

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

„Master's Thesis“

Einfluss der Temperatur auf das Festigkeitsverhalten von Porenbeton

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

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Ulrich SCHNEIDER

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich BRUCKNER

E206

Institut für Hochbau und Technologie

Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

Von

Slobodan MARTINOVIC

0025412

Anton Baumgartnerstrasse 44, 1230 Wien

Wien, im Herbst 2007

Kurzfassung

Im Allgemeinen sind mechanische Eigenschaften von Porenbeton von der Rohdichte und vom Feuchtegehalt abhängig. In dieser Arbeit wird der Frage nachgegangen, wie sich eine Temperaturbelastung auf die Festigkeitseigenschaften von Porenbeton auswirkt. Dieser Aspekt ist dann von Bedeutung, wenn Bauteile hohen Temperaturen ausgesetzt werden und wenn sie nach Wiederabkühlung eine ausreichend hohe Reststeifigkeit aufweisen müssen. Dazu wurden Probekörper auf 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C und 800 °C erhitzt und der E-Modul, der als Maß für reversible Verformungen dient, bestimmt. Nach Wiederabkühlung der Proben wurde der E-Modul erneut bestimmt. Diese Werte wurden mit den E-Modulwerten bei Normaltemperatur verglichen. Zusätzlich dazu, wurde während des Aufheizens in unterschiedlichen Tiefen des Probekörpers, die Temperatur laufend gemessen. Daraus lässt sich ein charakteristisches Temperatureindringverhalten ablesen. Des Weiteren wurden thermische Analysen (DTA und TG) und die Quecksilberporosimetrie durchgeführt.

Abstract

Mechanical properties of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) mainly depend on its density and the moisture content. The present work is dealing with the influence of thermal action on the strength properties of AAC. This is an important issue if construction elements are subjected to high temperatures and if after cooling on normal temperature the remaining stiffness has to achieve certain values. Therefore Young's Modulus was determined on specimens heated on 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C. After cooling down Young's Modulus was determined again and compared with the values under high temperature. Additionally the temperature intrusion during the heating process was observed. Also thermal analysis (DTA and TG) and the mercury intrusion porosimetry were carried out.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für *Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz* an der *Technischen Universität Wien*.

Mein Dank gilt Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. *Ulrich Schneider* für die Möglichkeit diese Diplomarbeit und die notwendigen Versuche an diesem Institut auszuführen. Mein besonderer Dank gilt Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. *Heinrich Bruckner*, der mir durch seine fachliche Unterstützung und durch seine flexible Betreuung wesentlich bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen hat.

Mein Dank gilt ebenso Hr. Dipl. Ing. *Johannes Kirnbauer*, Hr. Dipl. Ing. *Hubert Kirchberger*, Ing. *Karin Fussenegger* und Ing. *Hans Reschny*.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester, die mich während des gesamten Studiums unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Grundlagen	7
2.1	Geschichte des Porenbetons	7
2.2	Herstellung	9
2.2.1	Zusammensetzung	9
2.2.2	Produktionsablauf	10
2.2.3	Erläuterungen zu den Ausgangsstoffen und Zusatzmittel	14
2.2.4	Chemische Reaktionen bei der Herstellung	18
2.3	Eigenschaften	19
2.3.1	Physikalische Eigenschaften	21
2.3.2	Mechanische Eigenschaften	24
2.3.3	Gebrauchstauglichkeit	32
2.4	Temperatureinfluss	38
2.5	Messmethoden	40
2.5.1	Bestimmung der Trockenrohichte	40
2.5.2	Bestimmung des Feuchtegehaltes	41
2.5.3	E-Modul Bestimmung	42
2.5.4	Differenzthermoanalyse-Thermogravimetrie	44
2.5.5	Quecksilberporosimetrie	49
3	Versuchsplanung	50
3.1	Beschreibung der Versuchsanlagen	51
3.2	Herstellung der Probekörper	60
3.3	Vorversuche	61
4	Versuchsdurchführung und Auswertung	68
4.1	Versuchsprogramm	68
4.2	Wiedergabe der Versuchsergebnisse	71
4.2.1	E-Modul	71
4.2.2	Rest-E-Modul	89
4.2.3	Temperatureindringverhalten	106
4.2.4	Thermische Analyse	116
4.2.5	Quecksilberporosimetrie	120
4.3	Diskussion der Ergebnisse	122
5	Zusammenfassung und Ausblick	132
5.1	Zusammenfassung	132
5.2	Ausblick	133
6	Literatur	135
7	Normen	137
8	Anhang	138

1 Einleitung

Bei Brandversuchen an Porenbeton zeigt sich, dass sich die Festigkeit in Abhängigkeit der Temperatur ändert. Es wird vermutet, dass die chemische Zusammensetzung des Materials, aber auch seine Struktur im Hinblick auf die Porenverteilung, Einfluss auf dieses Verhalten haben. Die Erforschung dieser Wechselwirkung könnte wichtige Informationen über das Materialverhalten bei Temperaturbelastung liefern. Diese Ergebnisse würden somit die Effizienz und nicht zuletzt die Sicherheit in der Verwendung von Porenbeton steigern.

Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung des Einflusses der Temperatur auf den Elastizitätsmodul in Abhängigkeit des Ausgangs-E-Modul des Materials. Es sollen auch der Rest-E-Modul bestimmt werden, sowie thermoanalytische Untersuchungen durchgeführt werden.

Die erste Aufgabe dieser Arbeit wird darin bestehen den „Stand der Technik“ zu untersuchen. Dafür sind alle verfügbaren Daten von Untersuchungen des Porenbetons unter dynamischen Temperatureinflüssen heranzuziehen. Der Zweck dessen ist es, möglichst viel Information über das Materialverhalten im Vorfeld zu sammeln, um eine sorgfältige Versuchsvorbereitung und eine reibungslose Versuchsdurchführung machen zu können.

Im Labor wird der Elastizitätsmodul des Prüfmaterials in Abhängigkeit der Temperaturbelastung experimentell bestimmt. Dazu werden genormte Probekörper bei unterschiedlich hohen Temperaturen untersucht. Die Belastung erfolgt lastgesteuert mit einer Universalprüfmaschine. Es werden Werkstoffproben einer Festigkeitsklasse geprüft. Nämlich Porenbeton „Der Gelbe“ mit der zugehörigen Würfeldruckfestigkeiten von mindestens 2,0 N/mm².

Mit Hilfe des Quecksilberporosimeters wird die Porenverteilung der Probekörper ermittelt. Bei diesem Verfahren wird Quecksilber¹ in die Probe eingepresst. Diese metallische

¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Quecksilber>, 02.03.07

Flüssigkeit ist deswegen so geeignet, weil sie aufgrund ihrer nicht benetzenden Eigenschaften bis in die feinsten Poren durchdringen kann. Aus der Eintrittsgeschwindigkeit und der eintretenden Menge des Quecksilbers kann auf die Porengröße und deren Häufigkeitsverteilung geschlossen werden.

Weiters sind die Probekörper mit Hilfe der Simultanen thermischen Analyse (STA) zu untersuchen. Bei diesem Verfahren werden, während die Substanz langsam erwärmt wird, Gewichts- und Enthalpieänderungen registriert. Diese Änderungen werden durch chemische Reaktionen des Werkstoffes verursacht. Um diese chemischen Reaktionen erfassen zu können, wird gleichzeitig mit der zu untersuchenden Probe eine inerte Probe erhitzt. Die inerte Probe hat die Eigenschaft, dass sie unter den gegebenen Bedingungen nicht reagiert. Aus Temperaturmessungen können die Temperaturverläufe der beiden Proben graphisch dargestellt werden. Der Vergleich zeigt Abweichungen der zu untersuchenden Probe von der Referenzprobe, so genannte Peaks, welche einer chemischen Veränderung des Stoffes bei einer bestimmten Temperatur entsprechen. Diese Peaks können auf eine exotherme Reaktion hinweisen, bei welcher Energie frei wird oder sie deuten auf eine endotherme Reaktion hin, bei welcher Energie verbraucht wird. Einfluss auf die gemessenen Werte haben die Probenvorbehandlung, die Eigenschaften der Prüfanlage und die Eigenschaften der Inertsubstanz.

2 Grundlagen

2.1 Geschichte des Porenbetons

Der Einsatz des Porenbetons im Bauwesen ist in den vergangenen Jahrzehnten gestiegen. Sein Hauptmerkmal ist die relativ hohe Festigkeit bei geringem Eigengewicht. Er wird aus Rohstoffen wie Quarzsand, Zement und/oder Kalk als Bindemittel und Wasser hergestellt. Im Allgemeinen wird ihm durch Zugabe von geringen Mengen Aluminiumpulver als Treibmittel seine feinporige Struktur verliehen. Nach einer bestimmten Vorhärtezeit wird der Rohbaustoff unter Dampfdruck in sogenannten Autoklaven gehärtet und danach verpackt (*Wehrhahn, /1/*).

Erste Entwicklungen begannen schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts (*Tabelle 2-1*). Man versuchte einen Baustoff zu produzieren der billig in der Herstellung war, aber dennoch konstruktive - und Anforderungen an die Dauerhaftigkeit erfüllen konnte. Der Durchbruch gelang dem Schweden *J. A. Eriksson* von der Universität Stockholm im Jahre 1924, der es schaffte die bereits bekannten Verfahren der Porenbildung und der Dampfhärtung zu vereinen. Bald begann die industrielle Produktion des, unter dem damals als Gasbeton bekannten, Baustoffes. 1929 startete die Firma Yxult die Produktion des „Yxhults Anghärdade Gasbetong“ aus dem später - als Abkürzung - die Baustoffmarke Ytong wurde (*BVB-Porenbeton, /3/*). Er wird abgekürzt auch AAC (Autoclaved Aerated Concrete) genannt.

Tabelle 2-1: Herstellung von Porenbeton - Geschichtlicher Überblick (*BVB-Porenbeton, /5/*)

1877	Zernikow: Dampfgehärteter Kalk-Sand-Mörtel mit geringer Festigkeit
1880	Michaelis: Harter und wasserfester dampfgehärteter Baustoff
1889	Hoffmann: Poriger Zement- und Gipsmörtel
1914	Aylsworth und Dyer: Treiben durch Metallpulver
1924	Eriksson: Kombination von Treibverfahren und Dampfhärtung
1945	Serienfertigung großformatiger, bewehrter Platten. Drahtzuschnitt
1958	Normung bewehrter Dach- und Deckenplatten (DIN 4223)
1959	Normung der Steine und Bauplatten (DIN 4165 und DIN 4166)
1960	Planstein: nahezu fugenfreies Mauerwerk möglich
1977	Nut- und Feder-Verbindung: erleichtert und beschleunigt den Rohbau – kein Vermörteln der Stoßfugen

1983	Grifftasche: erleichtert die Handhabung und Verarbeitung von Plansteinen
1987	Planelement: Rationalisierung durch reduzierte Verarbeitungszeiten
1994	Flachsturz: geringes Gewicht, Versetzen von Hand möglich
1996	Planelement im Doppelpack: weiterer Schritt zum kostenoptimierten Bauen
2000	Planelement lang: bis zu 1,9 m2 Mauerwerk mit nur einem Kranhub

Seine Verwendung fand Porenbeton ursprünglich nur als Isolationsmaterial. Nach und nach bestand aber ein immer größeres Interesse an seinen konstruktiven Eigenschaften. Gekennzeichnet durch sein geringes Gewicht und durch die wirtschaftliche Herstellung, wurde seine Entwicklung in den vergangenen Jahrzehnten durch die Industrie stark vorangetrieben. Porenbeton gehört zur Gruppe der Leichtbetone. Sein spezifisches Gewicht kann durch Veränderung der Parameter in der Herstellung und der Nachbehandlung zwischen 300 kg/m^3 und 1000 kg/m^3 variieren.

Während der Produktion wird der Porenbeton nach Erreichen einer bestimmten Standfestigkeit in beliebige Formen und Größen geschnitten. Danach wird er in Autoklaven dampfgehärtet. Dabei können große monolithische Konstruktionen hergestellt werden, sowie kleinere auf die Erfordernis abgestimmte Formen. Porenbetonsteine lassen sich auf der Baustelle mit elektrischen Sägen oder Handsägen zuschneiden. Dies ermöglicht eine Flexibilität bei der Installation.

2.2 Herstellung

Porenbetonsteine werden stationär in industriellen Verfahren hergestellt. Bedingt durch immer gleichbleibende Herstellungsbedingungen, erhalten die Endprodukte stets gleiche Eigenschaften und die gleiche Qualität. Porenbetonsteine können bewehrt oder unbewehrt sein.

2.2.1 Zusammensetzung

Die erforderlichen Rohstoffe für die Herstellung sind:

- Quarzhaltiger Sand, oder andere Quarzhaltige Zuschlagstoffe
- Gegebenenfalls Zusatzstoffe
- Bindemittel
- Treibmittel
- Wasser.

Der Quarzsand muss frei von Verunreinigungen sein. Außer Sand werden auch Flugaschen aus Industrieabfällen als Zuschlagstoffe verwendet. Dabei ist der Gehalt an Siliziumoxid von Bedeutung.

Als Zusatzstoffe werden geringe Anteile von Gips und Anhydrit verwendet. Der Mischung werden ebenfalls Recyclingrohstoffe aus Porenbeton beigemischt.

Als Bindemittel verwendet man gemahlene Branntkalk und/oder Zement, wobei hauptsächlich Portlandzement zum Einsatz kommt. Es können aber auch andere Zementsorten beigemischt werden.

Als Treibmittel wird Aluminium in Pulverform oder als Paste eingesetzt. Dieses löst eine chemische Reaktion aus, bei welcher Wasserstoff frei wird und die Poren bildet. Es existieren auch mechanische Methoden zur Porenbildung, etwa mit Schäummitteln wie

Schaumwaschmitteln, Kunstharzseifen, etc. (Narayanan, S.322 /2/). Dabei werden die Poren ohne chemischen Einfluss gebildet. Diese Methode kommt vorwiegend bei Schaumbetonen zur Anwendung.

Das Wasser muss sauber sein. Es löscht unter Wärmeentwicklung den Kalk. Das Aluminiumpulver reagiert mit diesem alkalischen Gemisch. Dabei wird gasförmiger Wasserstoff frei, der die Poren bildet und zur Gänze entweicht. Die feste Porenwandstruktur sind vor allem Kalziumsilikathydrate, die dem in der Natur vorkommenden Material Tobermorit entsprechen (Weber, S. 11 /6/).

Im Folgenden werden einige Beispiele für die Rezeptur dargestellt. Zum Beispiel können Porenbetone gleicher Dichte unterschiedliche Anteile an Zement und Kalk aufweisen (Tabelle 2-2). Die verwendete Rezeptur hängt von der gewünschten Endproduktgüte ab und von den Eigenschaften der jeweiligen Rohstoffe. Aus 1m³ Rohstoffe werden ungefähr 5m³ Porenbeton erzeugt.

Tabelle 2-2: Beispiele für die Rezeptur von Porenbeton (Weber, S. 12 /6/)

Rohstoffe [kg/m ³]	Rohdichte [kg/m ³]		
	500	500	600
Quarzhaltiger Sand	350	330	420
Kalk	100	35	110
Zement	25	90	30
Aluminiumpulver	0,5	0,5	0,4
Wasser	330	330	440
Anhydrit	-	20	-

2.2.2 Produktionsablauf

Porenbeton kann in unterschiedlichen Dichten und Festigkeiten hergestellt werden. Seine physikalischen und mechanischen Eigenschaften hängen von der Mischungsrezeptur und von Einflussgrößen bei der Nachbehandlung ab.

Der Ablauf der Produktion kann wie folgt schematisch dargestellt werden (*Abbildung 2-1*):

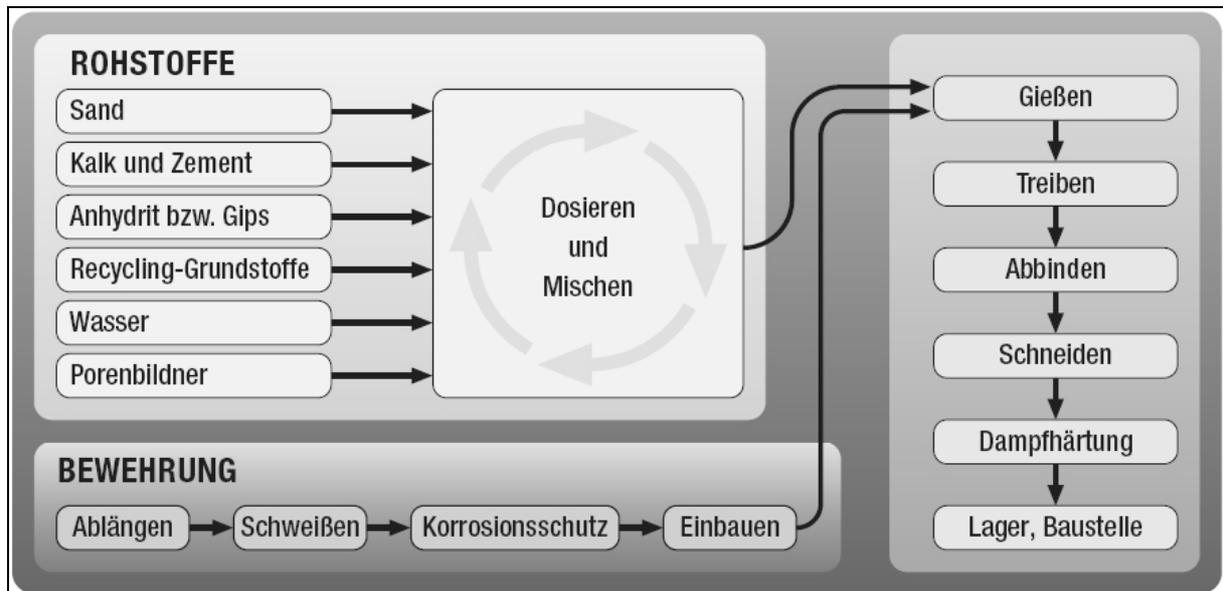


Abbildung 2-1: Ablauf der Produktion von Porenbeton (*Weber, S. 11, /6/*)

Vor der Verwendung müssen alle Rohstoffe überprüft werden. Es muss sichergestellt werden, dass sie den Anforderungen der entsprechenden Normen genügen. Als erstes werden der gemahlene Quarzsand, Kalk, Zement, Aluminiumpulver oder -paste, eventuell Recyclingrohstoffe und andere Zusatzstoffe und Wasser, mit Hilfe einer Dosiereinrichtung anteilmäßig der Rezeptur entsprechend, in den Mischer befördert. Nach einer vorgegebenen Mischzeit, wird die wässrige Suspension in Formen gegossen (*Abbildung 2-2*). Für bewehrte Montagebauteile wird in einem vorgeschalteten Arbeitsschritt die Bewehrung abgelängt, zu Bewehrungskörben zusammenschweißt, mit Korrosionsschutz versehen und vor oder nach dem Gießen in Formen eingebaut (*Abbildung 2-3*).



Abbildung 2-2: Einfüllen der Rohstoffmischung in die Form (BVB, /5/)

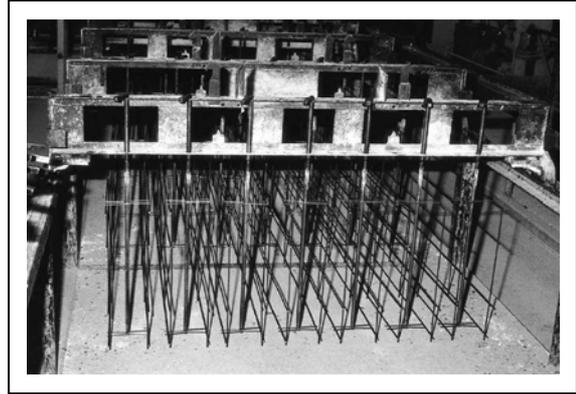


Abbildung 2-3: In Formen eingebaute Bewehrung (BVB, /5/)

Dort beginnt der chemische Prozess der Porenbetonverfestigung. In der ersten Reaktion löscht Wasser den Kalk. Das dadurch entstandene Kalziumhydroxid reagiert im Folgenden mit Aluminium und setzt gasförmigen Wasserstoff frei, der die Poren bildet und vollständig entweicht (Treibvorgang). Dabei erfährt die breiige Masse eine Volumsvergrößerung auf das zweifache. Die nächste Reaktion wird Abbinden genannt. Dabei wird durch die Kalklöschung zusätzliches Kalziumhydroxid gebildet. Nun reagieren die in Wasser aufgelösten Kalziumsilikate des Zements mit dem Kalziumhydroxid zu Calziumsilikathydrat (C-S-H). In dieser Phase steift die Porenbetonrohmasse bis zur Standfestigkeit an. Diese Rohblöcke werden im nächsten Schritt aus den Formen herausgenommen und maschinell mit Hilfe von straff gespannten Seilen mit hoher Genauigkeit geschnitten (Abbildung 2-4, Abbildung 2-5).

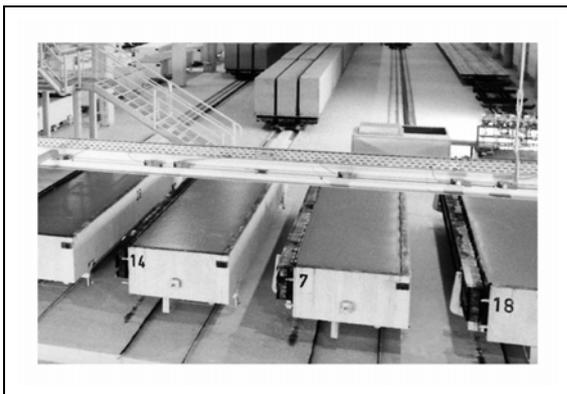


Abbildung 2-4: Abbinden der Rohstoffmischung bis zur Standfestigkeit (BVB, /5/)



Abbildung 2-5: Schneiden des Rohblocks mittels straff gespannter Drähte (BVB, /5/)

Anschließend werden die Blöcke in Autoklaven gehärtet (*Abbildung 2-6*), wo sie ihre endgültige Festigkeit erfahren. Autoklaven sind luftdichte Kammern, in welchen die Proben hohen Dampfdrücken und Temperaturen ausgesetzt werden können. Sie werden in diesen Dampfkesseln 5-12 Stunden lang, einer Temperatur von etwa 190°C und einem Druck von ca. 12 bar ausgesetzt. Erst bei dieser hohen Temperatur wird der Quarzsand, der sich bei niedrigen Temperaturen inert verhält (*Fournier, /15/; Walk, /16/*), löslich und reagiert mit Kalziumhydroxid bzw. mit der C-S-H-Phase und bildet das Mineral Tobermorit.

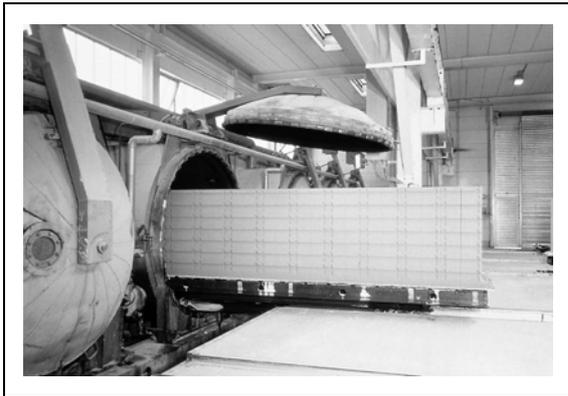


Abbildung 2-6: Geschnittene Plansteine werden in Autoklaven gehärtet (*BVB, /5/*)



Abbildung 2-7: Plansteine auf Palette verpackt

Als Beispiel ist in der unteren Abbildung der zeitliche Verlauf der Porenbetonherstellung der finnischen Firma „Siporex Oy“ dargestellt (*Abbildung 2-8*). Das Mischen erfolgt computergesteuert und dauert ungefähr 5 Minuten. Die Eingangsstoffe wurden zuvor auf eine Temperatur von circa 40°C vorgewärmt. Der anschließende Treibvorgang dauert ca. 9 Stunden bei 60°C. Nachdem der „Kuchen“ seine Standfestigkeit erreicht hat, wird er geschnitten und für die Autoklaven vorgewärmt. In den Autoklaven eingebracht, verweilen die Steine 14 Stunden lang, bei einer Temperatur von 185°C bei 11 bar Druck. Anschließend werden die Steine abgekühlt und in Schrumpffolien verpackt (*Holt, /18/*).

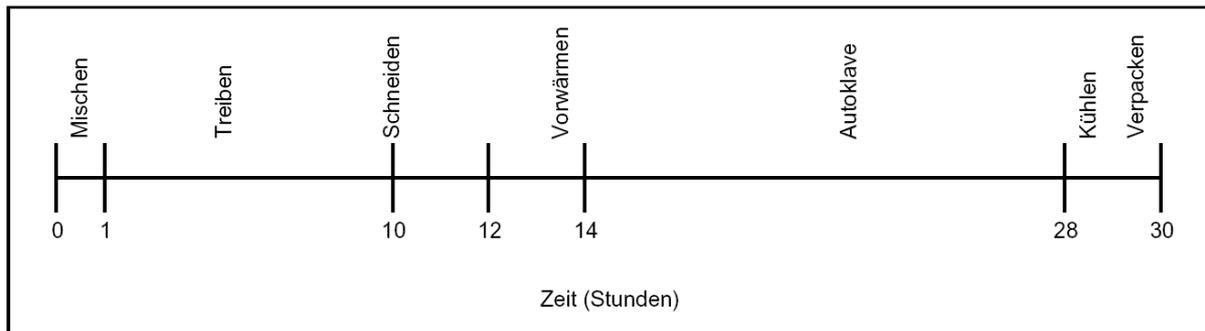


Abbildung 2-8: Zeitlicher Verlauf der Porenbetonherstellung (*Siporex Oy*)

2.2.3 Erläuterungen zu den Ausgangsstoffen und Zusatzmittel

Sand

Der quarzhaltige Sand (Siliziumoxid-Träger) wird in großen Mühlen (*Abbildung 2-9*, *Abbildung 2-10*) zementfein oder zu Schlämmen gemahlen. Untersuchungen haben ergeben, dass die Mahlfineinheit bzw. die Partikelgröße des Quarzsandes Einfluss auf die erforderliche Dampf härtezeit und auf die Festigkeit von Porenbeton haben. Fein gemahlener Quarz bedingt eine schnellere Bildung von Tobermorit und reduziert die Dampf härtezeit (*Norifumi, /7/*). Gröber gemahlener Quarz erhöht die Kristallinität des Tobermorit und bewirkt eine höhere Druckfestigkeit und einen höheren E-Modul des Porenbetons (*Norifumi, /8/*).

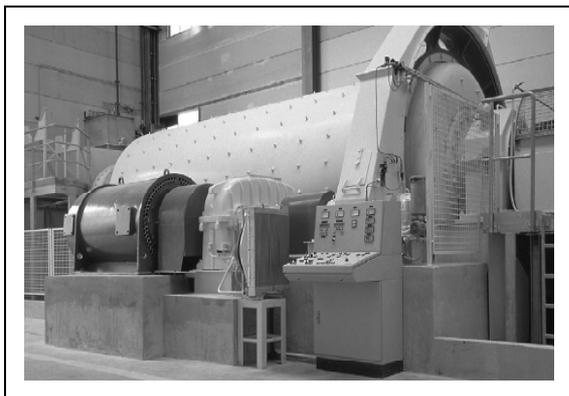


Abbildung 2-9: Sandmühle (*BVB, /5/*)

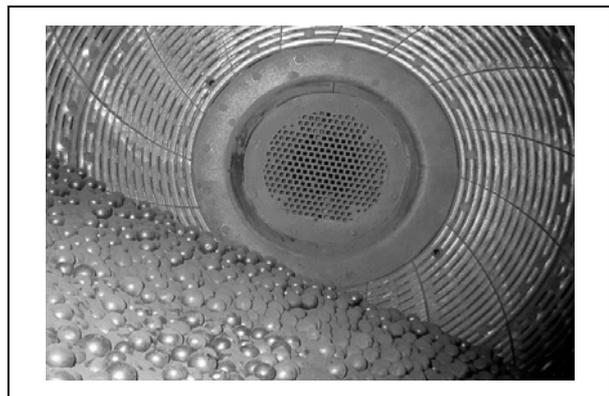


Abbildung 2-10: Blick ins Innere der Sandmühle Stahlkugeln vermahlen Quarzsand bei rotierender Trommel (*BVB, /5/*)

Zement

Als Bindemittel verwendet man gemahlene Brantkalk und/oder Zement. Bei Zementen wird in der Regel Portlandzement verwendet, aber auch andere Zementsorten sind möglich. Zemente sind hydraulische Bindemittel, d. h. sie erhärten bei Anwesenheit von Wasser. Sie setzen sich aus Zementklinker und Sulfatträger zusammen. Der Zementklinker setzt sich bis zu 80 % aus Trikalziumsilikat (C_3S) und Dikalziumsilikat (C_2S) zusammen. Außerdem enthält er noch Anteile des Trikalziumaluminat (C_3A) und Tetrakalziumaluminatferrit (C_4AF). Die erwähnten Kalziumsilikate sind beim Abbindevorgang beteiligt. Das Trikalziumaluminat ist zusätzlicher Lieferant des Aluminiums, der wiederum für die Porenbildung durch den Wasserstoff zuständig ist. Als Sulfatträger im Zement wird Gips verwendet. Er ist für die Regelung der Verarbeitungszeit notwendig. Die Mahlfineinheit regelt die Abbindegeschwindigkeit des Zementes und wird durch die spezifische Oberfläche (Blainewert) beschrieben. Sie beträgt im Allgemeinen 3000 – 5000 cm^2/g beim Zement (*Zementindustrie, /10/*).

Kalk

Für die Erzeugung von Kalk bzw. Brantkalk muss der in der Natur vorkommende Kalkstein thermisch zersetzt werden. Die Kalksteinzersetzung läuft nach einer heterogenen, reversiblen Dissoziationsreaktion ab: $\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$

Um die Reaktion der Kalksteinzersetzung in Gang zu setzen ist eine Temperatur von mindestens 900°C notwendig. Dabei wird Kalkstein unter Freisetzung von Kohlendioxid in Brantkalk umgewandelt. Durch die Variation der Temperatur, der Verweilzeit, Geschwindigkeit der Temperaturerhöhung u.a. können auf die Erfordernis angepasste Eigenschaften des Brantkalks erreicht werden. Im Allgemeinen sind Brenntemperaturen zwischen 900°C und 1250°C (Sintergrenze) üblich. Diese Anpassung ist nur bei der Herstellung von großen Mengen sinnvoll, da dies mit großem Aufwand verbunden ist. Der Brantkalk kommt in gemahlener Form zum Einsatz, deswegen spielt die Mahlfineinheit beim Reaktionsverlauf auch eine Rolle. Ein Brantkalk der bei der Porenbildung zu schnell reagiert setzt viel Wärme auf einmal frei. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Bildung der Poren, was sich negativ auf die Eigenschaften des Endprodukts niederschlagen kann. Bei der Porenbetonherstellung kommt der sogenannte Hartbrantkalk zum Einsatz. Seine

Reaktionsgeschwindigkeit mit Wasser ist gering – im Vergleich zu Weichbranntkalk (/12/). Er wird bei höheren Brenntemperaturen hergestellt. Seine Nachteile sind die hohen Kosten für die Herstellung und seine längere Abbindezeit die den Produktionsprozess verlangsamt (*Huege, /11/*).

Anhydrit und Gips

Anhydrit und Gips sind Sulfatträger und dienen zur Steuerung der Erstarrungszeit des Porenbetons. Sie stammen aus natürlichen Vorkommen oder werden technisch erzeugt.

Aluminium

Aluminiumpulver oder Aluminiumpaste (0,05-0,1 Gew.%) dienen als Porosierungsmittel. Sie reagieren im alkalischen Milieu unter Abgabe von Wasserstoff.

Recycling-Grundstoffe

Porenbetonbauteile die beim Abbruch oder Rückbau von Gebäuden entstehen, können zu Rohstoffen für die Porenbetonherstellung wiederaufbereitet werden. Voraussetzung dafür ist eine sorgfältige Trennung beim Abbruch und dass keine Verbindungen heterogener Baustoffe vorgenommen wurden. Das Material muss also frei von jeglichen Verunreinigungen sein. Ein weiterer Punkt bei der Verwendung von Recycling-Grundstoffen ist die Wirtschaftlichkeit. Dabei sind der Energieaufwand für die Wiederaufbereitung zu berücksichtigen, ebenso der Aufwand für den Abbruch, Trennung und den Transport. Werden diese Faktoren bei der Produktion mitberücksichtigt, ist die Verwendung von Recycling-Grundstoffen nicht immer lohnend (*Weber, S. 21 /6/*).

Flugaschen

Statt Sand als Füller oder als Zusatz zum Sand werden auch hochwertige Flugaschen verwendet. Sie entstehen als Rückstand bei Verbrennungen, beispielsweise in Wärmekraftwerken oder Müllverbrennungsanlagen. Als Rohstoff für die Porenbetonherstellung ist ihr Gehalt an Siliziumoxid von Bedeutung. Untersuchungen von *Narayanan (/9/)* ergaben jedoch, dass die Verwendung von Flugaschen den Hydratationsprozess des Zements verlangsamt. Außerdem läuft die Bildung der Kristallstruktur des Tobermorit nicht vollständig ab und das Schwindmaß während der

Erhärtungszeit ist auch größer als bei der Verwendung von reinem Quarzsand. Diese Umstände wirken sich nachteilig auf die Festigkeitsentwicklung von Porenbeton aus.

Wasser

Das Wasser muss rein sein. Es wird meistens vor dem Mischen auf ca. 60 °C vorgewärmt.

Schalöl

Schalöl dient als Trennmittel zwischen Form und Porenbetonbrei. Eingesetzt werden PAK²-freie mineralische Öle unter Zusatz von langkettigen Additiven zur Viskositätserhöhung. Damit wird ein Abfließen in der Form verhindert und ein sparsamer Einsatz ermöglicht (AUB, /13/).

Korrosionsschutzmittel

Porenbeton hat einen merklich niedrigeren pH-Wert als Beton. Er bewegt sich zwischen 10 und 11. Durch die poröse Struktur des Porenbetons ist die Bewehrung durch Umwelteinflüsse wie zum Beispiel durch Schwefeldioxid aus der Luft, der unter Präsenz von Wasser zu Schwefelsäure reagiert, besonders gefährdet. Ein weiteres Gefährdungspotential stellen salzsäurehaltige Atmosphären dar. Deswegen werden Bewehrungskörbe oder -matten für Montagebauteile in einem Tauchbad mit Korrosionsschutzmittel versehen. Eingesetzt werden vorwiegend stabile wässrige Dispersionen auf Basis von Bitumen, mit Beimischungen von Quarz zur Erhöhung der Haftung, aber auch anorganische Materialien, wie zum Beispiel Zementschlämme mit Beimischungen zur Erhöhung der Geschmeidigkeit. Bewehrungselemente müssen exakt in die Formen platziert werden. Einerseits weil die Blöcke nach dem Ansteifen geschnitten werden müssen und andererseits muss die erforderliche Betondeckung berücksichtigt werden (Weber, S. 12 /6/; Kus, /14/).

Faser

Als Verstärkung der Porenwandstruktur können auch Fasern eingesetzt werden. In Ihrer Erfindung zeigen *Creamer et al.*, dass durch die Beimischung von geringen Mengen Glasfaser und Polypropylenfaser akzeptable Druckfestigkeiten von ca. 3 N/mm² erreicht werden können – allerdings ohne Dampfdrucknachbehandlung (*Creamer, /19/*).

² PAK – Polyzyklische Aromatische Kohlenstoffverbindungen, wirken krebserregend

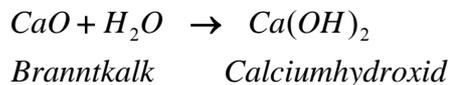
Hydrophobiermittel

Hydrophobiermittel reduzieren die Wasseraufnahme von Montagebauteilen und werden bei Kundenwunsch aufgebracht. Eingesetzt werden wasserlösliche Methylsilikonate (AUB, /13/).

2.2.4 Chemische Reaktionen bei der Herstellung

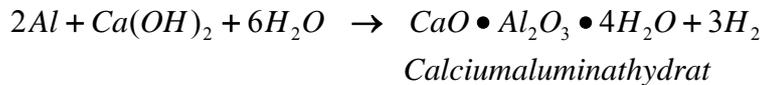
Im Folgenden werden chemische Reaktionen dargestellt, die bei der Herstellung von Porenbeton stattfinden.

Kalklöschung – erfolgt unmittelbar nach dem Gießen in Formen



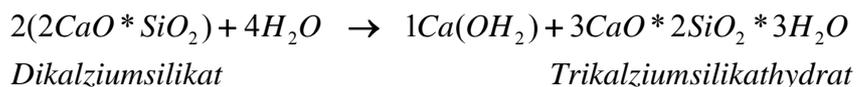
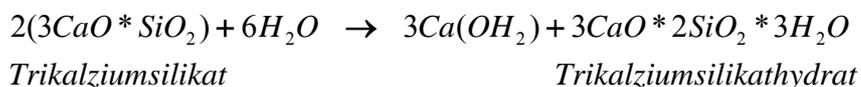
Das Wasser löscht unter Wärmeentwicklung den Kalk.

Treiben – Aufblähen der breiigen Mischung durch Porenbildung



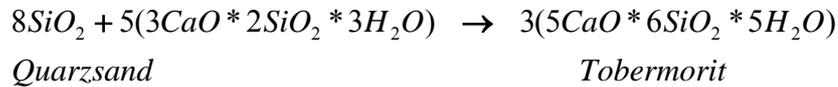
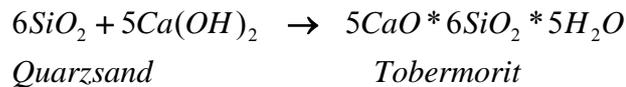
In Reaktion mit Aluminium entstehen Calciumaluminathydrat und Wasserstoff. Wasserstoff entweicht und bildet die Luftporen. Porenbildung erfolgt unter Volumsvergrößerung auf etwa das zweifache.

Abbinden – Ansteifen bis zur Standfestigkeit



Hydraulische Kalziumsilikate aus dem Zement reagieren mit Wasser zu Kalziumhydroxid und Kalziumsilikathydrat (C-S-H).

Härten – Dampfhärtung in Autoklaven bei hohem Druck und hoher Temperatur



In den Autoklaven reagiert der Quarz einerseits mit Kalziumhydroxid und andererseits mit Kalziumsilikathydrat und bildet das kristalline Mineral Tobermorit.

2.3 Eigenschaften

Die Beschreibungen der Eigenschaften von Porenbeton sind über eine Vielzahl verschiedenartiger Quellen verstreut. Die meisten Angaben sind in Publikationen von Porenbetonherstellern zu finden. Diese Daten sind jedoch größtenteils auf Fertigteilelemente bezogen und oft auf Bauindustrieerfordernisse ausgerichtet. Ergebnisse von wissenschaftlichen Untersuchungen sind in Fachzeitschriften zu finden. Diese befassen sich vorwiegend mit den Einflüssen verschiedener Zusatzstoffe und Rezepturen auf die Porenbetoneigenschaften, sowie mit Variationen im Herstellungsprozess.

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Eigenschaften von Porenbeton, wie zum Beispiel die Dichte, mechanische Eigenschaften, Volumsänderungen, thermisches - und Feuchtigkeitsverhalten usw., zusammengefasst. Die entsprechenden Werte sind Richtwerte und entsprechen dem heutigen Stand der Technik. Sie können nicht immer extrapoliert werden und die Anwendung ist mit Vorsicht zu genießen. Sie wurden aus der Literatur entnommen und sind oft länderspezifisch.

Porenbetone lassen sich nach der Besonderheit in der Herstellung wie folgt einteilen (Narayanan, /2/):

- Nach der Methode der Porenbildung

Im Allgemeinen unterscheidet man zwei Methoden der Porenbildung. Die erste Methode ist die am meist angewandte. Hierbei werden Chemikalien beim Mischen des Zement- und/oder Kalkmörtels hinzugefügt. Sie reagieren mit dem Zement/Kalk, setzen dabei Gase frei, welche die Poren bilden und somit zur Volumsvergrößerung führen. Nach dem entweichen der Gase bleibt eine poröse Struktur über. Zum Einsatz kommen Aluminiumpulver- oder paste, oder Wasserstoffperoxyd oder Kalziumkarbid. Diese bilden Wasserstoffgas, Sauerstoff bzw. Acetylen (Ethin). Am häufigsten wird Aluminiumpulver verwendet. Die Effizienz des Aluminiumpulvers hängt von seiner spezifischen Oberfläche ab, vom Reinheitsgrad, von der Alkalität des Zementes und auch von den getroffenen Maßnahmen, das Entweichen des Gases vor der Porenbildung zu verhindern.

Die zweite Methode der Porenbildung ist eine mechanische. Hierbei kommt es zu keinen chemischen Reaktionen mit dem Mörtel. Die Poren werden mit Hilfe von Schäummitteln, beispielsweise mit Schaumwaschmitteln oder Kunstharzseifen, gebildet. Diese Methode ist sehr verlässlich, insbesondere im Hinblick auf die Gleichmäßigkeit der Porenstruktur. Sie wird hauptsächlich bei der Schaumbetonherstellung angewendet.

Es können auch beide Methoden miteinander kombiniert werden.

- Nach der Bindemittelart

Es werden Zement oder Kalk verwendet, aber am häufigsten beide. Weiters werden Flugasschen als Additiv zum Bindemittel eingesetzt.

- Nach der Methode der Nachbehandlung

Porenbeton kann dampfgehärtet (*Autoclaved Aerated Concrete – AAC*) oder nicht dampfgehärtet (*Non Autoclaved Aerated Concrete – NAAC*) sein. Eigenschaften wie die Druckfestigkeit, Trocknungsschwinden, Absorptionseigenschaften usw. hängen direkt von der Dauer und Art der Nachbehandlung ab. Die Festigkeitsentwicklung beim *NAAC* läuft langsamer ab als beim *AAC* und die Endfestigkeit ist deutlich geringer. Andere Einflussgrößen sind das Alter und der Zustand der Mischung vor der Nachbehandlung und die Rate der Temperatur- bzw. Dampfdruckerhöhung.

2.3.1 Physikalische Eigenschaften

Porosität, Porengrößenverteilung, Durchlässigkeit

Eigenschaften des Porenbetons wie Druckfestigkeit, Durchlässigkeit, Diffusionsvermögen, Kriechen und Schwinden stehen im unmittelbaren Zusammenhang mit der Porosität und mit der Porengrößenverteilung. Aus diesem Grund sind Kenntnisse der Porenstrukturbeschaffenheit von großer Bedeutung und nicht zuletzt wegen des bis zu 80%-igen Porengehaltes beim Porenbeton. Die Porosität und die Porengrößenverteilung variiert stark je nach Zusammensetzung des Gemisches und ist ebenfalls von der Nachbehandlung abhängig.

Für die Ermittlung der Charakteristiken der Porenstruktur bedient man sich unterschiedlicher Meßmethoden. Beim Porenbeton sind es die Rasterelektronenmikroskopie (REM), die Bildanalyse, die Quecksilberporosimetrie und die Gassorption. Jedes dieser Messverfahren gibt Aufschluss über eine bestimmte Eigenschaft, d.h. es lassen sich nicht alle Parameter mit der Durchführung einer Messung feststellen. Entsprechend sind die Messbereiche der einzelnen Verfahren zu berücksichtigen.

Die Porengröße der sichtbaren Poren liegt im Millimeterbereich, sie verleiht dem Porenbeton seine typische zelluläre Struktur (*Abbildung 2-11*).

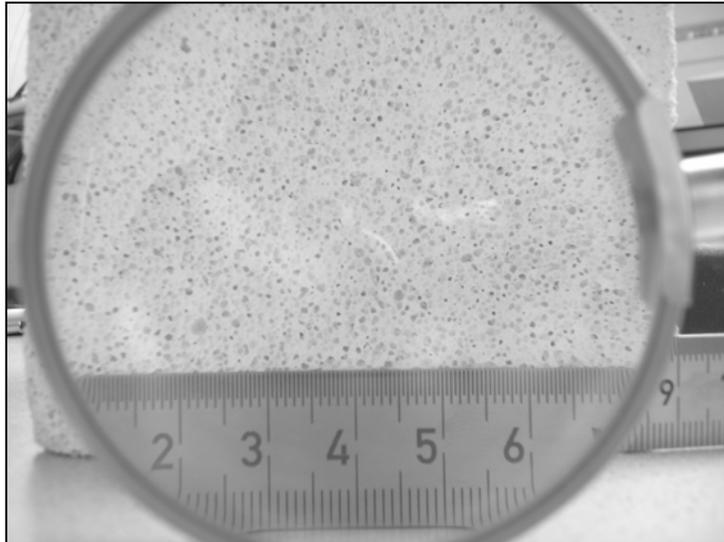


Abbildung 2-11: Porenstruktur in natürlicher Größe - eine geschlossenzellige Struktur mit dünnen Zellwänden

Die Größe und die Form der Poren üben Einfluss auf die Eigenschaften des Materials aus. Die beim Treibvorgang aufsteigenden Gasbläschen haben infolge des ihnen entgegenwirkenden Widerstandes eine ellipsoide Form, wobei die längere Achse senkrecht zur Treibrichtung verläuft. Dadurch ist die Druckfestigkeit in Treibrichtung immer etwas geringer, wie auch Prüfungen bestätigt haben (*Deckers, /21/; EN 679, 1993*).

Mikrostruktur

Die Mikrostruktur des Porenbetons steht mit der Methode der Porenbildung im direkten Zusammenhang. Das Strukturgefüge des festen Porenbetons besteht aus einer mikroporösen Matrix und den Makroporen. Die Makroporen entstehen beim Aufblähen des Mörtels durch Gasfreisetzung und die Mikroporen bilden sich in den Wänden zwischen den Makroporen. Als Makroporen betrachtet werden Poren mit einem Durchmesser von 50-1000 μm während Mikroporen einen Durchmesser von 50 nm aufweisen. Obwohl der Porengehalt beim AAC und NAAC nahezu identisch ist, sind deutliche Unterschiede in der Struktur zu erkennen. Sie werden durch unterschiedliche chemischen Reaktionen bei der Härtung hervorgerufen. Der AAC weist eine mikrokristalline Struktur mit einer vergleichsweise geringen spezifischen Oberfläche auf, was sich positiv auf die Festigkeit des Materials niederschlägt (*Narayanan, /2/*).

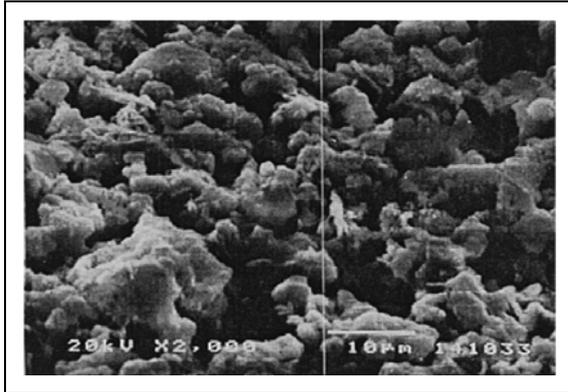


Abbildung 2-12: REM-Aufnahme der Porenstruktur von NAAC (Narayanan, /9/)

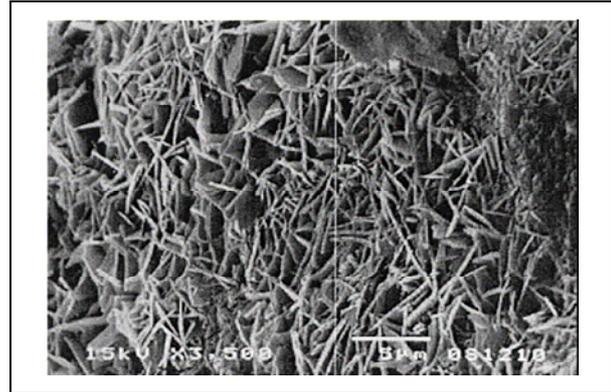


Abbildung 2-13: REM-Aufnahme der Porenstruktur von AAC (Narayanan, /9/)

Die obigen Abbildungen zeigen Rasterelektronenaufnahmen von NAAC und AAC. In der *Abbildung 2-12* ist die Porenstruktur eines normal gehärteten Porenbetons nach 90 Tagen dargestellt. Charakteristisch für den NAAC ist, dass sich die Mikrostruktur mit der Zeit weiter verändert. Die Umwandlung der CSH-Phasen in Tobermorit läuft hier nicht vollständig ab. Bei dampfgehärtetem AAC im Gegensatz, werden die CSH-Phasen fast vollständig in Tobermorit umgewandelt (*Abbildung 2-13*). Die für Tobermorit charakteristischen Leisten und Fasern sind eng miteinander zu einem Netzwerk verflochten. Nach der Dampfhärtung ist das Strukturgefüge vollständig ausgebildet und ändert sich nicht mehr. Tobermorit ist die wichtigste Phase der Dampfhärtung. Der Bildungsbereich des sogenannten 1,13 nm Tobermorits liegt zwischen 110°C und 275°C. Der Name stammt von einem sehr seltenen Mineral das zum ersten mal in Tobermory in Schottland gefunden wurde (*Deckers, /21/*).

Die Rohdichte

Wie bereits erwähnt, kann der Porenbeton durch Variation der Faktoren im Herstellungsprozess in unterschiedlichen Rohdichten hergestellt werden. Die Rohdichte hat Einfluss auf die Porenstruktur und die wiederum auf Eigenschaften wie die Festigkeit. Bei der Ermittlung der Rohdichte ist auf den Feuchtigkeitsgehalt zu achten. Direkt aus den Autoklaven entnommene Blöcke können bis zu 25 % schwerer sein als ofentrockenes Material. Im Allgemeinen liegt die Rohdichte des Porenbetons zwischen 300 kg/m³ und 1000 kg/m³.

2.3.2 Mechanische Eigenschaften

Die Druckfestigkeit

Porenbetonkörper können in unterschiedlichen Festigkeitsklassen hergestellt werden. Probekörpergröße und -form, Methode der Porenbildung, Belastungsrichtung, Alter, Feuchtigkeitsgehalt, Eigenschaften der Zusatzstoffe, Vorhandensein der Bewehrung, Methode der Nachbehandlung, alle wirken sich auf die Festigkeit aus. Die Porenstruktur und ihre Beschaffenheit wirken sich ebenfalls auf die Festigkeit aus. Analysen haben ergeben, dass sich die Reduktion der Dichte durch die Herstellung großer Poren negativ auf die Festigkeit auswirkt. Im Allgemeinen steigt die Festigkeit proportional zur Rohdichte. Werte für unterschiedliche Dichten sind der *Tabelle 2-3* zu entnehmen. In Abhängigkeit von der Dauer, der Temperatur und des Druckes während der Dampfdruckhärtung erreicht der Porenbeton seine endgültige Festigkeit, welche sich durch das Einstellen einer stabilen Form des Tobermorits ergibt (*Narayanan, /2/*).

Tabelle 2-3: Eigenschaften von Porenbeton (*Narayanan, /2/*)

Rohdichte [kg/m ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Wärmeleitfähigkeit [W/m°C]
400	1,3-2,8	180-1170	0,07-0,11
500	2,0-4,4	1240-1840	0,08-0,13
600	2,8-6,3	1760-2640	0,11-0,17
700	3,9-8,5	2420-3580	0,13-0,21

Die Druckfestigkeit ist in Treibrichtung bis zu 10 % niedriger als rechtwinkelig zur Treibrichtung. Deswegen sollten die Druckfestigkeit für Porenbetonelemente immer in Richtung der zukünftigen Belastung ermittelt werden.

Weiters ist die Druckfestigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt abhängig. Wenn der Feuchtigkeitsgehalt unter 10 Gew.-% fällt, steigt im Allgemeinen die Druckfestigkeit (*Abbildung 2-14*).

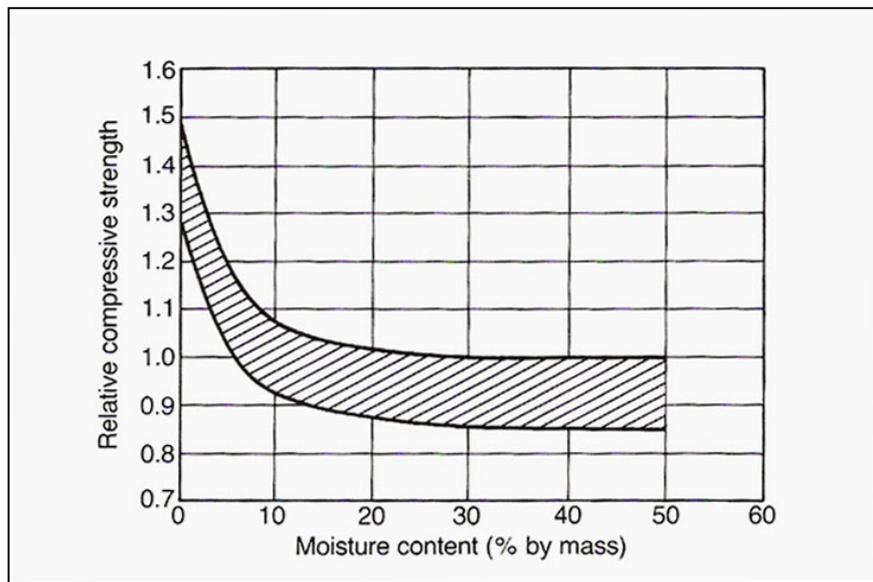


Abbildung 2-14: Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Festigkeit
(Rilem, /17/)

Für die industrielle Herstellung von Porenbetonbauteilen werden in der Regel vier Festigkeitsklassen verwendet. 2,0 N/mm², 4,0 N/mm², 6,0 N/mm² und 8,0 N/mm² wobei diese Werte der Mindestdruckfestigkeit entsprechen. Die entsprechenden mittleren Druckfestigkeiten sind 2,5 N/mm², 5,0 N/mm², 7,5 N/mm² und 10,0 N/mm² (Abbildung 2-15).

Porenbeton-Bauteil	Festigkeitsklasse	Mindestdruckfestigkeit (Steinfestigkeit)		Rohdichte	
		Mittelwert [N/mm ²]	kleinster Einzelwert [N/mm ²]	Klasse	Mittelwert [kg/dm ³]
Plansteine DIN V 4165-100 oder DIN V 20000-404	2	2,5	2,0	0,35	≥ 0,30 bis 0,35
				0,40	> 0,35 bis 0,40
				0,45	> 0,40 bis 0,45
				0,50	> 0,45 bis 0,50
	4	5,0	4,0	0,50*	≥ 0,45 bis 0,50
				0,55	> 0,50 bis 0,55
				0,60	> 0,55 bis 0,60
				0,65	> 0,60 bis 0,65
	6	7,5	6,0	0,60*	> 0,55 bis 0,60
				0,65	> 0,60 bis 0,65
				0,70	> 0,65 bis 0,70
				0,80	> 0,70 bis 0,80
8	10,0	8,0	0,80	> 0,70 bis 0,80	
			0,90	> 0,80 bis 0,90	
			0,90	> 0,80 bis 0,90	
			1,00	> 0,90 bis 1,00	

Abbildung 2-15: Festigkeitsklassen von Plansteinen (BVB, /5/)

Zur einfacheren Unterscheidung werden Porenbetonsteine auch farblich gekennzeichnet (Abbildung 2-16, Abbildung 2-17).

- >2,0 N/mm² - gelb
- >4,0 N/mm² - blau
- >6,0 N/mm² - rot
- >8,0 N/mm² - schwarz

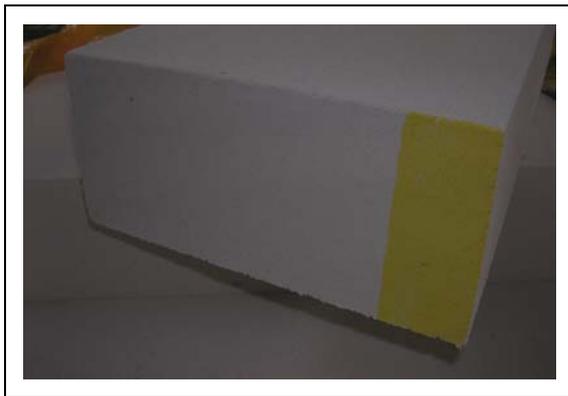


Abbildung 2-16: Porenbeton – Planstein:
Der Gelbe



Abbildung 2-17: Porenbeton – Planstein:
Der Blaue

Der E-Modul

Der E-Modul ist ein Maß für reversible Verformungen von Werkstoffen. Er ist eng verbunden mit der Druckfestigkeit und steht oft in direkter Korrelation zu dieser. Die E-Moduli von Porenbeton sind im Vergleich zu anderen Baustoffen sehr niedrig. In der *Tabelle 2-4* sind die E-Moduli von einigen Baustoffen zusammengestellt:

Tabelle 2-4: E-Moduli ausgewählter Baustoffe

Porenbeton [N/mm ²]	Beton [N/mm ²]	Baustahl [N/mm ²]	Holz parallel zur Faser [N/mm ²]	Aluminium [N/mm ²]
ca. 1000-2500	22000-45000	210000	7000-20000	70000

Der Elastizitätsmodul für Porenbeton ist abhängig von der jeweiligen Trockenrohddichte und vom Feuchtigkeitsgehalt des Prüfkörpers. Zur Prognose des E-Moduls existieren Formeln in der Literatur, die aufgrund von empirischen Werten zusammengestellt wurden (*Tabelle 2-5*). Dabei wurde der E-Modul meistens als eine Funktion der Druckfestigkeit dargestellt.

Tabelle 2-5: Empirische Formeln zur E-Modul Berechnung (*Narayanan, /2/*)

E-Modul	Bezeichnungen
$6000 * \alpha^{1,5} * S$	α Trockenrohddichte in [g/cm ³] S Würfeldruckfestigkeit in [kg/cm ²]
$1550 * S^{0,7}$	S Würfeldruckfestigkeit in [kg/cm ²]
$3000 * S_p$	S_p Prismadruckfestigkeit in [kg/cm ²]
$k * \gamma_{dry} * (f_c)^{0,5}$	γ_{dry} Trockenrohddichte in [kg/m ³] f_c Druckfestigkeit in [MPa] k Konstante zwischen 1,5 - 2,0
$c_1 * (\rho - c_2)$	c_1, c_2 Konstanten ρ Trockenrohddichte in [kg/m ³], E ist in [MPa]

Ein weiterer Zusammenhang wurde vom *Technischen Komitee RILEM* ermittelt. Hier wird die Beziehung zwischen dem E-Modul mit der Trockenrohddichte und dem Feuchtigkeitsgehalt beschrieben. In der *Abbildung 2-18* ist der Elastizitätsmodul von Porenbeton mit einem Wassergehalt von ca. 3 Gew.-% in Abhängigkeit von der Trockenrohddichte dargestellt. Das entspricht ungefähr einem Ausgleichsfeuchtigkeitsgehalt, der sich bei 50 % relative Luftfeuchte einstellt. Experimente haben folgenden mathematischen Zusammenhang ergeben:

$$E = (-520 + 4,7\rho_{dry}) \pm 500 N / mm^2 \quad \rho_{dry} \text{ Trockenrohddichte in } kg/m^3$$

Diese Gleichung hat ihre Gültigkeit nur für den Bereich der Trockenrohddichten zwischen 300 kg/m³ und 800 kg/m³.

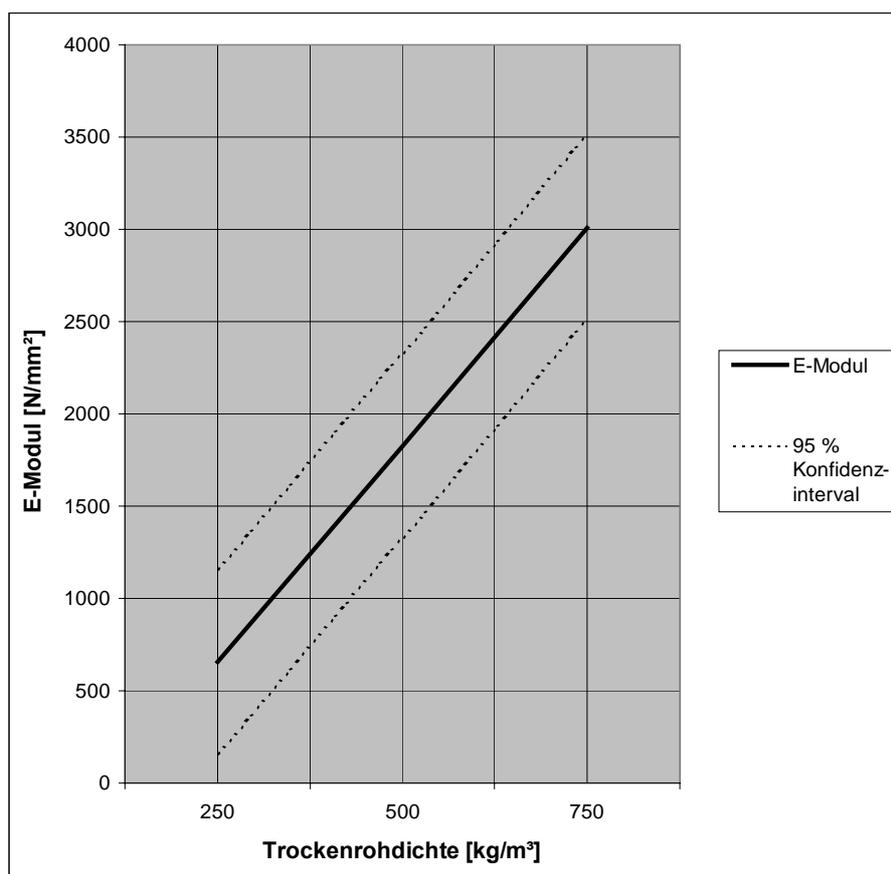


Abbildung 2-18: E-Modul in Abhängigkeit von der Trockenrohddichte, (*Rilem, /17/*)

Die Abhängigkeit des E-Moduls vom Feuchtigkeitsgehalt ist in der *Abbildung 2-19* dargestellt. Hierbei ist der relative Wert des E-Moduls als Funktion des Feuchtigkeitsgehaltes, der sich bei gegebener relativen Luftfeuchte einstellt, dargestellt. Durch die relative Regressionsanalyse der empirischen Daten wurde von *Rilem (/17/)* folgender mathematischer Zusammenhang ermittelt:

$$E = \frac{E_{(RH)}}{E_o} = (1,11 - 0,0022 * RH) \pm 0,05 N / mm^2$$

E_o ist der im Gleichgewichtszustand ermittelte E-Modul bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 50 %. RH steht für *Relative Humidity* und entspricht der relativen Luftfeuchte.

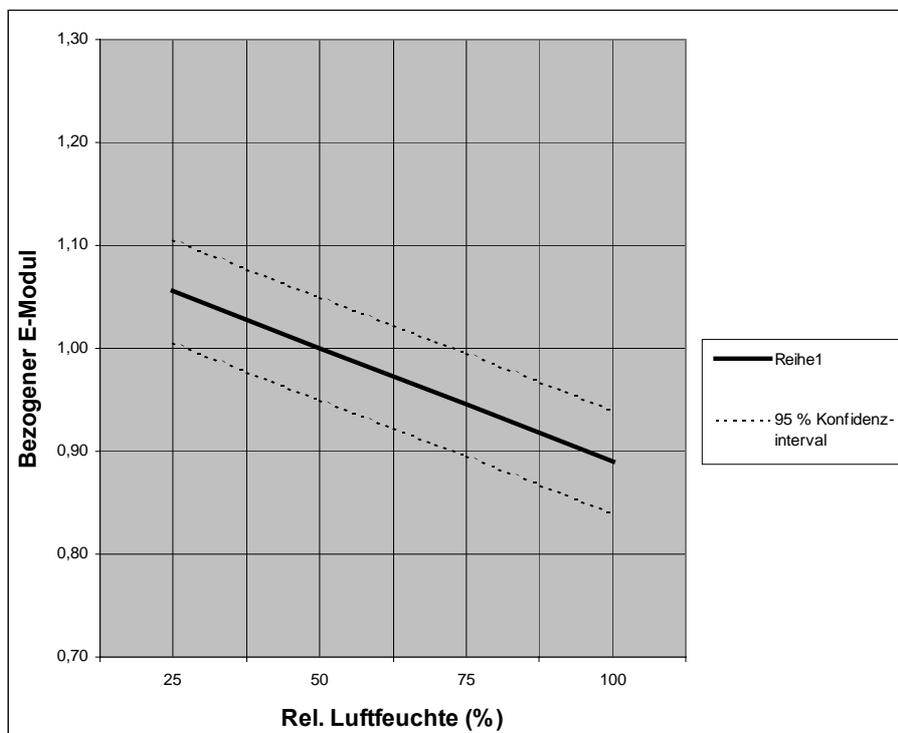


Abbildung 2-19: Relativer Wert des E-Moduls als Funktion der relativen Luftfeuchte, (*Rilem, /17/*)

Zugfestigkeit und Biegezugfestigkeit

Die Zugfestigkeit beträgt ungefähr 15-35 % der jeweiligen Druckfestigkeit. Es ist zu beachten dass bei Ermittlung der Zugfestigkeit der Zustand der Probekörper einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse haben kann als bei der Ermittlung der Druckfestigkeit. Beispielsweise ist bei Vorhandensein eines erheblichen Feuchtigkeitsgehaltsgradienten im Probekörper die Zugfestigkeit geringer. Der Einfluss gleichmäßig verteilter Feuchte ist ähnlich wie bei der Druckfestigkeit.

Die Biegezugfestigkeit ist etwas höher als die Zugfestigkeit und erreicht etwa 20-40 % der Druckfestigkeit. Auch hier hat der Feuchtigkeitsgehaltsgradient einen Einfluss. Die Biegezugfestigkeit kann näherungsweise nach der folgenden Formel ermittelt werden (*Rilem, /17/*):

$$MOR = 0,27 + 0,21f_{ct} (N / mm^2)$$

f_{ct} ist die Würfeldruckfestigkeit

MOR ist die Biegezugfestigkeit (*Modulus of Rupture*)

Schwindverhalten

Das Schwindverhalten ist beim Porenbeton wegen des hohen Porengehaltes (40-80 %) und wegen der hohen spezifischen Oberfläche der Poren (30 m²/g) besonders ausgeprägt. Schwinden tritt auf wenn der Baustoff Wasser an die Umgebung verliert. Das Schwindverhalten ist abhängig von der Art des verwendeten Bindemittels, wird durch die Dampfhärtung beeinflusst und ändert sich mit dem Gehalt der Feinporen. Zum Beispiel, weisen nur mit Zement hergestellte Produkte ein höheres Schwindmaß auf, als wenn Kalk oder Zement und Kalk als Bindemittel verwendet werden. Eine Vergrößerung des Feinporengehaltes bewirkt eine Erhöhung des Schwindmaßes. Der Zeitliche Verlauf des Schwindverhaltens hängt von den Materialeigenschaften, von der Probekörpergröße und von den klimatischen Verhältnissen der Umgebung ab. Darüber hinaus hängt das endgültige Schwindmaß vom Anfangs- und Endfeuchtigkeitsgehalt des Materials ab. Das Schwindmaß steigt meistens, wenn die relative Luftfeuchtigkeit sinkt (*Narayanan, /2/*).

In der folgenden Abbildung (*Abbildung 2-20*) ist der Zusammenhang der Schwindendwerte im Gleichgewicht mit der relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt.

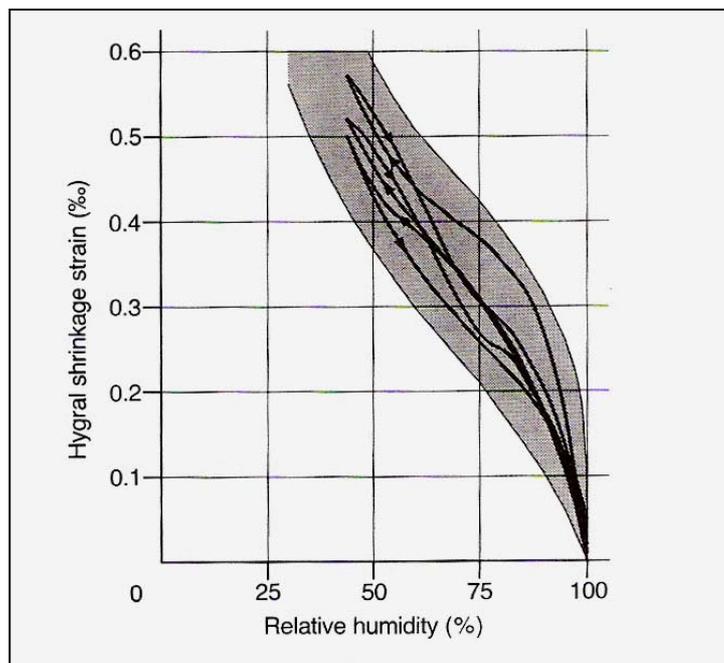


Abbildung 2-20: Schwindendwerte im Gleichgewichtszustand mit der relativen Luftfeuchtigkeit (*Rilem, /17/*)

Für Praktische Anwendungen, sowie für die industrielle Erzeugung von Porenbetonteilen wird das Schwindverhalten durch das Zertifizierungsprogramm *DIN CERTCO* bestimmt. Hersteller, die Mitglieder im Bundesverband Porenbeton sind, garantieren eine bautechnisch relevante Schwinddehnung von $<0,2$ mm/m bzw. 0,2 Promille. Hier ist noch zu bemerken, dass diese geringen Verformungswerte die Rissicherheit positiv beeinflussen (*Weber, /6/*).

2.3.3 Gebrauchstauglichkeit

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit steigt proportional zur Trockenrohddichte und dem Feuchtigkeitsgehalt. Für Probekörper die im Klimaschrank bei einer Temperatur von $105\pm 5^\circ\text{C}$ bis zur Massekonstanz temperiert wurden gilt die folgende Formel für die Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda_{dry} = A + B * p$$

wobei

$$A = -0,011 \text{ W/mK}$$

$$B = 0,00027 \text{ Wm}^2/\text{kgK}$$

p Trockenrohddichte in (kg/m^3)

λ_{dry} Wärmeleitfähigkeit in W/mK

In der *Abbildung 2-21* ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt.

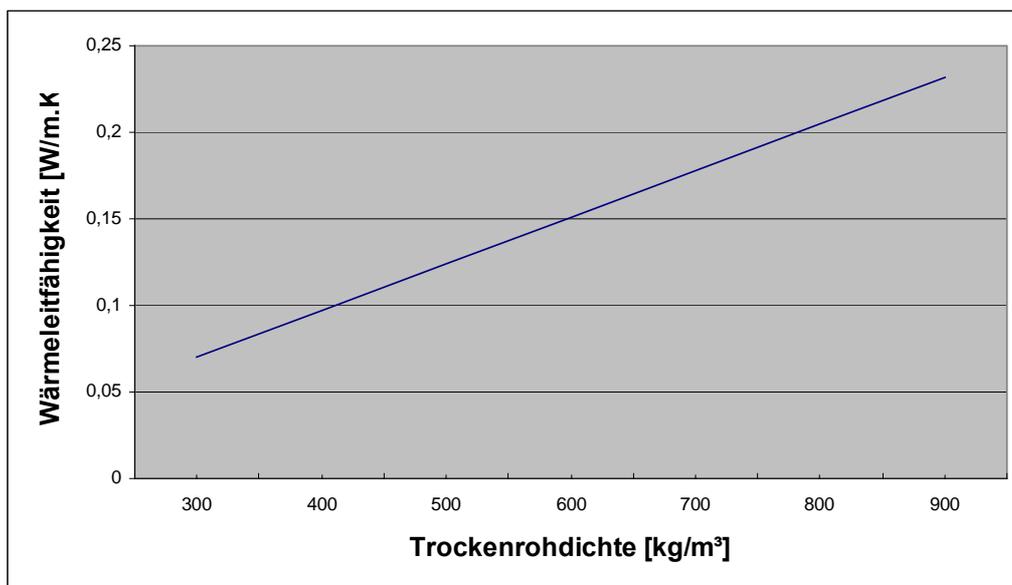


Abbildung 2-21: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Trockenrohddichte, (Rilem, /17/)

Die Wärmeleitfähigkeit steigt proportional zum Feuchtigkeitsgehalt. In der *Abbildung 2-22* sind Gleichungen angegeben die den Zusammenhang für unterschiedliche Rohdichteklassen beschreiben. Man kann feststellen, dass der Anstieg des Feuchtigkeitsgehaltes um 1 Gew.-%, eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um 42 % mit sich bringt.

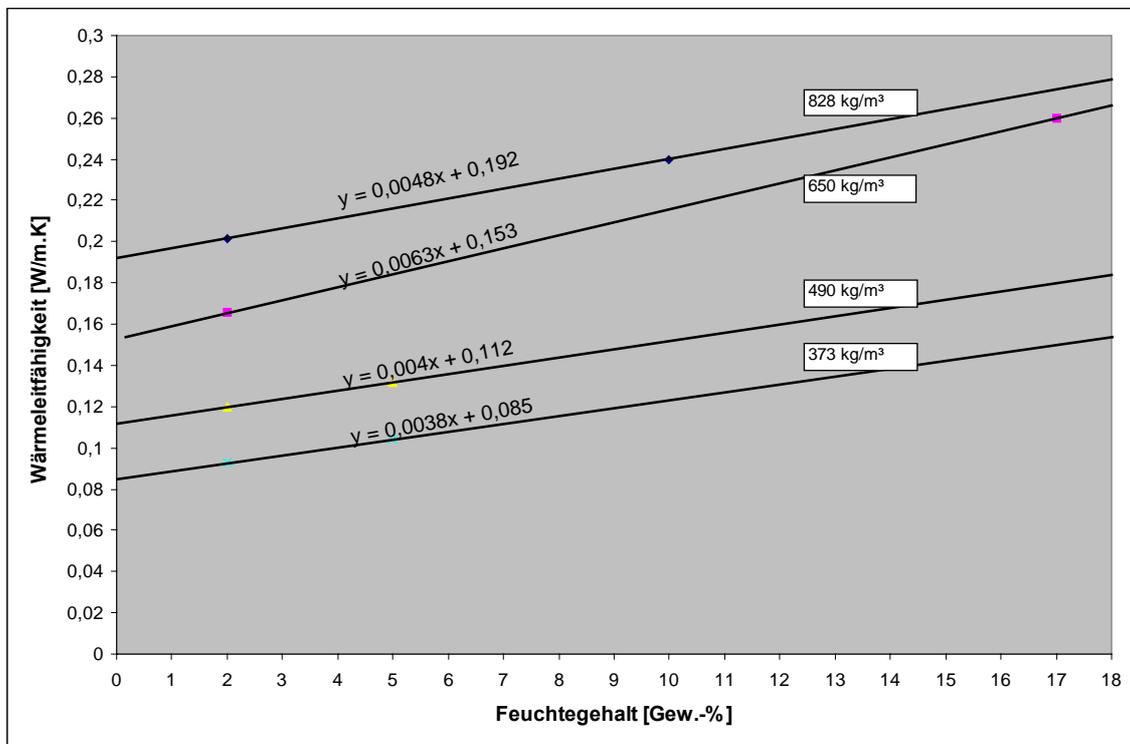


Abbildung 2-22: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, (Rilem, /17/)

Falls keine gemessenen Werte vorhanden sind, kann die Wärmeleitfähigkeit näherungsweise nach der folgenden Formel berechnet werden (Rilem, /17/):

$$\lambda_{moist} = \lambda_{dry} (1 + C * w)$$

wobei

λ_{moist} Wärmeleitfähigkeit im Normalzustand in W/m.K

λ_{dry} Wärmeleitfähigkeit im ofentrockenen Zustand in W/m.K

C 0,04

w Feuchtigkeitsgehalt in Gew.-%

Ein Vergleich der Wärmeleitfähigkeit mit anderen Baustoffen ist in der unteren *Abbildung 2-23* dargestellt.

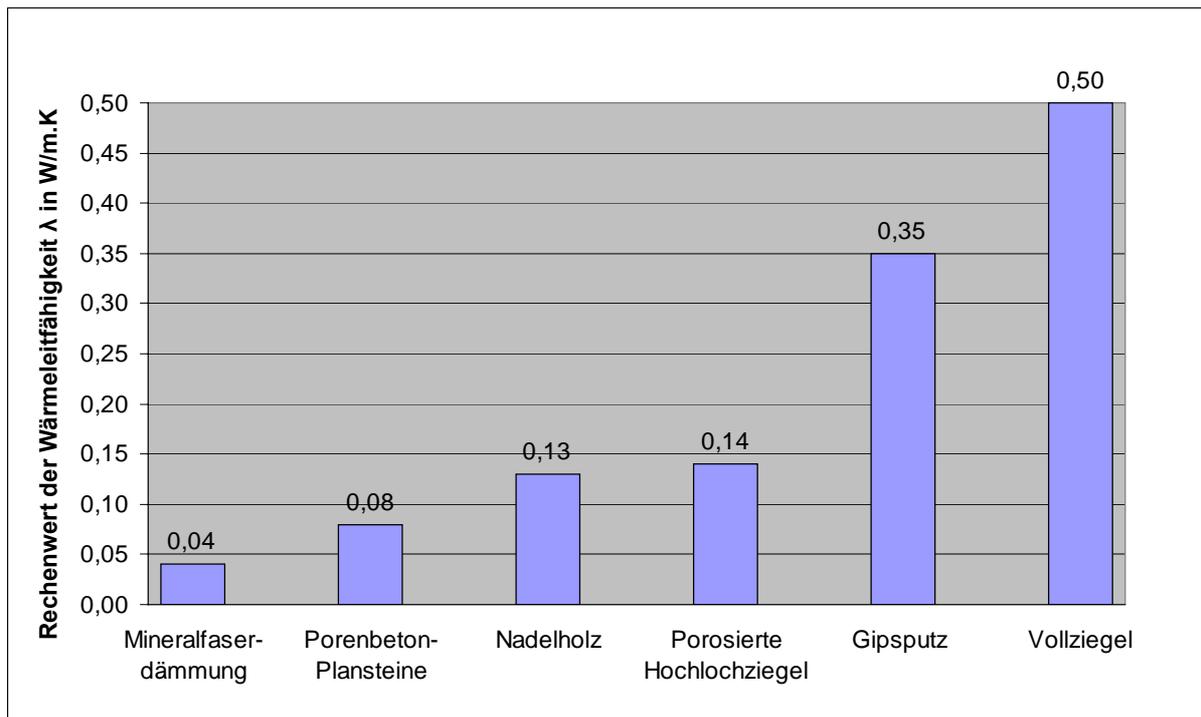


Abbildung 2-23: Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen im Vergleich (Weber, /6/)

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität kann als Summe der spezifischen Wärmekapazitäten von ofentrockenem Material und von der vorhandenen Feuchte angegeben werden. In der folgenden Formel ist dieser Zusammenhang dargestellt (Rilem, /17/):

$$C = 0,98 + 0,042 * V$$

wobei

V Feuchtigkeitsgehalt in Vol.-%

C spezifische Wärmekapazität in kJ/kg.K

Im Allgemeinen beträgt er bei hygroskopischer Ausgleichsfeuchte 1,00 kJ/kg.K (Weber, /6/).

Feuchtigkeitsverhalten

Das Feuchtigkeitsverhalten von Porenbeton ist ein sehr komplexes Thema und wird in *Rilem* (/17/) und im *Porenbetonhandbuch* (/6/) detailliert erläutert. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Feuchtigkeitsverhalten eine große Bedeutung für die Wärmedämmung und auch für das Raumklima hat. Da der Porenbeton eine niedrige Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl hat, ist er in der Lage Luftfeuchtigkeit aus dem Raum aufzunehmen und wieder abzugeben. *Abbildung 2-24* zeigt eine charakteristische Sorptionsisotherme für Porenbeton.

Die kapillare Wasseraufnahme erfolgt über die Mikroporen. Die Mikroporen regeln also das Saugverhalten und die Austrocknungsgeschwindigkeit.

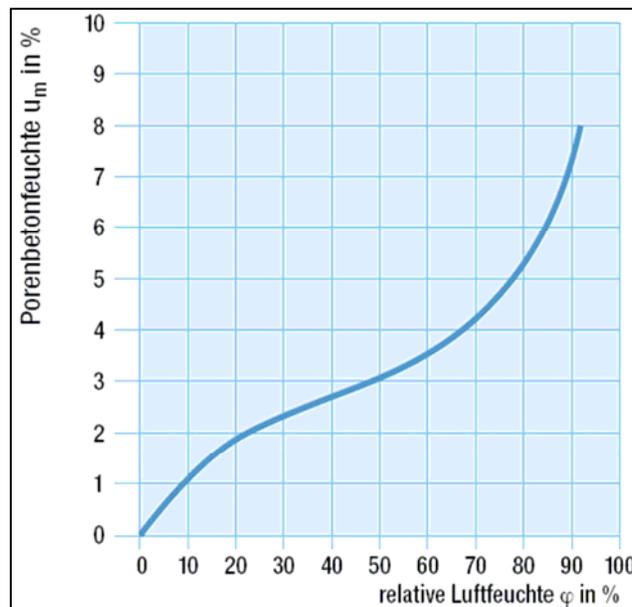


Abbildung 2-24: Sorptionsisotherme für Porenbeton
(BVB, /6/)

Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl

Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl von Porenbeton ist aufgrund der porösen Struktur niedrig und liegt bei Werten zwischen $\mu=5$ bis $\mu=10$ (*Weber*, /6/).

Frostwiderstandsfähigkeit

Die Frostwiderstandsfähigkeit von Porenbeton hängt von seinem Feuchtigkeitsgehalt ab. Des Weiteren hängt sie von der Porengrößenverteilung bzw. vom Mikroporengehalt ab. Dort spielt die Größe und die Form der Poren eine entscheidende Rolle, sowie die Festigkeit der Porenwände. Wenn Wasser in die Poren gelangt und gefriert, dehnt es sich bis auf das neunfache Volumen aus. Wenn dabei die Zugfestigkeit der Porenwandstruktur erreicht ist, kommt es zu Rissen im Material. Diese Risse können bei sich wiederholenden Frost-Tau-Zyklen zum gänzlichen Versagen des Materials führen. Deswegen ist es wichtig, dass Porenbeton durch geeignete Maßnahmen vor Durchfeuchtung und damit vor Frostschäden geschützt wird.

Brandschutz

Baustoffe werden aufgrund ihres Brandverhaltens nach DIN 4102-2 in Baustoffklassen eingeteilt (Tabelle 2-6). Folgende Baustoffklassen werden unterschieden:

Tabelle 2-6: Baustoffklassen nach *DIN 4102-1: 1998-05*

Baustoffklasse		Bauaufsichtliche Benennung
A		nicht brennbar
	A1	ohne brennbare Bestandteile
	A2	mit brennbaren Bestandteilen
B		brennbar
	B1	schwerentflammbar
	B2	normalentflammbar
	B3	leichtentflammbar

DIN 4102-4 enthält in einem Katalog Angaben über Baustoffe, die nach ihrem Brandverhalten auf der Grundlage von Prüfungen klassifiziert wurden und die ohne Prüfverfahren einer bestimmten Feuerwiderstandsklasse zugeordnet werden können. Hierzu (A1) gehört aufgrund seiner mineralischen Zusammensetzung auch der Porenbeton. Feuerwiderstandsklassen geben die Zeit an, nach welcher ein Bauteil unter Brandbelastung noch bestimmten Anforderungen

standhält. Nach *DIN 4102-1:1995-05* werden die Feuerwiderstandsklassen wie folgt eingeteilt:

Tabelle 2-7: Feuerwiderstandsklassen F nach *DIN 4102-1: 1998-05*

Feuerwiderstandsklasse	Feuerwiderstandsdauer in Minuten
F 30	≥ 30
F 60	≥ 60
F 90	≥ 90
F 120	≥ 120
F 180	≥ 180

Porenbeton erfüllt die Anforderungen aller Feuerwiderstandsklassen ohne Zusatzmaßnahmen, wie Bekleidung oder Beschichtung. Im Brandfall werden kein Rauch und keine toxischen Gase gebildet.

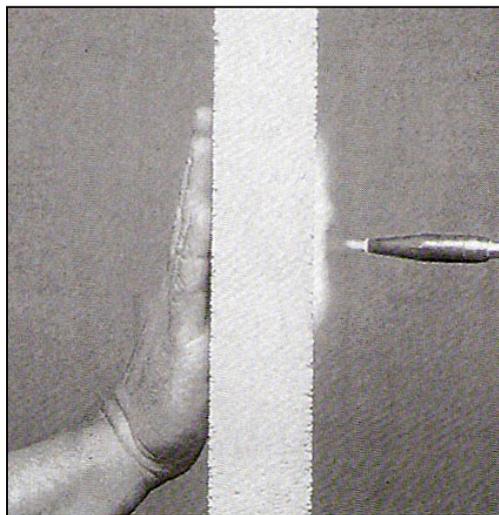


Abbildung 2-25: Porenbeton ist nicht brennbar und hat eine geringe Wärmeleitfähigkeit (Weber, /6/)

Abbildung 2-25 zeigt demonstrativ die geringe Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton. Auf der Feuer abgewandten Seite bleibt die Temperaturerhöhung gering. Entsprechend ist auch die Feuerwiderstandsdauer bei gleicher Plattendicke deutlich höher als bei Normalbeton (Weber, /6/). Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit ist die Temperatur auf der Feuer zugewandten Seite auch niedriger als bei Normalbeton. Das ist vor allem für den Schutz der Bewehrung von Vorteil. Das in kristalliner Form gebundene Wasser agiert dabei als Wärmesenke. Es

kann bei hohen Temperaturen als Wasserdampf durch die Poren entweichen und es kommt zu keinen Abplatzungen auf der Oberfläche (*Rilem, (/17/)*).

Schallschutz

Auf den Schallschutz wird hier nicht näher eingegangen. Reichlich Angaben darüber sind im *Porenbetonhandbuch (/6/)* und in *Rilem (/17/)* zu finden. Der Vollständigkeit halber ist zu sagen, dass der Porenbeton ein günstigeres Schalldämmmaß und einen höheren Schallabsorptionsgrad aufweist als andere vergleichbare Baustoffe.

Erdbebensicherheit

Der Porenbeton hat sich seit vielen Jahren in Regionen mit höheren seismischen Aktivitäten bewährt. Er ist vor allem für niedergeschossige Bauten mit symmetrischem Grundriss geeignet. Dadurch kann die Masse der Konstruktion gleichmäßig verteilt werden, was im Erdbebenfall die Massebeschleunigung der Einzelteile relativ zueinander reduziert. Dies hat zur Folge, dass die Bauteile mehr Platz haben sich zu verformen. Porenbeton ist kein brennbarer Baustoff. Das macht ihn für die Verwendung noch günstiger, da Erdbebenschäden oft mit Brandfällen gekoppelt sind (*Rilem, /17/*).

2.4 Temperatureinfluss

Die Kenntnis über den Einfluss höherer Temperaturen auf die Festigkeit von Porenbeton ist für die Ausführung von Porenbetonbauwerken oder Bauwerken mit Bestandteilen aus Porenbeton wichtig. Das Verhalten dieses Baustoffes ist vor allem dann von Interesse, wenn Bauten unter hoher Temperaturbelastung stehen bzw. wenn nach dieser Temperaturbelastung noch eine wesentliche Tragfähigkeit von ihnen gefordert wird. Dies kann beispielsweise bei Brandereignissen der Fall sein. Hier sollen Konstruktionen einer Brandbelastung für eine vorgegebene Zeit widerstehen können. Im schlimmsten Fall treten Brand- und Erdbebenereignis gleichzeitig auf. Starke Erschütterungen können elektrische Leiter

beschädigen, die zu Kurzschlüssen führen und so einen Brand entfachen. Sollte sich dann in einem Bauwerk das Feuer erheblich ausweiten, können auch wesentlich schwächere Erschütterungen das Bauwerk überbelasten, was zum Versagen der Konstruktion führen kann.

Das Verhalten der Betone oder Stahlbetone die extrem hohen Temperaturen ausgesetzt sind, beispielsweise in Reaktoren oder bei Bränden in Tunneln, wurden in der Vergangenheit hinreichend untersucht. Es handelt sich dabei um Bauteile die statische und brandschutztechnische Funktionen zugleich erfüllen müssen. Porenbeton hat sehr gute brandschutztechnische Eigenschaften. Er brennt nicht und hat eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Seine tragenden Eigenschaften sind jedoch begrenzt und liegen um das zehnfache unter denen des Normalbetons. Deswegen werden ihm, mit Ausnahme des Leichtbaus, keine statischen Tragfunktionen zugeordnet. Nun, da auch der Leichtbau mit Porenbeton immer mehr Zuspruch findet, ist es von Interesse seine Eigenschaften über die bauphysikalischen Eigenschaften hinaus zu erforschen.

Das technologische Verhalten von Porenbeton unter Einwirkung höherer Temperaturen dürfte hauptsächlich von der Trockenrohddichte, vom Feinporengehalt und von der Rezeptur bei der Herstellung abhängen. Die Veränderung der Eigenschaften des Baustoffes unter Temperaturbelastung ist mit dem Verlust des gebundenen Wassers gekoppelt. Der Verlust des Wassers ist bis zu einem gewissen Grad reversibel. Wird der Porenbeton nach dem Erhitzen wieder auf Normaltemperatur abgekühlt, nimmt er das Wasser aus der Umgebung wieder auf. Im Falle einer Erwärmung auf über 800°C, wird Tobermorit in β -Wollastonit umgewandelt und der Wasserverlust bleibt permanent (*Rilem, /17/*).

Folgt man der Empfehlung nach Rilem (/17/), so wird die Druckfestigkeit des Porenbetons bei Erwärmung bis auf 400°C steigen und danach steil abfallen (*Abbildung 2-26*). Dieser Zusammenhang ist jedoch nur hypothetisch. Genaue Werte für dieses Verhalten existieren in der Fachliteratur nicht.

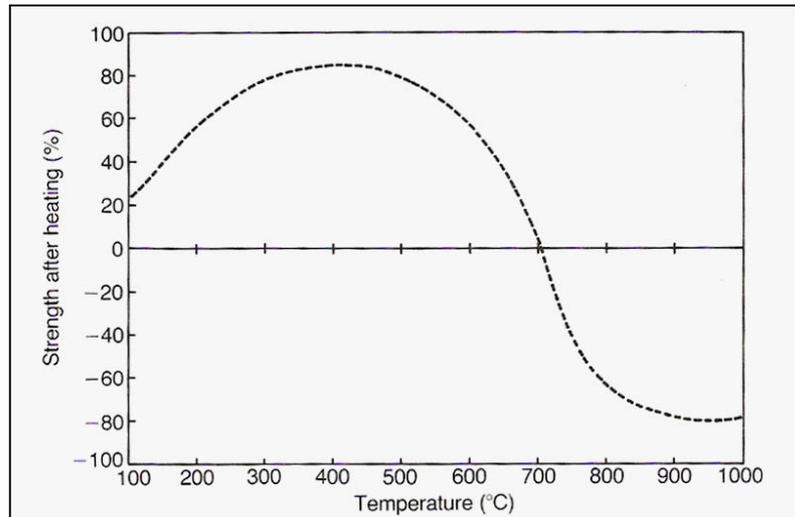


Abbildung 2-26: Änderung der Druckfestigkeit des Porenbetons bei unterschiedlichen Temperaturen (Rilem, /17/)

2.5 Messmethoden

Hauptaufgabe dieser Arbeit wird es sein, das Verformungsverhalten von Porenbeton bei Druckbeanspruchung unter hohen Temperaturen zu studieren. Zu diesem Zweck werden Messungen des Elastizitätsmoduls durchgeführt. Um die Ergebnisse interpretieren und um die dahinter steckenden Zusammenhänge verstehen zu können, müssen zusätzliche Messungen durchgeführt werden. Da die Festigkeitseigenschaften des Porenbetons mit der Rohdichte und mit dem Feuchtegehalt korrelieren, werden entsprechende Messungen durchgeführt. Um chemische Veränderungen des Stoffes bei hohen Temperaturen zu erfassen, werden zusätzlich thermische Analysen durchgeführt.

2.5.1 Bestimmung der Trockenrohichte

Die Trockenrohichte wird in Anlehnung an die Norm „EN 678: Dezember 1993, Bestimmung der Trockenrohichte von dampfgehärtetem Porenbeton“, bestimmt. Dazu werden mindestens 3 Probekörper aus vorgefertigten Bauteilen entnommen. Das Herausschneiden der Probekörper soll so erfolgen, dass bezogen auf die Treibrichtung aus dem unteren, mittleren und oberen Drittel des Bauteils je ein Probekörper entnommen werden soll. Die Volumina der Probekörper sind aus ihren Maßen zu bestimmen, wobei der Fehler nicht mehr als 1% betragen darf. Danach sind die Probekörper bis zum Erreichen der

Massenkonstanz in einem belüfteten Trockenschrank mit einer Temperatur von $105\pm 5^\circ\text{C}$ zu lagern. Unmittelbar nach dem Herausnehmen aus dem Trockenschrank ist die Trockenmasse, m_d , der einzelnen Probekörper zu bestimmen. Die Masse des Probekörpers darf als konstant angenommen werden, wenn sie sich nach weiteren 24stündigem Trocknen um nicht mehr als 0,2% geändert hat.

Die Trockenrohddichte ρ_i jedes einzelnen Probekörpers i ist in Kilogramm pro Kubikmeter wie folgt zu bestimmen:

$$\rho_i = \frac{m_{di}}{V_i} \quad \text{für } i = 1, 2, 3$$

dabei ist:

m_{di} die ermittelte Trockenmasse des Probekörpers in Kilogramm

V_i das ermittelte Volumen des Probekörpers in Kubikmeter

Die Trockenrohddichte des Produkts, ρ in Kilogramm pro Kubikmeter, ist definiert als Mittelwert der Trockenrohddichten ρ_i der drei Probekörper der Prüfserie:

$$\rho = \frac{1}{3}(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)$$

2.5.2 Bestimmung des Feuchtegehaltes

Die Bestimmung des Feuchtegehaltes wird gemäß *EN 1353: Dezember 1996* durchgeführt. Der Vorgang der Auswahl der Probekörper und der Volumsbestimmung ist analog wie bei der Bestimmung der Trockenrohddichte. Allerdings werden hier die Probekörper im quasi feuchten Zustand gewogen und dann in den Trockenschrank gelegt. Nach Erreichen der Massenkonstanz werden sie wieder gewogen.

Der Massebezogene Feuchtegehalt wird wie folgt berechnet:

$$\mu_m = 100 \frac{m_{hum} - m_{dry}}{m_{dry}}$$

Der volumenbezogene Feuchtegehalt wird wie folgt berechnet:

$$\mu_v = \frac{m_{hum} - m_{dry}}{V} 10^6$$

wobei

- μ_m der massenbezogene Feuchtegehalt, in Prozent
- μ_v der volumenbezogene Feuchtegehalt, in Kilogramm pro Kubikmeter
- m_{hum} die Masse des Probekörpers in feuchtem Zustand, in Gramm
- m_{dry} die Masse des getrockneten Probekörpers, in Gramm
- V das Volumen des Probekörpers, in Kubikmillimeter

2.5.3 E-Modul Bestimmung

Die Vorgangsweise für die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls für Porenbeton ist in der Norm *EN 1352: Dezember 1996, Bestimmung des statische Elastizitätsmoduls unter Druckbeanspruchung von dampfgehärtetem Porenbeton und von haufwerksporigem Leichtbeton*, definiert.

Der Elastizitätsmodul wird an prismatischen Probekörpern bestimmt, die vorgefertigten Bauteilen entnommen werden. Er wird aus der Differenz der Längsstauchungen berechnet, die dem Anstieg der Längsdruckspannung von der unteren Prüfspannung σ_a (ungefähr 5% der deklarierten Druckfestigkeit des Betons) zur oberen Prüfspannung σ_b (im Allgemeinen ein Drittel der deklarierten Druckfestigkeit des Betons) entsprechen. Als Referenzprobekörper sind Prismen mit quadratischem Querschnitt mit Maßen von üblicherweise 100 mm x 100 mm x 300 mm zu verwenden. Ein Prüfsatz muss aus mindestens drei Probekörpern bestehen. Für die Dehnungsmessung können u. a. induktive Wegaufnehmer (Fehlergrenze: $5 \cdot 10^{-6}$)

Die Be- und Entlastungsgeschwindigkeit sollte ungefähr $0,1 \pm 0,05$ N/mm² je Sekunde betragen. Vor und nach dem dritten Belasten ist die Beanspruchung σ_a bzw. σ_b 30 Sekunden konstant zu halten und die entsprechenden Ablesungen der Stauchungen ε_a und ε_b sind während der folgenden 30 Sekunden konstanter Beanspruchung durchzuführen. Die Prüfergebnisse sind nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$E_c = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a}$$

E_c und $\sigma_{a,b}$ in N/mm²

2.5.4 Differenzthermoanalyse-Thermogravimetrie

Die Differenzthermoanalyse (DTA) und die Thermogravimetrie (TG) gehören zur Gruppe der „Thermischen Analysen“. Die thermische Analyse umfasst alle Methoden, bei denen vorzugsweise an Feststoffen oder Feststoffgemischen physikalische und chemische Veränderungen der Probe in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen werden. Die Definition der Thermischen Analyse nach DIN 51 005 lautet:

„Thermische Analyse (TA): Oberbegriff für Methoden, bei denen physikalische und chemische Eigenschaften einer Substanz, eines Substanzgemisches und/oder von Reaktionsgemischen als Funktion der Temperatur oder Zeit gemessen werden, wobei die Probe einem kontrollierten Temperaturprogramm unterworfen ist (Hemminger, /26/).“

Bei der DTA wird die Temperaturdifferenz ΔT zwischen der Probe und einer Vergleichsprobe in Abhängigkeit der Temperatur gemessen. Dazu werden die zu untersuchende Substanz und eine thermisch inerte Vergleichsprobe gleichmäßig aufgeheizt. Finden in der Substanz bei linearer Temperaturerhöhung Reaktionen statt, die Wärme erzeugen (exotherm) oder Wärme verbrauchen (endotherm), so registriert man ein Abweichen von der geradlinigen Aufheizkurve (*Abbildung 2-28*). Die Analysesubstanz und die Inertsubstanz befinden sich in speziellen Probebehältern in einem geregelt aufheizbaren Ofen. Die Temperaturmessung

erfolgt mit Thermoelementen die in unmittelbarem Kontakt zu der Probe und der Inertsubstanz stehen. Die Thermoelemente sind so geschaltet, dass die Thermospannung bei Temperaturgleichheit in beiden Proben gleich Null ist. Bei einem thermischen Effekt in der Analysenprobe ergibt sich eine Spannungsdifferenz, die ein Abweichen von der Grundlinie bewirkt. Ändert sich die Bezugstemperatur linear mit der Zeit, so ist Messgröße bei der DTA:

$$\Delta T(t) = T_p(t) - T_R(t) \quad \text{mit} \quad T = T_0 + \beta t$$

wobei

T_p Temperatur der Probe

T_R Temperatur der Vergleichsprobe

T Bezugstemperatur

T_0 Anfangstemperatur

β Heizrate

t Zeit

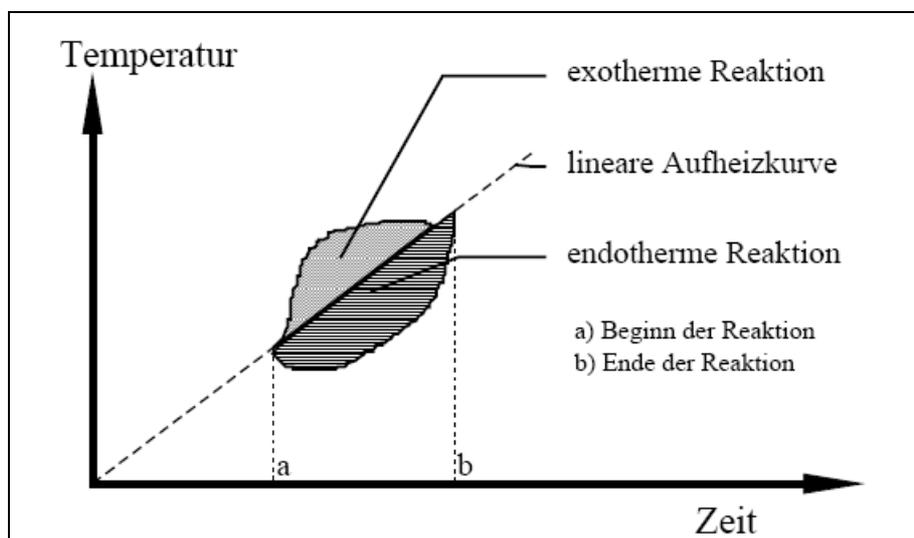


Abbildung 2-28: DTA - Abweichung der Proben- von der Vergleichsprobe-Temperatur durch Reaktionen bei linearer Aufheizung (TU Ilmenau, /30/)

Substanzen, die bei bestimmten Temperaturen Masseänderungen zeigen, lassen sich mit thermogravimetrischen Methoden untersuchen. Die hierfür gebräuchlichste Apparatur ist eine Thermowaage. Die Masseänderung wird mit der Waage kontinuierlich verfolgt und über

entsprechende Registriereinrichtungen in Abhängigkeit von der Zeit oder Temperatur aufgezeichnet (Abbildung 2-29). In der Regel sind die Stufen in der TG-Kurve aufgrund des dynamischen Messprinzips und kinetischer Hemmungen der Reaktionen etwas verzerrt. Häufig wird die Thermowaage mit einer DTA-Apparatur gekoppelt, um Reaktionen zu erkennen, die mit Gewichtsänderung ablaufen (Hemminger, /26/).

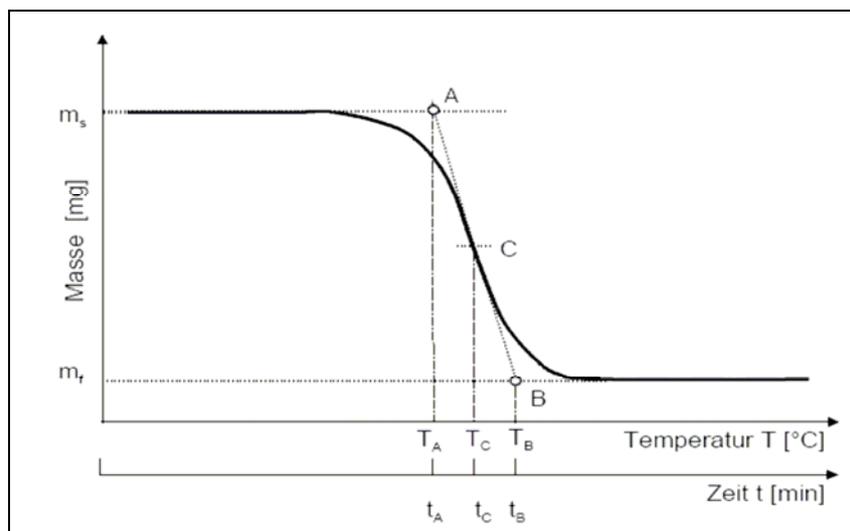


Abbildung 2-29: TG – Auswertung einer typischen Messkurve mit einstufiger Masseabnahme

Meist wird bei der Messung die Ofentemperatur (samt Probe) mit konstanter Heizrate $\beta = dT / dt$ erhöht. Für besondere Zwecke kann die Erhöhung der Temperatur auch stufenweise erfolgen. Thermogravimetrische Untersuchungen sind nur dann möglich, wenn die Probe Materie mit der Umgebung (Probenraum) austauschen kann. Die Probe kann beispielweise beim Verdampfen oder bei Zersetzungsreaktionen eine flüchtige Komponente an die Umgebung abgeben, oder sie kann aus der Umgebung einen Reaktionspartner aufnehmen (z. B. Oxidation). Die Messgröße ist also:

$$m = m(T) \quad \text{oder} \quad \Delta m = m(T) - m_0$$

wobei

m Masse der Probe

m_0 Anfangsmasse der Probe

T Temperatur

Die Messgröße hängt neben dem Temperatur-Zeit-Programm und den Probeneigenschaften auch von der Atmosphäre im Probenraum ab. Die Atmosphäre im Probenraum ist ein inertes Gas das die Probe laminar umströmt. Von der Probe abgegebene Reaktionsprodukte werden durch die Gasströmung so rasch entfernt, dass kein Rückstrom und damit keine Rückreaktion auftritt, wie es in einer stehenden Atmosphäre der Fall sein könnte.

Thermogravimetrie ist im Allgemeinen nur bei Beteiligung flüchtiger Komponenten möglich. Laufen während des Aufheizens Teilreaktionen ab, bei denen es zu keiner Masseänderung durch flüchtige Komponenten kommt, werden sie nicht aufgezeichnet. Dies bedeutet eine Beschränkung ihrer Einsatzmöglichkeiten gegenüber der DTA, bei welcher auch Festkörperreaktionen untersucht werden können. Deshalb setzt man die Thermogravimetrie häufig simultan mit der Differenzthermoanalyse ein (Simultane Thermische Analyse – STA).

Die Apparatur einer zur Durchführung einer STA ist in der folgenden *Abbildung 2-30* dargestellt:

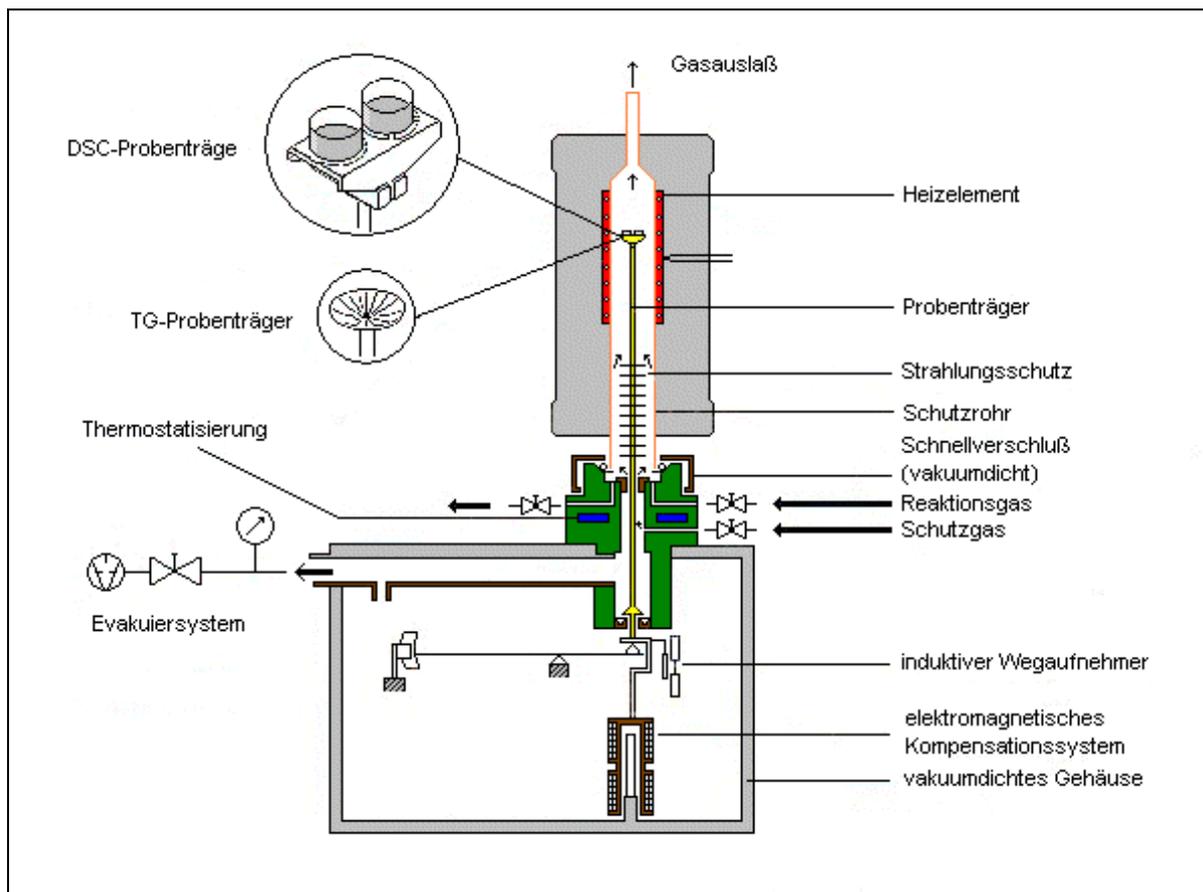


Abbildung 2-30: Apparatur – Simultane Thermische Analyse (TU-BS, /33/)

In der *Abbildung 2-31* ist die typische Messkurve einer simultanen thermischen Analyse dargestellt.

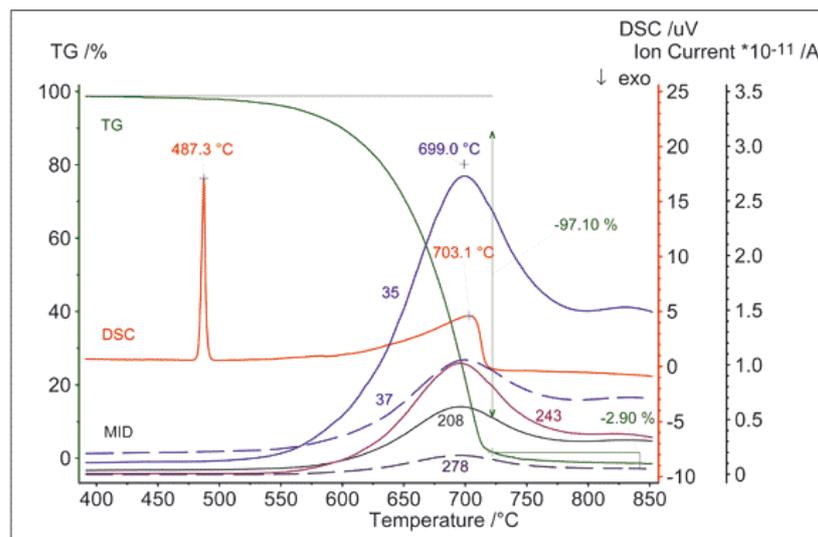


Abbildung 2-31: TG und DTA gekoppelt – typische Messkurve (TU-BS, /33/)

2.5.5 Quecksilberporosimetrie

Eine Methode zur Bestimmung von Porenräumen in porösen Feststoffen ist die Quecksilberporosimetrie. Damit lassen sich Poren im Bereich zwischen 3 Nanometer bis zu 400 Mikrometer erfassen. Die Meßmethode basiert auf den besonderen Eigenschaften des Quecksilbers. Quecksilber ist ein bei Raumtemperatur flüssiges Metall und zählt zu den sogenannten nicht benetzenden Flüssigkeiten. Damit Quecksilber in die Porenräume eindringen kann muss ein äußerer Druck aufgewendet werden. Nach *WASHBURN* ergibt sich folgende Relation zwischen Porenradius und dem aufgewendeten Druck:

$$r = \frac{-2 * \sigma * \cos \Theta}{p}$$

- r Porenradius in μm
 σ Oberflächenspannung
 Θ Randwinkel in $^\circ$
 p Druck in MPa

Aus der Relation des aufgewendeten Druckes, der Geschwindigkeit der Druckerhöhung und des Volumens der intrudierten Flüssigkeit, sowie der Geschwindigkeit der Intrusion, können mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie folgende Porenstrukturparameter festgestellt werden:

- Porenvolumen
- Porenradius
- Porenoberfläche
- Poren Größen Verteilung.

In der *Abbildung 2-32* ist der Porenfüllprozess dargestellt. Mikroporen mit einem Durchmesser < 3 nm bleiben bei der Quecksilberdruckporosimetrie ungefüllt und werden somit weder als Porenvolumen noch als Porengrößenverteilung erfasst. Zur Erfassung dieser Poren eignet sich die Gassorption. Sie erfasst einen Messbereich von 0,3-400 nm.

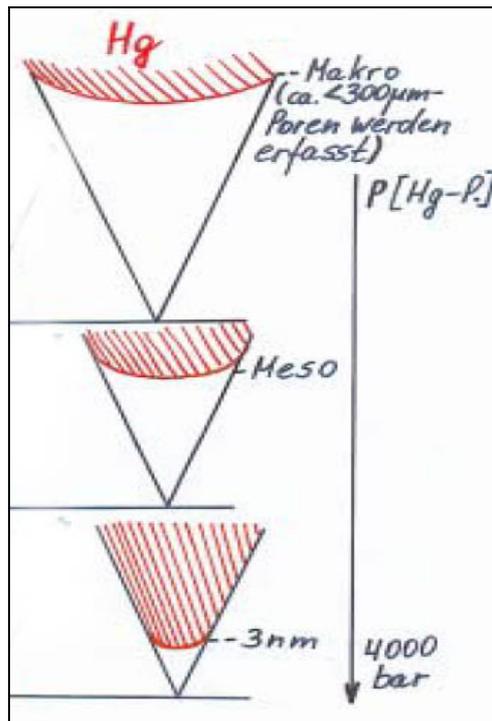


Abbildung 2-32: Porenfüllprozess (Partikelwelt, /34/)

3 Versuchsplanung

Der Praktische Teil dieser Arbeit besteht aus Versuchen an Probekörpern aus Porenbeton. Ziel ist es den E-Modul unter Einwirkung hoher Temperaturen zu ermitteln, sowie den Rest-E-Modul nach Abkühlung der Probekörper zu bestimmen. Dazu sollen Probekörper in einem Ofen auf eine bestimmte Temperatur erwärmt werden. Der Ofen soll so präpariert werden, dass die Messung, ohne den Probekörper herausnehmen zu müssen, erfolgen kann. Nach Abkühlung der Proben ist die Messung noch einmal durchzuführen. Ergebnisse sind graphisch darzustellen, mit dem E-Modul als Funktion der Temperatur. Um sicherzustellen dass sich beim Aufheizen im ganzen Probekörper die gewünschte Temperatur eingestellt hat, soll auch die Temperatur im Probekörper laufend gemessen werden. Es werden für alle Prüfungen Porenbetonsteine mit der deklarierten Mindestdruckfestigkeit von 2 N/mm^2 (Der Gelbe) verwendet.

In der *Abbildung 3-1* ist die geplante Prüfungsapparatur schematisch dargestellt.

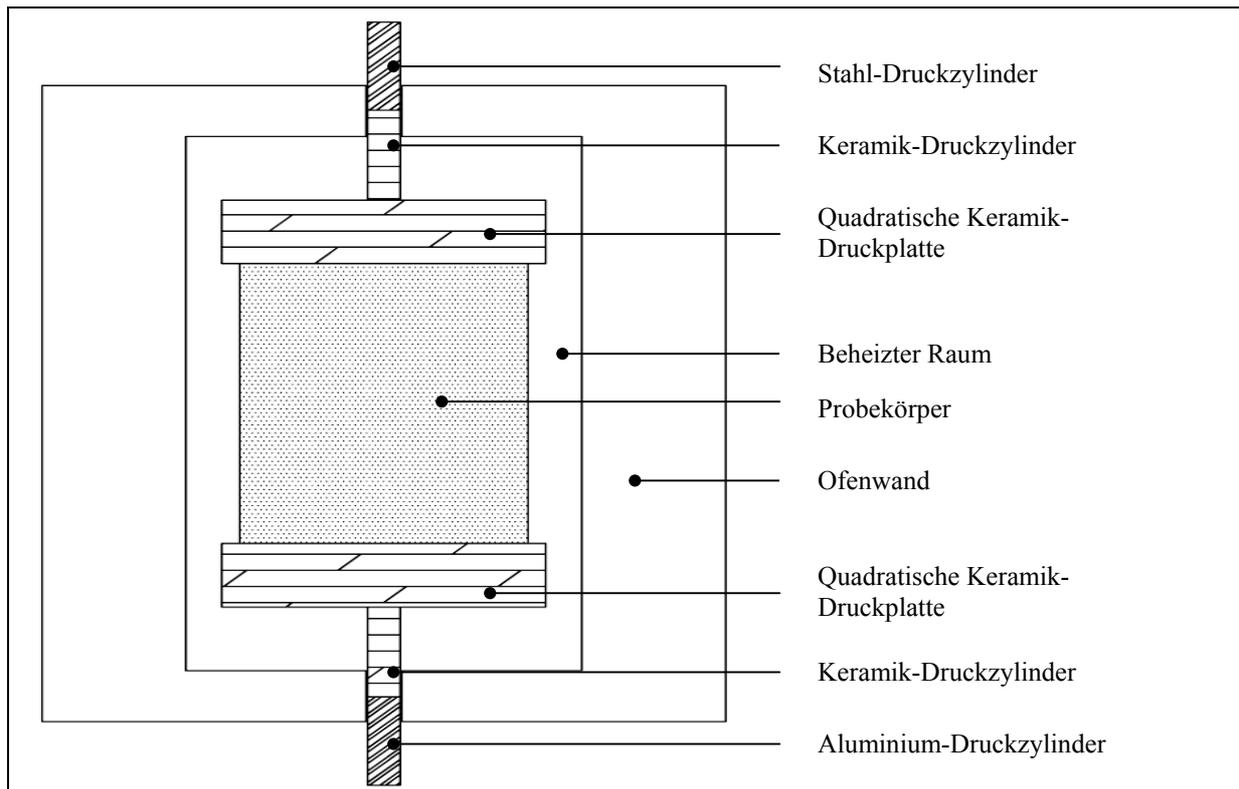


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der geplanten Prüfungsapparatur

3.1 Beschreibung der Versuchsanlagen

Der Ofen

Der Ofen hat die Innenabmessungen (L x B x H) 300 x 200 x 240 mm. Er hat an der Unterseite eine runde Öffnung. Der Deckel wurde aus Platzgründen abmontiert. Zum abschließen wurden zwei feuerfeste poröse Ziegelsteine, mit eingeschnittener Öffnung in der Mitte, verwendet (*Abbildung 3-2*). Die Aufheizrate des Ofens ist steuerbar und kann programmiert werden. Die Maximaltemperatur beträgt 1320°C. Im inneren des Ofens befinden sich Heizspiralen und ein Temperaturfühler. Der Temperaturfühler misst die aktuelle Temperatur an der Ofeninnenwand und regelt die Ein-Ausschaltsequenz der Heizspiralen, je nach vorgegebener Aufheizrate (*Abbildung 3-3*).



Abbildung 3-2: Rohde-Ofen



Abbildung 3-3: Innenraum des Ofens mit Heizspiralen und Temperaturmesser

Der Druckstempel

Die Probekörper müssen über die ganze Fläche gleichmäßig und einaxial belastet werden. Dazu wurden ein oberer und ein unterer Druckstempel angefertigt, welche die Kraft von der Traverse, über den Prüfkörper in die Bodenplatte der Prüfmaschine so einleiten können, dass dabei der Ofen statisch nicht belastet wird. Die Druckstempel bestehen aus einer quadratischen Keramikplatte $L \times B \times H = 124 \times 124 \times 64$ mm, einem Keramikzylinder $D = 48,5$ mm und einem Stahl- bzw. Aluminiumzylinder $D = 50,5$ mm. Die Elemente werden mittels einer zentrisch eingelegten Schraube mit Mutter starr zusammengehalten. Der Aluminiumzylinder hat auf der Unterseite eine Querschnittsverminderung auf $D = 30$ mm, damit er in die Bodenplatte der Druckprüfmaschine einrasten kann. Er ist so hoch, dass die quadratische Keramikplatte knapp über den Boden im Inneren des Ofens liegt, diesen aber nicht berührt und somit auch nicht belastet. Der Stahlzylinder wurde auf der oberen Seite mit einem $D = 15,6$ mm Bolzen mit einer Einkerbung zum Einspannen in die Druckprüfmaschine versehen. Es ist ein hoch legierter Stahl, dessen Steifigkeit sich auch bei hohen Temperaturen nicht ändert.



Abbildung 3-4: Herstellung des Aluminiumzylinders



Abbildung 3-5: Drehen des Stahlzylinderkopfes auf der Drehbank

Die Kontaktflächen des Keramikzylinders und der Keramikplatte wurden plangleich geschliffen. Um die Schraube einzuführen wurde in den Metallzylindern jeweils ein Gewinde eingeschnitten und die Keramikelemente zentrisch durchbohrt. Dann wurde die Schraube eingezogen und die Mutter aufgeschraubt. Die Mutter befindet sich auf der Unterseite der Keramikplatte in einer Öffnung, die später mit Feuerfest-Mörtel verschlossen und geschliffen wurde. Durch Aufschrauben des Metallzylinders an die aus dem Keramikzylinder herausstehenden Schraube, wurden die Elemente fest aneinander befestigt.



Abbildung 3-6: Unterer Druckstempel mit Aluminiumzylinder



Abbildung 3-7: Oberer Druckstempel aus hochlegiertem Stahl

Die Druckprüfmaschine

Für die Druckversuche wurde eine Universalprüfmaschine (*Abbildung 3-8*) der Fa. Zwick (Modell Z 250, max. Prüflast: 250 kN) mit dem Softwarepaket *testXpert* der Fa. Zwick

(Abbildung 3-9) verwendet. Dabei handelt es sich um eine kraft- bzw. weggeregelte, computerunterstützte Prüfeinrichtung. Der zurückgelegte Traversenweg wurde durch eine Messdose direkt an den PC übermittelt. Somit konnte in Echtzeit der Spannungsdehnungsverlauf ermittelt werden.



Abbildung 3-8: Universalprüfmaschine Zwick-Z250

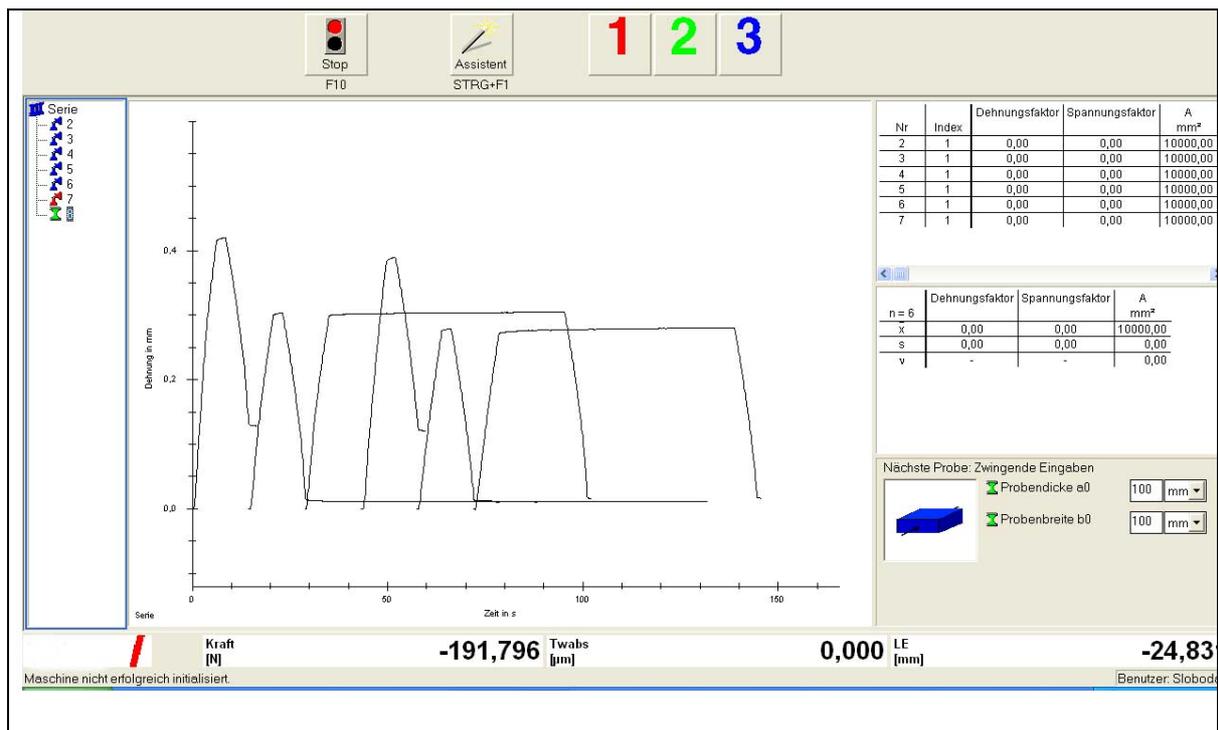


Abbildung 3-9: TestXpert Layout

Die Dehnungsaufnehmer

Der Dehnungsaufnehmer wurde für die Vorversuche, die bei ca. 20°C Raumtemperatur durchgeführt wurden, verwendet. Die Längsverformung wurden an zwei gegenüberliegenden Längsseiten gemessen. Dabei muss nach *EN 1352:1996 (/N2/)* die Mitte der Messstrecke mit der Mitte der Probekörperlänge übereinstimmen. Der Abstand der Messpunkte soll 100 mm betragen. Das Grundgerät ist ein Wegaufnehmer, der die Verschiebung der Spitze einer Tastzunge in ein elektrisches Signal umformt. Die Umformung erfolgt mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen, die in einer Vollbrückenschaltung auf der Messzunge innerhalb des Gerätes angeordnet sind (*Abbildung 3-10*). Für die E-Modulmessung wurde ein Ansatz-Wegaufnehmer verwendet. Das sind zwei einander gegenüber an der Probe angeordnete Ansatz-Dehnungsaufnehmer, die an einer Schnellspannvorrichtung montiert sind (*Abbildung 3-11*).



Abbildung 3-10: DD1-Dehnungsaufnehmer, Hottinger-Baldwin Messtechnik, (HBM, /32/)

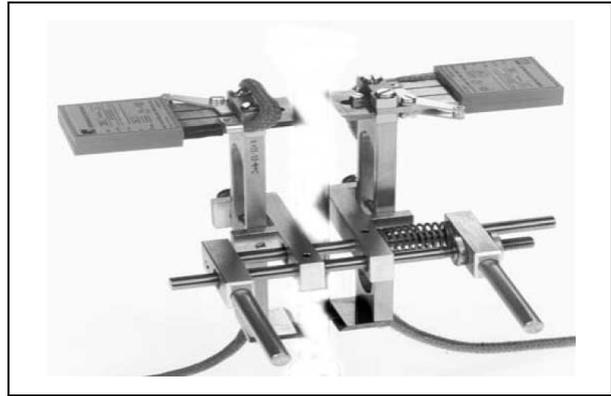


Abbildung 3-11: Ansetz-Dehnungsaufnehmer mit Spannfedersystem, (HBM, /32/)

Temperaturmessung

Zur Kontrolle der Prüfkörpertemperatur während des Aufheizens wurden NiCr – Ni Mantelthermoelemente eingesetzt, die an ein kalibriertes Messwerterfassungssystem angeschlossen wurden. Während der gesamten Aufheizdauer wurden die Temperaturverläufe in den Porenbetonprobekörpern bestimmt. Die Positionstiefe der Temperaturmessfühler gemessen von der Probekörperoberfläche betrug 0 cm, 0,5 cm, 2 cm und 5 cm (Abbildung 3-12). Ferner hat ein Temperaturmessfühler die Raumtemperatur im Ofen begleitend gemessen.



Abbildung 3-12: Probekörper mit installierten Thermoelementen

Als Schnittstelle zwischen den Thermoelementen und der Computererfassung der Daten diente ein Multimeter der Marke *Keithley*.

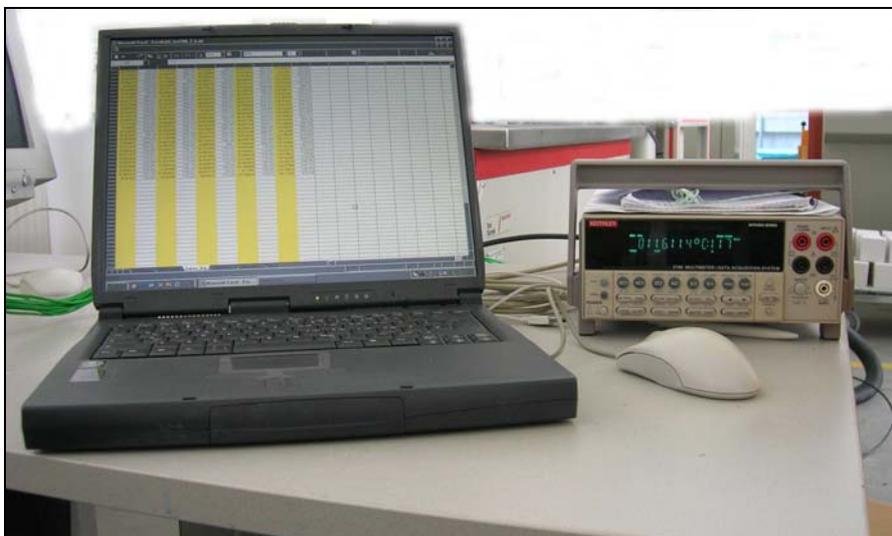


Abbildung 3-13: Einrichtung zur Temperaturlaufzeichnung

Darrofen

Zur Bestimmung der Trockenrohddichte wurde ein Trocknungsofen der Fa. *Memert* verwendet. Die Proben wurden bei 105°C bis zur Massenkonstanz getrocknet (*Abbildung 3-14*).



Abbildung 3-14: Trocknungsofen bei 105°C

STA 409 EP

Zur Durchführung von Thermoanalytischen Analysen wurde die *STA 409 EP (Simultane Thermische Analyse)* von *Netzsch* verwendet (*Abbildung 3-15*). Damit können thermoanalytische Untersuchungen im Temperaturbereich von 25 °C bis 1550 °C durchgeführt werden. Die Versuchseinrichtung besteht aus:

- Messgerät
- Energieversorgungsapparat
- Datenerfassungsapparat
- Vakuumpumpe
- Thermostat

- Gasversorgung
- PC.



Abbildung 3-15: STA 409 EP von Netzsch

Vor der Versuchsdurchführung wurden die Probe und der Tiegel gewogen (*Abbildung 3-16*). Die Probenmasse betrug ungefähr 30 mg und als Referenzprobe diente der leere Tiegel mit einem Eigengewicht von ca. 1377 mg (*Abbildung 3-17*). Zum Spülen wurde Luft verwendet. Die Messung wurde im Bereich von 30°C bis 1200°C mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/min durchgeführt.



Abbildung 3-16: Sartorius Waage mit einer Messgenauigkeit von 1/1000 Gramm



Abbildung 3-17: Probenhalterung mit Probetiegel und Referenzprobetiegel

3.2 Herstellung der Probekörper

Für die Versuchsdurchführung wurden aus Porenbetonplansteinen ($B \times H \times L = 300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$) 20 Stück $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ Prismen und 50 Stück $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ Würfel herausgeschnitten. Zum Schneiden wurde eine Tischkreissäge mit einer 90° -Führungsschiene verwendet. Dann wurden alle Probekörper mit einem Messschieber gemessen und jene mit den geringsten Abweichungen ausgewählt. Um ganz ebene Druckflächen herzustellen, wurden die Proben bei Bedarf, mit einem auf einer Holzplatte aufgebrachtem Schmirgelpapier, geschliffen. Ferner wurden sie mit einem Malerpinsel abgestaubt. Sie wurden durchnummeriert und auf Holzpaletten in der Prüfhalle gelagert (Abbildung 3-18). Um für die Temperaturmessung Thermoelemente einbringen zu können, wurden an entsprechenden Proben, in vorgegebenem Abstand von 0,5 cm, 2 cm und 5 cm von der Oberfläche, mit einem dünnen Stahldraht Löcher vorgebohrt.



Abbildung 3-18: Durchnummerierte 100x100x100 mm Proben

3.3 Vorversuche

Die Bestimmung des E-Moduls wurde in Anlehnung an die Norm *EN 1352:1996* durchgeführt. Als Referenzprobekörper sind demnach Prismen mit quadratischem Querschnitt mit den Maßen von 100 mm x 100 mm x 300 mm zu verwenden und die Verformung ist, wie zuvor beschrieben, mit einem Dehnungsaufnehmer zu bestimmen. In der Vorliegenden Arbeit ist der E-Modul bei hohen Temperaturen von Interesse. Dazu muss der Probekörper auf die gewünschte Temperatur erhitzt werden. Es ist dabei nicht möglich die Verformung mit einem Ansetz-Dehnungsaufnehmer (*Abbildung 3-11*) zu messen, da man davor den Probekörper aus dem Ofen herausnehmen müsste. Dieser würde eine plötzliche Abkühlung erfahren, was den Probekörper selbst beschädigen könnte, etwa durch Rissbildung und außerdem hätte man nicht die gewünschte Probekörpertemperatur während der Messung. Die Prüfungsdauer beträgt ungefähr zweieinhalb Minuten, was zu einer beträchtlichen Abkühlung führen würde. Ferner lässt sich der Dehnungsaufnehmer nicht in den Ofen mit einbauen, da er den hohen Temperaturen nicht standhalten würde. Aus diesem Grund wird die Prüfung, wie in *Abbildung 3-1* dargestellt, durchgeführt. Da der Innenraum des Ofens eine geringe Höhe aufweist, werden die Messungen an einem 100 mm x 100 mm x 100 mm Würfel durchgeführt. Die Verformungsmessung erfolgt über die Traverse der Universalprüfmaschine (*Abbildung 3-19*). Die Taverse wird nach den Belastungszyklen, wie in *Abbildung 2-27* dargestellt, kraftgesteuert gefahren. Da die mit der Traverse gemessenen Verformungen nicht

mit den tatsächlichen Verformungen des Probekörpers übereinstimmen, müssen sie mit einem Korrekturfaktor multipliziert werden. Die Bestimmung des Korrekturfaktors wird unten ausführlich beschrieben.

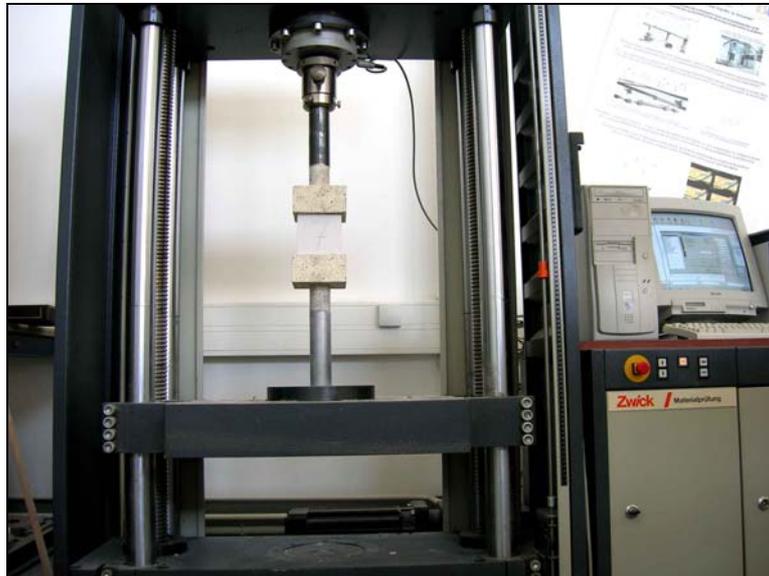


Abbildung 3-19: Belastungsvorrichtung ohne Ofen

Anmerkungen zur Prüfsoftware

Die Software von *TestXpert* arbeitet mit Prüfvorschriften. Das sind vorprogrammierte Prüfungsabläufe die sich an *EN* Normen orientieren. D. h., automatisch lassen sich nur jene Prüfungsabläufe durchführen und auswerten, für welche Prüfvorschriften in der Software lizenziert sind. Die vorhandene Prüfvorschrift „*HE006: Universeller Hystereseversuch für Elastomere*“ unterstützt zwar die E-Modulmessung, jedoch lassen sich mit ihr nur Belastungszyklen mit konstanten Wartezeiten realisieren. Um die Prüfung gemäß *EN 1352:1996* durchzuführen und die Wartezeiten zwischen den Belastungszyklen wie in *Abbildung 2-27* dargestellt zu verwirklichen, wurden mit der Prüfvorschrift „*Db002: Universeller Druck-Biegeversuch*“ drei aneinandergereihte Belastungszyklen mit den entsprechenden Wartezeiten gefahren (*Abbildung 3-20*). Dabei wurden laufend die Spannung und die Dehnung gemessen. Anschließend wurden die Daten ins Excel exportiert und der E-Modul nach der im Kapitel *E-Modul Bestimmung* angegebenen Formel ermittelt.

Folgende Prüfparametereinstellungen wurden vorgenommen:

- Vorkraft bis zum Erreichen der unteren Prüfspannung: $0,1 \text{ N/mm}^2$
- Untere Prüfspannung ($\sim 5\%$ der deklarierten Betondruckfestigkeit): $0,1 \text{ N/mm}^2$
- Obere Prüfspannung ($\sim 1/3$ der deklarierten Betondruckfestigkeit): $0,67 \text{ N/mm}^2$
- Haltezeiten wie in Abbildung 2-27 angegeben
- Halteart: kraftgeregelt
- Belastungs- und Entlastungsgeschwindigkeit: $0,1 \text{ N/mm}^2$ je Sekunde

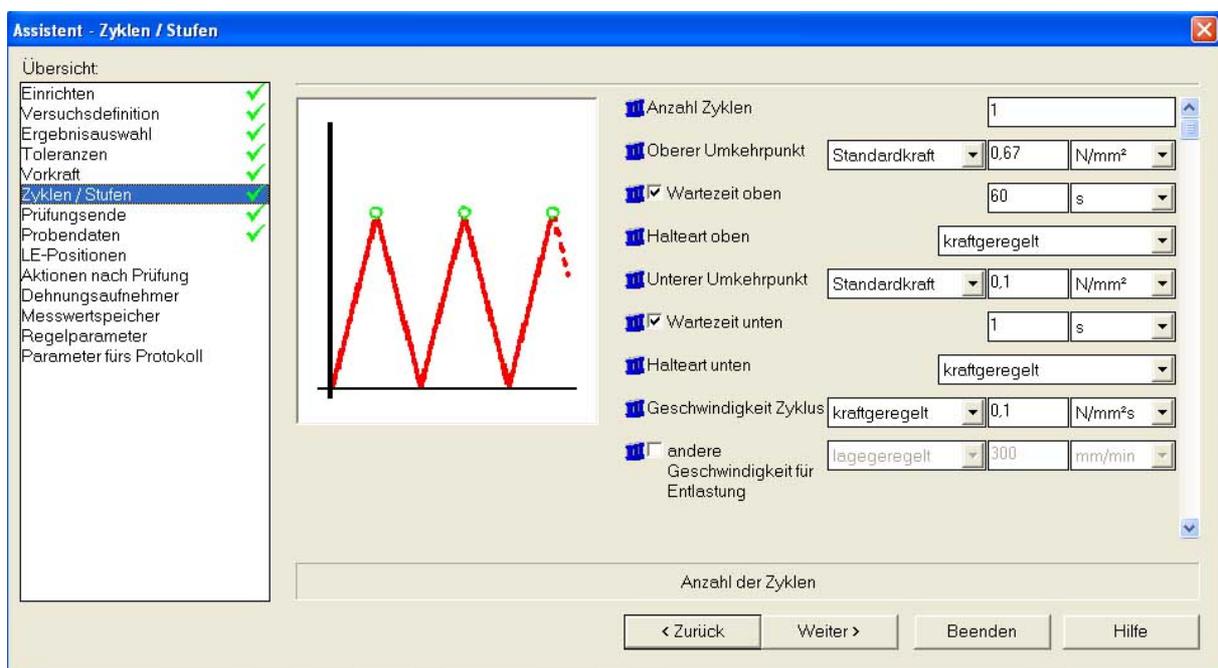


Abbildung 3-20: TestXpert Prüfungsvorschrift Layout

Bestimmung der Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichte wurde nach *EN 678:1993* bestimmt (siehe Kap. 2.5.1). Dafür wurden 3 Probekörper mit den Abmessungen $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ in einem belüfteten Trockenschrank (Abbildung 3-14) bei einer Temperatur von 105°C bis zum Erreichen der Massenkonstanz gelagert. Die Trockenrohdichte dient für die spätere Berechnung des Feuchtegehaltes. In der folgenden Tabelle sind Werte für $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ Prismen angeführt:

Tabelle 3-1: Bestimmung der Trockenrohddichte bei 105°C - Prisma

100 mm x 100 mm x 300 mm Probekörper						07.09.2007	10.09.2007	11.09.2007
Nummer	Höhe	Länge	Breite	QS-Fläche	Volumen	Gewicht vor Trocknung	Gewicht nach Trocknung	Gewicht nach Trocknung
	mm	mm	mm	mm ²	mm ³	g	g	g
1	29,86	10,25	9,94	101,89	3042,29	1452	1418	1418
2	29,84	10,25	9,96	102,09	3046,37	1435	1403	1403
3	29,75	10,20	9,94	101,39	3016,29	1431	1398	1398

Die Trockenrohddichten der einzelnen Probekörper ergeben sich zu:

$$\rho_1 = \frac{m_{d1}}{V_1} = \frac{1,418}{3042,29 * 10^{-6}} = 466 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_2 = \frac{m_{d2}}{V_2} = \frac{1,403}{3046,37 * 10^{-6}} = 461 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\rho_3 = \frac{m_{d3}}{V_3} = \frac{1,398}{3016,29 * 10^{-6}} = 463 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

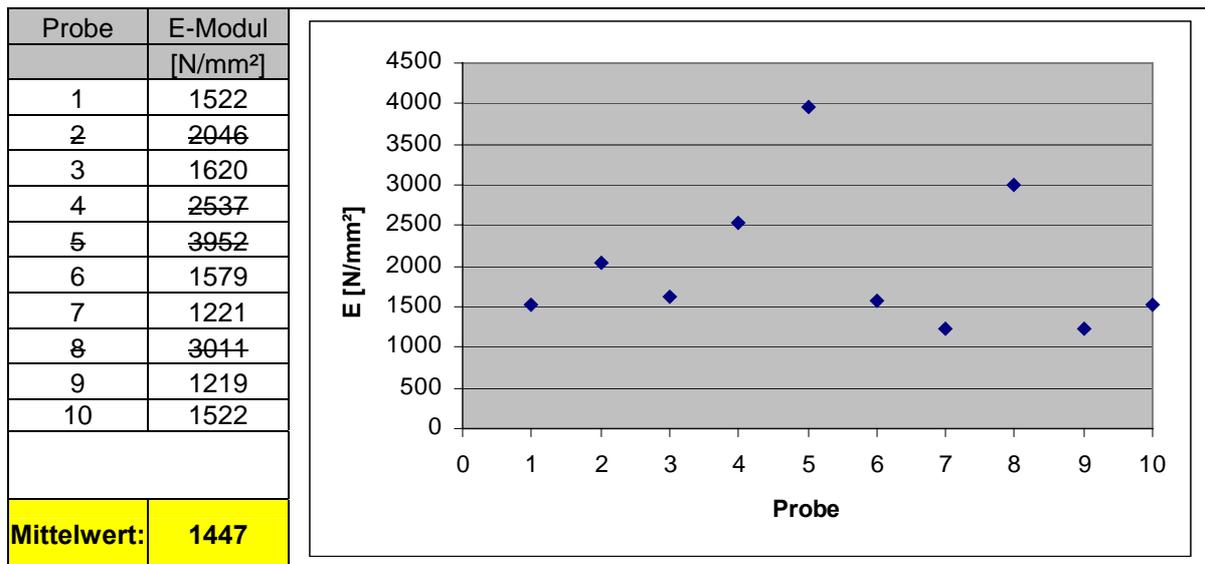
Die Trockenrohddichte des Produkts ist definiert als der Mittelwert der Trockenrohddichten der drei Probekörper und ergibt sich zu:

$$\rho = \frac{1}{3}(\rho_1 + \rho_2 + \rho_3) = \frac{1}{3}(466 + 461 + 463) = 463 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Bestimmung des Korrekturfaktors

In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst der Elastizitätsmodul an 100 mm x 100 mm x 300 mm Prismen mit Hilfe eines Ansetz-Dehnungsaufnehmers (*Abbildung 3-11*) bei Labortemperatur von ungefähr 20°C bestimmt. Diese Vorgangsweise entspricht den Anforderungen der *EN 1352:1996*. Es wurde eine Versuchsreihe mit 10 Proben durchgeführt. Die gemessenen Werte entsprechen den Werten aus der Literatur (*vgl. Tabelle 2-3*). Sie sind in der unteren *Tabelle 3-2* dargestellt.

Tabelle 3-2: Bestimmung des E-Moduls an Porenbetonprismen mit der deklarierten Mindestdruckfestigkeit von 2,0 N/mm²



Proben 2, 4, 5 und 8 werden als Ausreißer betrachtet und ausgeschlossen. Der errechnete Mittelwert beträgt 1447 N/mm². Ein Beispiel eines Einzelprüfungsprotokolls ist im Anhang in *Tabelle 8-1* dargestellt.

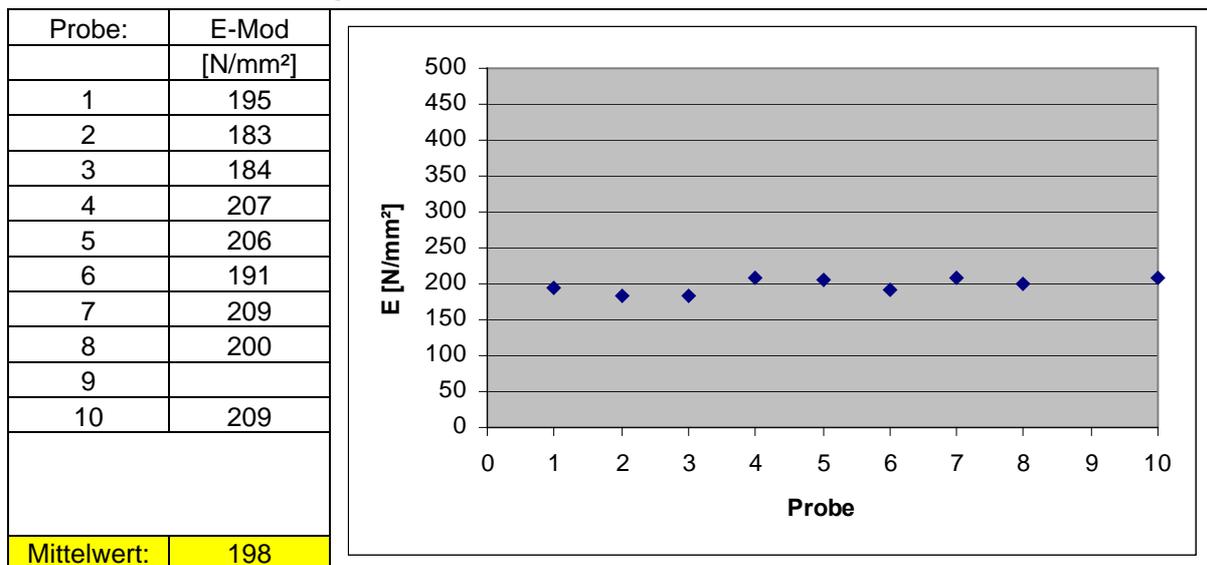
Weiters wurde eine Versuchsreihe mit 10 Proben an 100 mm x 100 mm x 100 mm Würfeln durchgeführt. Die Versuchsdurchführung erfolgte so, wie sie für Versuche bei hohen Temperaturen geplant war (*Abbildung 3-21*). Der Prüfkörper wurde über die Druckstempel im Ofen belastet, allerdings, auch wie beim vorigen Versuch, unter Laborbedingungen bei ca. 20°C.



Abbildung 3-21: Vorversuche für die Ermittlung des Korrekturfaktors

Folgende Ergebnisse wurden ermittelt (*Tabelle 3-3*):

Tabelle 3-3: Mit der Traverse gemessene E-Modulwerte an 100 mm x 100 mm x 100 mm Proben bei 20 °C



Probe 9 wurde zerstört. Alle weiteren Proben ergaben sehr ähnliche Ergebnisse mit einer geringen Streuweite. Der Mittelwert der gemessenen E-Moduli beträgt 198 N/mm².

Vergleicht man die Ergebnisse von der Messung mit dem Ansetz-Dehnungsaufnehmer und der Messung mit der Traverse so lässt sich feststellen, dass die letztere um etwa das 7-fache

geringer ist. Dieser Unterschied resultiert einerseits aus der Art der Verformungsmessung und andererseits aus der unterschiedlichen Höhe der Probekörper. Damit die gemessenen Werte den Soll-Werten entsprechen, müssen sie mit dem Korrekturfaktor multipliziert werden. Der Korrekturfaktor f errechnet sich folgendermaßen:

$$f = \frac{E_{\text{Dehnungsaufnehmer}}}{E_{\text{Traverse}}} = \frac{1447}{198} = 7,31$$

4 Versuchsdurchführung und Auswertung

4.1 Versuchsprogramm

E-Modul

Es werden 7 Versuchsreihen zu je 3 Proben geprüft. Für die Versuche wird Porenbeton der Mindestdruckfestigkeitsklasse 2,0 N/mm² (*Der Gelbe*) verwendet. Die Proben werden bei Temperaturen von 20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 600°C und 800°C getestet, wobei die Ergebnisse für die Prüfung bei 20°C bereits aus den Vorversuchen vorhanden sind. Da beim Erreichen der geforderten Temperatur im Ofen, noch gewartet werden muss bis sich im ganzen Probekörper ein homogenes Temperaturfeld eingestellt hat, wird die Temperatur im Probekörper stets gemessen. Die Temperaturänderung wird in Echtzeit auf dem Laptop angezeigt. Erst wenn sich die gewünschte Temperatur gleichmäßig im Probekörper eingestellt hat, wird mit der E-Modulmessung begonnen. Nach Beendigung der Messung wird der Ofen geschlossen gelassen, bis er sich vollständig abgekühlt hat. Die Prüfungen wurden deswegen meistens Nachmittags durchgeführt und der Ofen über Nacht abgekühlt. Die Proben wurden vor und nach dem Test gewogen. Im folgenden Unterkapitel sind die Ergebnisse dargestellt. Es wird von jeder Probe der berechnete E-Modul angegeben, die Abmessungen des Probekörpers, das Gewicht vor dem Aufheizen und nach Wiederabkühlung auf Raumtemperatur und die mittleren Dehnungen während der 30 Sekunden Ablesezeit für die untere und für die obere Prüfspannung. Die Dehnungen wurden mit der Traverse der Druckprüfmaschine aufgenommen. Aus dem Quotienten der Spannungs- bzw. Dehnungsdifferenzen wird der E-Modul, unten als *gemessener Wert* bezeichnet, berechnet (*siehe Kap. 2.5.3*). Um auf den tatsächlichen Wert zurückzurechnen wird der gemessene Wert mit dem Korrekturfaktor ($f=7,31$) multipliziert.

Rest-E-Modul

Die Bestimmung des Rest-E-Moduls wurde drei Tage nach Beendigung der ganzen Testreihe für den E-Modul durchgeführt. Bis dahin wurden die Probekörper bei Laborklima auf Holzpaletten gelagert. Die Prüfung erfolgte analog wie bei der E-Modulbestimmung, allerdings bei Labortemperatur von ca. 20°C. In der Auswertung werden diese Proben mit

z. B. „*Ex 100 °C*“ bezeichnet. Angegeben wird das Gewicht, die mittleren Dehnungen, sowie der gemessene Wert mit dem entsprechenden tatsächlichen Rest-E-Modul.

Temperaturmessung

Es wurde bei jedem Probekörper der Temperaturverlauf gemessen. Ein Thermoelement befand sich im inneren des Ofens, zwischen Wand und Probekörper. Ein Thermoelement wurde in einem eingeritzten Schlitz auf der Oberfläche der Probe befestigt und drei weitere wurden in Abständen von 0,5 cm, 2 cm und 5 cm von der Probekörperoberfläche hineingelegt. Die Aufheizrate des Ofens betrug 2 K/min. Bei manchen Proben kam es während der Temperaturaufzeichnung zu Unterbrechungen, weil die Software nicht immer einwandfrei funktionierte. Deswegen werden im *Unterkapitel 4.2.3* nur Temperaturmesskurven die störungsfrei aufgenommen wurden wiedergegeben. Es werden einerseits Messkurven aller Thermoelemente bei den einzelnen Temperaturen angegeben und andererseits Temperaturverläufe in Abhängigkeit von der Position des Thermoelementes im Probekörper. Weiters ist das Gewicht der Probekörper vor und nach der Temperaturbelastung gegeben.

DTA-TG

Die thermische Analyse wurde im Anschluss, nach Beendigung der Rest-E-Modulmessung durchgeführt. Dafür wurden kleine Versuchsstücke aus den Prüfkörpern herausgebrochen. Es wurden Proben von Prüfkörpern entnommen die auf 100 °C, 300 °C, 600 °C und 800 °C erhitzt worden waren. Im folgenden Unterkapitel ist die graphische Auswertung wiedergegeben.

Quecksilberporosimetrie

Die Untersuchung wurde mit *Pascal 440* der Fa. *Thermo Finnigan* durchgeführt. Die Analyse wurde an einer zuvor auf 800 °C vorbelasteten Probe durchgeführt und an einer Probe die nicht vorbelastet wurde. Die Ergebnisse wurden numerisch in Tabellen ausgegeben, und die Graphen mit MS Excel produziert.



Abbildung 4-1: Quecksilberporosimeter *Pascal 440*

4.2 Wiedergabe der Versuchsergebnisse

4.2.1 E-Modul

100°C				E-Modul:		1529 N/mm ²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	101,8x100,0x102,0	498	488	0,004014	0,001289	209

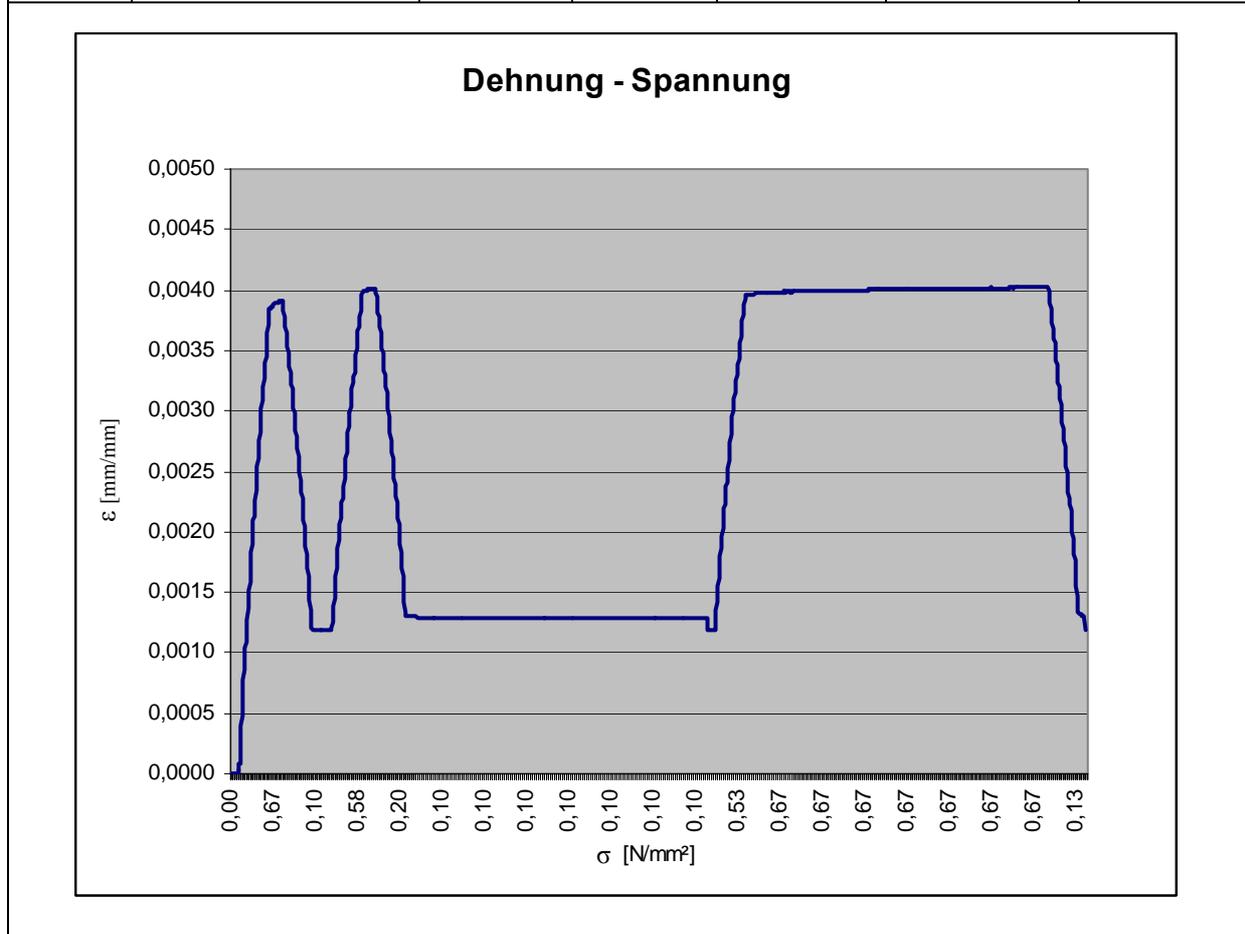


Abbildung 4-2: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 100 °C

100°C				E-Modul:	1529 N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,5x101,5x99,5	512	506	0,003671	0,000947	209

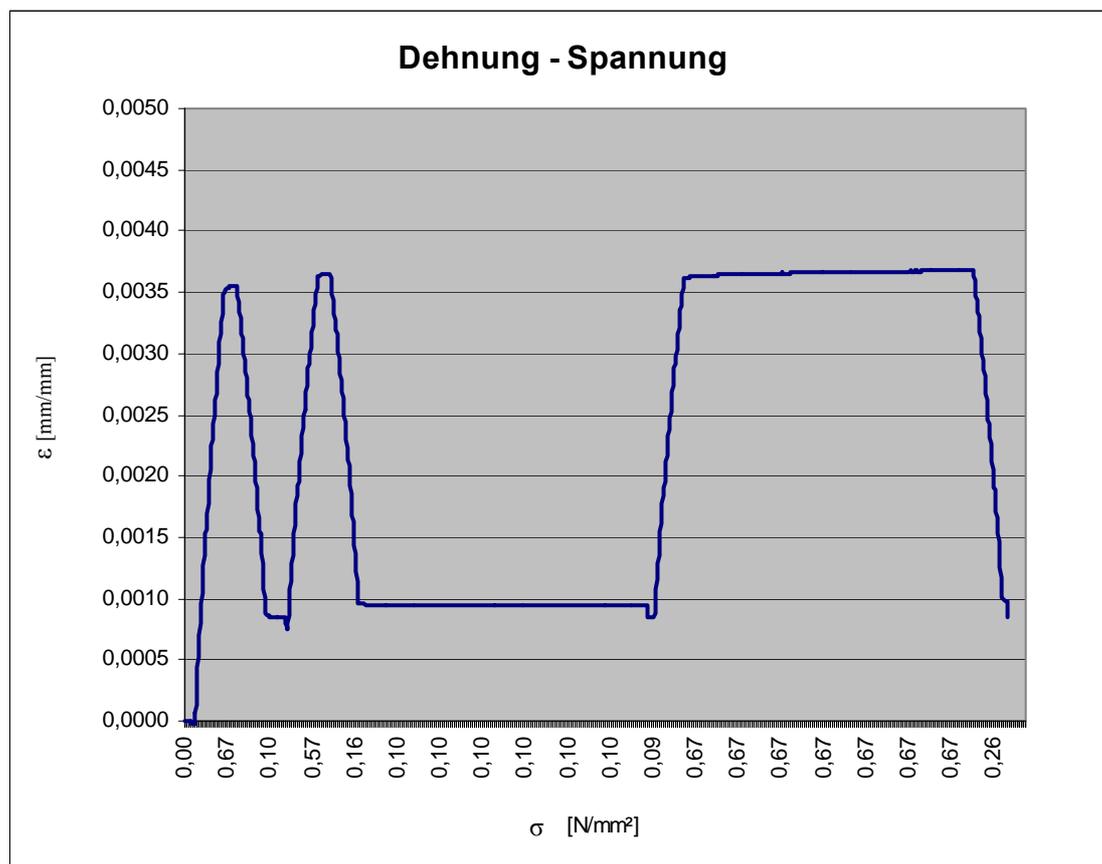


Abbildung 4-3: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 100 °C

100°C				E-Modul:		1570 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	101,6x101,6x99,2	492	478	0,003607	0,000953	215

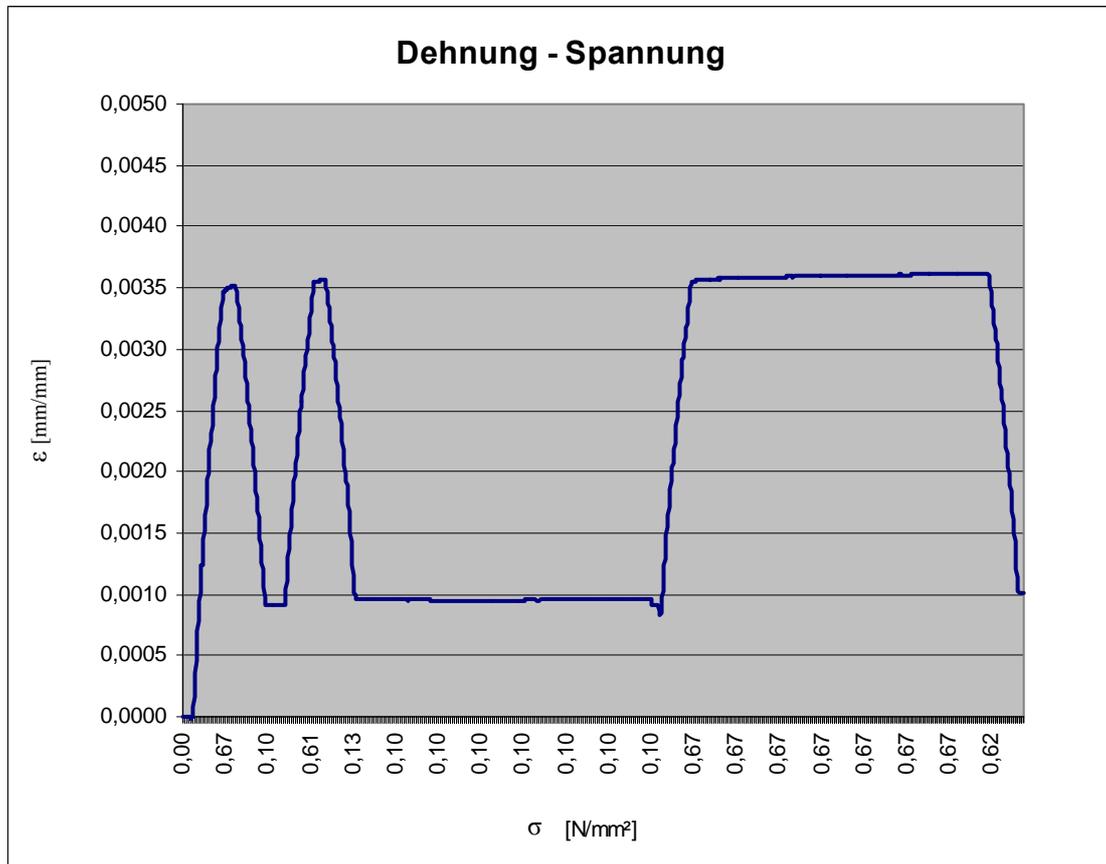


Abbildung 4-4: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 100 °C

200°C				E-Modul:		1524 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,8x101,2x99,9	501	487	0,005081	0,002348	208,5

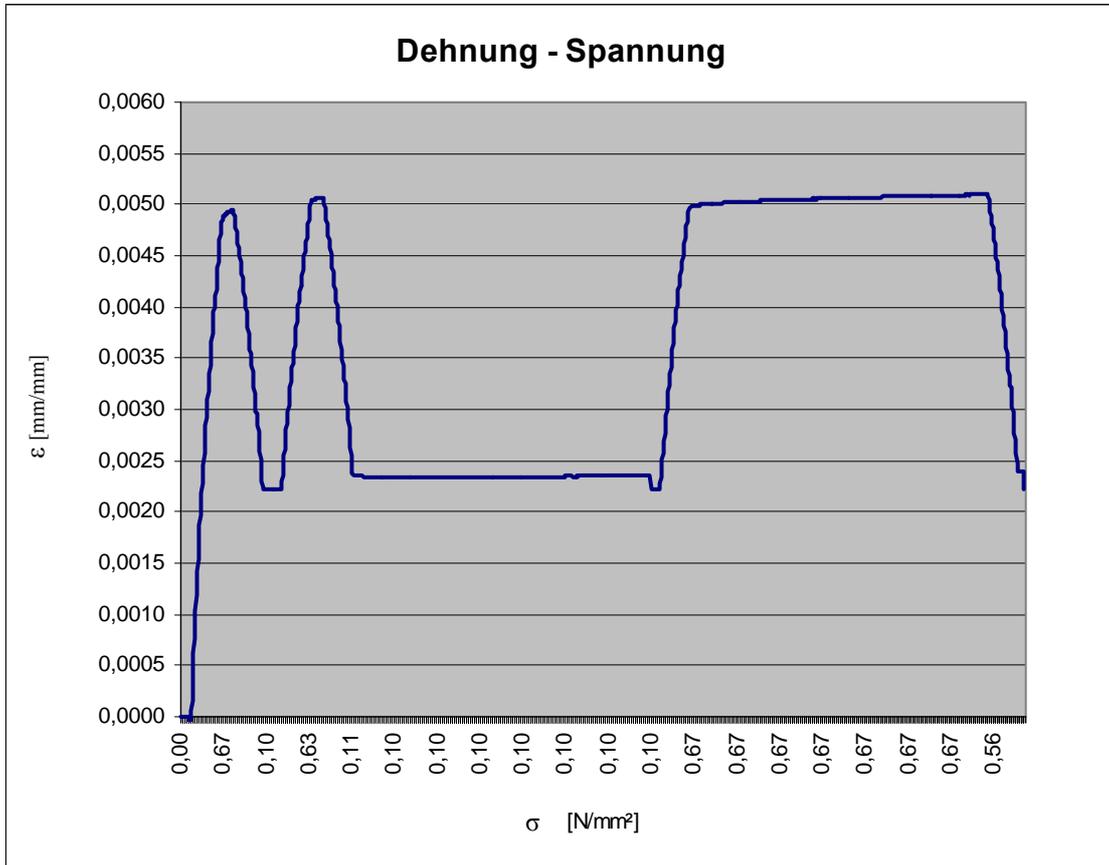


Abbildung 4-6: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 200 °C

200°C				E-Modul:		1536 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	102,2x101,7x99,5	503	494	0,004333	0,001621	210

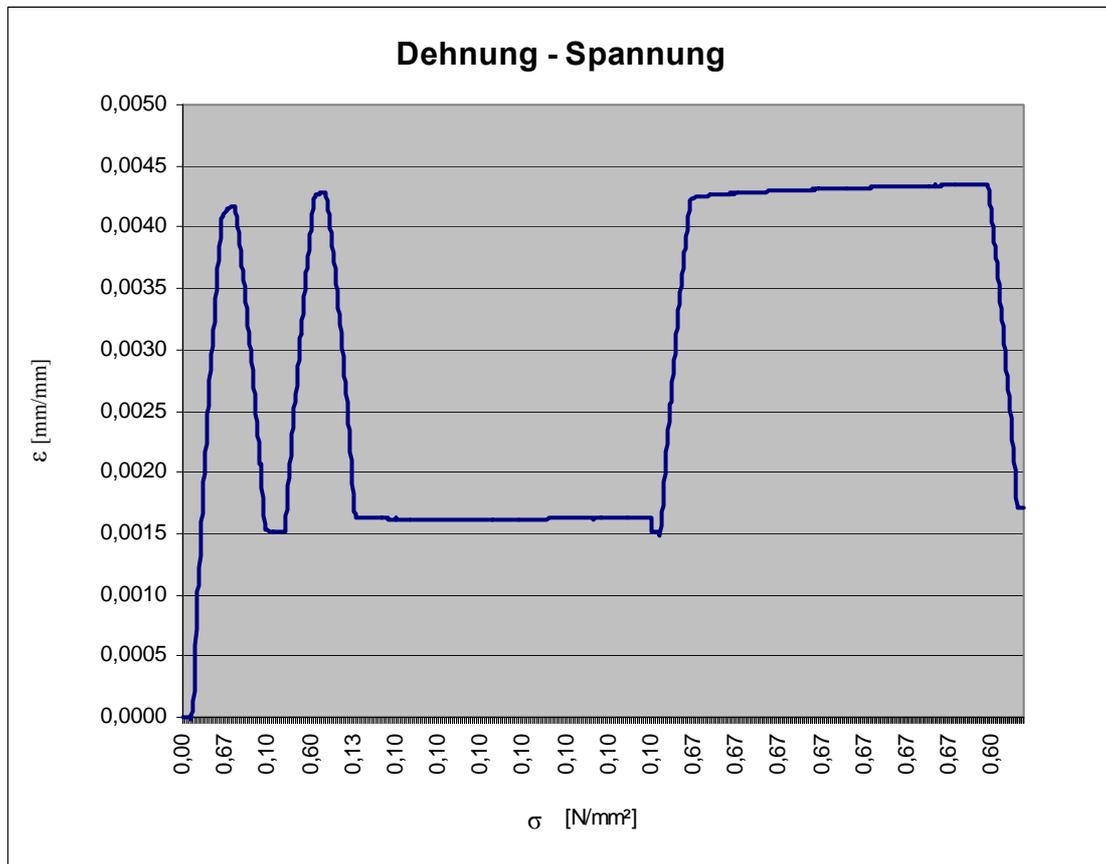


Abbildung 4-7: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 200 °C

300°C				E-Modul:		1361 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	101,2x99,8x101,2	486	471	0,004794	0,001734	186

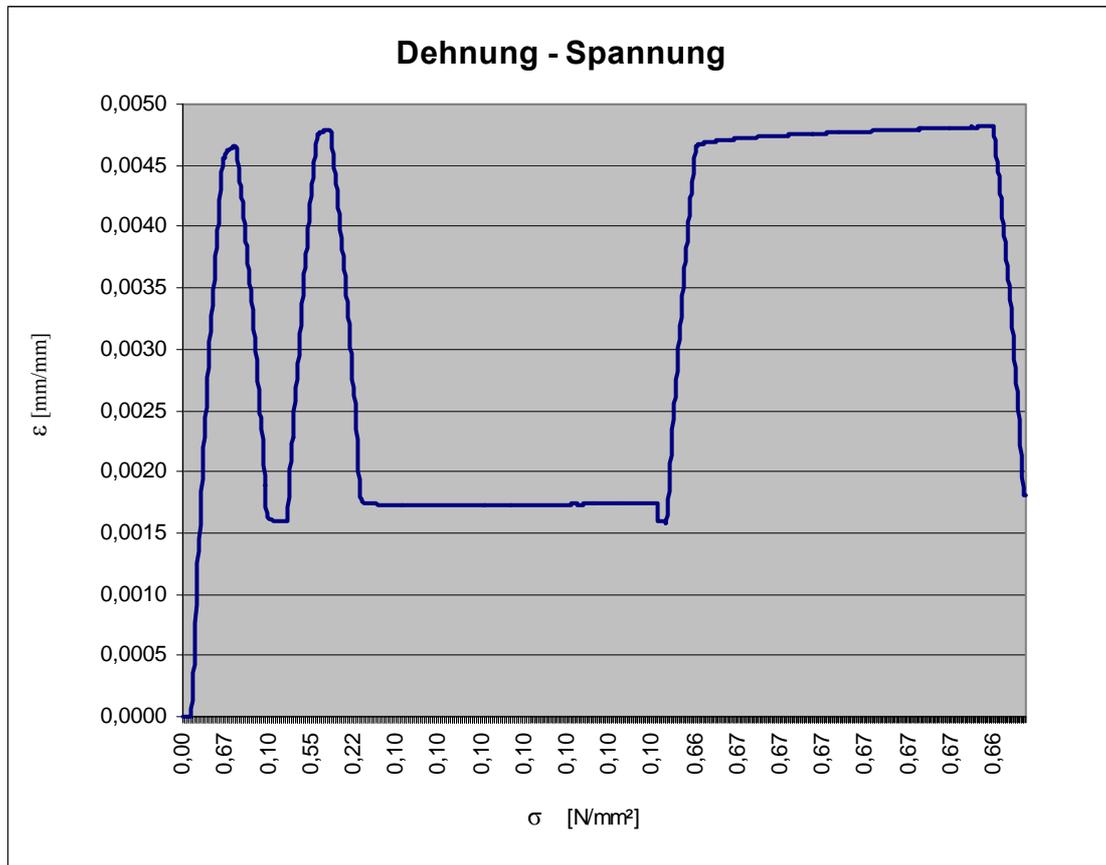


Abbildung 4-8: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 300 °C

300°C				E-Modul:		1426 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	101,2x99,8x101,2	483	473	0,004872	0,001950	195

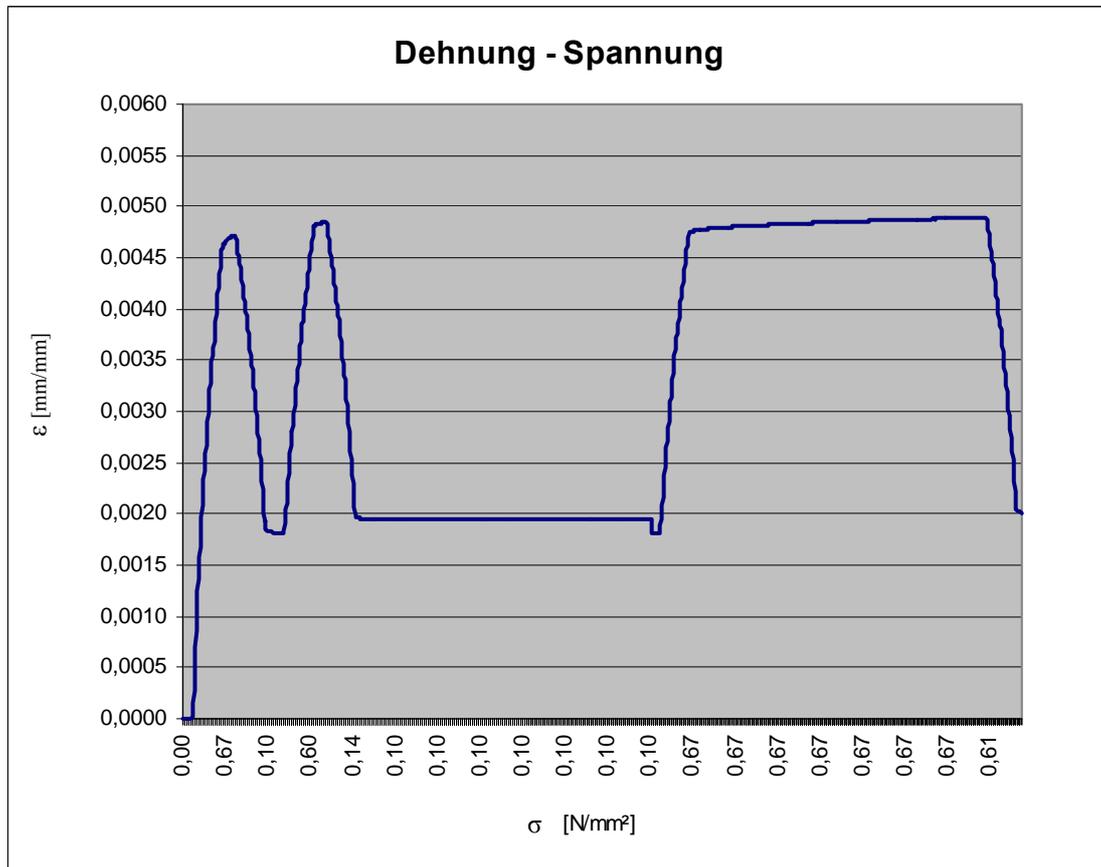


Abbildung 4-9: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 300 °C

300°C				E-Modul:		1430 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	101,8x99,5x101,5	483	472	0,004506	0,001593	196

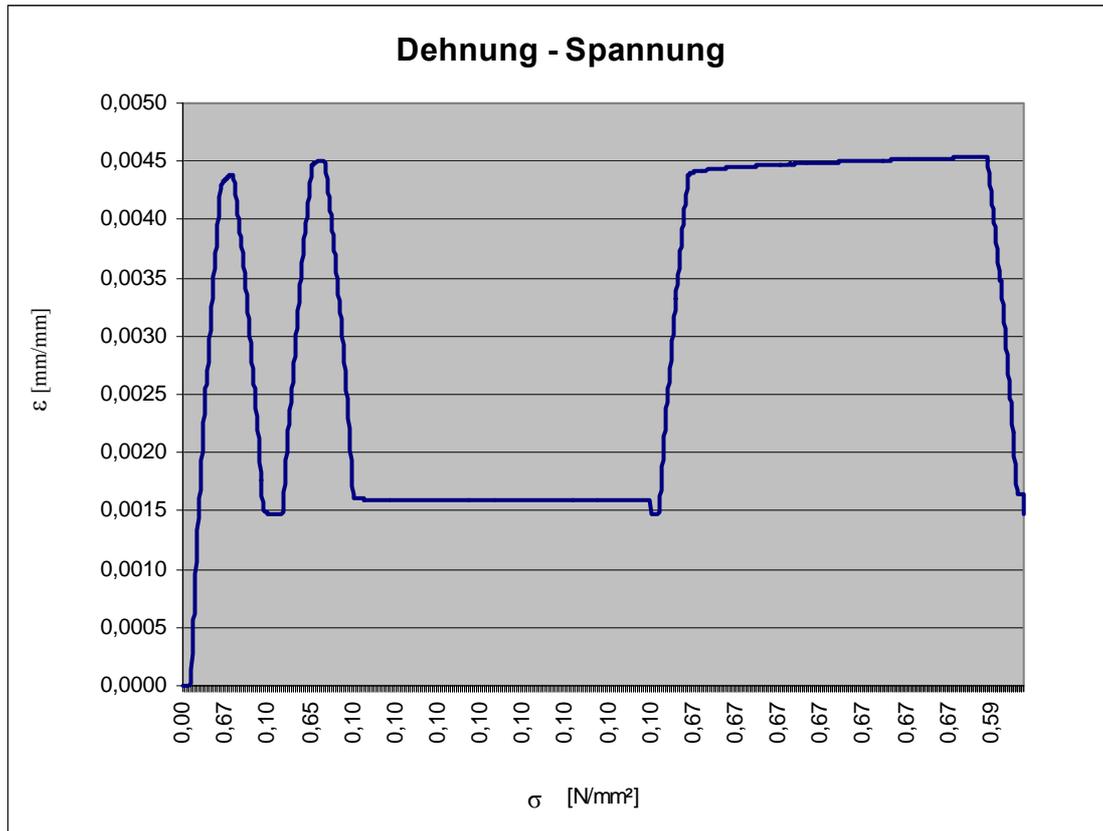


Abbildung 4-10: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 300 °C

400°C				E-Modul:		1377 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	102,1x99,9x101,8	500	473	0,004594	0,001569	188

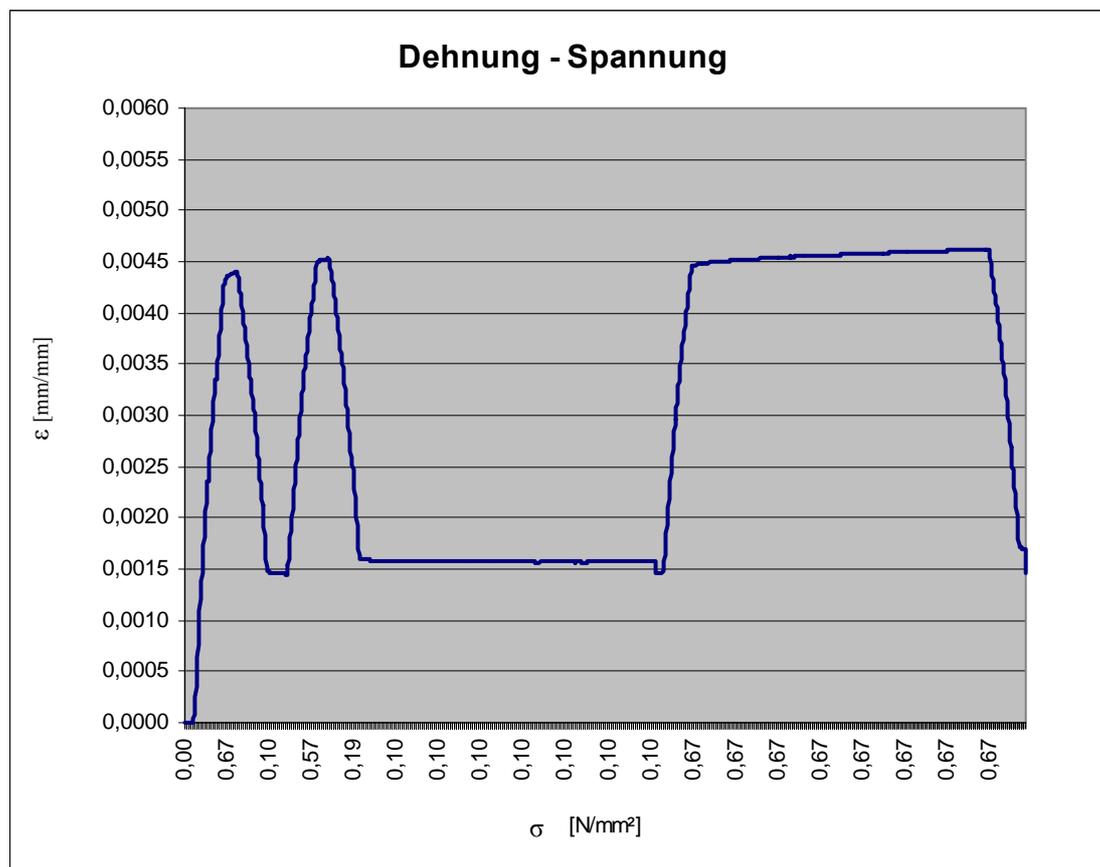


Abbildung 4-11: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 400 °C

400°C				E-Modul:	1261 N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,1x99,8x102,1	486	461	0,005471	0,002168	172

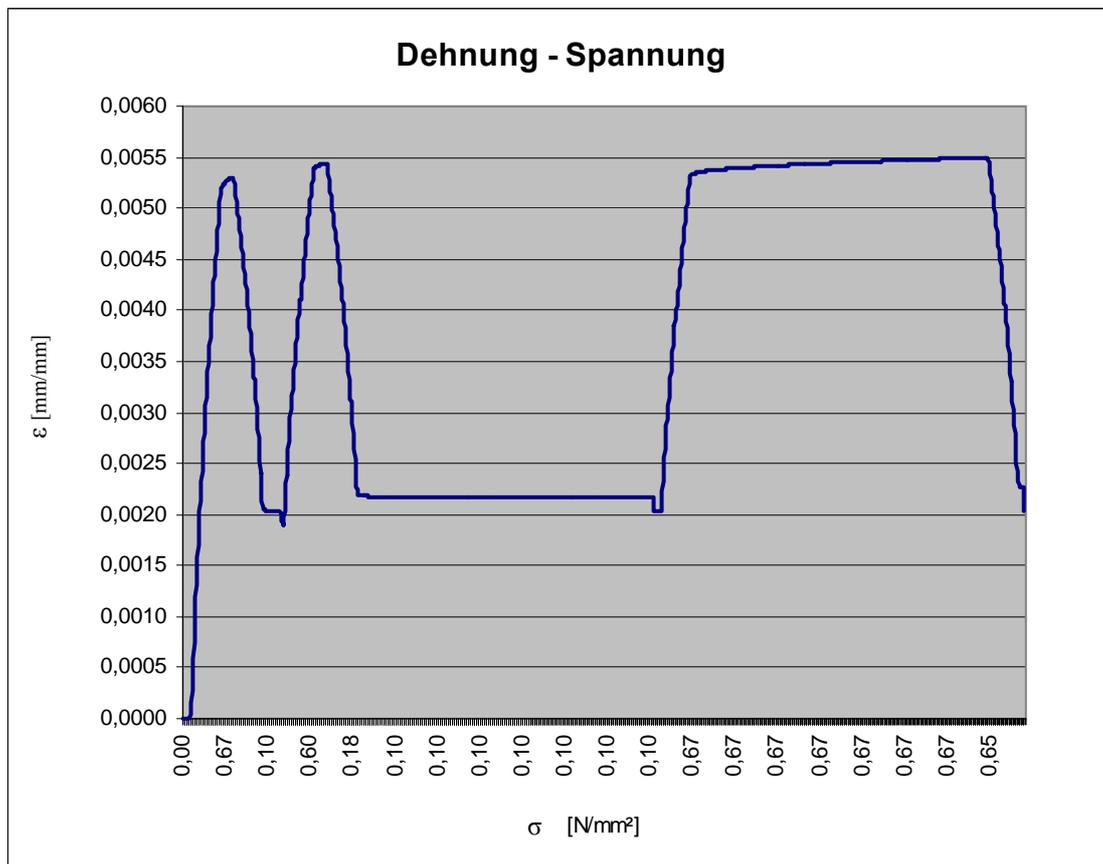


Abbildung 4-12: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 400 °C

400°C				E-Modul:		1370 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	101,5x9,95x102,0	486	460	0,004606	0,001565	187

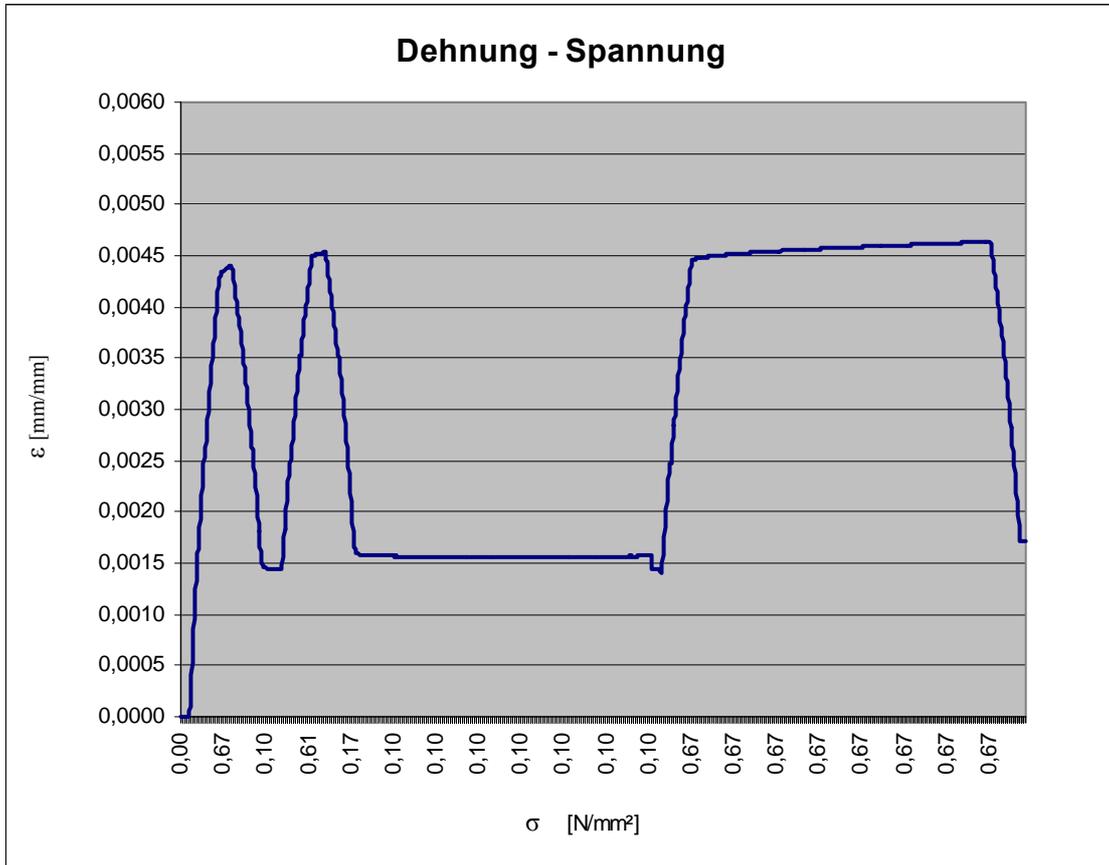


Abbildung 4-13: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 400 °C

600°C				E-Modul:		1294 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	102,2x99,8x101,2	497	X	0,005117	0,001901	177

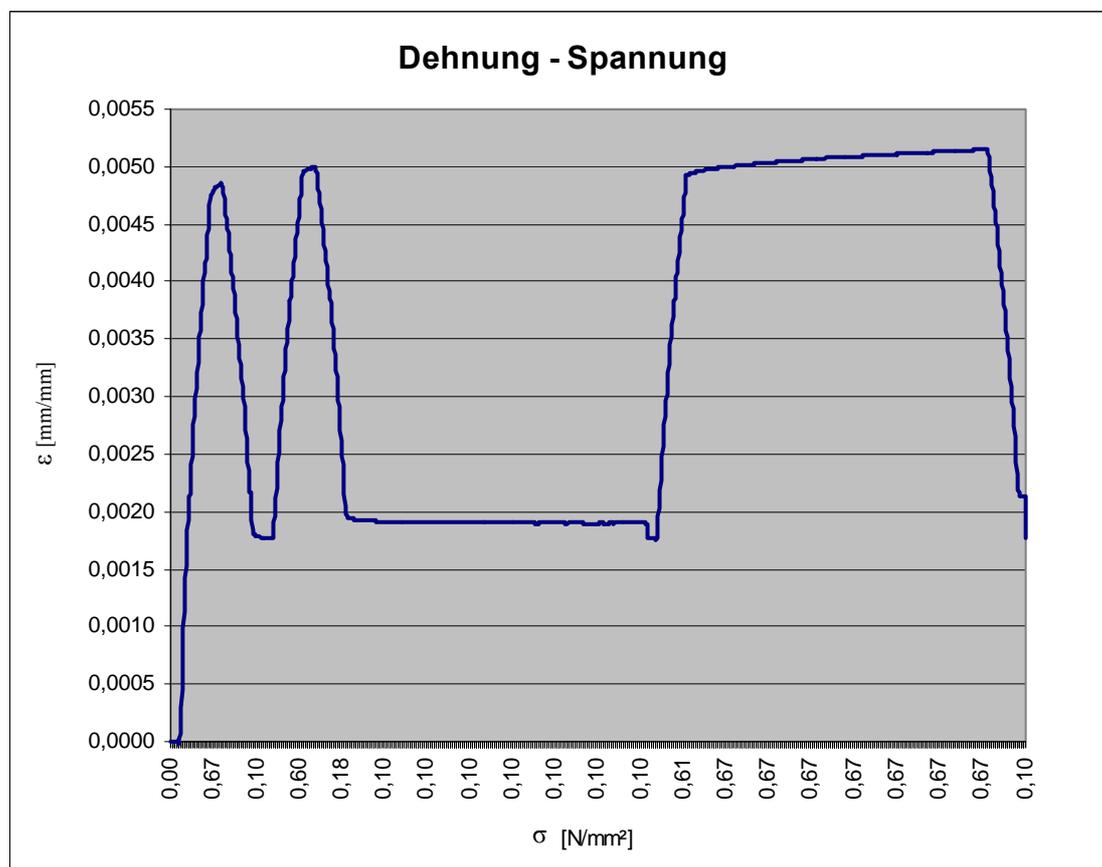


Abbildung 4-14: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 600 °C

600°C				E-Modul:		1261 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,2x99,8x101,8	484	470	0,005916	0,002614	173

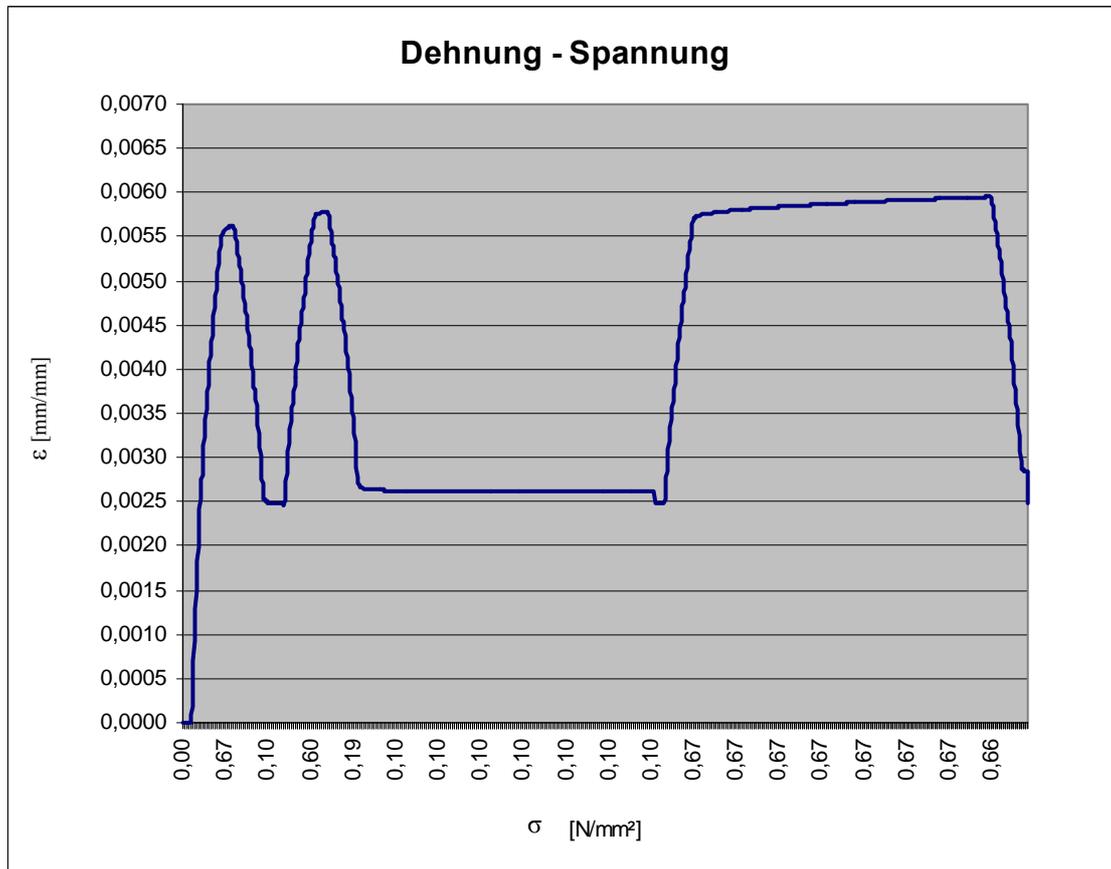


Abbildung 4-15: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 600 °C

600°C				E-Modul:	1255 N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	102,0x99,5x101,8	489	456	0,007255	0,003938	172

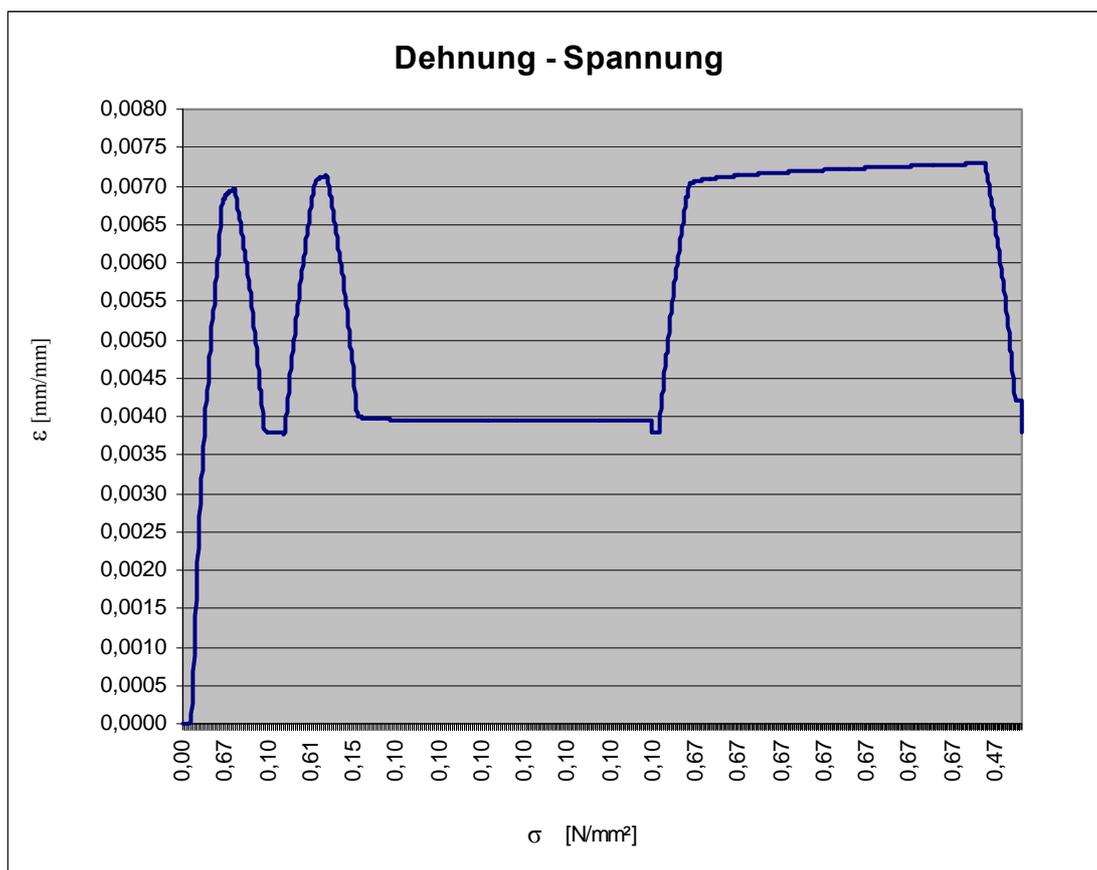


Abbildung 4-16: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 600 °C

800°C				E-Modul:	773 N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	102,5x99,4x101,8	496	454	0,013706	0,008315	106

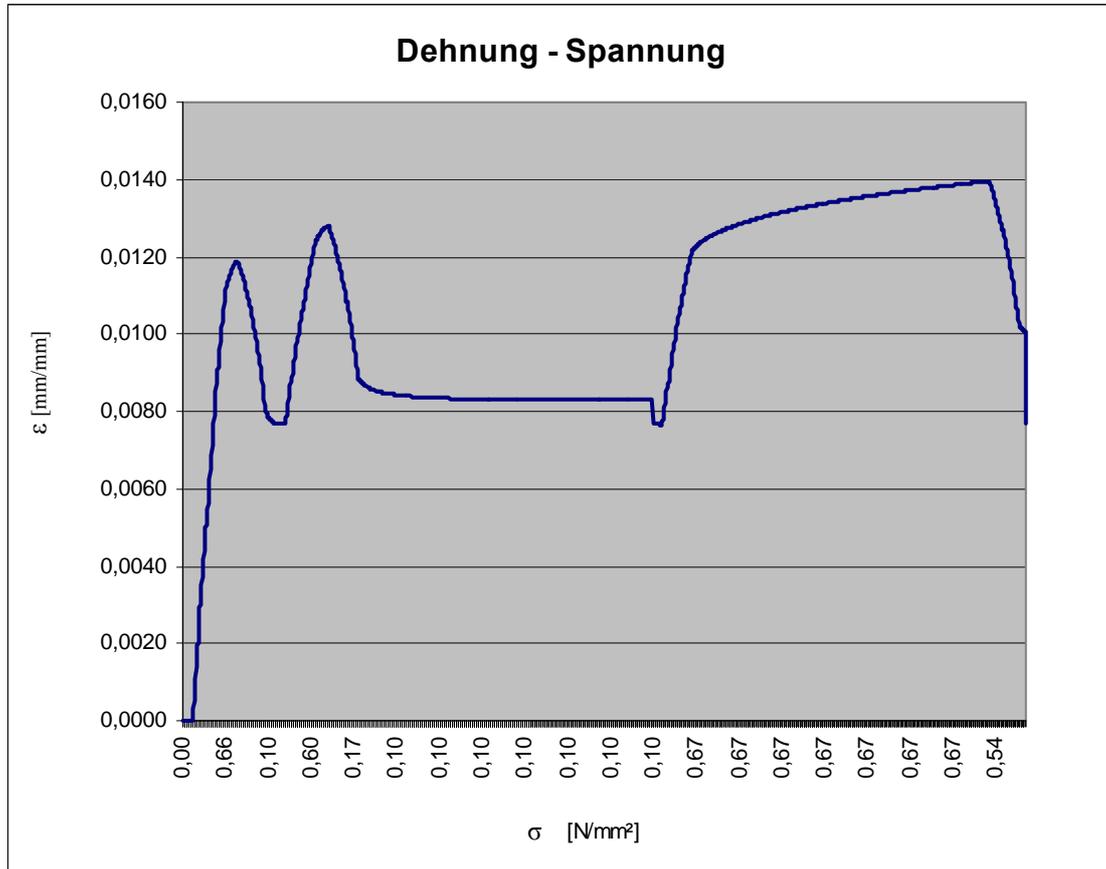


Abbildung 4-17: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 800 °C

800°C				E-Modul:	681 N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,4x99,6x101,7	500	459	0,016604	0,010491	93

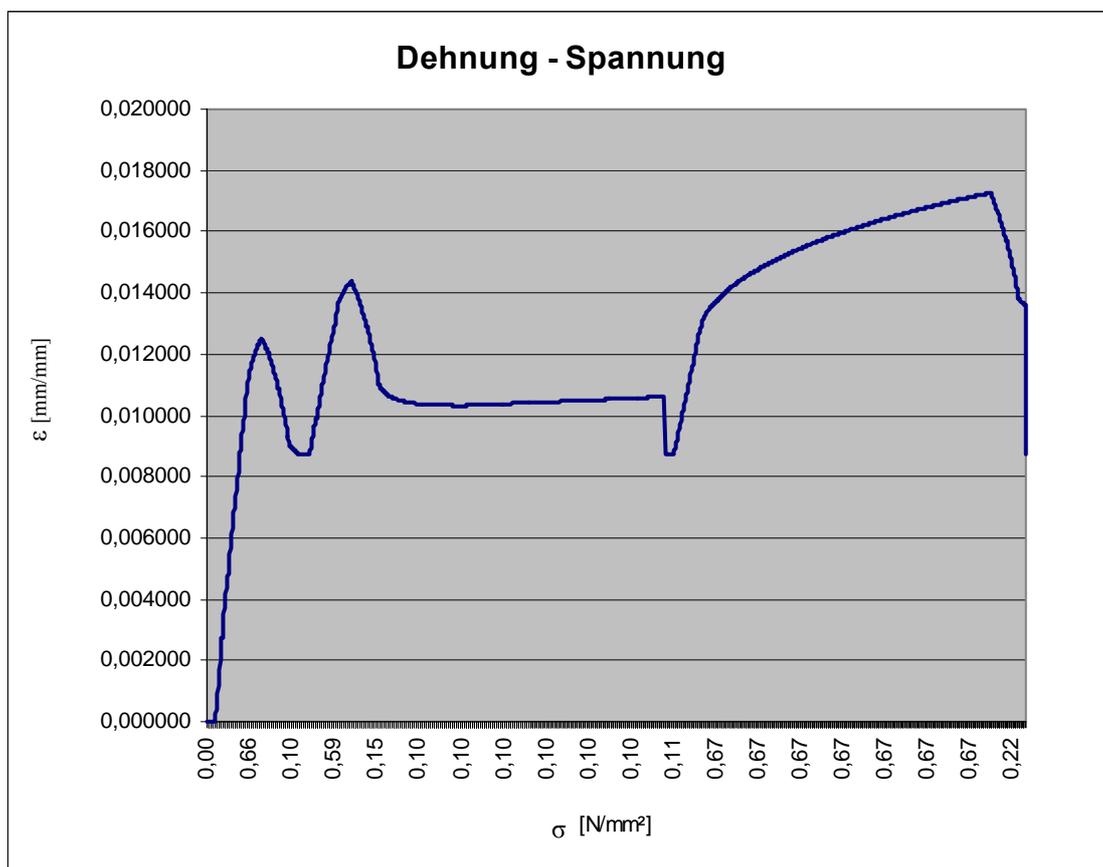


Abbildung 4-18: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 800 °C

800°C				E-Modul:	590 N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	102,4x99,6x101,7	505	466	0,016797	0,009734	81

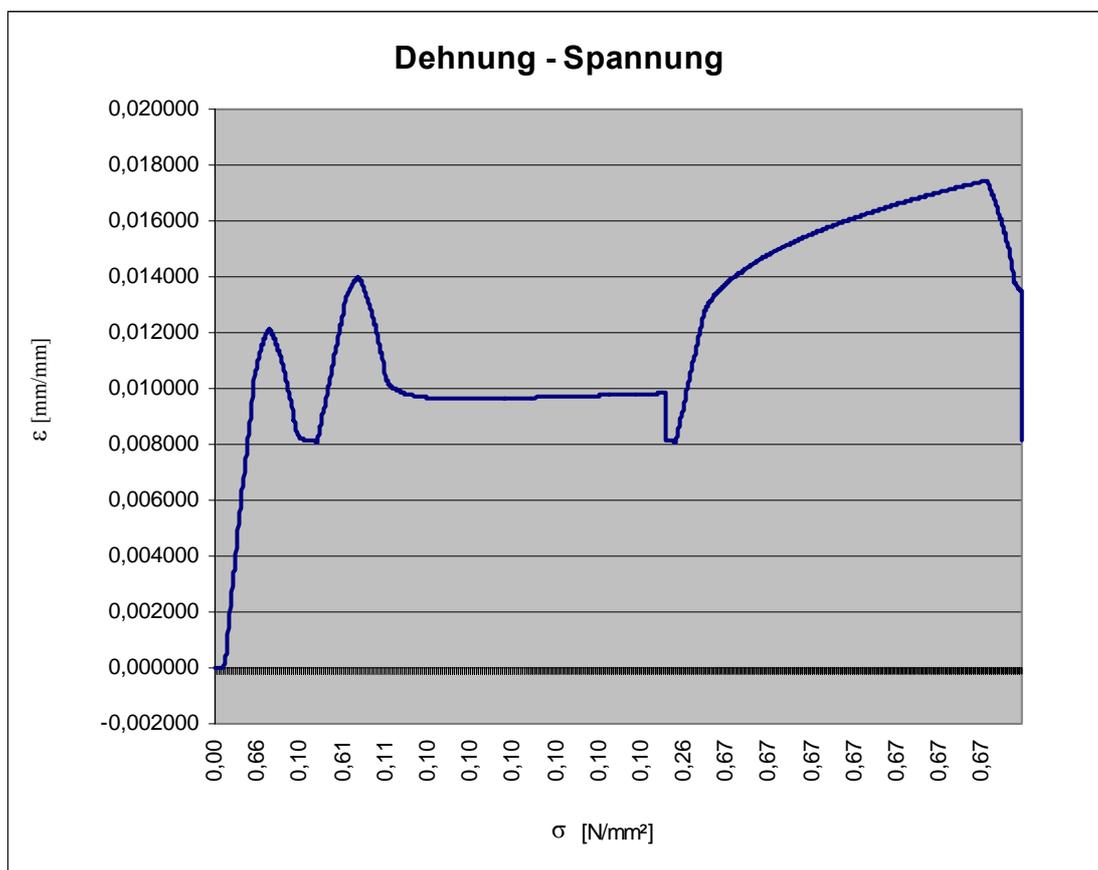


Abbildung 4-19: Dehnungsverlauf während der E-Modulbestimmung bei 800 °C

4.2.2 Rest-E-Modul

Ex 100°C			Rest-E-Modul:		1694 N/mm ²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	101,8x100,0x102,0	496	0,004477	0,002016	232

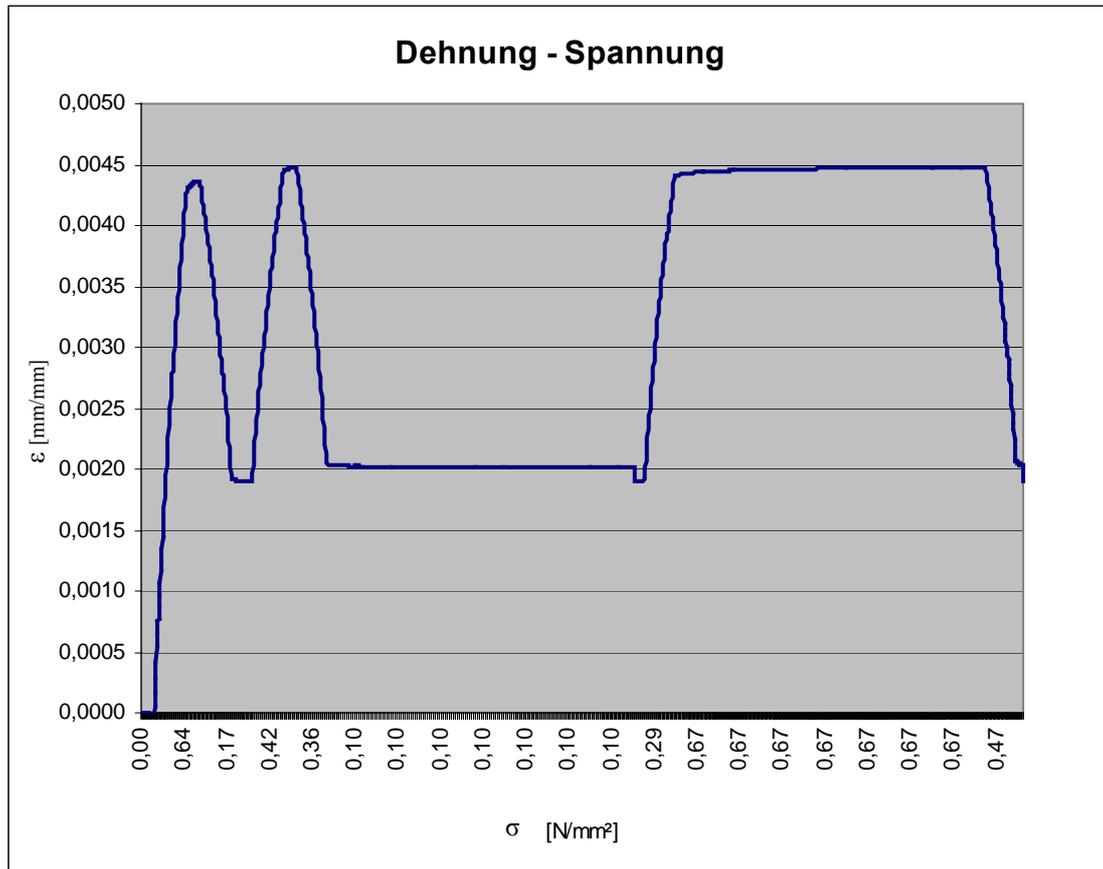


Abbildung 4-20: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 100 °C Proben

Ex 100°C			Rest-E-Modul:	1512 N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,5x101,5x99,5	512	0,004309	0,001553	207

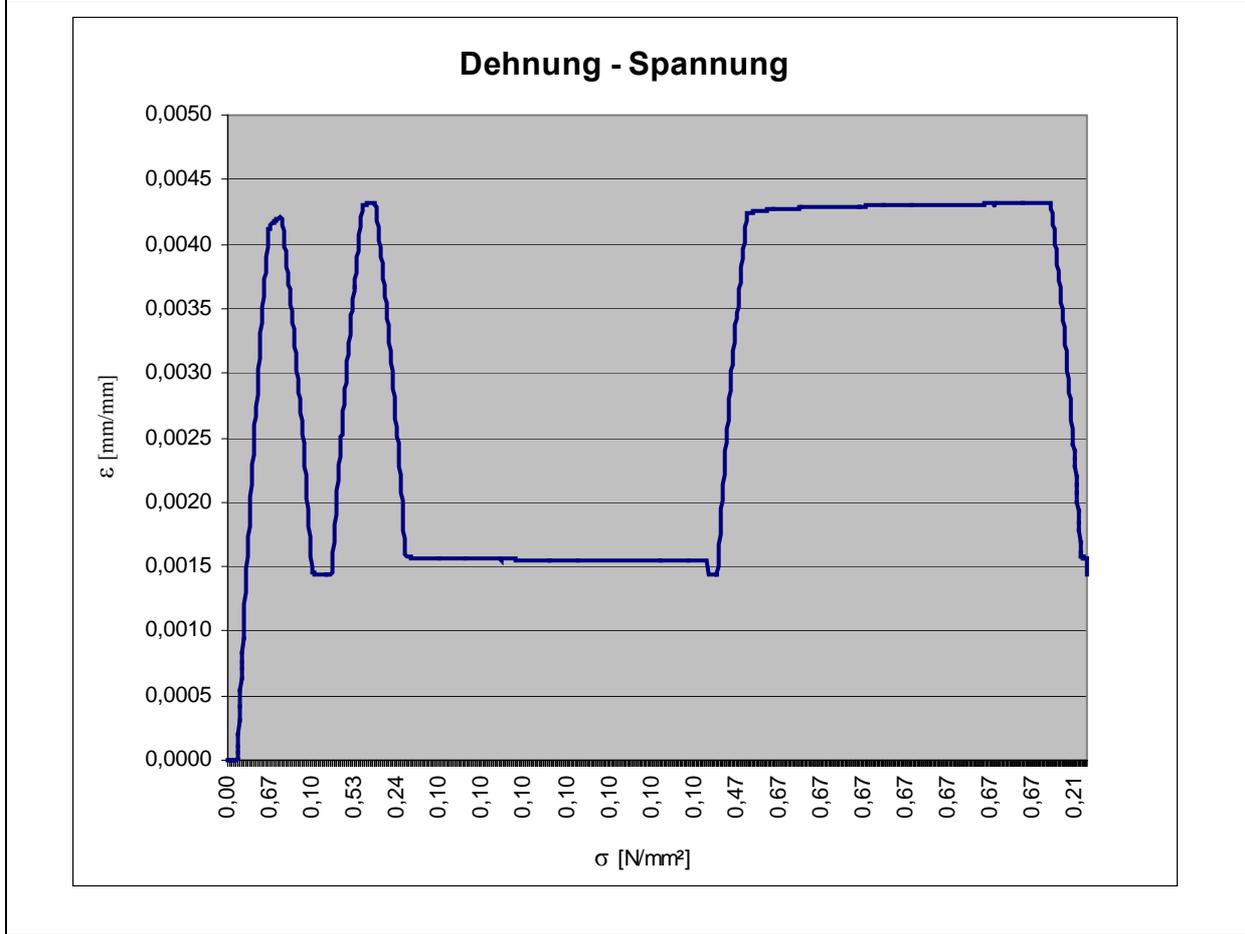


Abbildung 4-21: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 100 °C Proben

Ex 100°C			Rest-E-Modul:		1790 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	101,6x101,6x99,2	487	0,003352	0,001025	245

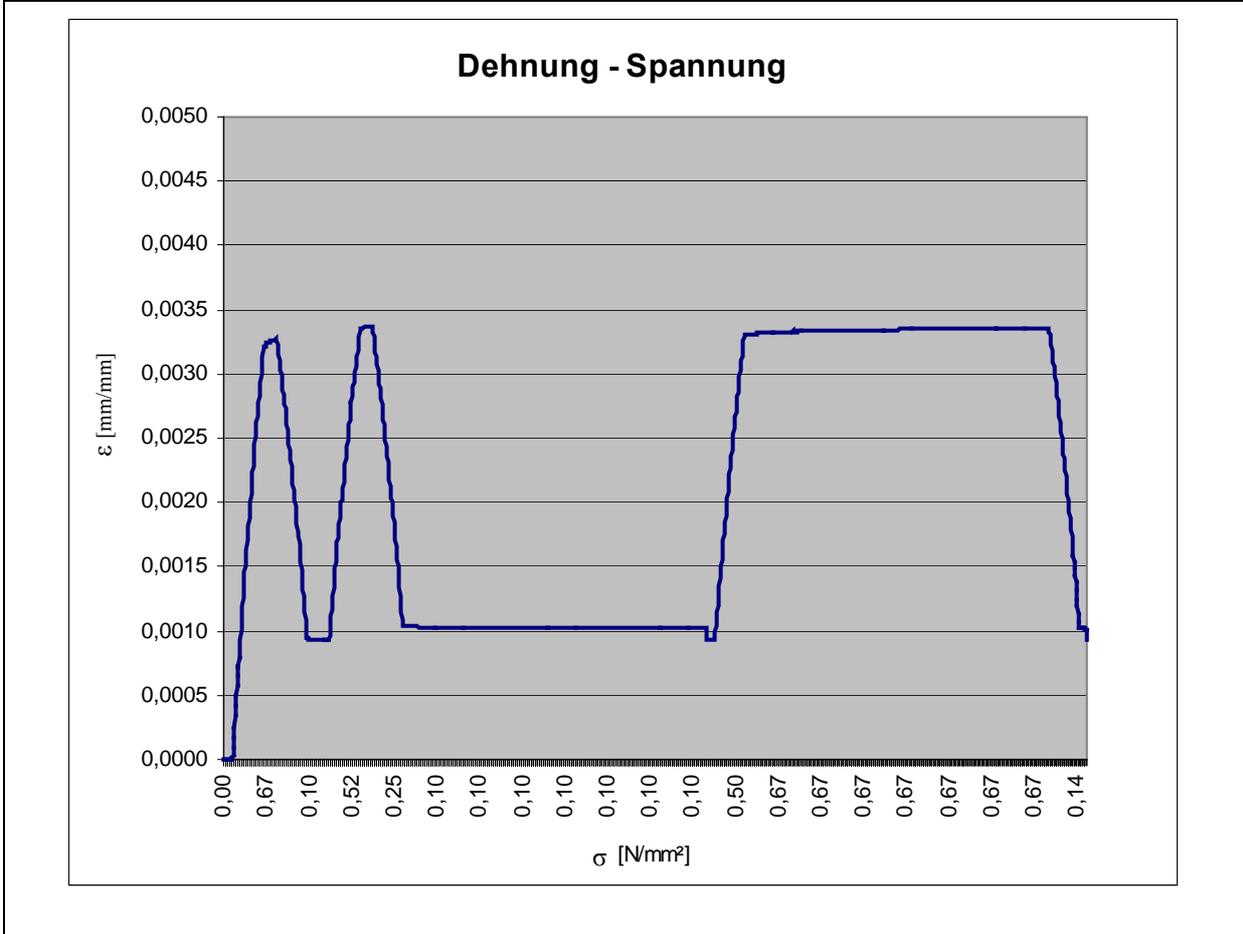


Abbildung 4-22: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 100 °C Proben

Ex 200°C			Rest-E-Modul:		1702 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	102,5x102,2x99,5	514	0,003840	0,001393	233

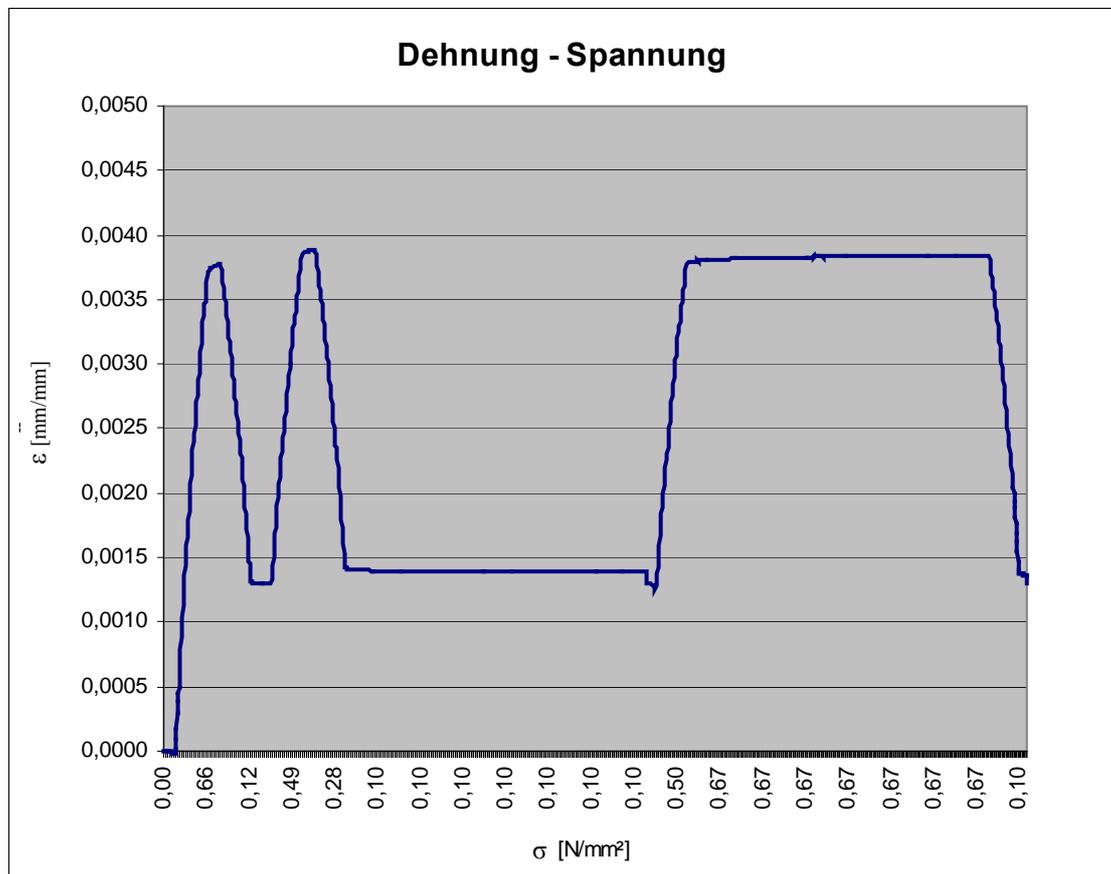


Abbildung 4-23: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 200 °C Proben

Ex 200°C			Rest-E-Modul:		1693 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,8x101,2x99,9	493	0,004314	0,001853	232

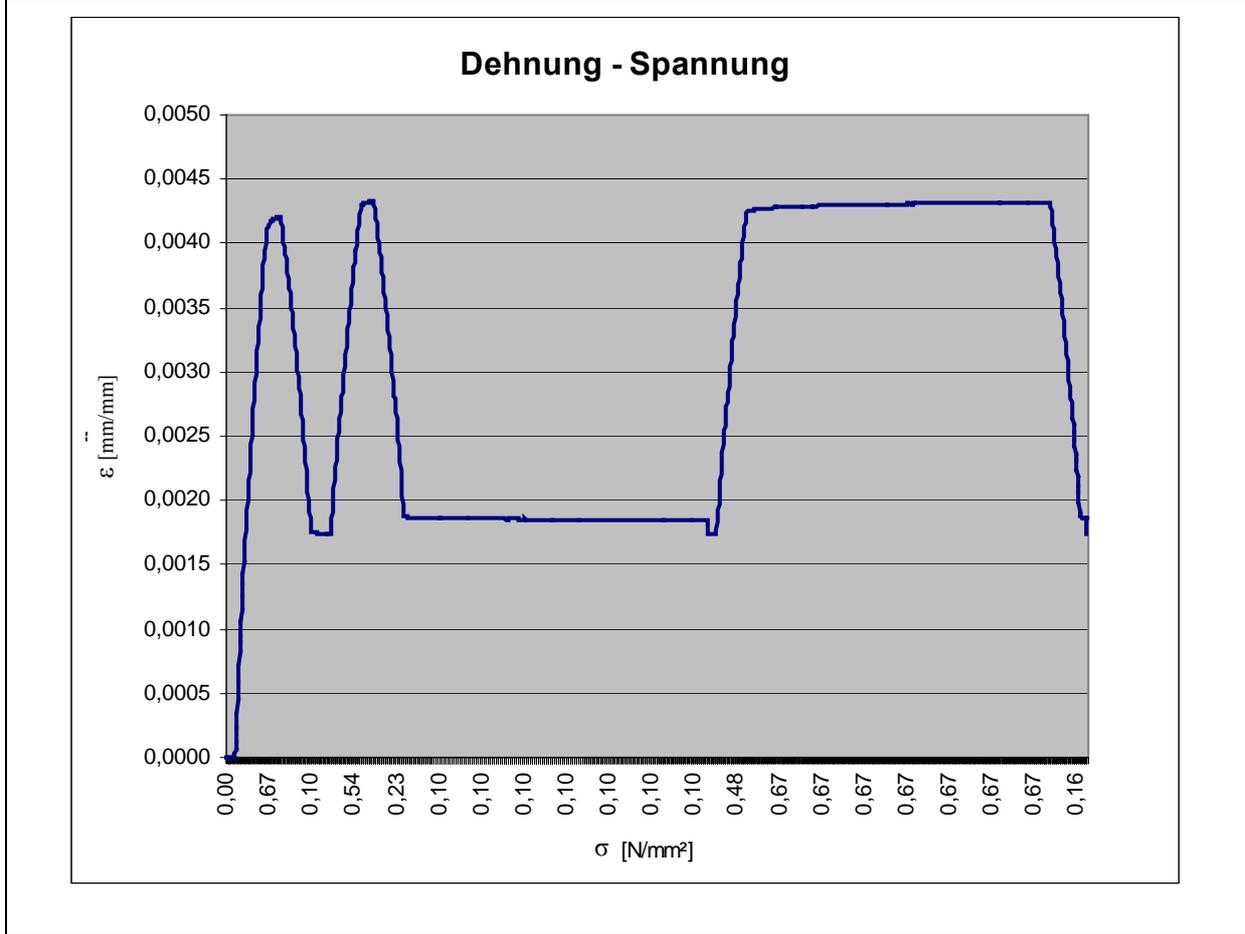


Abbildung 4-24: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 200 °C Proben

Ex 200°C			Rest-E-Modul:		1703 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	102,2x101,7x99,5	496	0,003971	0,001524	233

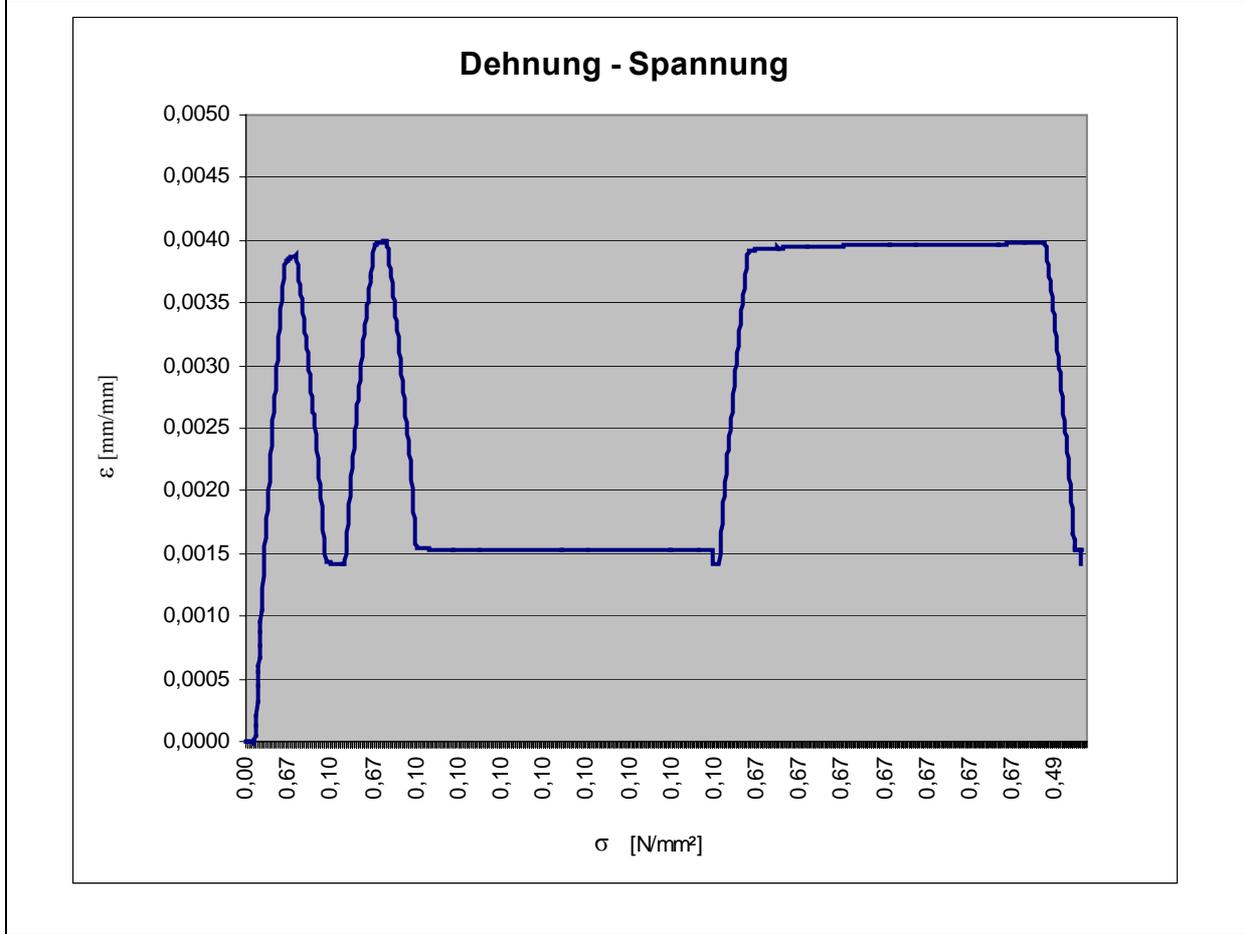


Abbildung 4-25: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 200 °C Proben

Ex 300°C			Rest-E-Modul:		1398 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	101,2x99,8x101,2	479	0,004527	0,001546	191

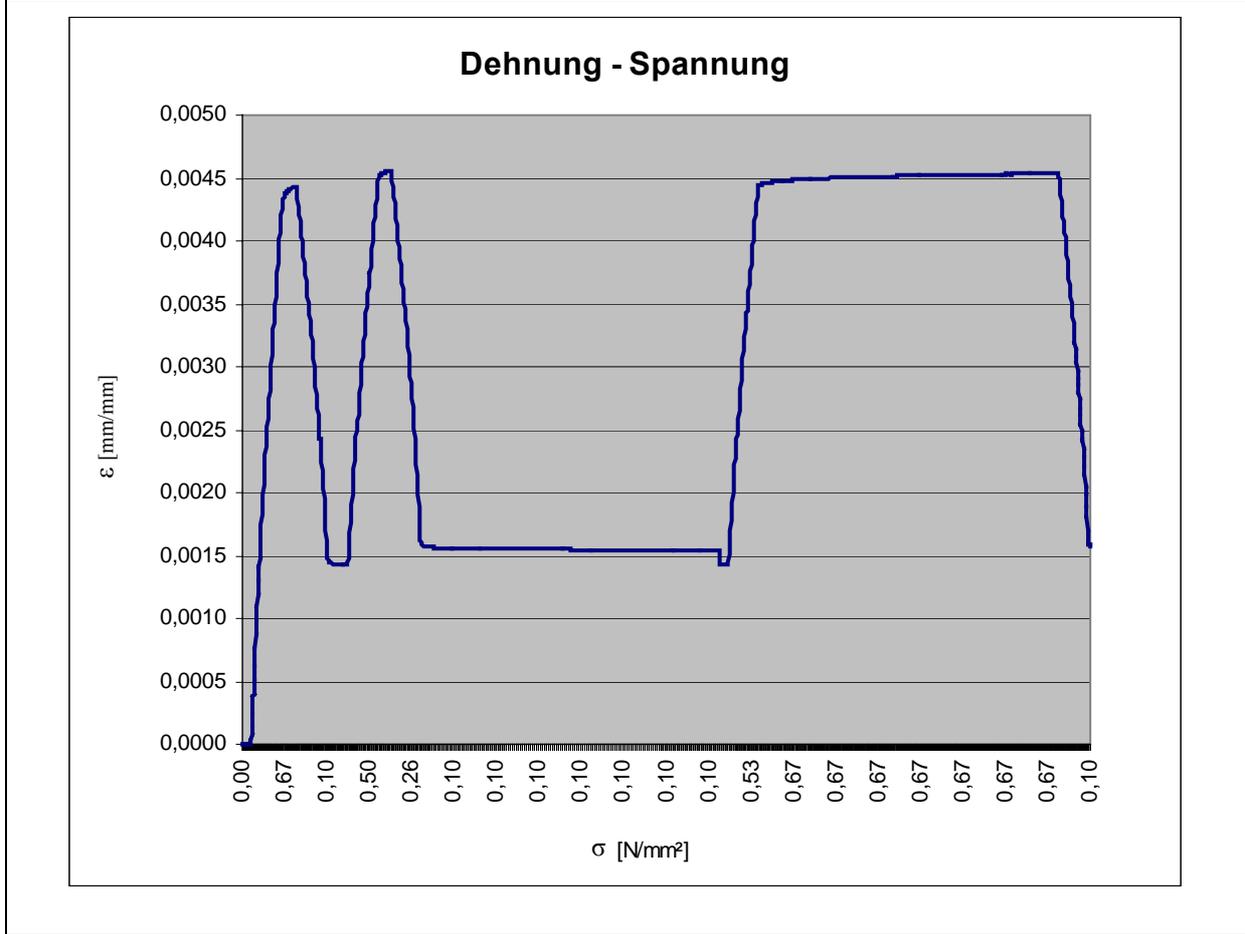


Abbildung 4-26: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 300 °C Proben

Ex 300°C			Rest-E-Modul:		1302 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	101,2x99,8x101,2	480	0,004966	0,001766	178

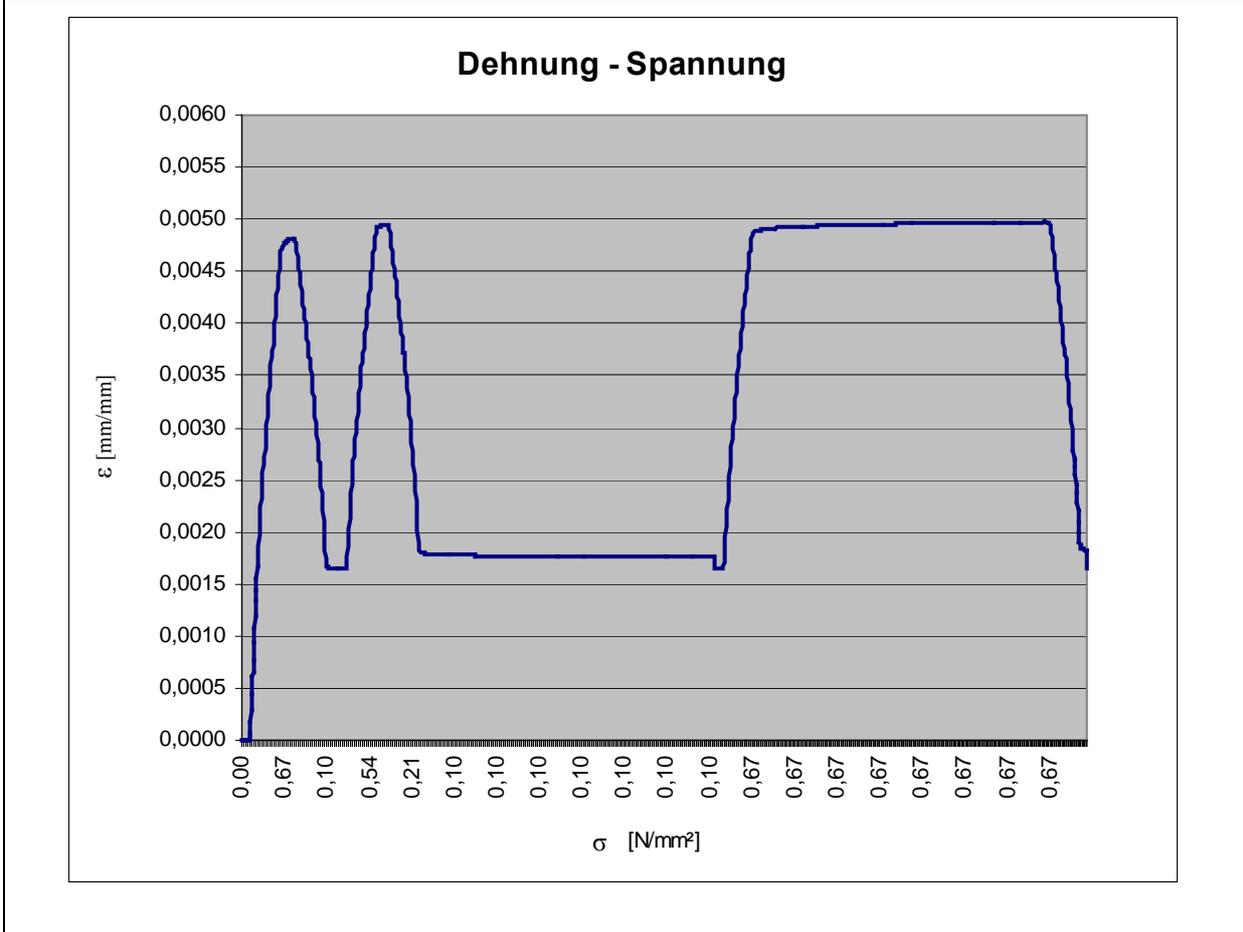


Abbildung 4-27: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 300 °C Proben

Ex 300°C			Rest-E-Modul:		1387 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	101,8x99,5x101,5	484	0,004707	0,001703	190

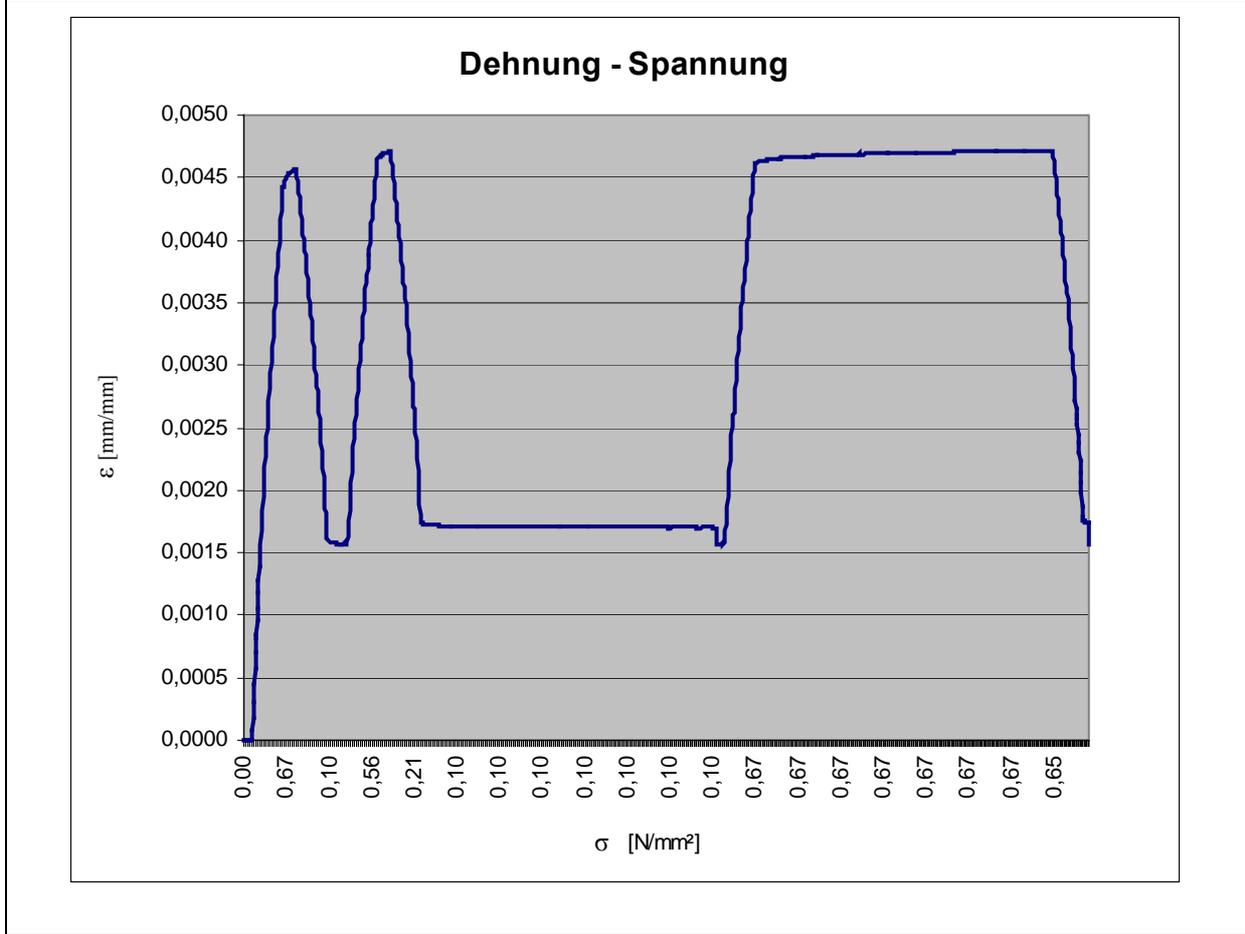


Abbildung 4-28: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 300 °C Proben

Ex 400°C			Rest-E-Modul:		1356 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	102,1x99,9x101,8	400	0,004632	0,001575	186

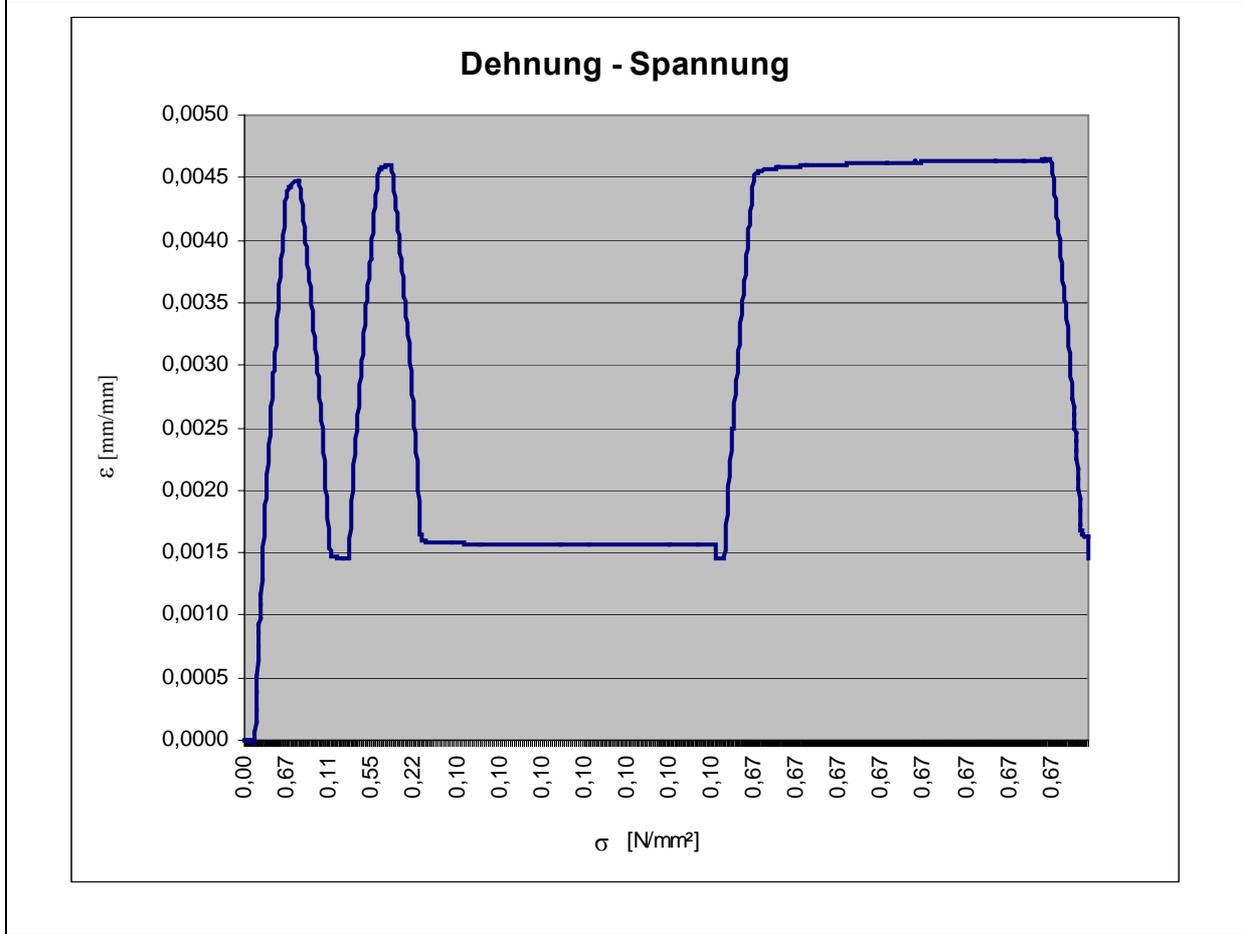


Abbildung 4-29: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 400 °C Proben

400°C			Rest-E-Modul:	1381 N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,1x99,8x102,1	474	0,004620	0,001615	189

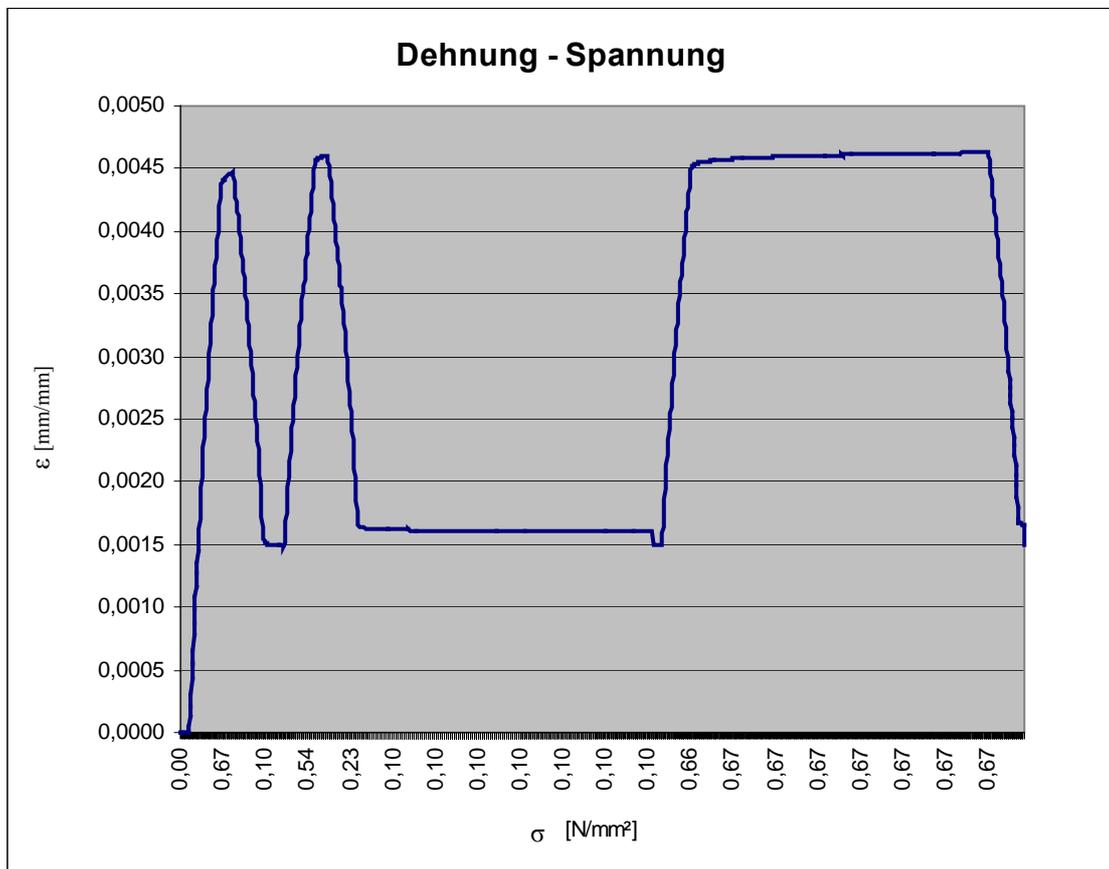


Abbildung 4-30: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 400 °C Proben

Ex 400°C			Rest-E-Modul:		1195 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	101,5x9,95x102,0	473	0,005410	0,001930	163

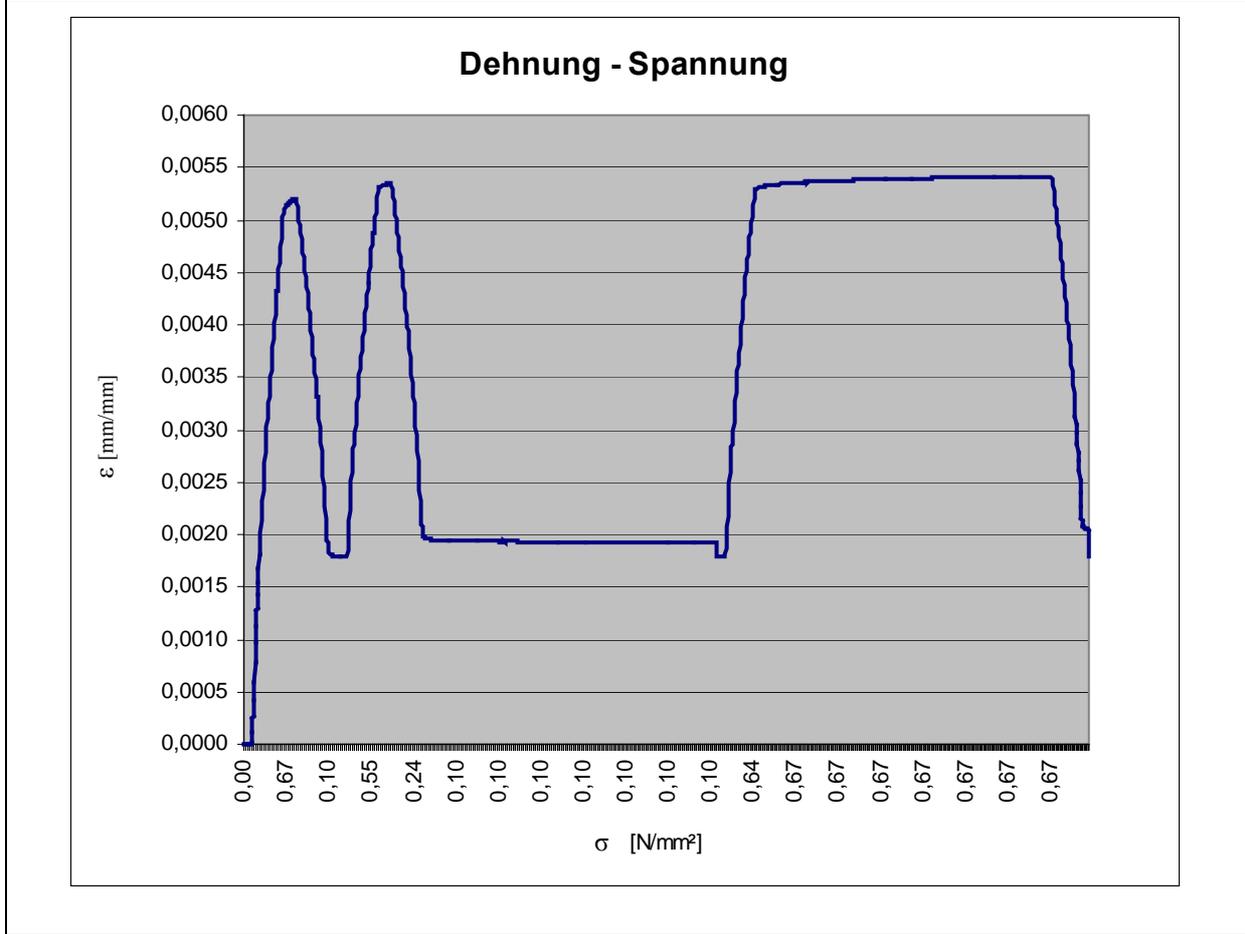


Abbildung 4-31: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 400 °C Proben

Ex 600°C		Rest-E-Modul:		1212 N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,2x99,8x101,8	484	0,005100	0,001662	166

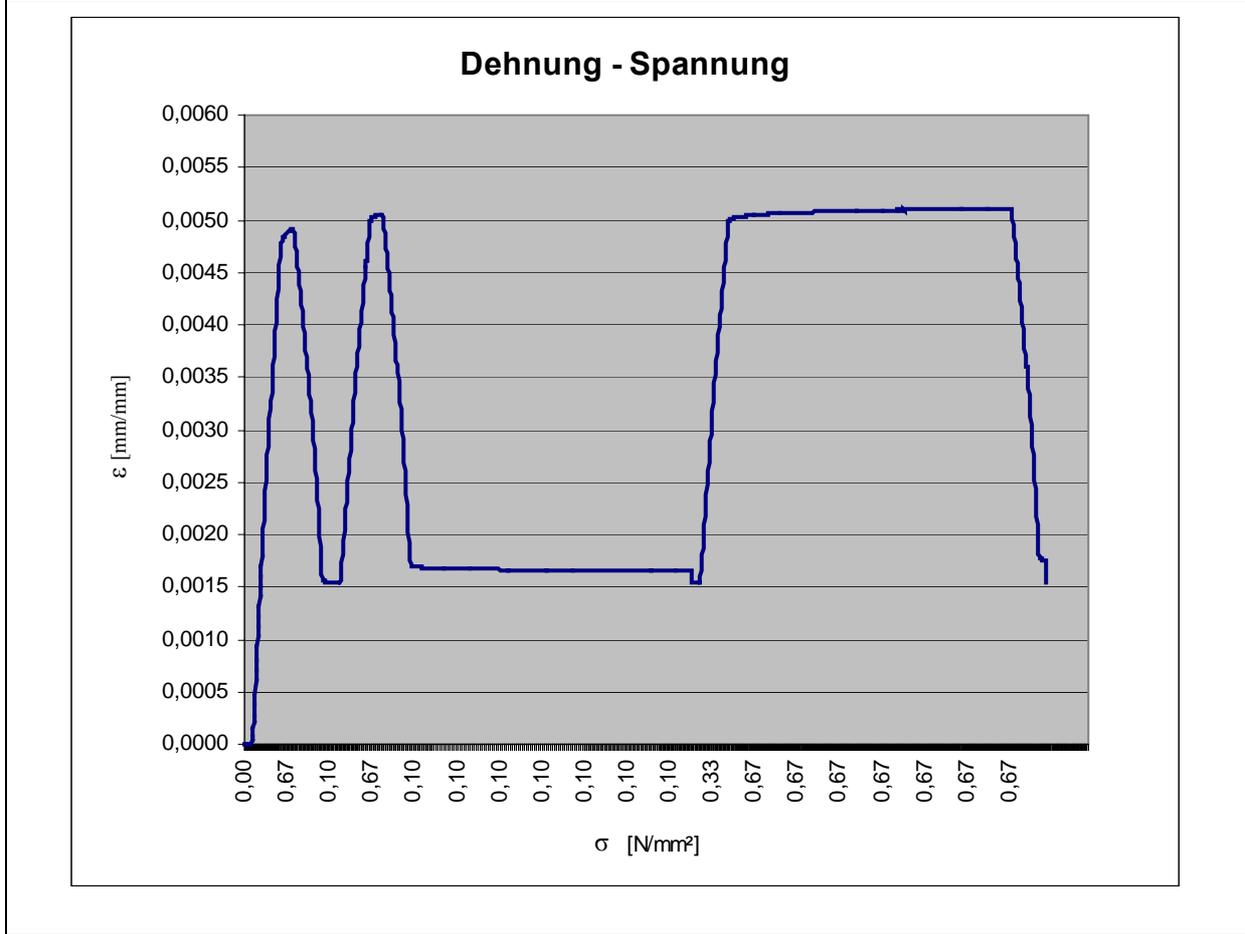


Abbildung 4-32: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 600 °C Proben

Ex 600°C		Rest-E-Modul:		1197N/mm²	
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	102,0x99,5x101,8	470	0,005252	0,001771	164

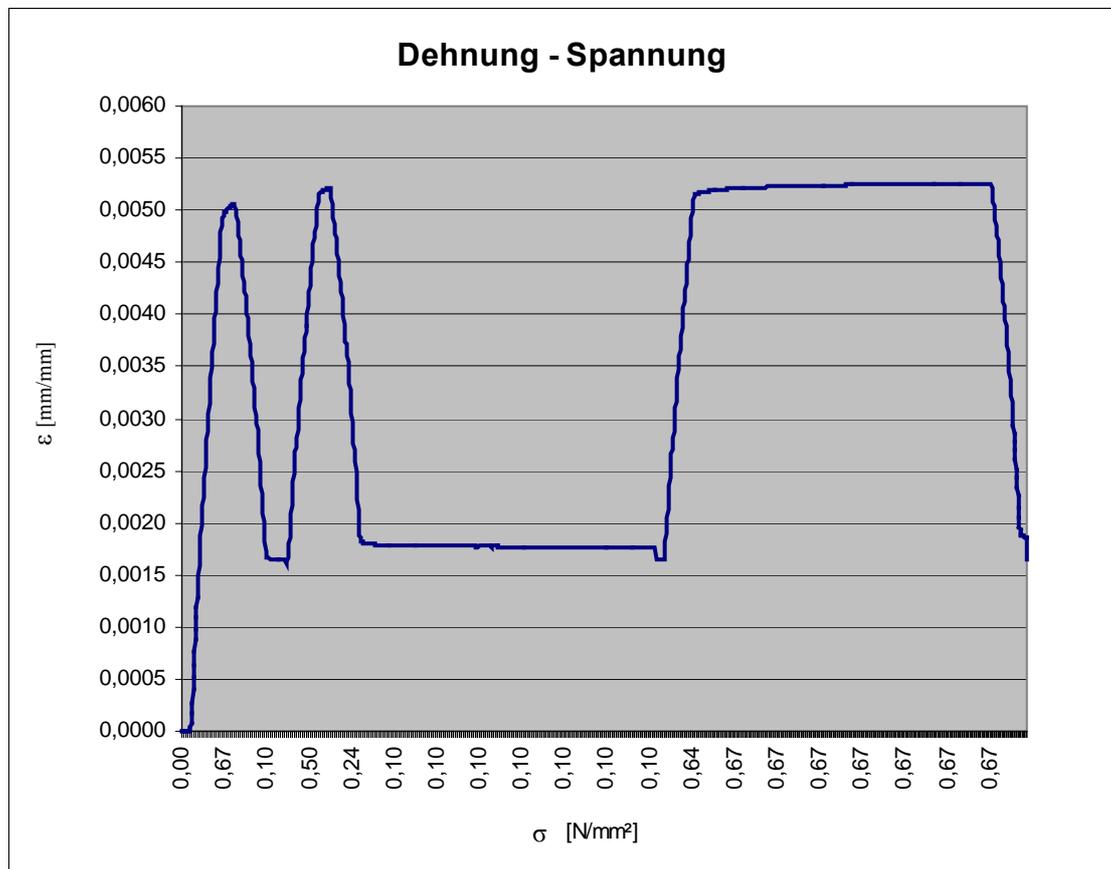


Abbildung 4-33: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 600 °C Proben

Ex 800°C			Rest-E-Modul:		755 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
1	102,5x99,4x101,8	456	0,009968	0,004454	103

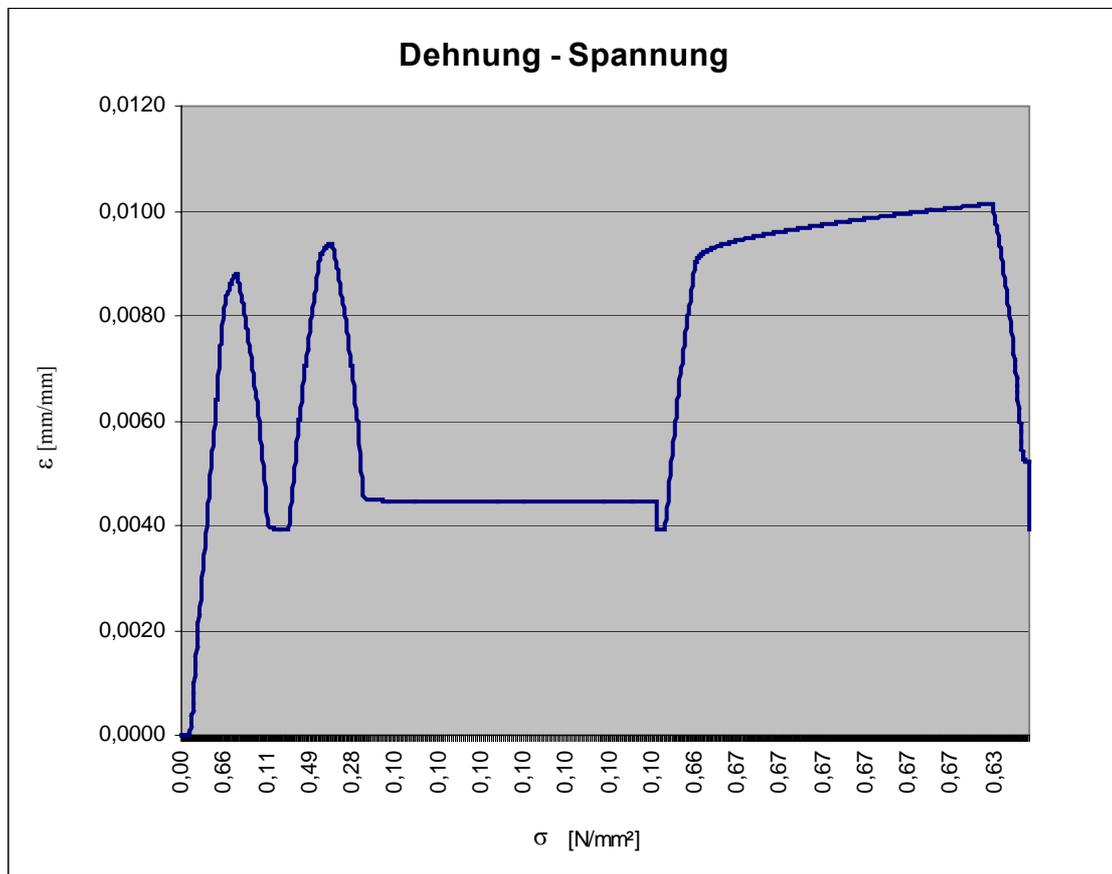


Abbildung 4-34: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 800 °C Proben

Ex 800°C			Rest-E-Modul:		914 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
2	102,4x99,6x101,7	461	0,007213	0,002656	125

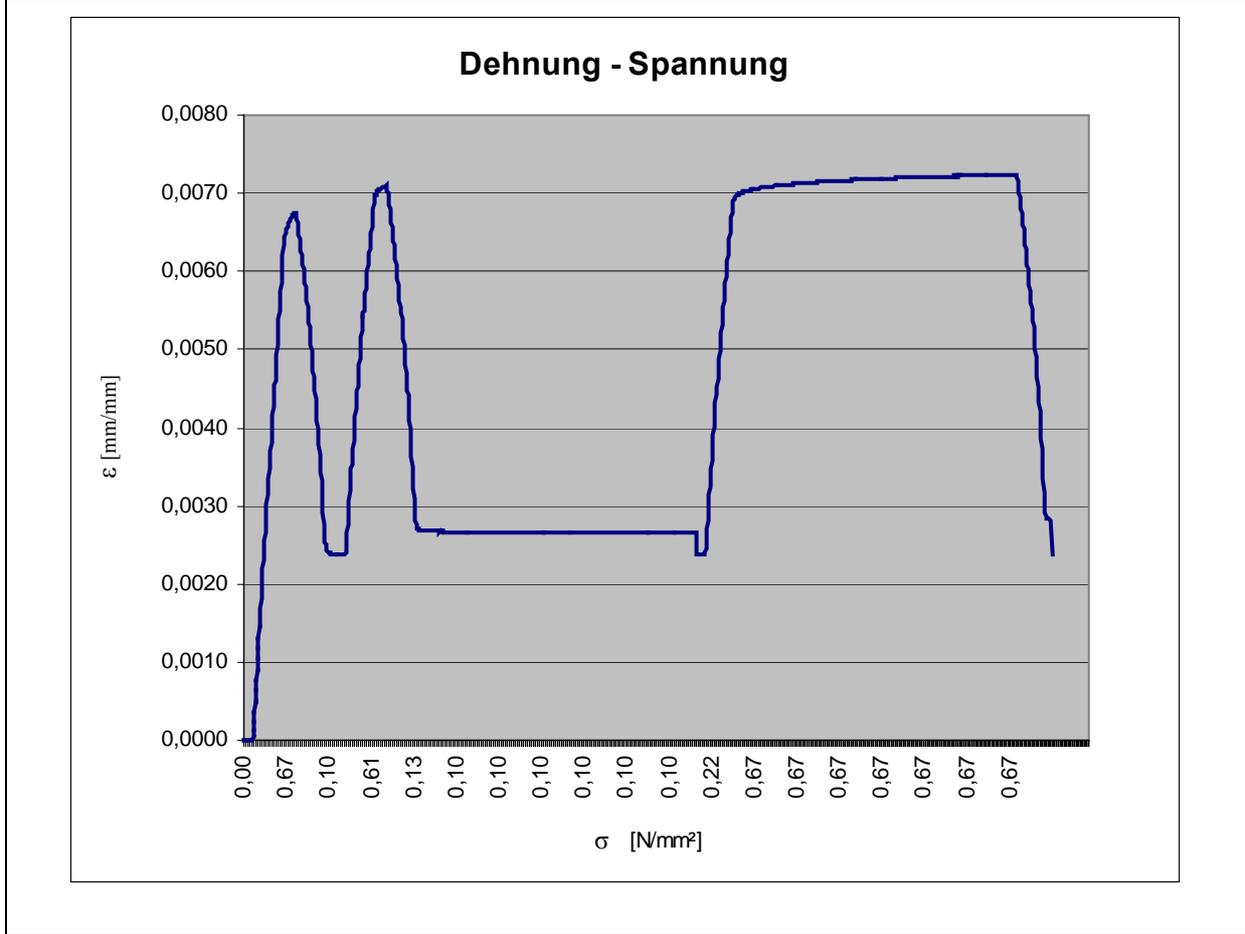


Abbildung 4-35: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 800 °C Proben

Ex 800°C			Rest-E-Modul:		891 N/mm²
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht [g]	Mittl. obere Dehnung []	Mittl. untere Dehnung []	Gemessener Wert [N/mm ²]
3	102,4x99,6x101,7	467	0,007798	0,003121	122

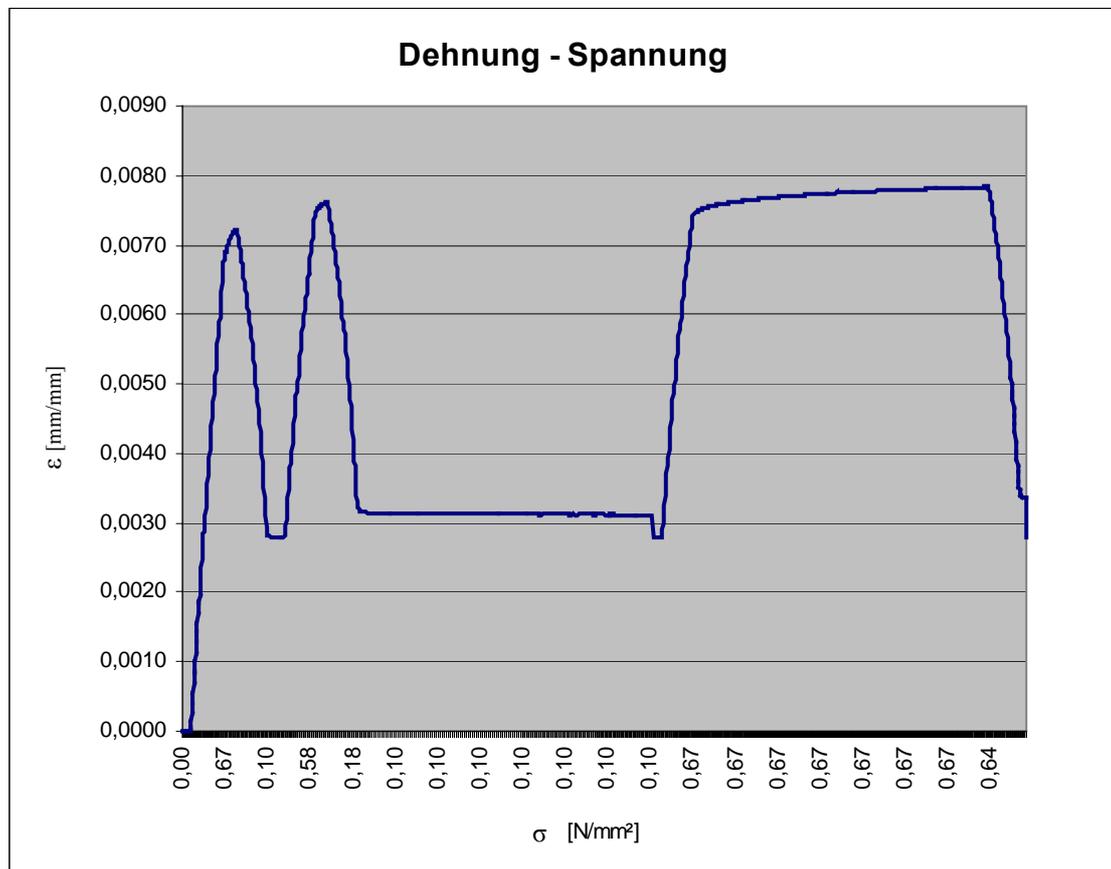


Abbildung 4-36: Dehnungsverlauf während der Rest-E-Modulbestimmung an Ex 800 °C Proben

4.2.3 Temperatureintringverhalten

100°C			Aufheizrate:	2 K/min
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	
3	101,6x101,6x99,2	492	478	

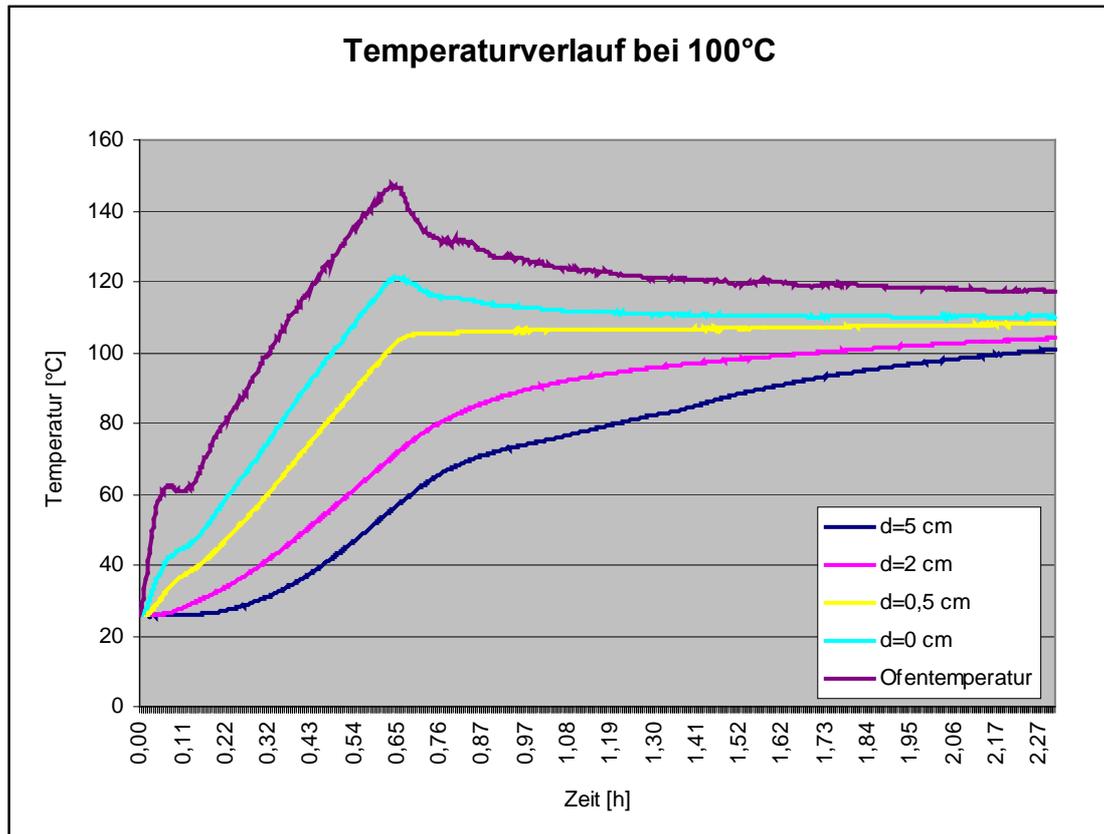


Abbildung 4-37: Temperaturmessung für Versuchstemperatur von 100 °C

200°C			Aufheizrate:	2 K/min
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	
2	102,8x101,2x99,9	501	487	

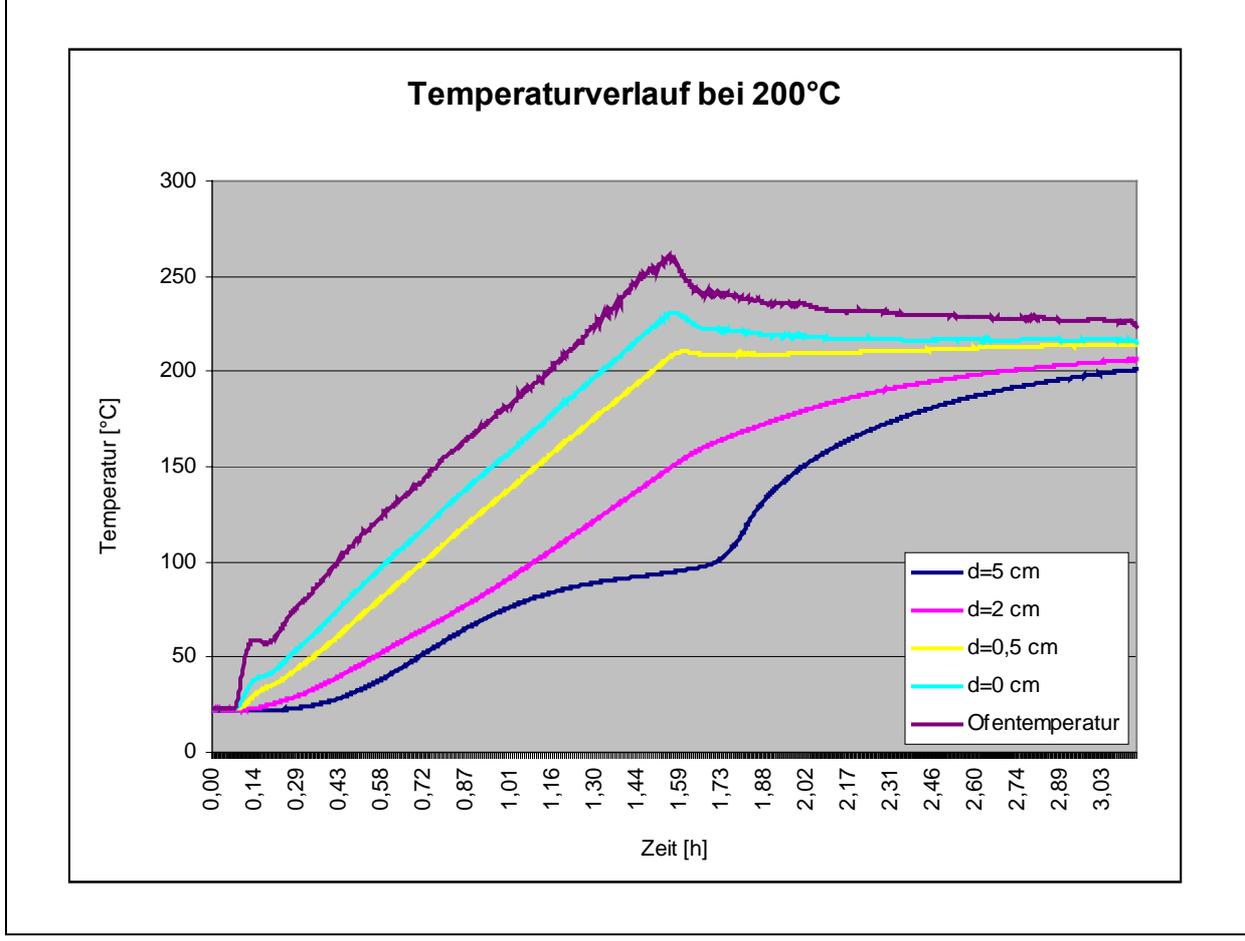


Abbildung 4-38: Temperaturmessung für Versuchstemperatur von 200 °C

300°C			Aufheizrate:	2 K/min
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	
2	101,2x99,8x101,2	483	473	

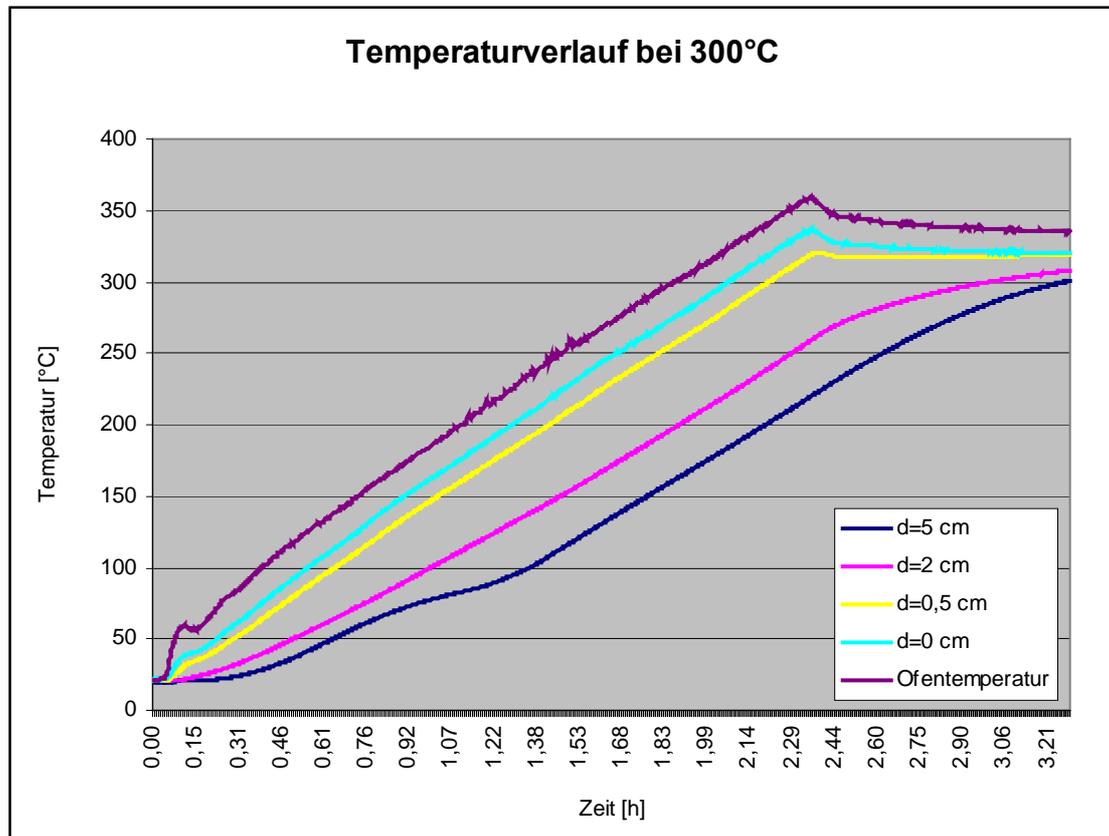


Abbildung 4-39: Temperaturmessung für Versuchstemperatur von 300 °C

400°C			Aufheizrate:	2 K/min
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	
1	102,1x99,9x101,8	500	473	

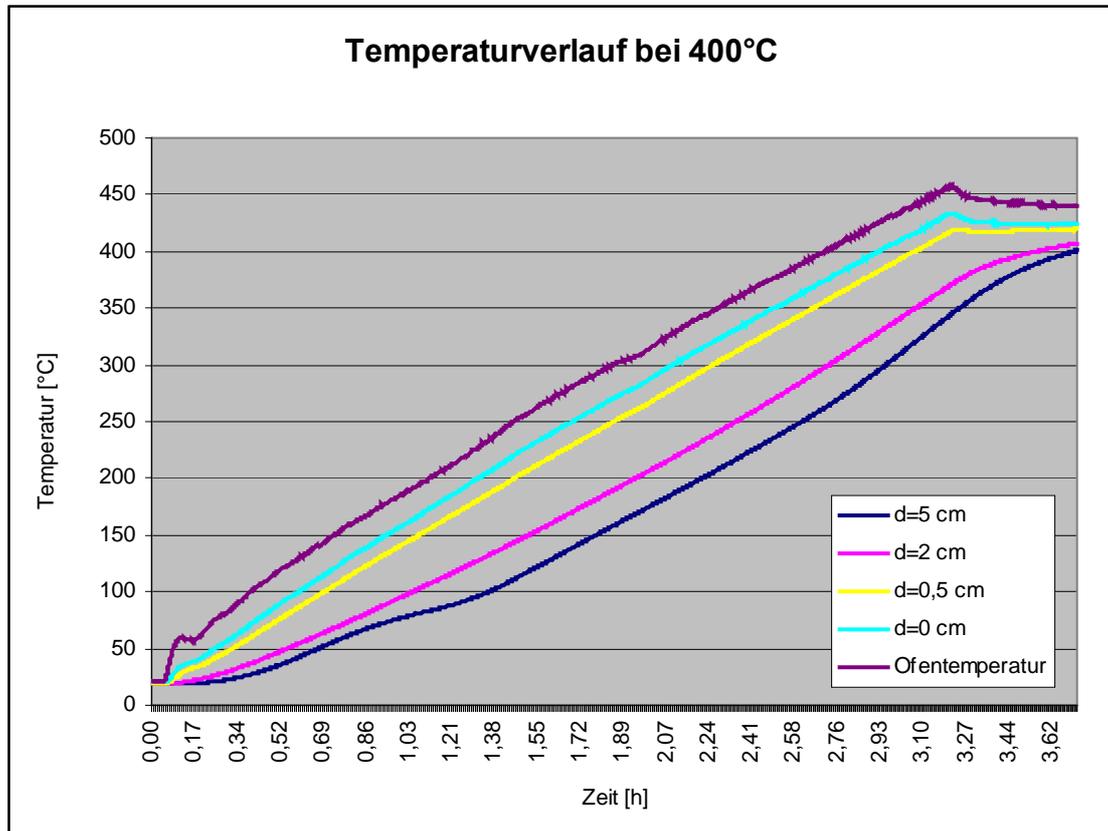


Abbildung 4-40: Temperaturmessung für Versuchstemperatur von 400 °C

600°C			Aufheizrate:	2 K/min
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	
2	102,2x99,8x101,8	484	470	

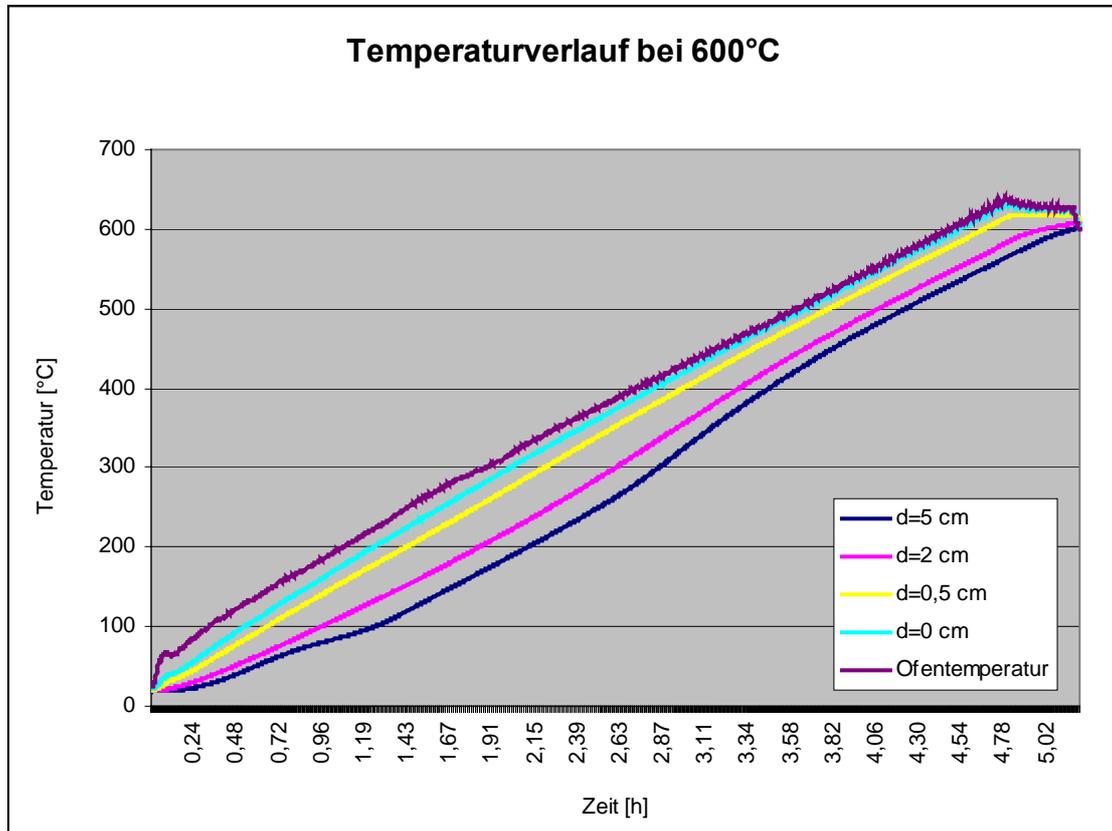


Abbildung 4-41: Temperaturmessung für Versuchstemperatur von 600 °C

800°C			Aufheizrate:	2 K/min
Probe	Abmessungen (LxBxH) [mm]	Gewicht davor [g]	Gewicht danach [g]	
2	102,4x99,6x101,7	500	459	

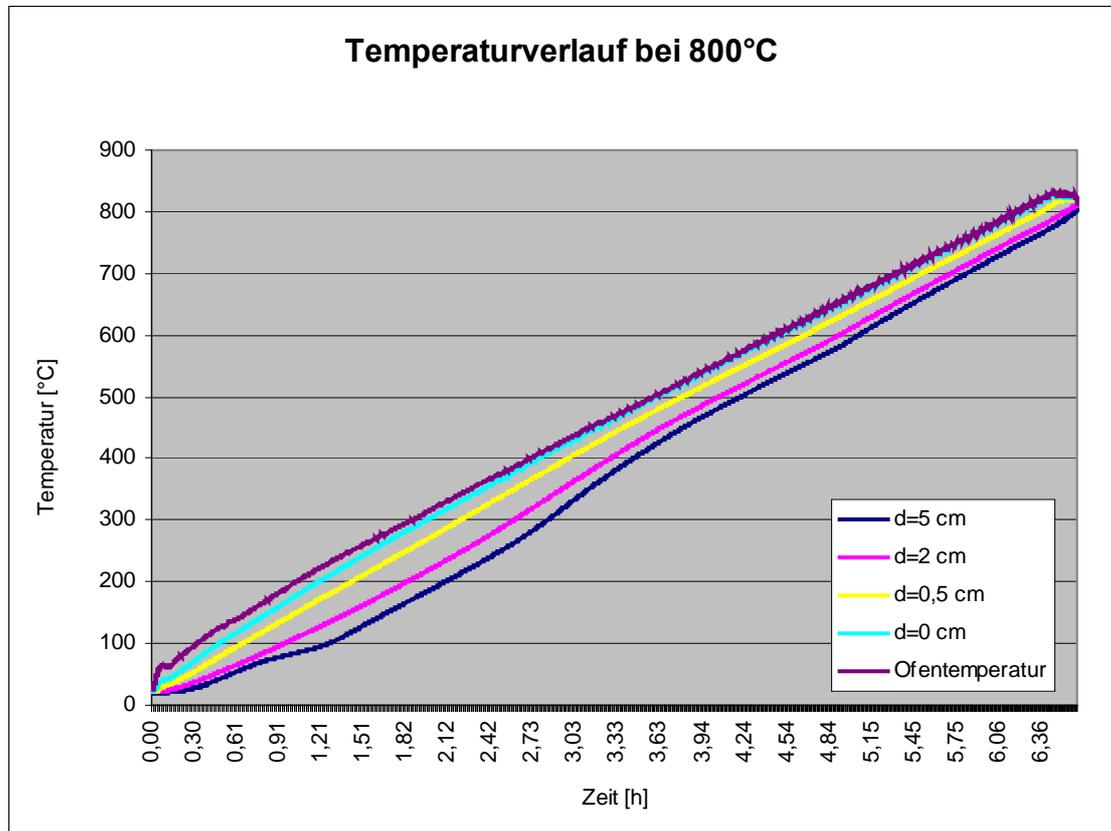


Abbildung 4-42: Temperaturmessung für Versuchstemperatur von 800 °C

d=5 cm

Aufheizrate:

2 K/min

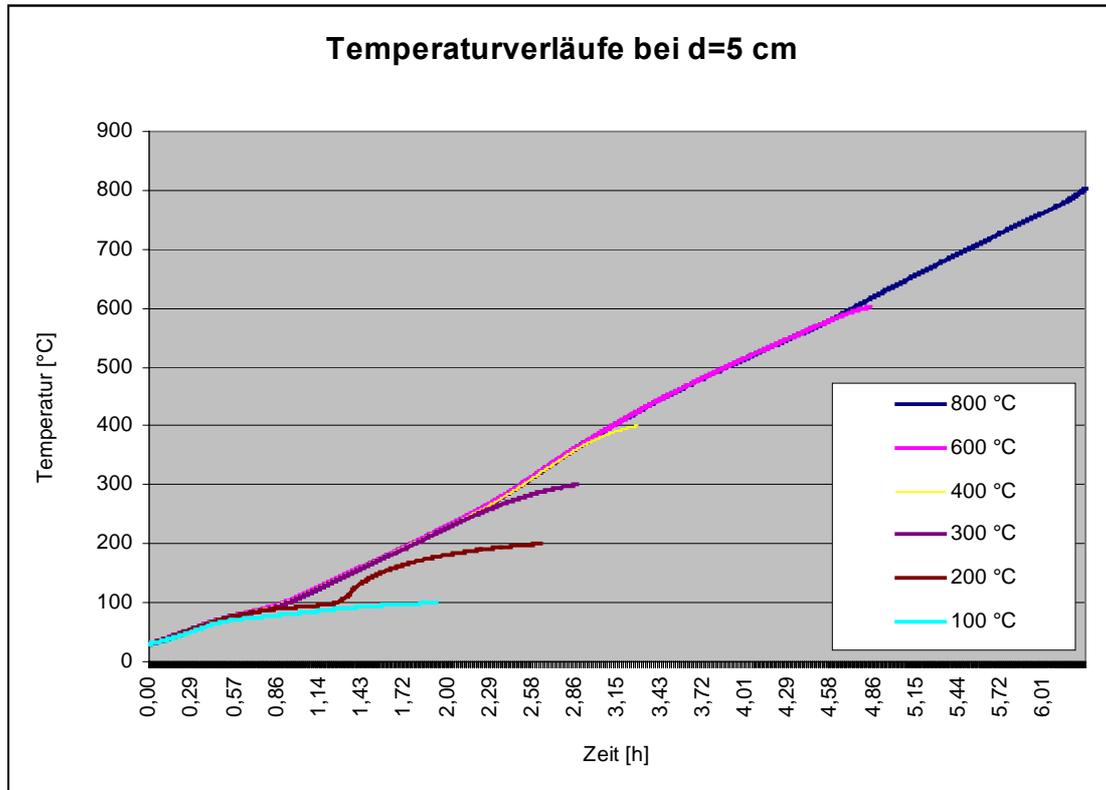


Abbildung 4-43: Temperaturverläufe bei Eindringtiefe von 5 cm

d=2 cm

Aufheizrate:

2 K/min

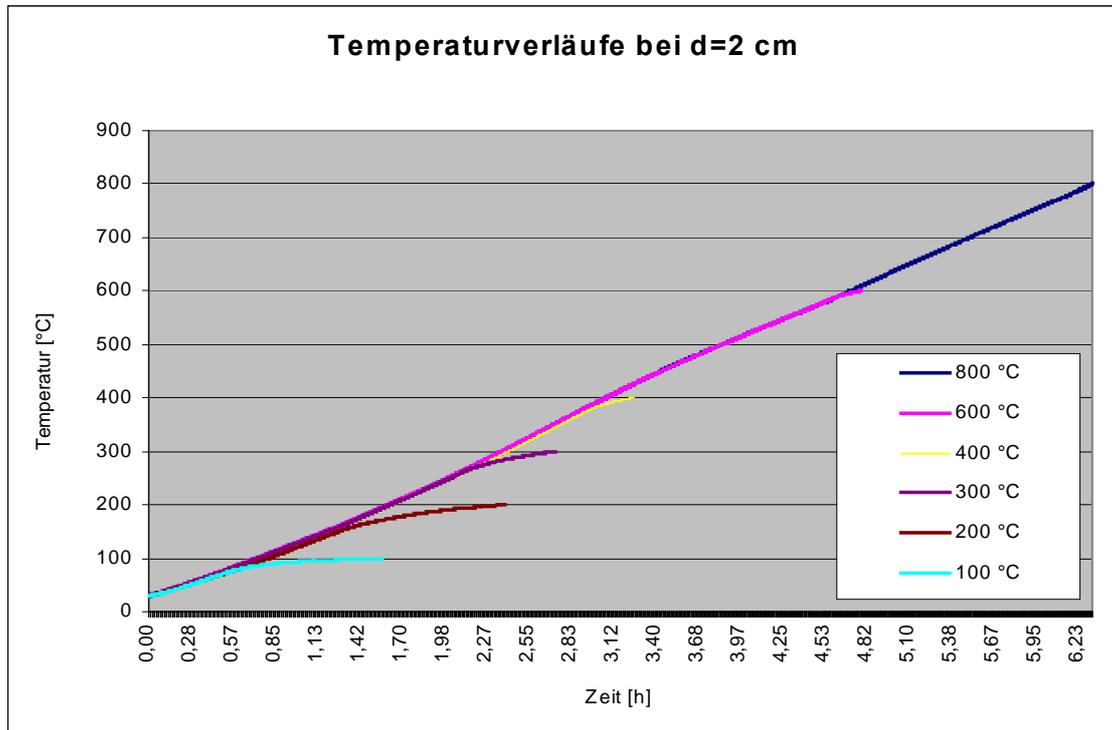


Abbildung 4-44: Temperaturverläufe bei Eindringtiefe von 2 cm

d=0,5 cm

Aufheizrate:

2 K/min

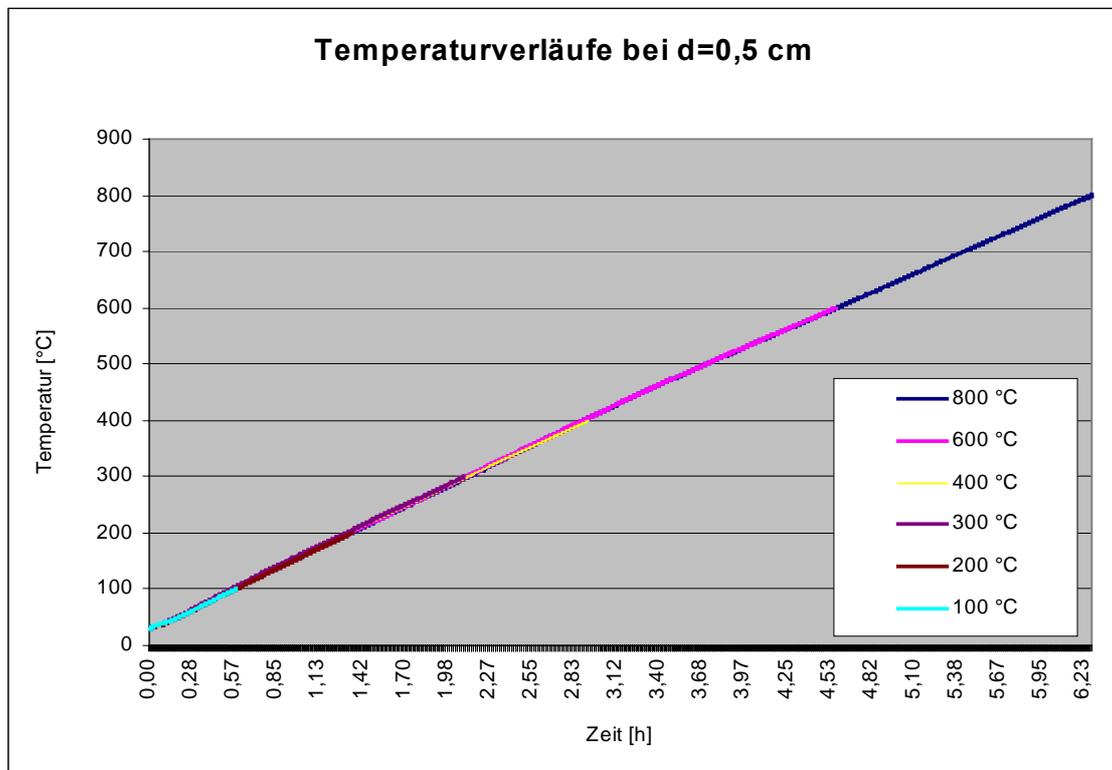


Abbildung 4-45: Temperaturverläufe bei Eindringtiefe von 0,5 cm

d=0 cm

Aufheizrate:

2 K/min

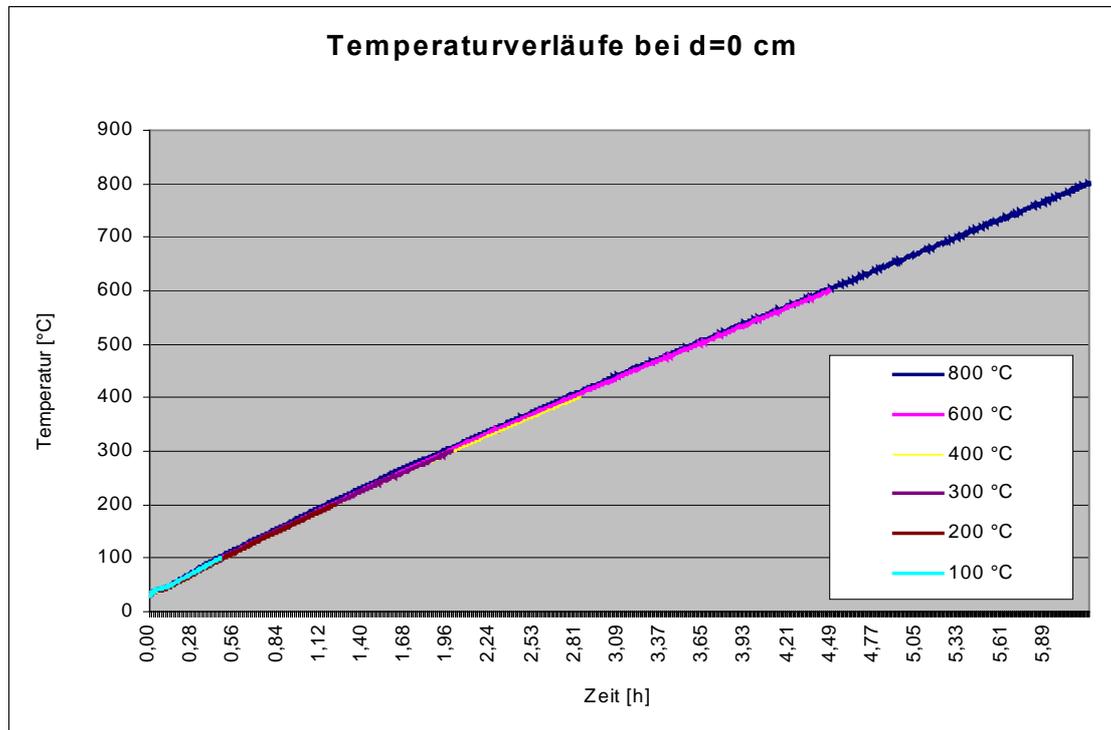


Abbildung 4-46: Temperaturverläufe an der Probekörperoberfläche

4.2.4 Thermische Analyse

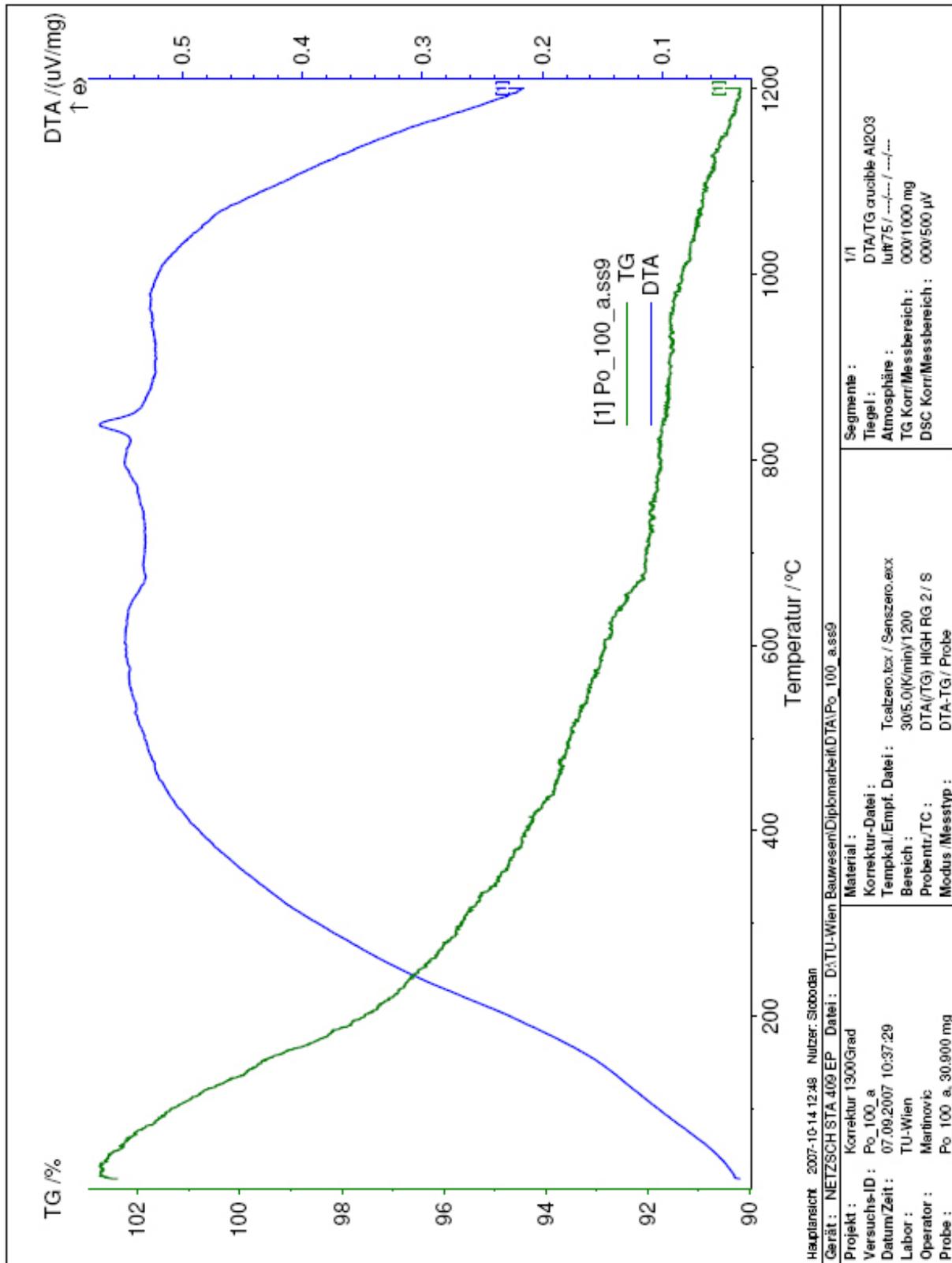


Abbildung 4-47: DTA und TG an Ex 100 °C Probe

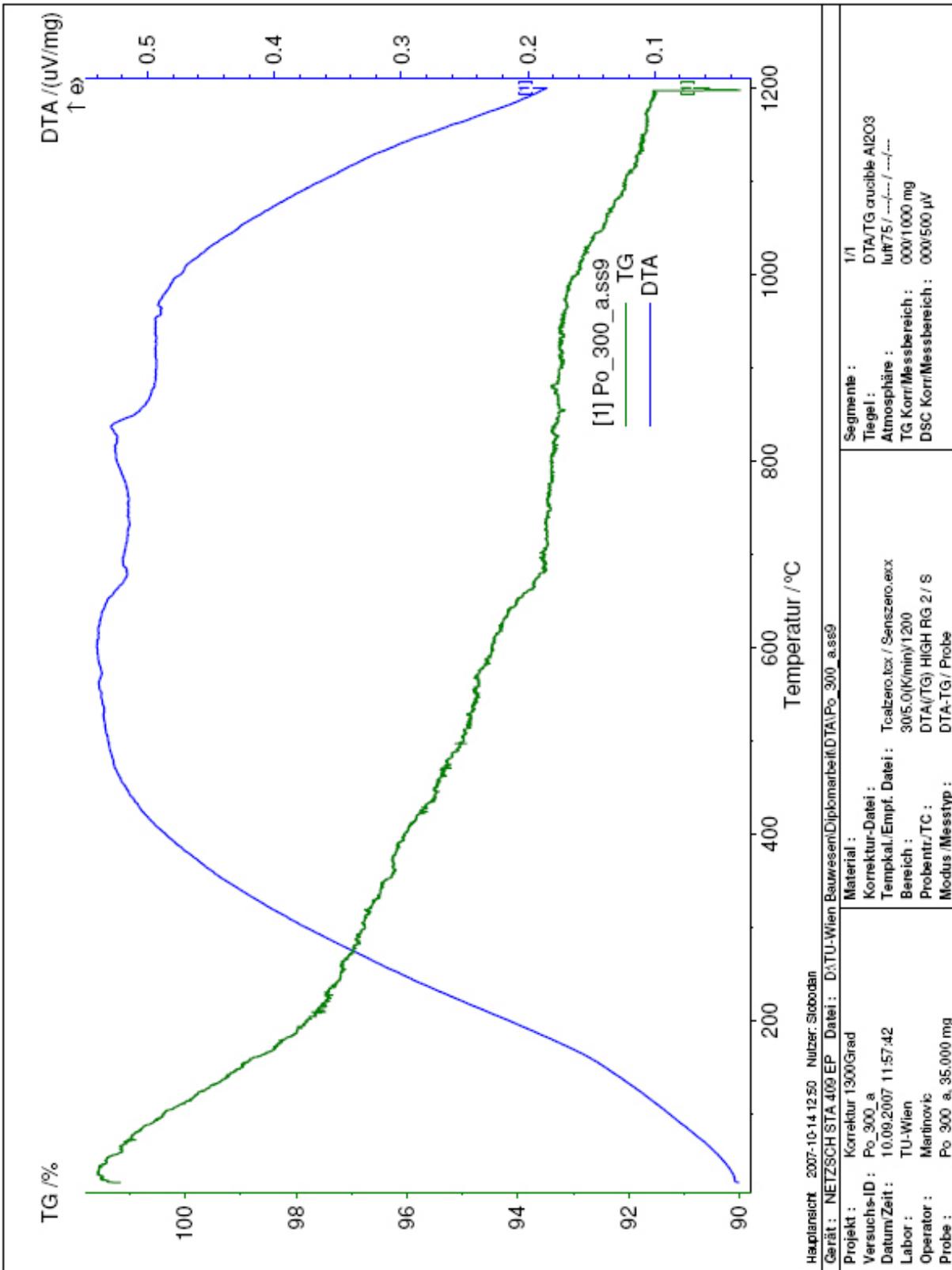


Abbildung 4-48: DTA und TG an Ex 300 °C Probe

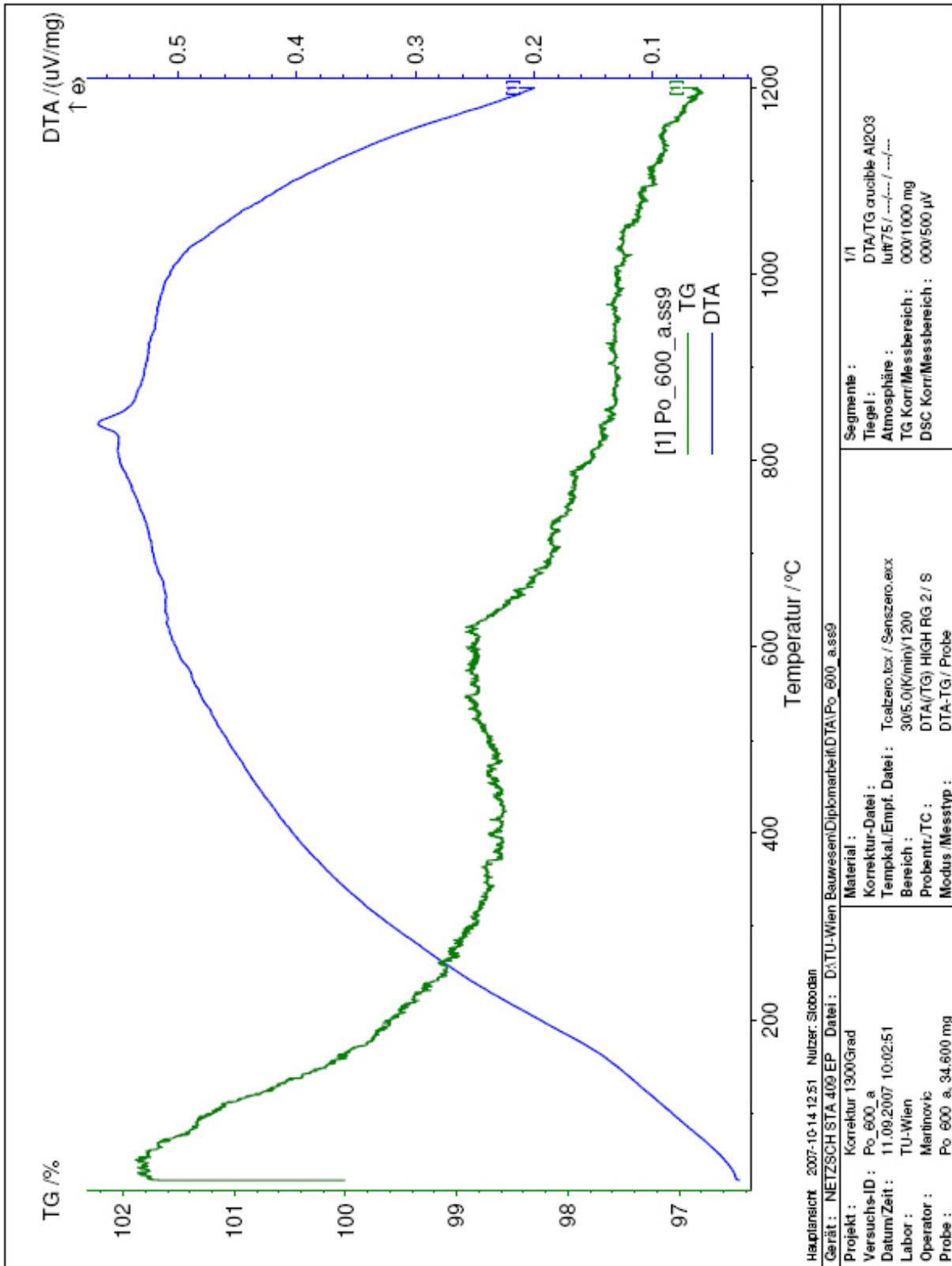


Abbildung 4-49: DTA und TG an Ex 600 °C Probe

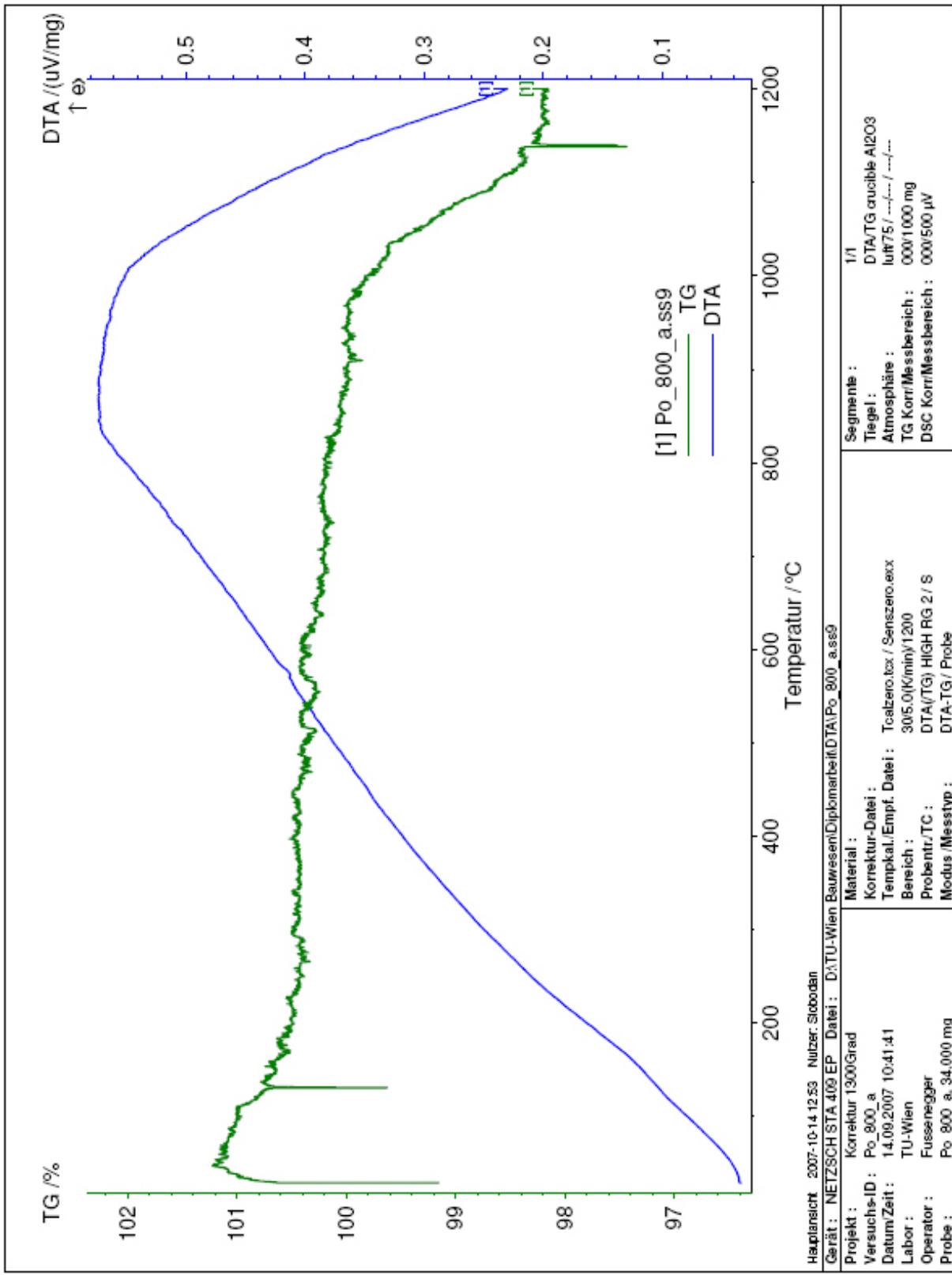


Abbildung 4-50: DTA und TG an Ex 800 °C Probe

4.2.5 Quecksilberporosimetrie

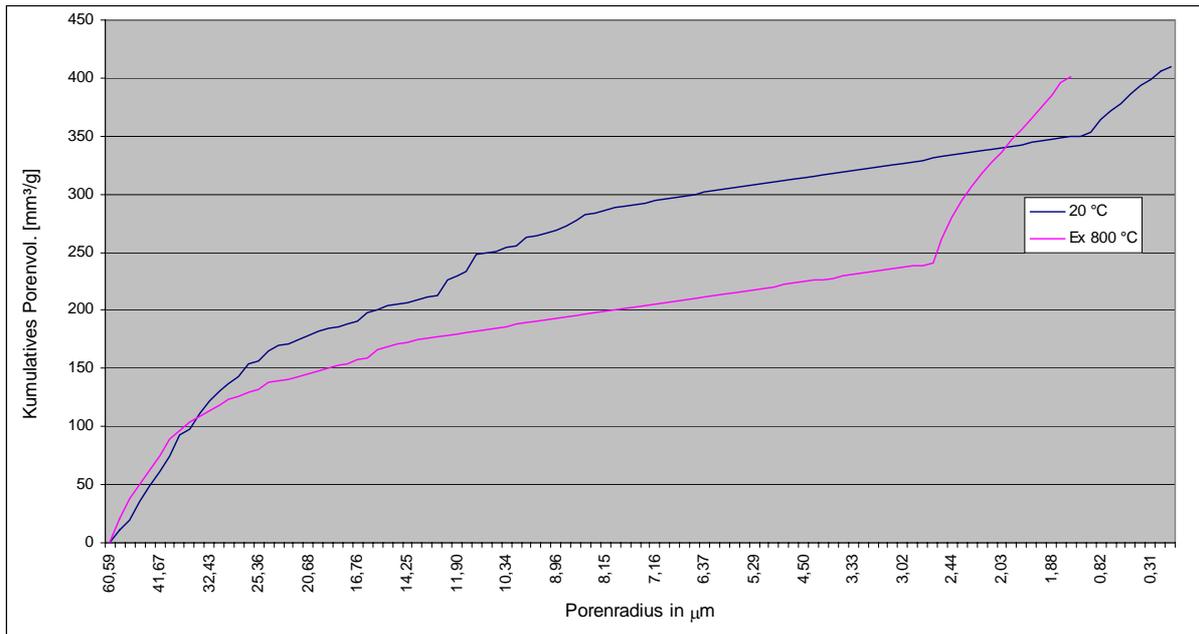


Abbildung 4-51: Porenradialen in Abhängigkeit vom Porenvolumen

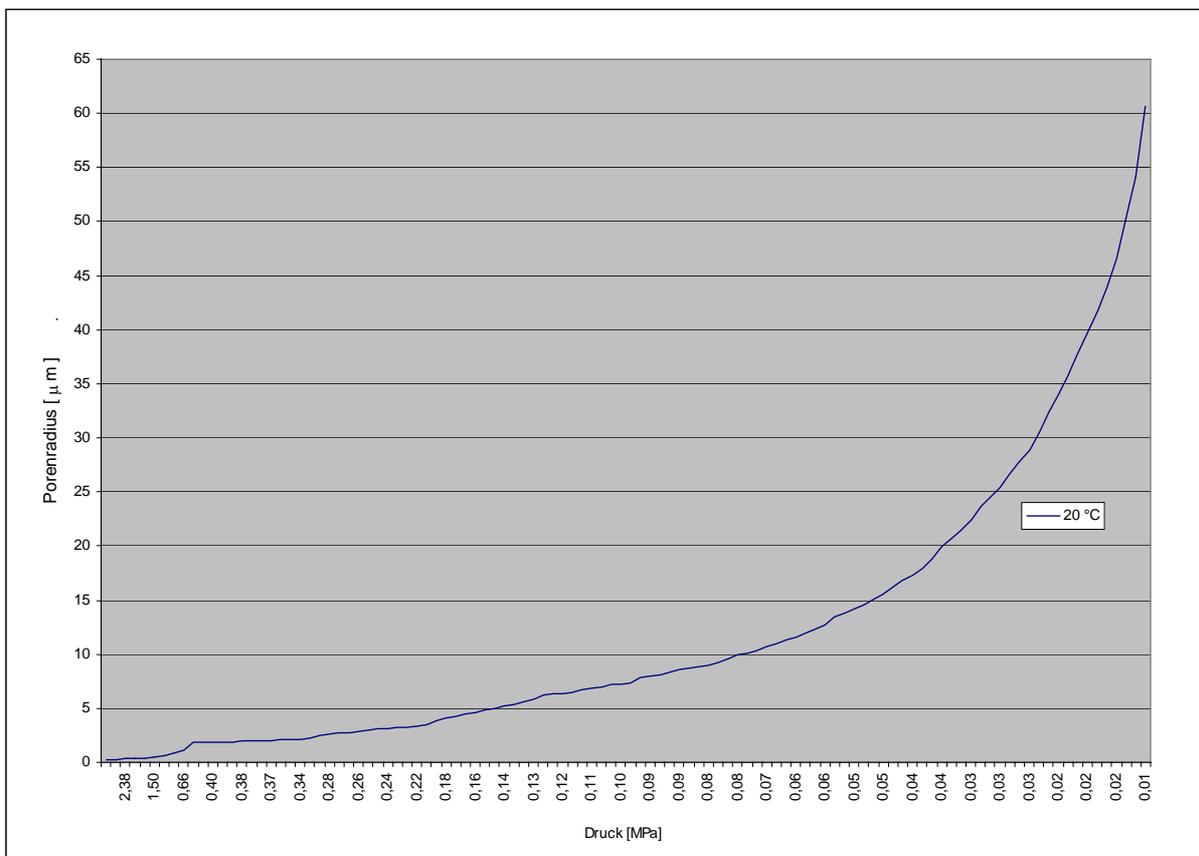


Abbildung 4-52: Porenradialen in Abhängigkeit vom aufgewendeten Druck bei einer Normalprobe

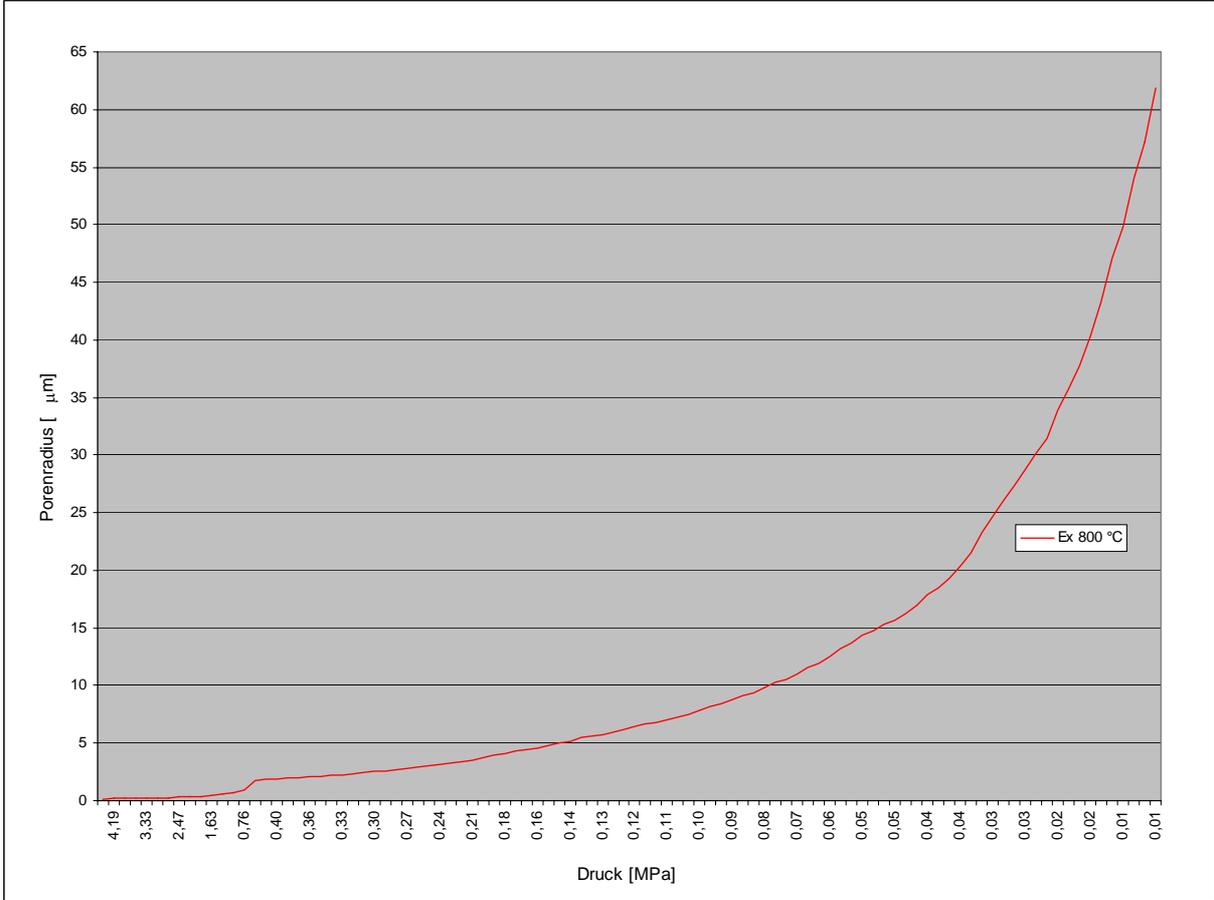


Abbildung 4-53: Porenradien in Abhängigkeit vom aufgewendeten Druck bei einer auf 800 °C vorbelasteten Probe

4.3 Diskussion der Ergebnisse

E-Modul

Gemäß Versuchsprogramm wurden die in den Abbildungen 4.1-18 zusammengestellten E-Modulwerte für Proben bei Versuchstemperaturen von 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 600 °C und 800 °C bestimmt. Die zur Auswertung herangezogenen Dehnungen sind ebenfalls angegeben.

In der *Tabelle 4-1* sind Werte der einzelnen Messungen und ihre Mittelwerte angegeben. Weiters sind mit dem Korrekturfaktor multiplizierte Werte, die dem tatsächlichen E-Modul entsprechen, angegeben.

Tabelle 4-1: Zusammenstellung der E-Moduli bei hohen Temperaturen

Testreihe:	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	600°C	800°C
	[N/mm ²]						
1.	siehe Tabelle 3-3	209	216	186	188	177	106
2.	siehe Tabelle 3-3	209	209	195	172	173	93
3.	siehe Tabelle 3-3	215	210	196	178	172	81
Mittelwert gemessene Werte:							
	198	211	212	192	179	174	93
Korrigierte Werte (Korrekturfaktor: 7,31):							
	1447	1542	1547	1406	1311	1272	682

In der *Abbildung 4-54* sind die gemessenen E-Modulwerte graphisch dargestellt. Demnach zeigten Probekörper bei Prüftemperaturen von 100 °C bzw. 200 °C einen geringfügig höheren Elastizitätsmodul als bei Labortemperatur. Temperaturen von 300 °C, 400 °C und 600 °C führten zu einem stetigen Abfall des E-Moduls. Bei einer Versuchstemperatur von 800 °C wurde ein erheblicher Abfall des E-Moduls registriert.

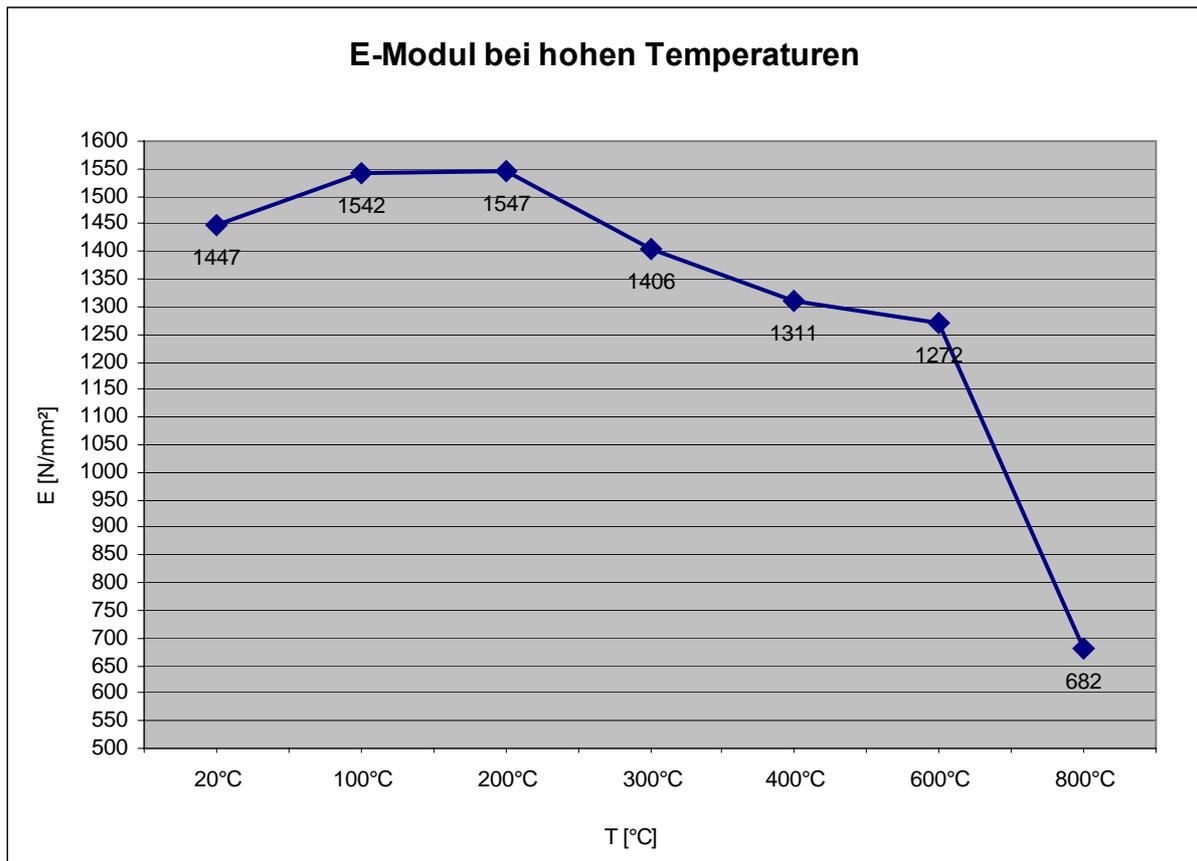


Abbildung 4-54: Graphische Darstellung der E-Moduli bei hohen Temperaturen

In der *Abbildung 4-55* sind E-Moduli bei hohen Temperaturen in Relation zum E-Modul bei 20 °C dargestellt. Es zeigt sich dass der E-Modul bei Versuchstemperaturen von 100 °C bzw. 200 °C um etwa 7 % höher ist als bei Normaltemperatur. Weitere Temperaturerhöhungen bewirkten einen Abfall des Wertes um 3 % bei 300 °C, um 9 % bei 400 °C und um 12 % bei 600 °C. Bei 800 °C wurde ein um 53 % geringerer E-Modul als bei Labortemperatur gefunden.

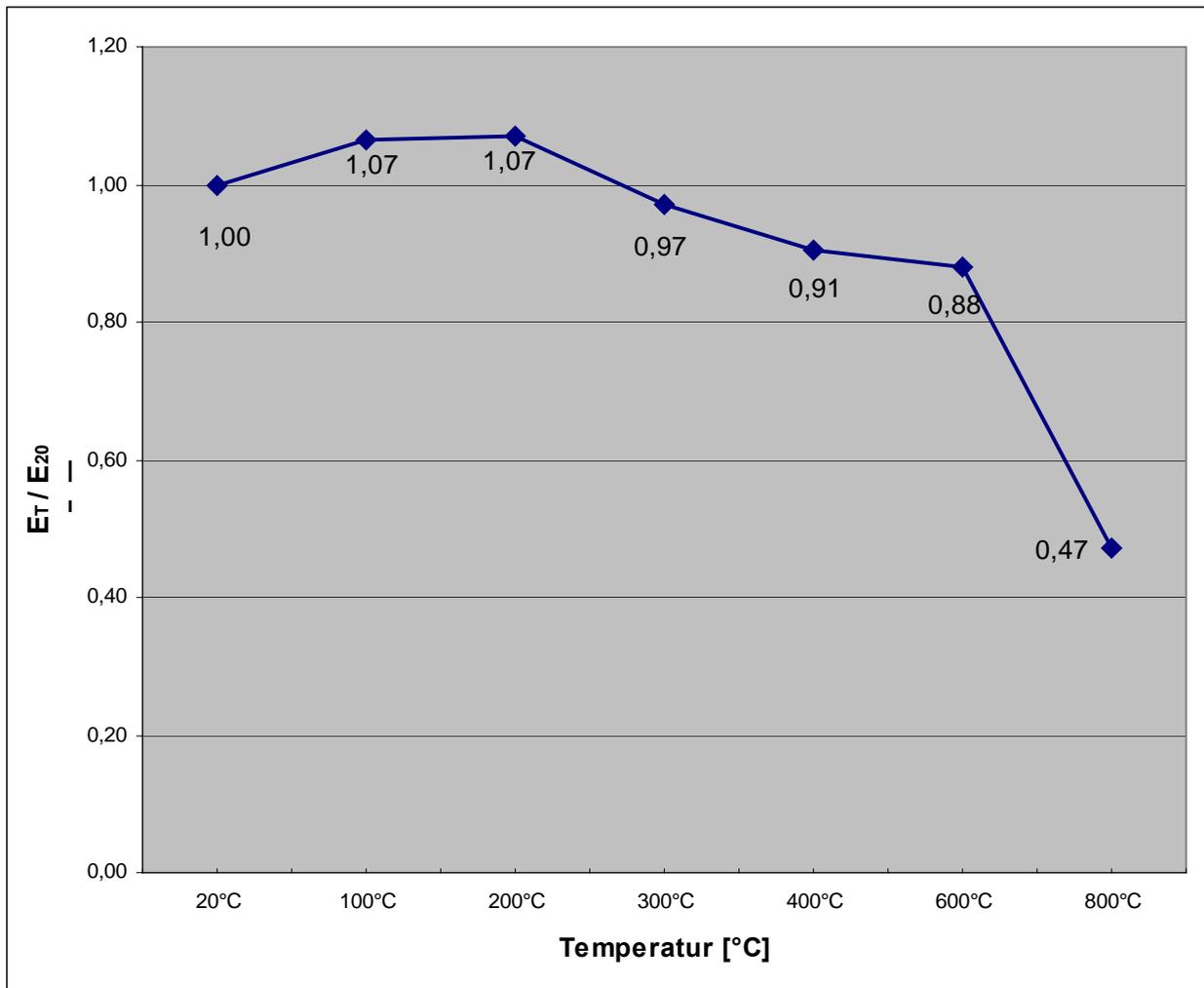


Abbildung 4-55: E-Moduli bei hohen Temperaturen in Relation zum E-Modul bei Labortemperatur von 20° C

Rest-E-Modul

Zusätzlich zum E-Modul wurde nach Beendigung der Versuchsreihe bei hohen Temperaturen der Rest-E-Modul an den wiederabgekühlten Proben bestimmt. In der unteren *Tabelle 4-2* wurden die E-Moduli der temperaturbelasteten Proben nach der Abkühlung zusammengestellt.

Tabelle 4-2: Zusammenstellung der Rest-E-Moduli

Testreihe:	Ex 100°C	Ex 200°C	Ex 300°C	Ex 400°C	Ex 600°C	Ex 800°C
	[N/mm ²]					
1.	232	233	191	186		103
2.	207	232	178	189	166	125
3.	245	233	190	163	164	122
Mittelwert gemessene Werte:						
	228	233	186	179	165	117
Korrigierte Werte (Multiplikator: 7,31):						
	1666	1700	1362	1311	1206	853

In der unteren *Abbildung 4-56* sind die an den wiederabgekühlten Proben gemessenen Rest-E-Moduli dargestellt. Die Streuweite der Ergebnisse war hier etwas größer als bei der E-Modulmessung unter Temperatureinwirkung. Das ist auf den Zustand der Probekörper zurückzuführen, da es während der Abkühlung der Probekörper zu einer mehr oder minder ausgeprägte Rissbildung gekommen ist.

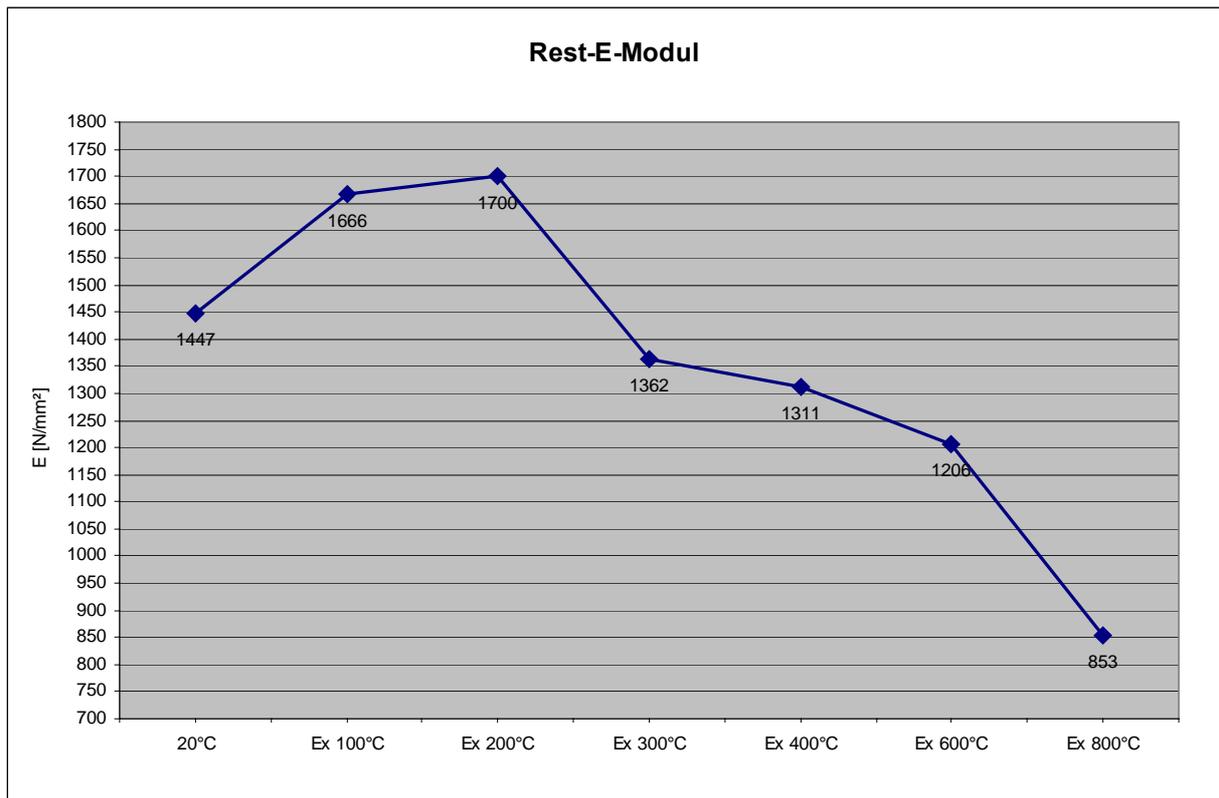


Abbildung 4-56: Graphische Darstellung der Rest-E-Moduli

In der folgenden *Abbildung 4-57* ist der Rest-E-Modul in Relation zum E-Modul bei Labortemperatur dargestellt. Der gemessene Rest-E-Modul bei dem ehemals auf 100 °C erhitzten Probekörper, ist um 15 % höher als der E-Modul bei Normaltemperatur. Bei der ehemals auf 200 °C erhitzten Probe wurde der höchste E-Modul von 1700 N/mm² gefunden, er ist um 18 % höher als der entsprechende Wert bei Raumtemperatur. Bei den restlichen Proben wurden geringere Werte als bei Normaltemperatur registriert. Aus den Messungen geht somit hervor, dass in den Temperaturzyklen zwischen 20 °C und maximal 250 °C jeweils Zunahmen in den E-Moduli beobachtet wurden, d.h. in der Praxis verbessern Bauteile aus Porenbeton in diesen Temperaturbereichen ihre mechanischen Eigenschaften.

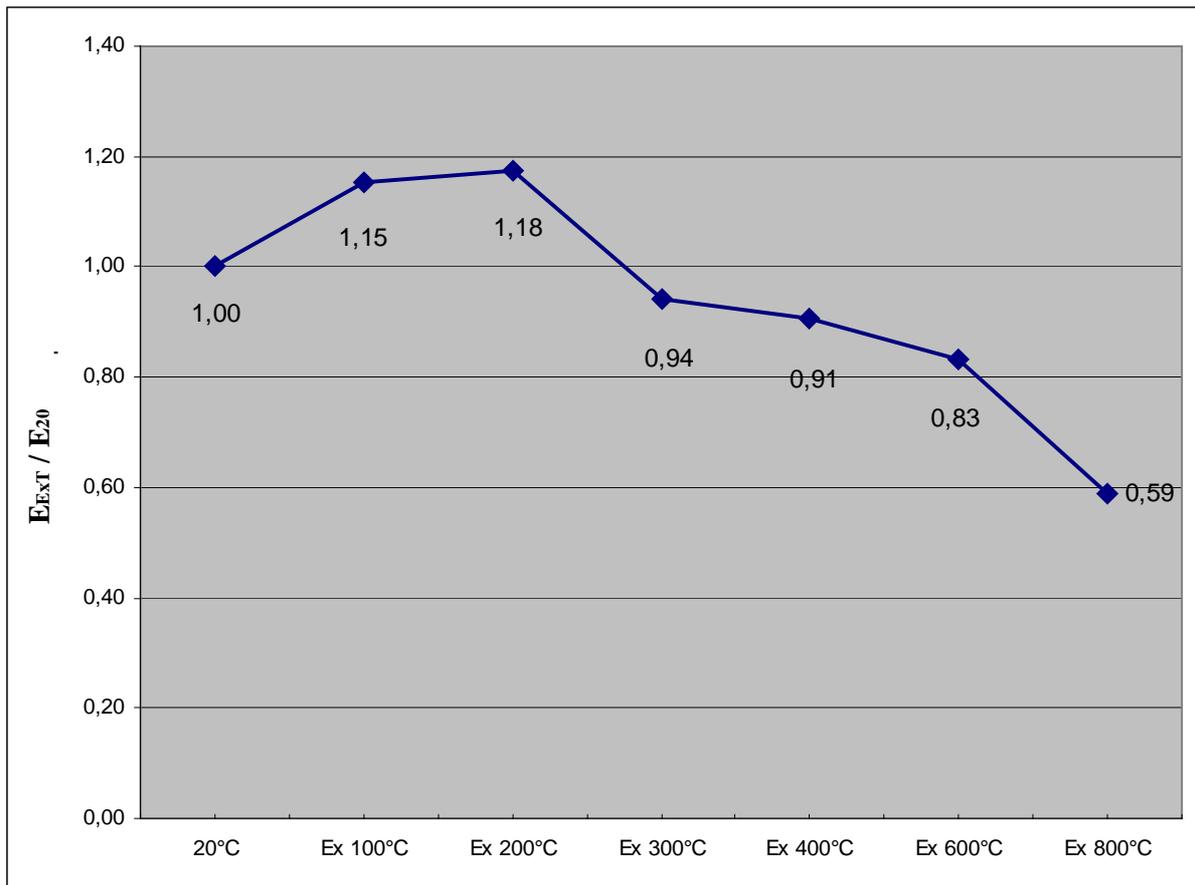


Abbildung 4-57: Rest-E-Moduli in Relation zum E-Modul bei Labortemperatur von 20° C

In der *Abbildung 4-58* ist der Quotient aus den Werten der ehemals Temperaturbelasteten Proben zu den temperaturbelasteten Proben dargestellt. Es ist ersichtlich dass der Rest-E-Modul im Schnitt höher ist als der E-Modul bei hohen Temperaturen (*vgl. Abbildung 4-55*).

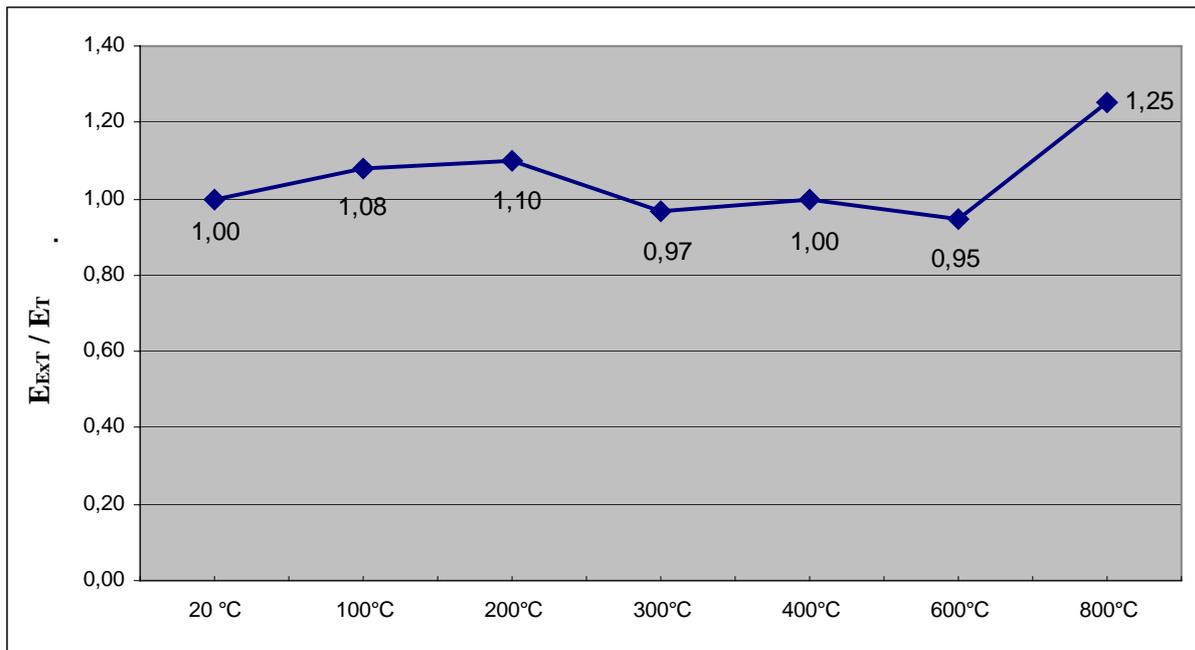


Abbildung 4-58: Rest-E-Moduli in Relation zu den E-Moduli bei hohen Temperaturen

Temperatureindringverhalten

In den *Abbildungen 4.36-41* sind die während der Aufheizung gemessenen Temperaturverläufe angegeben. Die Temperaturen wurden in unterschiedlichen Tiefen im Probekörper gemessen. Bei einer Versuchstemperatur von 100 °C ist die geringe Wärmeleitfähigkeit des Porenbetons deutlich zu erkennen. Die geforderte Temperatur wurde an der Oberfläche wie erwartet nach ca. 50 Minuten erreicht und erst nach weiteren 1,5 Stunden erreichte sie die Mitte des Probekörpers. Bei Prüftemperatur von 200 °C ist der Temperaturverlauf bei 5 cm Tiefe charakteristisch. Der Anstieg der Temperatur verläuft bis ca. 90 °C ziemlich parallel zur Ofentemperatur. Dann nimmt die Steigung ab und nimmt ab ca. 110 °C wieder zu. Dieser Verlauf deutet auf die Verdampfung des Porenwassers hin. Er ist auch bei höheren Temperaturen zu erkennen. Die nächste Steigungsschwankung tritt bei Temperaturen zwischen 300 °C und 400 °C wieder auf, wobei hier ein Teil des chemisch gebundenen Wassers entweicht.

Thermische Analyse

In den Abbildungen 4.46-49 ist die graphische Auswertung der *Simultanen Thermischen Analyse (STA)* wiedergegeben. Auf der Abszisse ist der Temperaturbereich der Untersuchung angegeben. Auf der linken Ordinate ist die Thermogravimetrie angegeben und auf der rechten Ordinate die Differenzthermoanalyse. Die TG gibt den Masseverlust der Probe während der Erwärmung in Prozent an. Die DTA misst die Wärmestromdifferenz zwischen der Probe und der Referenzprobe, hier leerer Tiegel, während des Aufheizens. Die Wärmestromdifferenz wird als elektrische Spannung (Mikrovolt je Milligramm) angegeben. Untersucht wurden Proben, die aus den ehemals temperaturbelasteten Probekörpern entnommen wurden.

Die Thermogravimetrie an der Probe *Ex 100 °C* (Abbildung 4-47) zeigt einen steilen Gewichtsverlust bis etwa 200 °C an. Diese Masseverluste von ca. 5 % sind der Verdunstung von Wasser aus den Poren zuzuordnen. Oberhalb von 200 °C verläuft die Kurve etwas flacher. Hier wird Wasser aus den Mikroporen freigesetzt und chemisch gebundenes Wasser abgegeben. Im Temperaturbereich von 500 °C bis ca. 700 °C kommt es zu weiteren Gewichtsverlusten. Diese werden u.a. durch die Zersetzung von Portlandit bei ca. 450 – 525 °C (Calciumhydroxid) zu Kalkstein und Wasser bedingt. Weiters ist bei der Probe *Ex 600 °C* der deutliche Gewichtsverlust bei Temperaturen bis 200 °C zu erkennen. Hier verdunstet das Wasser, welches bei der Abkühlung der Prüfkörper von den Poren wieder aufgenommen wurde. Danach verläuft die Kurve flach und bei ca. 600 °C kommt es wieder zu einem deutlichen Gewichtsverlust, bedingt durch die oben genannten Reaktionen. Bei der *Ex 800 °C* Probe (Abbildung 4-50) verläuft die Kurve bis etwa 1000 °C relativ flach, was auf geringe Gewichtsverluste hindeutet. Die Ursache hierfür liegt darin, dass bei Proben die auf 800 °C erhitzt wurden, der Tobermorit in β -Wollastonit umgewandelt wurde, welcher bei Wiederabkühlung kaum noch Wasser aufnimmt.

Die DTA hat keine deutlichen Ergebnisse geliefert. Das liegt evtl. daran, dass sie ohne Referenz-Zementmaterial erarbeitet wurde, die DTA zeigt eine riesige Drift. Deutlich erkennbar ist ein Peak bei 830 °C der die Bildung von *Wollastonit* anzeigt.

Die untere *Abbildung 4-59* zeigt zusammenfassend alle Ergebnisse der STA. Es ist ersichtlich dass die Kurven bei der TG mit steigender Temperatur der Vorbelastung immer flacher werden. Dies deutet darauf hin, dass es bereits zu einem Gewichtsverlust gekommen ist und je höher die Temperaturen waren, desto weniger reversibel waren die Gewichtsverluste.

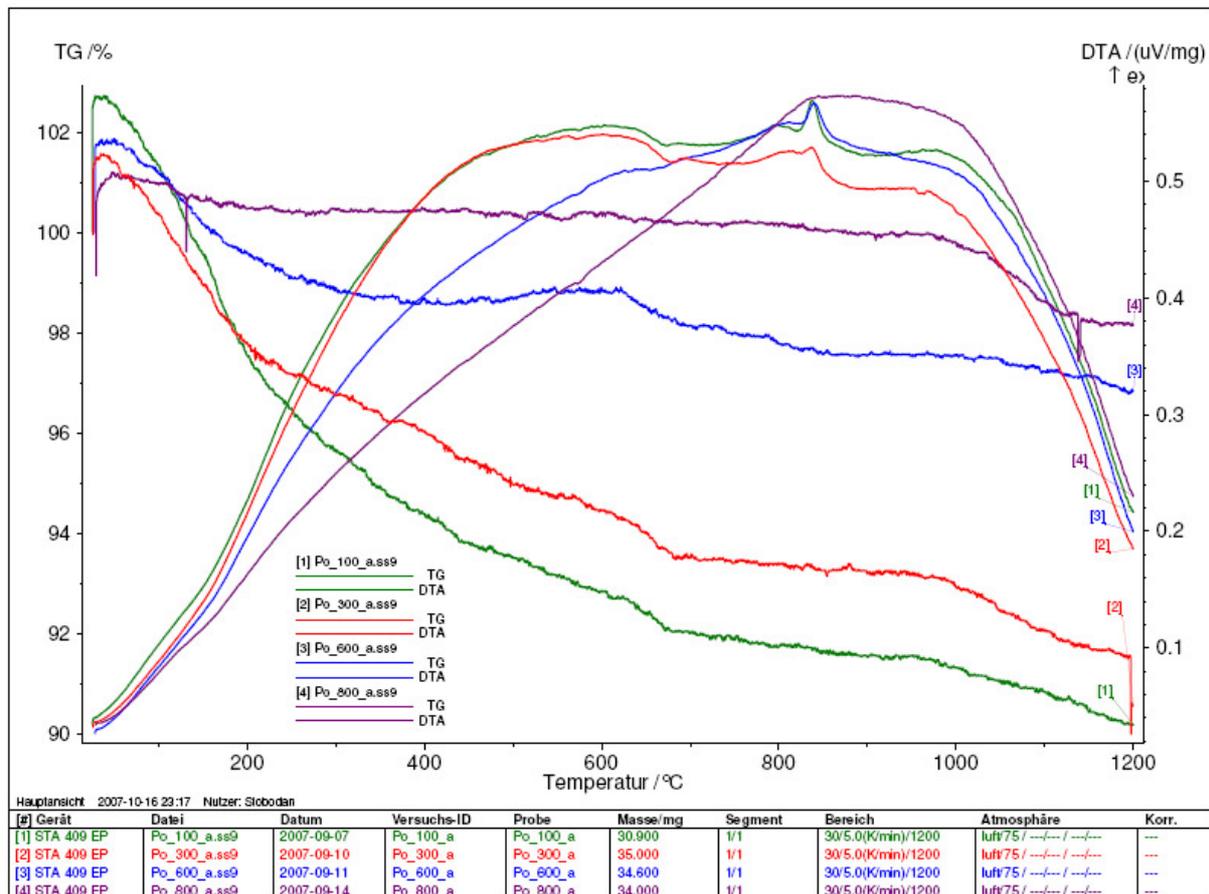


Abbildung 4-59: Zusammenfassung aller STA Ergebnisse

Quecksilberporosimetrie

Die nicht temperaturvorbelastete Probe wurde im Bereich von 0,24 bis 60,59 μm des Porenradius und im Bereich von 0,0124 bis 2,75 MPa beim Druck untersucht. Die auf 800 $^{\circ}\text{C}$ vorbelastete Probe wurde im Bereich von 0,17 bis 61,86 μm des Porenradius und im Bereich von 0,0121 bis 4,29 MPa beim Druck untersucht. Im Anhang ist eine Zusammenfassung der Eingangsparameter angegeben (*Tabelle 8-3*). Die Ergebnisse hier können nur qualitativ gewertet werden, weil der Bereich der Untersuchung nicht vollständig ist, um auch vernünftige quantitative Aussagen treffen zu können. Beispielsweise ergab die Prüfung eine

Gesamtporosität von nur 30 %, weil die Grobporen >62 µm mit dem Quecksilberporosimeter nicht erfasst wurden.

Der Vollständigkeit halber ist in der *Abbildung 4-60* die Porengrößenverteilung über den gesamten Größenbereich dargestellt. Diese Darstellung ist eine Komposition aus Bildanalyse- und Quecksilberporosimetrie-Daten.

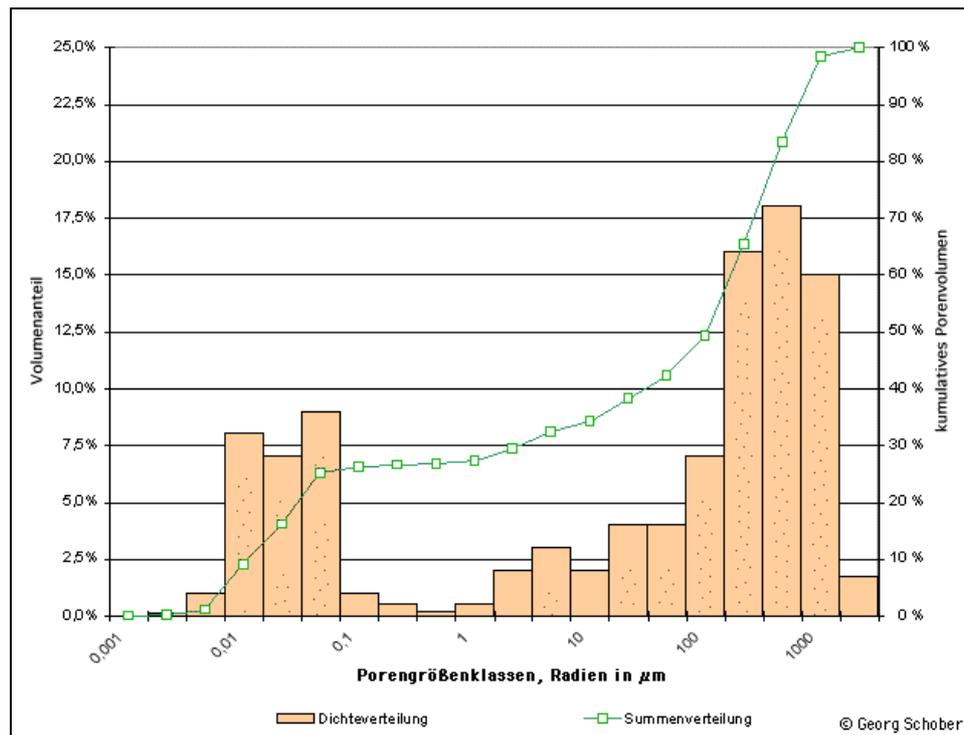


Abbildung 4-60: Porengrößenverteilung über den gesamten Größenbereich (*Schober, /35/*)

In der *Abbildung 4-51* sind die Porenradien in Relation zum kumulativen Porenvolumen dargestellt. Im Bereich größerer Radien ist die Kurve steil, was auf eine größere Menge intrudierten Quecksilbers hindeutet. Im Bereich kleinerer Radien verläuft die Kurve flacher. Bei der *Ex 800 °C* Probe ist im Bereich kleiner Radien ein anomaler Anstieg zu beobachten. Hier könnten die relativ spröden Porenwände durch den steigenden Druck gesprungen sein, was zum schnelleren Eindringen des Quecksilbers geführt hat. In der *Abbildung 4-52* und *Abbildung 4-53* sind die Porenradien in Abhängigkeit vom aufgewendeten Druck dargestellt. Mit steigendem Druck werden immer kleinere Poren gefüllt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

E-Modul

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Einflüsse der Temperatur auf den E-Modul des Porenbetons nachgewiesen werden konnten. Die höchsten Werte ergaben sich bei Temperaturen von 100 °C und 200 °C. Sie waren um etwa 100 N/mm² oder ca. 7 % höher als die Werte bei Normaltemperatur. Bei Temperaturen von 300 °C, 400 °C und 600 °C nahm der Elastizitätsmodul stetig ab und bei 800 °C hat sich der Wert auf weniger als 50 % des Normalwertes verringert.

Rest-E-Modul

Die Bestimmung des Rest-E-Moduls hat gezeigt, dass die Steifigkeit des Porenbetons nach einer Temperaturbelastung höher ist als bei der Raumtemperatur von 20 °C. So war der E-Modul der vormals auf 100 °C bzw. 200 °C um 15 % bzw 18 % höher als bei einer Prüfung bei 20 °C. Die Werte der ehemals auf 300 °C, 400 °C, 600 °C und 800 °C sind geringer als bei Normaltemperatur, sie sind jedoch höher oder ungefähr gleich, wie die gemessenen E-Moduli bei hohen Temperaturen (Abbildung 5-1).

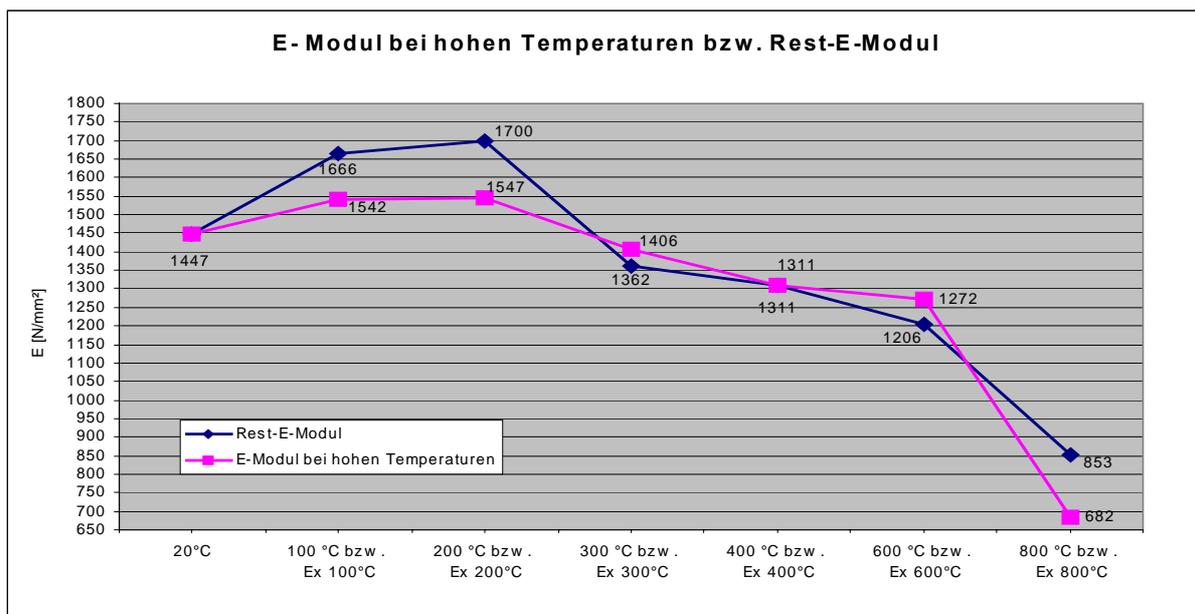


Abbildung 5-1: Zusammenfassung – E-Modul bei hohen Temperaturen bzw. Rest-E-Modul

Temperatureindringverhalten

Die Temperaturmessung bei diesen Versuchen diente vor allem um sicherzustellen dass sich während der Aufheizung auf die Versuchstemperatur, im ganzen Probekörper ein homogenes Temperaturfeld eingestellt hat. Zum Temperatureindringverhalten ist zu sagen, dass je höher die Versuchstemperaturen wurden, die Temperaturverteilung im Probekörper vergleichsweise schneller voran ging. Weiters wurde bei allen Proben ungefähr bei 90 °C und in 5 cm Tiefe eine Abflachung der Aufheizkurve beobachtet. Ab 110 °C verliefen die Temperaturkurven der Probe nahezu parallel zur Aufheizkurve des Ofens.

Thermische Analyse

Bei der Thermogravimetrie war charakteristisch, dass je höher die vormalige Temperaturbelastung der Probe war, desto niedriger die Gewichtsverluste ausfielen. Die DTA lieferte bei allen Proben einen Ausschlag bei etwa 830 °C, der die Wollastonitbildung anzeigt. Weitere Erkenntnisse konnten aus den DTA Analysen nicht gewonnen werden.

Quecksilberporosimetrie

Die Quecksilberporosimetrie hat keine quantitativen Ergebnisse geliefert. Ersichtlich sind nur die üblichen Zusammenhänge zwischen den Porenradien dem intrudierten Quecksilbervolumen und dem aufgebrachten Druck.

5.2 Ausblick

Über die Eigenschaften des Porenbetons bei hohen Temperaturen existieren bis dato kaum Aufschlüsse. Es wird empfohlen thermische Analysen mit höherer Auflösung anzuwenden, um Aufschlüsse über die chemischen Veränderungen zu gewinnen und somit Rückschlüsse auf die Gefügestruktur bei hohen Temperaturen machen zu können. Das Verhalten bei Druckbeanspruchung unter hohen Temperaturen sollte auch untersucht werden. Eine Annahme über die Festigkeitseigenschaften wurde von *Rilem* (Abbildung 2-26) gemacht. Dieser Beobachtung sollte weiter nachgegangen werden, weil sie wichtige Aussagen für die praktische Anwendung, z. B. Brandbeanspruchung, enthält.

In der Phase der Versuchsdurchführung bzw. während der Abwicklung der Vorversuche wurden folgende zusätzliche Erkenntnisse gewonnen:

- Für die hiesige E-Modulmessung wurde (*nach EN 1352:1993*) mit 2 Vorlastzyklen vorbelastet. Bei Anwendung von 3 bzw. 4 Vorlastzyklen wurde ein um etwa 10 % höherer E-Modul gemessen.
- Weiters haben die Haltezeiten Einfluss auf das Ergebnis der Messung. Beispielsweise ergaben E-Modulmessungen nach *Rilem (S.253 /17/)*, (Haltezeit = 90 Sekunden), auch einen geringfügig höheren E-Modul als die Messung nach *EN1352:1993* (Haltezeit = 2 Sekunden).

Es wird empfohlen für Untersuchungen bei hohen Temperaturen einen größeren Ofen zu verwenden. Für größere Proben sind stabilere Prüfungsvorrichtungen, Druckstempel etc., erforderlich.

Ein weiterer Aspekt ist die Wiederaufnahme der Feuchtigkeit nach Temperaturbelastung. Es sollte untersucht werden, inwieweit die Feuchteaufnahme reversibel ist.

6 Literatur

Nr.	Autor	Titel, Verlag, Auflage, Ort, Jahr
/1/	Wehrhahn	Porenbeton – Ein überragender Baustoff, 27738 Delmenhorst, Deutschland www.wehrhahn.de
/2/	N. Narayanan, K. Ramamurthy	Structure and properties of aerated concrete: a review, Cement & Concrete Composites, 22 (321-329), 2000
/3/	BVB-Porenbeton	Bundesverband – Porenbeton, 30419 Hannover, Deutschland www.bv-porenbeton.de
/4/	Helmut Weber	Das Porenbetonhandbuch, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1991
/5/	BVB-Porenbeton	Porenbeton Lehrmaterial, Diagramme – Illustrationen – Bilder, Copyright BVB-Porenbeton, 4. CD-ROM Auflage 10-2006
/6/	Helmut Weber, Heinz Hullman	Porenbeton Handbuch, Bauverlag – Gütersloh, 5. Auflage, Gütersloh, 2002
/7/	Norifumi Isu, Hideki spida, Takeshi Mitsuda	Influenze of quarz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (I) tobermorite formation; Cement and Concrete Research, Vol.25, No.2, pp.243-248, Elsevier Science Ltd, 1995
/8/	Norifumi Isu, Hideki spida, Takeshi Mitsuda	Influenze of quarz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (II) fracture toughness, strength and micropore; Cement and Concrete Research, Vol.25, No.2, pp.249-254, Elsevier Science Ltd, 1995
/9/	N. Narayanan, K. Ramamurthy	Microstructural investigations on aerated concrete; Cement and Concrete Research, Vol.30, pp. 457-464, Pergamon, 2000
/10/	Zementindustrie	http://www.zementindustrie.at/file_up1/Zementerzeugung.pdf ; Aug. 2007;
/11/	F. R. Huege et al.	United States Patent No.: US 6,395,205 B1; Method of manufacturing an aerated autoclaved concrete material; May 28, 2002
/12/	Lexikon	http://de.wikipedia.org/wiki/Calciumoxid ; Sept. 2007
/13/	Arbeitsgemeinschaft Umweltverträgliches Bauprodukt E.V.	Regeln für AUB-Produktdeklarationen –Porenbeton- ; Arbeitsgemeinschaft Umweltverträgliches Bauprodukt E.V.; 53637 Königswinter
/14/	Hüla Kus, Thomas Carlsson	Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete; Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp.1423-1432; Pergamon 2003
/15/	R. O. Fournier J. J. Rowe	The solubility of amorphous silica in water at high temperature and high pressures; American Mineralogist, Vol. 62, pp. 1052-1056, 1977
/16/	B. Walk-Laufer	Untersuchung des Einflusses von Sulfaten auf das System CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -K ₂ O-H ₂ O mittels Wärmeflusskalorimetrie und in-situ Neutronenbeugung unter hydrothermalen Bedingungen; Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften; Universität Siegen, 2002
/17/	RILEM	Autoclaved Aerated Concrete; Properties, Testing and Design; RILEM Recommended Practice; RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC,

		E&FN Spon, London, 1993
/18/	E. Holt, P. Raivio	Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete; Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp. 796-802, Elsevier, May 2004
/19/	R. Creamer, B. Boggs, R. M. Bergman	United States Patent No.: US 6,773,500 B1; Fiber reinforced aerated concrete and methods of making same; Aug. 10, 2004
/20/	F. H. Wittmann	Advances in AAC, Balkema, Page 272 ff., Balkema, 1992
/21/	S. Deckers	Einfluß der Eigenschaften hydraulischer Bindemittel auf die Eigenschaften hydrothermal gehärteter Leichtbetone; Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, 2000
/22/	K. W. Usemann	Brandschutz in der Gebäudetechnik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2003
/23/	H. Knoblauch, U. Schneider	Bauchemie, 4. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1995
/24/	O. Henning, D. Knöfel	Baustoffchemie, 5. Auflage, Bauverlag, Wiesbaden, 1997
/25/	H. Lindner	Physik für Ingenieure, 16. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 2001
/26/	W. F. Hemminger, H. K. Cammenga	Methoden der Thermischen Analyse, Springer-Verlag, Berlin, 1989
/27/	H. Weigler, R. Fischer, H. Dettling	Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 164, Berlin, 1964
/28/	U. Schneider	Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 337, Berlin, 1982
/29/	M. Alandjiyska	Entwicklung neuer Modellkatalysatoren auf Porenbetonbasis, Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2003
/30/	TU Ilmenau	Praktikum Glas und Keramikwerkstoffe, Institut für Werkstofftechnik, Sept. 2007
/31/	Uni-Erlangen	http://www.lkt.uni-erlangen.de/pdf/Leseprobe_ptak.pdf , Sept. 2007
/32/	HBM	http://www.hbm.com , Aug. 2007
/33/	TU-BS	http://www.pci.tu-bs.de/agbecker/tga.html
/34/	Partikelwelt	Partikelwelt, Quantachrome GmbH, No.3, Januar 2004
/35/	G. Schober	http://www.pb-aac.de/poren.html , Sept. 2007

7 Normen

/N1/	EN 680:1993 D	Bestimmung des Schwindens von dampfgehärtetem Porenbeton
/N2/	EN 1352:1996 D	Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls unter Druckbeanspruchung von dampfgehärtetem Porenbeton und haufwerksporigem Leichtbeton
/N3/	EN 678:1993 D	Bestimmung der Trockendichte von dampfgehärtetem Porenbeton
/N4/	EN 679:1993 D	Bestimmung der Druckfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton
/N5/	EN 1351:1997	Bestimmung der Biegezugfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton
/N6/	EN 1353:1996	Bestimmung des Feuchtegehaltes von dampfgehärtetem Porenbeton
/N7/	EN 1355:1997	Bestimmung der Kriechverformungen unter Druckbeanspruchung von dampfgehärtetem Porenbeton und haufwerksporigem Leichtbeton
/N8/	EN 15304:2007	Bestimmung des Frost-Tau-Widerstandes von dampfgehärtetem Porenbeton
/N9/	EN 772-11:2004	Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbeton, Betonwerksteinen und Natursteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln

8 Anhang

Tabelle 8-1: Einzelprüfungsprotokoll - E-Modulmessung mit Ansatz-Dehnungsaufnehmer

Einzelprüfungsprotokoll		100 x 100 x 300 D	1/10
Prüfung:	Zyklische E-Modulmessung		
Probe:	Porenbeton, Ytong, Der Gelbe		
Püfnorm:	ÖNORM EN 1352:1996		
Prüfer:	Slobodan Martinovic		
Maschinendaten:	Zwick-Universalprüfmaschine Z 250/SNA, Typ 148670 Dehnungsaufnehmer DD1, 2,5mm, H. Baldwin Messtechnik		
Abmessungen:	100x100x300mm		
Rohdichte:	463,37kg/m ³		
Einstellungen:	Vorkraft: 0,1N/mm ² Kraft bei E-Modul Beginn: 0,1N/mm ² Kraft bei E-Modul Ende: 0,67N/mm ² Vorlastzyklen und Haltezeiten gemäß Prüfnorm Ableseung der Werte - Mittelwert während 30s Ablesezeit		
Probennummer:	1		
Uhrzeit, Datum	22.08.2007, 17h		
h (mm):	29,75		
l (mm):	10,35		
b (mm):	9,90		
Volumen (m ³)	0,003048		
Masse (kg):	1,664		
Dichte (kg/m ³)	545,87		
Feuchtegehalt (m%)	17,80		
mittl. obere Prüfspannung (N/mm ²)	0,670393		
mittl. untere Prüfspannung (N/mm ²)	0,100320		
mittl. obere Dehnung ()	0,000380		
mittl. untere Dehnung ()	0,000006		
Berechneter E-Modul (N/mm ²)	1522		

Tabelle 8-2: Einzelprüfungsprotokoll - E-Modulmessung mit der Traverse

Einzelprüfungsprotokoll		100 x 100 x 100 T	1/10
Prüfung:	Zyklische E-Modulmessung		
Probe:	Porenbeton, Ytong, Der Gelbe		
Prüfnorm:	ÖNORM EN 1352:1996		
Prüfer:	Slobodan Martinovic		
Maschinendaten:	Zwick-Universalprüfmaschine Z 250/SNA, Typ 148670		
Abmessungen:	100x100x100mm		
Rohdichte:	474,67kg/m ³		
Einstellungen:	Vorkraft: 0,1N/mm ² Kraft bei E-Modul Beginn: 0,1N/mm ² Kraft bei E-Modul Ende: 0,67N/mm ² Vorlastzyklen und Haltezeiten gemäß Prüfnorm Ablesung der Werte - Mittelwert während 30s Ablesezeit		
Probennummer:	1		
Uhrzeit, Datum	24.08.2007, 12h		
h (mm):	9,95		
l (mm):	10,29		
b (mm):	10,18		
Volumen (m ³)	0,001042		
Masse (kg):	0,518		
Dichte (kg/m ³)	496,99		
Feuchtegehalt (m%)	4,70		
mittl. obere Prüfspannung (N/mm ²)	0,670276		
mittl. untere Prüfspannung (N/mm ²)	0,100210		
mittl. obere Dehnung ()	0,004290		
mittl. untere Dehnung ()	0,001366		
Berechneter E-Modul (N/mm ²)	195		
<p>Spannung-Prüfzeit</p>			
<p>Dehnung - Spannung</p>			

Tabelle 8-3: Eingangsparameter der Quecksilberporosimetrie

Sample name :	Beton_20_a		
Instrument type :	Pascal 440		
Date :	23.10.2007		
Filename :	C:\PASCAL Daten\Fussenegger\Corptus_Beton\Beton_20_a_C.440		
*** Sample information	***		
Company Name :	Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik u. Brandschutz d. TU Wien		
Operator :	K. Fussenegger		
Date :	23.10.2007		
Sample name :	Beton_20_a		
Preparation :	Slobodan		
Sample mass (g) :	,9924		
Sample density (g) :	0		
Mercury height (mm) :	89,54		
Vol. at run (mm3) :	435		
Weight dilatometer+mercury+sample (g) :	164,9716		
Weight dil.+mercury+sample correct(g) :	165,053		
Capillary mercury height (mm) :	61,54		
*** Acquisition parameters	***		
Max pressure :	400		
Pump speed increase :	6		
Pump speed decrease :	9		
Pump speed inc. compensation :	Pascal		
Pump speed dec. compensation :	Pascal		
Dilatometer number :	9		
Dilatometer type :	Normal		
*** Calculation parameters	***		
Contact angle (Deg) :	141,3		
Hg surface tension (Dyne/cm) :	480		
Hg density (g/cm3) :	13,5438		
Temperature Hg (°C):	21		
Pores model :	Cylindrical		
Sample volume correction :	No		
Region start :	,001		
Region stop :	100		
Region number of intervals :	50		
Pores average mode :	50 %		
Particle size distribution :	Yes		
Kp factor :	0		
Cut off radius :	0-0		
*** Blank parameters	***		
Blank data file path :	C:\PASCAL Daten\Fussenegger\Blindwerte_neu_Sept_05_Okt_06\Blindwert_12C		
Blank name instrument :	Pascal 440		
Num. of blank data points increase :	131		
Num. of blank data points decrease :	82		
Filling volume (mm3) :	441 (from blank file)		
Weight dilatometer (g) :	59,86 (from blank file)		
Weight dilatometer+Hg (g) :	182,252 (from blank file)		
Capillary radius (mm) :	1,5 (from blank file)		
Dilatometer cone height (mm) :	28 (from blank file)		
Hg density blank (g/cm3) :	13,5328 (from blank file)		
Temperature Hg (°C):	25,5		
*** Report options	***		
Report unit pores radius :	Micron		
Report unit Spec./Rel. volume :	mm3/g		
Line factor :	10		