Bauforschung

Untersuchungen zum Schwindverhalten von Reaktionsharzbetonen und Reaktionsharzmörteln

T 889

Fraunhofer IRB Verlag

T 889

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Amtlich anerkannte Prüfanstalt
Für Kunststoffe

SÜDDEUTSCHES
KUNSTSTOFF-ZENTRUM

Untersuchungen zum Schwindverhalten von Reaktionsharzbetonen und Reaktionsharzmörteln

SKZ - Institut für Kunststoffverarbeitung, -anwendung und –prüfung
Frankfu rter Straße 15, D-8700 Würzburg
Telefon (09 31) 4 40 81, FS 068 448 skzd

Forschungsauftrag:	F 151 Schlußbericht
Forschungsthema:	Untersuchungen zum Schwindverhalten von Reaktionsharzbetonen und Reaktionsharzmörteln
Auftraggeber:	Institut für Bautechnik, Berlin
Sachbearbeiter:	Ing.(grad.) M. Kurzmeier

Prof. Dr.-Ing. W. Woebcken
Institutsdirektor

Dr.-Ing. J. Zöhren
Prüfung und Forschung

Der Bericht umfaßt 147 Seiten mit 6 Tabellen und 66 Bildern.

Würzburg, den 30. Oktober 1980

Inhaltsverzeichnis Seite

Inhalt I

Vorwort III

Abkürzungen IV

1. Einleitung 1

2. Zusammenfassung 3

3. Vorhandene Erkenntnisse 6

4. Untersuchung des Schwindverhaltens 8

4.1 Versuchsprogramm 8

4.2 Beschreibung der Verbundsystem-Komponenten 12
4.2.1 Harzsysteme 12
4.2.1.1 UP-Harz 12
4.2.1.2 EP-Harz 15
4.2.1.3 MMA-Harz 16
4.2.2 Zuschlagstoffe 17

4.3 Orientierende Vorversuche 19
4.3.1 Untersuchung der Verarbeitbarkeit 19
4.3.2 Untersuchung des Kurzzeit-Biegeverhaltens 20

4.4 Auswahl und Beschreibung der Meßmethoden 21
4.4.1 Methoden zur Untersuchung des Schwindverhaltens 21
4.4.1.1 Dichtemessung 21
4.4.1.2 Prismen-Methode 22
4.4.1.3 Ring-Methode 23
4.4.1.4 Thermometer-Methode 27
4.4.1.5 Sensor-Methode 28
4.4.2 Methoden zur Untersuchung des mechanischen Kurzzeit- und Langzeitverhaltens 33
4.4.2.1 Kurzzeit-Zugversuche an ungefüllten Reaktionsharzsystemen 33
4.4.2.2 Kurzzeit-Biegeversuche an ungefüllten Reaktionsharzsystemen 33
4.4.2.3 Zeitstand-Biegeversuche an ungefüllten Reaktionsharzsystemen 33
4.4.2.4 Kurzzeit-Biegeversuche an Verbundsystemen 34
4.4.2.5 Zeitstand-Biegeversuche an Verbundsystemen 34

4.5 Herstellung der Verbundsysteme 36

	Seite
4.6 Durchführung der Untersuchungen	37
4.6.1 Untersuchungen an ungefüllten Reaktionsharzen	37
4.6.2 Untersuchungen an Reaktionsharzbeton	39
4.6.3 Untersuchungen an Reaktionsharzmörtel	41
5. Darstellung der Ergebnisse	42
5.1 Ergebnisse der Untersuchungen an ungefülltem Reaktionsharz	42
5.2 Ergebnisse der Untersuchungen an Reaktionsharzbeton	52
5.2.1 Prismen-Methode	52
5.2.2 Ring-Methode	64
5.2.3 Thermometer-Methode	69
5.2.4 Sensor-Methode	77
5.2.5 Kurzzeit-Biegeversuche	107
5.2.6 Zeitstand-Biegeversuche	116
5.3 Ergebnisse der Untersuchungen an Reaktionsharzmörtel	123
5.3.1 Prismen-Methode	123
5.3.2 Ring-Methode	123
5.3.3 Thermometer-Methode	126
5.3.4 Sensor-Methode	126
5.3.5 Kurzzeit-Biegeversuche	130
5.3.6 Zeitstand-Biegeversuche	132
5.4 Vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse	134
6. Interpretation der Ergebnisse und Nutzen für die Praxis	138
7. Literaturverzeichnis	142

Vorwort

Aus der Praxis ist bekannt, daß Reaktionsharzbetone und Reaktionsharzmörtel unterschiedliches Schwindverhalten infolge der Einflüsse aus der Zusammensetzung, der konstruktiven Gestaltung und der Verarbeitung aufweisen. Es erschien daher erforderlich, die z.T. komplizierten Zusammenhänge zu klären, wobei die Erfahrungen aus der Zusammenarbeit der Forschungsinstitute mit Herstellern und Verarbeitern genutzt werden sollten. Das Institut für Bautechnik (IfBt) beauftragte das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum (SKZ) mit diesen Untersuchungen.

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde dankenswerter Weise mit Mitteln des Instituts für Bautechnik (IfBt), Berlin, gefördert.

Dank gilt auch dem Verband Kunststofferzeugende Industrie e.V., Frankfurt, sowie folgenden Industriefirmen für die Unterstützung und kostenfreie Bereitstellung der Versuchsmaterialien:

- Bakelite GmbH, 4100 Duisburg 12
- Chemische Werke Hüls AG, 4370 Marl 1
- Ducalin Kunststoffe, 8070 Ingolstadt
- Hürttenberger Steine und Erden GmbH, 5000 Köln 1
- Peroxid-Chemie GmbH, 8023 Höllriegelskreuth

Zu Beginn der Untersuchungen waren an diesem Vorhaben die Herren Dipl.-Ing. H.W. Franken und Ing.(grad.) G. Dihsmaier maßgeblich beteiligt, die inzwischen aus dem Institut ausgeschieden sind. Den Mitarbeitern des SKZ, die mit Durchführungen und Bewertungen von Versuchen betraut waren, sei an dieser Stelle für ihre Hilfe gedankt.

Abkürzungen

a	=	Sieblinienbezeichnung
b	=	Sieblinienbezeichnung
c	=	Sieblinienbezeichnung
C	=	Konstante aus Druckeichung
d	=	Sieblinienbezeichnung
d_a	=	Ringaußendurchmesser
d_i	=	Ringinnendurchmesser
e	=	Sieblinienbezeichnung
E_0	=	Elastizitätsmodul bei Zugbeanspruchung
E_{b0}	=	Elastizitätsmodul bei Biegebeanspruchung
E_{bc}	=	Kriechmodul im Zeitstand-Biegeversuch
E_{b1}	=	Kriechmodul im Zeitstand-Biegeversuch nach 1 Stunde Belastungszeit
E_{b24}	=	Kriechmodul im Zeitstand-Biegeversuch nach 24 Stunden Belastungszeit
E_{RHB}	=	Elastizitätsmodul des Reaktionsharzbetons
E_{RHM}	=	Elastizitätsmodul des Reaktionsharzmörtels
E_{rb10^5}	=	durch Extrapolation ermittelter Kriechmodul im Zeitstand-Biegeversuch bei 10^5 Stunden Belastungszeit
E_S	=	Elastizitätsmodul des Sensor-Werkstoffes
h	=	Stunden
h_r	=	Höhe des RHB- bzw. RHM-Ringes
k	=	Konstante
KN	=	Kriechneigung
lo	=	Ursprungslänge
Δl	=	Längendifferenz

m_A	=	Masse der vorbeschleunigten Harzkomponente
m_B	=	Masse der Härterkomponente
p	=	Schwindungsdruck bei der Ringmethode
p_S	=	Schwindungsdruck
$p_{T/M}$	=	Druck auf das Quecksilberreservoir
r_i	=	Innenradius des Meßringes
s	=	Wanddicke des Meßringes
S_L	=	lineare Schwindung
S_V	=	Volumenschwindung des Reinharzes
t	=	Zeit
t_A	=	Aushärtezeit
t_B	=	Beanspruchungszeit
α	=	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
α_H	=	Aushärteabhängiger linearer Wärmeausdehnungskoeffizient der Harzmatrix
α_S	=	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient des Sensors
α_{tA}	=	α_H bei bestimmter Aushärtezeit
$\alpha_{t\ Amax}$	=	α_H bei Reaktionstemperaturmaximum
β_b	=	Biegefestigkeit
β_z	=	Zugfestigkeit
ε	=	Dehnung bzw. Stauchung
ε_b	=	Dehnung bei Biegebeanspruchung
ε_S	=	aus Schwindung resultierende Dehnung des Meßringes
ε_{Se}	=	genaue Dehnung des Sensors
ε_{SSH}	=	aus Schwindung resultierende Dehnung der Harzmatrix
ε_{ST}	=	Differenz aus ε_{SSH} und ε_{STS}

ε_{STH}	=	Wärmeausdehnung der Harzmatrix
ε_{STS}	=	Wärmeausdehnung des Sensors
ε_{S*}	=	effektive Schwindungsdehnung
ε_{tS}	=	Tangentialdehnung am Meßring
ε_{SL}	=	lineares Schwindmaß
ϱ	=	Dichte
ϱ_0	=	Dichte der Harzmatrix zum Zeitpunkt 0
ϱ_A	=	Dichte der vorbeschleunigten Harzkomponente
ϱ_B	=	Dichte der Härterkomponente
ϱ_t	=	Dichte der Harzmatrix bei bestimmter Aushärtezeit
σ	=	Spannung
σ_b	=	Biegespannung
σ_{b2}	=	Biegespannung bei 2 % rechnerischer Randfaserdehnung
σ_S	=	lineare Schwindspannung
σ_{S*}	=	Schwindspannung aus der Sensormethode
σ_{tS}	=	Tangentialspannung
ϑ	=	Temperatur
$\Delta\vartheta$	=	Temperaturdifferenz
ϑ_A	=	Reaktionstemperatur bei bestimmter Aushärtezeit
ϑ_R	=	Reaktionstemperatur
EP	=	Epoxidharz
MMA	=	Methylmethacrylatharz
UP	=	ungesättigtes Polyesterharz
RHB	=	Reaktionsharzbeton
RHM	=	Reaktionsharzmörtel
VS	=	Verbundsystem

1. Einleitung

Mit Reaktionsharzbeton (RHB) und Reaktionsharzmörtel (RHM) bzw. Kunstharzbeton und Kunstharzmörtel werden Verbundsysteme aus meist mineralischen Füllstoffen und Bindemitteln auf Basis duroplastischer Kunstharze bezeichnet. Diese Materialien haben bereits ein breites Anwendungsfeld gefunden. So werden im Bauwesen nichttragende oder selbsttragende Bauteile wie z.B. Fensterbänke, Belagplatten, Beschichtungen, Kanaldeckel, Kabelkanäle, Wannen, galvanische Bäder, Abwasserrohre u.a. aus Reaktionsharzbeton oder Reaktionsharzmörtel hergestellt. In zunehmendem Maße werden diese Formstoffe auch als konstruktiv tragende Werkstoffe bei Verankerungen und Verbindungen oder bei der Fertigung von Bauteilen wie Treppen, Deckenelementen, Fassenelementen und ähnlichen Formteilen eingesetzt.

Durch die gezielte Auswahl der verschiedenen, am Verbundsystem beteiligten Einzelkomponenten können unter Beachtung der Eigenschaften und Wirkungsweise dieser Komponenten die Eigenschaften von Reaktionsharzbeton und Reaktionsharzmörtel beeinflußt werden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen die Vorgänge im Mikrobereich der Harzmatrix und deren Einfluß auf das Schwindverhalten des Reaktionsharzes mit und ohne äußere Verformungsbehinderung abgeschätzt werden. Dazu ist die Kenntnis des Schwindverhaltens sowie des Kurz- und Langzeitverhaltens bei Zugbeanspruchung, abhängig vom Aushärtezustand, erforderlich. Die theoretischen Überlegungen sollten durch Versuche bestätigt werden.

Durch gezielte Untersuchungen mit bereits bekannten und mit im Rahmen des Forschungsvorhabens zu entwickelnden Meßmethoden sollten an verschiedenen Verbundsystemen Grundlagen geschaffen werden, die eine Abschätzung der Schwindspannungen im Makrobereich unter Berücksichtigung der einflußnehmenden Größen ermög-

lichen. Darüber hinaus sollten durch systematische Untersuchungen der Schwindvorgänge in Verbundsystemen bzw. der maßgebenden Einflußgrößen die Spannungszustände erfaßt werden, die zur Beurteilung von Reaktionsharzbeton und Reaktionsharzmörtel im bauaufsichtlichen Bereich notwendig sind.

2. Zusammenfassung

Diese Arbeit befaßt sich mit dem Schwindverhalten von Reaktionsharzbeton (RHB) und Reaktionsharzmörteln (RHM) und den damit einhergehenden Folgeerscheinungen.

Die Schwindung von RHB und RHM ist auf das Verhalten der Matrixwerkstoffe zurückzuführen und wird wesentlich durch den Reaktionsprozeß verursacht. Der Reaktionsprozeß erfolgt bei den verwendeten Matrixwerkstoffen ungesättigtes Polyesterharz (UP), Epoxidharz (EP) und Methacrylatharz (MMA) aufgrund verschiedener, chemischer Vorgänge und wird durch die Kombination der Reaktionskomponenten sowie durch die Verarbeitungsparameter entscheidend beeinflußt.

Die relativ ungünstige Schwindung ungefüllter Reaktionsharzformstoffe tritt bei RHB und RHM nur teilweise in Erscheinung. Die schwindfreien Füllstoffe, d.h. Füllstoffanteil, -art und -gestalt, beeinflussen wesentlich das Schwindverhalten von RHB und RHM.

Entscheidende Schwindungsvorgänge spielen sich während der Reaktionsphase ab, d.h. in statu nascendi, wobei eine Superposition der Schwindung aus der exothermen Reaktion und der thermischen Ausdehnung bzw. Kontraktion der Verbundkomponenten erfolgt.

Die Schwindvorgänge verursachen Spannungszustände, die sich während der Reaktion hinsichtlich Richtung und Betrag ändern und die sich in der Matrix, im Füllstoff und im Grenzflächenbereich auswirken. Da die Verbundkomponenten verschiedene Eigenschaftsbilder aufweisen bzw. durchlaufen, hat diese Schwindspannung für Matrix und Füllstoff unterschiedliche Bedeutung.

Mittels verschiedener Meßmethoden wurde versucht, das Schwindmaß bzw. die Schwindspannungen, deren Betrag und Wirkungsrichtung an verschiedenen Verbundsystemen zu erfassen. Neben bekannten Verfahren kamen Meßmethoden zum Einsatz, die im Rahmen der Forschungsarbeit entwickelt wurden. Im Prinzip handelt es sich dabei um Sensoren, die die Erfassung von Beanspruchungen auf ein einzelnes Füllstoffkorn während des Härtungsvorganges ermöglichen sollen. Mit den angewandten Methoden konnten die bekannten Größen und die Unterschiede zwischen den einzelnen Verbundsystemen bestätigt werden.

Nach Abschluß der Reaktionsphase und Stabilisierung bzw. Abkühlung der Matrixtemperatur ist der entscheidende Schwindprozeß beendet. Dieser Vorgang zieht sich je nach Wahl der Härtungsparameter über verschieden lange Zeiträume hin. Insbesondere während der Abkühlphase bilden sich dabei die sogenannten Schwindspannungen aus. Bei den hier untersuchten Systemen führt das vorwiegend zu Druckspannungen, z.T. auch zu Zugspannungen im Grenzflächenbereich in der Matrix oder im Füllstoffkern. Ausgeprägt kurze Reaktionsphasen mit hohen Reaktionstemperaturen, d.h. kurze Aufheiz- und Abkühlzeiten, sind ebenfalls ursächlich für die Entstehung hoher Eigenspannungen im Verbund. In diesem Zustand kommt besonders dem Relaxationsverhalten der Matrix und der Homogenität des Verbundes Bedeutung zu. Inhomogenitäten führen zu örtlichen Spannungsspitzen, die durch hohes Relaxationsvermögen teilweise abgebaut werden können. Besteht die Möglichkeit der Relaxation nicht, so führen bereits hohe Eigenspannungen oder zusätzlich wirkende äußere Beanspruchungen u.U. zur Störung des Verbundes bzw. zum Versagen von RHB- oder RHM-Bauteilen. Auftretende Druckspannungen erweisen sich als weniger gefährlich, da sowohl Füllstoff als auch Matrix besser in der Lage sind, dieser Beanspruchung entgegenzuwirken. Normalschwindende Harzsysteme können unter ungünstigen Voraussetzungen, d.h. bei hohen Reaktionstemperaturen, kurzen Reaktionszeiten

und ungenügendem Relaxationsvermögen Eigenspannungen im RHB bzw. RHM entwickeln, die an die Grenzen der irreversiblen Schädigungen reichen. Auf gezielte Auswahl der am Verbund beteiligten Komponenten ist deshalb besonders zu achten.

Die im Rahmen der Forschungsarbeit entwickelte Sensor-Methode erweist sich zwar für die Ermittlung örtlicher Spannungsspitzen als nützlich, ist aber in der Praxis wegen des hohen technischen Aufwandes und wegen der fehlenden globalen Aussage über das Schwindverhalten nur begrenzt anwendbar.

Die bereits mehrfach für experimentelle Untersuchungen des Schwindverhaltens angewandte Thermometer-Methode und die Ring-Methode scheinen praktisch anwendbar und liefern befriedigende Beurteilungsgrundlagen.

Für die Herstellung von Teilen aus RHB bzw. RHM ist es bedeutsam, eine richtige Auswahl aller am Verbund beteiligten Komponenten zu treffen und abzuwägen. Einerseits sind durch geeignete Härtung die Bildung von Eigenspannungen weitgehend zu vermeiden oder wieder abzubauen, und diese andererseits mit den Gesichtspunkten für eine wirtschaftliche Formteilfertigung abzustimmen.

3. Vorhandene Erkenntnisse

Von besonderer Bedeutung für den Einsatz dieser Werkstoffe ist das kurz nach der Verarbeitung einsetzende Schwinden dieser Systeme, welche aus relativ starren Zuschlägen und den für das Schwinden verantwortlichen duroplastisch vernetzten Harzen bestehen. Das Schwinden beruht auf der Volumenkontraktion, die bei der Vernetzung der Harze auftritt. Durch Füllung der Harze mit mineralischen Zuschlägen wird der Volumenschrumpf des Gesamtsystems reduziert. Die Füllstoffe beeinflussen aber auch die Aushärtung der Harze, da sie dem Harz Reaktionswärme entziehen und somit den zeitlichen Ablauf der Reaktion beeinflussen. Durch Inhomogenitäten, die bei der Abmischung der Systeme und durch unsymmetrische Erzeugnisgestalt entstehen können, treten zudem unterschiedliche Reaktionsabläufe auf, die wiederum ein unterschiedliches Schwindverhalten zur Folge haben.

Als maßgebende Einflußgrößen auf das Schwindverhalten gelten:

- das Gewichts- bzw. Volumenverhältnis Zuschlagstoff zu Harzmatrix,
- der Aufbau der Zuschlagstoffe,
- die Form der Zuschlagstoffe,
- die Harzart,
- der Aushärtegrad,
- der Härtungsverlauf und
- die Verarbeitungsbedingungen.

Der in der Fachliteratur diskutierte Zusammenhang zwischen linearer Schwindung und Volumenschwindung ist entsprechend zu berücksichtigen. Die lineare Schwindung wird gemäß DIN 53 464 bei duroplastischen Formmassen auch "Verarbeitungs-Schwindung" genannt, das während der Anwendung möglicherweise eintretende weitere Schwinden nennt man "Nachschwindung". Beide Beträge zusammen sind die "Gesamtschwindung".

Da bei den hier untersuchten Reaktionsharzen die Nachschwindung meistens vernachlässigbar klein ist, wird im folgenden i.a. von dem nach der Verarbeitung unmittelbar einsetzenden "Schwinden" gesprochen. Die Definition der Verarbeitungs- und der Nachschwindung hinsichtlich der Zeit nach Verarbeitungsbeginn fehlt bisher bei RHB und RHM, eine individuelle Festlegung wäre erwünscht.

In der Literatur sind einige Angaben über das Schwindverhalten verschiedener ungefüllter Reaktionsharzsysteme zu finden. Vornehmlich wird über das relativ geringe Schwinden von Epoxidharzen berichtet, obwohl das Schwindmaß anderer Harze größer und daher deren Problematik bedeutsamer ist. Vereinzelt wird auch über das Schwindverhalten gefüllter Kunstharze berichtet.

Von BOOS und HAUSCHILDT [1], KLÖKER [2], GROCHE [3] und LAWONN [4] wurde die Schwindung von UP-Harzen unter Berücksichtigung chemischer und physikalischer Gesichtspunkte untersucht. ROTH [5] befaßte sich mit der Schwindung ungefüllter und glasfaserverstärkter UP-Harze. Die in gefüllten EP-Harzen bei der Reaktion auftretenden Eigenspannungen wurden von JELLINEK [6] sowie von MENGES und Mitarbeiter [64] untersucht. MATTING und EHRENSTEIN [7] beobachten u.a. diese Eigenspannungen an glasfaserverstärkten EP- und UP-Harzen. Von JELLINEK [8] und TEEPE [9] liegen Beiträge zum Schwindverhalten von EP-Harzen in der ersten Reaktionsphase vor. RAUCH, PUNTIGAM und VÖLKER [10] beschreiben die Schwindvorgänge in Acrylharzen.

4. Untersuchung des Schwindverhaltens

4.1 Versuchsprogramm

Das Schwindverhalten von ungefüllten und gefüllten Reaktionsharzen auf Basis von UP, EP und MMA wurde unter Variation der Härtungsbedingungen untersucht. Mit einem normalen und einem schwindarmen UP-Harztyp wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt. An EP- und MMA-Harzen wurden ergänzende Untersuchungen vorgenommen.

In Tabelle 1 sind die verwendeten Harze und die angewandten Rezepturen angegeben. Die für die Testreihen herangezogenen Harztypen entsprechen in ihren Eigenschaften den in der praktischen Anwendung häufig vorkommenden Harzen. Bei der Auswahl des EP-Harzsystems wurde darauf Wert gelegt, möglichst große Unterschiede hinsichtlich des Schwindverhaltens zu erzielen. Da MMA-Harze in der Praxis als Konstruktionswerkstoff in geringeren Mengen als UP- und EP-Harze Anwendung finden, wurde nur eine typische Variante dieses Systems mit in die Untersuchungen einbezogen.

Weitere wesentliche Parameter sind die Art und Zusammensetzung der Füllstoffe sowie die Kombination mit den Harzsystemen.

Mit den in Tabelle 2 genannten Kornverteilungen wurden die in Tabelle 3 zusammengestellten Verbundsysteme, die zu Untersuchungen herangezogen wurden, erzeugt.

System	Harz	Härter	Beschleuniger	Zusätze
UP1	100 Gew.-% UP-Harz Vestopal 150 (Chem. Werke Hüls)	2 Gew.-% Dibenzoylperoxid BP-50-RP (Peroxid-Chemie)	1 Gew.-% Dimethylanilin AMB (Peroxid-Chemie)	7,5 Gew.-% Styrol (Chem. Werke Hüls)
UP2	100 Gew.-% UP-Harz Vestopal 400 (Chem. Werke Hüls)	2 Gew.-% Dibenzoylperoxid BP-50-RP (Peroxid-Chemie)	1 Gew.-% Dimethylanilin (Peroxid-Chemie)	7,5 Gew.-% Styrol (Chem. Werke Hüls)
EP	100 Gew.-% EP-Harz Rütapox 0166/S20 (Bakelite GmbH)	53 Gew.-% Polyamidhärter MF 250 (Bakelite GmbH)	-	-
MMA	100 Gew.-% MMA-Harz Silikal 1017 M (Ducalin Kunststoffe)	15 Gew.-% Silikal 1007 P (Ducalin Kunststoffe)	-	-

Tabelle 1: Untersuchte Harzsysteme

		Korngröße in mm						
	Sieblinie	bis 0,063	0,125-0,25	0,25-0,5	0,5-1,0	1,0-2,0	2,0-4,0	4,0-8,0
	a	-	7	10	10	20	27	26
Anteile am Gesamt-	b	-	7	10	10	20	27	26
Zuschlag in Gew.-%	c	-	21	40	39	-	-	-
	d	24	8	10	10	10	19	19
	e	24	8	10	10	10	19	19

Tabelle 2: Kornverteilung der Zuschläge

Verbundsystem	Harzsystem	Füllstoffgehalt	Füllstoffart	Sieblinie	Zusätze
I	UP1	89 Gew.-%	Quarz-Rundkorn	a	-
II	UP1	89 Gew.-%	Quarz-Splitt	b	-
III	UP1	89 Gew.-%	Quarz-Ausfallkorn	c	-
IV	UP2	89 Gew.-%	Quarz-Rundkorn	a	-
V	UP2	89 Gew.-%	Quarz-Splitt	b	-
VI	EP	89 Gew.-%	Quarz-Rundkorn	a	-
VII	EP	89 Gew.-%	Quarz-Splitt	b	-
VIII	MMA	89 Gew.-%	Quarz-Rundkorn	d	Juralin-Kreide
IX	MMA	89 Gew.-%	Quarz-Splitt	e	Juralin-Kreide

Tabelle 3: Untersuchte Verbundsysteme

4.2 Beschreibung der Verbundsystem-Komponenten

4.2.1 Harzsysteme

4.2.1.1 UP-Harz

Ungesättigte Polyesterharze (UP) sind Lösungen ungesättigter Polyestermoleküle in polymerisierbaren Monomeren, die durch eine radikalisch eingeleitete Copolymerisation zu einer festen Substanz werden. Für die Kalthärtung von UP-Harzen verwendet man zusätzlich zum Härter Beschleuniger, mit deren Hilfe der Zerfall der Peroxide ohne Temperaturzufuhr einsetzt. Durch Variation der Härtungssysteme und der Menge der Reaktionspartner kann die Reaktionsgeschwindigkeit bei verschiedenen Umgebungstemperaturen gesteuert werden.

Die Reaktionsvorgänge wurden bereits vielfach u.a. auch in [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18] und [20] beschrieben. Der Reaktionsprozeß läuft nach DEMMLER und Mitarbeitern [18] dabei folgendermaßen ab:

Zu Beginn der Härtungsreaktion entstehen statistisch verteilt Radikale, die die Copolymerisation starten. Daraufhin bilden sich lose Knäuel (bis zu 1000 Å groß, die schließlich ein weitmaschiges Gel bilden. Im weiteren Verlauf der Copolymerisation ziehen sich die Knäuel stark zusammen (ca. 300 Å), wobei noch nicht eingebautes Material herausgequetscht wird. Anschließend wachsen die Knäuel dadurch, daß vernetztes Material von außen angebaut wird, und gleichzeitig entstehen neue Knäuel aufgrund weiterer Bildung von Radikalen. Diese neuen Knäuel werden wahrscheinlich nicht mehr so groß wie die anfangs entstandenen, da nunmehr weniger polymerisierbares Material vorhanden ist.

Diese mehr oder weniger großen Knäuel werden durch weniger dicht vernetztes Material zusammengehalten, den sogenannten interpartikulären Bereich, die am Ende der Aushärtung in der Größenordnung von unter 50 Å vorliegen. Das Restmonomere befindet sich hauptsächlich in diesen Zwischenbereichen, in denen sich die Nachhärtungsreaktionen vornehmlich abspielen. Das heißt, die Veränderungen der verschiedenen Eigenschaften, die wir im Laufe der Aushärtezeit feststellten, sind in erster Näherung auf Vorgänge in diesen Zwischenbereichen zurückzuführen. Hierbei vernetzt das Material dort stärker und wird teilweise noch auf die Knäuel aufgebaut.

Während dieser in Bild 1 schematisch dargestellten Vorgänge reduziert sich das Volumen des Harzes sowohl im sogenannten interpartikulären Bereich als auch in den stärker vernetzten Knäueln. In den Knäueln spielt sich dabei vornehmlich ein Großteil des Reaktionsschwindens ab, wogegen in den interpartikulären Bereichen die für das sogenannte Nachschwinden verantwortliche Kontraktion stattfindet. Von ROTH [5] wurden weitere Modelle, die das physikalisch bedingte Schwinden der UP-Harze erklären, beschrieben.

Beide verwendeten UP-Harze entsprechen dem DIN-Typ 1140 nach DIN 16 946 [19], [20]. Beim UP-Harz Vestopal 150 handelt es sich um ein hochreaktives Harz mit hoher Wärmeformbeständigkeit [21]. Dieses Harz kann zu den Normaltypen gezählt werden und wurde ausgewählt, um das Schwindverhalten dieser relativ häufig für Reaktionsharzbeton und Reaktionsharzmörtel angewandten Harztype zu erfassen.

Das UP-Harz Vestopal 400 ist ein an der Luft klebfrei aushärtendes Harz mit hoher Wärmeformbeständigkeit und niedrigem Volumenschrumpf [22]. Wegen der geringen Volumenschrumpfung wird dieser Harztyp für maßgenaue RHB- und RHM-Erzeugnisse bevorzugt verwendet.

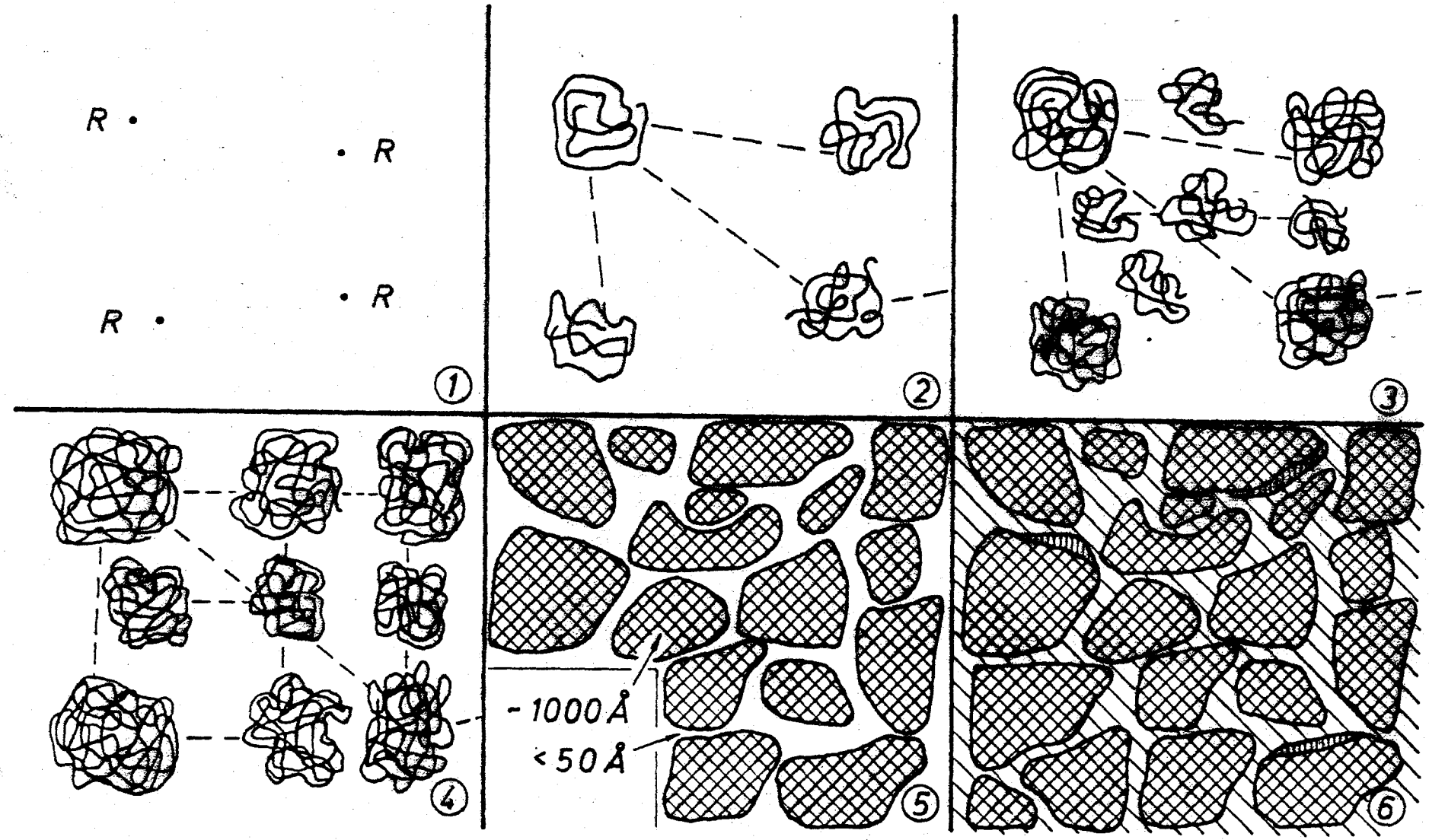


Bild 1: Verlauf der Härtung von UP-Harzen, schematisch
R = Radikal (nach Demmler)

4.2.1.2 EP-Harz

Epoxidharze (EP) sind Produkte, die durch die Reaktion von Diphenolen oder Dialkoholen mit Epichlorhidrin entstehen und durch geeignete Härter vernetzt werden.

Das hier angewandte System ist in die in DIN 16 946 [19] angegebenen Systeme einzuordnen.

Bei dem in die Untersuchungen mit einbezogenen Epoxidharz findet zunächst eine Kondensation der Ausgangsstoffe Bisphenol A und Epichlorhydrin statt (Polykondensation). Der Epoxiring am Ende des Epichlorhydrins bleibt auch nach der Verbindung mit dem Bisphenol A erhalten und ist maßgebend für die Reaktionsfähigkeit des Harzes. Durch die Zugabe von Härtern wird der Epoxiring aufgelöst und ist Ausgangspunkt für das Kettenwachstum. Der Härtungsvorgang findet durch Polyaddition statt, da sich Harz- und Härtermoleküle addieren. Dies wirkt sich auf die Aushärtung vorteilhaft aus, weil die Reaktion meist schon bei Raumtemperatur sehr rasch und ohne wesentliche Schwinderscheinungen abläuft. Abhängig vom Härtertyp wird dabei die Wärmeentwicklung bei der Polyaddition beschleunigt.

Bei der gewählten Amidhärtung verläuft die Reaktion bei gleichzeitig geringer Wärmeentwicklung relativ langsam. Die Vernetzung ist verhältnismäßig schwach, wobei sich der Schrumpfvorgang über längere Zeiträume erstreckt. Die Produkte sind entsprechend der schwachen Vernetzung zäh und flexibel. Der chemische Reaktionsvorgang ist z.B. in [23], [51] und [52] ausführlich beschrieben.

Das verwendete Harz Rütapox 0166/S20 ist ein 100 % reaktives, niedrigviskoses Harz und verhält sich mit dem gewählten Amidhärter MF 250 mittelreaktiv bei einer für Epoxidharze verhältnismäßig hohen Schwindung [24].

4.2.1.3 MMA-Harz

Methacrylat-Gießharze (MMA) gehen durch radikalisch initierte Polymerisation vom flüssigen in den festen Zustand über. Bei der Kalthärtung ist wie bei den UP-Harzen (außer den Peroxiden) der Zusatz eines Aktivators nötig, der den Reaktionsstart ohne Temperaturzufuhr ermöglicht.

Die Startreaktion für eine radikalische Polymerisation verläuft in zwei Stufen:

- Bildung eines Radikals und
- Addition des ersten Monomermoleküls an ein Radikal.

Die Geschwindigkeit der Startreaktion ist dabei abhängig von der Menge der zum Start befähigten Radikale, von der Temperatur und von der Löslichkeit. Die Wachstumsreaktion besteht aus einer in sehr rascher Folge ablaufenden Addition von Monomer-Molekülen an das Radikal. Die Abbruchreaktion bei der radikalischen Polymerisation beruht auf der Tendenz der Radikale, sich gegenseitig zu gesättigten bzw. mit inaktiven Verbindungen zu vereinen [10], [25].

Das verwendete Harzsystem ist in DIN 16 946 einzugruppieren und besteht aus einer niedrigviskosen polymerisierbaren Monomerflüssigkeit und einem pulverförmigen Copolymerisat in Verbindung mit einem Peroxid-Beschleuniger [26], [27].

Bei der Auswahl des Reaktionsharzsystemes wurde auf die praktische Anwendbarkeit und die damit verbundenen Erfahrungen abgezielt.

4.2.2 Zuschlagstoffe

Als Zuschlagstoffe wurden mit Ausnahme der Systeme VIII und IX (siehe Tabelle 3) nur Quarzprodukte aus ein und derselben Fundstelle verwendet. Damit waren vergleichende Untersuchungen, ohne besondere Einflüsse des Zuschlagstoffes berücksichtigen zu müssen, möglich. Bei den MMA-Harzbetonen war der Zusatz von Juralin-Kreide erforderlich, um ein Absinken der verhältnismäßig schweren Zuschläge im niedrigviskosen Harzsystem zu verhindern. Die Juralin-Kreide-Zusätze ermöglichen einen gewissen Toxitropiereffekt, ohne besondere Einflüsse auf das Reaktionsverhalten zu nehmen.

Bei der Auswahl der Zuschlagform wurden die beiden in der Praxis vorkommenden Extreme Rundkorn und Splitt berücksichtigt, da eine Beeinträchtigung des Schwindverhaltens und der mechanischen Eigenschaften der Reaktionsharzbetone und Reaktionsharzmörtel durch die Korngeometrie zu erwarten war. Stichprobenartig wurde Ausfallkorn in die Versuchsreihe einbezogen.

Auf die Untersuchung weiterer Zuschläge unterschiedlicher Korngeometrie innerhalb eines Systems wurde zugunsten besserer Interpretation der Meßergebnisse verzichtet.

Der Kornaufbau der verwendeten Zuschlaggemische ist in Tabelle 2 angegeben. Außerdem sind die Sieblinien in Bild 2 im Vergleich zu den in DIN 1045 [28], DIN 4226 [29] und DIN 66 141 [30] genannten Grenzsieblinien aufgezeichnet.

Die gewählte Kornverteilung weicht zum Teil von den Grenzsieblinien ab, wurde aber dennoch beibehalten, da sich dieser Aufbau bei den Vorversuchen als günstig erwies.

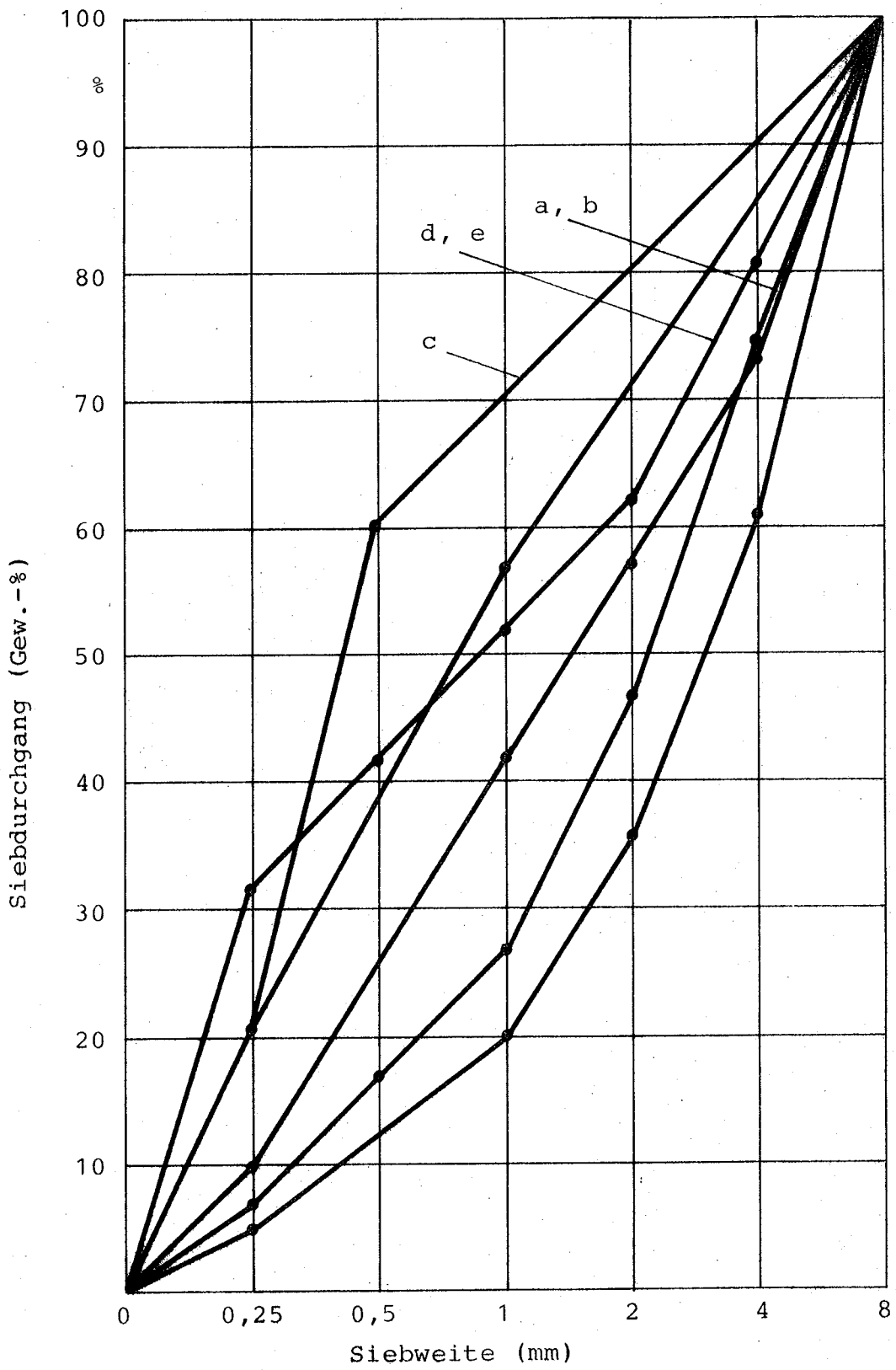


Bild 2: Sieblinien der untersuchten Zuschläge

4.3 Orientierende Vorversuche

Um eine Basis für die Untersuchungen an allen vorgesehenen Verbundsystemen zu schaffen, wurden Vorversuche unternommen. Bei den Vorversuchen wurde vor allem darauf abgezielt, für die jeweiligen Harzsysteme eine optimale Zuschlagverteilung zu finden. Hierbei war es besonders bedeutsam, der Viskosität der Harzsysteme und der damit einhergehenden Verarbeitbarkeit der Reaktionsharz/Zuschlag-Gemische Rechnung zu tragen. Ferner sollte durch die Vorversuche der Zuschlaganteil, der für alle Bindemittelsysteme gleichermaßen anwendbar ist, ermittelt werden. Ein wesentliches Kriterium, dem die Vorversuche galten, war die Festlegung von Verbundsystemen, die mit den bisher angewendeten Meßmethoden prüfbar waren.

4.3.1 Untersuchung der Verarbeitbarkeit

Mit dem vorgesehenen Harzsystemen wurden Mischungen unter Berücksichtigung gleichbleibender praktikabler Arbeitsbedingungen, d.h. leichter Dosierbarkeit bei manuellen Mischvorgängen, ausreichender Verarbeitungszeit (Gelierzeit mind. 10 min) und guter Verdichtungsmöglichkeit, angefertigt. Im Vordergrund stand dabei, mit möglichst geringem Harzanteil einen nahezu homogenen und fehlerfreien Verbundwerkstoff mit brauchbaren Eigenschaften herzustellen.

Aufgrund der relativ hohen Viskosität der UP-Harze war es ohne Styrolzusätze nicht möglich, mit vergleichbar geringem Harzanteil eine ähnlich gute Verdichtung wie bei EP- und MMA-Harz zu erzeugen. Durch Zugabe von 7,5 Gew.-% Styrol, bezogen auf den Harzanteil, konnte bei beiden UP-Harzsystemen eine ausreichend gute Einbindung der Zusätze erreicht werden.

Das EP-Harzsystem war in der ursprünglich vorgesehenen Version anwendbar, wodurch keinerlei Modifikation des Verbundsystems notwendig war.

Bei der Verwendung des MMA-Harzes als Bindemittel hingegen war es nötig, den Feinkornanteil in Form von Juralin-Kreide zu erhöhen, um eine tixotrope Einstellung des Bindemittel/Zuschlag-Gemisches zu erreichen und damit ein Absinken der Grobfüllstoffe zu verhindern. Zugunsten dieses Effektes wurden bei den Sieblinien d und e die Anteile der Korngruppen 1,0 mm bis 8,0 mm reduziert. Die mechanischen Eigenschaften wurden dadurch jedoch kaum verändert.

4.3.2 Untersuchung des Kurzzeit-Biegeverhaltens

Neben der Verarbeitbarkeit wurde das Verhalten thermisch nachbehandelter Reaktionsharzbetone bei einer Kurzzeit-Biegebeanspruchung als Vergleichskriterium herangezogen. Insbesondere wurde darauf geachtet, vertretbare Unterschiede des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens und eine ähnliche Biegefestigkeit zu erreichen.

Zu diesem Zweck wurden an je 3 Probekörpern der Verbundsysteme I, II, III, VI und VIII Dreipunkt-Biegeversuche in Anlehnung an DIN 53 452 [31] bei Normalklima 23/50-2 DIN 50 014 [32] durchgeführt. Um Einflüsse verschiedener Aushärtezustände auszuschließen, wurden die Probekörper der Abmessungen 300 mm x 60 mm x 30 mm 8 Stunden nach der Reaktionsharzbeton-Herstellung über 24 Stunden bei 60 °C getempert.

Da die bei der Untersuchung der Verarbeitbarkeit ermittelte Kombination auch hinsichtlich des Kurzzeit-Biegeverhaltens befriedigende Resultate zeigten, wurden keine weiteren Optimierungsmaßnahmen ergriffen. Als wesentliches Vergleichskriterium wurden die Spannungs-Dehnungs-Linien aus dem Dreipunkt-Biegeversuch herangezogen.

4.4 Auswahl und Beschreibung der Meßmethoden

4.4.1 Methoden zur Untersuchung des Schwindverhaltens

Dem gesetzten Ziel zufolge bestanden Bestrebungen, Meßmethoden für die Untersuchungen heranzuziehen, welche die Erfassung des reaktionsabhängigen Schwindens der ungefüllten und der gefüllten Harzsysteme mit vertretbarem Aufwand ermöglichen.

Zusätzlich zum bereits in der Zementbeton-Industrie bekannten und angewandten Verfahren, mit dem das lineare Schwindmaß erfaßt wird, sollten weitere Meßmethoden entwickelt bzw. aus ähnlichen Problemstellungen übernommen und entsprechend geändert werden.

4.4.1.1 Dichtemessungen

Für die Ermittlung des Reaktionsschwindens an ungefüllten Harzsystemen bot sich das bereits eingeführte und u.a. in der "Richtlinie für die Kennwertbestimmung, Zulassungsprüfung und Güteüberwachung von RHM und RHB für zulassungspflichtige Anwendungen" des IfBt [33] und in DIN 16 945 Blatt 1 [34] empfohlenen Verfahren der Dichtemessung an.

Da die untersuchten Reaktionsharzmassen bei Raumtemperatur bereits beim Mischvorgang zu reagieren beginnen, gestaltet sich die Bestimmung der Dichte noch nicht reagierender Reaktionsharzmassen schwierig. Deshalb wurde die Dichte der einzelnen Reaktionskomponenten nach DIN 53 479 Verfahren B ermittelt und die Dichte im Zeitpunkt des Zusammenmischens der Komponenten nach folgender Gleichung berechnet:

$$\varrho_o = \frac{(m_A + m_B) \cdot \varrho_A \cdot \varrho_B}{m_A \cdot \varrho_B + m_B \cdot \varrho_A} \qquad (1)$$

Hierbei bedeuten m_A die Masse und ϱ_A die Dichte der Harzkomponente sowie m_B un ϱ_B die Masse und die Dichte der Härterkomponente. Unter m_A und ϱ_A sind bei UP- und bei MMA-Harz das bereits mit Beschleuniger vermischte Harz zu verstehen.

Nach Ablauf der Härtungszeit und im weiteren Verlauf der Nachreaktion wurde an eigens dafür hergestellten Probekörpern der Abmessungen 40 mm x 40 mm x 5 mm die Dichte ϱ_t nach DIN 53 479 Verfahren A bei 20°C bestimmt. Die Volumenschwindung wurde nach der Formel

$$S_{V\varrho(t)} = \frac{\varrho_t - \varrho_o}{\varrho_t} \cdot 100\ \% \qquad (2)$$

berechnet, wobei $S_{V\varrho(t)}$ und ϱ_t der jeweiligen Aushärtezeit zuzuordnen sind.

Untersuchungen des linearen Schwindmaßes sind an ungefüllten Harzsystemen, die für RHB und RHM verwendet werden, weniger interessant, da diese Größen vom Zuschlagsystem und von der Erzeugnisgeometrie entscheidend abhängen.

4.4.1.2 Prismenmethode

Ein Verfahren zur Bestimmung des linearen Schwindmaßes gefüllter Harzsysteme ist ebenfalls in der o.g. Richtlinie des IfBt vorgeschlagen. Diese Methode ist identisch mit dem in der Zementbeton-Industrie üblichen Meßprinzip der Längenänderungsmessung an Prismen.

In eine zerlegbare, einseitig offene Stahlform für drei Rechteckprismen der Abmessungen 800 mm x 90 mm x 40 mm wird die zu untersuchende Substanz gefüllt und verdichtet.

Vor dem Einbringen des Materials werden in Bohrungen, die jeweils mittig an beiden Prismen stirnseitig in der Stahlform angeordnet sind, 18 mm lange Meßzäpfchen so eingesetzt und fixiert, daß sie 10 mm in die Form ragen. Nach Beenden des Füll- und Verdichtungsvorganges werden die Meßzäpfchen aus ihrer Fixierung gelöst und können sich dann frei in Längsrichtung mit den schwindenden Prismen bewegen. Mit Hilfe von Meßuhren mit 1/100 mm Teilung kann in einer geeigneten Vorrichtung die Längenänderung gemessen werden; Bild 3 zeigt die Versuchsanordnung.

Obwohl die glatten Forminnenseiten üblicherweise mit entsprechendem aufgesprühtem Trennmittel zu versehen sind, können gewisse Reibungs- bzw. Klebeffekte zwischen Form und RHB bzw. RHM auftreten. Um den Einfluß dieser Effekte zu erfassen, wurden stichprobenartig zusätzlich zu Trennmitteln auf Silikonbasis Trennfolien verwendet. Die Prismenlänge wurde bewußt relativ groß (800 mm lang) gewählt, damit die Längenänderung schwindarmer Systeme im Rahmen der Meßgenauigkeit noch zweifelsfreie meßbare Maße annahm.

Die unbehinderte lineare Schwindung läßt sich errechnen nach der Formel:

$$S_L = \frac{\Delta l}{l_o} \cdot 100\ \% \qquad (3)$$

L_o = ursprüngliche Prismenlänge
Δl = Längenänderung

4.4.1.3 Ringmethode

Die Ringmethode wurde in ähnlicher Weise beriets in [5], [18], [19], [54] und [64] angewandt.

Bei der sogenannten Rongmethode wird der RHB bzw. RHM sofort nach dem letzten Mischvorgang zwischen zwei Ringe unterschiedlicher Durchmesser gegossen und verdichtet.

Der Außenring kann dabei, abgesehen von der Ringhöhe und vom Innendurchmesser, beliebig gewählt werden. Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß der Ring so steif ist, daß er beim Befüllvorgang keine Deformation erfährt, die er später wieder an den RHB bzw. RHM und u.U. auf den Innenring überträgt.

Der Innenring soll aus einem Werkstoff mit bekanntem oder eindeutig bestimmbarem Elastizitäts- und Temperaturverhalten gefertigt werden. Nach Vorversuchen mit Innenringen aus verschiedenen Werkstoffen stellte sich heraus, daß sich Stahl als Werkstoff für den Innenring gut eignet. Für die Fertigung der Innen- und Außenringe wurde deshalb Stahl St 60 verwendet, wobei der Außenring im Vergleich zum Innenring verhältnismäßig dick ausgeführt war. Die Abmessungen der kreisrund gedrehten Ringe sind Bild 4 zu entnehmen.

An der Innenseite des Innenringes wurden auf halber Ringhöhe an gleichmäßig auf den Umfang verteilten Stellen Dehnungsmeßstreifen (DMS) mit 20 mm Meßgitterlänge appliziert. Mittels der DMS können die Dehnungen bzw. Stauchungen des Innenringes, die infolge des Aufschrumpfens des RHB entstehen, gemessen und als Funktion der Versuchszeit aufgezeichnet werden. Die Übertragung der Reaktionswärme auf den Innenring muß entsprechend kompensiert bzw. bei der Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse beachtet werden.

Während der Vorversuche wurde festgestellt, daß der Elastizitätsmodul des Stahlringes bei der auftretenden Temperaturänderung praktisch konstant bleibt. Die Werkstoffdehnungen sind dabei so gering, daß ein Kriecheffekt des Stahlringes während der Versuchsdauer nicht zu befürchten ist.

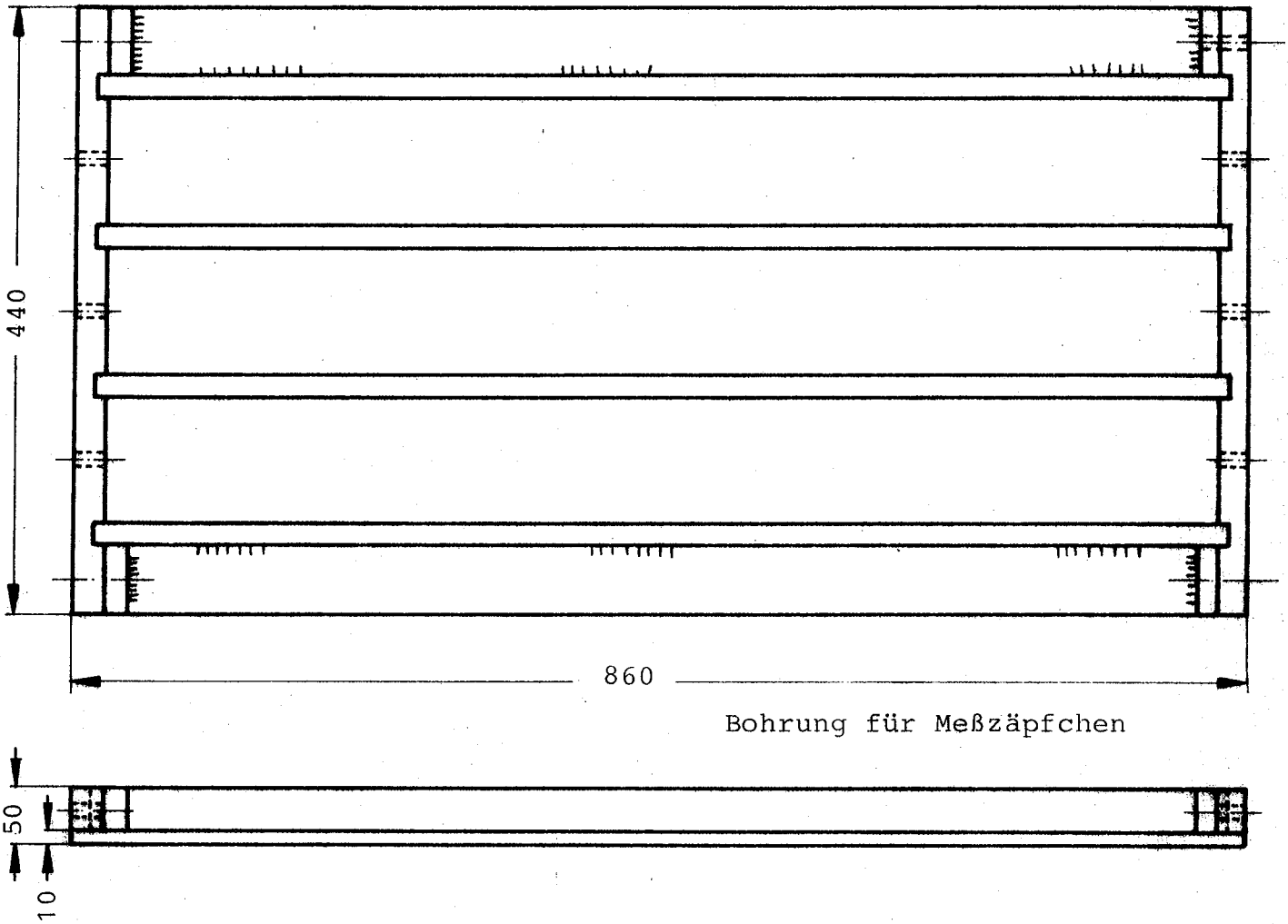


Bild 3: Versuchsvorrichtung für die Prismenmethode

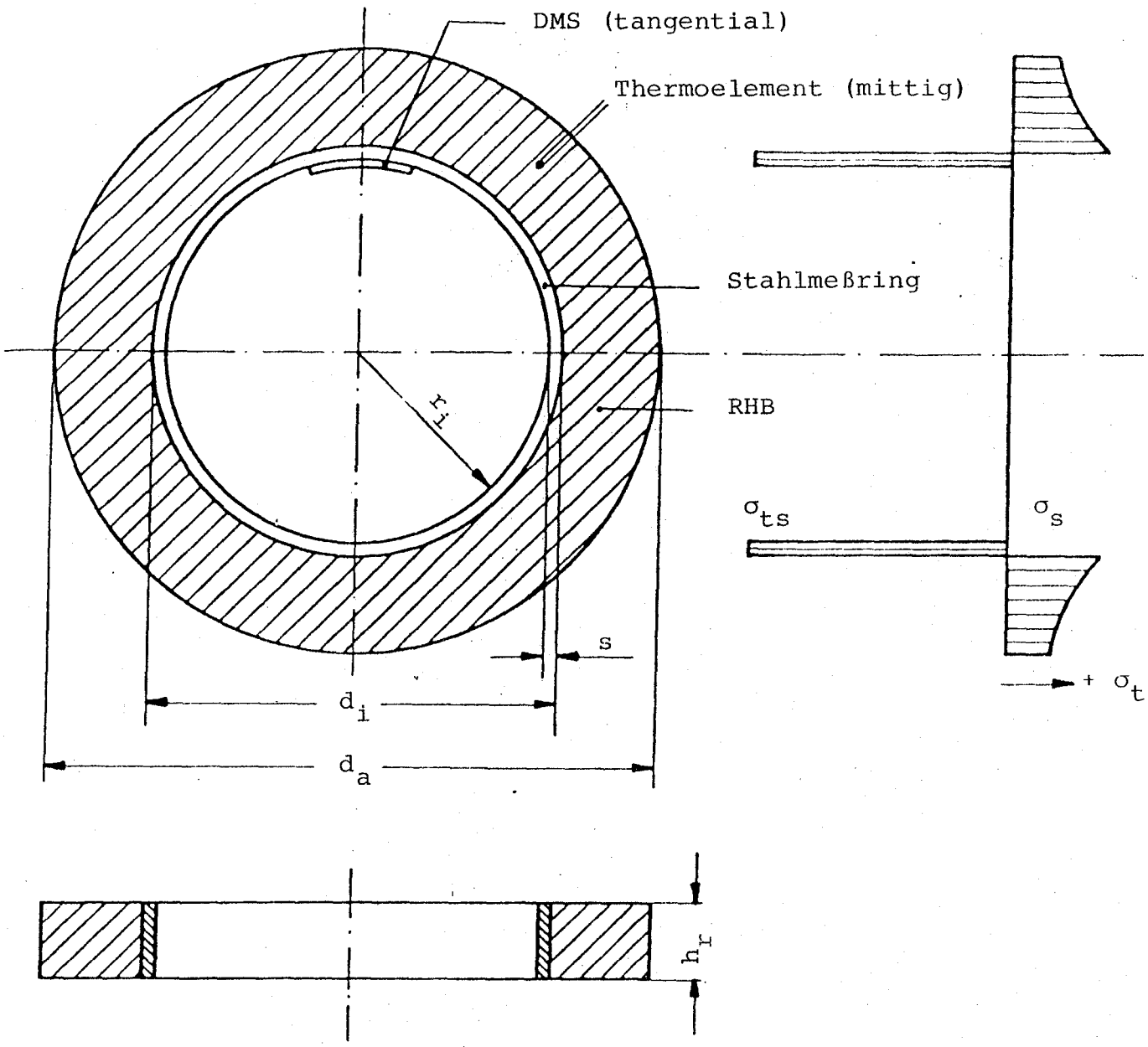


Bild 4: Versuchsvorrichtung für die Ringmethode

Unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse der Versuchsanordnung, der Eigenschaften des Innenringes und des RHB bzw. RHM lassen sich der radiale Schwindungsdruck und die tangentiale Schwindungsspannung errechnen [7], [36]. Die mathematischen Beziehungen hierzu sind in Abschnitt 5.2.2 ausführlich erläutert.

4.4.1.4 Thermometer-Methode

Mit Hilfe der Thermometer-Methode werden ähnlich wie bei der Ringmethode Schwindungsdrücke ermittelt. BOSS und HAUSCHILDT [1] sowie ROTH [5] bedienten sich in ihren Untersuchungen ebenfalls des Temperatur-Druck-Verhaltens des Quecksilbers.

Für die Untersuchungen des Schwindverhaltens wurden Quecksilber-Thermometer mit einem Meßbereich von 0°C bis 100°C und mit einer Meßgenauigkeit von 0,1°C verwendet. Für jedes Thermometer wurde bei konstanter Temperatur eine Druckeichkurve angefertigt. Dabei wurde das Quecksilberreservoir der Thermometer in eine Vorrichtung eingesetzt und unter gleichen Voraussetzungen wie bei der Schwindungsmessung mit Flüssigkeitsdruck beaufschlagt. Der exakt meßbare Druck wurde stufenweise erhöht und jeweils der Anzeige in der Quecksilberkapillare des Thermometers zugeordnet. Aus dem Verhältnis des aufgebrachten Druckes zur Thermometeranzeige läßt sich eine im hier angewandten Bereich lineare Eichkurve erstellen.

Die Eichkurven gelten jeweils nur für das geeichte Thermometer, da sich die Quecksilberreservoire zwar nur geringfügig unterscheiden, aber dennoch ein verschiedenes Druckverhalten verursachen.

Das Quecksilberreservoir der so geeichten Thermometer wurde sofort nach dem Verdichten im RHB bzw. RHM, der zuvor gemischt und in eine Plattenform gefüllt wurde, getaucht. Im Abstand von 10 mm wurde neben dem Thermometer ein Fe-Konstantan-Thermoelement plaziert; Bild 5 zeigt die Versuchsanordnung.

Nachdem sich das Thermometer dem Temperaturzustand der Matrix angepaßt hat - ca. 30 Sekunden nach dem Eintauchen -, wurde die als Nullwert geltende Höhe der Quecksilbersäule abgelesen. In regelmäßigen Zeitabständen wurde die Ablesung wiederholt, wobei gleichzeitig die Registrierung der Reaktionstemperatur über das Thermoelement erfolgte.

Subtrahiert man die mit dem Thermoelement gemessene Reaktionstemperatur zur Zeit t von der Thermometeranzeige gleicher Zeit, so erhält man einen Wert, der mittels der Eichkurve in einen Druckwert umgerechnet werden kann. Dieser Druckwert ist gleichzusetzen mit dem Druck, der auf einen eingegossenen Körper wirkt. Eine Erklärung der mathematischen Auswertung erfolgt in Abschnitt 5.2.3.

4.4.1.5 Sensor-Methode

Anhand der Sensor-Methode wurde versucht, das räumliche Schwindverhalten von RHB und RHM über Schwindspannungen, die auf einen eingebetteten Würfelkörper wirken, zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden in umfassenden Vorversuchen geeignete Prüfeinrichtungen entwickelt und erprobt.

Als anwendbar erwies sich die Einbettung mit DMS beklebter Phenolharzmörtel, deren Elastizitäts- und Temperaturverhalten eichbar ist. Bei der Auswahl des Würfelwerk-

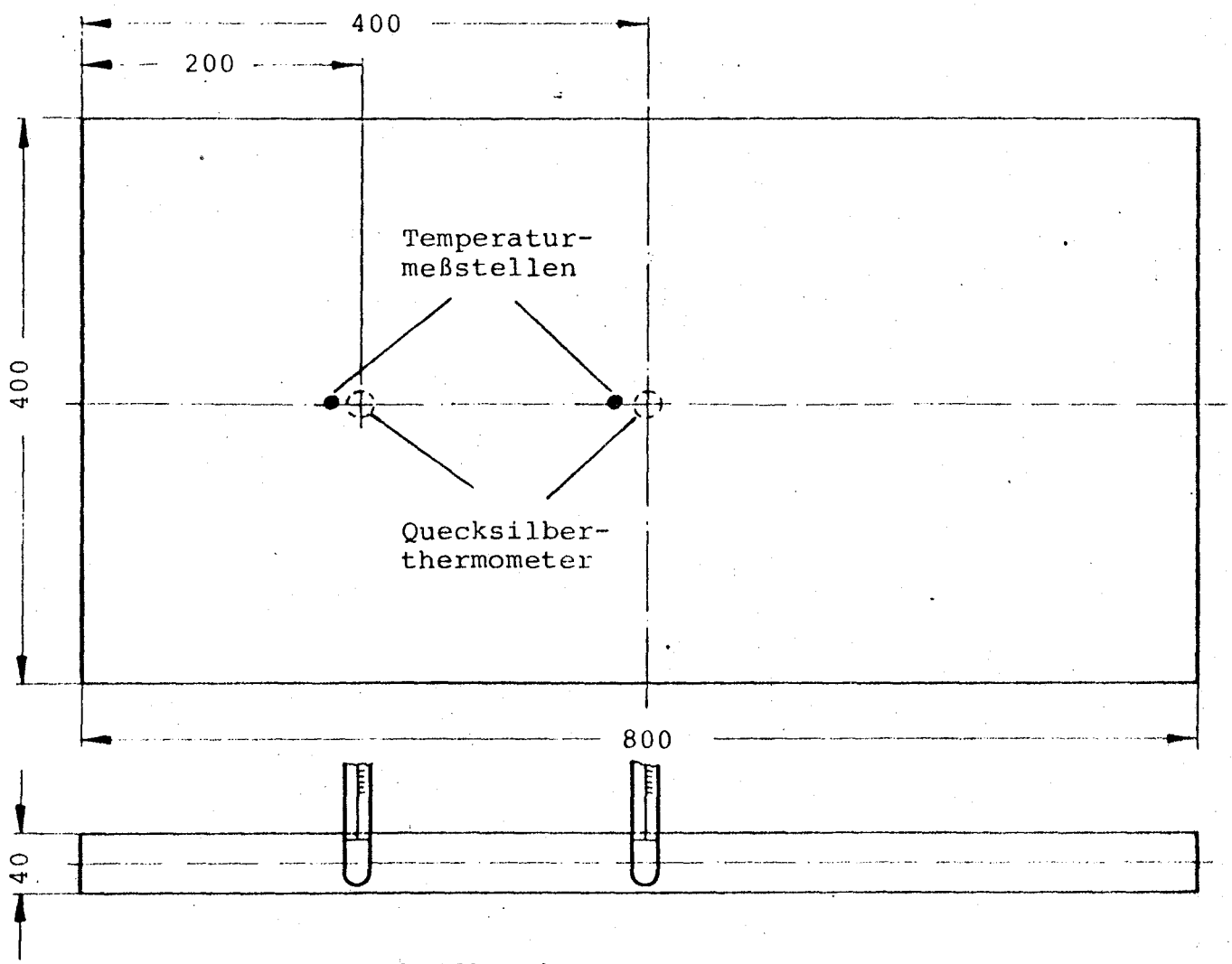


Bild 5: Versuchsanordnung bei der Thermometer-Methode

stoffes fiel die Entscheidung auf den spanend gut bearbeitbaren Phenolharz-Typ 51 nach DIN 7708 [37], da der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α dem des ausgehärteten RHB bzw. RHM ähnlich ist und da der Elastizitätsmodul bei gleichzeitig guter Temperaturstabilität verhältnismäßig niedrig ist. Der niedrige Elastizitätsmodul ist erforderlich, um bei geringen auf den Würfel wirkenden Schwindspannungen relativ große Würfelstauchungen zu erhalten.

Die allseitig plangefrästen Würfel mit einer Kantenlänge von 10 mm wurden an zwei gegenüberliegenden Seiten mittels eines dünnschichtigen, schnellhärtenden Einkomponenten-Klebstoffes mit biaxial messenden 2-Meßgitter-DMS beklebt. In einer speziell konstruierten Eichvorrichtung konnte das Elastizitäts- und Temperaturverhalten der präparierten Würfel ermittelt werden. Dabei wurden die Würfel auf den vier nicht mit DMS versehenen Seiten mit Druck beaufschlagt, so daß sich im Würfel ein zweiachsiger Spannungszustand einstellte. Das Druck-Verformungsverhalten der Würfel wurde bei verschiedenen, bei der Reaktion des RHB bzw. RHM auftretenden Temperaturen bestimmt.

Die so vorbereiteten Sensoren waren für die Messungen der während der Reaktion eintretenden Schwindspannungen in den RHB bzw. RHM eingießbar. Die DMS waren zum Schutz gegen Füllstoffkörner mit einer ca. 1 mm dicken Moosgummischicht abgedeckt; Bild 6 zeigt schematisch den Aufbau eines Sensors.

In eine melaminharzbeschichtete Holzform wurden Platten der Abmessungen 800 mm x 300 mm x 40 mm gegossen. In halber Plattenhöhe über dem Formboden war je ein Sensor

in der Mitte und bei einem Viertel der Plattenlängsachse angeordnet. Unmittelbar neben den Sensoren befanden sich Fe-Konstantan-Thermoelemente zur Messung der Reaktionstemperaturen in Sensornähe. Die Versuchsanordnung ist in Bild 7 dargestellt.

Mittels geeigneter Trägerfrequenzverstärker und Registriergeräte konnten die Verformungen des Würfels und die Temperatur in Würfelnähe während und nach der Reaktionsphase aufgezeichnet werden.

Die physikalischen und mathematischen Beziehungen zur Berechnung der Schwindspannungen sind in Abschnitt 5.2.4 erläutert.

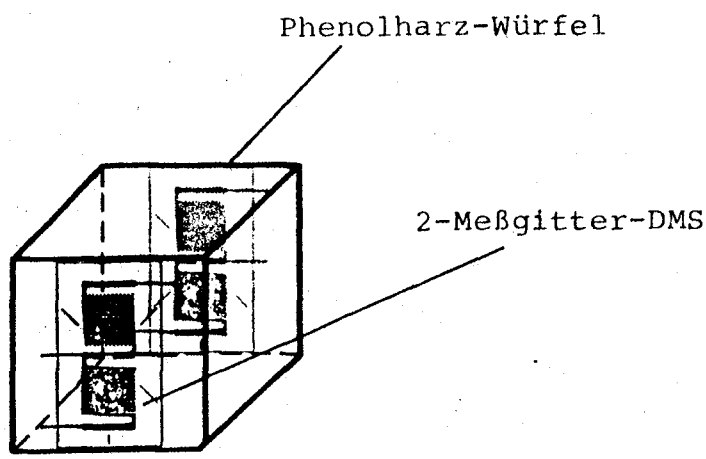


Bild 6: Schematische Darstellung des Meßsensors

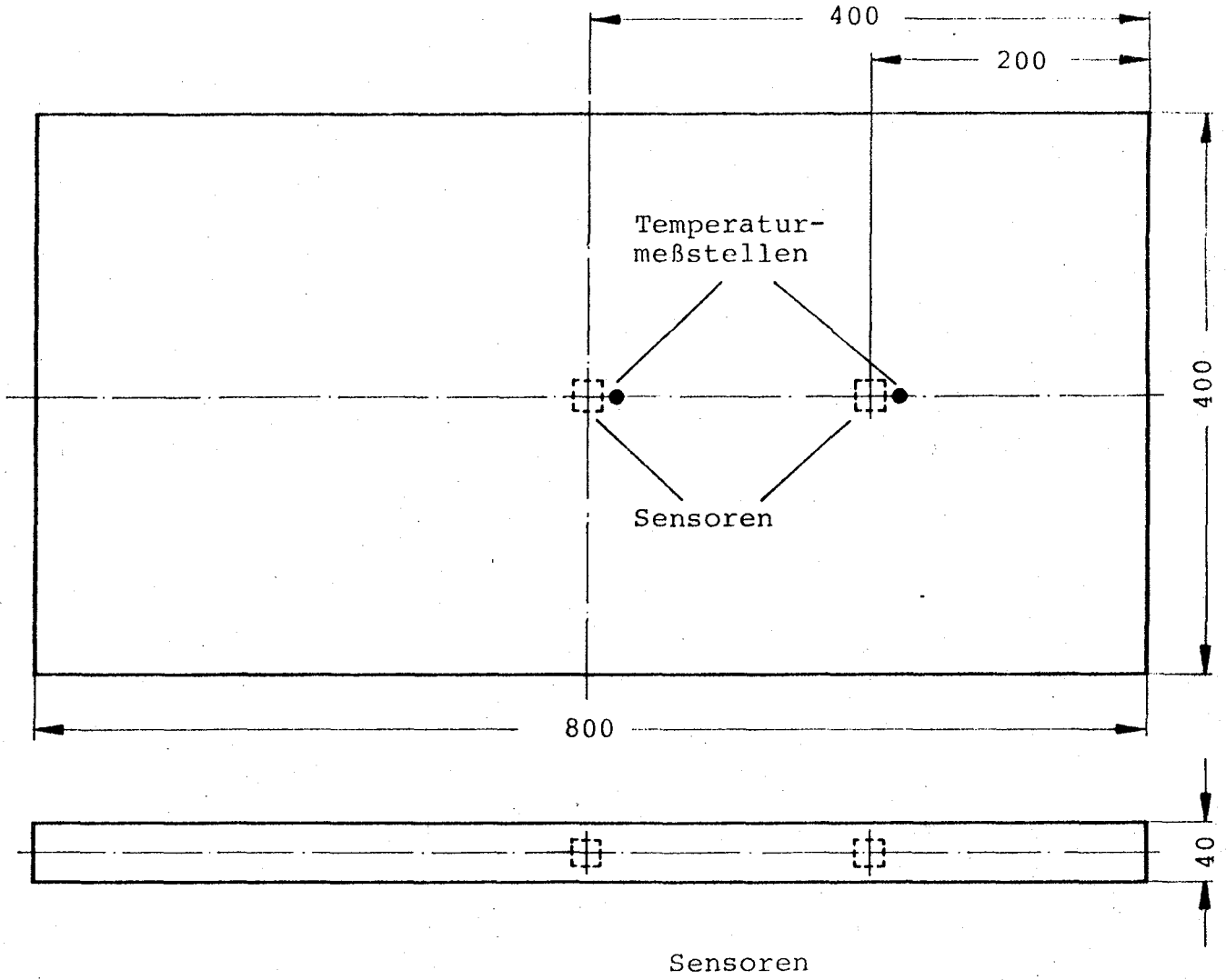


Bild 7: Versuchsanordnung bei der Sensor-Methode

4.4.2 Methoden zur Untersuchung des mechanischen Kurzzeit- und Langzeitverhaltens

4.4.2.1 Kurzzeit-Zugversuche an ungefüllten Reaktionsharzsystemen

Die Kurzzeit-Zugversuche wurden in Anlehnung an DIN 53 455 und DIN 53 457 bei Normalklima 23/50-2 an Probekörpern aus ungefüllten Reaktionsharzen durchgeführt. Die Probekörper wurden spanend aus 4 mm dicken gegossenen Platten herausgearbeitet. Die Prüfgeschwindigkeit wurde so gewählt, daß sich eine Dehnungsgeschwindigkeit von 1 %/min ergab. Die Dehnungen wurden mittels eines induktiven Meßsystems erfaßt und als Funktion der Kraft aufgezeichnet. Ermittelt wurden die Zugfestigkeit und der Elastizitätsmodul.

4.4.2.2 Kurzzeit-Biegeversuche an ungefüllten Reaktionsharzsystemen

Doe Kurzzeit-Biegeversuche an ungefülltem Reaktionsharz wurden im 3-Punkt-Verfahren nach DIN 53 452 bei Normalklima 23/50-2 vorgenommen. Die Probekörper entstammten 4 mm dicken gegossenen Platten. Die Prüfgeschwindigkeit wurde so gewählt, daß sich für die Randfaser eine rechnerische Dehnungsgeschwindigkeit von 1 %/min einstellte. Die Durchbiegungen wurden mittels eines induktiven Wegaufnehmers gemessen und als Funktion der Kraft registriert. Da sich bei nur schwach ausgehärteten kein vergleichbares Versagenskriterium anbot, wurde als Vergleichs-Kennwert außer dem Tangenten-Elastizitätsmodul die Biegespannung bei 2 % rechnerischer Randfaserdehnung herangezogen.

4.4.2.3 Zeitstand-Biegeversuche an ungefüllten Reaktionsharzsystemen

Die Zeitstand-Biegeversuche an den Matrixwerkstoffen wurden in Anlehnung an DIN 53 444 und DIN 53 452 an Probe-

körpern aus 4 mm dicken gegossenen Reinharzplatten bei Normalklima 23/50-2 durchgeführt. Die Anordnung ist analog der des Kurzzeitversuches. Die konstante Biegebeanspruchung von σ_b = 4,0 N/mma wirkte jeweils 24 h auf den Probekörper ein. Die Durchbiegung nach 1 h und 24 h Belastungszeit wurde mittels Meßuhren /1/100 mm Teilung) gemessen. Ermittelt wurden die Kriechmoduln bei 1 h und 24 h Belastungszeit und die Kriechneigung.

4.4.2.4 Kurzzeit-Biegeversuche an Verbundsystemen

Die Kurzzeit-Biegeversuche wurden entsprechend Abschnitt 3.5.4 der IfBt-Richtlinie für die Kennwertbestimmung, Zulassungsprüfung und Güteüberwachung von RHM und RHB bei Normalklima 23/50-2 durchgeführt. Dabei wurden die Probekörper aus den Platten, an denen das Schwindverhalten mit der Sensor-Methode untersucht wurde, entnommen und im Vierpunkt-Biegeversuch geprüft. Die Geometrie der Probekörper und die Versuchsanordnung ist in Bild 8 wiedergegeben. Die Prüfgeschwindigkeit wurde so gewählt, daß sich in der Randfaser eine rechnerische Dehnungszunahme von 0,5 ‰ pro Minute einstellte. Die Durchbiegung der Probekörper wurde mittels eines induktiven Aufnehmers gemessen und als Funktion der Kraft aufgezeichnet. Anhand dieser Daten war die Erstellung von Spannungs-Dehnungs-Linien sowie die Auswertung der Biegefestigkeit und des Elastizitätsmoduls möglich.

4.4.2.5 Zeitstand-Biegeversuche an Verbundsystemen

Das Kriech-Verhalten bei statischer Beanspruchung wurde ebenfalls im Vierpunkt-Biegeversuch bei Normalklima 23/50-2 ermittelt. Der Aufbau ist identisch mit dem des Kurzzeitversuches. Die Belastung wurde jedoch konstant gehalten, wobei die Messung der Durchbiegung während der

Beanspruchungsdauer mittels Meßuhren (1/100 mm Teilung) erfolgte. Die aufgebrachte Biegespannung σ_B betrug bei allen Versuchen 4,0 N/mm² ~ 0,2 β_B. Die Beanspruchungsdauer betrug 24 bzw. 1000 Stunden. Aus den Meßwerten wurden unter Einbezug der geometrischen Größen die Kriechmoduln $E_{bc(t)}$ und die Kriechneigung KN errechnet.

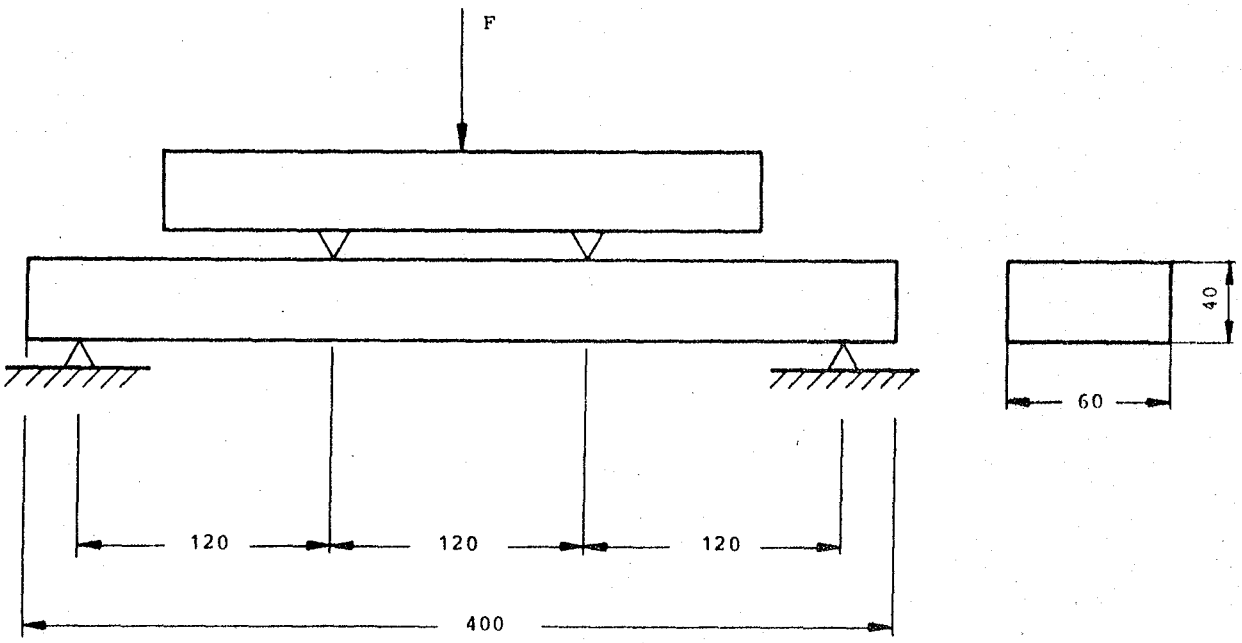


Bild 8: Versuchsanordnung und Probekörpergeometrie beim Vierpunkt-Biegeversuch

4.5 Herstellung der Verbundsysteme

Der Herstellung der Verbundsysteme ging jeweils eine exakte Vorbereitung der zu füllenden Formen für die einzelnen Meßmethoden voraus. Sämtliche Meßvorrichtungen mußten funktionsbereit sein, da mit einem Mischansatz alle Schwindungs-Meßmethoden, mit Ausnahme der Dichtemessung, gleichzeitig zum Einsatz kommen sollten.

Bei den Verbundsystemen I bis V wurde dem in einem ausreichend großen Behältnis befindlichen Harz der Styrolanteil zugesetzt. Nach intensivem Verrühren mit einem Rührpaddel erfolgte unter Berücksichtigung ausreichender Verteilung in gewissen Abständen die Zugabe des Härters und des Beschleunigers. Dieses Reaktionsharzgemisch wurde sofort den Füllstoffen in einem Zyklos-Zwangsmischer beigemengt und intensiv vermischt. Unmittelbar nach dem Mischvorgang wurden gleichzeitig alle Formen (Prismenform, Ringform und Plattenform) gefüllt, auf dem Rütteltisch zunächst vorverdichtet und nach Fixierung der Meßgeräte weiter verdichtet. Beim Mischen und Verdichten wurden die bei den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um möglichst gleichmäßige, quasihomogene Verbundstrukturen zu erreichen.

Die Herstellung der Verbundsysteme VI und VII erfolgte in gleicher Weise wie die der Systeme I bis V. Die Zugabe von Styrol und Beschleuniger entfiel jedoch.

Bei den Verbundsystemen VIII und IX erfolgte zuerst die Vermengung der Trockensubstanzen Füllstoffe und Härter. Im Zwangsmischer wurde dem Trockengemisch das dünnflüssige Reaktionsharz beigemischt. Nach ausreichender Vermischung konnte die Füllung der Formen und die Verdichtung vorgenommen werden.

Bei sämtlichen Vorbereitungs- und Verarbeitungsvorgängen herrschte Normalklima 23/50-2. Vor der Verarbeitung lagerten alle Einzelkomponenten ebenfalls bei diesen klimatischen Bedingungen.

4.6 Durchführung der Untersuchungen

4.6.1 Untersuchungen an ungefüllten Reaktionsharzen

Um Schlüsse auf das unterschiedliche Schwindverhalten gefüllter Reaktionsharze ziehen zu können, war zunächst die Untersuchung des Schwindverhaltens ungefüllter Harzsysteme erforderlich. Dies geschah wegen der bereits vorhandenen Erkenntnisse an UP-Harzen. Zur Anwendung kam dabei das in 4.4.1.1 beschriebene Verfahren der Dichtemessung.

Der Einfluß üblicher Umgebungstemperaturen auf das Härtungs- und Schwindverhalten kalthärtender UP-Harze wurde durch Untersuchungen bei + 5°C, + 20°C und + 30°C ermittelt. Dazu war es notwendig, die Einzelkomponenten bei entsprechenden Temperaturen zu lagern und zu verarbeiten. Die Messung der Dichte an den Reaktionsharzformstoffen erfolgte jeweils bei + 20°C und mußte insbesondere an den bei + 5°C gelagerten Proben binnen kurzer Zeit (ca. 5 Minuten) nach der Entnahme aus dieser Temperatur geschehen, um nicht Nachreaktionen mit zu erfassen. Da die Probekörper nach der Dichtemessung am Feststoff für weitere Untersuchungen nicht mehr verwertbar waren, mußte eine ausreichend große Anzahl von Proben hergestellt werden. Die geringe Streuung der Meßergebnisse erlaubte die Beschränkung auf eine relativ kleine Probenzahl von drei. Neben den Meßergebnissen fanden auch visuell wahrnehmbare Veränderungen der Formstoffe Beachtung.

Die anderen aufgezeigten Methoden zur Untersuchung des Schwindverhaltens sind für ungefüllte Harzsysteme nicht anwendbar, da aufgrund zu rascher und zu heftiger Reaktion der großen Massen praxisfremde Härtungsabläufe und -zustände auftreten würden. Es ist sogar damit zu rechnen, daß mit den angegebenen Rezepturen die Reaktionstemperaturen so weit ansteigen, daß sich eine vorzeitige thermische Schädigung des Reaktionsharzformstoffes ergibt.

Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften erfolgte nach Abschnitt 4.4.2.1 bis 4.4.2.3 an Probekörpern, die zwischen Glasplatten gegossenen 4 mm Reinharzplatten entstammten.

4.6.2 Untersuchungen an Reaktionsharzbeton

Die in Tabelle 3 genannten Verbundsysteme - mit Ausnahme des Systems III - wurden mit den in 4.4.1.2 bis 4.4.1.5 beschriebenen Methoden bei Normalklima 23/50-2 geprüft. Insbesondere das Verhalten der Systeme auf UP-Harzbasis wurde dabei über längere Zeiträume bis 1000 Stunden beobachtet. Die Untersuchung der EP- und MMA-Systeme haben nur ergänzenden Charakter, deshalb erfolgte nach Beobachtung der wesentlichen Reaktionen der Abbruch dieser Versuche.

Auf die Untersuchung bei anderen Temperaturen wurde verzichtet, da die Temperatureinflüsse bei Reinharzuntersuchungen auf die Aushärtung und das Schwindverhalten tendenziell übertragbar sind.

Mit den UP-Harzsystemen wurden je drei Ansätze gemischt, so daß jeweils insgesamt an neun Ringen, neun Prismen und sechs Platten Messungen möglich waren. Bei dem EP- und MMA-Harzsystem war eine Reduzierung auf je zwei Ansätze vertretbar, da die bei den UP-Harzen festgestellten geringen Fertigungsstreuungen und Meßergebnisschwankungen auch hier zu erwarten waren.

Sofort nach Beendigung des Formfüll- und Verdichtungsvorganges begannen die Messungen. Die Erfassung der Verformungs-, Druck- und Längenänderungen mittels DMS, Quecksilberthermometer und Meßzäpfchen geschah stufenweise in stetig zunehmenden Zeitabständen. Die Messung der Reaktionstemperaturen erfolgte kontinuierlich über die wesentliche Reaktionsphase und dann jeweils zum Zeitpunkt der Ermittlung der oben erwähnten Daten.

Während der Versuchsdurchführung fanden neben der meßtechnischen Zustandserfassung auch visuell wahrnehmbare Veränderungen Beachtung. So fiel insbesondere, wie bereits bei

Messungen während der Vorversuche, auf, daß die Haftung zwischen melaminharzbeschichteter Holzform und RHB bei der verhältnismäßig großen Plattenform stellenweise so intensiv war, daß sich örtliche Schwindungsbehinderungen ergaben. Diese unerwünschten Haftbrücken konnten durch Verwendung von Polyesterfolien als Trennschicht unterbunden werden.

Bedingt durch die geringere Viskosität des MMA-Harz-Systems war es bei der Verdichtung notwendig, die Rüttelintensität im Vergleich zu der bei dem anderen System angewandten zu reduzieren, um eine Entmischung und Ablagerung der Grobfüllstoffe zu verhindern.

Der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit - glänzend bei UP- und EP-Systemen, matt und zementschlempeähnlich beim MMA-System - wurde keine das Schwindverhalten entscheidend beeinflussende Bedeutung beigemessen.

Maßnahmen zur Vermeidung von Luftinhibierung an der Probenoberfläche und zur Verzögerung der Reaktion wurden bewußt nicht ergriffen, um gleiche und praxisnahe Bedingungen zu erhalten und den Meßvorgang nicht zu erschweren.

Die Probekörper für die Kurzzeit- und Zeitstandbiegeversuche entstammten jeweils der Plattenhälfte, in der sich die Meßwertaufnehmer befanden. Nach dem Entformen der Platten und nach dem Abtrennen der Probekörper wurde überprüft, ob dies einen Einfluß auf den Spannungszustand an den Meßstellen bewirkte.

4.6.3 Untersuchungen an Reaktionsharzmörtel

Die Untersuchungen an RHM erfolgten, abgesehen von den im folgenden genannten Abweichungen, analog dem in Abschnitt 4.6.2 beschriebenen Verfahren am Verbundsystem III.

Bedingt durch die Verteilung gleicher Bindemittelanteile auf eine größere Zuschlagoberfläche und durch den verhältnismäßig hohen Anteil an Feinzuschlag (21 Gew.-% Kornklasse 0,125 - 0,25) ergab sich eine zähe, relativ trockene Masse, die sich zwar schwer mischen, aber gut verdichten ließ. Aufgrund dieser Effekte war es nötig, beim RHM die Mischzeit zu verlängern und die Masse in mehreren Gängen in die Form einzubringen und zu verdichten.

Um den Mischvorgang zu erleichtern, wäre eine Veränderung des Harz/Zuschlag-Verhältnisses oder der Zuschlagverteilung sowie eine Verringerung der Harzviskosität notwendig gewesen. Da eine solche Maßnahme die Systematik der Untersuchungen gestört hätte, wurde auf eine Änderung verzichtet. Im Gegensatz zum RHB auf UP-Harzbasis, der eine glänzende Oberfläche zeigte, bildete sich beim RHM eine matte, rauhe Oberfläche.

5. Darstellung der Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Untersuchungen an ungefülltem Reaktionsharz

Die im Rahmen der Untersuchungen an ungefüllten UP-Harzformstoffen gewonnenen Ergebnisse werden im folgenden detailliert beschrieben. Die Ergebnisse bestätigen die z.T. schon bekannten und an anderen Stellen zitierten Erkenntnisse [5], [18], [38], [39], [40], [41], [42].

In Bild 9 ist der Verlauf der Reaktionstemperaturen in 4 mm dicken Platten der RH-Systeme UP1 und UP2 dargestellt. Die Temperaturen des Systems UP2 bleiben, wie zu erwarten war, während der Reaktionsphase deutlich unter den Temperaturen des hochreaktiven Systems UP1.

Die Abnahme des Reststyrolgehaltes während der Nachreaktionsphase bei 23°C ist für beide UP-Systeme in Bild 10 angegeben. Die höhere Reaktivität des Systems UP1 setzt sich auch in der Nachreaktion in chemischer Hinsicht - Reduzierung des Restmonomerengehaltes - fort. Der verhältnismäßig hohe Anteil an Restmonomeren ist dabei auf den Zusatz von 7,5 Gew.-% Styrol zum Reaktionsharz, das im Anlieferzustand einen Styrolgehalt von 35 Gew.-% aufweist, zurückzuführen. Der chemisch-physikalische Einfluß der Änderung des Restmonomerengehaltes auf den Aushärtungsprozeß wird in [1], [12], [16], [18], [38], [39], [41], [43] ausführlich diskutiert.

Interessanter für die Bewertung des Schwindverhaltens im Makrobereich während der Vernetzung erscheint die Beobachtung der Dichteänderung. Bild 11 zeigt die Veränderung der Dichte der UP-Systeme während der Haupt- und der Nachreaktionsphase. Beim System UP1 ist das Verhalten für drei Temperaturen: 5°C, 23°C und 30°C, ermittelt worden.

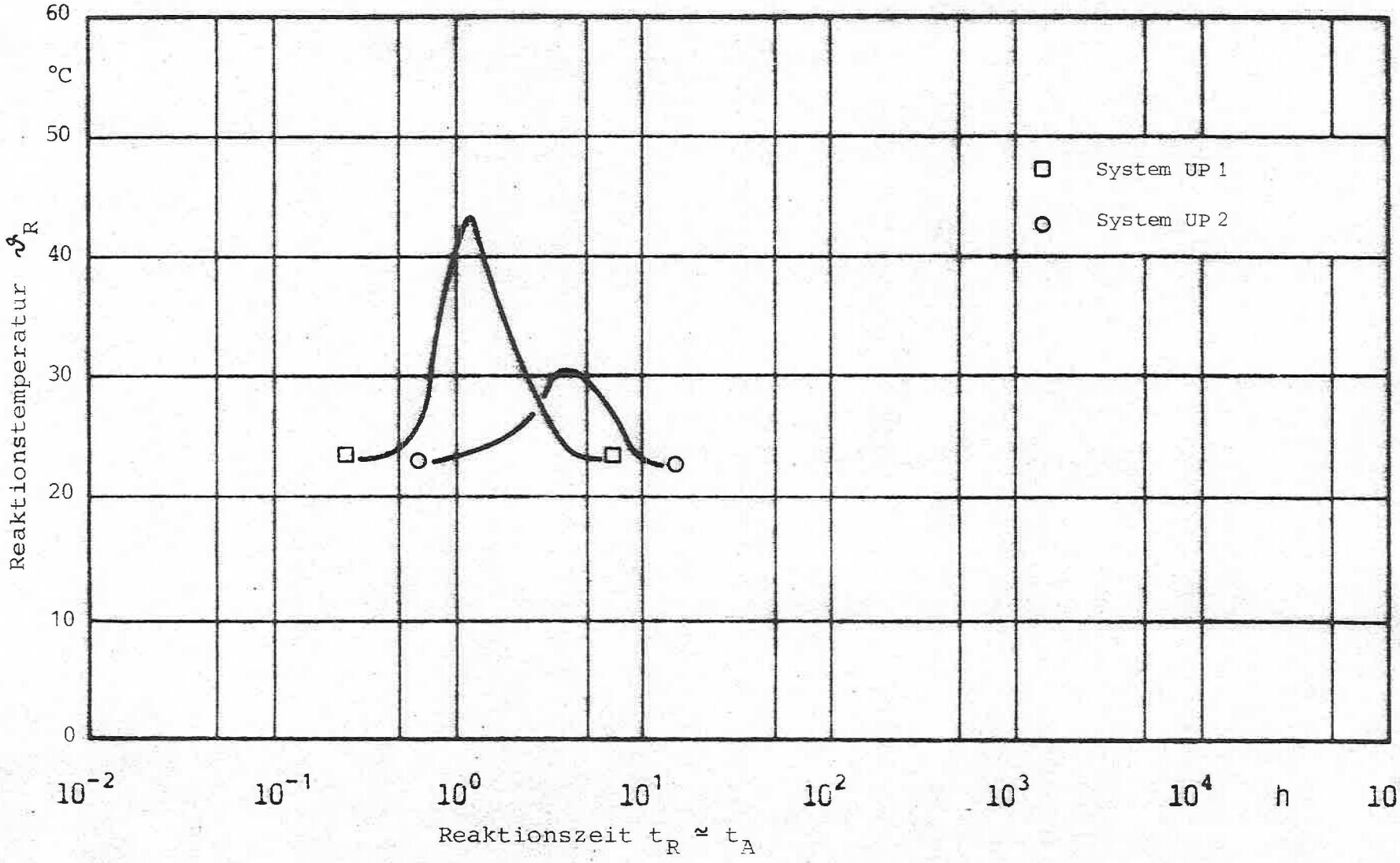


Bild 9: Reaktionstemperatur ϑ_R der UP-Harzsysteme in Abhängigkeit von der Reaktionszeit

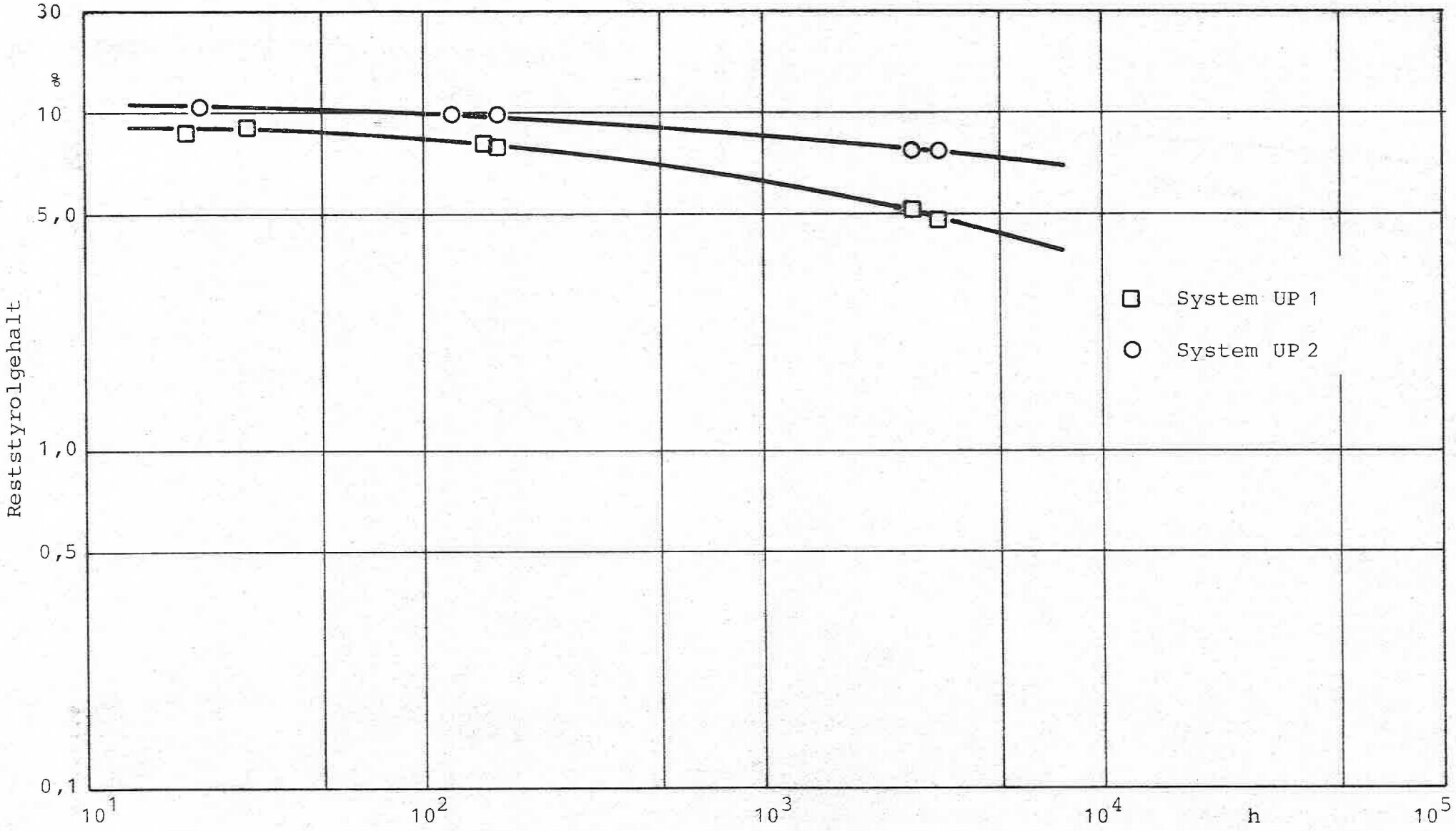


Bild 10: Reststyrolgehalt in Abhängigkeit von der Aushärtezeit

Die Kurvenzüge der Systeme UP1 und UP2 bei 23°C sind als nahezu identisch zu bezeichnen. Der Kurvenverlauf des Systems UP1 bei 30°C liegt konstant geringfügig über den 23°C-Kurven, wogegen die Dichtezunahme bei 5°C erheblich unter diesem Wert bleibt. Die Formstoffcharakteristik läßt vermuten, daß für das System UP2 ähnliche Erscheinungen gelten.

Aus Bild 12 ist die Veränderung der Dichte für die Harzsysteme EP und MMA ersichtlich. Beim System EP ist anhand der relativ geringen Dichteveränderung bereits erkennbar, daß eine kleine Volumenschrumpfung zu verzeichnen ist.

Eine Gegenüberstellung der Resultate der Dichtebestimmung an allen ungefüllten Systemen erfolgt in Bild 13, indem die Änderung der Dichte über der Zeit nach Gleichung (2) in Volumens-Schwindungen umgerechnet wurde. Die nach 10 Stunden Aushärtezeit vorliegenden Volumensschwindungen sind vergleichbar mit den Literaturangaben [3], [20], [47], [49] und [53].

Die Auswirkungen der zunehmenden Aushärtung auf die mechanischen Eigenschaften der Formstoffsysteme UP1 und UP2 sind in den Bildern 14, 15 und 16 dargestellt.

Die Werkstoff-Kennwerte bei kurzzeitiger Zugbeanspruchung, Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul sind in Bild 14 zeitabhängig aufgetragen. Bild 15 zeigt den Verlauf der Biegespannung bei 2 % rechnerischer Randfaserdehnung und des Biege-E-Moduls in Abhängigkeit von der Aushärtezeit bei Dreipunkt-Biegebeanspruchung. Die Abhängigkeit des Zeitstandverhaltens von der Aushärtezeit ist in Bild 16 dargestellt. Dort ist die Veränderung des Kriechmoduls E_{bc1} nach 1 Stunde Belastungszeit und der Kriechneigung KN zwischen 1 Stunde und 24 Stunden Belastungszeit bei Dreipunkt-Biegebeanspruchung über der Aushärtezeit t_A aufgetragen.

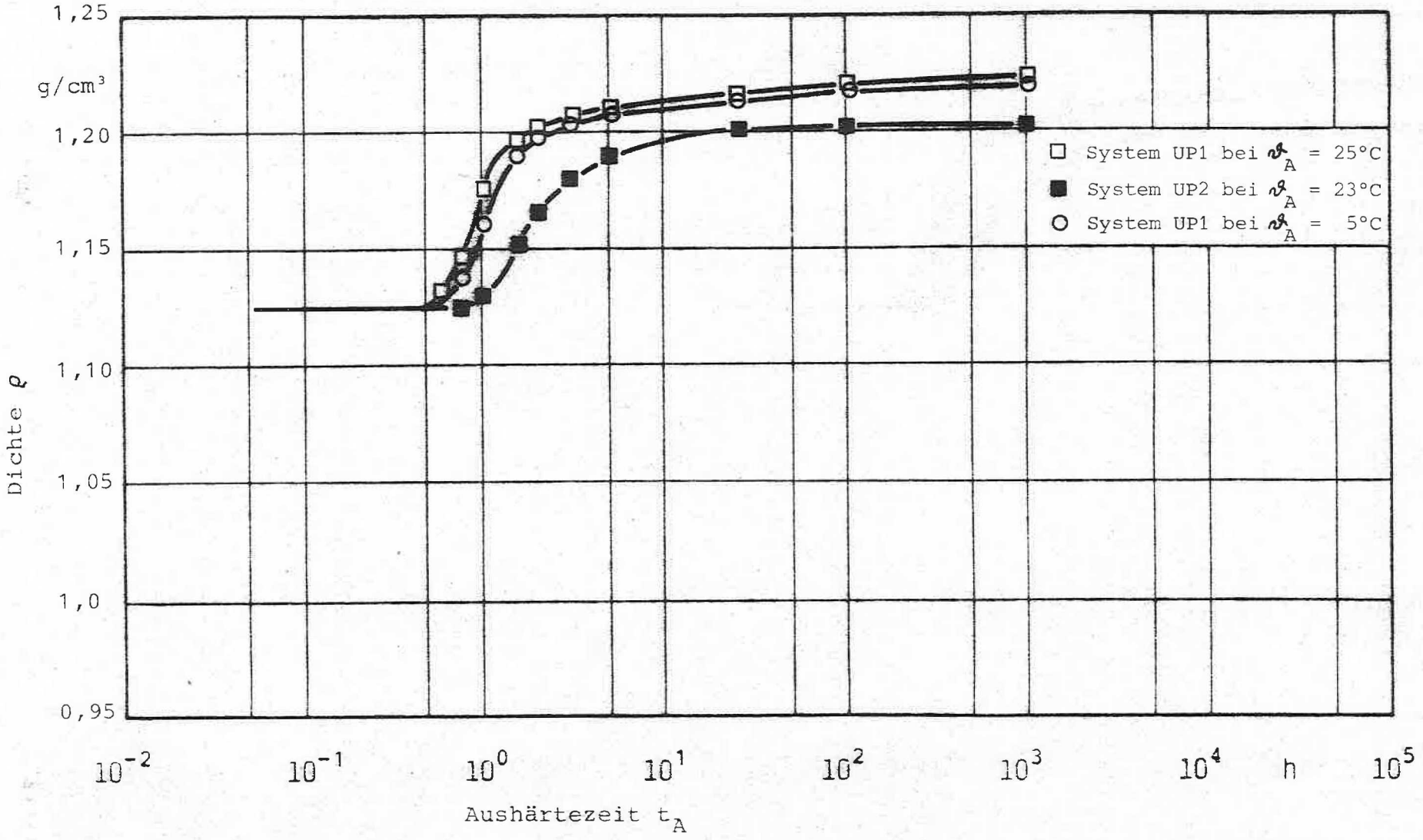


Bild 11: Dichte ϱ der UP-Harzsysteme in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

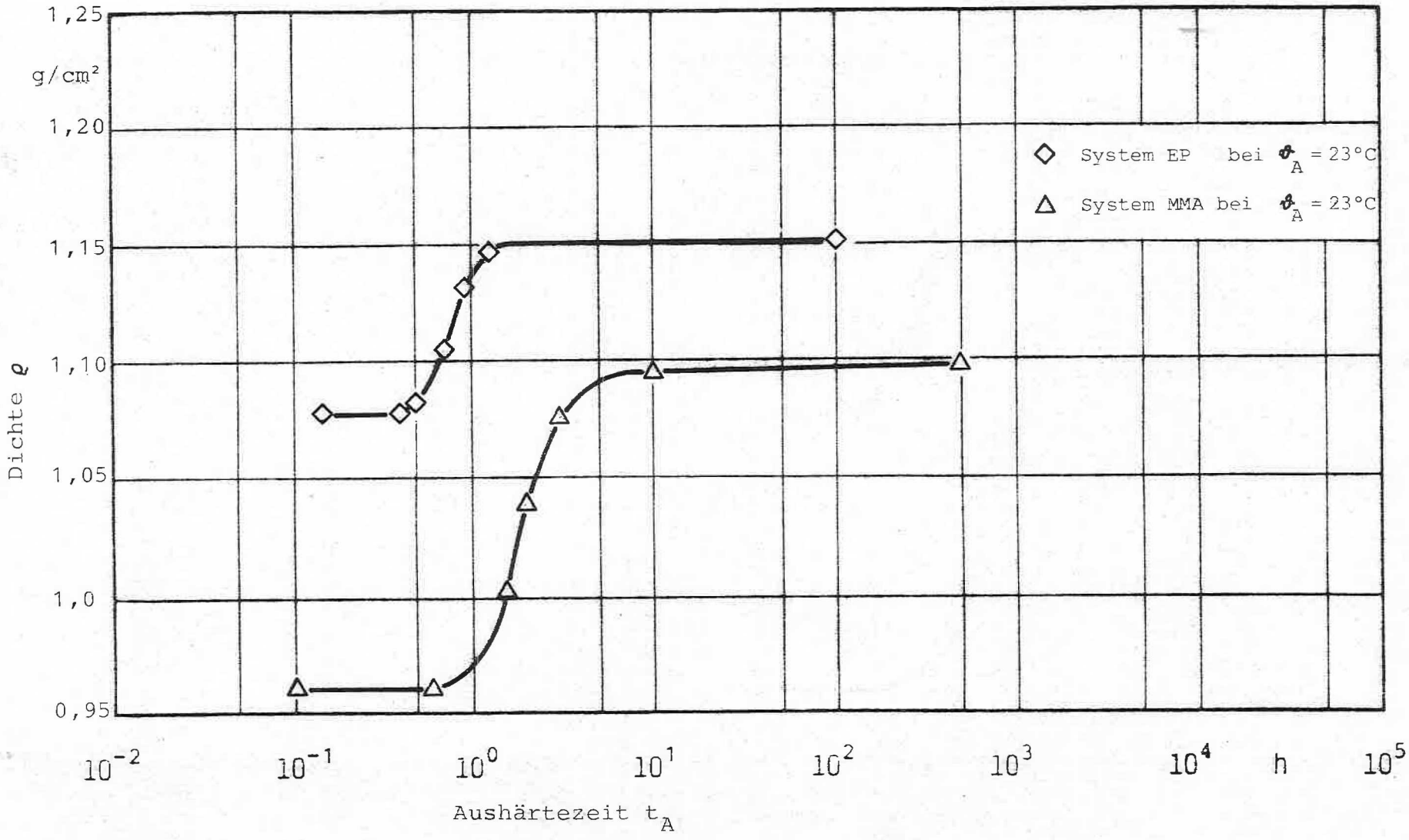


Bild 12: Dichte ρ der Harzsysteme EP und MMA in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

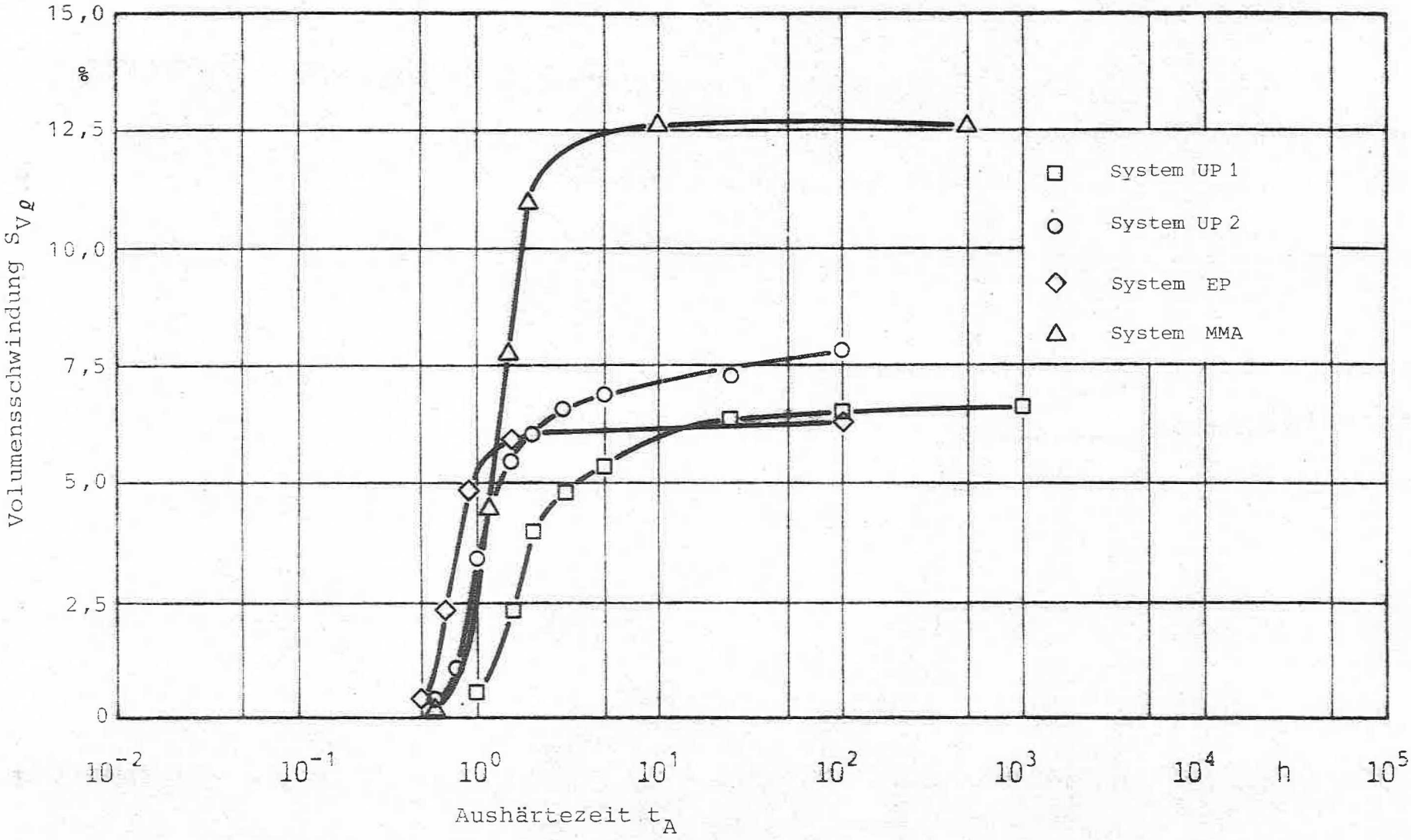


Bild 13: Volumensschwindung $S_{V\varrho}$ aus der Dichtebestimmung in Abhängigkeit von Aushärtezeit t_A

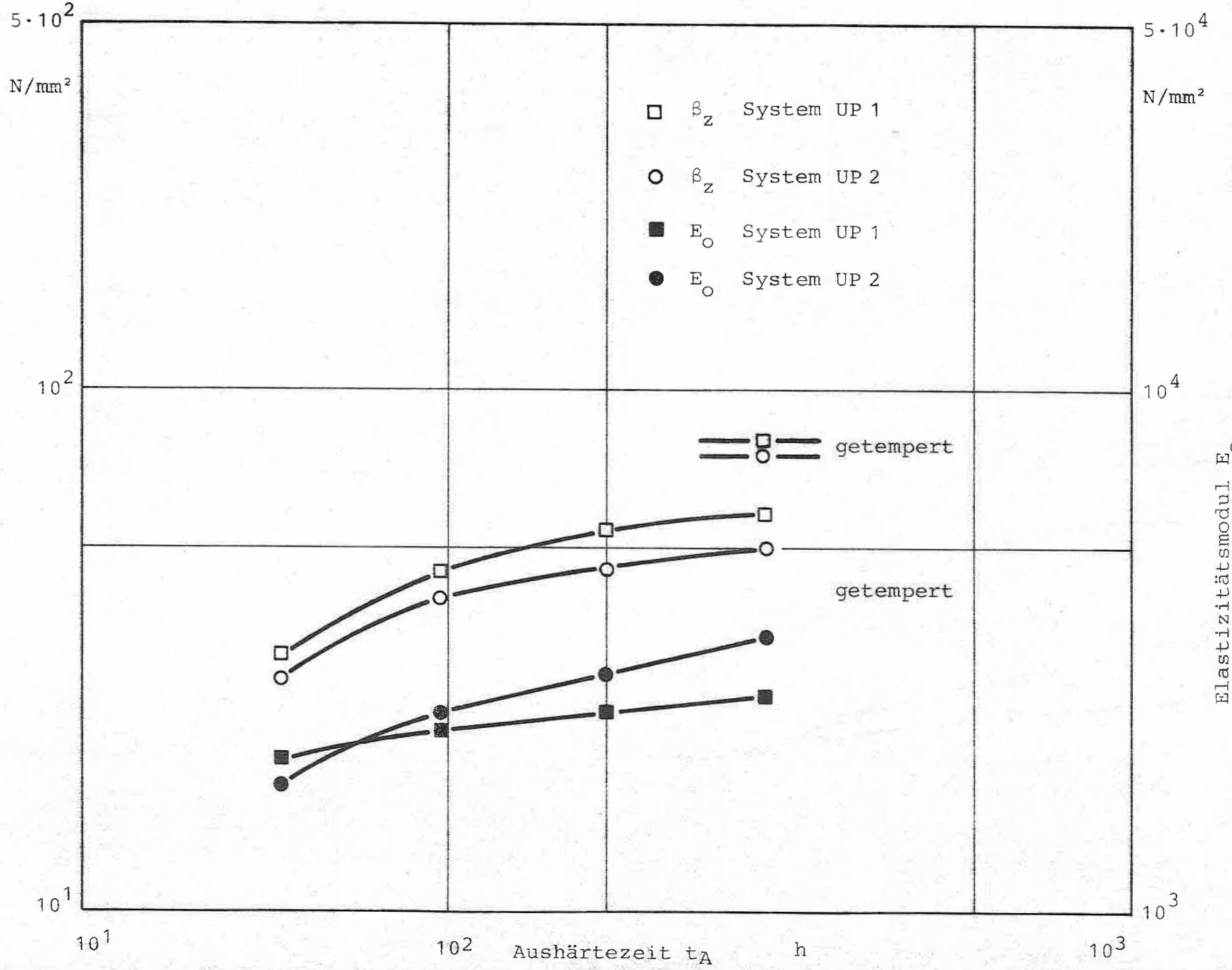


Bild 14: Zugfestigkeit und E-Modul in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

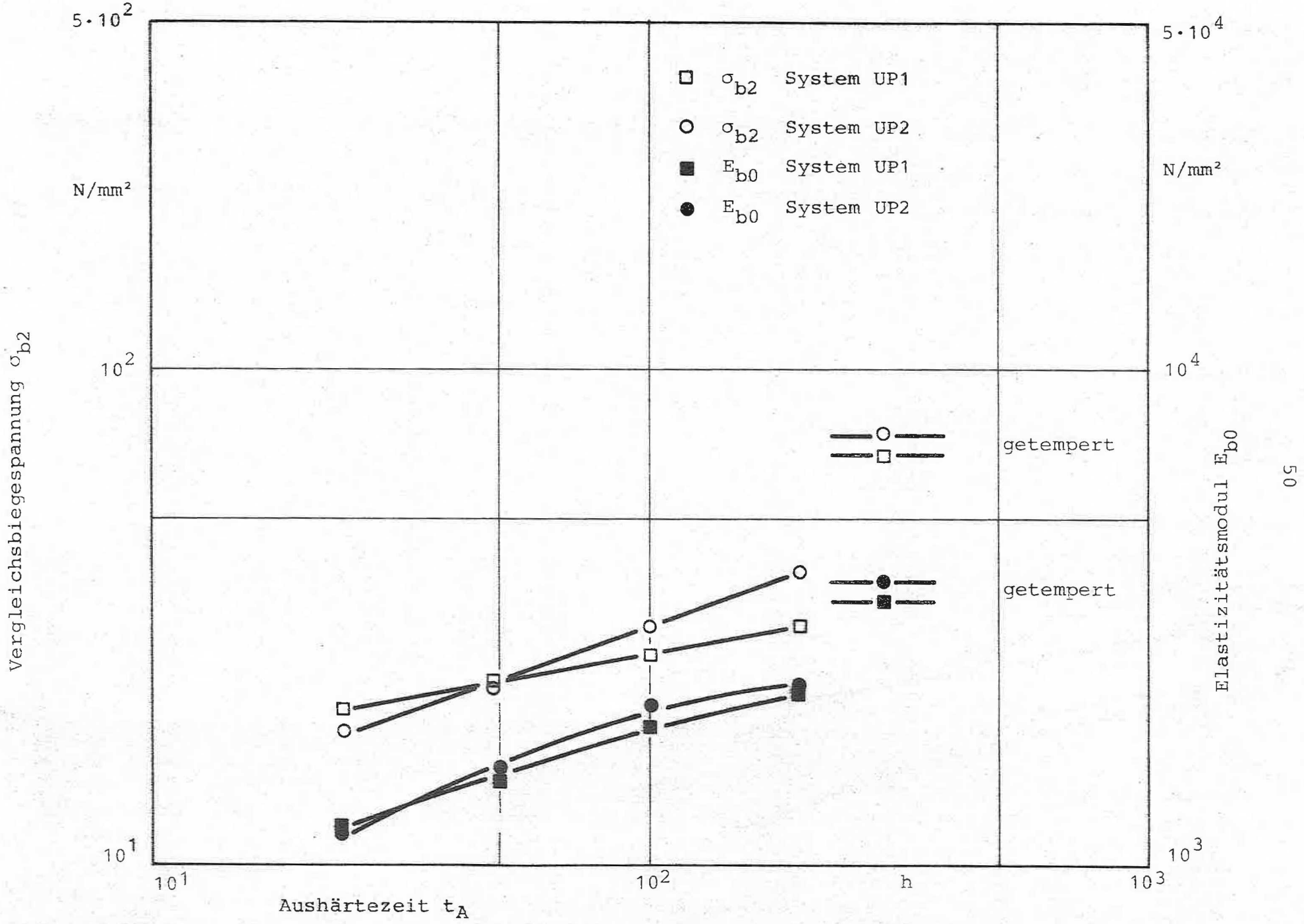


Bild 15: Verhalten bei Kurzzeit-Biegebeanspruchung in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

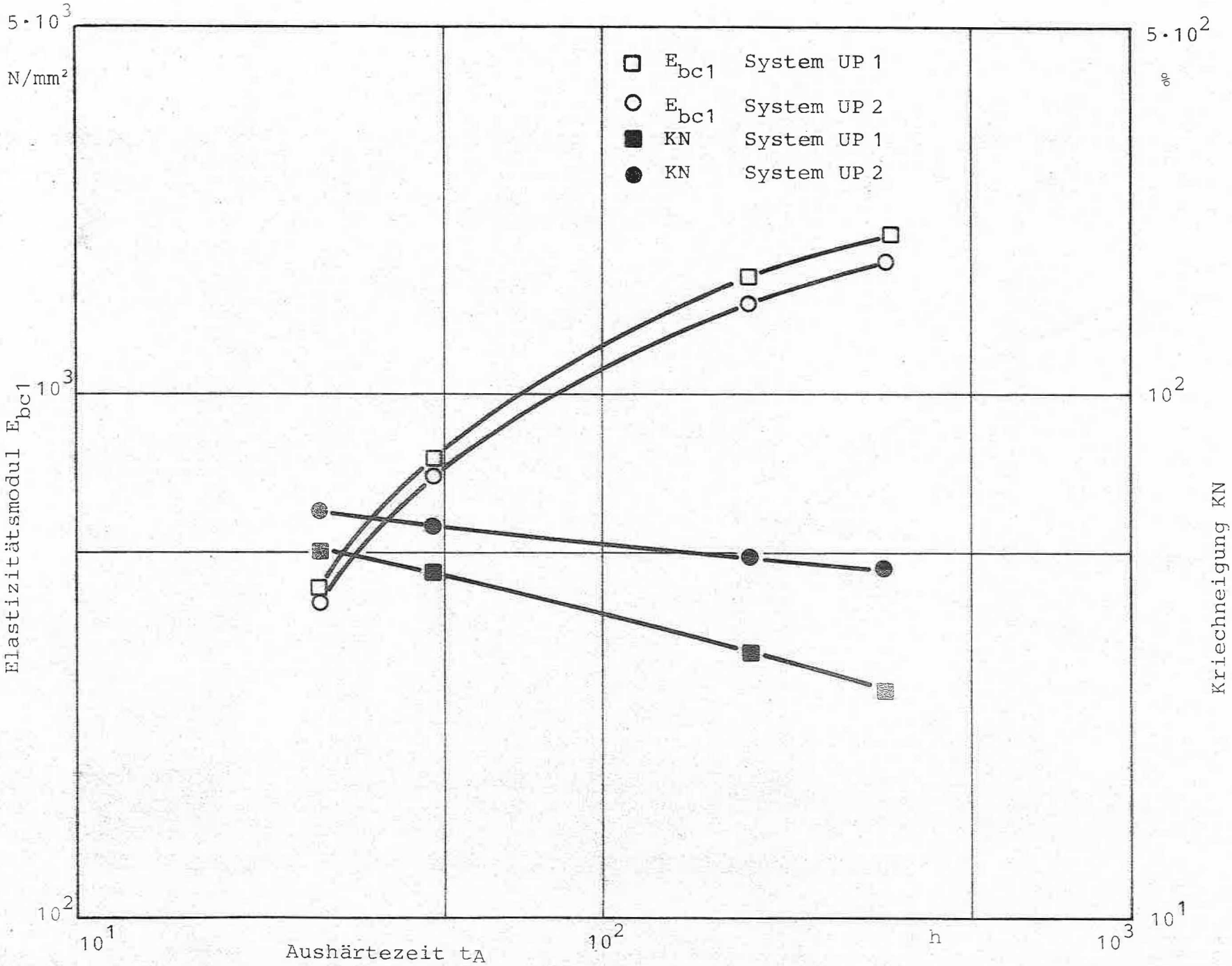


Bild 16: Zeitstandverhalten im 3-Punkt-Biegeversuch in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

Die u.a. in [38] bereits genannten Tendenzen werden hier bestätigt. Das Werkstoffverhalten unter statischer Dauerbeanspruchung fügt sich ebenfalls in das in [38] erwähnte Schema ein.

5.2 Ergebnisse der Untersuchungen an Reaktionsharzbeton

Das Schwindverhalten von RHB-Systemen findet bei allen Anwendern vordringliches Interesse und wurde deshalb eingehend untersucht.

5.2.1 Prismen-Methode

Anhand der Prismen-Methode sollten Erkenntnisse über die unbehinderte lineare Schwindung gewonnen werden. Wie sich jedoch bereits bei den Vorversuchen zeigte, liegen bei dieser Methode zwar keine geometriebedingten Schwindungsbehinderungen vor, Haftreibung und Klebeeffekt führen jedoch im Grenzbereich RHB/Form zu gewissen Einschränkungen der freien Schwindung. Trotz Vorbehandlung der Stahlformen mit Trennmitteln wurden Störungen der freien Schwindungen verzeichnet. Erst die nicht praxisübliche Verwendung von Trennfolien brachte den gewünschten Effekt der unbehinderten Schwindung in Meßrichtung. In den meisten Fällen wurden brauchbare Meßwerte erst etwa zwei Stunden nach der Vermischung der Systeme ermittelt, da erst ab dieser Zeit eine fest Einbindung der Meßzäpfchen in RHB gewährleistet war. In Bild 17 ist der Verlauf der durch Haftreibung behinderten prozentualen Schwindung in der Prismenlängsachse des Verbundsystems I über der Versuchszeit dargestellt. Die zwei Kurvenzüge verdeutlichen den Streubereich, der sich durch tatsächliche Unterschiede des Schwindmaßes und durch Meßwertunsicherheiten ergab. Bild 18 dagegen zeigt den Verlauf der linearen Schwindung in Prismenlängsachse bei Verwendung von Polyesterfolie als Trennmittel. Auch hier ist der Streubereich durch zwei Kurvenzüge erkennbar gemacht. Für die Berechnung des linearen Schwindmaßes wurde die Gleichung (3) herangezogen.

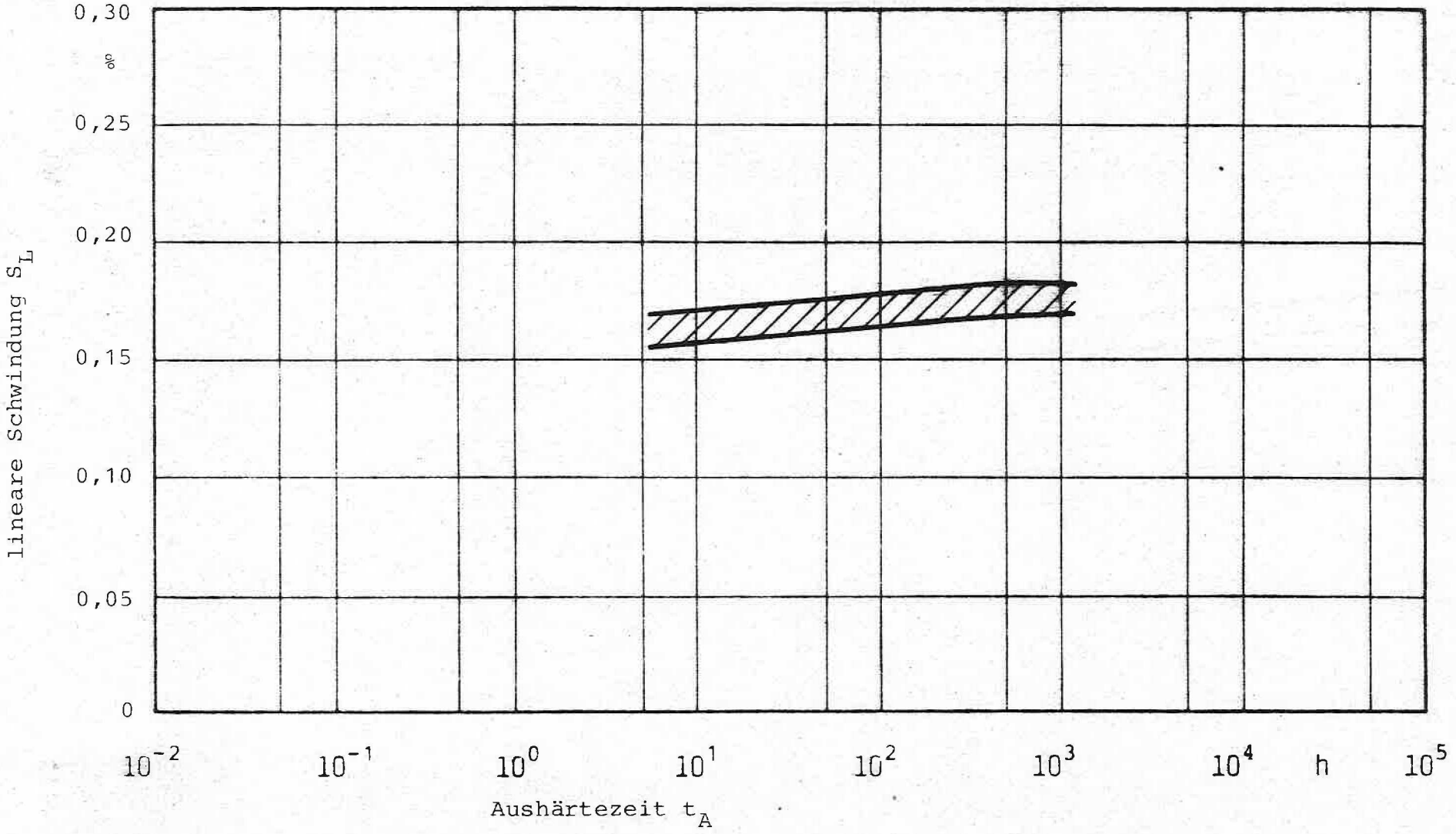


Bild 17: Lineare Schwindung S_L des Verbundsystemes I in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A ohne Verwendung von Trennfolie

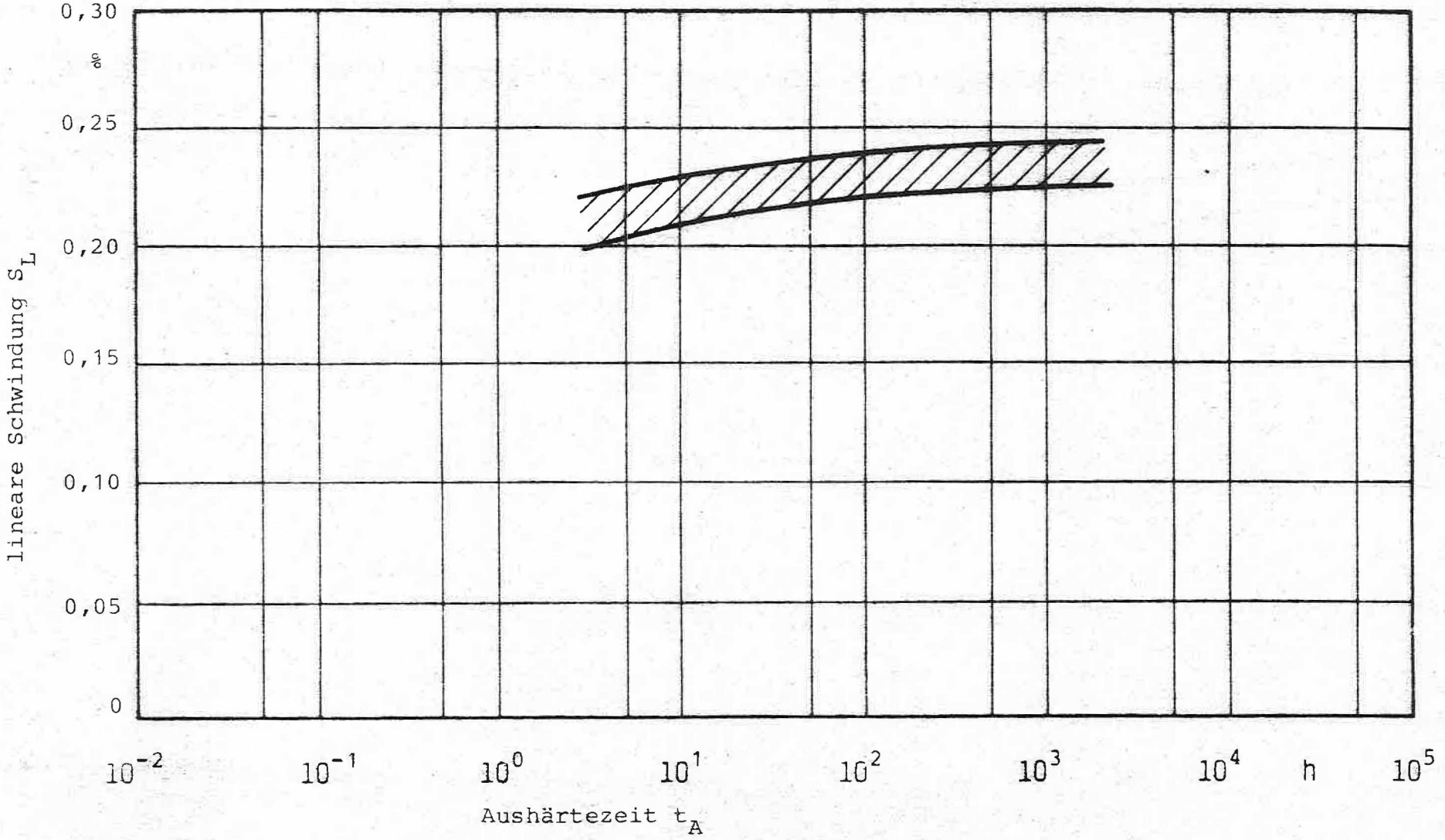


Bild 18: Lineare Schwindung S_L des Verbundsystemes I in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A bei Verwendung von Trennfolie

Sowohl der absolute Betrag der Schwindung als auch der Verlauf der Kurven machen deutlich, daß durch nicht ausreichende Trennung zwischen RHB und Form eine erhebliche Behinderung der Schwindung auftritt. Die Anfangsschwindung, d.h. nach etwa zwei Stunden, war bei den gegebenen Voraussetzungen bedingt durch die Haftreibung bedeutend geringer als bei der störungsfreien Längenänderung. Bezogen auf diese Anfangsschwindung betrug die Zunahme der Schwindung innerhalb von 1000 Stunden ohne Trennfolie ca. 9 %, mit Trennfolie ca. 12 %. Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, daß sich durch die Haftreibung erhebliche Schwindspannungen, insbesondere im Grenzbereich RHB/Form, aufbauen können. Für die weiteren Betrachtungen der Schwindungsmessungen von RHB mittels der Prismen-Methode wurden trotz dieses Verhaltens nur Versuche ohne Folien als Trennmittel herangezogen, da die Verwendung von Trennfolien nur für die hauptsächliche Reaktionsschwindung bedeutsam ist und da sie nicht den praktischen Gepflogenheiten entspricht.

Eine achtstündige thermische Nachbehandlung des Verbundsystems I bei 80°C nach der Herstellung und 24-stündiger Lagerung bei 23°C zeigte, daß die lineare Schwindung, bedingt durch zunehmende Vernetzung, spontan um ca. 10 %, bezogen auf den Wert vor der Temperung, anstieg und dann nahezu konstant blieb. Bild 19 stellt den Schwindungsverlauf dar. Ohne thermische Nachbehandlung, also bei konstanter Lagerung bei 23°C, nimmt die lineare Schwindung im gleichen Zeitraum nur wenig zu. Bezogen auf den ungetemperten RHB liegt das Schwindmaß des getemperten Materiales 1000 Stunden nach der Herstellung um durchschnittlich 7 % höher. Dieser Unterschied ist relativ gering, da während der Nachreaktionsphase - zwischen 24 und 1000 Stunden - noch eine deutliche Längenänderung der Prismen erfolgte.

Der Einfluß der Füllstoffgeometrie auf die lineare Schwindung wird beim Vergleich von Bild 17 mit Bild 20 deutlich. Bedingt durch die unregelmäßige, sperrige Form des Grobfüllstoffes Splitt beim Verbundsystem II wird die Längenänderung teilweise behindert. Eine weitere Ursache des geringeren Schwindverhaltens ist darin zu sehen, daß bei zwar gleichen Füllstoff-Gewichtsanteilen für die Benetzung des Splittes, bedingt durch die relativ größere und rauhere Oberfläche, mehr Matrixsubstanz benötigt wird. Dies hat wiederum zur Folge, daß sich zwischen den einzelnen Füllstoffteilchen geringere Matrixmassen konzentrieren, wodurch die Reaktion weniger intensiv abläuft. Bezogen auf das System I liegt beim System II der Wert der Schwindung fünf Stunden nach der Herstellung um ca. 20 % niedriger. Der tendenzielle Verlauf der Kurven ist ähnlich, so daß dieser Unterschied auch nach 1000 Stunden noch vorliegt.

Beim Verbundsystem IV mit schwindarmem UP-Harz konnten Längenänderungen festgestellt werden, die bei sonst gleichen Bedingungen bedeutend kleiner sind als die des Systems I. In Bild 21 ist der Verlauf der linearen Schwindung dieser Variante durch zwei Kurvenzüge eingegrenzt. Während bei den bisher beschriebenen Kurven ein flacher Verlauf zu verzeichnen ist, ist hier ein anfangs steiler Anstieg feststellbar, der vorwiegend auf die später einsetzende und länger andauernde Reaktionsphase zurückzuführen ist. Auffallend ist, daß das lineare Schwindmaß zwischen fünf und 1000 Stunden von ca. 0,05 % auf ca. 0,1 % ansteigt und sich dann in dieser Größenordnung einpendelt.

Bild 22 zeigt das lineare Schwindverhalten des Verbundsystems VI. Wie zu erwarten war, weist dieses System ein noch geringeres Schwindmaß als die bisher beschriebenen Systeme auf. Überraschend ist jedoch, daß sich der Schwin-

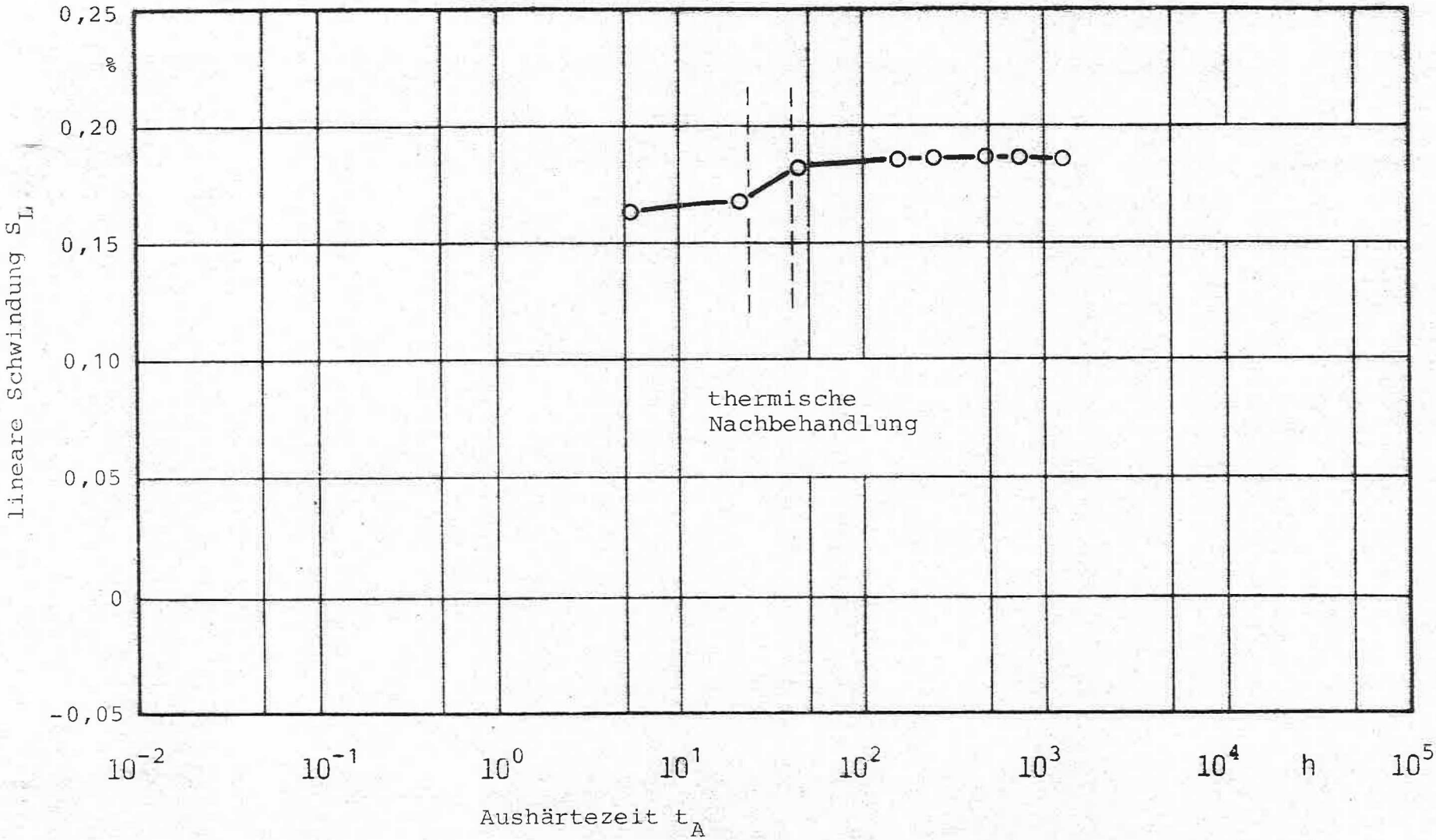


Bild 19: Einfluß thermischer Nachbehandlung auf das lineare Schwindverhalten

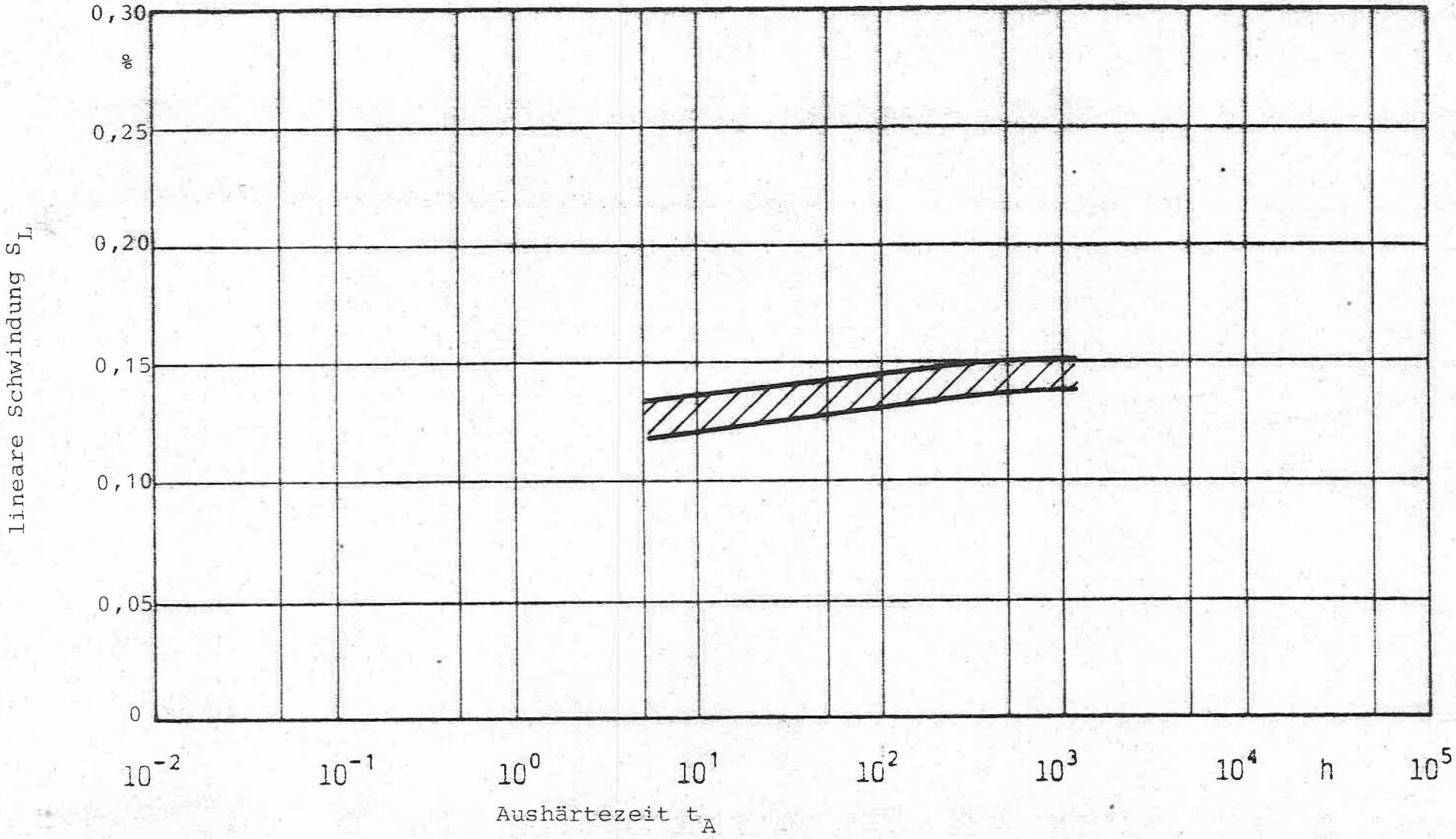


Bild 20: Lineare Schwindung des Verbundsystemes II in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

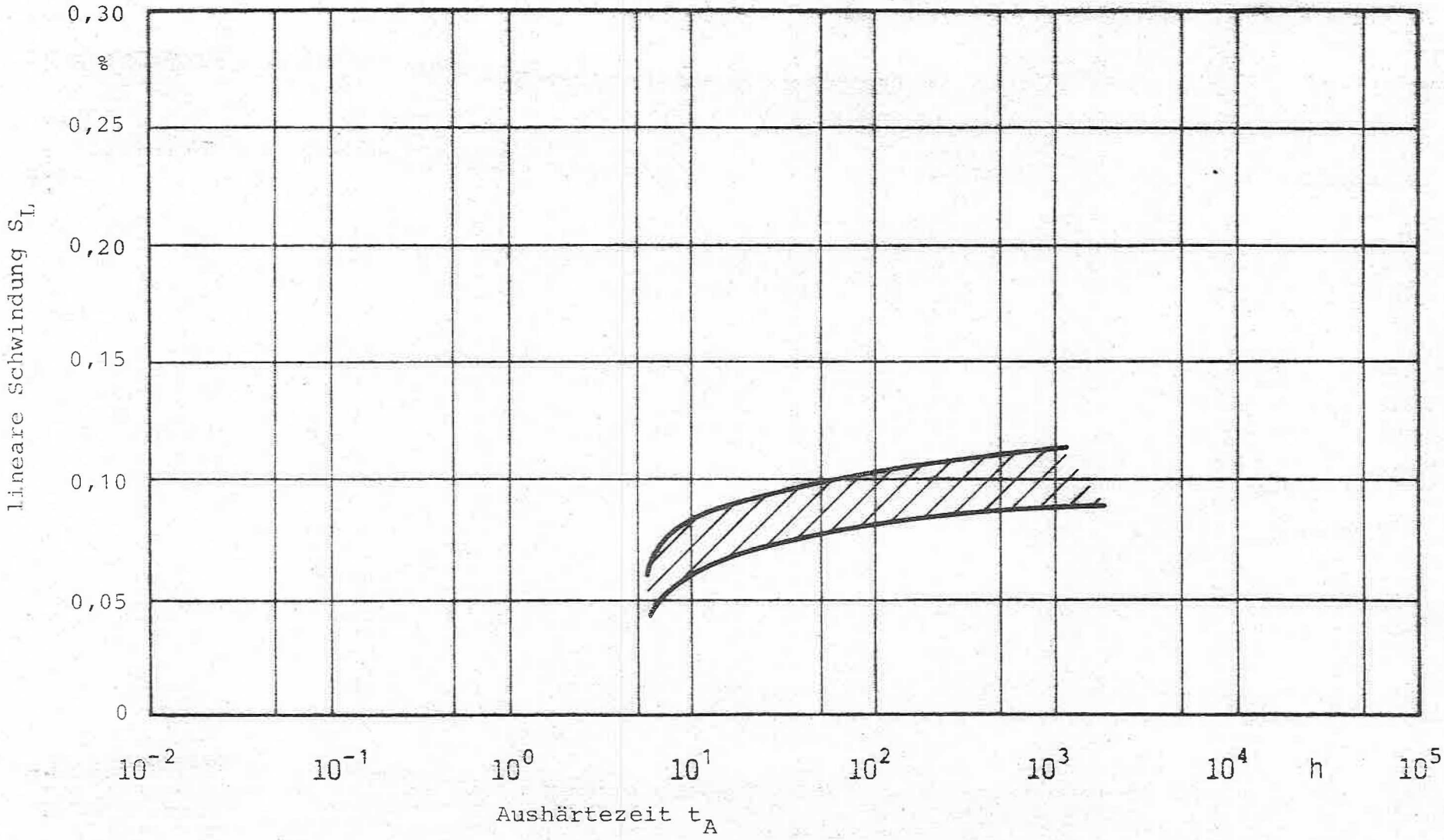


Bild 21: Lineare Schwindung S_L des Verbundsystemes IV in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

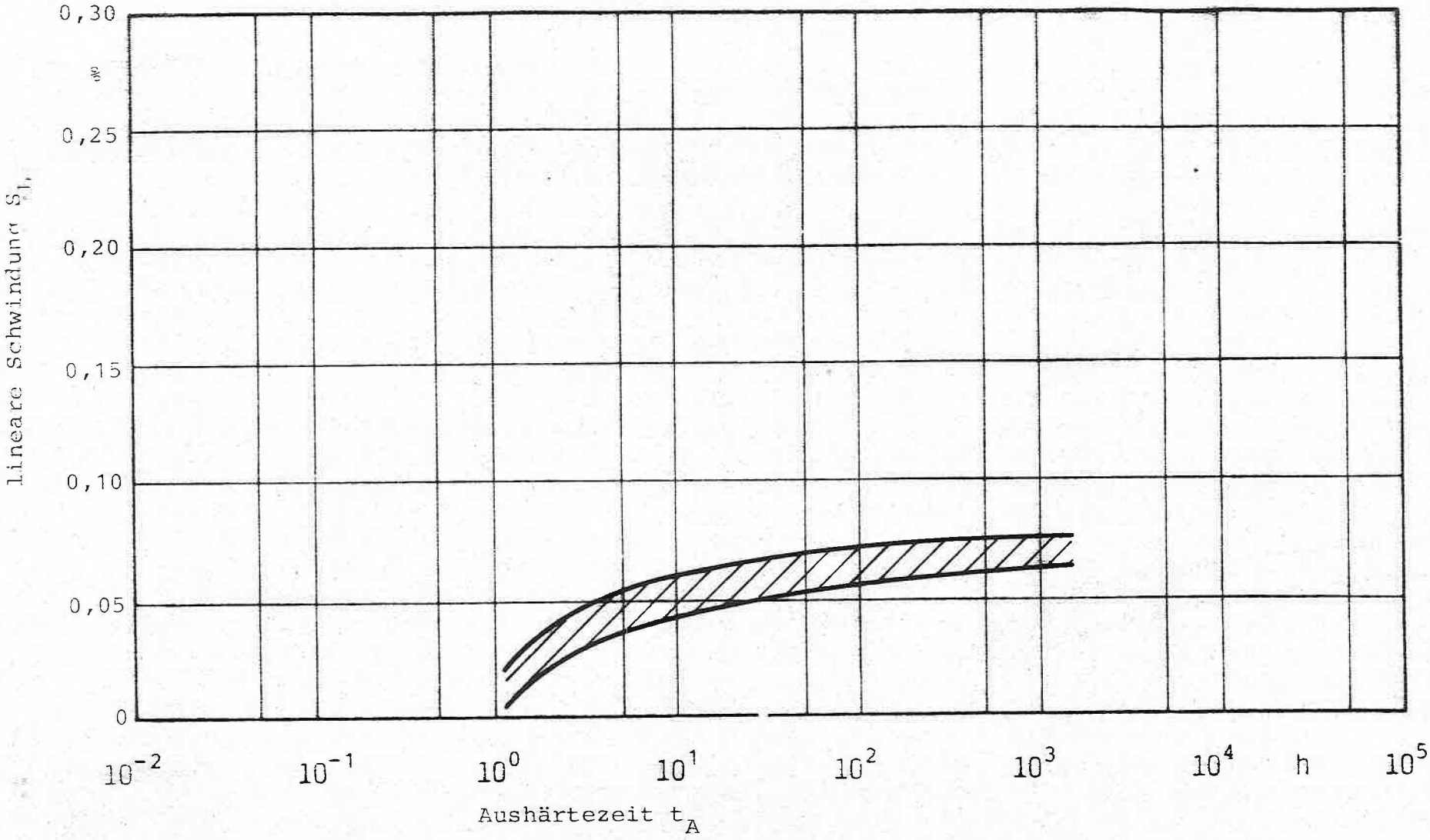


Bild 22: Lineare Schwindung S_L des Verbundsystemes VI in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

dungsprozeß über lange Zeit hinzieht und daß sich bei zehn Stunden (0,05 %) durchschnittlich erst 8 % des Schwindmaßes bei 1000 Stunden (0,65 %) einstellen. Dieses relativ hohe Maß der Nachschwindung ist auf die bewußt gewählte, träge reagierende Kombination von Reaktionspartnern zurückzuführen.

Die in Bild 23 dargestellten Kurven zeigen das Schwindverhalten der Prismen der Systeme VIII und IX. Ähnlich wie bei den Systemen I und II wird hier das Schwindmaß durch die Füllstoffgestalt erheblich beeinflußt. Für dieses Verhalten sind die bereits beim Vergleich der Systeme I und II genannten Ursachen verantwortlich. Betrachtet man die Veränderung der Dichte (Bild 12), so überraschen die relativ hohen Schwindmaße beider Systeme nicht. Auch die Nachschwindung in der Zeit 10 h < t_A < 1000 h liegt prozentual gesehen in einer Größenordnung deutlich über der der anderen Systeme.

In Tabelle 4 sind die linearen Schwindmaße bei 10 und bei 1000 Stunden sowie das Maß der Nachschwindung zwischen 10 und 1000 Stunden, bezogen auf den Wert bei 10 Stunden, vergleichend gegenübergestellt.

Der Vergleich zeigt, daß bei den schwindarmen Systemen IV und VI die Nachschwindung einen verhältnismäßig hohen Anteil an der Gesamtschwindung hat. Dies ist damit zu begründen, daß die Reaktion dieser Systeme spät startet, langsam verläuft und etwa 10 Stunden nach der Herstellung erst abklingt. Ein ähnliches, jedoch nicht so aufgeprägtes Verhalten wurde auch bei den Systemen mit Splitt als Grobfüllstoff festgestellt.

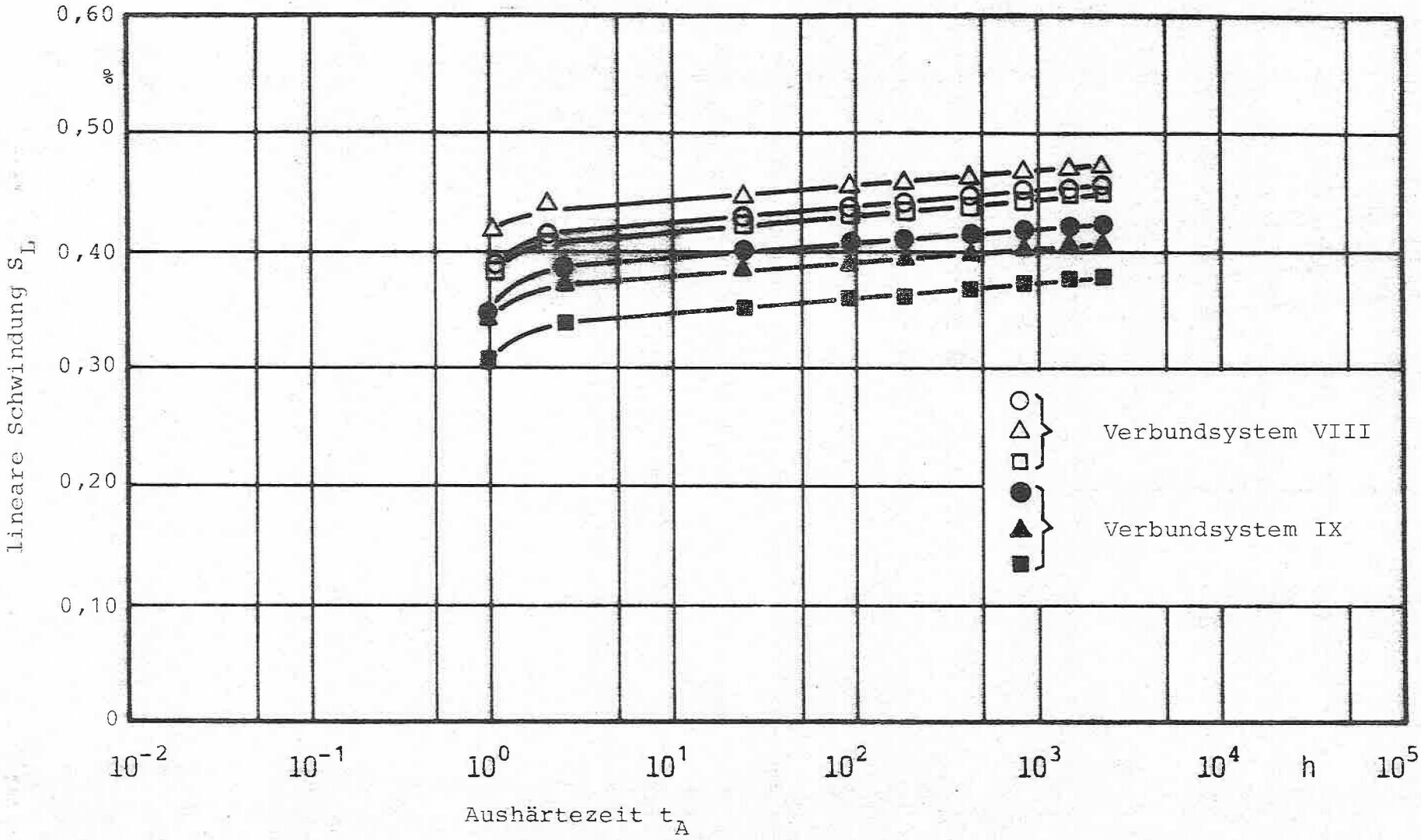


Bild 23: Lineare Schwindung S_L der Verbundsysteme VIII und IX in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

Verbundsystem	lineares Schwindmaß (%) ε_{SL10} bei $t_A = 10$ h	ε_{SL10^3} bei $t_A = 10^3$ h	Nachschwindung (%) $\varepsilon_{SL10^3} - \varepsilon_{SL10}$
I	0,164	0,176	0,012
I (mit Trennfolie)	0,220	0,235	0,015
I (getempert)	0,166	0,186	0,020
II	0,129	0,145	0,016
IV	0,072	0,101	0,029
VI	0,052	0,070	0,018
VIII	0,429	0,457	0,028
IX	0,369	0,396	0,030

Tabelle 4: Vergleichende Gegenüberstellung der linearen Schwindmaße

5.2.2 Ring-Methode

Bei der Ring-Methode schrumpft der RHB während der Reaktion auf den inneren Stahlring auf und verursacht einen Schwindungsdruck, der sich wiederum durch eine negative Tangtialdehnung im Ring äußert.

Diese am inneren Stahlring mittels Dehnungsmeßstreifen während der Versuchszeit t gemessenen Dehnungen ε_{ts} lassen sich unter Einbeziehung des Ring-E-Moduls E_s nach folgender Gleichung in Tangentialspannungen σ_{ts} umrechnen:

$$\sigma_{ts} = E_s \cdot \varepsilon_{ts} = f\ (t) \qquad (4)$$

Die Tangentialdehnungen im Ring ε_{ts} und der E-Modul des Stahlringes E_s sind dabei normalerweise von der Reaktionstemperatur des RHB ϑ_R und von der Außentemperatur ϑ_A (konstant 23°C) abhängig. Die Reaktionstemperatur ϑ_R hat auf den E-Modul des Stahlringes, wie die Vorversuche zeigten, keinen für die Messung bedeutenden Einfluß. Die Wärmeausdehnung des Innenringes muß bei der Ermittlung von ε_{ts} rechnerisch berücksichtigt werden.

Anhand der Beziehung

$$p = \frac{\sigma_{ts} \cdot s}{r_i} \qquad (5)$$

läßt sich der radial auf den Meßring wirkende Schwindungsdruck errechnen. Hierbei bedeuten s die Wanddicke und r_i der Radius des Meßringes.

Unter Voraussetzung der Gültigkeit des HOOK'schen Gesetzes im untersuchten Bereich kann die tangentiale Schwindspannung im RHB nach TIMOSHENKO [44] wie folgt berechnet werden [5], [45]:

$$\sigma_s = p\,[[1 + (\frac{d_i}{d_a})^2 \;/\; 1 - (\frac{d_i}{d_a})^2] + \mu] \qquad (6)$$

Die so ermittelten tangentialen Schwindspannungen sind in Bild 24 in Abhängigkeit von der Versuchszeit, die mit der Aushärtezeit gleichzusetzen ist, für die Systeme I, II, IV, V, VI und VIII dargestellt.

Vergleicht man den qualitativen Verlauf der tangentialen Schwindspannungen mit den Ergebnissen der Prismen-Methode, so läßt sich eine Ähnlichkeit feststellen. Die Systeme VI und VIII bilden wieder die Extremfälle, quantitativ gesehen ergeben sich jedoch beachtliche Verschiebungen inbesondere bei der Betrachtung des Schwindverhaltens bis 10 Stunden Aushärtezeit und des darauffolgenden Nachschwindungsprozesses.

Bedingt durch grundsätzlich verschiedene Meßanordnungen und Möglichkeiten der Schwindung - frei und behindert - waren bessere tendenzielle Übereinstimmungen nicht zu erwarten.

Bestrebungen, die tangentialen Schwindspannungen in lineare Schwindung in tangentialer Richtung nach der Beziehung

$$\varepsilon_s = \sigma_s \;/\; E_{RHB} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_s \;/\; E_{RHM} \qquad (7)$$

umzurechnen, sind nur eingeschränkt zu realisieren, da sich der E-Modul des RHB während der Aushärtezeit ändert. Es wäre also nötig, den unter den vorliegenden Bedingungen gültigen E-Modul-Verlauf im frühen Aushärtestadium zu kennen. Da sich die Ermittlung des E-Moduls unter den gegebenen Bedingungen wegen der behinderten Schwindung sehr schwierig gestaltet und da komplizierte Überschneidungen thermischer Vorgänge ebenfalls Einfluß nehmen, wurde von einer exakten

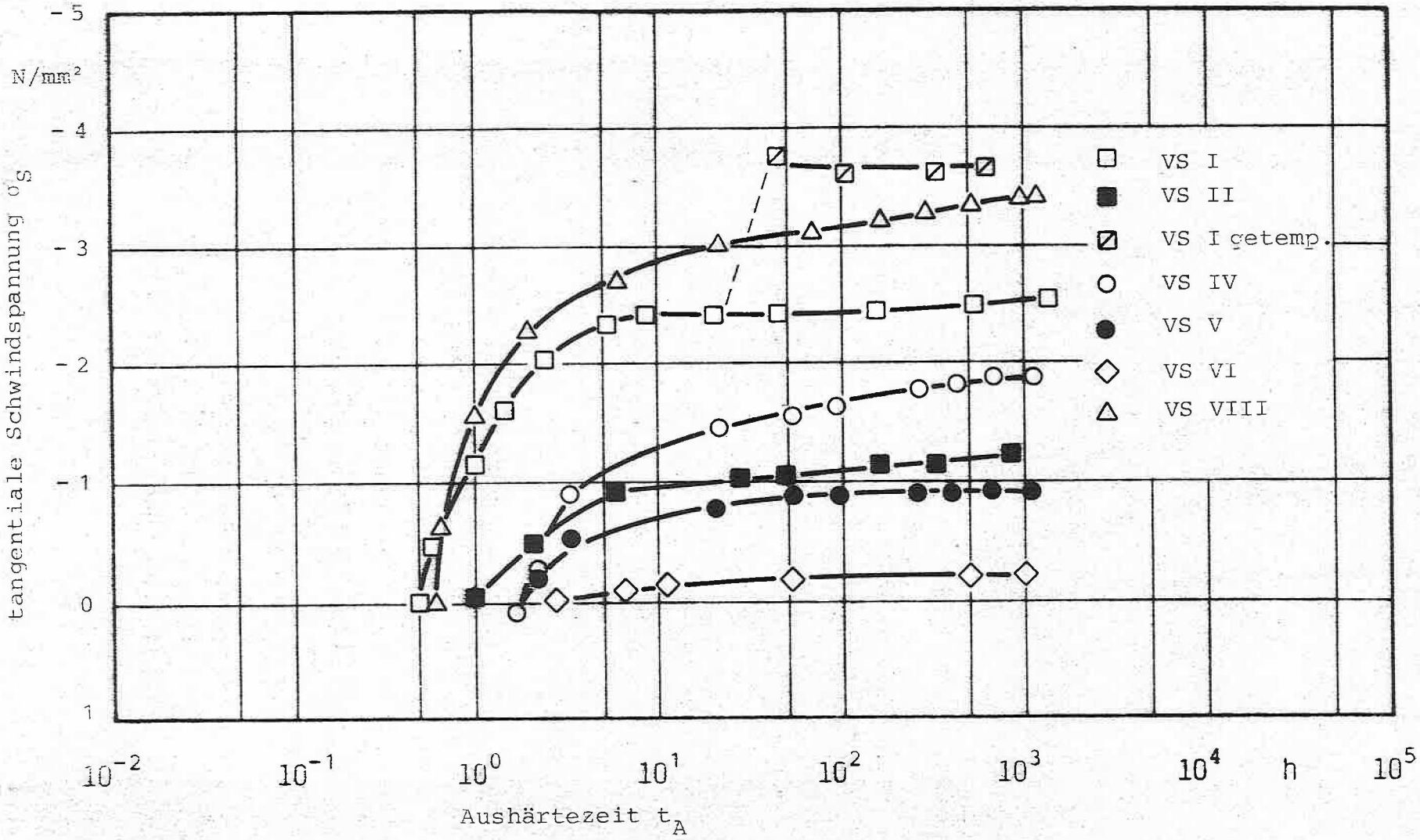


Bild 24: Tangentiale Schwindspannung σ_s in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

Bestimmung der Schwindung verzichtet. Stattdessen kann auf eine tendenzielle Entwicklung hingewiesen werden, die darauf hindeutet, daß die Schwindung bis 10 Stunden Aushärtezeit vermutlich nicht so ausgeprägt ist wie die tangentiale Schwindspannung, da in dieser Reaktionsphase ein deutlicher Anstieg des E-Moduls zu erwarten ist.

Die Problematik der thermischen Vorgänge sei im folgenden angedeutet.

Aus Bild 25 ist ersichtlich, daß die Schwindspannungen zwar zeitversetzt zur Reaktionstemperatur nacheilen, daß aber ein ähnlicher charakteristischer Verlauf erfolgt. Dies ist dadurch zu erklären, daß sich die Folgen der exothermen chemischen Reaktion in der Matrix nicht spontan in physikalischen Größen äußern, sondern daß die bei der Reaktion entstehende Wärmeentwicklung eine beschleunigte räumliche Vernetzung und somit Volumenkontraktion nach sich zieht. Die thermische Ausdehnung des RHB wirkt, soweit die äußerliche Behinderung dies erlaubt, zunächst diesem Vorgang entgegen und überlagert sich bei abklingender Reaktionstemperatur der Schwindung.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient des RHB ändert sich während des Reaktionsvorganges ebenfalls und nimmt ab, d.h. Längenausdehnungen beim Temperaturanstieg sind absolut gesehen größer als die Kontraktion bei der Abkühlung. Die einzelnen Vorgänge, die im RHB während der Reaktionsphase $0\ h < t_A < 10\ h$ durch die Temperaturänderungen ausgelöst werden, sind meßtechnisch mit vertretbarem Aufwand nicht erfaßbar. Für die einzelnen Verbundsysteme wären vermutlich verschiedene, aber im Prinzip ähnliche, der jeweiligen Reaktionscharakteristik entsprechende Abläufe zu erwarten.

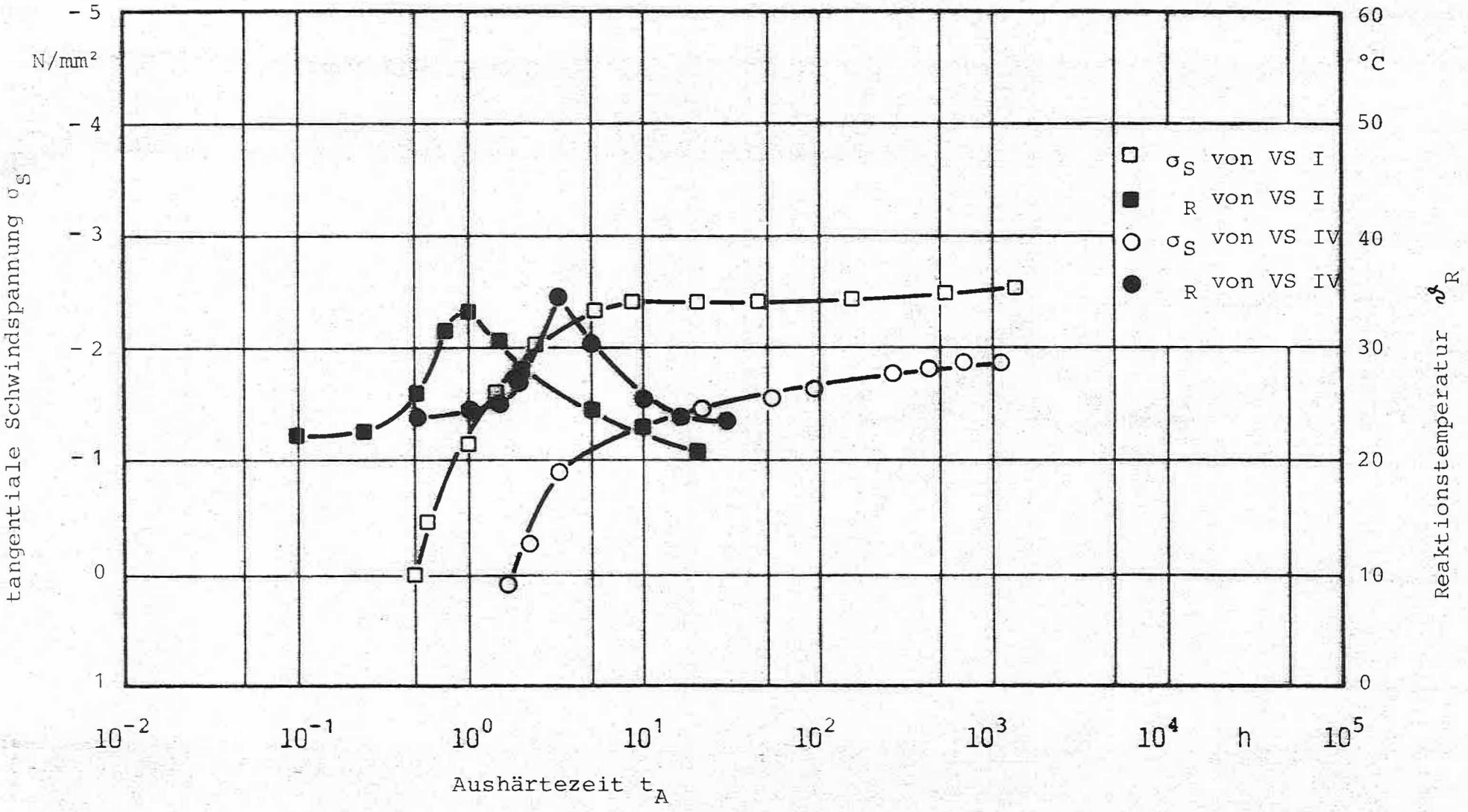


Bild 25: Lineare Schwindung σ_S und Reaktionstemperatur ϑ_R der Verbundsysteme I und IV in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

Unter diesen Voraussetzungen erscheint eine Umrechnung der tangentialen Schwindspannungen in tangentialwirkende lineare Schwindung bei äußerer Behinderung wenig sinnvoll. Die tangentiale Schwindspannung muß somit als Vergleichsmaß für die behinderte Schwindung der untersuchten Systeme betrachtet werden.

5.2.3 Thermometer-Methode

Wie bereits aus den Vorversuchen resultiert, ist die Thermometer-Methode bei RHB nur beschränkt anwendbar. Bedingt durch die Struktur der Formmasse, insbesondere der Füllstoffe, wirken auf das relativ kleine Quecksilberreservoir ungleichmäßige Beanspruchungen, die zu Fehlmessungen bzw. zu falscher Interpretation der Meßergebnisse führen können. Aus diesen Gründen sind die erzielten und im folgenden beschriebenen Resultate mit gewissen Einschränkungen zu werten.

In Bild 26 und 27 sind zunächst die bei den Verbundsystemen I, IV, VI und VIII auf das Quecksilberreservoir wirkenden Drücke über der Aushärtezeit zusammengefaßt.

Die Ermittlung des auf der Ordinate aufgetragenen Druckes erfolgt anhand des von der Thermometerskala abgelesenen Wertes a und der nahe des Thermometers mittels Thermoelement ebenfalls zur gleichen Zeit gemessenen Temperatur $\vartheta_A = f(t)$ nach folgender Gleichung:

$$p_S = C \cdot (a - \vartheta_A) \qquad (8)$$

Der Wert C ist die aus der Eichkurve des jeweiligen Thermometers empirisch ermittelte Druck-Konstante.

Die Kompensation der Temperatur während der Reaktions- und der Abkühlphase geschah auf rechnerischem Wege, da eine

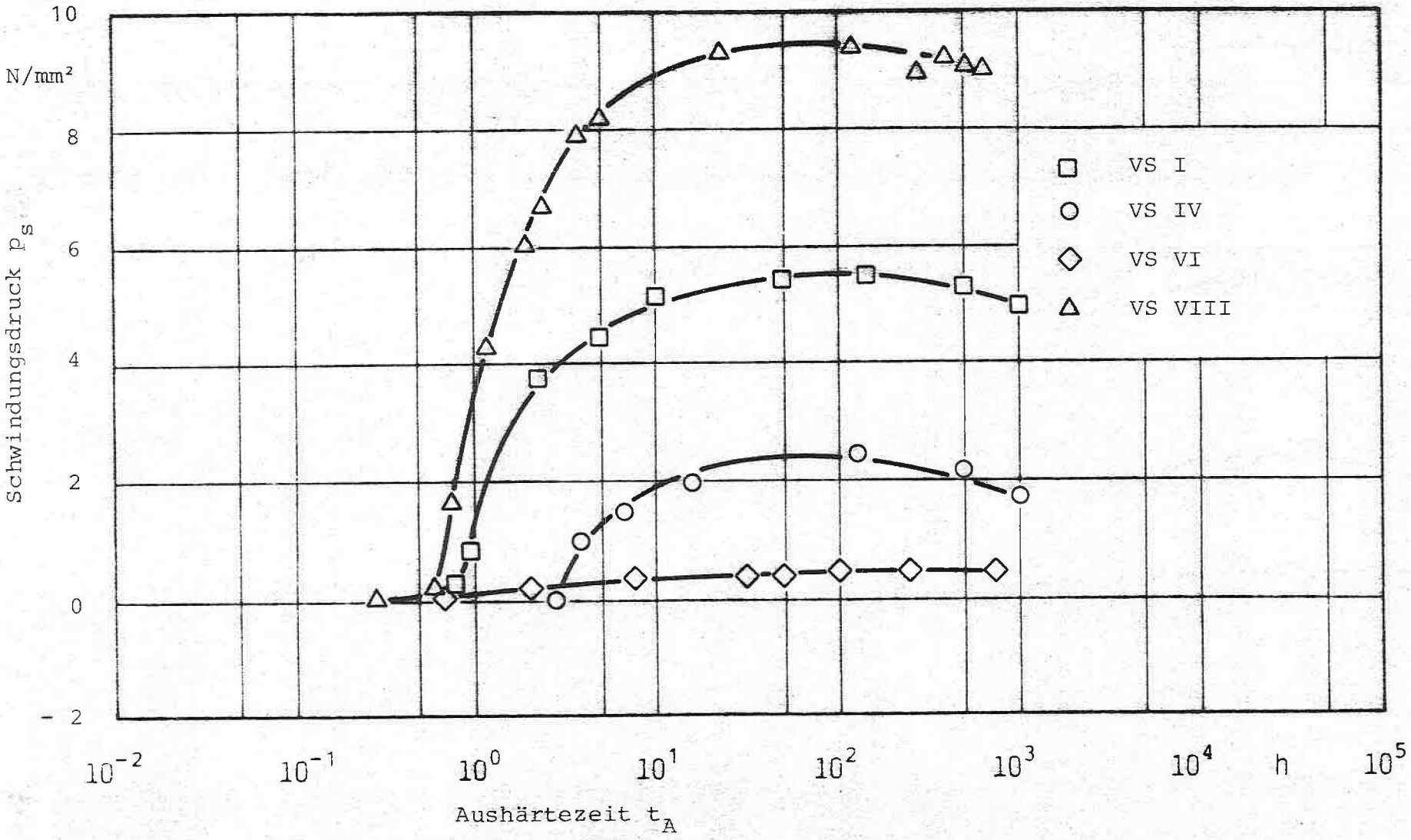


Bild 26: Schwindungsdruck p_s im Plattenzentrum in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

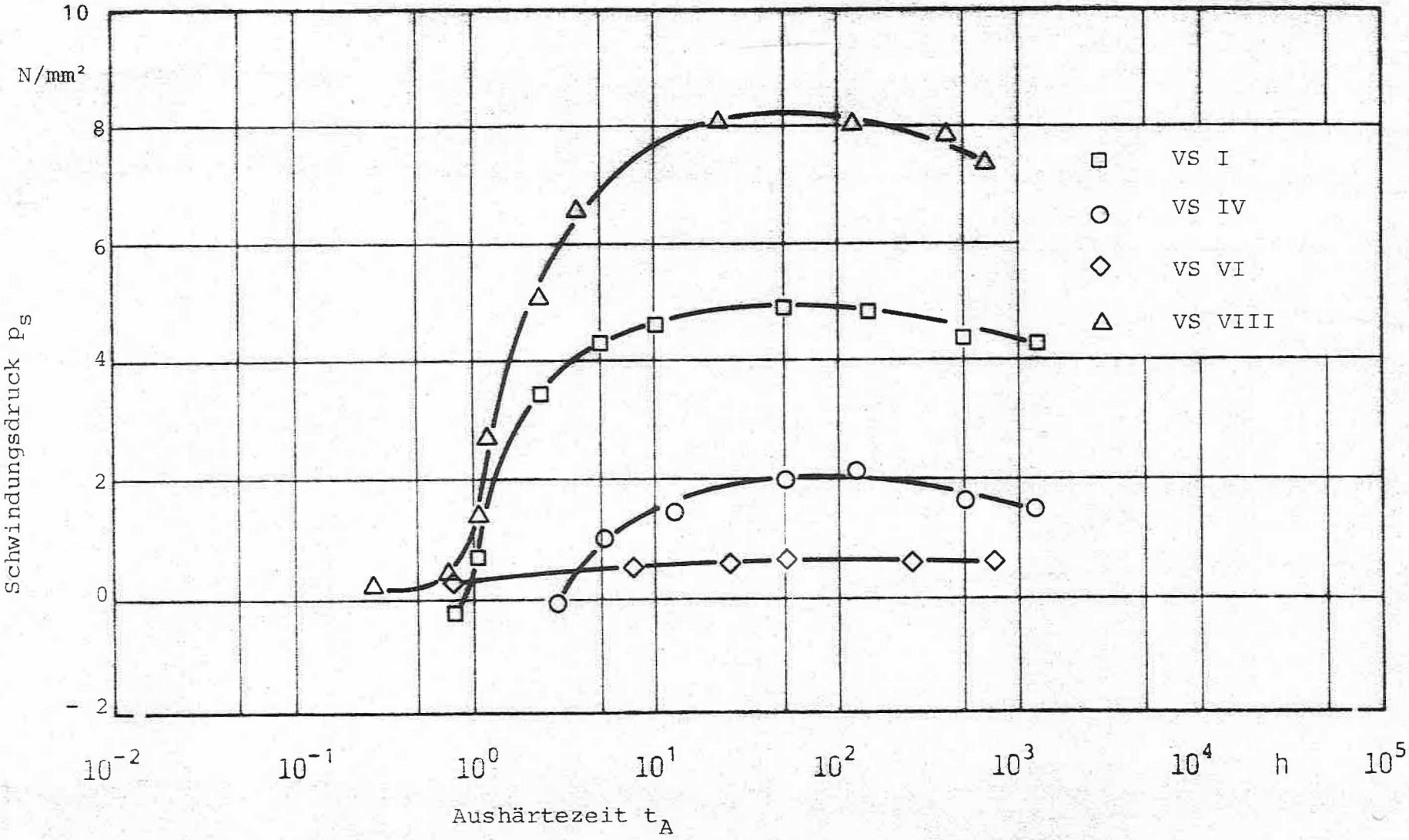


Bild 27: Schwindungsdruck p_s im Plattenviertelspunkt in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

Kombination der beiden Meßvorgänge - Temperaturmessung und visuelle Thermoeterablesung - meßtechnisch schlecht realisierbar ist.

Bild 26 zeigt das Verhalten im Diagonalschnittpunkt der RHB-Platte, wogegen Bild 27 die Ergebnisse im Viertelspunkt der Platte darstellt. Die Versuchsanordnung und die Lage der Meßstellen sind Bild 5 zu entnehmen.

Betrachtet man den Verlauf der Kurven in Bild 26, so kann man etwa die gleiche Zuordnung der Systeme zueinander wie bei den anderen Meßmethoden erkennen. Auffallend ist dabei, daß ab 100 Stunden Aushärtezeit der auf das Quecksilberreservoir wirkende Druck scheinbar wieder deutlich abfällt. Eine meßtechnisch oder physikalisch zu belegende Erklärung kann hierzu nicht gegeben werden. Vermutlich findet jedoch während der Nachreaktionsphase ein Abbau der Schwindspannungen im Meßbereich durch Verlagerung der Spannungen in der Platte statt.

Eine weitere Erklärung für den Abfall der Kurven ist darin zu sehen, daß der unter Druck stehende Bereich des RHB relaxiert. Tritt bei gleichbleibender Werkstoffdeformation eine Verringerung des E-Modul infolge Kriechens unter ständiger Druckspannung ein, so ist mit einer Reduzierung des auf den Thermometer wirkenden Druckes zu rechnen. In [1] und [5] wurde die Möglichkeit eines derartigen Verhaltens ebenfalls angedeutet. Der Kurvenabfall wäre somit vom Relaxationsverhalten des RHM abhängig. Nach einer Aushärtungszeit > 1000 Stunden wäre logischerweise ein Einpendeln der Kurven auf ein gleichbleibendes Druckniveau zu erwarten.

Beim System VI, das ohnehin kaum erfaßbare Drücke aufbaut, ist dieser Effekt nicht erkennbar. Die Ursache dafür dürfte vorwiegend in der unzureichenden Meßgenauigkeit zu suchen sein. Wahrscheinlich ist diese Erscheinung bei diesem Verbundsystem auch nicht so ausgeprägt, da hier generell keine so hohen Spannungen entstehen, die eine Verlagerung oder einen Abbau bewirken könnten. Zudem ist nach einer Aushärtezeit > 100 Stunden kaum mehr eine Nachreaktion meßbar.

Beim System VIII sind, wie schon bei den anderen Methoden festgestellt, höhere Schwindvorgänge zu verzeichnen. Der in Bild 27 dargestellte Verlauf der Drücke auf das Quecksilberreservoir im Viertelpunkt der RHB-Platte entspricht tendenziell gesehen etwa dem Verlauf in Bild 26. Die absolute Lage der Kurven ist mit Ausnahme des Systems VI niedriger. System VI weist im Rahmen der Meßgenauigkeit gleiches Verhalten bei beiden Meßstellen auf.

Der Vergleich der Bilder 26 und 27 läßt den Schluß zu, daß im Viertelpunkt der Platte geringere Schwindspannungen als im Diagonalenschnittpunkt auftreten. Die Unterschiede werden in Bild 28 für System VIII, bei dem sie ausgeprägt sind, separat hervorgehoben. Das verschieden hohe Niveau fällt bereits unmittelbar nach dem Beginn der Reaktion auf. Setzt man voraus, daß der Reaktionsstart in allen Bereichen der RHB-Platte gleichzeitig einsetzt, so sind die Druckunterschiede, die während der gesamten Reaktionsphase annähernd konstant bleiben, auf eine intensivere Anfangsreaktion im Plattenzentrum zurückzuführen. Ein möglicher Temperaturstau in diesem Bereich, bedingt durch schlechte Wärmeleitung, könnte eine Erklärung für dieses Verhalten sein. Für die Systeme I, IV und VI gelten die gleichen Erkenntnisse und Annahmen wie für System VIII.

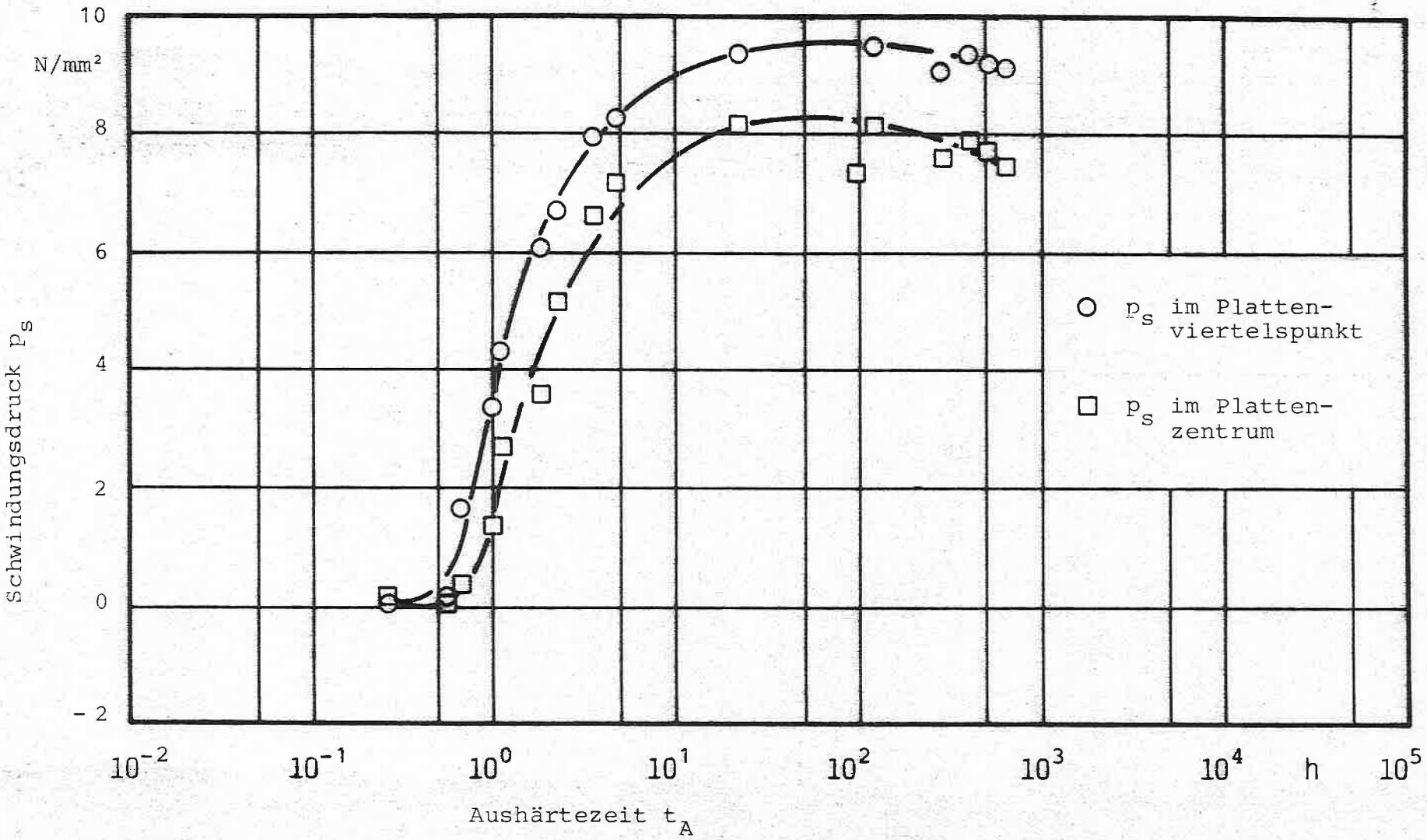


Bild 28: Vergleich des Schwindungsdruckes im Plattenviertelspunkt und im Plattenzentrum beim Verbundsystem VIII

Da eine Beeinträchtigung der Messungen durch die Füllstoffgeometrie, insbesondere bei Verwendung von Splitt als Grobfüllstoff, zu befürchten war, erfolgten Vergleichsmessungen an den Systemen II und V unter sonst gleichen Bedingungen. Entgegen den Erkenntnissen aus den Untersuchungen nach der Prismen- und der Ring-Methode bauten sich bei der Verwendung von Rundkorn als Grobfüllstoff keine Drücke auf, die auf größere Schwindung hindeuten. Bild 29 zeigt den Verlauf der auf das Quecksilberreservoir wirkenden Drücke für die Systeme II und V im Plattenviertelspunkt und im Diagonalschnittpunkt. Die Differenz zwischen den Drücken bei beiden Meßstellen ist den aus Bild 26 und 27 zu entnehmenden Unterschieden ähnlich. Auf den Vergleich des Verhaltens der Systeme VI und VII wurde verzichtet, da die Unterschiede, falls überhaupt vorhanden, kleiner als die Meßwertschwankungen wären.

Die weiter oben dargelegte Meinung, daß die Schwindung von RHB durch die Gestalt der Grobfüllstoffe beeinflußt wird, scheint sich hier nicht zu bestätigen. Da die nach der Thermometer-Methode ermittelten Ergebnisse vermutlich nicht so aussagekräftig sind und da die festgestellten Größen vorwiegend von den lokal stattfindenden Schwindvorgängen bestimmt werden, ist diesem Ergebnis weniger Bedeutung beizumessen.

Die nach der Thermometer-Methode ermittelten Schwindungsdrücke als Funktion der Aushärtezeit stellen streng betrachtet nur Kenngrößen dar, die unter Idealbedingungen, d.h. unter gleichmäßiger Druckverteilung auf das Quecksilberreservoir, gelten, da unter diesen Voraussetzungen die Eichung der Thermometer erfolgte. Treten ungleichmäßig auf die äußere Oberfläche des Reservoirs wirkende Drücke

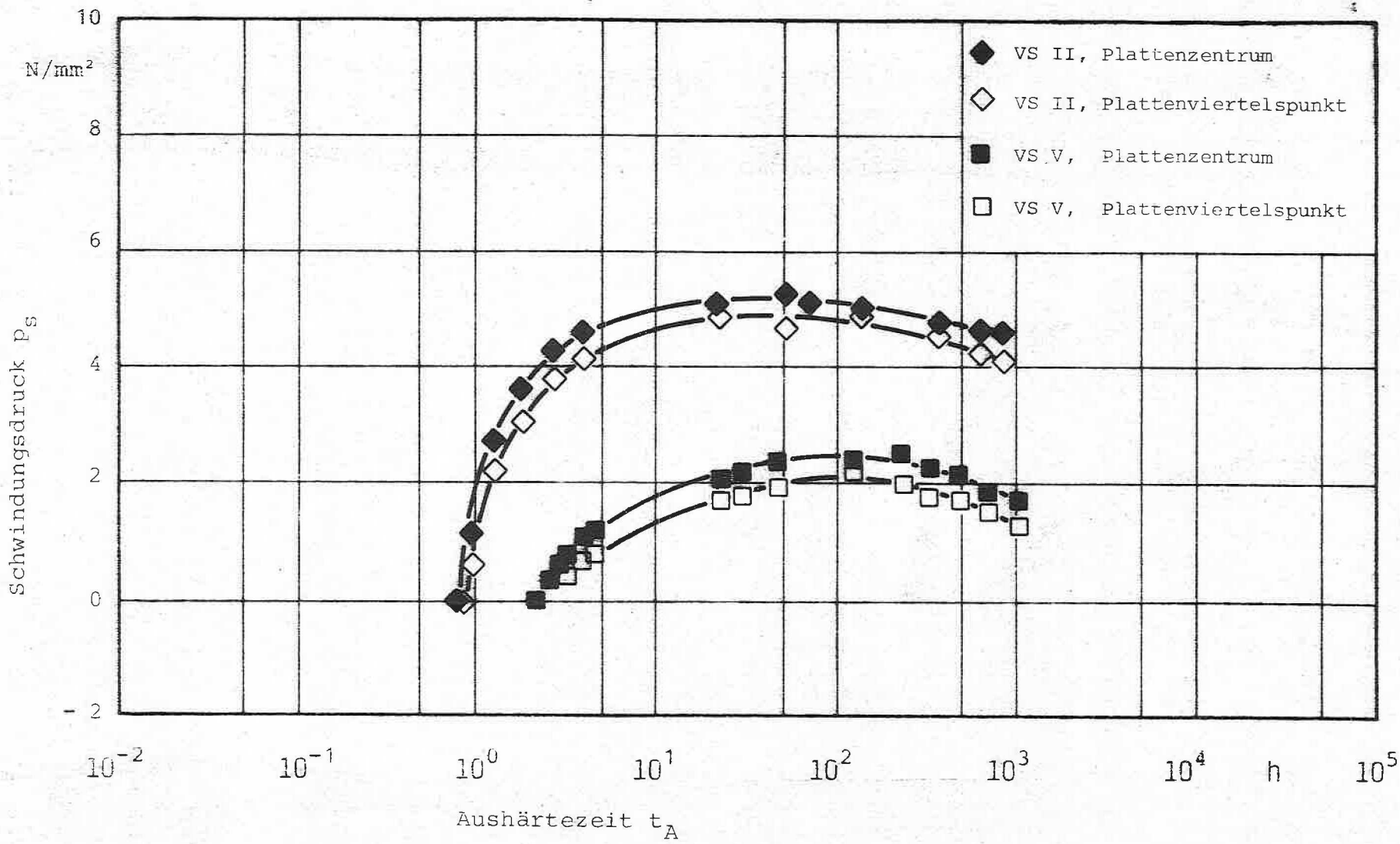


Bild 29: Vergleich der Schwindungsdrücke der Verbundsysteme II und V im Plattenviertelspunkt und im Plattenzentrum

auf, etwa durch Füllstoffe oder durch Orientierungen, so ist zunächst in Frage gestellt, inwieweit der jeweilige Meßwert brauchbar ist. Man setzt also bei dieser Methode voraus, daß der durch die Volumenkontraktion des RHB erzeugte Druck gleichmäßig auf die annähernd zylindrische Oberfläche des Reservoirs verteilt ist. Da genaue Angaben über die Geometrie des Reservoirs, z.B. Rundheit und Wanddickenverteilung, fehlen, ist eine Umrechnung des Druckes in tangential und radial wirkende Größen nicht möglich. Die bei der Vernetzung der Reaktionsharze stattfindenden Volumenänderung kann also hier nicht, wie z.B. bei den anderen Methoden aufgezeigt, quantitativ erfaßt, sondern nur als qualitative Beurteilungsgröße herangezogen werden. Der durch die Volumenkontraktion des RHB auf das Quecksilberreservoir wirkende Druck kann deshalb nur als Vergleichsmaßstab betrachtet werden.

Setzt man annähernd gleiches, reaktives und elastisches Verhalten der zu vergleichenden RHB-Systeme voraus, so kann unter Beachtung der aufgezeigten Problematik diese Methode jedoch zur qualitativen Beurteilung der Volumenschwindung herangezogen werden.

5.2.4 Sensor-Methode

Die anhand der verhältnismäßig aufwendigen Sensor-Methode gewonnenen Meßdaten sind unter Berücksichtigung verschiedener Einflußfaktoren in Kenngrößen umzuwandeln, die eine Beurteilung der Schwindungsvorgänge im Bereich eingeschlossener Körper erlauben. Wie bei der Thermometer-Methode wurden auch hier im Plattenviertelpunkt und im Plattenzentrum Messungen vorgenommen. Die in diesen Bereichen eingebetteten Meßwürfel lieferten Meßdaten, die aus der Schwindung und der Wärmeausdehnung in Plattenebene resultieren. Unterschieden wird hier zwischen Vorgängen in Plattenlängs- und in Plattenbreitachse.

Die Bilder 30 und 31 stellen den Verlauf der Meßwertkurven für das Plattenzentrum dar. Aufgetragen sind die mittels DMS gemessenen Verformungen der Sensor-Würfel ohne Berücksichtigung der Temperatureinflüsse; Bild 30 gilt für die Verformungen in Plattenlängsachse, Bild 31 für die Plattenbreitachse. Widererwarten muß festgestellt werden, daß an den Würfeln bei allen Verbundsystemen zunächst keine Stauchung, sondern eine Dehnung auftritt, die in beiden Vorzugsrichtungen etwa gleich groß ist.

Die Lage der Kurven zueinander reiht sich, zumindest im Bereich des Reaktionsmaximums, in die nach den anderen Methoden ermittelten Abhängigkeiten gut ein.

Für die Interpretation der Schwindungsvorgänge sind die Ergebnisse während der Anfangsphase alleine nicht verwendbar, da sie das Gegenteil zu dem logischerweise auftretenden Verhalten bedeuten würden. Berücksichtigt man die Ausdehnung eines Würfels, der ohne äußere mechanische Einwirkungen nur der Reaktionstemperatur ausgesetzt wird, so würde dieser aufgrund seiner thermischen Eigenschaften bei den auftretenden Reaktionstemperaturen eine erhebliche Ausdehnung erfahren. Dieser Ausdehnung wirkt beim eingegossenen Würfel die durch den Schwindungsprozeß erzeugte Stauchung entgegen. In der Reaktionsphase ist die theoretische thermische Würfelausdehnung folglich betragsmäßig größer als die gemessene Ausdehnung des eingegossenen Würfels. Die Überlagerung des Meßwertes und der rechnerischen Wärmeausdehnung im Plattenzentrum ist in den folgenden Abbildungen für die einzelnen Systeme wiedergegeben. Die Differenz zwischen gemessenen und rechnerischen Würfelausdehnungen ist ebenfalls in den Abbildungen eingezeichnet. Sie läßt sich grafisch oder rechnerisch nach folgender Formel ermitteln:

$$\varepsilon_{Se}\ (t_A) - \varepsilon_{ST}\ (t_A) = \varepsilon_S^*\ (t_A) \qquad (9)$$

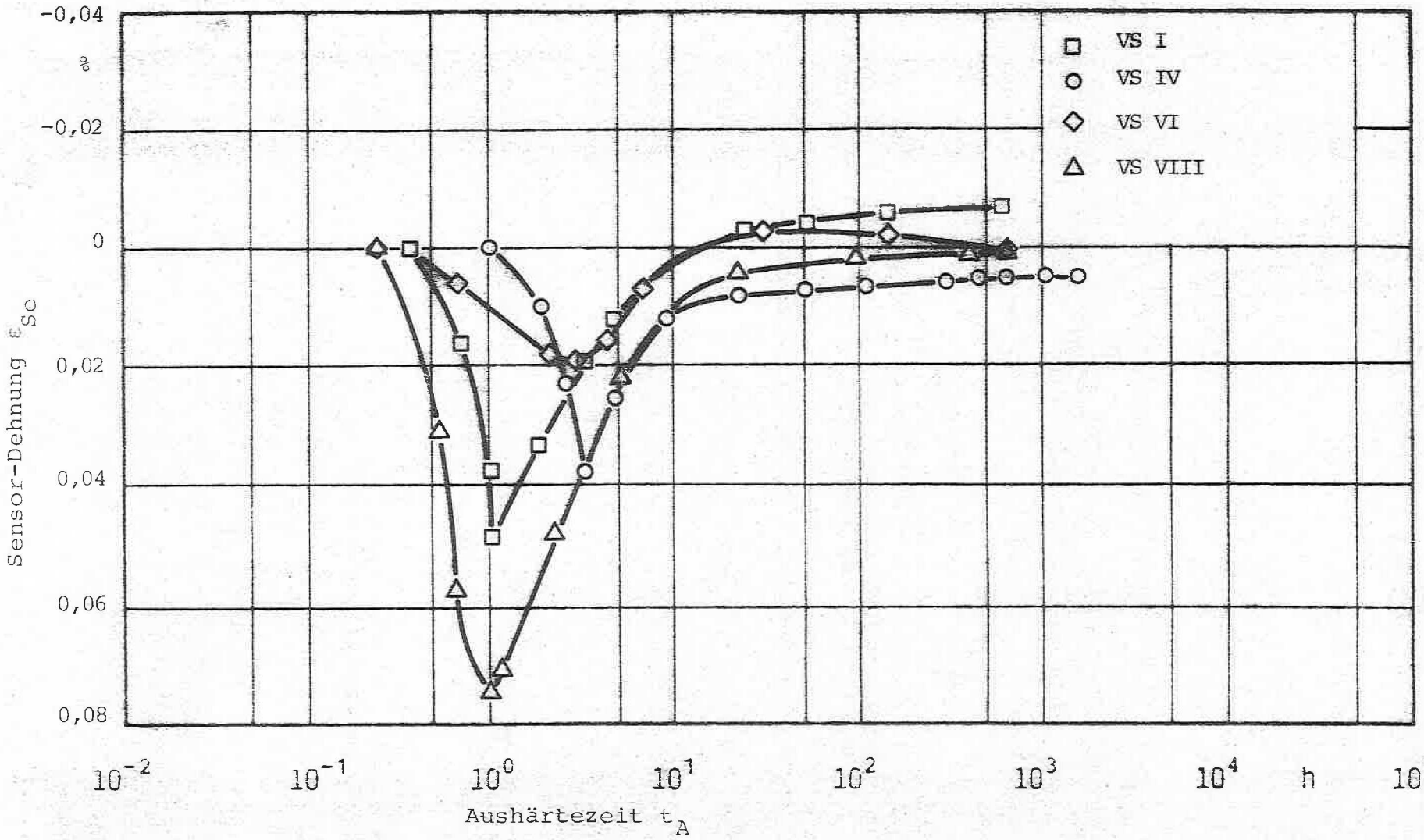


Bild 30: Dehnung ε_{Se} der Sensoren in Plattenlängsachse in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

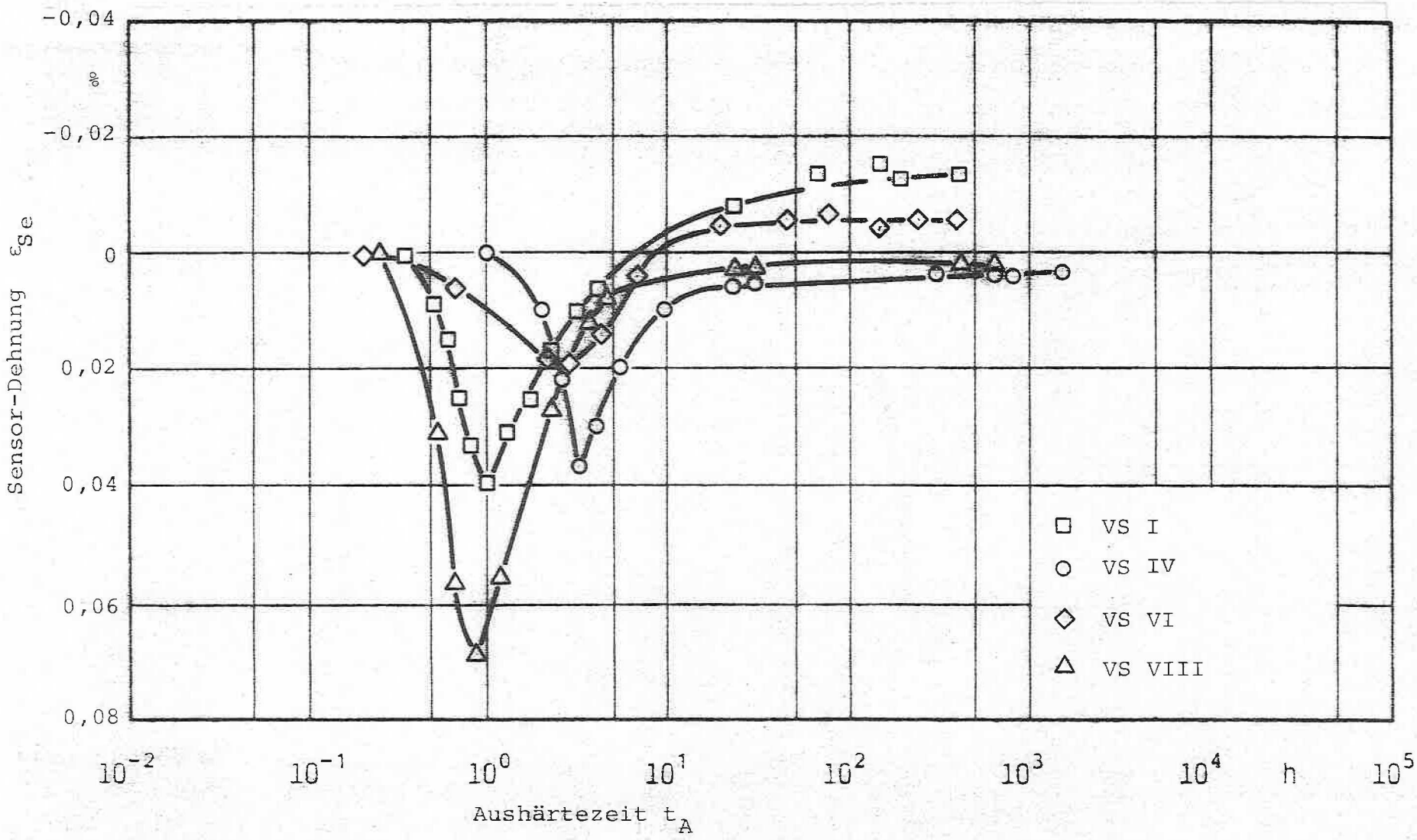


Bild 31: Dehnung ε_{Se} der Sensoren in Plattenbreitachse in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

Auf die Darstellung der Verhältnisse im Plattenviertelpunkt für die Systeme IV, VI und VIII wurde verzichtet, da die Abweichungen von den gezeigten Kurven unbedeutend erscheinen und da sie teilweise sehr gering sind. Das System I zeigte die größten Unterschiede zwischen Plattenviertelpunkt und Plattenzentrum, deshalb werden für dieses System die Ergebnisse beider Meßstellen dargestellt. Die Bilder 32 und 33 stellen den Verlauf im Plattenzentrum für beide Vorzugsrichtungen dar. Bild 34 und 35 enthalten die Meßergebnisse aus den Viertelpunkten. Die für die Bilder 32 und 33 gültige Reaktionstemperaturkurve ist in Bild 36 eingezeichnet. Qualitativ wurde an beiden Meßstellen ein ähnliches Verhalten festgestellt. Bemerkenswert ist, daß im Plattenzentrum nach 10 Stunden Aushärtung in der Breitachse die verbleibende Stauchung größer ist als in der Längsachse. Der Unterschied ist jedoch nicht so groß, daß sich daraus eine eindeutige Begründung ableiten ließe.

In den Bildern 37 und 38 sind die Dehnungsverläufe für das System IV wiedergegeben. Die zugehörige Reaktionstemperaturkurve ist in Bild 39 dargestellt.

Das Verhalten des Systems VI ist aus den Bildern 40 bis 42 ersichtlich, wobei Bild 42 den Verlauf der Reaktionstemperatur zeigt.

Die am System VIII erzielten Ergebnisse sind in den Bildern 43 bis 45 zusammengefaßt; Bild 45 enthält den Reaktionstemperaturverlauf.

In den Bildern 46 und 47 sind die Differenzwertkurven jeweils für die Systeme I, IV, VI und VIII in Plattenlängs- (Bild 46) und in Plattenbreitachse (Bild 47) zusammengefaßt. Die Temperaturkurven stellen jeweils den Verlauf der Reak-

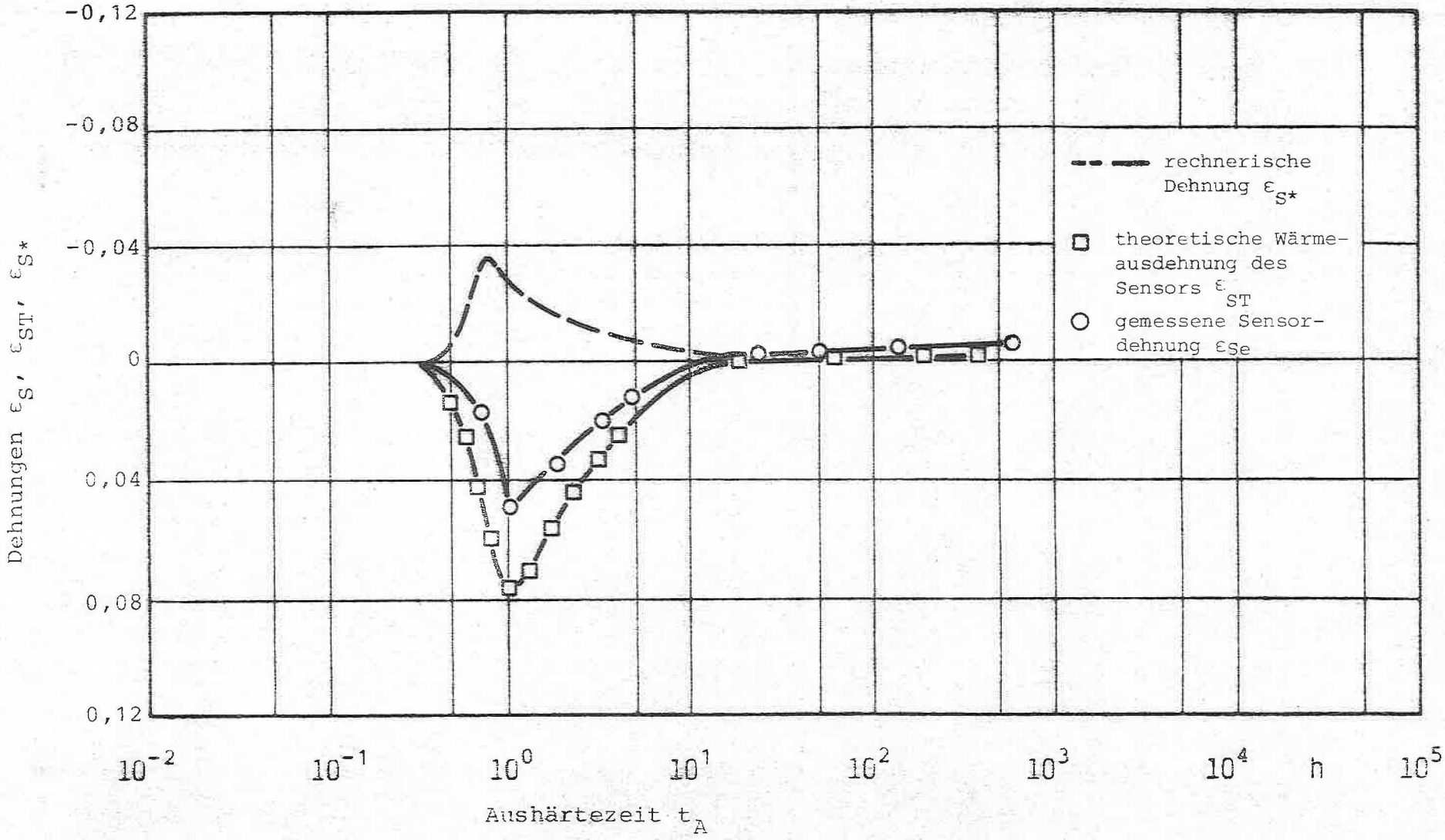


Bild 32: Gemessene und rechnerische Sensor-Dehnungen des Verbundsystemes I gültig für die Längsachse im Plattenzentrum

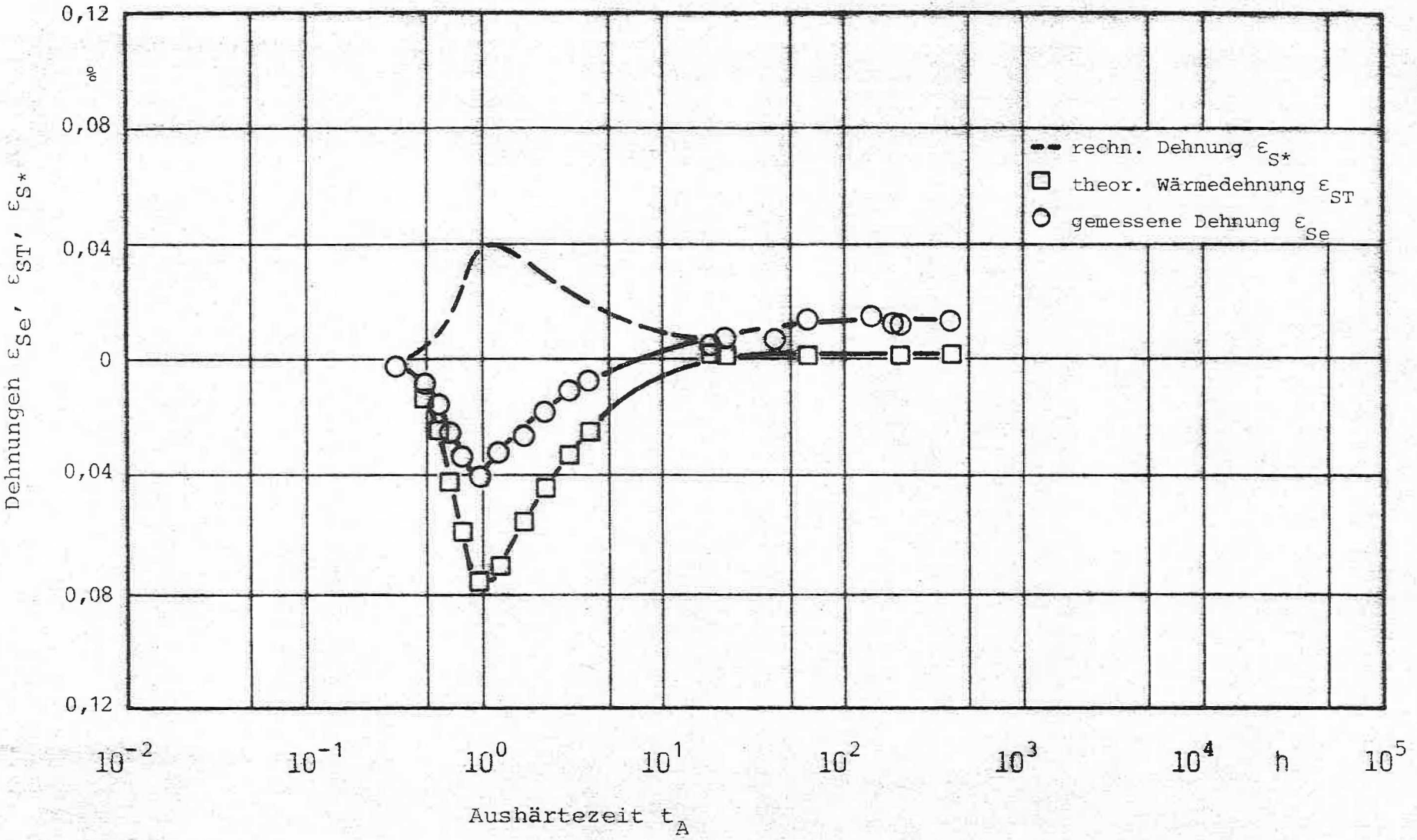


Bild 33: Gemessene und rechnerische Sensordehnungen des Verbundsystemes I gültig für die Breitachse im Plattenzentrum

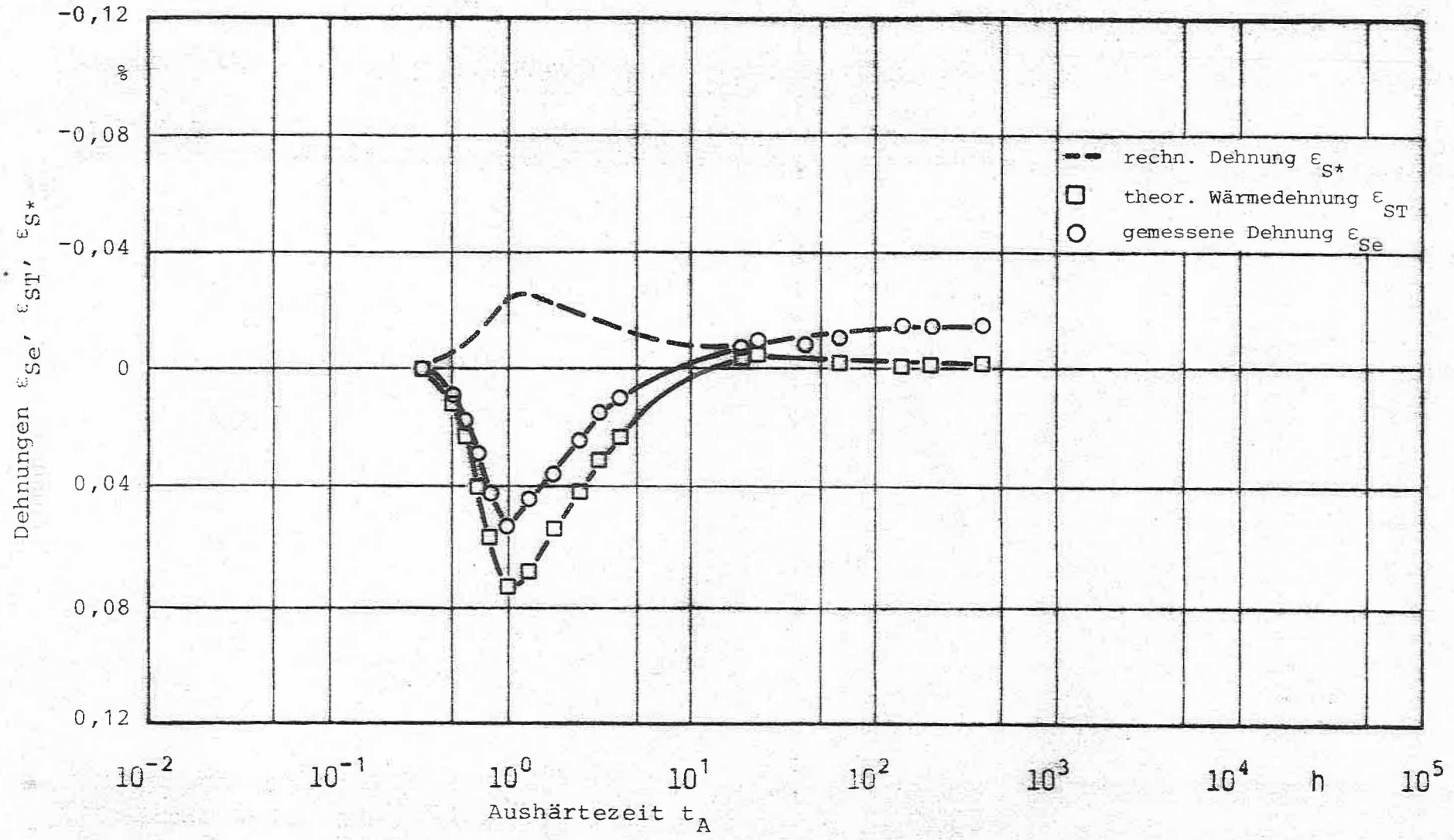


Bild 34: Gemessene und rechnerische Dehnungen des Verbundsystemes I gültig für die Längsachse im Plattenviertelspunkt

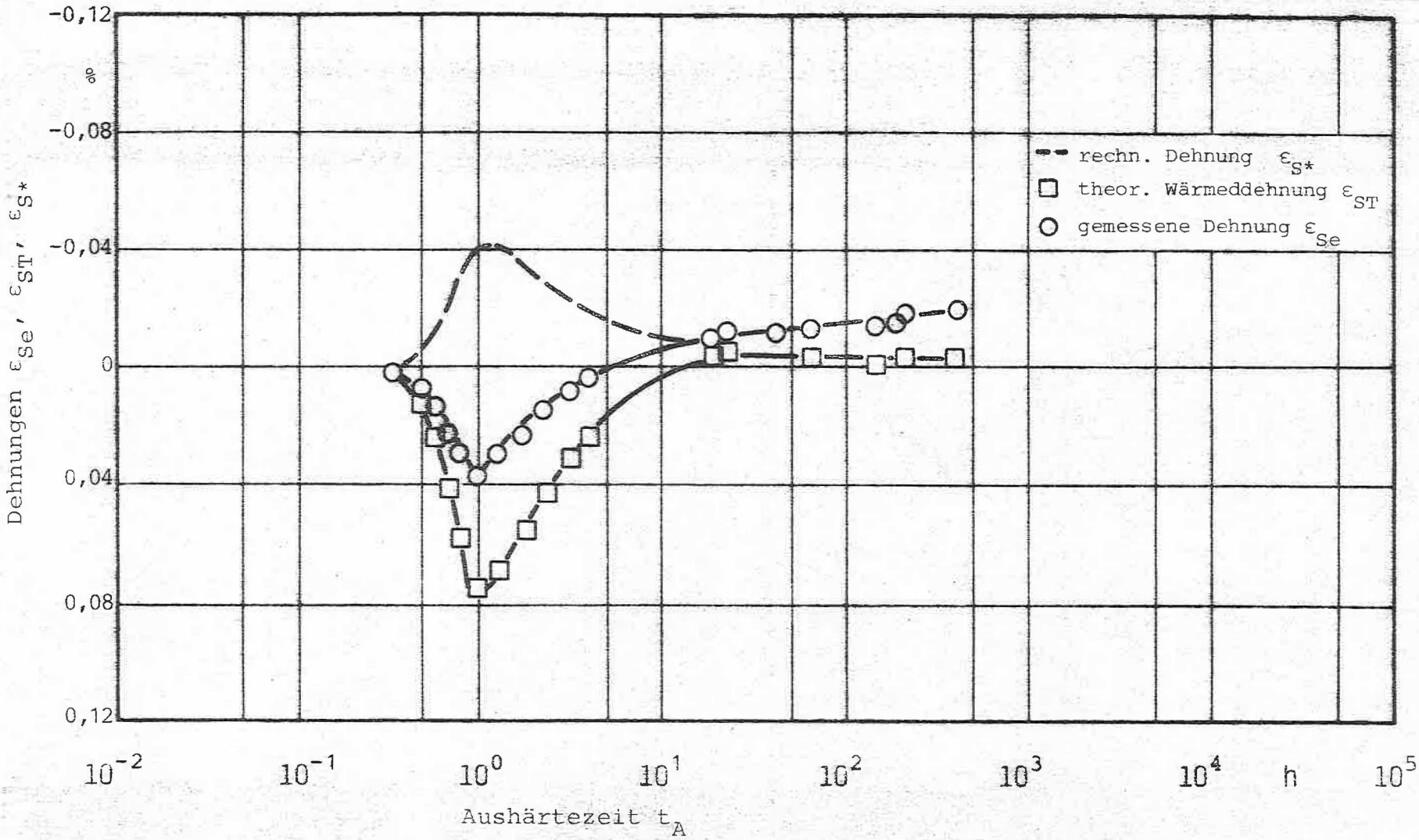


Bild 35: Gemessene und rechnerische Dehnungen des Verbundsystemes I gültig für die Breitachse im Plattenviertelspunkt

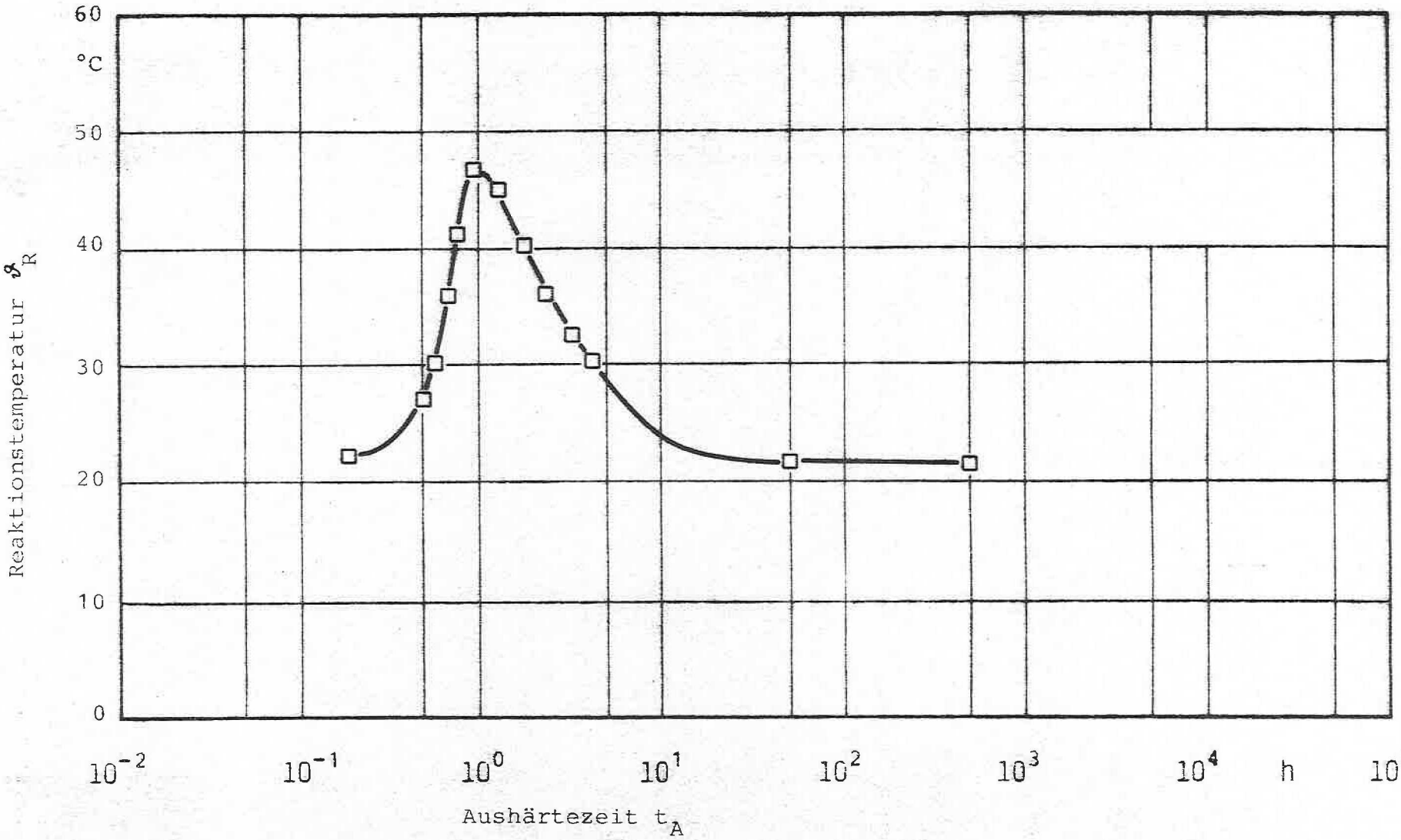


Bild 36: Reaktionstemperatur ϑ_R des Verbundsystemes I im Plattenzentrum in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

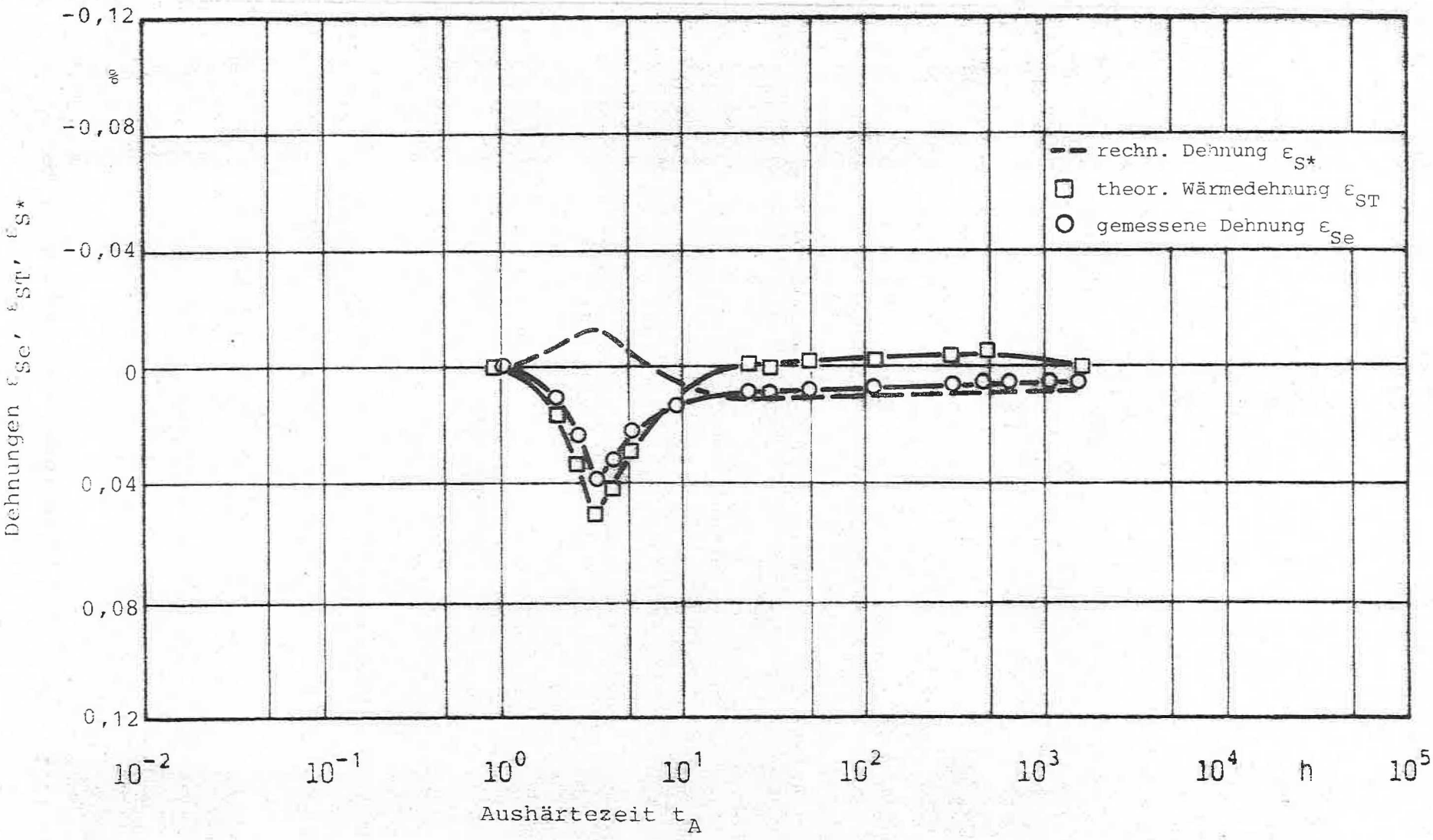


Bild 37: Gemessene und rechnerische Dehnungen des Verbundsystemes IV gültig für die Längsachse im Plattenzentrum

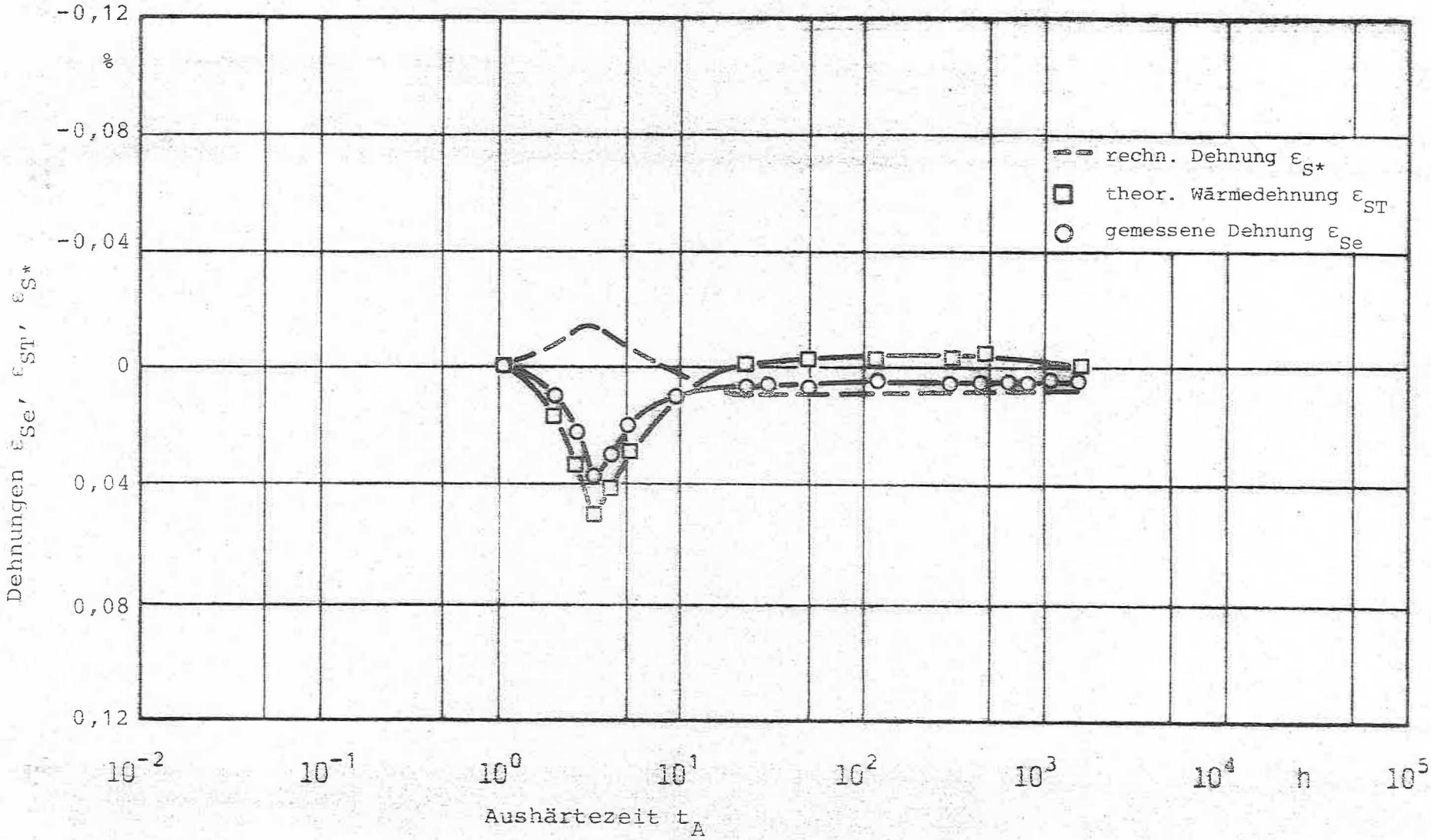


Bild 38: Gemessene und rechnerische Dehnungen des Verbundsystemes IV gültig für die Breitachse im Plattenzentrum

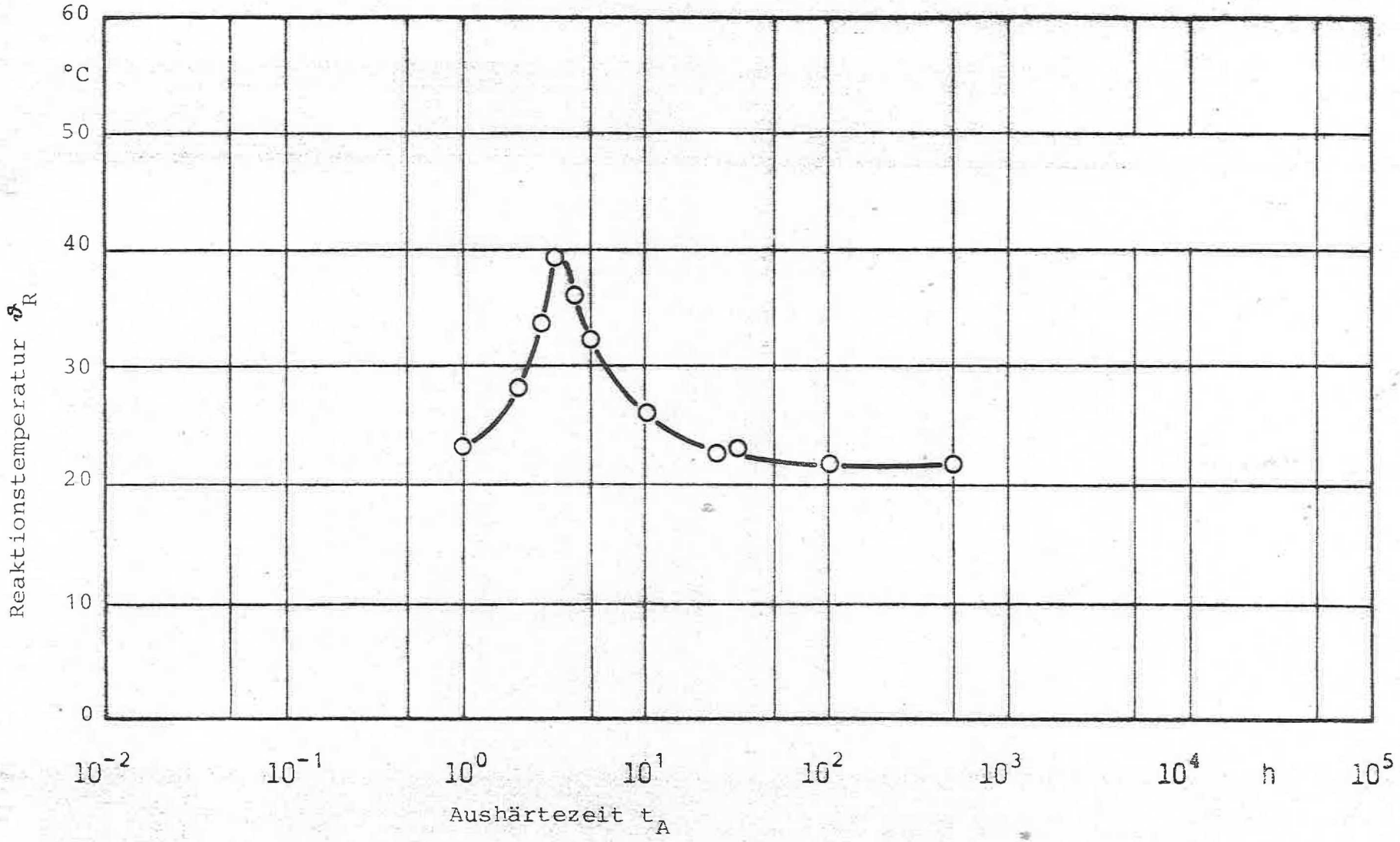


Bild 39: Reaktionstemperatur ϑ_R des Verbundsystemes IV im Plattenzentrum in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

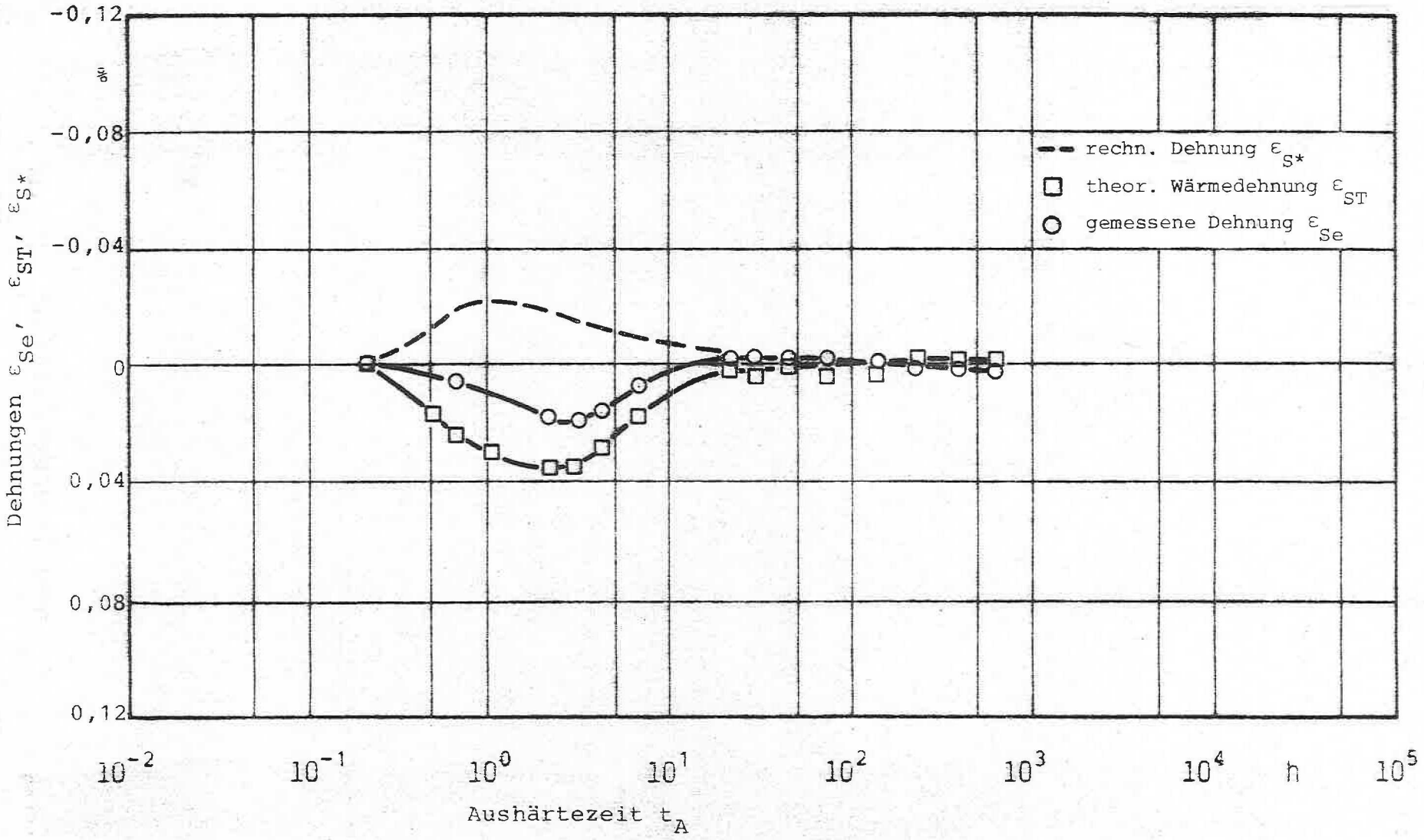


Bild 40: Gemessene und rechnerische Dehnungen des Verbundsystemes VI gültig für die Längsachse im Plattenzentrum

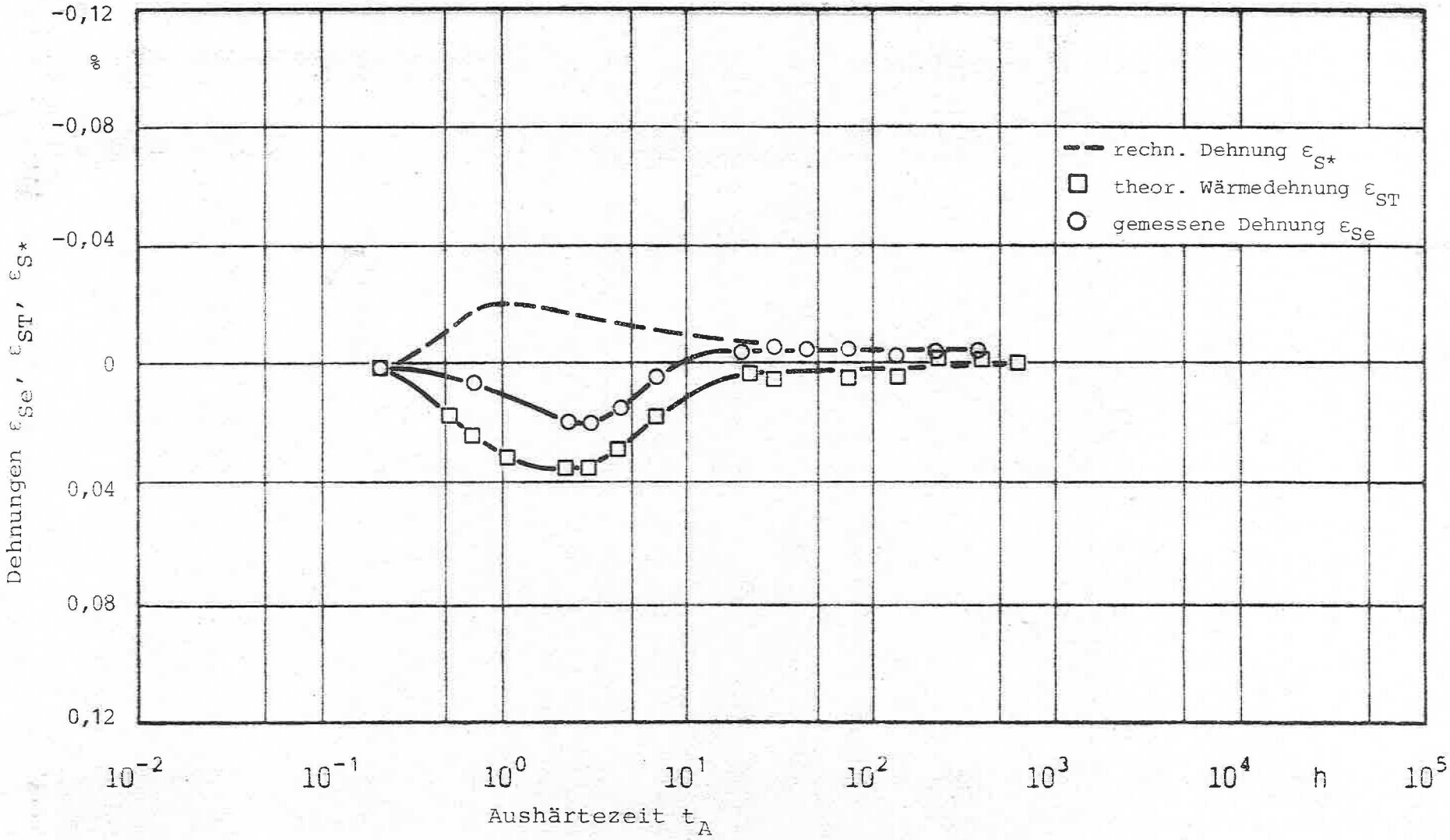


Bild 41: Gemessene und rechnerische Dehnungen des Verbundsystemes VI gültig für die Breitachse im Plattenzentrum

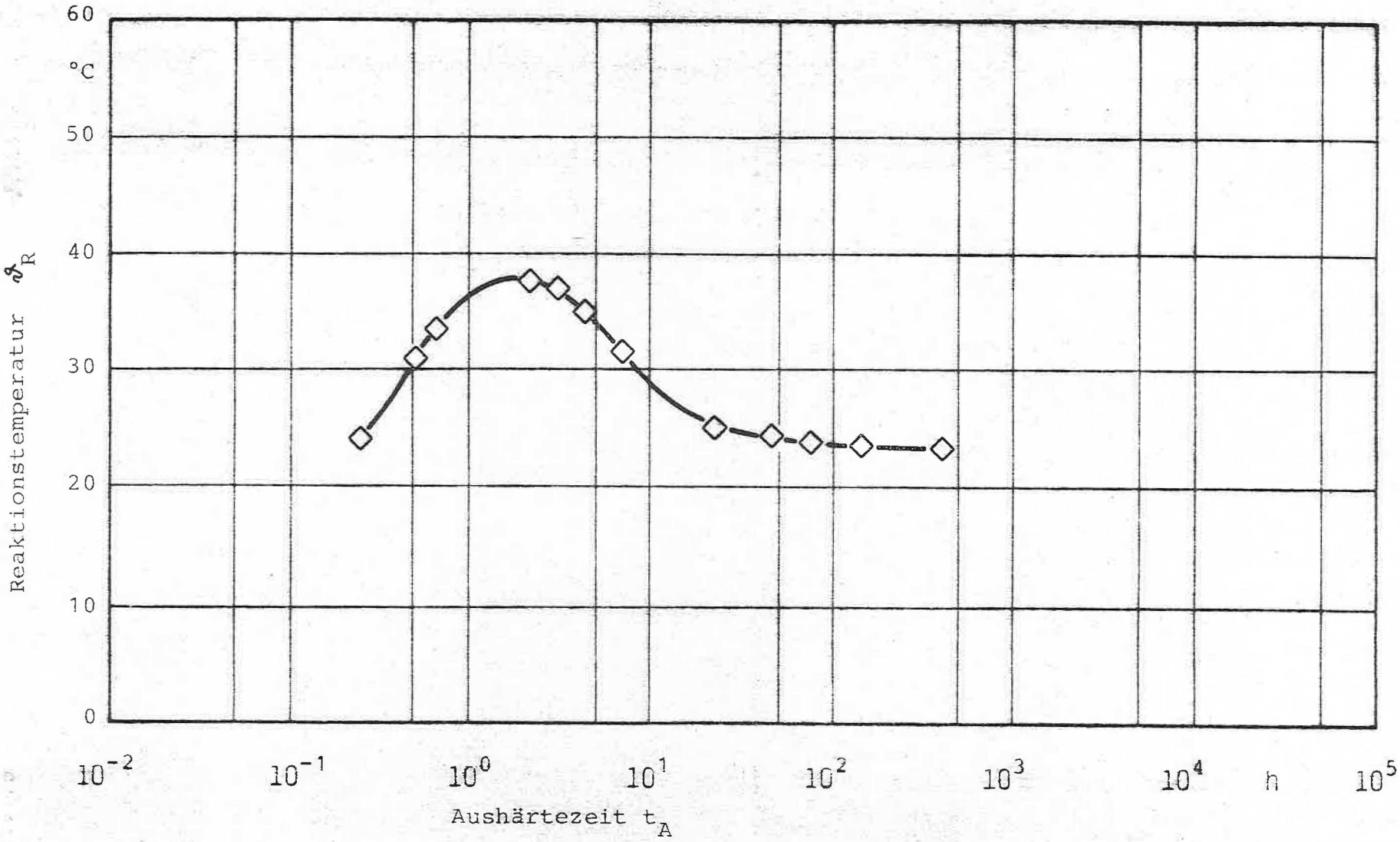


Bild 42: Reaktionstemperatur ϑ_R des Verbundsystemes VI im Plattenzentrum

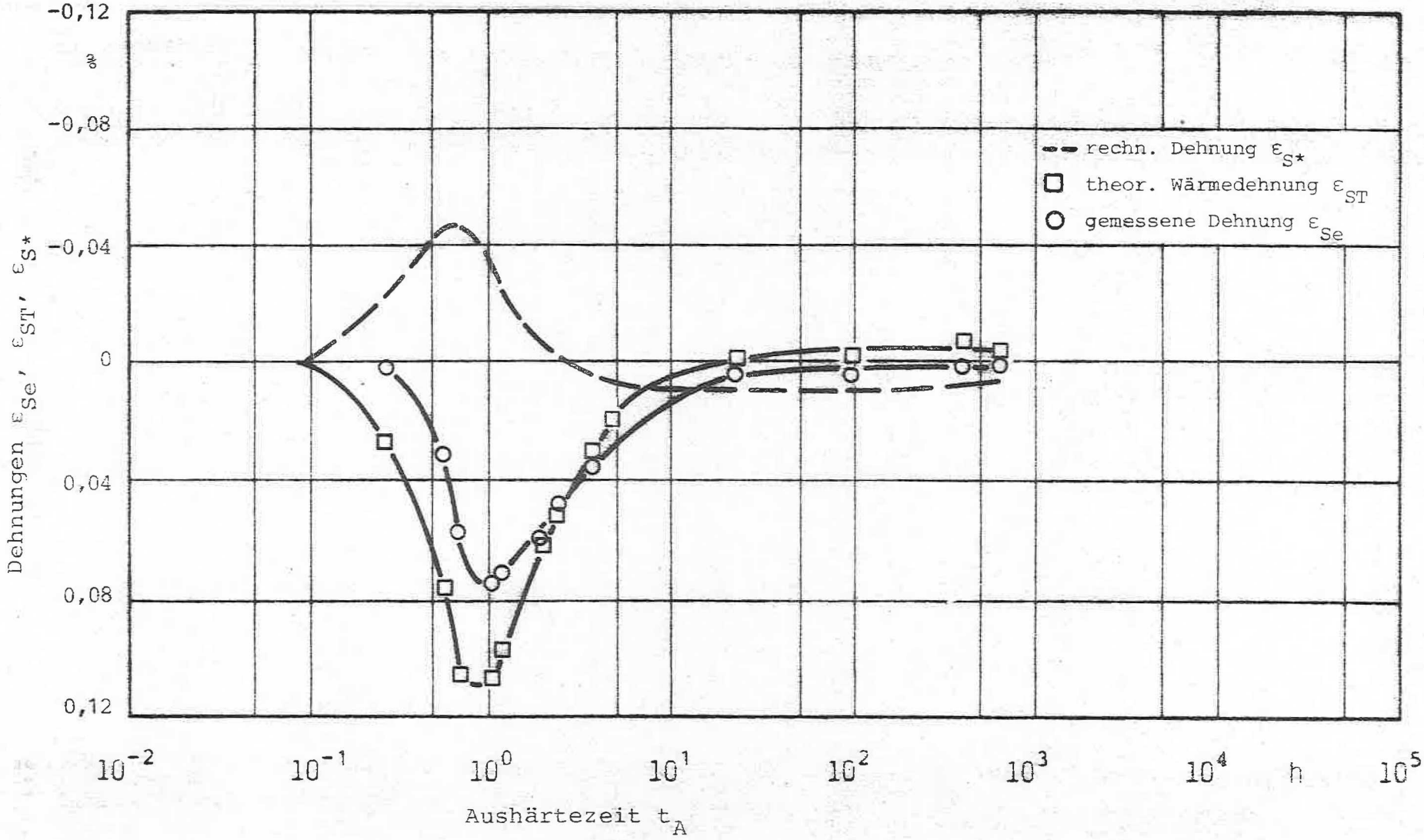


Bild 43: Gemessene und rechnerische Dehnungen des Verbundsystemes VIII gültig für die Längsachse im Plattenzentrum

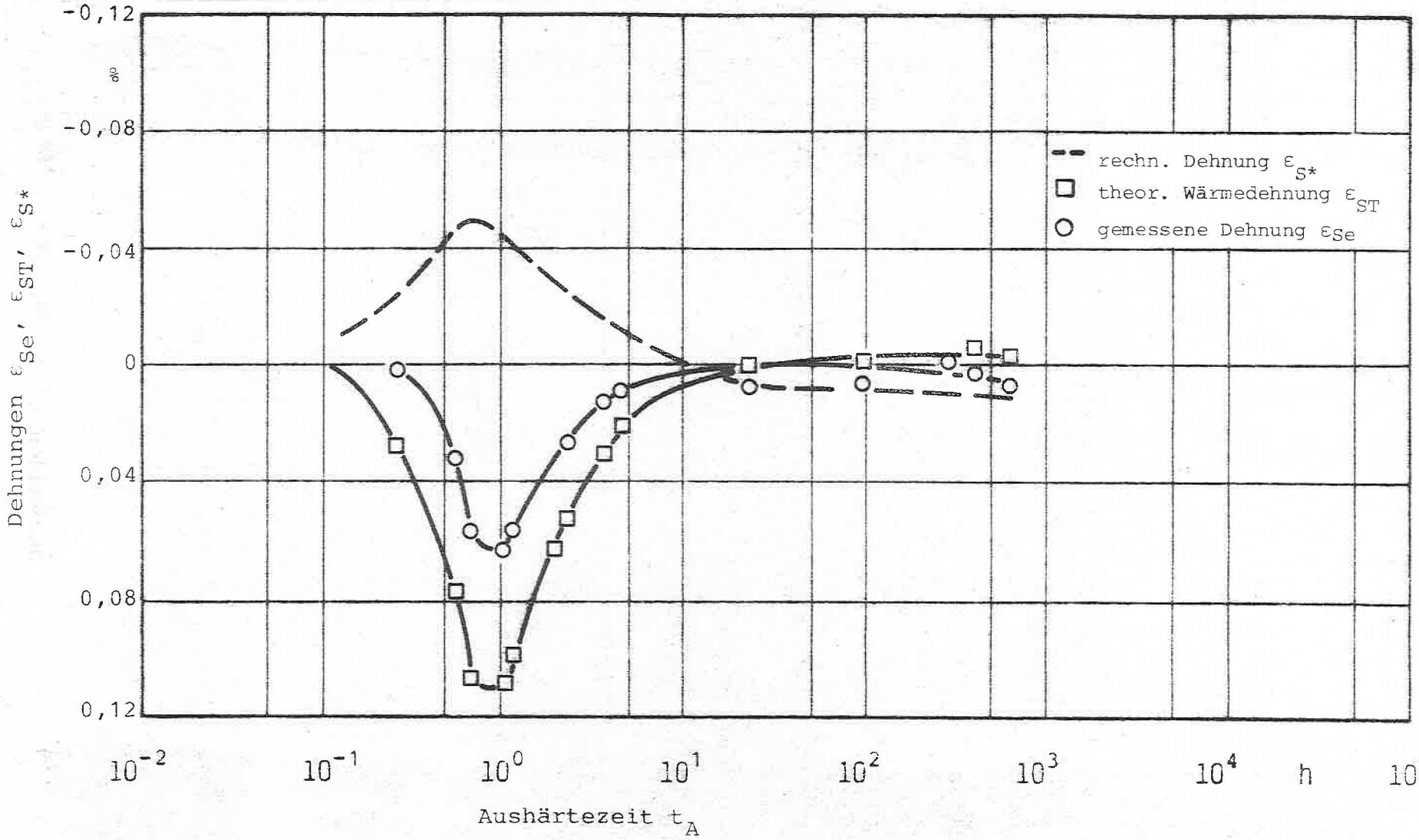


Bild 44: Gemessene und rechnerische Dehnungen des Verbundsystemes VIII gültig für die Breitachse im Plattenzentrum

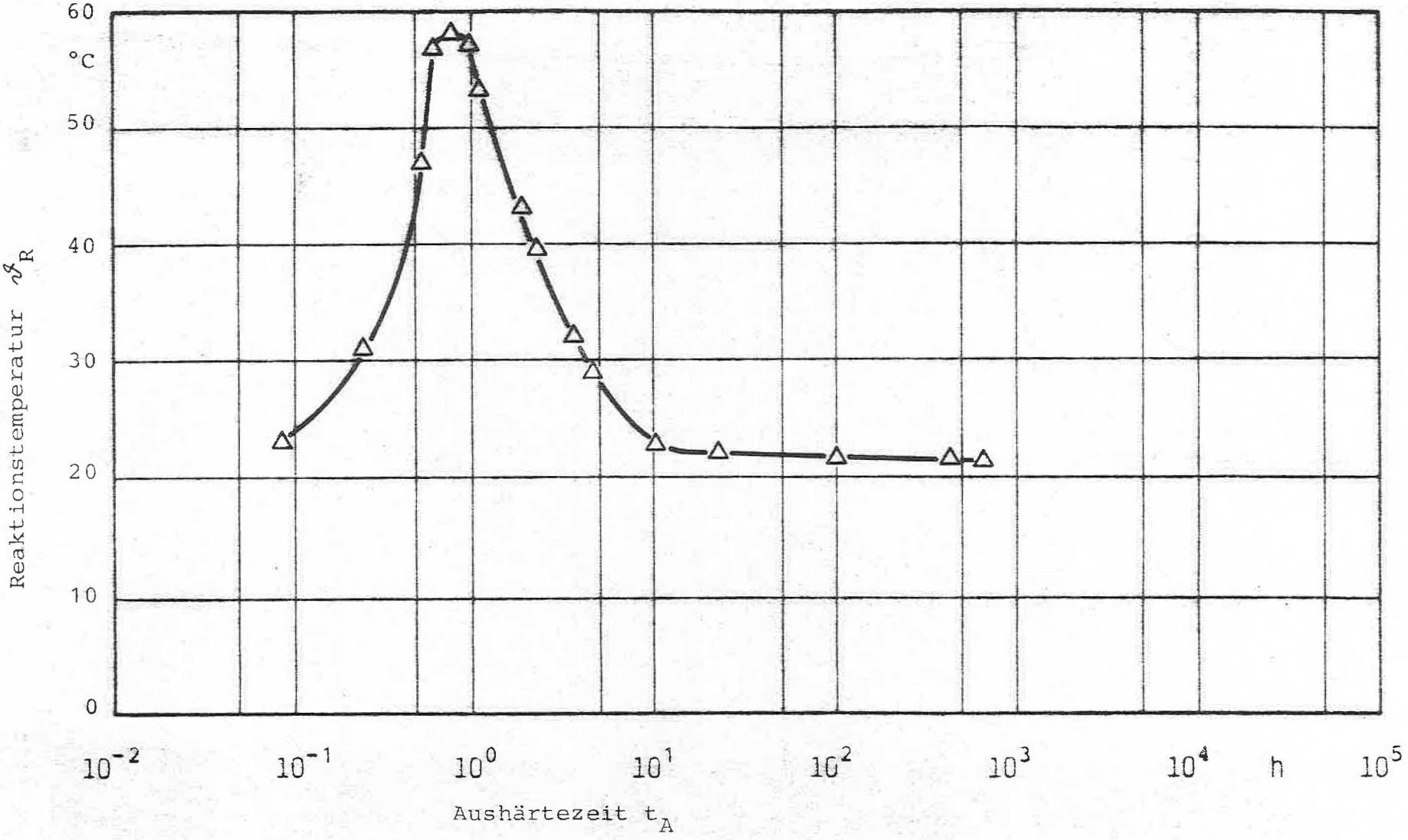


Bild 45: Reaktionstemperatur ϑ_R des Verbundsystemes VIII im Plattenzentrum

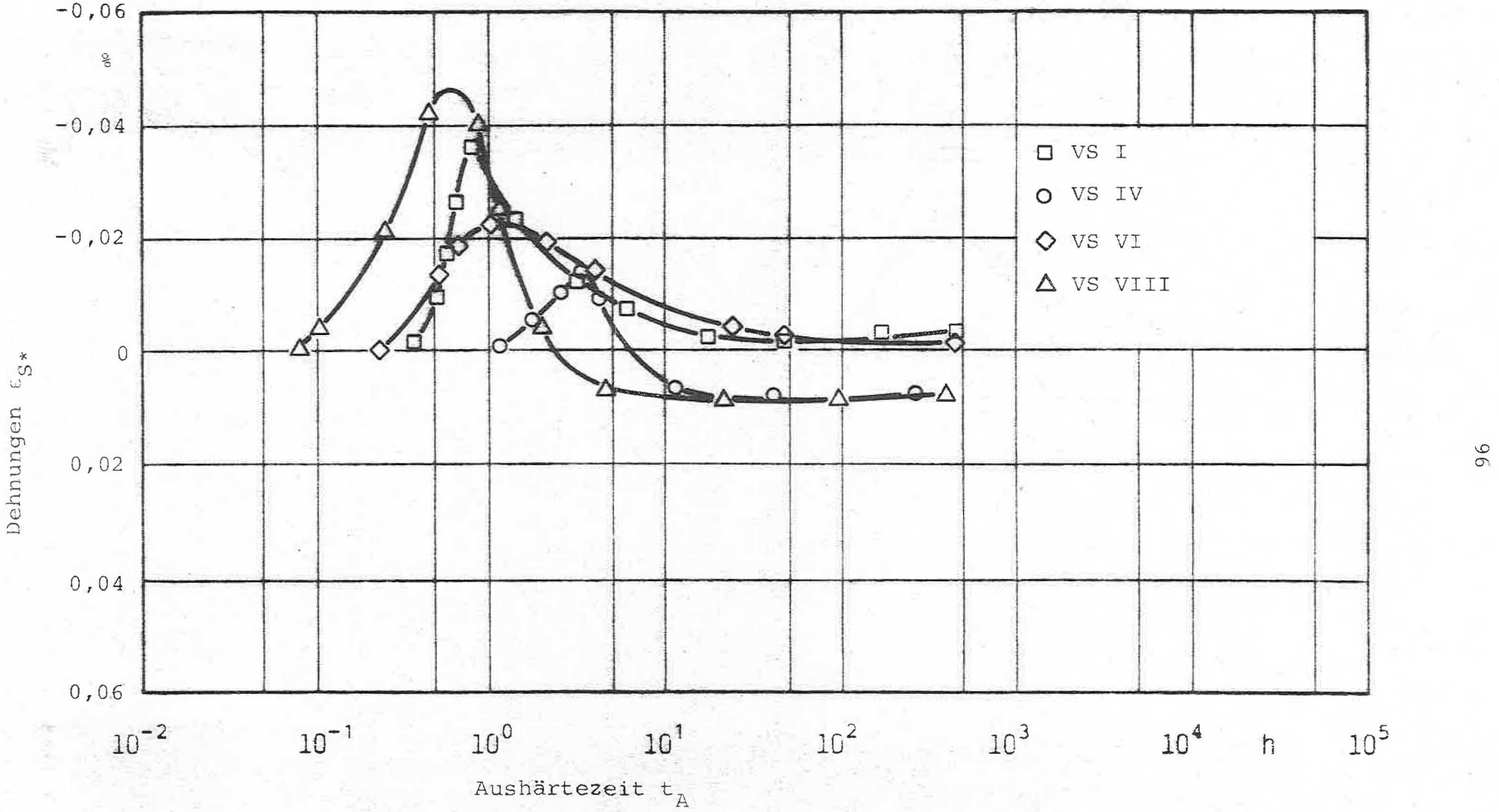


Bild 46: Vergleich der Dehnungen ε_{S*} verschiedener Verbundsysteme im Plattenzentrum in Längsachse

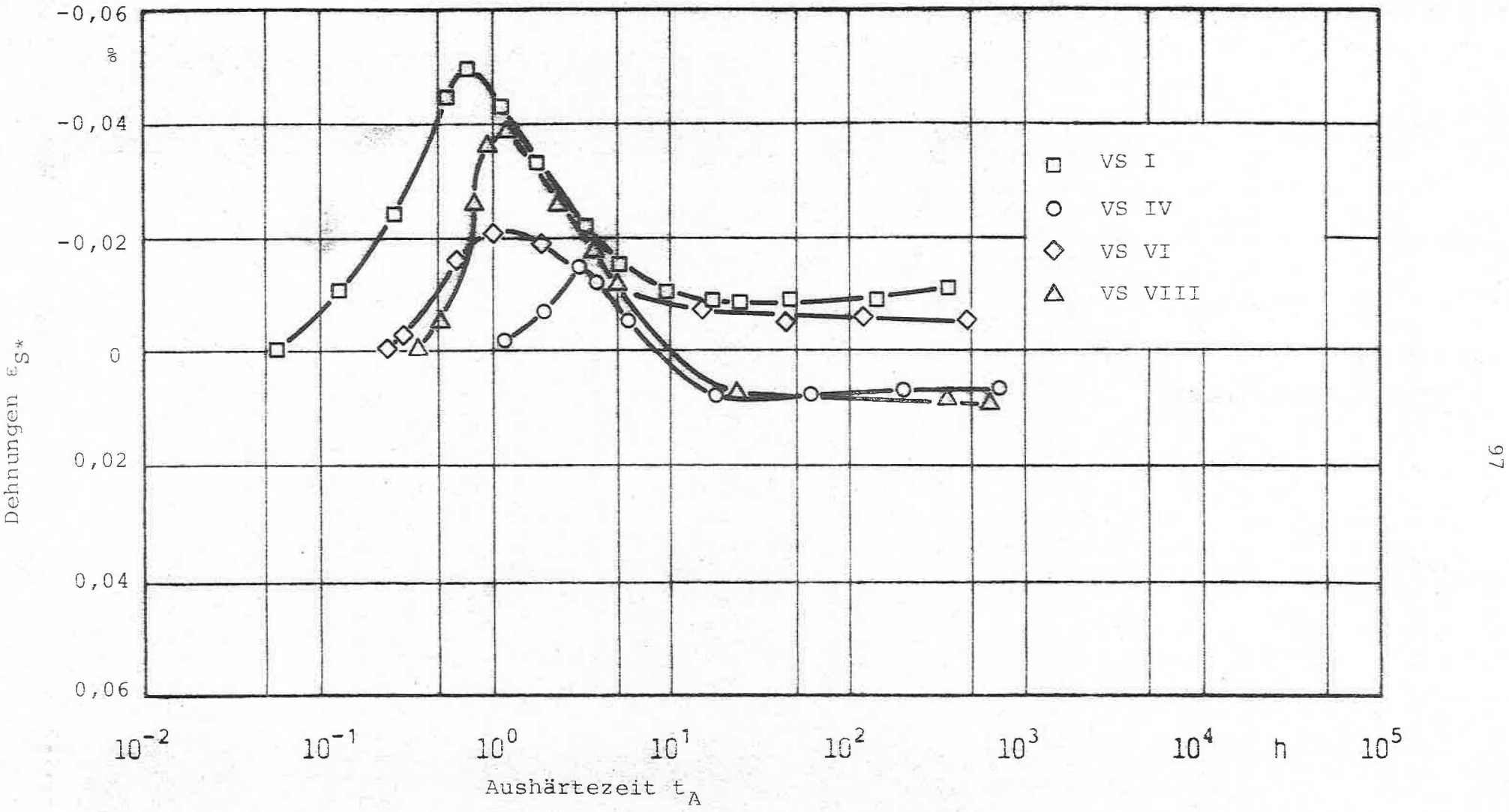


Bild 47: Vergleich der Dehnungen ε_{S*} verschiedener Verbundsysteme im Plattenzentrum in Breitachse

tionstemperatur und deren Abklingen unmittelbar neben dem Sensor im Plattenzentrum dar. Für den Sensor gelten mit ausreichender Genauigkeit die gleichen Temperaturverhältnisse.

Wie aus den Einzeldiagrammen und aus den Zusammenstellungen zu entnehmen ist, kommen bei allen Verbundsystemen negative Dehnungsverläufe mit einem ausgeprägten Kurvenmaximum während der Reaktionstemperaturspitzen zustande. Die Stauchungen nehmen mit abklingender Reaktionstemperatur infolge der Abkühlung und der damit einhergehenden Kontraktion der Würfel ab und streben der Null-Linie zu bzw. überschreiten diese. Eine Überschreitung der Null-Linie bedeutet in diesem Falle, daß auf den eingegossenen Würfel eine Zugbeanspruchung wirkt, die sich infolge starker Volumenkontraktion des Würfels beim Abkühlvorgang einstellt.

Dieses Verhalten ist dadurch zu erklären, daß in der Harzmatrix während des Reaktionsvorganges eine ständige Stoffänderung stattfindet, wogegen der Sensorwerkstoff seinen Zustand, abgesehen von den Wärmeausdehnungen, nicht ändert. Während dieser Stoffänderung, der Strukturumwandlung in der Harzmatrix, ändert sich nicht allein der Vernetzungszustand, sondern auch die davon abhängigen mechanischen und thermischen Eigenschaften. Der thermische Ausdehnungskoeffizient des unvernetzten Harzes reduziert sich beim Vernetzungsvorgang, abhängig von der Reaktionsgeschwindigkeit, erheblich. Bis zum Reaktionstemperaturmaximum nimmt also die Wärmeausdehnung der Harzmatrix zu, und zwar mit abnehmender Geschwindigkeit. Der Aushärtevorgang ist nach dem Erreichen des Temperaturmaximums nicht beendet, da auch in der Abkühlphase eine Zunahme der Vernetzung erfolgt. Dadurch verringert sich der Ausdehnungskoeffizient langsam weiter und strebt einem Endwert zu.

Daraus würde sich ergeben, daß das Maß der Wärmeausdehnung vom Reaktionsstart bis zum Reaktionstemperaturmaximum deutlich größer ist als die Kontraktion beim Abkühlvorgang. Nach 100 Stunden Versuchszeit liegen die α-Werte $\alpha_{t_{A\sim 10^2 h}}$ des RHB etwa in der Größenordnung des α-Wertes des Sensors α_s. Mathematisch kann diese Annahme folgendermaßen dargestellt werden:

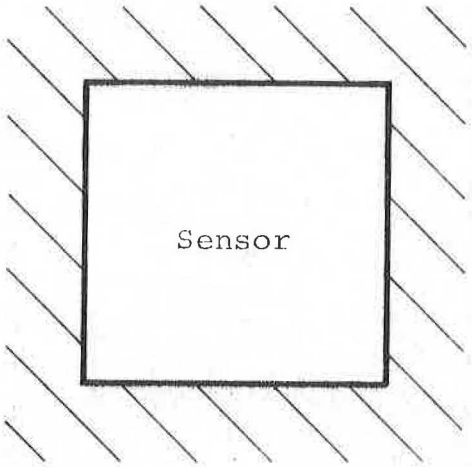
$$\alpha_{t_{A\sim 0}} > \alpha_{t_{A\ max}} > \alpha_{t_{A\sim 10^2 h}}$$

wobei

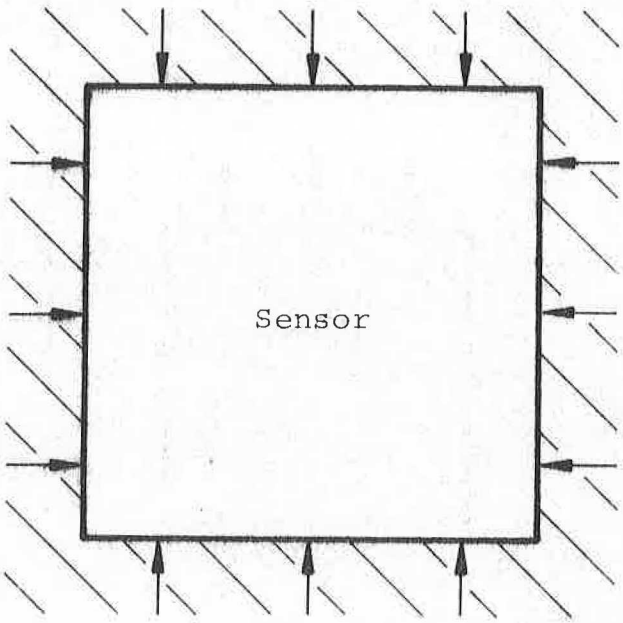
$$\alpha_{t_{A\sim 10^2 h}} \sim \alpha_s$$

Für die Anwendung der Sensor-Methode bzw. für die Interpretation der Meßergebnisse ist die Berücksichtigung dieser Zusammenhänge von Bedeutung. In Bild 48 ist ein Gedankenmodell über die Vorgänge hinsichtlich der thermischen Ausdehnung im Bereich des Sensors zweidimensional bildlich dargestellt. Quantitative Aussagen können davon jedoch nicht abgeleitet werden.

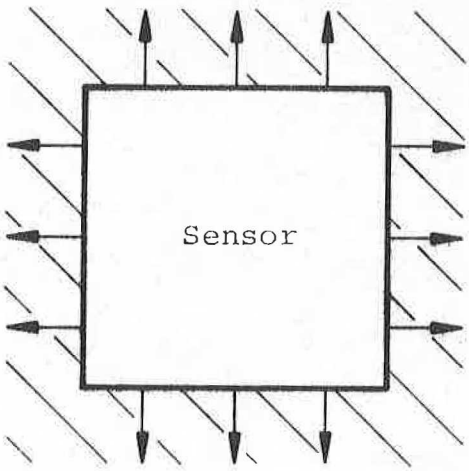
Der Schwindung der Harzmatrix wirkt also während der Temperaturerhöhung die Wärmeausdehnung entgegen, wogegen sich beim Abkühlvorgang Schwindung und negative Wärmeausdehnung überlagern. Dies bewirkt für den Würfel, der quasi als größeres Füllstoffkorn betrachtet werden kann und der sein Temperaturverhalten über der Reaktionszeit nicht ändert, zunächst Druckspannungen, die beim Abklingen der Temperatur wieder abgebaut und je nach Temperaturunterschied und Schwindverhalten u.U. sogar zu Zugespannungen werden. Zugspannungen treten dann am Würfel auf, wenn das Maß der Wärmeausdehnung und somit auch die Kontraktion beim Abkühlvorgang größer ist als die Differenz zwischen Schwindmaß und Abkühlkontraktion des Verbundsystems.



Zustand bei Aushärtezeit $t_A \sim 0$



Zustand bei Reaktions-temperatur-maximum



Zustand bei Aushärtezeit $t_A \geq 10$ h

Bild 48: Modellvorstellung über die schwindungs- und thermisch-bedingten Vorgänge in zweidimensionaler Ebene

Dieser Effekt trifft besonders für das System VIII zu, da bei diesem System eine relativ hohe Temperaturdifferenz herrscht und da sich der α-Wert aufgrund der enormen Viskositätsänderung der Harzmatrix wesentlich reduziert.

Die Gleichung kann deshalb noch umfassender diskutiert werden, da sich der Ausdruck $\varepsilon_{ST}\ (t_A)$ aus der Wärmeausdehnung der Harzmatrix $\varepsilon_{STH}\ (t_A)$ und der Wärmeausdehnung des Sensors $S_{STS}\ (t_A)$ zusammensetzt. Es ergibt sich somit:

$$\varepsilon_{S^*} \leftarrow (t_A) = \varepsilon_{Se}\ (t_A) - [\varepsilon_{STH}\ (t_A) + \varepsilon_{STS}\ (t_A)] \qquad (10)$$

Der Klammerausdruck bildet dabei - mit den wenigen Ausnahmen bezüglich System IV und VIII - fast während der gesamten Versuchszeit den größeren Teil, so daß sich negative Dehnungen ergeben. Bis zum Temperaturmaximum wächst der Klammerausdruck entsprechend der Temperaturentwicklung ständig an und nimmt dann wieder ab.

Der Begriff $\varepsilon_{STS}\ (t_A)$ ist nur von der Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ abhängig und errechnet sich mit dem konstant bleibenden Wärmeausdehnungskoeffizienten des Sensors α_S nach

$$\varepsilon_{STS}\ (t_A) = \Delta\vartheta\ (t_A) \cdot \alpha_S \qquad (11)$$

Die Größe $\varepsilon_{STH}\ (t_A)$ ergibt sich aus der Multiplikation der Variablen $\Delta\vartheta\ (t_A)$ und $\alpha_H\ (t_A)$.

Der von der Aushärtung abhängige Wert α_H stellt in diesem Zusammenhang eine theoretische, durch Messungen nicht quantitativ ermittelte Größe dar, wobei jedoch angenommen werden kann, daß diese Größe als Folge der Vernetzung stetig abnimmt.

Beim System VI sind die Unterschreitungen der Null-Linie vermutlich darauf zurückzuführen, daß beim Abklingen der Reaktionstemperatur die Vernetzung und somit der Schwindvorgang der Harzmatrix bereits weitgehend abgeschlossen sind, wogegen der Sensor nach dem Temperaturmaximum noch schrumpft.

Wie bereits oben angedeutet, findet während der Aushärtung eine entscheidende Veränderung der mechanischen Werkstoffkenngrößen statt. Der Elastizitätsmodul der Harzmatrix steigt, wie in [23], [38], [39], [43] bereits gezeigt wurde, während der Reaktionsphase rasch an und führt zu einer Versteifung der Verbundsysteme. Die anfänglich relativ unbehinderte Wärmeausdehnung des Sensors findet also auch durch die zunehmende Versteifung der Matrix einen mechanischen Widerstand. Mit zunehmender Aushärtung und daraus folgender E-Modul-Erhöhung ist die Matrix somit in der Lage, dem thermischen Verhalten des Würfels entgegen zu wirken. Das bedeutet, daß die Volumenkontraktion der Matrix durch Schwindung und Abkühlung vermutlich einen wesentlich stärkeren Einfluß auf den Sensor nimmt, als die Vorgänge in der Matrix vor dem Erreichen des Reaktionsmaximums. Daraus folgt aber wiederum, daß Sensor und Matrix bzw. Verbundsystem in sich schrumpfen. Damit reduzieren sich die Druckspannungen und im Extremfall treten Zugspannungen auf den Sensor in der Grenzschicht oder in der Matrix auf. Dieses Modell wurde in ähnlicher Weise bereits in [5] vorgestellt, wobei als Füllstoff Glasfasernoder Glaskugeln verwendet wurden.

Die in den Bildern 46 und 47 für die Verbundsysteme mit Rundkorn-Füllstoffen zusammengefaßten Zeit-Dehnungs-Kurven scheinen das Gedankenmodell zu bestätigen. Abhängig von der jeweiligen Reaktionscharakteristik der Harzsysteme bauen sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten unterschiedlich

hohe Druckspannungen auf, die sich durch Stauchung des eingegossenen Würfels äußern. Im hier näher untersuchten Plattenzentrum zeigen sich keine entscheidenden Unterschiede zwischen Längs- und Breitachse. Nach dem Erreichen des Temperaturmaximums, was wiederum zu verschiedenen Versuchszeiten geschieht, fallen die Stauchungen wieder ab, und zwar mit geringerer Geschwindigkeit als sie aufgebaut werden.

Die Kurvenmaxima liegen für die untersuchten Systeme verschieden hoch, unterscheiden sich aber innerhalb eines Systems nicht in den Meßrichtungen. System I erreicht etwa die zweifache Stauchung des Systems IV, wogegen System VIII etwa den dreifachen Wert überschreitet. Auffallend ist, daß beim System IV in beiden Richtungen entgegen den Erwartungen geringere Stauchungen als beim System VI im Kurvenmaximum auftreten und daß sich diese Zuordnung - bezogen auf die Verhältnisse bei der Aushärtungszeit von 100 Stunden - umkehrt. Wahrscheinlich ist dieses Verhalten auf die zeitlich verschobene Zusammenwirkung der Temperaturausdehnung von Matrix und Sensor und auf die vernetzungsabhängige Matrixschwindung zurückzuführen.

Weiterhin ist festzustellen, daß die Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen erst nach dem Abklingen der Reaktionstemperatur erkennbar sind und daß nach 100 Stunden Aushärtung kaum Änderungen auftreten, die auf aushärtungsabhängige Einflüsse hindeuten. Die feststellbaren Abweichungen von der Geraden sind höchstwahrscheinlich auf minimale Temperaturschwankungen zurückzuführen.

Unter Verwendung der E-Modul-Temperatur-Eichkurve der Sensoren können die ermittelten Dehnungszustände in Spannungsgrößen umgerechnet werden.

Vorausgesetzt wird dabei, daß die HOOK'sche Gesetzmäßigkeit

$$\sigma_{S*} = E_S \cdot \varepsilon_{S*} \qquad (12)$$

für den Würfel im angewandten Bereich gilt.

Ferner ist dabei wichtig, daß das Elastizitätsverhalten des Würfels bei gleichzeitig zweidimensionaler Beanspruchung, wie sie im eingebetteten Zustand auftritt, als Rechenwert heranzuziehen ist.

Die Bilder 49 und 50 beinhalten die rechnerisch ermittelten Spannungslinien für die Systeme I, IV, VI und VIII, gültig für das Plattenzentrum in Längs- und Breitachse. Sie verlaufen tendenziell ähnlich wie die Zeit-Dehnlinien und werden vorwiegend von der Änderung des E-Moduls durch die Temperatur beeinflußt.

Betrachtet man die Linien im einzelnen, so kann man feststellen, daß nach Ablauf der wesentlichen Aushärtephase die Systeme I und VI eine geringere Druckspannung auf den Würfel ausüben. Die Unterschiede in Längs- und Breitachse sind vermutlich als Meßwertschwankungen anzusehen. Die Matrix der Systeme IV und VIII kontrahiert so, daß am Würfel minimale Zugspannungen zu verzeichnen sind. Erstaunlich ist, daß sich je ein als normalschwindend und ein als schwindarm bezeichnetes System in die gleiche Größenordnung einreihen. Generell kann man jedoch sagen, daß sich die Spannungslinien nach einer Aushärtezeit von 10 Stunden um die Null-Linie einordnen und um nur ca. 1,5 N/mm² differieren.

Die nach Gleichung [12] berechnete richtungsbezogene Kenngröße $\sigma_{S*}(t_A)$, die am Sensor herrscht, muß folglich auch

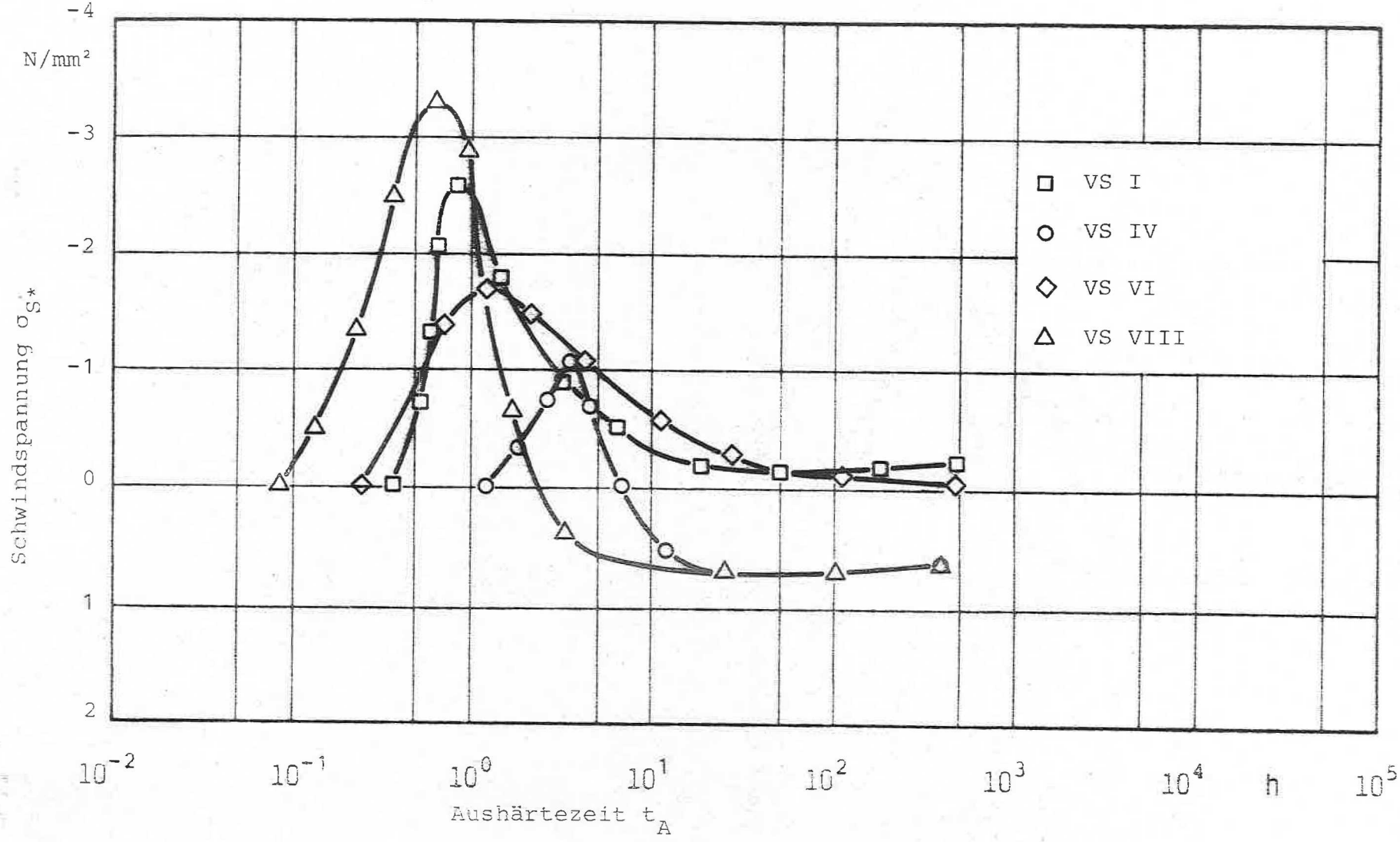


Bild 49: Schwindspannung σ_{S^*} für verschiedene Verbundsysteme im Plattenzentrum in Längsachse

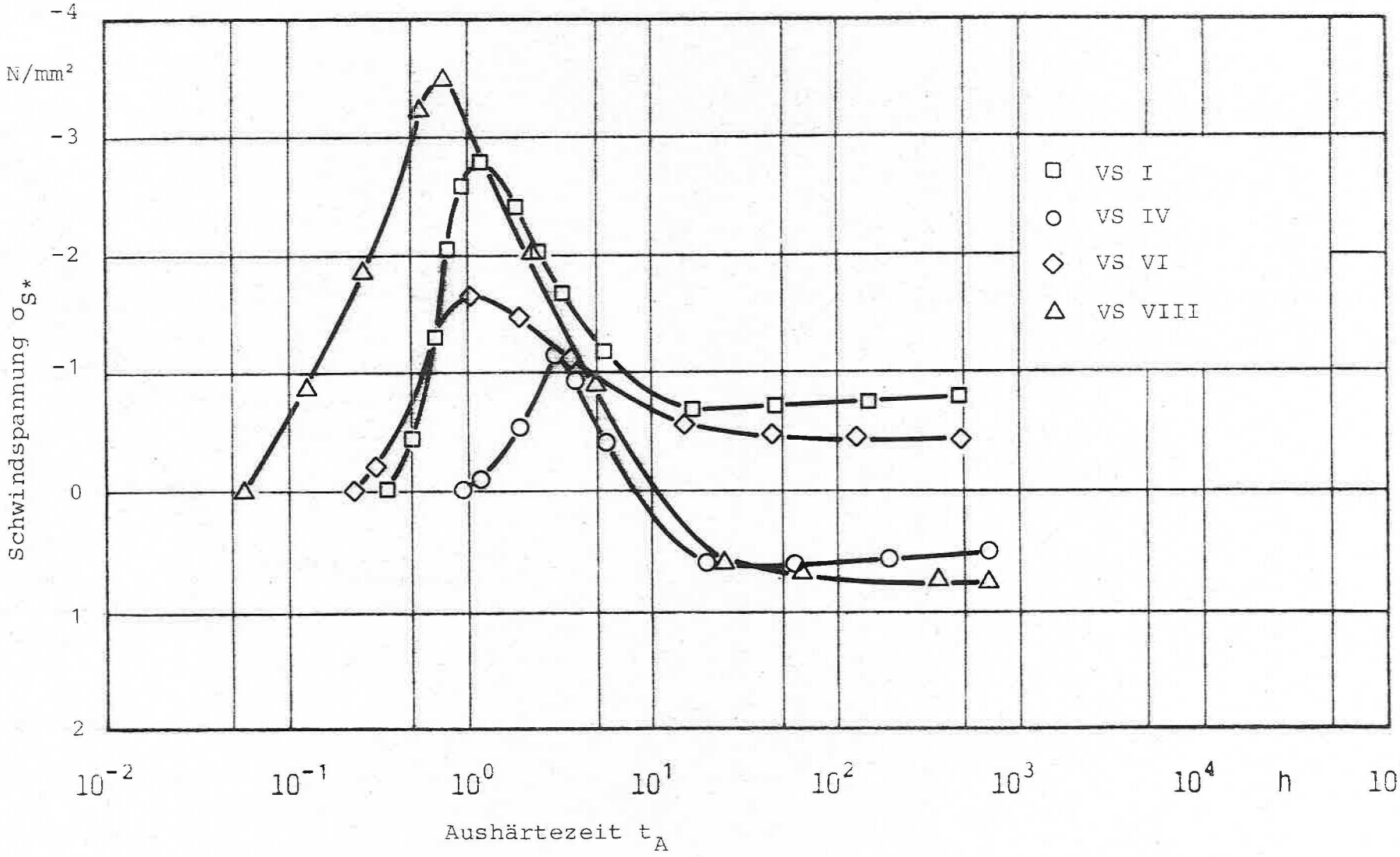


Bild 50: Schwindspannung σ_{S*} für verschiedene Verbundsysteme im Plattenzentrum in Breitachse

im angrenzenden Verbundsystem wirken und ist somit als Schwindspannung zu betrachten. Genau gesehen handelt es sich um einen komplexen Begriff, der sich vornehmlich aus aushärtungsabhängigen Faktoren zusammensetzt.

5.2.5 Kurzzeit-Biegeversuche

Um die auf einfache Art durch die Messung der Durchbiegung ermittelten verformungsbezogenen Werkstoffkennwerte richtig deuten zu können, wurde in Vorversuchen der Spannungsverlauf am Biegebalken untersucht. Wie aus Bild 51 zu erkennen ist, wurden dabei Prismen beidseitig gleichmäßig über der Prismenhöhe mit je neun Dehnungsmeßstreifen versehen. Die im Vierpunkt-Biegeversuch ermittelten Dehnungen, Bild 52, zeigen in weiten Beanspruchungsbereichen einen nahezu symmetrischen Verlauf mit ausgeprägt dehnungsfreier Zone in Prismenmitte. Unter der Voraussetzung der Gültigkeit der HOOK'schen Beziehung und der Annahme eines in allen Ebenen des Prismas gleichen E-Moduls ist der Spannungsverlauf qualitativ dem Dehnungsverlauf gleichzusetzen.

Für die Serienuntersuchungen konnten die verformungsbezogenen Kenngrößen nach der Gleichung der kreisbogenförmigen Biegelinie, unter Verwendung der Durchbiegungen, berechnet werden. Diese Voraussetzungen gelten auch für die in Abschnitt 5.2.6 beschriebenen Zeitstandbiegeversuche.

Die nach einer Aushärtezeit von 100 und 1000 Stunden ermittelten Werkstoffkennwerte Biegefestigkeit und Biege-E-Modul sind in der Tabelle 5 zusammengefaßt. Es ergeben sich bei der Biegefestigkeit keine aushärte- und systemabhängigen Unterschiede. In [38] wurde bereits gezeigt, daß sich bei Normalklima wesentliche, vernetzungsabhängige Änderungen der Biegefestigkeit glasfaserverstärkter UP-Harze bei Aushärtezeiten < 100 Stunden abspielen. Die Größenordnung dieses Kennwertes wird ohnehin in großem Maße von den Eigenschaften der Füllstoffe beeinflußt und liegt bei etwa 20 N/mm^2.

Verbundsystem	Aushärtezeit t_A (h)	Biegefestigkeit β_b (N/mm²)	Biege-E-Modul E_{bo} (N/mm²)
I	10^2	19,6	19300
	10^3	20,3	22700
	getempert	20,0	24800
II	10^2	18,4	20190
	10^3	19,4	23900
III	10^2	20,7	25100
	10^3	20,8	29800
	getempert	19,2	29400
IV	10^2	21,6	25220
	10^3	21,1	25220
	getempert	19,2	27410
V	10^2	22,4	20040
	10^3	19,8	22180
VI	10^2	22,3	16500
	10^3	23,9	18210
	getempert	22,9	18930
VII	10^2	-	-
	10^3	-	-
VIII	10^2	17,2	16410
	10^3	19,4	19830
	getempert	20,9	20750
IX	10^2	16,6	14990
	10^3	22,1	17470

Tabelle 5: Kennwerte aus Kurzzeit-Biegeversuchen

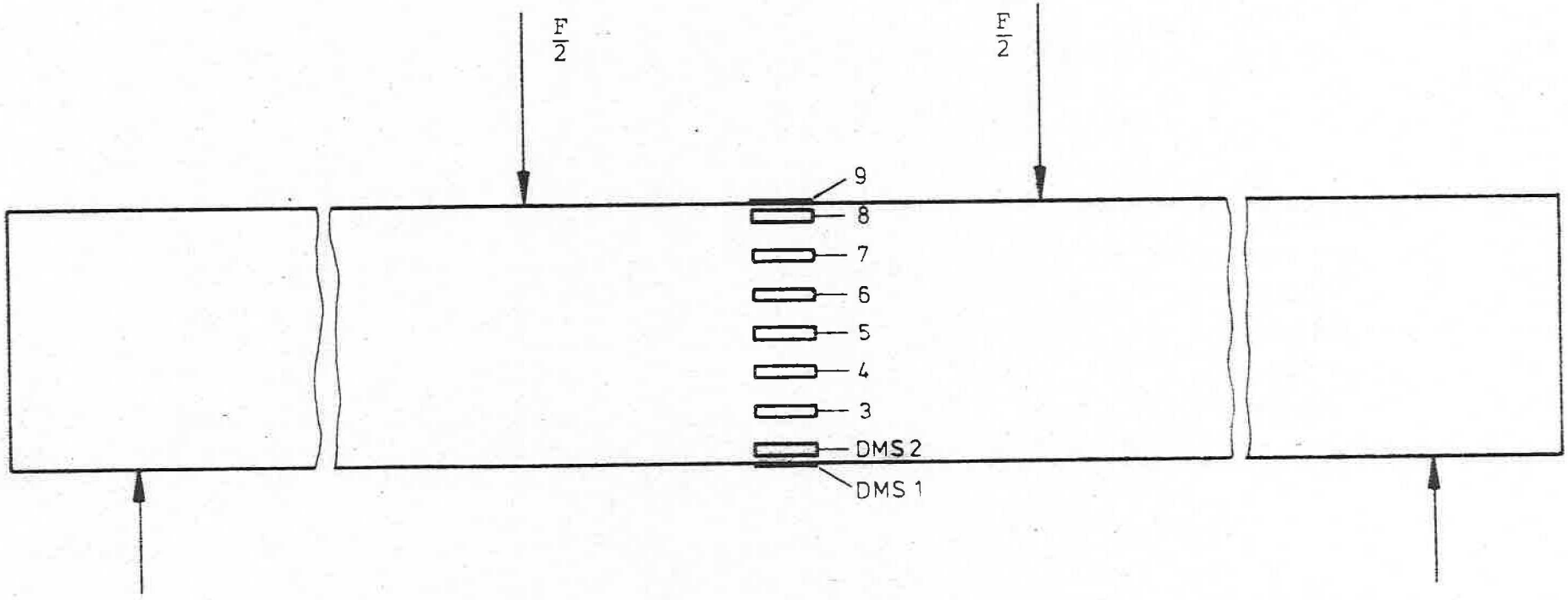


Bild 51: Anordnung der Dehnungsmeßstreifen am Biegebalken

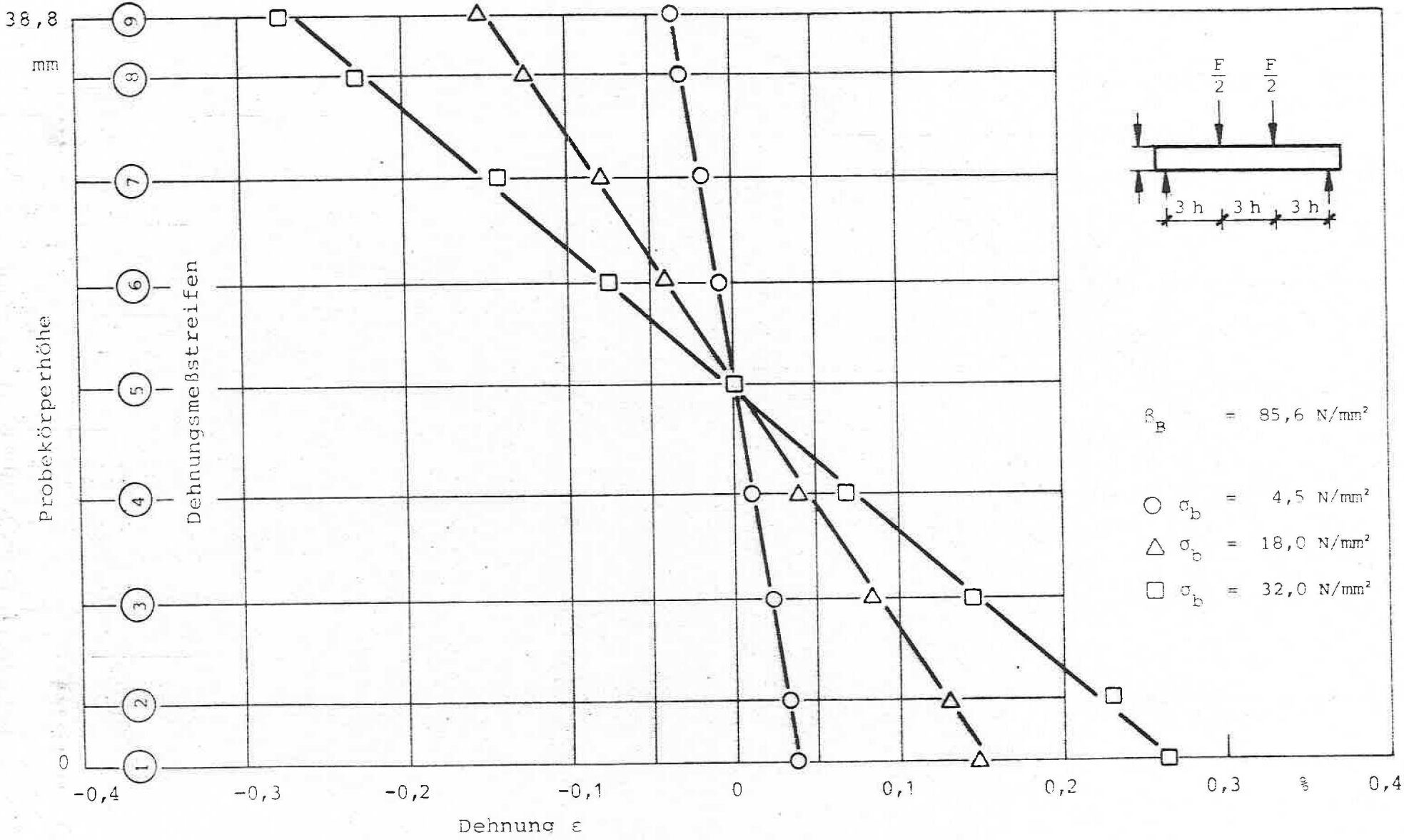


Bild 52: Dehnungsverteilung über den Biegebalkenquerschnitt

Das Versagen tritt primär jeweils im Füllstoff auf, da bei den gewählten Mischungsverhältnissen Harz/Füllstoff die Füllstoffeigenschaften dominieren und mit ihren ungünstigeren Eigenschaften die Festigkeit des Verbundes bestimmen. In [46] wird dies bereits angedeutet und weiterhin eine Abhängigkeit des Versagens von der Korngröße bei Zugbeanspruchung genannt. Bei den hier ermittelten Biegefestigkeiten ist dieser Effekt vermutlich ebenfalls gegeben, jedoch aufgrund der Streuung der Kennwerte nicht eindeutig erkennbar. Die Form der Grobfüllstoffe - Rundkorn oder Splitt - hat scheinbar keinen systematischen Einfluß auf die Biegefestigkeit. Die genannte Wechselwirkung zwischen Füllstoffgehalt und Biegefestigkeit bewegt sich wahrscheinlich innerhalb der Streubereiche der hier untersuchten Systeme.

Die verformungsbezogene Dimensionierungsgröße Elastizitätsmodul ist im Gegensatz zur Biegefestigkeit entscheidend vom Harzsystem und von dessen Aushärtezustand abhängig. In [46] wurde für verschiedene unverstärkte und glasfaserverstärkte UP-Harzsysteme festgestellt, daß bei Normalklima wesentliche Veränderungen des Elastizitätsverhaltens bereits vor 100 Stunden Aushärtezeit stattfinden. Ohne thermische Nachbehandlung sind die Reaktionsvorgänge zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig abgeschlossen. Nach dieser Zeit sind bei allen Systemen noch deutliche Anstiege der E-Modul-Werte zu verzeichnen.

Erwartungsgemäß liegt die Zunahme beim EP-System unter dem Durchschnitt der übrigen Systeme. Mangels mehrerer Ergebnisse zu verschiedenen Aushärtezeiten kann keine verbindliche Aussage über den Verlauf der E-Modul/Aushärtezeit-Abhängigkeit getroffen werden. Es ist jedoch anzunehmen, daß sich nicht lineare, sondern degressive E-Modul/Aushärtezeit-Linien bilden würden, die einen konstanten

E-Modulbetrag zustreben. Nach einer Aushärtezeit von 1000 Stunden sind nahezu die E-Modul-Werte erreicht wie bei einer achtstündigen Temperung bei 80°C direkt nach der Herstellung des Systems. Daraus ist zu schließen, daß nach dieser Aushärtezeit die Nachreaktion weitgehend abgeschlossen ist. Arbeiten an unverstärkten[38] und verstärkten [39] bzw. gefüllten [47], [48] UP-Harzen und EP-Harzen bestätigen diese Vermutung.

Die Meßergebnisse zeigen ferner, daß die Füllstoffgestalt bei gleicher Korngröße und Kornverteilung auf den Biege-E-Modul keinen merklichen Einfluß ausübt. Auffallend ist, daß die Füllstoffgröße und die Füllstoffverteilung einen entscheidenden Einfluß auf den E-Modul bewirken. Bezüglich der Eigenschaften des hier untersuchten RHM kann festgestellt werden, daß der E-Modul bei gleichem Füllstoffgehalt mit abnehmender Korngröße vermutlich wegen des geringeren Luftporenanteiles in begrenztem Maße zunimmt.

Betrachtet man die Ergebnisse der gleichermaßen gefüllten Verbundsysteme I und IV, so ist erkennbar, daß trotz gegensätzlichen Verhaltens des ungefüllten Harzformstoffes der E-Modul des Systems IV bei allen Aushärtezuständen höher ist. Schnitte durch die untersuchten Proben zeigen, daß der Luftporenanteil des Systems I trotz geringerer Viskosität der unvernetzten Matrix größer ist als der des Systems IV. Da dieser Effekt bei allen untersuchten Probekörpern auftrat, ist anzunehmen, daß entweder bei den Mischvorgängen unterschiedlich viele Luftblasen eingebracht wurden, oder daß die Verdichtung unterschiedlich wirksam auf die Entlüftung war. Eindeutige Zuordnungen können jedoch nicht getroffen werden.

Abgesehen von den Einflüssen der Füllstoffarten und der Mischungsverhältnisse können die aufgrund der reaktionsabhängigen Schwindungen oder behinderten Schwindungen entstandenen Eigenspannungszustände den E-Modul des Verbundsystems beeinträchtigen. Über den Betrag und die Wirkungsrichtung dieser Eigenspannungen oder auch Schwindspannungen können pauschal keine Aussagen getroffen werden, da hier füllstoff- und matrix-spezifische Faktoren gleichzeitig einwirken. Um das gesamte Spannungs-Dehnungs-Verhalten der hier untersuchten Verbundsysteme zu beschreiben, sei u.a. auf typische und vielfach dargestellte Ergebnisse verwiesen [38], [39], [46], [47] und [48]. Bis hin zu ca. 70 % der Biegefestigkeit stellt sich nach 100 Stunden Aushärtezeit ein lineares Spannungs-Dehnungsverhältnis ein. Bei längeren Aushärtezeiten bis 1000 Stunden und bei thermischer Nachbehandlung erfolgt das Abweichen vom linearen Zusammenhang bei etwa 80 % der Versagensgröße. In Bild 53 sind beispielhaft für den tendenziellen Verlauf der restlichen Verbundsysteme die Spannungs-Dehnungslinien für die Systeme I, IV, VI und VIII nach 100 Stunden Aushärtezeit gezeigt; Bild 54 enthält die Abhängigkeit bei 1000 Stunden. Die Systeme mit Splitt als Grobfüllstoff weisen im Rahmen der Meßwertstreuung nahezu das gleiche Verhalten wie die rundkorngefüllte Systeme auf.

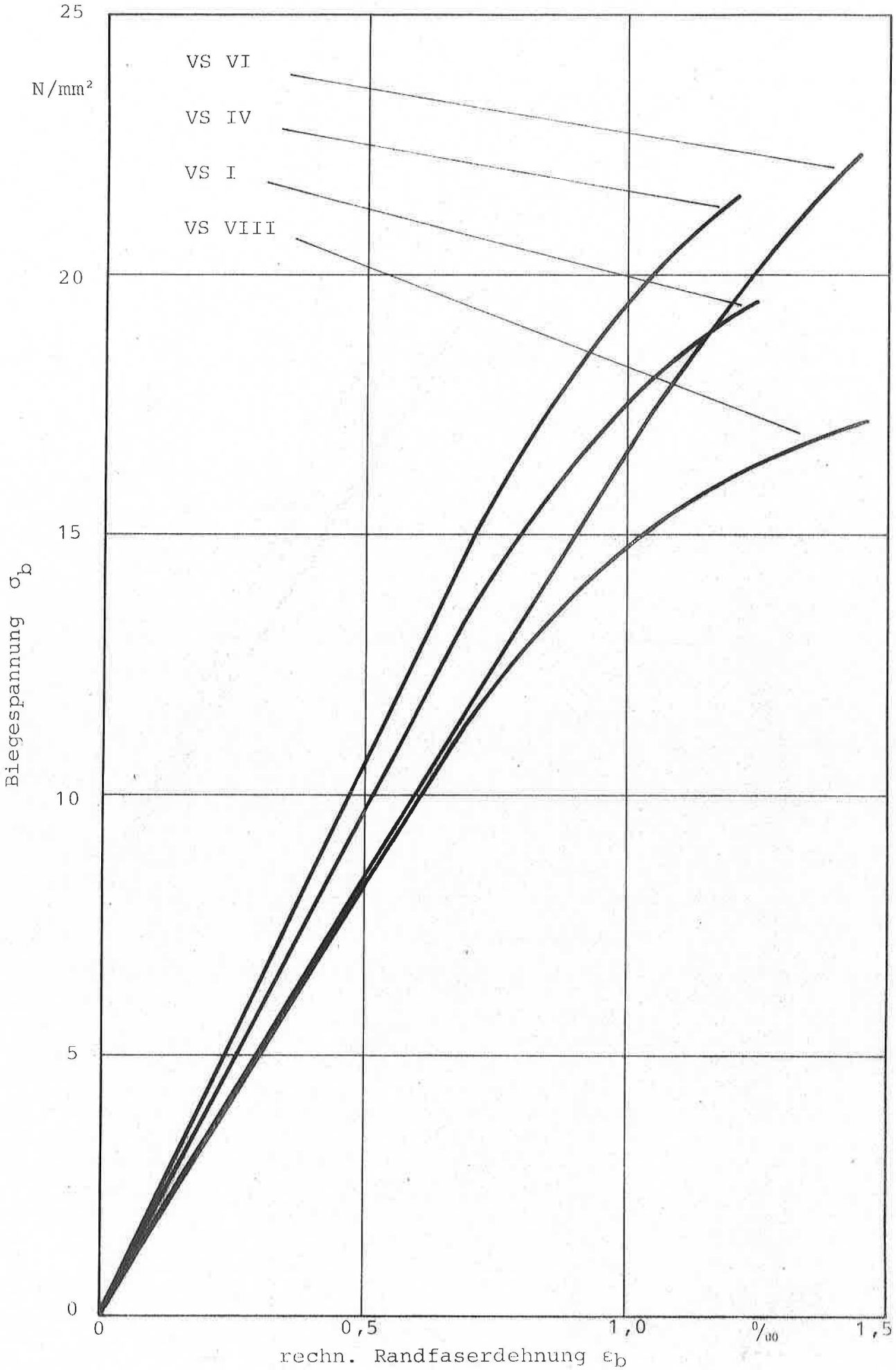


Bild 53: Spannungs-Dehnungs-Linien verschiedener Verbundsysteme nach 10^2 h Aushärtezeit

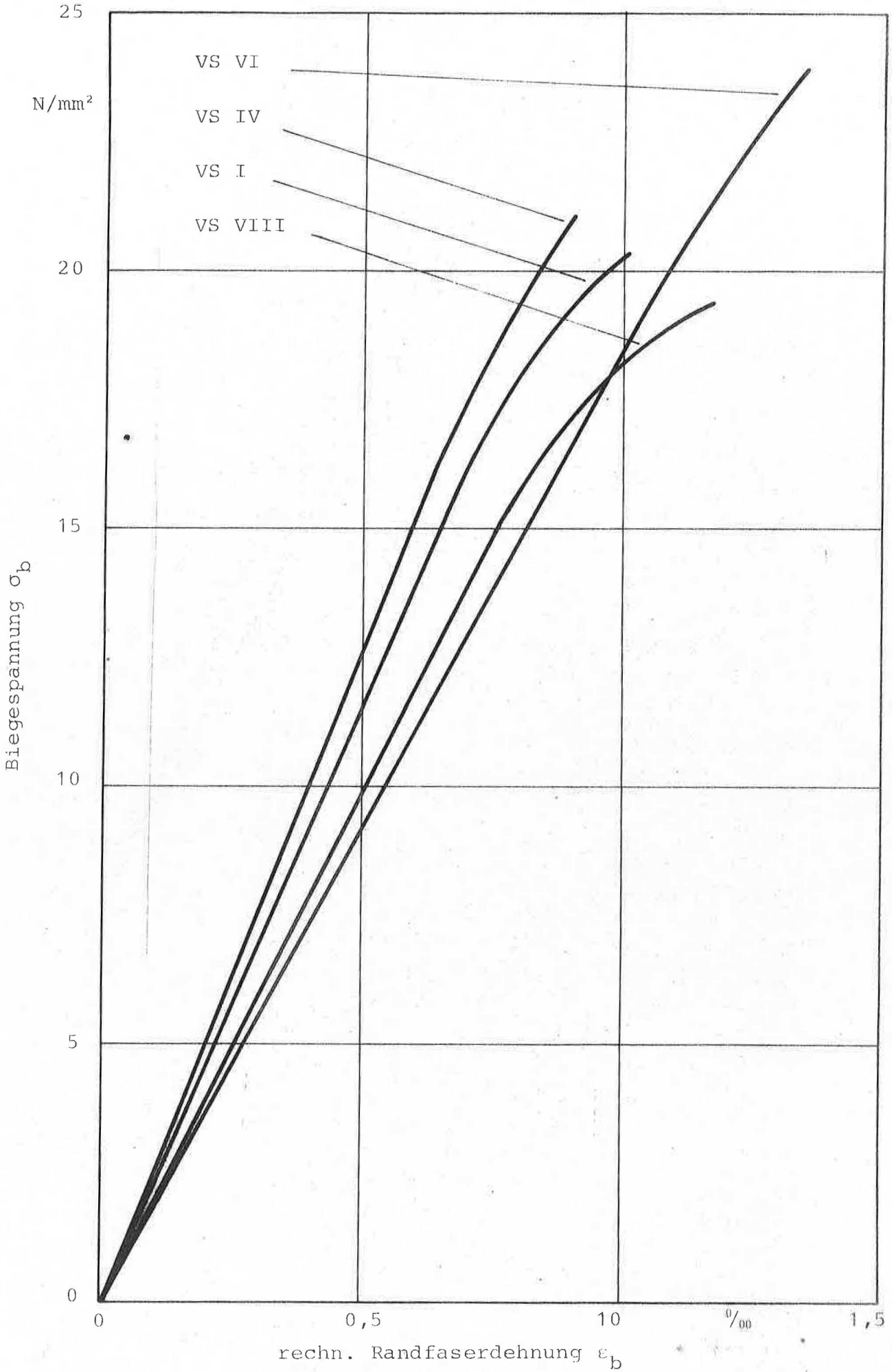


Bild 54: Spannungs-Dehnungs-Linien verschiedener Verbundsysteme nach 10^3 h Aushärtezeit

5.2.6 Zeitstand-Biegeversuche

Aus den gleichen Gründen, welche in Abschnitt 5.2.5 bereits erwähnt sind, wurden die Zeitstand-Biegeversuche auf die Systeme I, IV, VI und VIII beschränkt. Die etwa 1000 Stunden nach der Herstellung beginnenden Versuche wurden über eine Zeitspanne von 1000 Stunden geführt, die 100 Stunden nach der Herstellung begonnenen Versuche bereits nach 24 Stunden Belastungsdauer abgebrochen. Die Ergebnisse beider Versuchsreihen sind, jeweils systembezogen, in den Bildern 55 bis 58 in doppeltlogarithmischer Darstellung zusammengefaßt.

Aufgezeichnet ist der Verlauf des aus der Probengeometrie und den Versuchsbedingungen errechneten Kriechmoduls über der Beanspruchungszeit. Der Kriechmodeul wurde dabei unter Annahme der Gültigkeit der HOOK'schen Beziehung aus der Biegespannung und der aus der Durchbiegung ermittelten Randfaserdehnung errechnet. Aus den Diagrammen ist zu ersehen, daß sich durch relativ frühzeitige Belastung ein Kriechverhalten ergibt, das nicht identisch ist mit dem üblicherweise dargestellten Kriechverhalten von RHB. Die Abhängigkeiten verlaufen nicht wie vielfach zitiert [46], [48], [49] als Gerade im doppeltlogarithmischem System, sondern zeigen einen progressiven Abfall des Kriechmoduls über der Beanspruchungszeit. Sind die Verbundsysteme relativ gut ausgehärtet, so stellt sich dieser Effekt nicht ein. Daraus wäre zu schließen, daß trotz weitgehend abgeschlossener Reaktion durch frühzeitig wirkende Dauerlasten in der Größenordnung von ~ 0,2 ß ein weniger leicht kalkulierbares Kriechverhalten verursacht wird. In [50] wurde ein derartiges Verhalten an glasfaserverstärkten UP-Harzen ebenfalls festgestellt.

Bemerkenswert ist, daß die Kriechmodul-Werte bei einer Beanspruchungsdauer von 6 Minuten fast ausnahmslos im Streubereich der Elastizitätsmodul-Werte beim Kurzzeitversuch liegen.

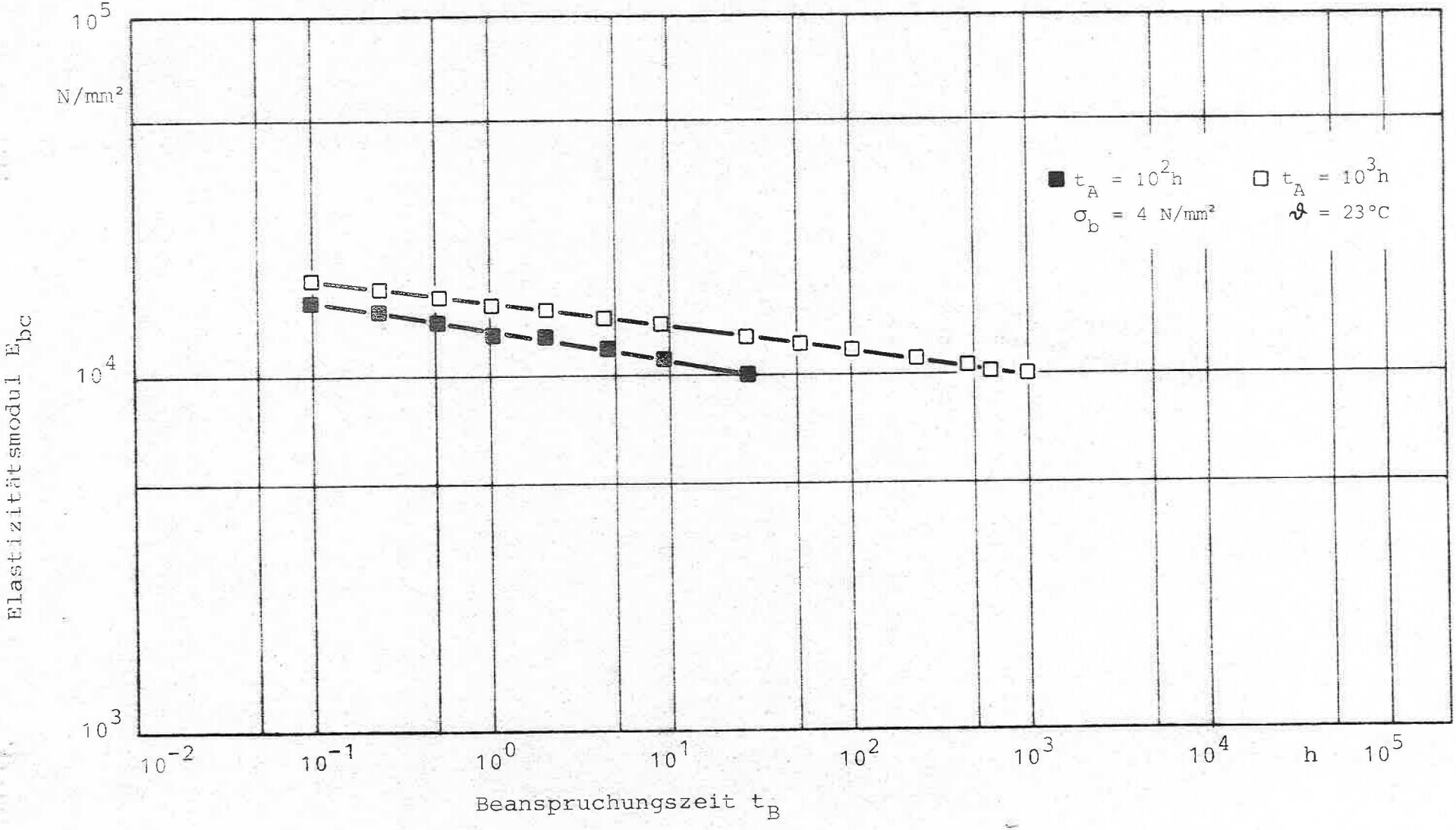


Bild 55: Zeitabhängigkeit der Kriechmoduln des Verbundsystemes I bei verschiedenen Aushärtezuständen

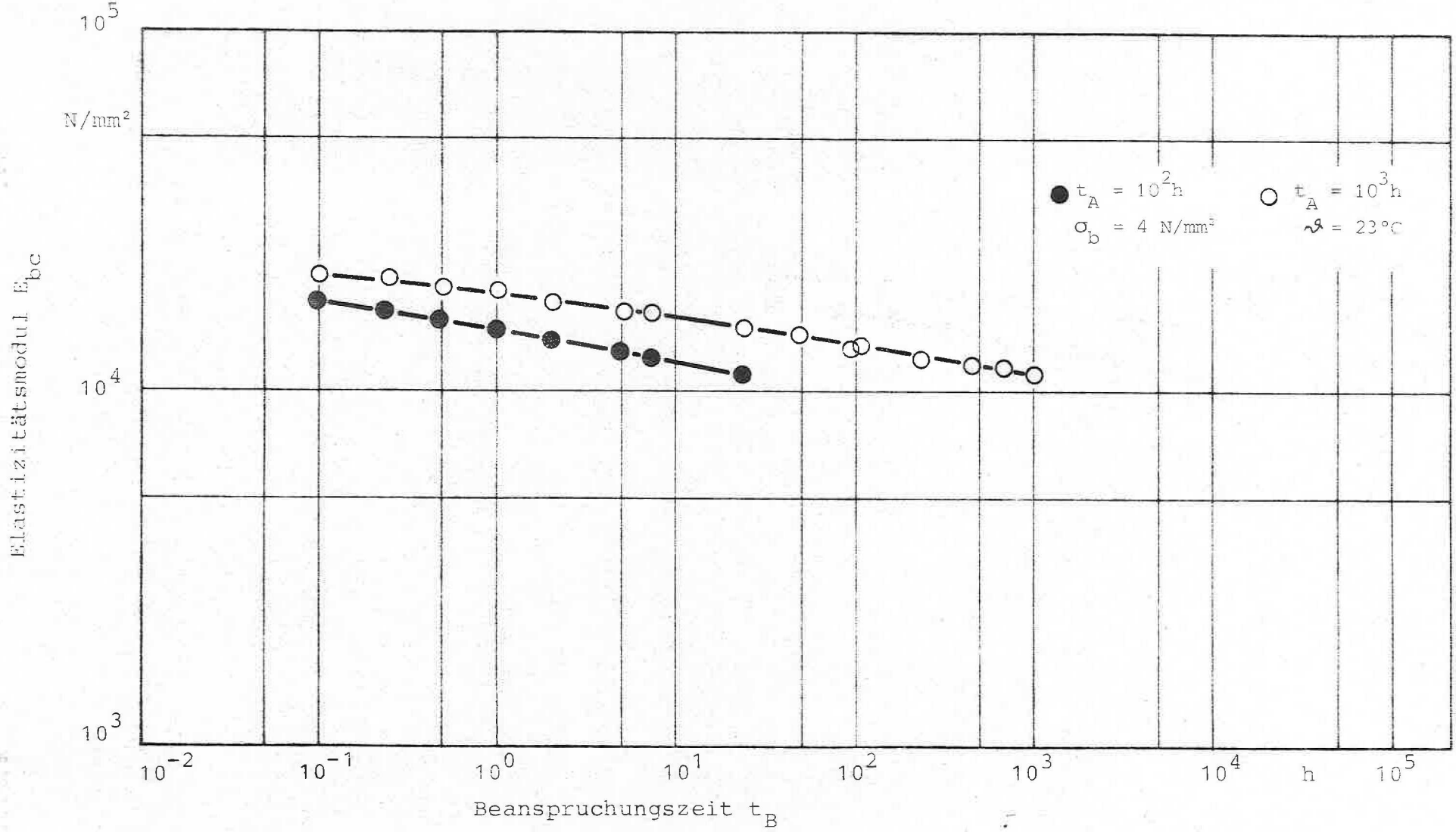


Bild 56: Zeitabhängigkeit der Kriechmoduln des Verbundsystemes IV bei verschiedenen Aushärtezuständen

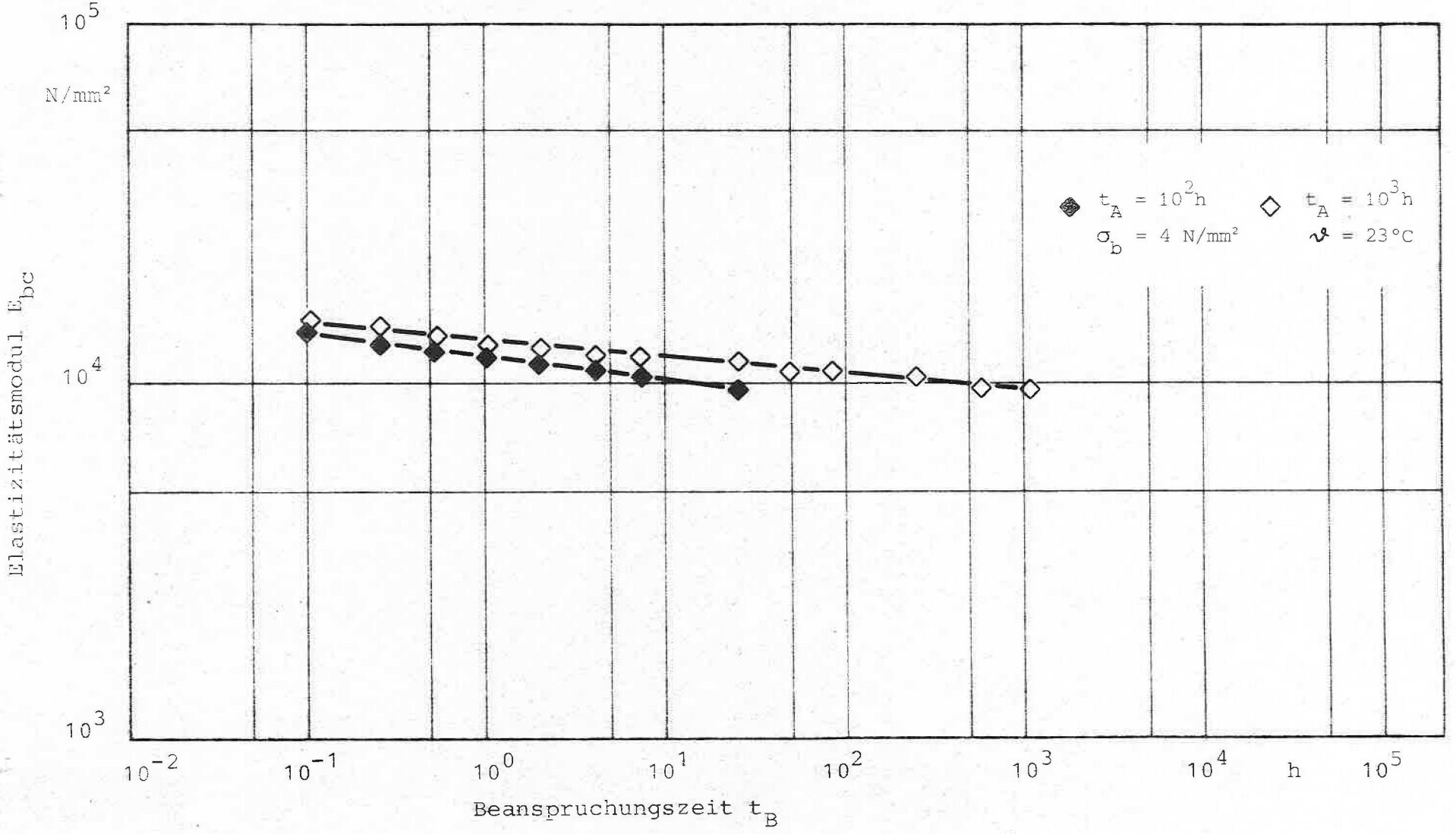


Bild 57: Zeitabhängigkeit der Kriechmoduln des Verbundsystemes VI bei verschiedenen Aushärtezuständen

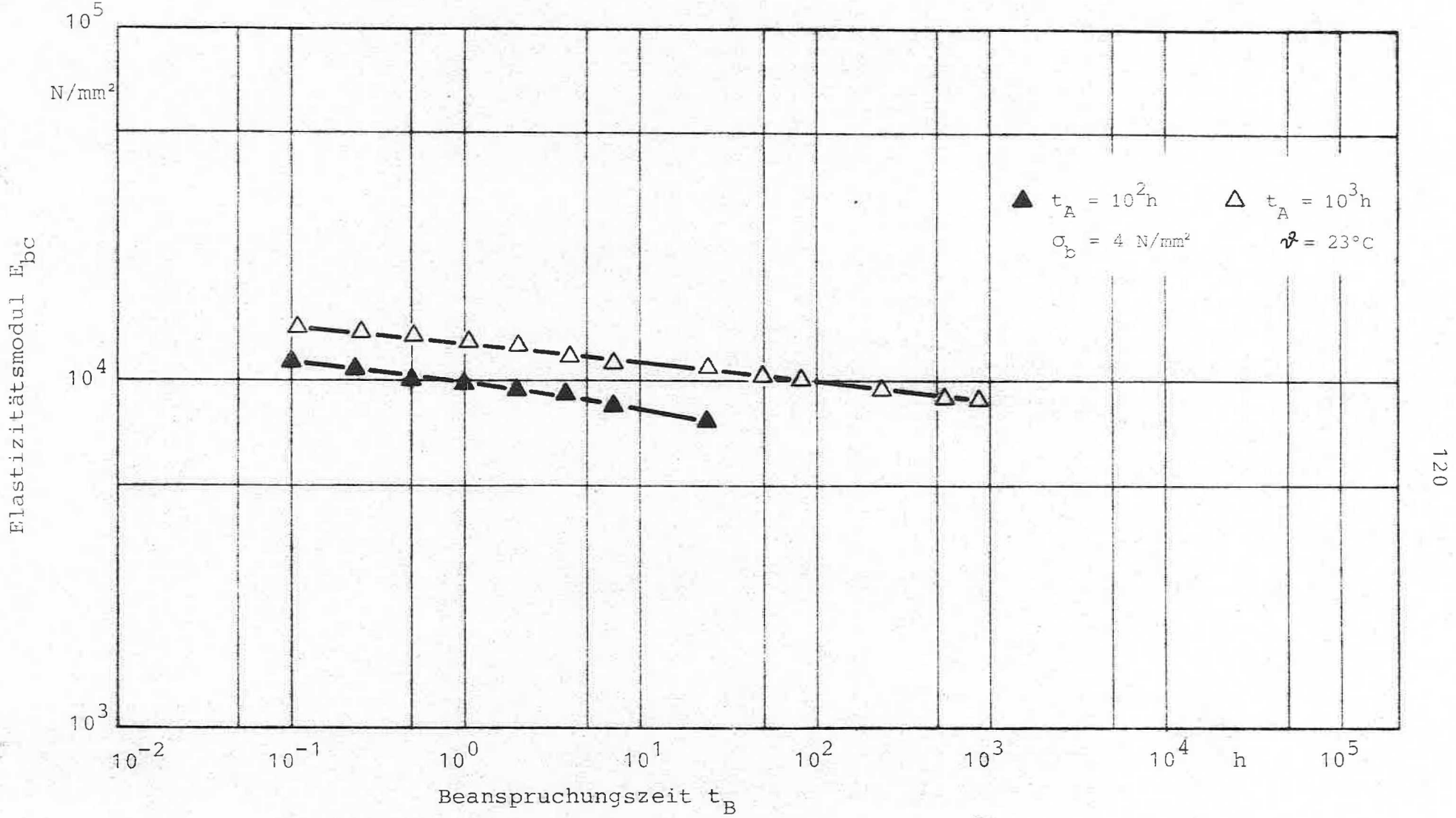


Bild 58: Zeitabhängigkeit der Kriechmoduln des Verbundsystemes VIII bei verschiedenen Aushärtezuständen

In der Annahme, daß die Tendenz der Kriechkurven der 100 Stunden härtenden Proben über 1000 Stunden Belastungsdauer anhalten würde, wäre ein wesentlich geringerer und besser abschätzbarer Kriechfaktor zu erwarten. Unter dem Begriff "Kriechfaktor" soll hier der Quotient aus Kurzzeit-E-Modul und Kriechmodul nach 10^5 Stunden Belastungszeit verstanden sein. E_{bc10^5} wird durch lineare Extrapolation der Kriechkurven bis 10^5 Stunden Belastungszeit t_B ermittelt. Unter Annahme eines linearen Verlaufes der Kriechkurven im doppeltlogarithmischen System kann der rechnerische Kriechmodul-Wert nach 10^5 h Belastungszeit E_{rb10^5} nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\lg (E_{rb10^5}) = \lg (E_{bc1}) - k \cdot \lg (E_{bc1}/E_{bc24}) \qquad (13)$$

Hierin ist k eine Konstante, die sich aus den gewählten Beanspruchungszeiten ergibt.

$$k = \lg 10^5 / \lg 24 = 3{,}62 \qquad (14)$$

In der Tabelle 6 sind die unter o.g. Annahmen ermittelten Kriechmoduli sowie die daraus resultierenden Kriechfaktoren für die untersuchten Systeme gegenübergestellt. Vergleichsweise sind die durch lineare Extrapolation auf grafischem Wege ermittelten Kriechmoduli für die 1000 Stunden ausgehärteten Systeme angegeben.

Verbund-system	Aushärte-zeit	Elastizitäts-modul	Kriechmodul nach 10^5 h Belastungszeit		Kriechfaktoren	
			grafisch ermittelt	rechnerisch ermittelt		
	t_A (h)	E_{b0} (N/mm²)	E_{b10^5} (N/mm²)	E_{rb10^5} (N/mm²)	E_{b0}/E_{b10^5}	E_{b0}/E_{rb10^5}
I	10^2	19300	-	4530	-	4,26
I	10^3	22700	7120	7310	3,19	3,10
IV	10^2	21070	-	5410	-	3,89
IV	10^3	25220	8460	9100	2,98	2,77
VI	10^2	16410	-	5510	-	2,98
VI	10^3	19830	7580	7670	2,62	2,58
VIII	10^2	16500	-	3930	-	4,20
VIII	10^3	18210	6920	7080	2,63	2,57

Tabelle 6: Vergleichende Gegenüberstellung von Kriechmoduln und Kriechfaktoren

5.3 Ergebnisse der Untersuchungen an Reaktionsharzmörtel

Die Ergebnisse, die bei Untersuchungen an RHM, d.h. am Verbundsystem III, erzielt wurden, wurden bereits unter Abschnitt 5.2 vergleichend erwähnt. Da die Versuche an RHM nur ergänzenden Charakter haben, wurden aufgrund des Prüfumfanges Ergebnisse erzielt, die nicht die statistische Aussagekraft der für RHB vorliegenden Erkenntnisse besitzen.

5.3.1 Prismen-Methode

In Bild 59 ist der Verlauf der linearen Schwindung über der Aushärtezeit dargestellt. Sowohl die Krümmung als auch die absolute Lage der Kurve sind nahezu identisch mit den am RHB-System I mit Trennfolie ermittelten Kurven.

Es ist also anzunehmen, daß sich bei RHM ohne äußere oder konstruktive Schwindungsbehinderung ein geringfügig größeres lineares Schwindmaß als bei RHB unter sonst gleichen Bedingungen einstellt. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß der RHM eine etwas homogenere Masse mit gleichmäßigen inneren Spannungszuständen darstellt. Örtlich unterschiedlich auftretende innere Schwindungsbehinderungen durch den Grobfüllstoff treten hierdurch nicht in Erscheinung, so daß die Schwindung der Matrix die Kontraktion des Verbundes wirksamer beeinflußt. Die hier festgestellten Unterschiede zwischen RHB und RHM sind jedoch nicht so groß und bewegen sich in weiten Bereichen innerhalb der Streugrenzen, so daß man sie nicht als generell zutreffend bezeichnen kann.

5.3.2 Ring-Methode

Die mit dem Verbundsystem III ermittelten Erkenntnisse aus der Ring-Methode sind in Bild 60 wiedergegeben. Dabei sind die unter Abschnitt 5.2.2 beschriebene Schwindspannung und die Reaktionstemperatur über der Versuchszeit aufgetragen.

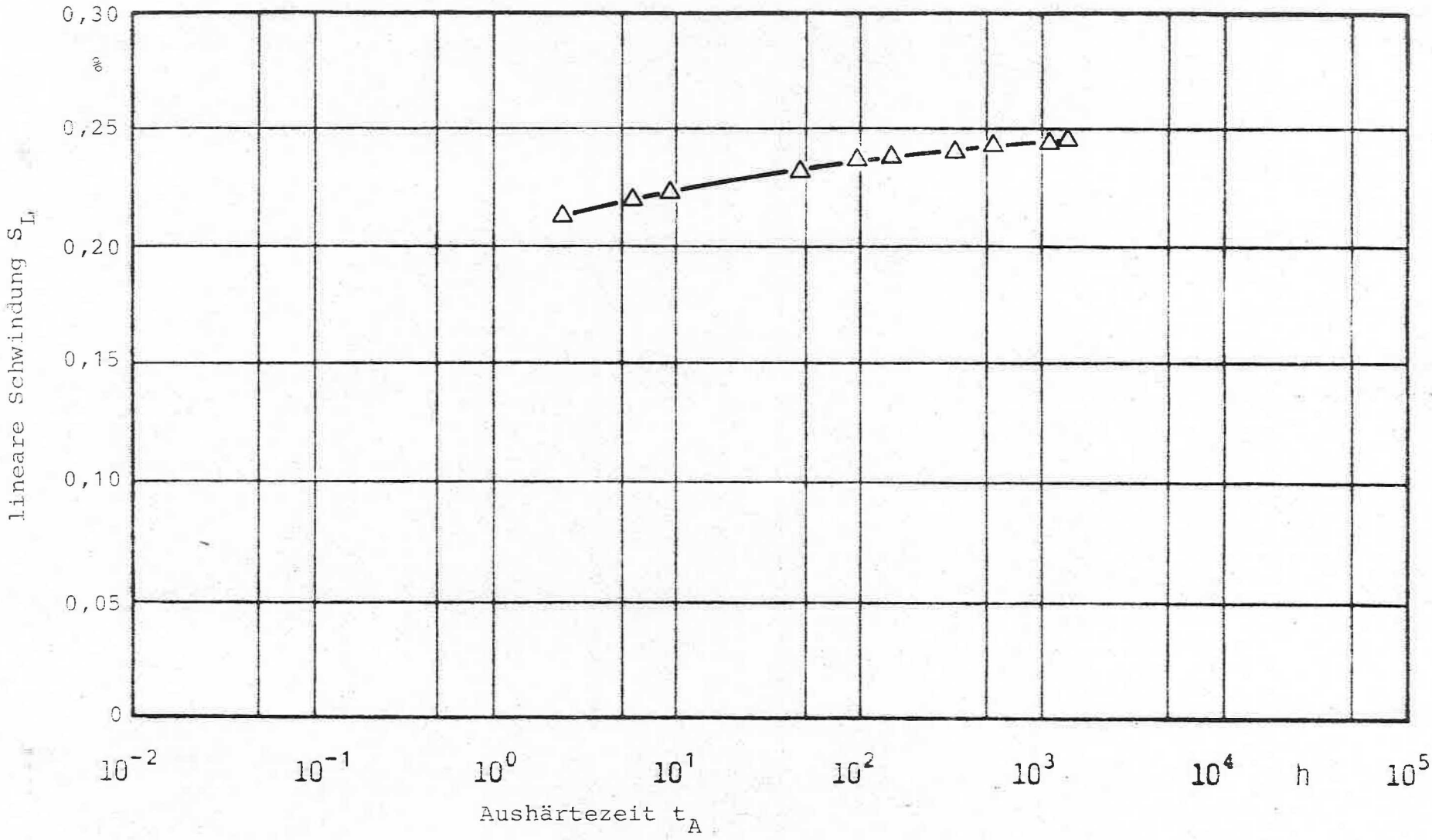


Bild 59: Lineare Schwindung S_L des Verbundsystemes III in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

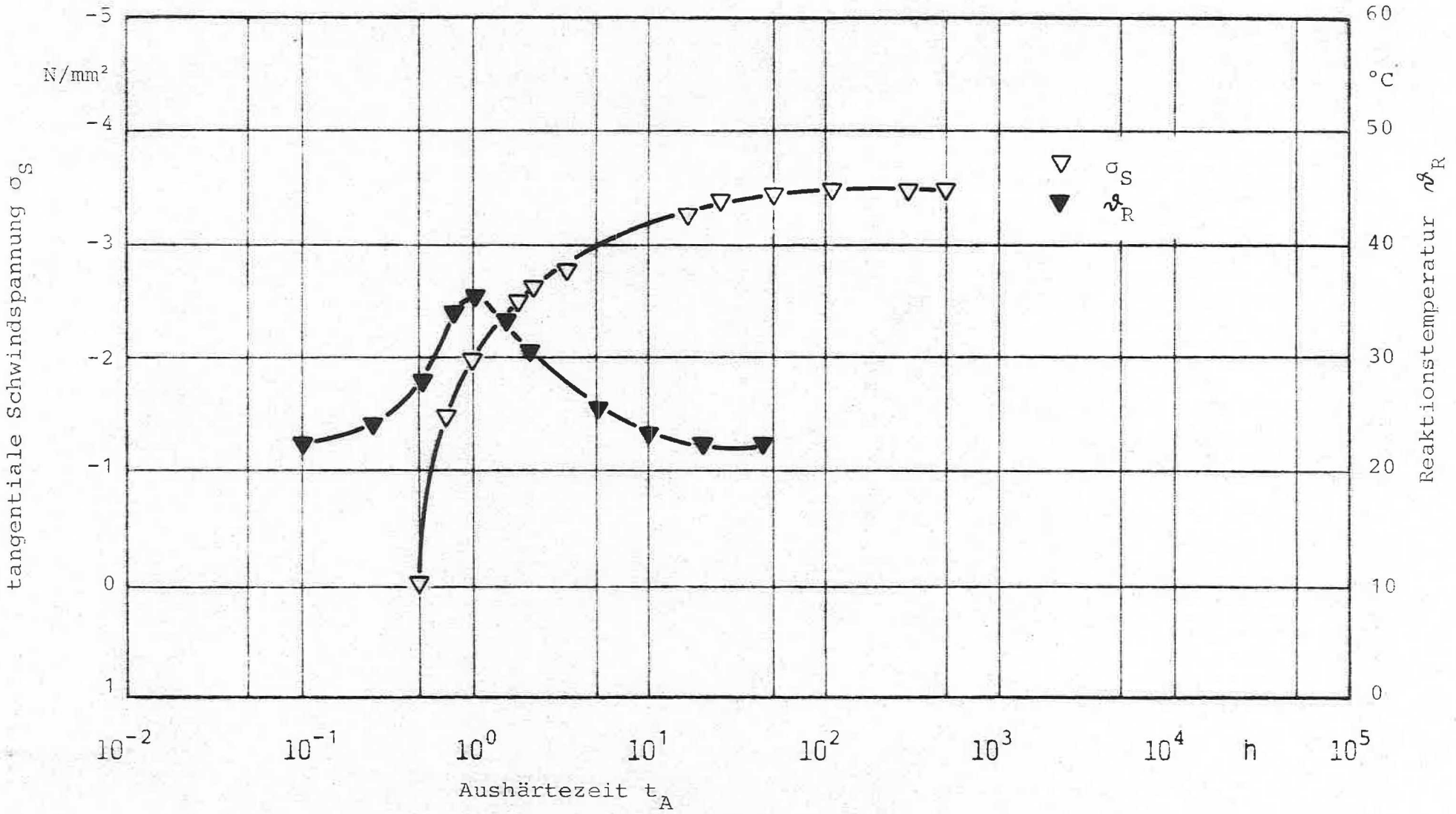


Bild 60: Tangentiale Schwindspannung σ_S und Reaktionstemperatur ϑ_R des Verbundsystemes III in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

Im Vergleich zum Verbundsystem I, das auf dem gleichen Harzsystem basiert, wurden neben einer geringfügig höheren Reaktionstemperatur bedeutend größere Schwindspannungen ermittelt. Auch hier kann - wie bei der Prismen-Methode - davon ausgegangen werden, daß die Schwindung der Matrix wegen der besseren Homogenität des Verbundes signifikanter zur Geltung kommt.

5.3.3 Thermometer-Methode

Die in Bild 61 dargestellten Kurven deuten ebenfalls auf Schwindungszustände hin, die deutlich über denen des RHB mit gleichem Harzsystem liegen. Der Verlauf der Kurven ist in der Charakteristik dem an RHB ermittelten Verlauf ähnlich. Auffallend ist, daß zum Plattenzentrum und im Viertelpunkt kaum unterschiedliche Meßwerte erzielt wurden. Dieser Umstand könnte ebenfalls eine Folge des homogenen Werkstoffaufbaues sein. Bedingt durch gleichmäßigen Verbundaufbau, wie er beim RHM gegeben ist, werden im vorliegenden Fall lokale Eigenspannungen unterbunden und ermöglichen eine störungsfreie Entwicklung der Schwindungsvorgänge. Mit dieser Annahme können auch die höheren Schwindungsdrücke erklärt werden.

5.3.4 Sensor-Methode

Die am Verbundsystem III anhand der Sensor-Methode im Plattenzentrum in Längsrichtung ermittelten Dehnungszustände sind in Bild 62 wiedergegeben. Auf die Darstellung der Dehnungszustände in Breitachse und im Plattenviertelpunkt wurde verzichtet, da sie sich kaum erkennbar von den in Bild 62 aufgezeigten Verhältnissen unterscheiden. Die aus den gemessenen und theoretischen Werten errechneten Dehnungen und die unter Berücksichtigung des Sensor-E-Moduls ermittelten Schwindspannungen sind in Bild 63 aufgetragen. Der Vergleich dieser Kurven mit den in Bild 46 und 49 für das Verbundsystem I dargestellten Kurven zeigt, daß auch mit der Sensor-Methode

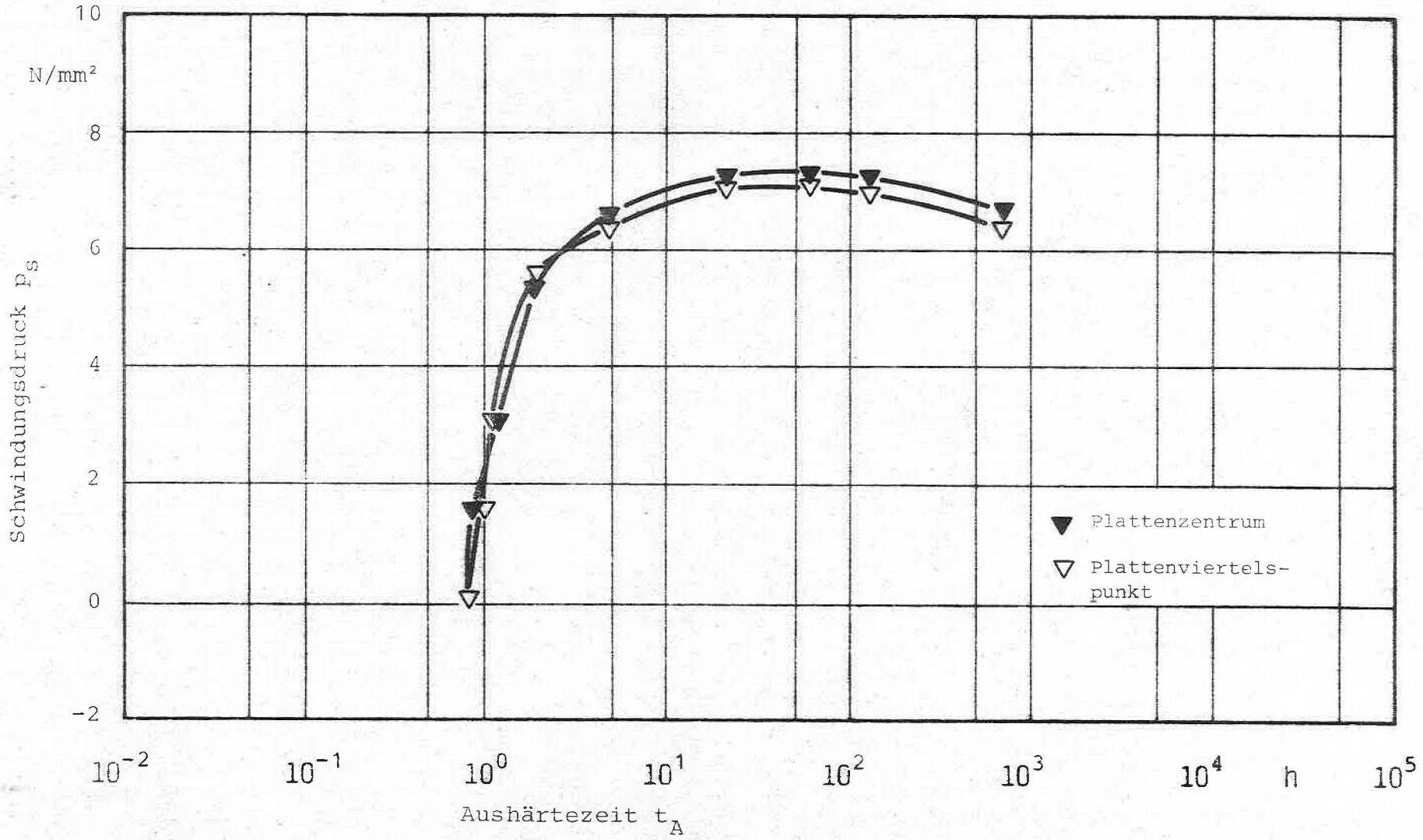


Bild 61: Schwindungsdruck des Verbundsystemes III in Abhängigkeit von der Aushärtezeit t_A

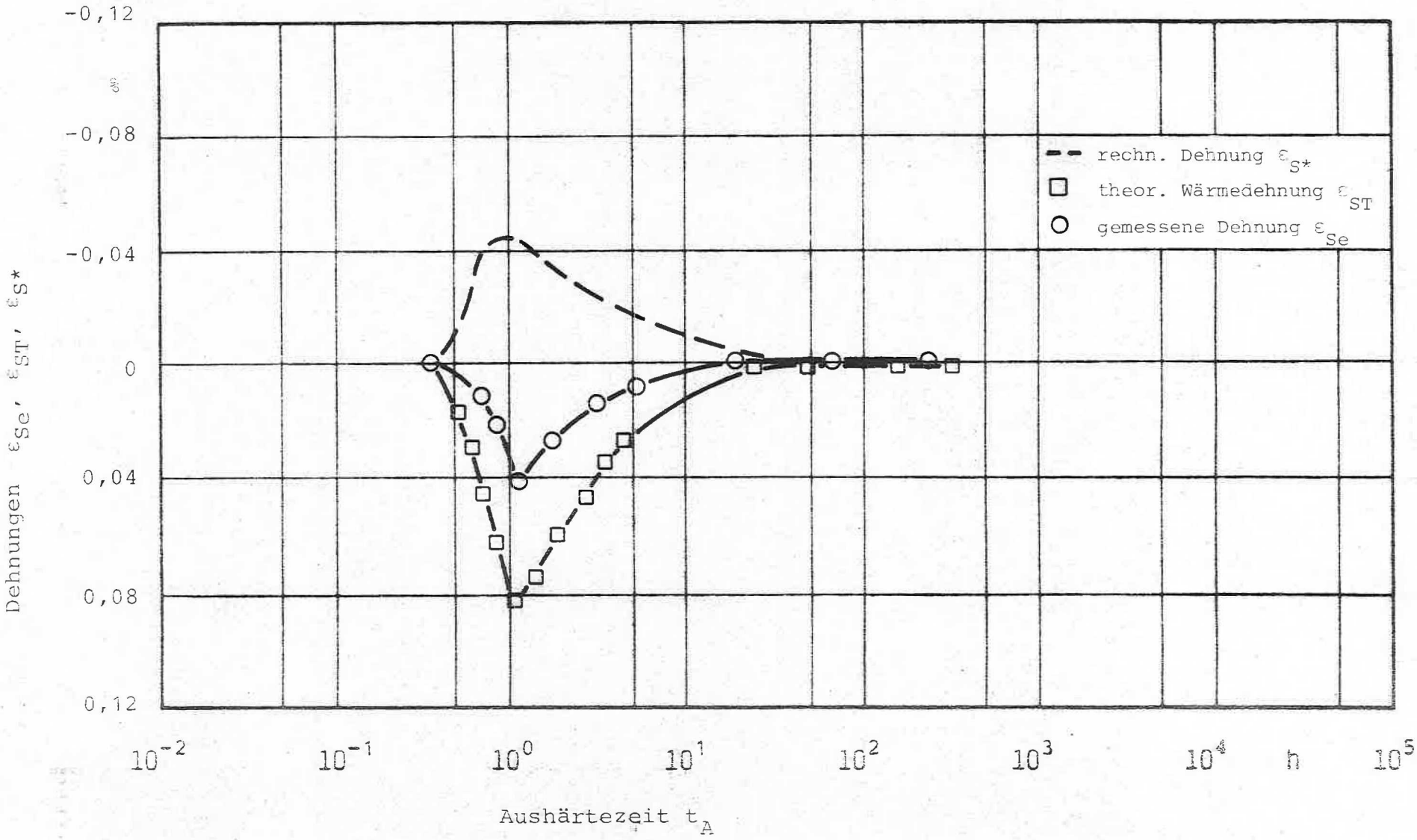


Bild 62: Gemessene und rechnerische Dehnungen des Verbundsystemes III gültig für die Längsachse im Plattenzentrum

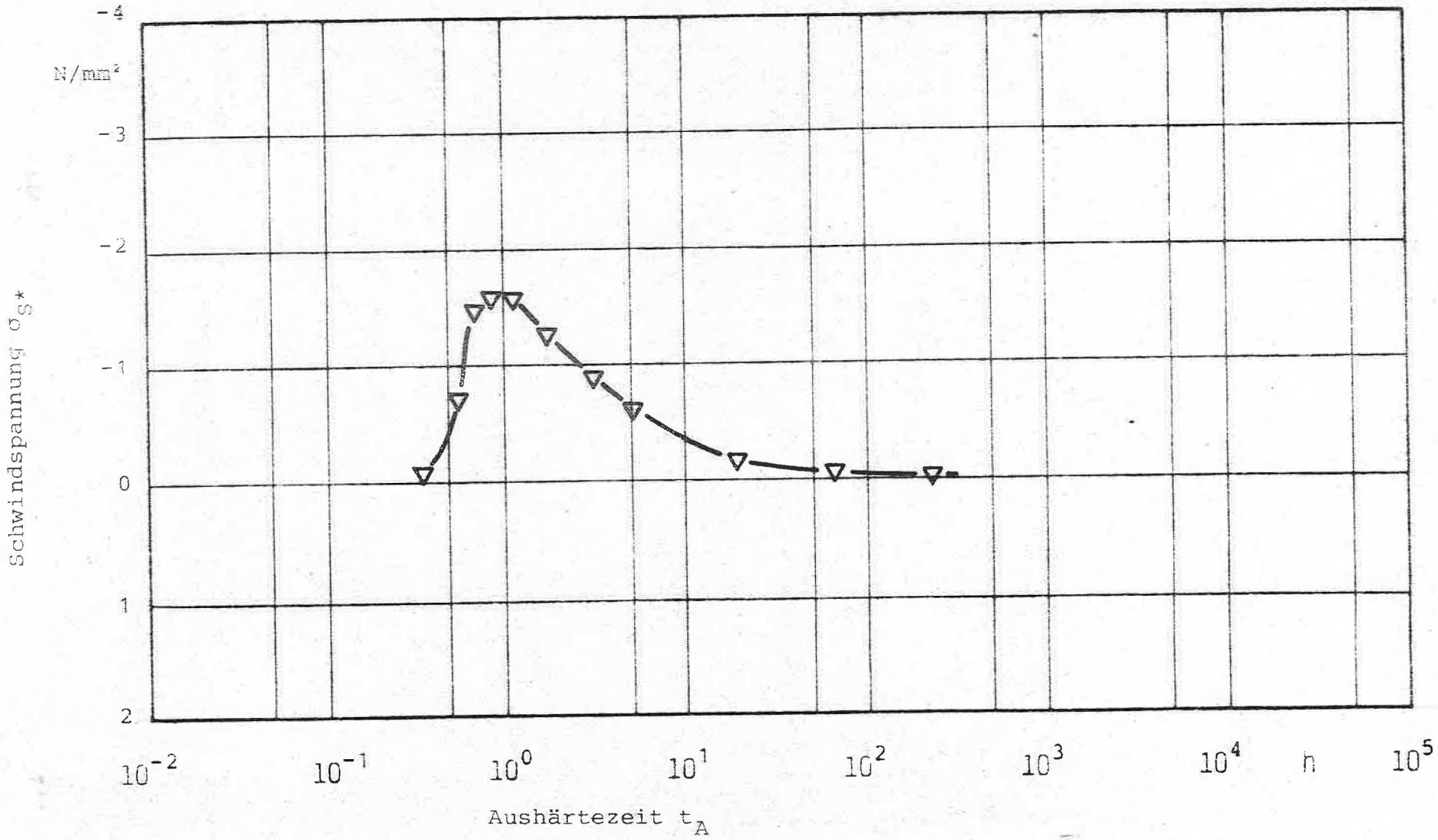


Bild 63: Schwindspannung σ_{S*} des Verbundsystemes III im Plattenzentrum in Längsachse

beim Verbundsystem III höher schwindungsbedingte Dehnungen und folglich höhere Schwindspannungen festgestellt werden. Die Ursachen dürften identisch mit den Ursachen sein, welche bei den anderen Meßmethoden festgestellt wurden. Unterschiede zwischen den beiden Vorzugsrichtungen und den verschiedenen Lagen in den Versuchsplatten sind noch geringer als bei den anderen Meßmethoden. Dies bestätigt, daß beim Verbundsystem III eine homogene Matrix-Füllstoff-Verteilung vorliegt, die für den gleichmäßigen Spannungszustand in der Versuchsplatte verantwortlich ist.

5.3.5 Kurzzeit-Biegeversuche

Die bei den Kurzzeit-Biegeversuchen ermittelten Ergebnisse sind bereits unter Abschnitt 5.2.5 in Tabelle 5 angegeben. In Bild 64 ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Verbundsystemes III nach 100 und 10^5 Stunden Aushärtezeit in Form eines Diagrammes dargestellt.

Generell fällt auf, daß sich die Biegefestigkeiten kaum von den des Verbundsystems I unterscheiden, wogegen der E-Modul erheblich höher ist. Die Ursache hierfür ist wahrscheinlich in der Festigkeit des Füllstoffes und in der dichteren Packung des Verbundes zu suchen. Bedingt durch die geringen Unterschiede der Korngröße und gleichmäßiger Konverteilung ergeben sich kleinere Matrixbereiche zwischen den einzelnen Füllstoffteilchen. Dadurch kommt die Steifigkeit des Füllstoffes besser zum Tragen und bewirkt die etwas höhere Steifigkeit des gesamten Verbundes. Bemerkenswert ist auch, daß die Spannungs-Dehnungs-Linien ähnlich wie bei den anderen Verbundsystemen nach 1000 Stunden Aushärtezeit über weite Bereiche linear sind.

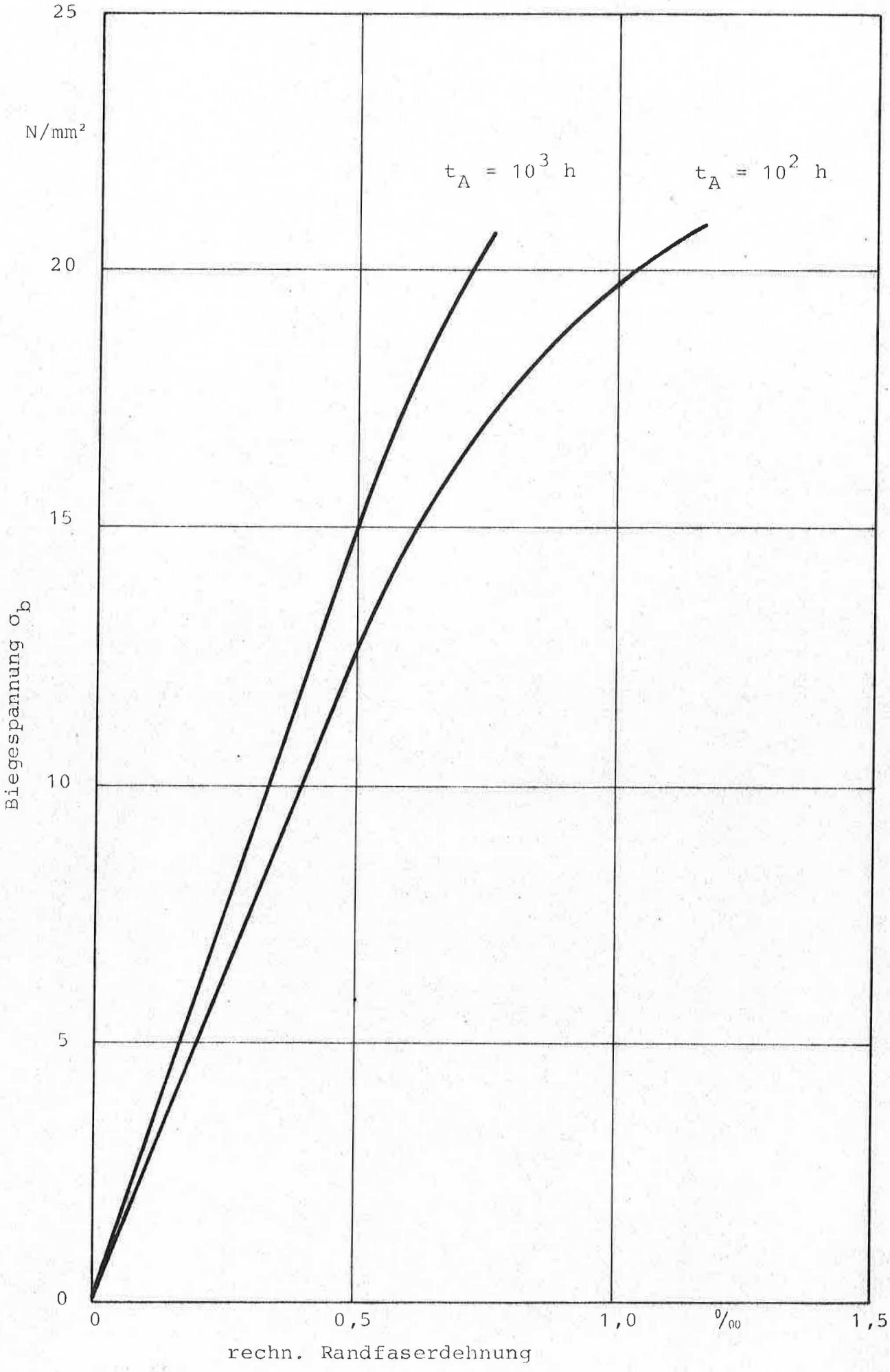


Bild 64: Spannungs-Dehnungs-Linien des Verbundsystemes III bei 10^2 h und 10^3 h Aushärtezeit

5.3.6 Zeitstand-Biegeversuche

Das Verhalten des Verbundsystems III bei Zeitstand-Biegebeanspruchung ist aus Bild 65 zu ersehen. Während in der gewählten Darstellung bei den Versuchen, die nach 100 Stunden Aushärtezeit bei 23°C begonnen wurden, nach ca. 10 Stunden Belastungszeit ein progressiver Abfall des Kriechmoduls festgestellt wurde, ergab sich bei den Versuchen, die 1000 Stunden nach der Mörtelherstellung begonnen wurden, in der gewählten Darstellungsweise ein linearer Abfall des Kriechmoduls. Die Formel zur Berechnung der Kriechmoduli wurden bereits in Abschnitt 5.2.6 beschrieben, sie gelten auch hier. Im Prinzip wurden ähnliche Resultate wie beim RHB ermittelt. Auch in diesem Fall ist feststellbar, daß nach 100 Stunden Aushärtezeit im Vergleich zu 1000 Stunden ausgehärtetem RHM geringere Kriechmoduli und ein ungünstigeres Kriechverhalten eintreten. Die durch Rechnung und Extrapolation ermittelten Kriechmoduli und die Kriechfaktoren sind in Tabelle 6 aufgeführt.

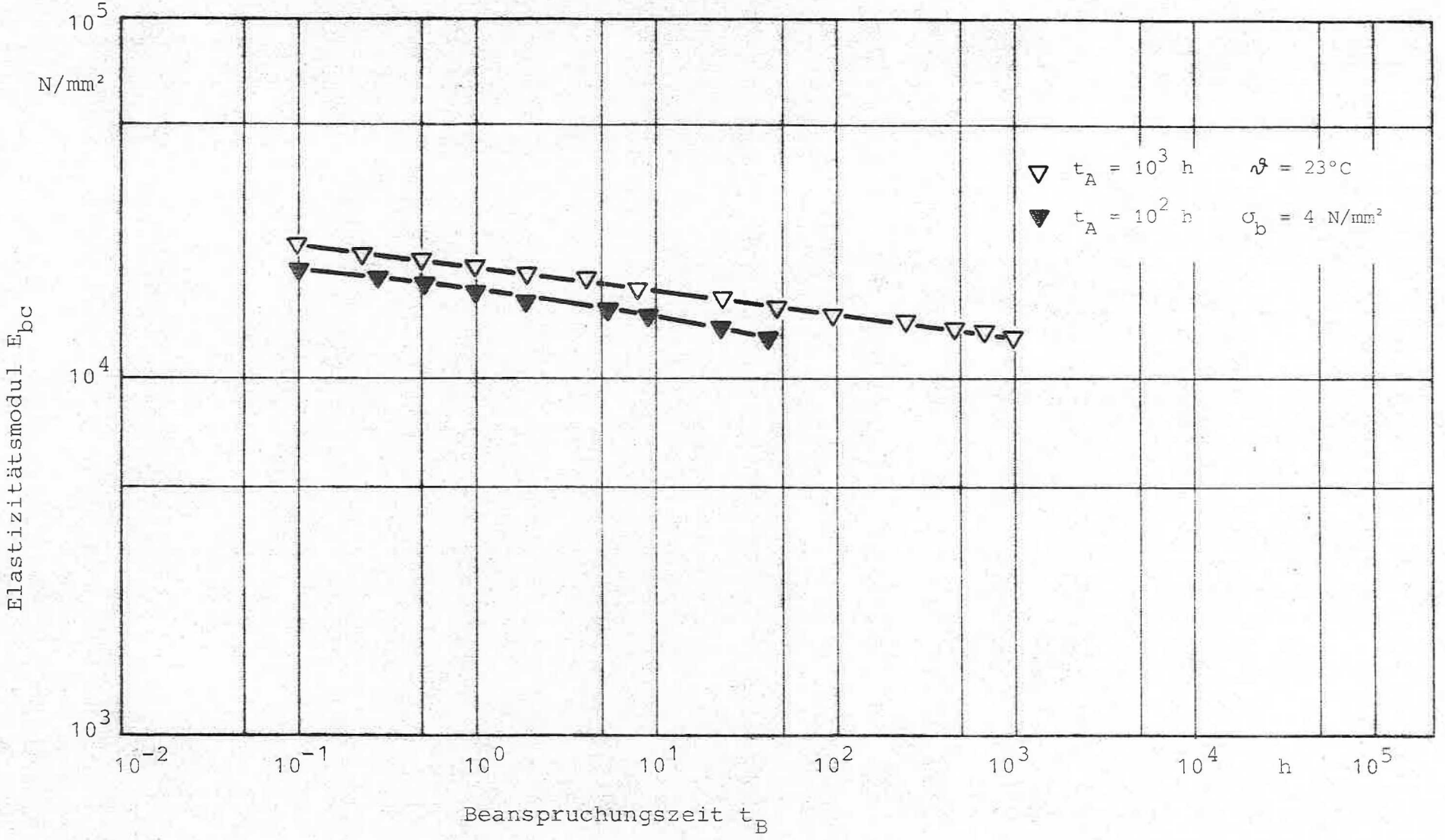


Bild 65: Zeitabhängigkeit der Kriechmoduln des Verbundsystemes III bei verschiedenen Aushärtezuständen

5.4 Vergleichende Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die werkstoffabhängigen Ergebnisse wurden bereits in den Abschnitten 5.2 und 5.3 einem Vergleich unterzogen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß das zu erwartende Schwindverhalten bestätigt werden konnte. So zeigen die als schwindarm zu betrachtenden Verbundsysteme IV, V, VI und VII geringe Schwindungen bzw. aus geringer Schwindung resultierende Eigenschaften. Die Verbundsysteme VIII und IX weisen jeweils das ausgeprägteste Schwindverhalten auf. Aus den gezeigten Diagrammen sind die Unterschiede zwischen den Verbundsystemen gut erkennbar. Die festgestellten Daten können freilich nicht als Absolutwerte auf beliebige Bauteile oder Erzeugnisse aus RHB bzw. RHM übertragen werden. Vielmehr sind die dargestellten Tendenzen, insbesondere hinsichtlich der Aushärteabhängigkeit, als richtungsweisend anzusehen. Hierbei spielt die Wechselwirkung zwischen der Matrix als Bindemittel und dem Füllstoff eine wesentliche Rolle, da der Füllstoff einerseits durch seine Zusammensetzung und andererseits durch seine Gestalt und seine statistische Verteilung im Verbundsystem Einfluß nimmt.

In [58], [61], [62] und [63] hat man sich u.a. intensiv mit der Wechselwirkung zwischen Bindemittel und Füllstoff befaßt. Als Merkmal erscheint hier, daß bei gleichem Füllstoffgehalt und bei gleicher Substanz die Schwindung des Verbundes durch große Anteile grober gebrochener (Splitt) Füllstoffe leicht behindert und dadurch minimal reduziert wird. Die Geometrie der Erzeugnisse hat offensichtlich ebenfalls einen Einfluß, und zwar besonders dann, wenn schwindungsbehindernde Elemente zur Wirkung kommen.

Der entscheidende Einfluß wird jedoch durch die Wahl der Matrixwerkstoffe, durch die Füllstoffanteile und deren Verteilung sowie von den Verarbeitungsparametern, z.B. Tempera-

turen, Luftfeuchtigkeit und Vermischung, ausgeübt [46], [47], [48] und [49]. Der Verlauf der Aushärtung wird erheblich von diesen Faktoren beeinträchtigt. Mit zunehmendem Aushärtegrad steigen auch das Schwindmaß oder schwindungsabhängige Erscheinungen, wie z.B. Eigenspannungen, an und klingen erst nach dem Ablauf der wesentlichen Reaktionsphase ab oder kriechen bzw. relaxieren einen annähernd konstanten Zustand zu. Dabei ist zu bemerken, daß die als kritisch anzusehenden Eigenspannungen vorwiegend während der Abkühlphase entstehen. Thermische Nachbehandlungen führen zwar zu besserer Aushärtung, aber auch bei zu rascher Abkühlung zu erheblichen Eigenspannungen.

Wie durch Versuche an ungefüllter Matrix in [38] gezeigt werden konnte, wird der Aushärtungsverlauf bei kalthärtenden Reaktionsharzen außer von den Reaktionsmitteln entscheidend von der Temperatureinwirkung und der Zeit geprägt. Diese Erkenntnisse können zwar - wegen der Wirkung der Füllstoffe - nicht absolut, aber doch tendenziell auf RHB und RHM übertragen werden. Bei normalen und höheren Umgebungstemperaturen ist bei sonst gleichen Bedingungen ein rascherer Härtungsverlauf als bei niedrigeren Temperaturen zu erwarten. Damit verbunden ist wiederum der Verlauf der Schwindung, was bedeutet, daß sich der Schwindungsverlauf abhängig von Reaktionssystem und Umwelttemperatur über verschieden lange Zeiträume erstrecken kann, und zudem auf die Quantität der Schwindung Einfluß nimmt.

Da aus den hier durchgeführten Untersuchungen verschiedene Kenngrößen resultieren, wird im folgenden versucht, diese miteinander zu vergleichen. Von den vier für RHB und RHM angewandten Meßmethoden wird durch die Prismen-Methode ein lineares Schwindmaß ermittelt. Die Ring-, die Thermometer- und die Sensor-Methode liefern spannungsbezogene Kenngrößen. Es liegt deshalb nahe, diese Kenngrößen miteinander zu vergleichen.

In Bild 66 sind die Kurven des Verbundsystems I gegenübergestellt. Dabei sei angenommen, daß die tangentiale Schwindspannung σ_S aus der Ring-Methode, der Schwindungsdruck p_S aus der Thermometer-Methode und die Schwindspannung σ_{S*} aus der Sensor-Methode etwa gleiche Bedeutung haben. Betrachtet man die Kurvenverläufe, so kann man neben verschiedenem Startverhalten auch sehr verschiedene Endzustände erkennen. Der Kurvenverlauf der Sensor-Messung ist dabei auf Relaxationsvorgänge im Sensor und in benachbarten RHB-Bereichen zurückzuführen. Würde der Kurvenzug das Niveau des Spannungsmaximums beibehalten, so könnte man zumindest von qualitativ ähnlichen Verhältnissen ausgehen. Auf die Gegenüberstellung der Kurvenverläufe der anderen Verbundsysteme wird verzichtet, da sich auch dabei ein ähnliches Verhalten zeigen würde. Lediglich bei den schwindarmen Systemen auf Basis der Matrix UP2 und EP pendeln sich die tangentiale Schwindspannung σ_S und der Schwindungsdruck p_S auf ein ähnliches Niveau ein.

Vergleicht man den meßtechnischen Aufwand und die mit den hier angewandten Methoden erzielbaren Aussagen, so muß erkannt werden, daß neben der Prismen-Methode die Ring-Methode für die Praxis brauchbare Meßdaten liefert. Die Thermometer- und die Sensor-Methode scheinen wegen des erheblichen meßtechnischen Aufwandes für eine standardisierte Untersuchung der Schwindvorgänge in der Praxis leider nur begrenzt anwendbar.

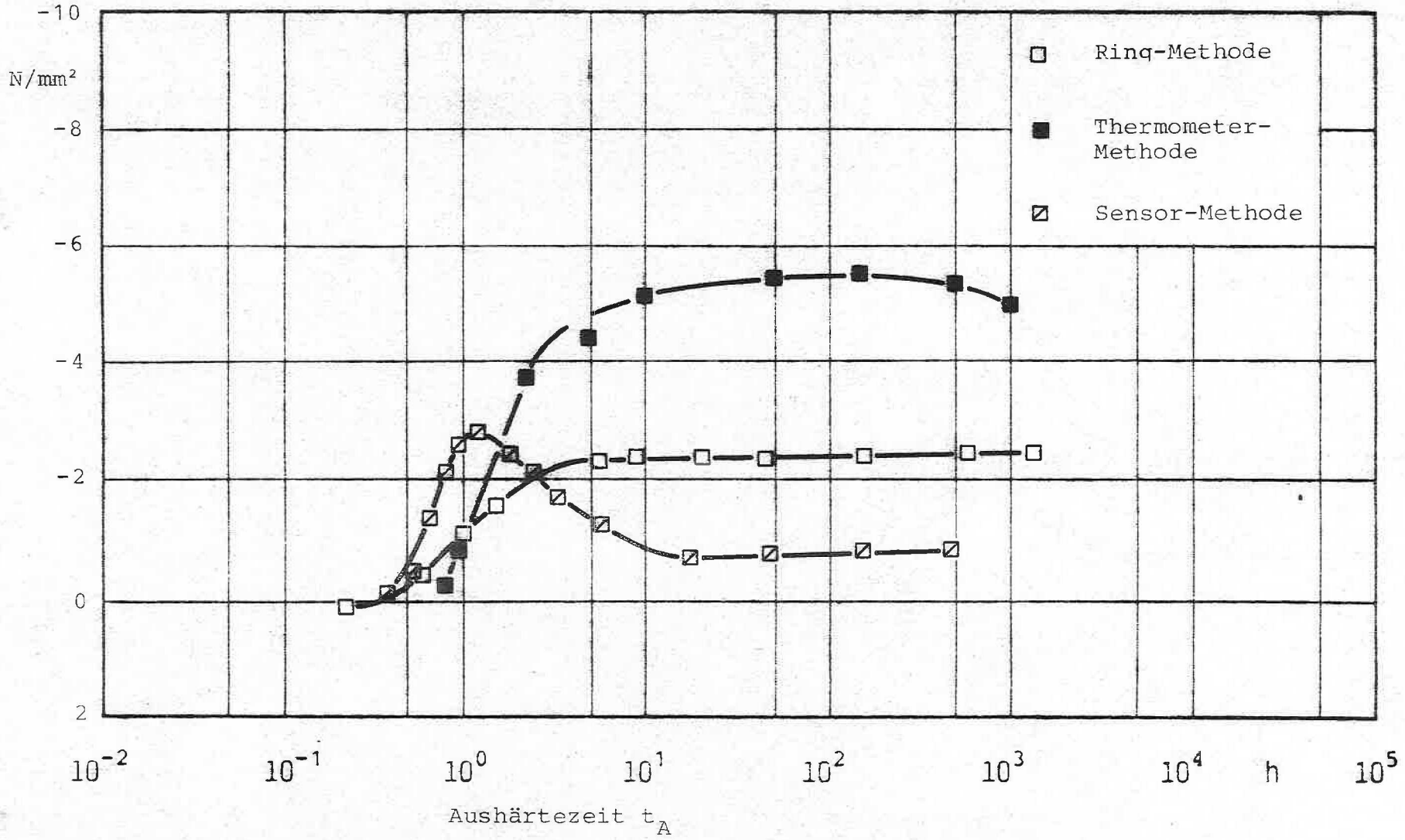


Bild 66: Vergleichende Gegenüberstellung der Meßmethoden

6. Interpretation der Ergebnisse und Nutzen für die Praxis

Nachdem die Resultate der Untersuchungen nunmehr in werkstoffspezifischer Hinsicht und im Hinblick auf die Aussagefähigkeit der Meßmethoden verglichen wurden, ist deren Bedeutung für die Praxis zu betrachten.

Wie aus verschiedenen Diagrammen und der Zusammenstellung in Bild 66 zu entnehmen ist, sind bei normaler Kalthärtung die entscheidenden Aushärtungs- und Schwindungsvorgänge fast ausnahmslos innerhalb von ca. 24 Stunden weitgehend beendet. Die nach dieser Zeitspanne noch stattfindenden Nachreaktionen bei normalen Umgebungstemperaturen sind einerseits in quantitativer Hinsicht unbedeutend und überlagern sich andererseits der Relaxation des Matrixwerkstoffes. Bei nachträglicher thermischer Nachbehandlung zwecks Erzielung höherer Aushärtegrade ist infolge erheblicher Nachreaktionen mit zusätzlichen Schwinderscheinungen zu rechnen.

Wie bereits erwähnt und in [5] und [64] angedeutet, werden bei reaktionsintensiven Härtungssystemen infolge hoher Reaktionstemperaturen und kurzen Aufheiz- und Abkühlphasen zwar gute Aushärtezustände erreicht, aber auch thermisch bedingte Eigenspannungen erzeugt.

Während der Abkühlphase wirken die Kontraktion der Füllstoffe und der Matrix sowie die Schwindung der Matrix zusammen und ermöglichen die Bildung von Zugspannungen im Verbund. Durch Lufteinschlüsse, die beim Mischvorgang z.T. zwangsweise insbesondere bei Systemen hoher Viskosität entstehen, werden zusätzlich Fehlstellen erzeugt, die sich vorwiegend im Grenzflächenbereich bemerkbar machen. Infolge von Lufteinschlüssen, die sich bevorzugt um Grenzflächenzonen gruppieren, wird die Schwachstelle des Verbundes, die Grenzfläche, zusätzlich ungünstig beeinflußt.

Bei der Bildung hoher Eigenspannungen in Form von Zugspannungen stellen diese Lufteinschlüsse oder Poren Störungen dar und sind u.U. für Schäden im Verbund verantwortlich. Es ist also bei der Fertigung von RHB- bzw. RHM-Teilen neben der geeigneten Werkstoffauswahl darauf zu achten, durch günstige Verarbeitungsbedingungen möglichst wenige, im Idealfall keine Störstellen in Form von Luftporen einzumischen. Durch konstruktive und verarbeitungstechnische Maßnahmen ist die Bildung von Störstellen möglichst zu vermeiden, die die Schwindung besonders behindern und zusätzliche Belastungen des Werkstoffes darstellen.

Bezüglich der Anwendbarkeit der hier benutzten Meßmethoden in der Praxis gilt zusammengefaßt, daß zur Bestimmung des linearen Schwindverhaltens von RHB bzw. RHM sich die auch in der Betonindustrie übliche Prismen-Methode als orientierende Untersuchung eignet. Den Problemen, die durch die Klebwirkung zwischen Matrixwerkstoff und Versuchsform auftreten können, ist entsprechend Rechnung zu tragen, um Schwierigkeiten in dieser Beziehung oder Fehlinterpretation der Meßwerte zu vermeiden. Ferner ist dabei zu klären, ob die unter Idealbedingungen ermittelten Schwindungsverhältnisse auf die u.U. komplizierte Gestalt eines Formteiles übertragbar sind.

Die Ring- und die Thermometer-Methode liefern im Prinzip ähnliche Aussagen. Während mit der Ring-Methode Schwindspannungen ermittelt werden können, die für das jeweilige Verbundsystem als spezifisch zu betrachten sind, geben die mit der Thermometer-Methode festgestellten Schwindungsdrücke eine Information über den örtlichen wirkenden Spannungszustand. Mit der Thermometer-Methode werden höhere Spannungen als mit der Ring-Methode ermittelt. Unter der Annahme, daß beiden Meßgrößen die gleiche Bedeutung zukommt, ist zu vermuten, daß die örtlich feststell-

baren Spannungszustände allmählich abgebaut werden und in einem Teil, wie z.B. im Ring, nur noch teilweise zur Geltung kommen. Die Thermometer-Methode kann deshalb zur Erfassung örtlicher Schwindungszustände herangezogen werden, erfordert aber einen gewissen meßtechnischen Aufwand. Die Ring-Methode dagegen eignet sich für die Untersuchung von Schwindspannungen unter Voraussetzung der Schwindungsbehinderung durch konstruktive Elemente.

Mit Hilfe der meßtechnisch sehr aufwendigen Sensor-Methode können ebenfalls Informationen über örtliche Spannungszustände gewonnen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß besonders das Relaxationsverhalten des Sensorwerkstoffes und der angrenzenden Matrix in die Meßwerte eingehen und bei oder nach der Abkühlphase zur Verfälschung der Meßergebnisse führen können. So ist u.U. eine Fehlaussage möglich, als ob nach gewisser Aushärtezeit die Spannungszustände im RHB einem neutralen Wert zustreben.

Besonders anhand der Prismen-, der Ring- und der Thermometer-Methode wurde festgestellt, daß mit den schwindarmen Matrixwerkstoffen UP2 und EP bedeutend geringere Schwindungserscheinungen im RHB auftreten

Mit allen hier angewandten Meßmethoden konnte trotz unterschiedlicher Aussagewerte eine ähnliche, für die Praxis bedeutsame Aussage gefunden werden. Die gefundenen Abhängigkeiten zeigen in ihrer Tendenz, daß die Schwindungsvorgänge bei Kalthärtung und die daraus resultierenden Zustände vornehmlich entscheidend von der exothermen Reaktionsphase und der danach folgenden Abkühlung beeinflußt werden. Der Härtungsverlauf wird dabei von der Auswahl der Reaktionspartner gesteuert. Ferner hängt der im Bauteilen infolge Schwindung vorliegende

Spannungszustand von der Füllstoffverteilung, von der Füllstoffgestalt und von der Bauteilgeometrie ab. Einen wesentlichen Einfluß auf die Auswirkung bzw. am Abbau dieser Eigenspannungen hat das Relaxationsvermögen der Matrix und die Homogenität des Verbundes.