stelle tendenzielle Aussagen hinsichtlich des Materialverhaltens angestellt werden. Die Größenordnung der reversiblen als auch der irreversiblen Schwinddehnungen lagen innerhalb der in der Literatur angegebenen Bereiche. Auch beim zweiten Schwinden wurde ein irreversibler Anteil der Schwinddehnungen festgestellt, der jedoch einen deutlich niedrigeren Betrag als beim ersten Schwinden besaß. Für den qualitativen Verlauf beim ersten Schwinden zeichnete sich eine nicht-lineare Beziehung zwischen Schwinddehnung und Gleichgewichtsfeuchtigkeit ab. Die darauffolgenden Quell- und Schwinddehnungen besaßen dagegen einen linearen Verlauf.

Mit den gewonnenen Messergebnissen konnte grundsätzlich für die betrachteten Zementsteine ein proportionaler Zusammenhang zwischen Schwinddehnung und chemischem Potential μ gezeigt werden. Die Quelldehnungen zeigten dagegen einen bilinearen Verlauf. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf die Bedeutung der Proportionalitätsfaktoren C_g und C_μ sowie auf dem beobachteten Knick im Quelldehnungsverlauf zwischen 75 und 80 % r.F. nicht weiter eingegangen. Dies kann unter Verwendung der hier entwickelten Messmethode und unter Berücksichtigung von Wiederholungsmessungen sowie weiterer Zementsteinstrukturen an anderer Stelle erfolgen. Hier war es von wesentlichem Interesse, die proportionale Beziehung zwischen ε_h und μ mit den gewonnenen Messergebnissen zu zeigen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] ACI Committee 209: *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures (ACI 209R-92)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1992, pp. 47
- [2] Adolphs, J.: Thermodynamische Beschreibung der Sorption. Dissertation an der Universität GHS Essen (1994), In: *Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen*, Heft 61
- [3] Adolphs, J.; Setzer, M. J.; Heine, P.: Changes in pore structure and mercury contact angle of hardened cement paste depending on relative humidity. In: *Materials and Structures*, Vol. 35 (2002), No. 252, pp. 477 – 486
- [4] Al-Alusi, H. R.; Bertero, V.; Polivka, M.: Einflüsse der Feuchte auf Schwinden und Kriechen von Beton. In: *Beton und Stahlbetonbau* (1978), Band 73, Heft 1, pp. 18 - 23
- [5] Alonso, M. T.: Hochfester Beton. *Beiträge zum 41. Forschungskolloquium des DAfStb am 11. und 12. Juli 2002 im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf*, (2002), pp. 41 – 54
- [6] ASTM C 596 – 01: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement. In: *Annual Book of ASTM Standards 2004*
- [7] ASTM C490 – 00 a: Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. In: *Annual Book of ASTM Standards 2004*
- [8] Badmann, R.; Stockhausen, N.; Setzer, M. J.: The Statistical Thickness and the Chemical Potential of Adsorbed Water Films. In: *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 82 (1981), No. 2, pp. 534 – 542
- [9] Baroghel-Bouny, V.; Godin, J.: Experimental Study on drying Shrinkage of ordinary and High-Performance Cementitious Materials. In: *Pro 17 : International Rilem Workshop on Shrinkage of Concrete*, Edited by V. Baroghel-Bouny and P.C. Aitcin, Rilem Publication S.A.R.L., (2000) , pp. 215 - 232
- [10] Baroghel-Bouny, V.; Mainguy, M.; Coussy, O; Lassabatere, T.: Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials. In: *Cement*

- and Concrete Research*, Vol. 29 (1999), Issue 8, pp.1225 - 1238
- [11] Barr, B.; Hoseinian, S. B.; Beygi, M. A.: Shrinkage of concrete stored in natural environments. In: *Cement and Concrete Research* , Vol. 25 (2003), Issue 1, pp. 19 – 29
- [12] Barrett, E.P.; Joyner, L.G.; Hallenda, P.P.: The determination of porevolume and area distribution in porous substances. In: *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 73 (1951), pp. 373– 380
- [13] Bartsch: *Taschenbuch Mathematischer Formeln*, 9. Auflage, Verlag Harri Deutsch (1986)
- [14] Bažant, Z. P.: Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3. In: *Materials and Structures*, Vol. 28 (1995), No.179, pp. 357-365
- [15] Bažant, Z. P.: Discussion of Hwang and Young’s Paper on “Drying Shrinkage of Portland Cement Pastes – I. Microcracking during Drying”. In : *Cement and Concrete Research*, Vol. 15 (1985), Issue 5, pp. 925 – 930
- [16] Bažant, Z. P.: Thermodynamics of hindered Adsorption and its Implication for Hardened Cement Paste and Concrete. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 2 (1972), Issue 1, pp. 1- 16
- [17] Bažant, Z. P.; Asghari, A. A.; Schmidt, J.: Experimental study of creep of hardened Portland cement paste at variable water content. In: *Materials and Structures*, Vol. 9 (1979), No.52, pp. 279 - 290
- [18] Bažant, Z. P.; Hemann, J. H.; Koller, H.; Najjar, L. J.: A thin-wall cement paste cylinder for creep tests at variable humidity or temperature. In: *Materials and Structures*, Vol. 6 (1973), No. 34, pp.277-281
- [19] Bažant, Z. P.; Raftshol, W. J.: Effect of cracking in drying and shrinkage specimens. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 12 (1982), pp. 209 - 226
- [20] Beaudoin, J.; Tamtsia, B.: Effect of Drying Methods on Microstructural Changes in Hardened Cement Paste: an A.C. Impedance Spectroscopy Evaluation. In: *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2 (2004), No.1, pp.113 - 120
- [21] Bentur, A.; Berger, R. L; Lawrence, F. V.; Milestone, N. B.; Mindess, S.; Young, J. F.: Creep and Drying Shrinkage of Calcium Silicate Pastes - III. A Hypothesis of Irreversible Strains. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 9 (1979), Issue 1, pp. 83 – 96
- [22] Bentur, A.; Milestone, N. B.; Young, J. F.: Creep and Drying Shrinkage of Calcium Silicate Pastes - II. Induced Microstructural and Chemical

- Changes. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 8 (1978), Issue 6, pp. 721 – 732
- [23] Bentur, T. A.: Early age shrinkage and cracking in cementitious systems. PRO 17: *International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete*, Edited by V. Baroghel-Bouny and P. C. Aitcin, Rilem Publication S.A.R.L., (2000), pp. 1-20
- [24] Bentz, D. P.; Quenard, D. A.; Baroghel-Bouny, V.; Garboczi, E. J.; Jennings, H. M.: Modelling drying shrinkage of cement paste and mortar Part 1: Structural models from nanometres to millimetres. In: *Materials and Structures*, Vol. 28 (1995), No. 179, pp. 450 – 458
- [25] Blain, R. L.: A statical study of the shrinkage of neat cements and concretes. In: *Colloque International sur le retrait des betons hydrauliques*, Madrid (1968), Vol. I, I - H
- [26] CEB-FIP, Model Code 1990, Design Code, Comité Euro International du Beton
- [27] Chatterji, S.: A Discussion of the Paper “Drying Shrinkage of the Portland Cement Pastes – I. Microcracking during Drying”. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 15 (1985), Issue 3, pp. 553 – 554
- [28] Chatterji, S.: Drying Shrinkage of Cement Paste and Concrete, A Reappraisal of the Measurement Technique and its Significance. In: *Cement and Concrete Research*, Vol.6 (1976), Issue 1, pp. 145 - 148
- [29] Chatterji, S.; Thaulow, N.; Christensen, P.: Formation of Shrinkage Cracks in Thin Specimens of Cement Paste. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 11 (1981), Issue 1, pp. 155 – 157
- [30] Coussy, O.; Dangla, P.; Lassabatere, T.; Baroghel-Bouny, V.: The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials. In: *Materials and Structures*, Vol. 37 (2004), No. 265, pp. 15 – 20
- [31] Coussy, O.; Eymard, R.; Lassabatere, T.: Constitutive Modeling of Unsaturated Drying Deformable Materials. In: *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124 (1998), Issue 6, pp. 658 - 667
- [32] Czernin, W.: *Zementchemie für Bauingenieure*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden – Berlin 1960 und 1977.
- [33] Czernin, W.: Das Schwinden des Betons. In: *Betonstein-Zeitung*, (1960), pp. 460 - 464
- [34] Dahmen, K.; Lehwald, S.; Ibac, H.: Bending of crystalline plates under the influence of surface stress – a finite element analysis. In: *Surface Science*, 446 (2000), pp. 161 - 173

- [35] Day, R. L.; Illston, J. M.: The Effect of Rate of Drying on the Drying / Wetting Behaviour of the Hardened Cement Paste. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 13 (1983), Issue 1, pp. 7 – 17
- [36] Derjaguin, B.V.; Muller, N.V.; Muller, V.M.; *Surface Forces*, Consultants Bureau, New York (1987)
- [37] DIN 1045: Tragwerke aus Beton und Stahlbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Teil 2: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [38] DIN 4227: Teil 1: Spannbeton; Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, (1988)
- [39] DIN 52 450: Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe. Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern.
- [40] Dorkin, V.; Zaitsev, Y.: Effect of cement kind on chemical and drying shrinkage. In: *7th Int.Congr. on the Chemistry of Cement*. Paris (1980), Vol. III – VI, pp. 57 - 60
- [41] Eickschen, E.; Siebel, E.: Einfluß der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Schwinden und Quellen von Straßenbeton. In: *Beton*, (9/98), pp. 580 – 586 (Teil 1) und *Beton*, (10/98), pp. 641 – 646 (Teil 2)
- [42] Feldman, R. F.: Sorption and length-change scanning isotherms of methanol and water on hydrated portland cement. In: *Proceedings Fifth International Symposium on Chemistry of Cement*, Tokyo, (1968), Part 3, pp. 53 - 66
- [43] Feldman, R. F.; Sereda, P. J.: A datum point for estimating the adsorbed water in hydrated Portland cement. In: *Journal of Applied Chemistry*, Vol. 13 (1963), pp. 375 – 382
- [44] Feldman, R. F.; Swenson, E. G.: Volume Change on First Drying of Hydrated Portland Cement With and Without Admixtures. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 5 (1975), Issue 1, pp. 25 – 35
- [45] Ferraris, C. F.; Wittmann, F. H.: Shrinkage mechanism of hardened cement paste. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 17 (1987), Issue 3, pp. 452 – 464
- [46] Fleischer, W.: Einfluß des Zements auf das Schwinden und Quellen von Beton. Dissertation TU München (1992), Erschienen in „*Berichte aus dem Baustoffinstitut*“, Heft 1/1992
- [47] Gardner, N. J.; Zhou, J. W.: Creep and Shrinkage Revisited. In: *ACI Materials Journal*, Vol. 90, (1994), No. 3, pp. 234-246

- [48] Gardner, N; Lockman, M. J.: Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete. In: *ACI Materials Journal*, Vol. 98 (2001), No. 2, pp. 159-167
- [49] Gertis, K.; Kiesel, K.; Werner, H.; Wolfseher, H.: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen. In: *DafStb*, Heft 258 (1976)
- [50] Graf, O.: Untersuchungen über das Schwinden und Quellen von Zementmörtel bei Verwendung von Zementen verschiedener Mahlung und verschiedener Herkunft. In: *Zement*, No. 15(1926), pp.459 – 461 und S.475 - 477
- [51] Granger, L.; Torrenti, J. M.; Acker, P.: Thoughts about drying shrinkage: Scale effects and modelling. In: *Materials and Structures*, Vol. 30 (1997), No. 204, pp. 96 – 105
- [52] Grube, H.; Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile. In: *Schriftenreihe der Zementindustrie*, Darmstadt (1990), Heft 52
- [53] Hammer, T.A.: Effect of silica fume on the plastic shrinkage and pore water pressure of high-strength concretes. In: *PRO 17: International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete*, Edited by V. Baroghel-Bouny and P. C. Aitcin, Rilem Publication S.A.R.L., (2000), pp. 75 - 98
- [54] Hein, A. : Röntgenfluoreszenzanalyse bei Totalreflexion der anregenden Synchrotronstrahlung an ELSA. Bonn, Universität, Diss.,1996
- [55] Helmuth, R. A.; Turk, D.: The reversible and irreversible drying shrinkage of hardened Portland cement and Tricalcium Silicate pastes. In: *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, Vol. 9 (1967), pp. 8 - 21
- [56] Hilsdorf, H. K.: Austrocknung und Schwinden von Beton. In: *Stahlbeton-Berichte aus Forschung und Praxis*. Festschrift Rüschi, Verlag Ernst & Sohn, Berlin (1969)
- [57] Hobbs, D. W.; Parrott, L. J.: Prediction of drying Shrinkage. In: *Concrete*, (1979), pp. 19 - 24
- [58] Hundt, J.; Kantelberg, H.: Sorptionsuntersuchungen an Zementstein, Zementmörtel und Beton. In: *DAfStb*, (1978), Heft 297
- [59] Hwang, C. L.; Young, J. F.: Drying Shrinkage of Portland Cement Pastes - I. Microcracking during Drying. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 14 (1984), Issue 4, pp. 585 – 594
- [60] Jennings, H. M.: Colloid model of C-S-H and implication to the problem of the creep and shrinkage. In: *Materials and Structures*, Vol. 37 (2004), No. 265, pp. 59 – 70

- [61] Juenger, M. C. G.; Jennings, H. M.: Examining the relationship between the microstructure of calcium silicate hydrate and drying shrinkage of cement pastes. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 32 (2002), Issue 2, pp. 289 – 296
- [62] Justnes, H.; van Gembert, D.; Verboven, F.; Sellevod, E. J.: Total and external chemical shrinkage of low w/c ratio cement paste . In: *Advances in cement Research*, Heft 31 (1996), pp. 121-126
- [63] Keil, F.: *Zement- Herstellung und Eigenschaften*. Springer-Verlag, Berlin (1971)
- [64] Klopfer, H.; *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden (1974)
- [65] Klug, P.: *Kriechen, Relaxation und Schwinden von Zementstein*. München, Technische Universität, Diss., 1973
- [66] Krus, M.: *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken*. Stuttgart, Universität, Diss., 1995
- [67] Kühl, H.: *Zement-Chemie*. Band 3, VEB-Verlag Technik, Berlin (1961)
- [68] Kury, P.: *Untersuchungen zu Verspannung und Morphologie bei der Epitaxie von Ge, Sb und Si auf Si (111)*. Hannover, Universität, Institut für Festkörperphysik, Diplomarbeit, 1999
- [69] Kury, P.; Zahl, P.; Horn von Hoegen, M.: Precise calibration for surface stress induced optical deflection measurements. In: *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, No. 6, pp. 2211 - 2212
- [70] Locher, F. W.; *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Verlag Bau und Technik, Düsseldorf (2000)
- [71] Mears, A. R.; Hobbs, D. W.: The effect of mix proportions upon the ultimate air-drying shrinkage of mortars. In: *Magazine of Concrete Research* 24, Vol. 79 (1972), pp. 77 - 84
- [72] Miyazawa, S.; Tazawa, E.: Influence of Specimen Size and Relative Humidity on Shrinkage of High-Strength Concrete. In: *PRO 17: International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete*, Edited by V. Baroghel-Bouny and P. C. Aitcin, Rilem Publication S.A.R.L., (2000), pp. 233-246
- [73] Mokarem, D. W.; Meyerson, R. M.; Weyers, R. E.: Development of Concrete Shrinkage Performance Specifications. In: *Contract Research, Sponsored by The Virginia Transportation Research Council*, Virginia (2003)

- [74] Müller, H. S.; Kvitsel, V.: Kriechen und Schwinden von Beton, Grundlagen der neuen DIN 1045 und Ansätze für die Praxis. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, Heft 1 (2002), pp. 8-19
- [75] Neubauer, C. M.; Bergstrom, T. B.; Sujata, K.; Xi, Y.; Garboczy, E. M.; Jennings, H. M.: Drying shrinkage of cement paste as measured in an environmental scanning electron microscope and comparison with microstructural models. In: *Journal of Materials Science*, Vol. 32 (1997), pp. 6415 – 6427
- [76] Odler, I.; Köster, H.: Investigation on the Structure of Fully Hydrated Portland Cement and Tricalcium Silicat Pastes. III. Specific surface area and permeability. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 21 (1991), Issue 6, pp. 975 - 982
- [77] Parrott, L. J.; Hansen, W.; Berger, R. L.: Effect of First Drying upon the Pore Structure of Hydrated Alite Paste. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 10 (1980), Issue 5, pp. 647 - 655
- [78] Pihlajavaara, S.E.: A Review of some of the main Results of a Research on the Ageing Phenomena of Concrete: Effect of Moisture Conditions on Strength, Shrinkage and Creep of Mature Concrete. In: *Cement and Concrete Research*, Vol. 4 (1974), Issue 5, pp. 761 – 771
- [79] Powers T. C.: Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste. In: *Cement and Concrete Association*, London, (1965), pp. 319 – 344
- [80] Powers, T. C.: The thermodynamics of volume change creep. In: *Materials and Structures*, Vol. 6 (1968), pp. 487 – 507
- [81] Powers, T. C.; Brownyard, T. L.: Studies of the Physical Properties of Hardened Cement Paste. In: *Bulletin*, Vol.22, Portland Cement Association, Chicago (1948)
- [82] Produktdatenblatt der Firma Hamamatsu
- [83] Ramachandran, V. S.; *Concrete Science*. Heyden & Son GmbH Ltd, (1981)
- [84] Reinhardt, H.W.: *Beton als constructiemateriaal*. Delftse Universitaire Pers., (1985)
- [85] Roper, H.: Dimensional Change and water Sorption Studies of Cement Paste. In: *Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete*, Washington, D.C. (1966), pp. 74 - 83
- [86] Roper, H.; Bryden, J.G.: A combination recording sorption balance and extensometer. In: *Journal of Scientific Instruments*, Vol 41 (1964), pp. 84 - 87

- [87] Roper, H: Shrinkage Tensile Creep and Cracking Tendency of Concretes. In: *Australian Road Research*, Vol. 5 (1964), No. 6, pp 26 – 35
- [88] Rostasy, F. S.: *Theoretische und experimentelle Beiträge zur Erforschung des Schwindens und der Schwindspannungen des Betons*. Stuttgart, Technische Hochschule, Diss., 1958
- [89] Rostasy, F. S.: Zur Theorie der Austrocknung und des Schwindens zementgebundener Massen. In: *Zement-Kalk-Gips* 3 (1960), pp. 93 – 103
- [90] Sabri, S; Illston, J. M.: Isothermal Drying Shrinkage and Wetting Swelling of Hardened Cement Paste. Fundamental Research on Creep and Shrinkage. Editor F. H. Wittmann. In: *The Hague: Martinus Nijhoff Publishers*, (1982), pp. 25 - 34
- [91] Sakata, K.: Prediction of Concrete Creep and Shrinkage. In: *Proceedings of the 5th International RILEM Symposium (ConCreep)*, Barcelona, Spain, (1993), pp. 649 - 654
- [92] Schell-Sorokin, A. J.; Tromp, R. M.: Mechanical Stress in (Sub)monolayer Epitaxial Films. In: *Physical Review Letters*, Vol. 64 (1990), No. 9, pp. 1039 – 1042
- [93] Selig, M.: *Spaltdruck und Adsorptionsverhalten wässriger, kationischer Tensidlösungen in dünnen Schichten zwischen Quarzglasoberflächen*. Essen, Universität, Diss., 1980
- [94] Setzer, M. J.: Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. In: *DAfStb*, Heft 280 (1977)
- [95] Setzer, M. J.: Interaction of water with hardened cement paste. In: *Conf. Advances in cementitious materials. Ceramic Transactions Vol. 16. Westerville Amer. Cer. Soc.* (1991), pp. 415 – 439
- [96] Setzer, M. J.: Persönliche Mitteilung. Universität Duisburg-Essen, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, 2003
- [97] Setzer, M. J.; *Oberflächenenergie und mechanische Eigenschaften des Zementsteins*. München, Technische Universität, Diss., 1972
- [98] Setzer, M. J.; Wittmann, F. H.: Surface Energy and Mechanical Behaviour of hardened Cement Paste. In: *Applied Physics*, Vol. 3 (1974), pp. 403 - 409
- [99] Shimomura, T.; Maekawa, K.: Analysis of drying shrinkage behaviour of concrete using a micromechanical model based on the micropore structure of concrete. In: *Magazine of Concrete Research*, Vol. 49 (1997), No. 181, pp. 303 - 322
- [100] Splittgerber, H.: *Studium der van der Waals Kräfte zwischen Makrosko-*

- pischen Körpern bei Abständen von 100 Å bis 1600 Å.* München, Technische Universität, Diss., 1971
- [101] Stark, J; Wicht, B: Anorganische Bindemittel – Zement – Kalk – Spezielle Bindemittel. In: *Schriftenreihe der Bauhaus – Universität Weimar*, Nr. 109, (1998)
- [102] Stockhausen, N.: Die Dilatation hochporöser Festkörper bei Wasseraufnahme und Eisbildung. München, Technische Universität, Diss., 1981
- [103] Tazawa, E. I.; Sato, R.; Sakai, E.; Miyazawa, S.: Work of JCI Committee on autogenous shrinkage. In: *PRO 17: International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete*, Edited by V. Baroghel-Bouny and P. C. Aitcin, Rilem Publication S.A.R.L., (2000), pp. 21- 40
- [104] Thomas, J. J.; Jennings, H. M.; Allen, A. J.: The Surface Area of hardened cement Paste as measured by various techniques. In: *Concrete Science and Engineering*, Vol. 1 (1999), pp. 45 - 65
- [105] Torroja, E.; de la Peña, C.: Discussion to paper on “Volume changes of concrete” by R. L’Hermite. In: *Chemistry of Cement, 4th Intern. Symp., Wash., D.C., 1960*, U.S. Nat. Bureau of Standards Monograph 43, Vol. II, pp. 695-699.
- [106] Valckenborg, R. M. E.; Pel, L.; Hazrati, K.; Kopinga, K.; Marchand.: Pore water distribution in mortar during drying as determined by NMR. In: *Materials and Structures*, Vol. 34 (2001), No. 244, pp. 599 – 604
- [107] Venuat, M.: Influence du ciment sur le retrait hydraulique apres prise. In: *Colloque International sur le retrait des betons hydrauliques*, Madrid (1968), Vol I, I - H
- [108] Videla, C.; Covarrubias, J. P.; Masana, C.: Updating Concrete Drying-Shrinkage Prediction Models for Local Materials. In: *ACI Materials Journal* V. 101, May - June 2004, No. 3, pp. 187 – 198
- [109] Walz, K.: Bewertung des Schwindmaßes verschiedener Zemente. In: *Beton* 11 1961, Heft 8, pp. 557/558
- [110] Weigler, H.; Karl, S.: *Beton Arten-Herstellung-Eigenschaften*, Herausgeber Prof. Dr.-Ing. H. Kupfer, Technische Universität München, Ernst und Sohn, (1989)
- [111] Will, P.; Lämmel, B.: *Kleine Formelsammlung Technische Mechanik*, 3. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien 2004
- [112] Wischers, G.; Dahms, J.: Kriechen von frühbelastetem Beton mit hoher Anfangsfestigkeit. In: *Betontechnische Berichte 1977*, Düsseldorf: Beton-Verlag, 1978, pp.29-54

-
- [113] Wittmann, F. H.: Grundlage eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons. In: *DAfStb*, Heft 290, (1977)
- [114] Wittmann, F. H.: Zur Ursache der sogenannten Schrumpfrisse. In: *Zement und Beton*, 1975, Heft 85/86, S. 10-16
- [115] Young, J. F.: Material Models for Structural Creep Analysis. In: *Mathematical Modelling of Creep and Shrinkage of Concrete*, Edited by Bažant, Z. P., John Wiley & Sons Ltd (1988), pp. 99 - 216
- [116] Young, J. F.: Physikal Mechanisms and their Mathematical Descriptions. In: *Mathematical Modelling of Creep and Shrinkage of Concrete*, Edited by Bažant, Z. P., John Wiley & Sons Ltd (1988), p. 63 - 97
- [117] Zech, B.: *Zum Gefrierverhalten des Wassers im Beton*. München, Technische Universität, Diss., 1981
- [118] *Zement Taschenbuch*, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf (2002)

10 Anhang

Tabelle 10.1: Einfluss des Dickenverhältnisses auf die bez. Normalspannung in Punkt A und auf die bez. Kopfverschiebung (Bild 6.5)

$t_Z = 1,7 \text{ mm}$ $E_Z = 15.000 \text{ N/mm}^2$ $E_S = 60.000 \text{ N/mm}^2$															
t_S / t_Z	0,01	0,03	0,06	0,09	0,18	0,29	0,35	0,41	0,47	0,59	1,00	1,18	1,47	1,76	2,35
bez. σ_A	0,32	0,53	0,80	0,96	1,14	1,17	1,16	1,14	1,12	1,08	1,00	1,00	1,02	1,06	1,13
bez. w_K	0,44	0,74	1,12	1,34	1,62	1,67	1,65	1,60	1,55	1,43	1,00	0,85	0,66	0,51	0,33

Tabelle 10.2: Kalibrierkurve eines PSD (Bild 6.15)

Weg in μm	PSD-Signal in Volt	Weg in μm	PSD-Signal in Volt
0	0	0	0
250	0,223	-250	-0,437
500	0,629	-500	-0,839
750	1,047	-750	-1,255
1000	1,459	-1000	-1,663
1250	1,868	-1250	-2,077
1500	2,274	-1500	-2,489
1750	2,688	-1750	-2,883
2000	3,097	-2000	-3,304
2250	3,517	-2250	-3,709
2500	3,920	-2500	-4,149
2750	4,338	-2750	-4,583
3000	4,743	-3000	-4,990
3250	5,151	-3250	-5,398
3500	5,571	-3500	-5,873
3750	5,981	-3750	-6,226
4000	6,376	-4000	-6,651
4250	6,804	-4250	-7,013
4500	7,199	-4500	-7,440
4750	7,603	-4750	-7,896
5000	8,014	-5000	-8,249
5250	8,438	-5250	-8,710
5500	8,816	-5500	-9,083
5750	9,199	-5750	-9,485
6000	9,570		

Tabelle 10.3: Ergebnisse der FE-Berechnung unter Variation von E-Modul und Dicke der Kleberschicht (Bild 6.23)

Kopfauslenkung w_K								
z in mm	Variation E-Modul in N/mm ²			Variation Kleberdicke in mm			Vergleich FEM mit Auswertemethode	
	0	2.500	10.000	0	0,10	0,15	FEM	Auswert.
5	-0,006	-0,006	-0,007	-0,006	-0,007	-0,007	-0,006	-0,0061
10	-0,025	-0,025	-0,026	-0,025	-0,026	-0,027	-0,025	-0,0244
15	-0,056	-0,056	-0,058	-0,056	-0,058	-0,059	-0,056	-0,0550
20	-0,099	-0,100	-0,103	-0,099	-0,103	-0,104	-0,099	-0,0978
25	-0,153	-0,155	-0,160	-0,153	-0,160	-0,162	-0,153	-0,1528
30	-0,220	-0,222	-0,229	-0,220	-0,229	-0,232	-0,220	-0,2200
35	-0,298	-0,302	-0,311	-0,298	-0,311	-0,315	-0,298	-0,2995
40	-0,389	-0,394	-0,405	-0,389	-0,405	-0,410	-0,389	-0,3912

Tabelle 10.4: Abnahme des relativen Fehlers mit abnehmendem Krümmungsradius R (Bild 6.25)

R in mm	18.865	11.647	5.351	2.666	2.368	2.234	1.942	1.954	1.595	1.491	638	455
Fehler in %	3,40	2,90	2,61	2,57	2,56	2,56	2,55	2,55	2,54	2,54	2,53	2,53

Tabelle 10.5: Entwicklung des relativen Fehlers von e_h in Abhängigkeit von der Standardabweichung der Eingangsgrößen E_S und t_S (Bild 6.26)

Variation von σ_{ES} $E_S = 60.000 \text{ N/mm}^2$		Variation von σ_{tS} $t_S = 0,15 \text{ mm}$	
σ_{ES}	Fehler in %	σ_{tS}	Fehler in %
0	4,47	0,000	3,72
1.000	4,51	0,003	3,80
2.000	4,64	0,006	4,02
3.000	4,86	0,009	4,37
4.000	5,14	0,012	4,82
5.000	5,49	0,015	5,34
6.000	5,88	0,010	4,51

Tabelle 10.6: Einfluss der Variation von E_S auf das Ergebnis der Schwinddehnung (Bild 6.27)

E_S in N/mm²	50.000	55.000	60.000	65.000	70.000
$\varepsilon_h(E_S) / \varepsilon_h(E_S=60.000)$	1,08	1,03	1,00	0,97	0,95

Tabelle 10.7: Verlauf der PSD-Signale PSD 1 und PSD 2 in Abhängigkeit von der Gleichgewichtsfeuchtigkeit sowie Quotient PSD 1 / PSD 2 (Bild 7.3)

Relative Luftfeuchte in %	PSD-Signal in Volt		Quotient
	PSD 1	PSD 2	
100,0	0,000	0,000	-
96,5	2,251	0,514	4,378
90,4	10,056	1,987	5,061
88,5	15,596	3,306	4,718
87,2	17,567	3,730	4,710
86,9	18,590	3,923	4,739
85,6	21,664	4,796	4,517
86,1	21,508	4,746	4,532
82,7	26,464	5,924	4,467
81,6	28,271	6,293	4,493
77,5	35,027	7,555	4,637
75,7	37,321	8,016	4,656
70,7	45,920	9,551	4,808
67,0	52,675	10,843	4,858
60,6	64,718	13,382	4,836
57,0	72,838	15,531	4,690
54,2	84,362	18,561	4,545
52,4	93,440	21,449	4,356

Tabelle 10.8: Verlauf von (PSD1 - PSD 2) für Desorption und Adsorption (Bild 7.4)

Desorption		Adsorption	
Relative Luftfeuchte in %	Differenz PSD1 – PSD 2 in Volt	Relative Luftfeuchte in %	Differenz PSD1 – PSD 2 in Volt
100,0	0,000	52,4	43,511
96,5	1,050	64,0	40,049
90,4	4,877	65,5	39,297
88,5	7,428	73,3	36,755
87,2	8,363	75,0	36,010
86,9	8,865	82,4	33,086
85,6	10,195	87,8	30,585
86,1	10,131	90,8	28,129
82,7	12,414	92,0	27,321
81,6	13,284	96,8	24,890
77,5	16,605	98,3	23,737
75,7	17,712	99,1	23,577
70,7	21,981		
67,0	25,283		
60,6	31,027		
57,0	34,636		
54,2	39,770		
52,4	43,511		

Tabelle 10.9: Verlauf der Schwind- und Quelldehnungen von Probe 1 ($w/z = 0,60$) (Bild 7.6)

Relative Luftfeuchte in %	Schwind- und Quellverformungen in mm/m		
	Fall 1	Fall 2	Fall 3
100,0	0,00	0,00	0,00
96,5	-0,10	-0,10	-0,09
90,4	-0,46	-0,43	-0,36
88,5	-0,70	-0,67	-0,59
87,2	-0,79	-0,76	-0,67
86,9	-0,84	-0,80	-0,70
85,6	-0,96	-0,94	-0,86
86,1	-0,95	-0,93	-0,85
82,7	-1,17	-1,14	-1,06
81,6	-1,25	-1,22	-1,13
77,5	-1,57	-1,51	-1,35
75,7	-1,67	-1,61	-1,44
70,7	-2,07	-1,98	-1,71
67,0	-2,38	-2,28	-1,94
60,6	-2,92	-2,80	-2,40
57,0	-3,26	-3,15	-2,78
54,2	-3,75	-3,65	-3,32
52,4	-4,10	-4,04	-3,84
64,0	-3,78	-3,70	-3,45
65,5	-3,70	-3,62	-3,35
73,3	-3,46	-3,38	-3,13
75,0	-3,39	-3,31	-3,04
82,4	-3,12	-3,05	-2,85
87,8	-2,88	-2,83	-2,65
90,8	-2,65	-2,62	-2,54
92,0	-2,58	-2,55	-2,48
96,8	-2,35	-2,36	-2,40
98,3	-2,24	-2,27	-2,38
99,1	-2,22	-2,27	-2,40

Tabelle 10.10: Quelldehnung der Proben 1 und 3 ($w/z = 0,60$) (Bild 7.7)

Probe 1		Probe 3	
Relative Luftfeuchte	Quellverformungen	Relative Luftfeuchte	Quellverformungen
in %	in mm/m	in %	in mm/m
52,4	0,00	50,0	0,00
64,0	0,33	65,0	0,34
65,5	0,40	70,7	0,49
73,3	0,64	81,0	0,90
75,0	0,71	85,5	1,27
82,4	0,98	94,4	1,69
87,8	1,22		
90,8	1,45		
92,0	1,53		
96,8	1,76		
98,3	1,86		
99,1	1,88		

Tabelle 10.11: Erstes und zweites Schwinden bzw. Quellen von Zementstein (Probe 2, $w/z = 0,50$) (Bild 7.9)

1. Schwinden und Quellen		2. Schwinden und Quellen	
Relative Luftfeuchte	Verformungen	Relative Luftfeuchte	Verformungen
in %	in mm/m	in %	in mm/m
100,0	0,00	100,0	0,00
93,6	-0,23	92,7	-0,39
88,0	-0,56	94,5	-0,33
83,5	-0,79	88,8	-0,63
74,3	-1,48	84,6	-0,83
66,0	-2,10	77,1	-1,27
58,8	-2,82	73,6	-1,46
46,6	-3,96	66,4	-1,88
50,6	-3,93	59,8	-2,35
55,9	-3,66	54,0	-2,80
62,8	-3,35	45,2	-3,40
68,9	-3,19	56,1	-2,90
74,8	-2,79	66,7	-2,51
81,3	-2,49	73,7	-2,17
82,3	-2,41	78,4	-1,94
88,5	-2,03	86,9	-1,60
96,5	-1,45	98,7	-0,55
98,7	-1,15	100,0	-0,45

Tabelle 10.12: *Schwind- und Quelldehnung in Abhängigkeit vom chemischen Potential Probe 1 und 2 (Bilder 7.10 und 7.11)*

Schwinden und Quellen Probe 1		Schwinden und Quellen Probe 2	
Chemisches Potential in J/mol	Verformungen in mm/m	Chemisches Potential in J/mol	Verformungen in mm/m
0	0,00	-15	0
-88	-0,10	-162	-0,2300292
-249	-0,46	-314	-0,55782082
-301	-0,70	-442	-0,79360076
-335	-0,79	-729	-1,48368837
-343	-0,84	-1019	-2,09901649
-383	-0,96	-1302	-2,82360849
-467	-1,17	-1873	-3,95650232
-500	-1,25	-1669	-3,9281422
-624	-1,57	-1428	-3,66218762
-683	-1,67	-1142	-3,34648646
-850	-2,07	-914	-3,18870333
-983	-2,38	-711	-2,79128427
-1229	-2,92	-508	-2,48501345
-1377	-3,26	-476	-2,41144966
-1503	-3,75	-299	-2,03301042
-1584	-4,10	-86	-1,45103768
-1096	-3,78	-31	-1,145871
-1037	-3,70		
-761	-3,46		
-706	-3,39		
-475	-3,12		
-319	-2,88		
-237	-2,65		
-205	-2,58		
-81	-2,35		
-42	-2,24		