

**Zur Berechnung von Klebverbindungen hybrider
Karosseriestrukturen beim Lacktrocknungsprozess**

Von der Fakultät Maschinenwesen

der

Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades eines
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Stephan Menzel

Tag der Verteidigung: 22.09.2011

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand der Abteilung Werkstoffe und Fertigungsverfahren der Konzernforschung der Volkswagen AG in Wolfsburg. Anlass der Arbeit waren noch offene Fragestellungen zur Konstruktion und Auslegung von Mischbaustrukturen und der damit verbundenen Füge-technik. In enger Zusammenarbeit mit der Aufbau-Vorentwicklung der Marke Volkswagen konnte ich das Projekt Aluminiumdach im Passat Variant (VW462) begleiten. Ziel und Motivation des Projekts war es, die Leichtbaupotentiale großflächiger, dünnwandiger Karosseriestrukturen vor dem Hintergrund der Delta Alpha Problematik und der Verbindungstechnik zu nutzen. Das Thema der Auslegung der Klebverbindungen während der Warmaushärtung im Lacktrocknungsprozess stand dabei im Fokus. Insbesondere die Frage nach dem Festigkeitsverhalten der Verbindungsstellen und die zu erwartenden bleibenden Deformationen in den flächigen Strukturen war steti-ger Inhalt der Diskussion. Trotz jahrzehntelanger Forschung auf dem Gebiet der Auslegung von Klebverbindungen hat sich bis heute keine einheitliche Vorgehensweise durchgesetzt. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit experimentelle Festigkeitsuntersuchun-gen an stumpf geklebten Rohrproben unter Temperatureinfluss durchgeführt sowie an einfach überlappte Zugscherproben numerisch validiert. Letztendlich konnten die Erkenntnisse aus den Untersuchungen auf das Aluminiumdach in einer Stahlkarosserie übertragen werden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Werner Hufenbach danke ich besonders für die erste Anregung zu dieser Arbeit, für die Übernahme der Doktorvaterschaft und der mir so gegebenen Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit. Seine durchgängige Unterstützung und der großzügig gewährte Freiraum während der Bearbeitung haben mich dabei stets begleitet.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Für die beständige Förderung der Arbeit gebührt der Volkswagen AG meine Anerkennung. Hervorheben möchte ich weiterhin die Unterstützung durch meinen fachlichen Betreuer Dr.-Ing. Tino Fuhrmann, dem ich für die stetige Motivation, die konstruktiven Diskussionen und die freundschaftliche Zusammenarbeit danke.

Weiterhin möchte ich mich für die institutsseitige Unterstützung von Dr.-Ing. F. Adam, Dipl.-Ing. R. Protz und Dipl.-Ing. A. Neudecker (alle Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Dresden), sowie bei Dr.-Ing. S. Paulke (P+Z

Engineering GmbH) und Dr.-Ing. M. Lambrecht (ehemals: P+Z Engineering GmbH) bei der Verwendung der von Ihnen programmierten User Subroutine für das Materialmodell des Klebstoffs bedanken.

Auch allen Studenten, die den experimentellen aber auch numerischen Teil der Arbeit unterstützt haben, sei für Ihr Engagement herzlich gedankt.

Abschließend möchte ich mich besonders herzlich bei meiner Frau Bettina für die liebevolle Unterstützung und Motivation während der Promotion bedanken.

Rechtlicher Hinweis:

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Abkürzungen, Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	1
2 Werkstoffmechanische Beschreibung von Klebstoffen	3
2.1 Grundlagen der Kontinuumsmechanik für Klebverbindungen.....	3
2.2 Grundbegriffe.....	4
2.3 Spannungs-Deformations-Beziehungen.....	15
2.4 Delta Alpha Problematik in der Mischbauweise.....	16
3 Untersuchungen zum Materialverhalten	18
3.1 Einfluss des Vernetzungsgrades.....	18
3.1.1 Ermittlung der Reaktionskinetik zur Beschreibung des Aushärteverhaltens ...	19
3.1.2 Bestimmung der Glasübergangstemperatur.....	25
3.2 Viskoelastische Materialkennwerte	27
3.2.1 Dynamisch-Mechanische Analyse	28
3.2.2 Masterkurve, Schifffunktion, Prony-Reihen.....	30
3.2.3 Beschreibung des Gleichgewichtsmoduls	36
3.3 Rheologische Untersuchungen zur Bestimmung des Gelpunktes.....	37
3.4 Bestimmung der Ausdehnungskoeffizienten	41
3.4.1 Thermischer Ausdehnungskoeffizient.....	41
3.4.2 Ausdehnungskoeffizient infolge chemischer Reaktionsschwindung	42
3.5 Quasistatische Grundversuche an Rohrproben	44
3.5.1 Probengeometrie und -fertigung.....	44
3.5.2 Prüfmaschine	46
3.5.3 Verformungsmessung.....	47
3.5.4 Quasistatische Festigkeitsversuche.....	49
3.5.5 Beschreibung der Spannungs-Deformations-Beziehungen	51
3.5.6 Bestimmung der Moduln und des Fließbeginns	55
3.6 Ergebnisse der quasistatischen Festigkeitsuntersuchungen	59
3.6.1 Spannungs-Verformungs-Verhalten.....	59

3.6.2	Bruchbilder	65
3.6.3	Fließbeginn und Spannungsmaximum	67
3.6.4	Ansatz zur Vernetzungsgradabhängigkeit der Fließspannung	72
4	Validierung des Materialmodells	75
4.1	Grundlegende Beschreibung des Materialmodells	75
4.1.1	Spannungsrelaxation.....	76
4.1.2	Berücksichtigung von Einschnüreffekten.....	77
4.1.3	Ausgabevariablen des Materialmodells.....	78
4.2	Numerische Untersuchungen an geklebten Rohrproben.....	79
4.2.1	Modellbeschreibung	79
4.2.2	Einfluss der Klebschichtdiskretisierung	81
4.2.3	Experimentelle und numerische Ergebnisse für den vollständig vernetzten Klebstoff	82
4.2.4	Experimentelle und numerische Ergebnisse des nicht vollständig vernetzten Klebstoffs.....	90
4.3	Experimentelle und numerische Untersuchungen an geklebten Zugscherproben	92
4.3.1	Modellbeschreibung	93
4.3.2	Untersuchungen während des Vernetzungsprozesses	96
4.3.3	Untersuchungen an Zugscherproben mit vollständig vernetztem Klebstoff ..	100
4.3.4	Validierung an der einfach überlappten Zugscherprobe.....	102
5	Berechnung einer Klebverbindung am Beispiel eines Aluminiumdaches	104
5.1	Beschreibung der Fahrzeugstruktur	104
5.2	Modellbeschreibung.....	104
5.3	Temperaturverteilung in der Karosseriestruktur	107
5.4	Ergebnisse der numerisch berechneten Mischbaustruktur.....	110
6	Zusammenfassung und Ausblick	116
	Literatur	119
	Anhang	125

Abkürzungen, Formelzeichen

Abkürzungen

AF	Adhäsionbruch
CF	Kohäsionsbruch
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMA	Dynamisch Mechanische Analyse
DSC	Differential Scanning Calorimetrie (engl.)
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FE	Finite-Elemente
G-Modul	Schubmodul
ISO	International Organization for Standardization (engl.)
IWM	Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg
JMAK	Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorow
KTL	Katodische Tauchlackierung
NT	Node Temperature (engl.)
PEP	Produktentstehungsprozess
PTFE	Polytetrafluorethylen
RP	Rohrprobe
RT	Raumtemperatur
SCF	Substratnaher Kohäsionsbruch
SDV	Solution-Dependent-State-Variables (engl.)
Var.	Variante
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WLF	Williams, Landel, Ferry

Formelzeichen

a) Lateinisch

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit	Kapitel
a	Verformungsamplitude	μm	
a_1	Präexponentialfaktor	1/s	3.1.1
a_1	Ansatzfreiwert der Fließfunktion nach Schlimmer	-	2.2
a_2	Ansatzfreiwert der Fließfunktion nach Schlimmer	-	
a_p	Ansatzfreiwert der Fließfunktion nach Schlimmer	-	
a_T	Schifffaktor	-	
A	Fläche	mm^2	
A_0	Avrami-Ansatzfreiwert	-	
A_1	Avrami-Ansatzfreiwert	-	
b	Probenbreite	mm	
b_1	Ansatzfreiwert der Fließfunktion nach Lambrecht	-	
b_2	Ansatzfreiwert der Fließfunktion nach Lambrecht	-	
B_0	Avrami-Ansatzfreiwert	-	
B_1	Avrami-Ansatzfreiwert	-	
C_1	Ansatzfreiwert der Schifffunktion	-	
C_2	Ansatzfreiwert der Schifffunktion	-	
C_3	Ansatzfreiwert der Schifffunktion	-	
C_4	Ansatzfreiwert der Schifffunktion	-	
d	Innendurchmesser	mm	
d_K	Klebschichtdicke	mm	
D	Außendurchmesser	mm	
e	hydrostatischer Verzerrungsanteil	-	

e_1	Aktivierungsenergie	kJ/mol	
e_i	Relaxationsstärke für Laufvariable i	-	
e^c	vernetzungsbedingter hydrostatischer Verzerrungsanteil	-	
e^e	elastischer hydrostatischer Verzerrungsanteil	-	
e^p	plastischer hydrostatischer Verzerrungsanteil	-	
e^{shr}	volumenschwindungsbedingter hydrostatischer Verzerrungsanteil	-	
e^{th}	thermischbedingter hydrostatischer Verzerrungsanteil	-	
e^v	viskoser hydrostatischer Verzerrungsanteil	-	
E	Elastizitätsmodul	Pa	
E_0	Glasmodul	Pa	
E_∞	Gleichgewichtsmodul	Pa	
E_F	Elastizitätsmodul des Fügeteils	Pa	
E_i	Elastizitätsmodul für Laufvariable i	Pa	
E_{ijkl}	Elastizitätstensor	-	
E_{ZSV}	Elastizitätsmodul (Zugscherversuch)	Pa	
E'	Speichermodul	Pa	
E''	Verlustmodul	Pa	
E^*	Komplexmodul	Pa	
f	Frequenz	Hz	
F	Dynamische Kraft	N	3.2.1
F	Funktion der Fließbedingung bzw. plastisches Potenzial	-	
F_{IWM}	Fließfunktion des IWM	-	
$F_{Lambrecht}$	Fließfunktion nach Lambrecht [Lam08]	-	
$F_{Schlimmer}$	Fließfunktion nach Schlimmer [Sch74]	-	

$F_{Schlimmer/Mahnken}$	Fließfunktion nach Schlimmer/Mahnken [Mah05]	-
$F^*_{Schlimmer}$	plastisches Potenzial nach Schlimmer [Sch04]	-
F_x	Längskraft	N
G	Schubmodul	Pa
G_F	Schubmodul des Fügeteils	Pa
G_1	Ansatzfreiwert	-
G_2	Ansatzfreiwert	-
h	Probenhöhe	mm
i	Laufvariable	-
I_1	1. Invariante des Spannungstensors	Pa
J_2	2. Invariante des Spannungsdeviators	Pa ²
J_3	3. Invariante des Spannungsdeviators	-
k	Laufvariable	-
k_{cat}	Katalytischer Faktor	-
k_ε	Avrami-Ansatzfreiwert	-
k_γ	Avrami-Ansatzfreiwert	-
l	freie Biegelänge	mm
l_0	Ausgangsmesslänge	mm
l_1	Länge des ersten Fügeteils	mm
l_2	Länge des zweiten Fügeteils	mm
l_e	freie Einspannlänge	mm
l_{ges}	Gesamtlänge	mm
l_{mess}	Messlänge	mm
$l_{\ddot{u}}$	Überlappungslänge	mm
Δl	Längenänderung	mm
m	Exponent	-

$m_{K(a)}$	Masse des Klebstoffs (Wägen in Luft)	kg	
$m_{K(f)}$	Masse des Klebstoffs (Wägen in Flüssigkeit)	kg	
M	Drehmoment	Nm	
n	Exponent	-	
n_1	Reaktionsordnung	-	
n_i	Anzahl parallel geschalteter Maxwell-Elemente	-	
N	Anzahl Messpunkte	-	
p	Ansatzfreiwert der Fließfunktion	-	2.2
p	Vernetzungsgrad	-	3.1
p_{Gel}	Vernetzungsgrad am Gelpunkt	-	
q	Ansatzfreiwert der Fließfunktion	-	2.2
Q_{ges}	Gesamtreaktionswärme	J/g	
Q_{rest}	Restreaktionswärme	J/g	
r	Korrelationskoeffizient	-	
R	Determinationskoeffizient	-	3.5.5
R	Universelle Gaskonstante	J/(mol K)	3.1.1
s	hydrostatischer Spannungsanteil	Pa	
S_{Vol}	Volumenschwindung	-	
t	Zeit	s	
t_0	Startwert der Zeit	s	
$t_{Aluminium}$	Bleckdicke Aluminium	mm	
t_{Stahl}	Bleckdicke Stahl	mm	
T	Temperatur	K	
T_G	Glasübergangstemperatur	°C	
T_{G0}	Glasübergangstemperatur des unvernetzten Klebstoffs	°C	
T_{Ref}	Referenztemperatur	°C	
ΔT	Temperaturänderung	K	

u_F	Schubverformung der Füge­teile	mm	
u_{Ges}	Gesamtschubverformung der Klebschicht	mm	
u_K	Schubverformung der Klebschicht	mm	
u_x	Verschiebung in x-Richtung	mm	
u_y	Verschiebung in y-Richtung	mm	
u_z	Verschiebung in z-Richtung	mm	4.3.1
u_3	Verschiebung in z-Richtung	mm	5.4
v_F	Verformung der Füge­teile in Längsrichtung	mm	
v_{Ges}	Gesamtverformung der Klebschicht in Längsrichtung	mm	
v_K	Verformung der Klebschicht in Längsrichtung	mm	
v_{ux}	Geschwindigkeit der Verschiebung in x-Richtung	mm/s	
v_{uy}	Geschwindigkeit der Verschiebung in y-Richtung	mm/s	
V	Volumen	mm ³	
ΔV	Volumenänderung	mm ³	
W	Formänderungsarbeit (-energiedichte)	J	
W_h	hydrostatischer Anteil der Formänderungsarbeit	J	
W_P	polares Widerstandsmoment	m ³	
W'	deviatorischer Anteil der Formänderungsarbeit	J	
Y	Werkstoffkennwert	-	
Y_0	Fließschubspannung	Pa	

b) Griechisch

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit	Kapitel
α	Ansatzfreiwert der Fließfunktion	-	
α_K	Drehwinkel	-	

α_{shr}	linearer Ausdehnungskoeffizient infolge chemischer Reaktionsschwindung	-
α_{th}	thermischer Ausdehnungskoeffizient	K ⁻¹
$\bar{\alpha}$	mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	K ⁻¹
δ	Phasenverschiebung	-
δ_{ij}	Kronecker-Delta	-
ε	elastische Dehnung	-
ε_1	erster Dehnungswert (E-Modulbestimmung)	-
ε_2	zweiter Dehnungswert (E-Modulbestimmung)	-
ε_F	Fließdehnung	-
ε_i	Dehnung nach dem Hookeschen Gesetz	-
ε_{kl}	Verzerrungstensor	-
ε_x	Dehnung in x-Richtung	-
ε_y	Dehnung in y-Richtung	-
ε_z	Dehnung in z-Richtung	-
ε_x^C	technische bzw. Cauchy-Dehnung in x-Richtung	-
ε_x^H	wahre bzw. Hencky-Dehnung in x-Richtung	-
$\tilde{\varepsilon}$	deviatorischer Verzerrungsanteil	-
$\tilde{\varepsilon}^c$	vernetzungsbedingter deviatorischer Verzerrungsanteil	-
$\tilde{\varepsilon}^e$	elastischer deviatorischer Verzerrungsanteil	-
$\tilde{\varepsilon}^p$	plastischer deviatorischer Verzerrungsanteil	-
$\tilde{\varepsilon}^v$	viskoser deviatorischer Verzerrungsanteil	-
$\dot{\varepsilon}_1$	Hauptdehnrates	s ⁻¹
$\dot{\varepsilon}_x$	Dehnrates	s ⁻¹
Φ	Fließfläche	-
γ	Gleitung	-

γ_1	erster Gleitungswert (G-Modulbestimmung)	-	
γ_2	zweiter Gleitungswert (G-Modulbestimmung)	-	
γ_A	Scheramplitude	%	
γ_{xy}	Gleitung in der xy-Ebene	-	
γ_{xy}^C	technische bzw. Cauchy-Gleitung in der xy-Ebene	-	
γ_{xy}^H	wahre bzw. Hencky-Gleitung in der xy-Ebene	-	
$\dot{\gamma}_{xy}$	Gleirate	s ⁻¹	
η	Viskosität	Pa s	3.3
η	plastischer Viskositätsparameter	-	2.2
λ	plastischer Proportionalitätsfaktor	-	2.2
λ	Wärmeleitfähigkeit	W(mK) ⁻¹	2.4
ν	Querkontraktionszahl	-	
Π	Pi	-	
ρ_{Fl}	Dichte der Flüssigkeit	g/cm ³	
ρ_K	Dichte des Klebstoffs	g/cm ³	
$\rho_{unvernetzt}$	Dichte des unvernetzten Klebstoffs	g/cm ³	
$\rho_{vollständig_vernetzt}$	Dichte des vollständig vernetzten Klebstoffs	g/cm ³	
σ	Spannung	Pa	
σ_0	Spannung (Asymmetrie der Fließfläche)	Pa	
σ_1	erster Spannungswert (E-Modulbestimmung)	Pa	
σ_2	zweiter Spannungswert (E-Modulbestimmung)	Pa	
σ_F	Fließspannung	Pa	
σ_h	hydrostatische Spannung	Pa	
σ_i	Spannung nach dem Hookeschen Gesetz	Pa	
σ_{ii}	Teil des Spannungstensors	-	
σ_{ij}	Spannungstensor	-	

σ_{jj}	Teil des Spannungstensors	-	
σ_k	k-ter Spannungswert	Pa	
σ_{kk}	Teile des Spannungstensors	Pa	
σ_x	Normalspannung in x-Richtung	Pa	
σ_y	Normalspannung in y-Richtung	Pa	
σ_z	Normalspannung in z-Richtung	Pa	
$\tilde{\sigma}$	deviatorischer Spannungsanteil	Pa	2.1
σ'_{ij}	deviatorischer Spannungsanteil	Pa	2.2
σ'_k	k-ter Avrami-Spannungswert	Pa	
τ	Schubspannung	Pa	2.2
τ	Relaxationszeit	S	2.2
τ_1	erster Schubspannungswert (G-Modulbestimmung)	Pa	
τ_2	zweiter Schubspannungswert (G-Modulbestimmung)	Pa	
τ_i	Relaxationszeit für Laufvariable i	S	
τ_{xy}	Schubspannung in der xy-Ebene	Pa	
τ_{xz}	Schubspannung in der xz-Ebene	Pa	
τ_{yz}	Schubspannung in der yz-Ebene	Pa	
ω	Kreisfrequenz	Hz	
ξ	Biaxialverhältnis	-	

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Mobilität stellt eines der Grundbedürfnisse der Menschen dar. Das Fahrzeug ist als individuelles Verkehrsmittel in der heutigen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Die Mobilität in Zukunft sicher zu stellen, ist neben der gesellschaftspolitischen Verantwortung auch eine technische Herausforderung. Die Automobilindustrie steht deshalb heute im starken Wandel. [Sei08]

Durch ein steigendes Umweltbewusstsein der Kunden und verschärfte Gesetze werden deutliche Verbrauchssenkungen und eine Reduzierung des CO₂-Ausstosses erwartet. Nach dem Entwurf einer EU-Richtlinie [Euk07] ist für Neufahrzeuge eine CO₂-Grenzwertkurve bezogen auf das Fahrzeuggewicht geplant. Demnach ist das Ziel im Flottendurchschnitt nicht mehr als 120 g CO₂/km zu emittieren. Eine Gewichtsreduktion im Fahrzeug von 100 kg spart ca. 8,5 g CO₂/km, sofern auch Antriebsstrang und Fahrwerk an das reduzierte Gewicht angepasst werden.

Neue Leichtbauentwicklungen im Automobilbau werden so zunehmend in Mischbauweise ausgeführt. Moderne Mischbauweisen mit metallischen Werkstoffen erfordern somit aber auch werkstoffangepasste Fügekonzepte. Dabei kommt der beanspruchungsgerechten Auslegung der Fügebereiche eine besondere Bedeutung zu [Huf08b]. Das Kleben als Kaltfügeverfahren ($T \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$) eignet sich in besonderer Weise zur flächigen Verbindung von unterschiedlichsten Werkstoffpaarungen [Huf08a]. Die Simulation dieser Verbindungen spielt im Produktentstehungsprozess eine immer größere Rolle. Die Erwartungshaltung an die Simulation ist hoch. Sie soll maßgeblich bei der Verkürzung der Entwicklungszeiten, der Beherrschung der steigenden Variantenvielfalt, der Einsparung von Prototypen, der Erhöhung der Erprobungsqualität von Prototypen und der Erweiterung von Erprobungsmöglichkeiten helfen.

1.2 Zielsetzung

Im Karosseriebau finden hochfeste, einkomponentige, warmhärtende Epoxidharze als Strukturklebstoffe Verwendung. Diese Klebstoffe müssen komplexen mechanischen und schon im Fertigungsprozess thermischen Beanspruchungen genügen. Berechenbare Eigenschaften dieser Klebverbindungen sind so für den Einsatz in der Serienproduktion von großer Bedeutung.

Während der Warmaushärtung der Strukturklebstoffe spielen zwei wesentliche Verformungsmechanismen eine Rolle. Die thermischen Belastungen im Prozess führen zum einen zu einer thermischen Ausdehnung und die reaktionsbedingte Dichtezu- bzw. -abnahme zu Eigenspannungen in der Klebschicht, die zu Deformationen und Abzeichnungen im Klebnahtbereich führen können. Zum anderen führen eingefrorene Relativbewegungen der werkstofflich verschiedenen Fügepartner wiederum zu Eigenspannungen und zu Deformationen der Fügeteile. In Abhängigkeit der Dimension der Fügeteile können Relativbewegungen von mehreren Millimetern auftreten. Die Berücksichtigung der temperatur-, vernetzungsgrad- und zeitabhängigen Eigenschaften des Klebstoffs ist daher Grundlage für die Beschreibung und Simulation dieser fertigungsbedingten Deformationen. Ziel muss es sein, die Prognosefähigkeit des Deformationsverhaltens geklebter Karosserie-Mischbaustrukturen zu erhöhen.

Inhalt dieser Arbeit ist die experimentelle und numerische Untersuchung des komplexen Materialverhaltens eines Strukturklebstoffs. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Ermittlung der temperatur- und vernetzungsgradabhängigen Festigkeiten des Klebstoffs, der Berücksichtigung der Viskoelastizität, der Plastizität und der Kompressibilität im Werkstoffverhalten. Die Validierung des Materialverhaltens erfolgt unter Zuhilfenahme der Methode der Finiten Elemente (FE) an geometrisch einfachen Strukturen, wie den stumpf geklebten Rohrproben sowie einfach überlappte Zugscherproben in Rein- und Mischverbindungen, aber auch an einer geklebten Mischbaustruktur aus einem Gesamtfahrzeug.

Damit sollen die Grundlagen geschaffen werden, zur Bereitstellung einer Methodik zur Auslegung geklebter Karosserie-Mischbaustrukturen während der Warmaushärtung im Lacktrocknungsprozess. Durch den Einsatz artfremder Werkstoffe treten insbesondere bei großflächigen Karosseriestrukturen in der Aufheizphase des Lacktrocknungsprozesses Relativverschiebungen auf. Nach der Aushärtung der Klebverbindung werden diese Verschiebungen „eingefroren“. Dadurch kommt es im Abkühlprozess zu festigkeitsrelevanten Beanspruchungen in der Klebschicht und zu bleibenden Deformationen im Blech. Entscheidend für die Auslegung der Klebverbindung ist daher die Beschreibung der physikalischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs über den gesamten Prozess hinweg.

2 Werkstoffmechanische Beschreibung von Klebstoffen

In einer Klebschicht, die im Folgenden als homogenes isotropes Kontinuum betrachtet werden soll, stellt sich bei Beanspruchung im Allgemeinen ein inhomogener mehrachsiger Spannungszustand ein, der die mechanische Beanspruchung und das Versagen der Klebschicht bestimmt [Sch07b]. Das Kapitel gibt einen Einblick in das mechanische Werkstoffverhalten polymerer Klebstoffe nach kontinuumsmechanischen Gesichtspunkten und dessen werkstoffmechanische Beschreibung.

2.1 Grundlagen der Kontinuumsmechanik für Klebverbindungen

Der Spannungstensor beschreibt bekanntermaßen jeden beliebigen Spannungszustand in einem Element. Er setzt sich aus einem hydrostatischen und einem deviatorischen Anteil zusammen. Der hydrostatische Anteil beschreibt eine in alle Raumrichtungen gleich große Beanspruchung, die lediglich eine Änderung des Volumens, nicht aber der Form des Elements bewirkt. Der deviatorische Anteil einer Beanspruchung bewirkt eine Formänderung des Elements, bei gleichzeitiger Volumenkonstanz.

Gesamtzustand Volumen- und Gestaltänderung	Hydrostatischer Anteil nur Volumenänderung keine Gestaltänderung	Deviatorischer Anteil keine Volumenänderung nur Gestaltänderung	
$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h \end{bmatrix}$	$+ \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_h & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_h & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_h \end{bmatrix}$	Formel 2.1

mit

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad \text{Formel 2.2}$$

Der hydrostatische (volumenändernde) Spannungsanteil wird allgemein durch die 1. Invariante des Spannungstensors ausgedrückt:

$$I_1 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad \text{Formel 2.3}$$

Der deviatorische (gestaltändernde) Anteil wird durch die 2. Invariante des Spannungsdeviators beschrieben:

$$J_2 = \frac{1}{3}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_x\sigma_z) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 \quad \text{Formel 2.4}$$

Weiterhin wird bei der Beschreibung von Verzerrungen und Spannungen grundlegend zwischen elastischer (reversibler) und plastischer (irreversibler) Verformung unterschieden. Um das komplexe Werkstoffverhalten der Klebstoffe zu beschreiben, sind aber weitere Spannungs- und Verzerrungsanteile zu berücksichtigen. So werden die Spannungen σ und Verzerrungen ε jeweils in einen deviatorischen (gestaltändernden, isochoren) und einen hydrostatischen (volumenändernden, volumetrischen) Anteil zerlegt.

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon - \frac{1}{3}e \quad e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad \text{Formel 2.5}$$

$$\tilde{\sigma} = \sigma - \frac{1}{3}s \quad s = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad \text{Formel 2.6}$$

Die Dehnung e beschreibt den hydrostatischen Deformationsanteil, während der deviatorische Anteil $\tilde{\varepsilon}$ den gestaltändernden Zustand erfasst. Analog wird s auch als hydrostatische Spannung und $\tilde{\sigma}$ als Spannungsdeviator bezeichnet.

Die Verzerrungen $\tilde{\varepsilon}$ und e werden weiter additiv in elastische (e), viskose (v), plastische (p) und irreversibel vernetzungsbedingte (c) Anteile aufgespaltet. Bei den hydrostatischen Größen werden noch die Verzerrungen aufgrund der Temperaturänderung (th) und der Volumenschwindung (shr) beim Aushärten berücksichtigt. Diese Anteile werden entsprechend indiziert.

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}^e + \tilde{\varepsilon}^v + \tilde{\varepsilon}^p + \tilde{\varepsilon}^c \quad e = e^e + e^v + e^p + e^c + e^{th} + e^{shr} \quad \text{Formel 2.7}$$

2.2 Grundbegriffe

Festigkeit

Die Festigkeit einer Klebeverbindung wird bestimmt durch die Haftung des Klebstoffes an der Fügeteilgrenzfläche (Adhäsion) und der Festigkeit des Klebstoffes selbst (Kohäsion).

Bei der Adhäsion wirken vorwiegend Van der Waals Kräfte, die auf zwischenmolekularen, physikalischen Anziehungskräften (Adsorptionskräfte) beruhen. Die Reichweite liegt bei ca.

0,003 μm , was wesentlich geringer ist, als die technisch herstellbare Oberflächenrauigkeit. Daher muss der Klebstoff in die Oberflächenrauigkeiten eindringen. Die Kohäsion setzt sich zusammen aus den zwischenmolekularen Anziehungskräften (Van der Waals Kräfte) und aus der Verklammerung der Polymermoleküle untereinander.

Elastizität

Das Werkstoffverhalten im elastischen Bereich wird bekanntermaßen über das Hookesche Gesetz beschrieben. Es stellt einen linearen, tensoriellen Zusammenhang zwischen der Spannung und der daraus resultierenden Verzerrung eines Kontinuums über den Elastizitätstensor her.

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

Formel 2.8

Das elastische Gesetz ist ebenso Teil der Theorie der Viskoelastizität wie auch der der Plastizität. Auf die Bedeutung des elastischen Potentials wird im Abschnitt Plastizität eingegangen.

Viskoelastizität

Viskoelastizität ist nach [Hof99] eine Materialtheorie bei der die Beziehungen zwischen Spannungen und Verzerrungen, im Gegensatz zur Elastizitäts- und Plastizitätstheorie, in geschwindigkeitsabhängiger Form vorliegen. Dadurch lassen sich prinzipiell Kriech- (spannungsgesteuert, $\sigma = \text{konst.}$) und Relaxationsvorgänge (dehnungsgesteuert, $\epsilon = \text{konst.}$) beschreiben.

Im unvernetzten Zustand verhält sich der Klebstoff wie eine viskose Flüssigkeit. Erst im Laufe der Vernetzung mit steigendem Vernetzungsgrad ändert sich das Verhalten zu einem viskoelastischen Festkörper mit steigendem elastischen Verformungsanteil.

Die viskoelastischen Kenngrößen zur Beschreibung des Verformungsverhaltens werden näherungsweise auf einfache mechanische Feder-Dämpfer-Modelle zurückgeführt. Dabei repräsentiert die lineare Feder das Hookesche Gesetz. Der viskose Dehnungsanteil wird durch einen Dämpfer abgebildet und verhält sich demnach wie ein Newtonsches Fluid. Die Relaxationszeit τ ist die Zeit, die der Dämpfer benötigt, um nach Ende der Beanspruchung wieder seine Ausgangsposition zu erreichen. Die Reihenschaltung dieser beiden mechanischen Elemente wird als Maxwell-Modell bezeichnet. Da sich das Verhalten realer Werkstoffe nicht durch eine Relaxationszeit, sondern nur durch eine Vielzahl verschiedener Zeiten charakterisieren lässt, wird in dieser Arbeit zur Beschreibung ein verallgemeinertes Modell mit n_i

($i = 1..24$) parallel geschalteten Maxwell-Elementen verwendet. Die Erweiterung einer Prony-Reihe auf unendlich viele Elemente wird als kontinuierliches Relaxationsspektrum eines Materials [Fer80] bezeichnet, eine auf n_i beschränkte Anzahl von Elementen als diskontinuierlich.

Zur Definition der Relaxationsfunktion werden nach [Gau07] traditionell abklingende Exponentialfunktionen verwendet, die sich aber bekanntermaßen nur begrenzt an gemessenes Materialverhalten anpassen lassen. Aus diesem Grund werden häufig Reihen von Exponentialfunktionen, sogenannte Prony-Reihen, verwendet, wodurch eine bessere Adaptivität über eine größere Frequenz oder größere Zeitbereiche erreicht wird, sich zugleich aber die benötigte Anzahl an Materialparametern stark erhöht. Der Elastizitätsmodul bzw. die Relaxationsfunktion im Materialmodell nach Lambrecht wird über i Prony-Reihen wie folgt beschrieben:

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^{n_i} e_i E_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad \text{Formel 2.9}$$

mit dem Gleichgewichtsmodul E_{∞} , dem Glasmodul E_0 , den Relaxationsstärken e_i und den Relaxationszeiten τ_i .

Plastizität

Dieses Kapitel beinhaltet in einem kurzen Einblick grundlegende Zusammenhänge der Kontinuumsmechanik zu verschiedenen Festigkeitstheorien und ordnet das in dieser Arbeit zur numerischen Berechnung verwendete Materialmodell nach Lambrecht in den Kontext ein. Nach dem derzeitigen Stand der Technik sind die Theorien nach Schlimmer und Fleck für kompressible Werkstoffe maßgeblich, daher beruht die Fließfunktion nach Lambrecht auf Ansätzen dieser Theorien.

Die Fließbedingung kann physikalisch durch die Formänderungsarbeit gedeutet werden. Die auf das Werkstoffvolumen bezogene Formänderungsarbeit lautet für den nichtlinearen Spannungs-Verzerrungs-Zusammenhang:

$$W = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad \text{Formel 2.10}$$

Elastisches Potenzial

Bis zur Fließgrenze wird vorausgesetzt, dass sich die Klebschicht linear-elastisch verhält. Erst darüber hinausgehend setzt plastische Verformung ein. Die bis zur Fließgrenze durch die äü-

Bere Beanspruchung eingebrachte Arbeit wird in die Klebschicht als Formänderungsarbeit gespeichert und als elastisches Potenzial bezeichnet. [Sch03a]

Die Aufspaltung der Arbeit (für linear-elastisches Werkstoffverhalten) in den deviatorischen und hydrostatischen Anteil folgt mit den linearen isotropen Elastizitätsgleichungen wie folgt:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left[(1 + \nu) \sigma_{ij} - \nu \sigma_{kk} \delta_{ij} \right] \quad \text{Formel 2.11}$$

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad \text{Formel 2.12}$$

$$W = W' + W_h = \left(\frac{1 + \nu}{2E} \right) \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} + \frac{1}{3} \left(\frac{1 - 2\nu}{2E} \right) \sigma_{ii} \sigma_{jj} \quad \text{Formel 2.13}$$

dabei ist δ_{ij} das Kronecker-Delta, welches den Wert 1 für $i = j$ und andernfalls 0 liefert.

Plastisches Potenzial

Für den hier untersuchten Klebstoff mit einem zähen, elastoplastischen Spannungs-Verformungs-Zusammenhang sind verschiedenen Plastizitätstheorien entwickelt worden, die aber im Gegensatz zu der für metallische Werkstoffe immer noch gültigen von Mises Theorie von plastischer Kompressibilität ausgehen. Der Beginn der plastischen Verformung, der Fließbeginn, ist maßgeblich von der Formänderungsarbeit (-energiedichte) bestimmt, die eine ausgeprägte Abhängigkeit vom hydrostatischen Spannungszustand aufweist.

Für duktile, plastisch inkompressible Werkstoffe ist für den Fließbeginn nach von Mises der elastische deviatorische Anteil der Formänderungsarbeit maßgeblich. Für homogene isotrope dünne Klebschichten ist nach [Sch03a] für den Fließbeginn die Formänderungsenergiedichte W bestimmend. Diese nimmt jedoch keine konstante Größe ein, sondern ist vielmehr abhängig vom hydrostatischen Spannungszustand.

Die Fließgrenze kennzeichnet das Ende des Bereichs linear-elastischer Deformationen elastoplastischer Werkstoffe. Sie hängt ebenso wie das Spannungsmaximum von der Beanspruchungskombination ab. Bei Beanspruchung über die Fließgrenze hinaus treten bleibende Verformungen auf. Üblicherweise wird die Fließgrenze am Übergang vom linearen zum nichtlinearen Werkstoffverhalten bestimmt.

Die Fließbedingung für elastoplastische Werkstoffe ist allgemein eine Funktion F des Spannungstensors und wird als plastisches Potenzial aufgefasst. Y_0 ist dabei als Werkstoffkennwert definiert.

$$F = F(\sigma_{ij}) = Y_0 \quad \text{Formel 2.14}$$

Für plastische inkompressible Werkstoffe ist die Fließbedingung eine Funktion der 2. und 3. Invariante des Spannungsdeviators $F(J_2, J_3)$. Unter Berücksichtigung der plastischen Kompressibilität und somit des hydrostatischen Spannungsanteils wird die Fließbedingung um die 1. Invariante des hydrostatischen Anteils des Spannungstensors erweitert und lautet somit:

$$F = F(I_1, J_2, J_3) \quad \text{Formel 2.15}$$

Nach [Sch74] beschreibt ein Ansatz sowohl die Abhängigkeit vom hydrostatischen als auch vom deviatorischen Spannungsanteil und lautet:

$$F_{Schlimmer} = (J_2)^{\frac{m}{2}} + \left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{m}{2}} \sum_{p=1}^q a_p \sigma_F^{m-p} I_1^2 \quad \text{Formel 2.16}$$

Woraus wiederum ein einfacher Sonderfall für $m = q = 2$ formuliert werden kann, der eine parabolische Fließortkurve liefert:

$$F_{Schlimmer} = J_2 + \frac{1}{3} (a_1 \sigma_F I_1 + a_2 I_1^2) \quad \text{Formel 2.17}$$

Fließfunktion

Allgemein entscheidet die Fließbedingung aufgrund der Fließfunktion, ob elastisches bzw. plastisches Verhalten auftritt. Die Fließfunktion wird als 2-dimensionale Ableitung bzw. Schnitt des Fließkörpers im 3-dimensionalen Hauptspannungsraum verstanden. Im 1-dimensionalen Fall mit ideal elastisch-plastischem Verhalten vereinfacht sich die Fließbedingung nach [Sim98] zu:

$$F = \sigma_{ii} - \sigma_F \leq 0 \quad \text{Formel 2.18}$$

wobei σ_F keinen konstanten Wert annimmt, sondern vielmehr vom hydrostatischen Spannungszustand abhängig ist.

Die Fließfunktion nach von Mises zum Beispiel beschreibt einen Zylinder im Hauptspannungsraum, wie in Abbildung 2-1 dargestellt. Die hydrostatische Achse (1. Spannungsinvariante I_1) bildet bei allen Fließkörpern die Rotationsachse.

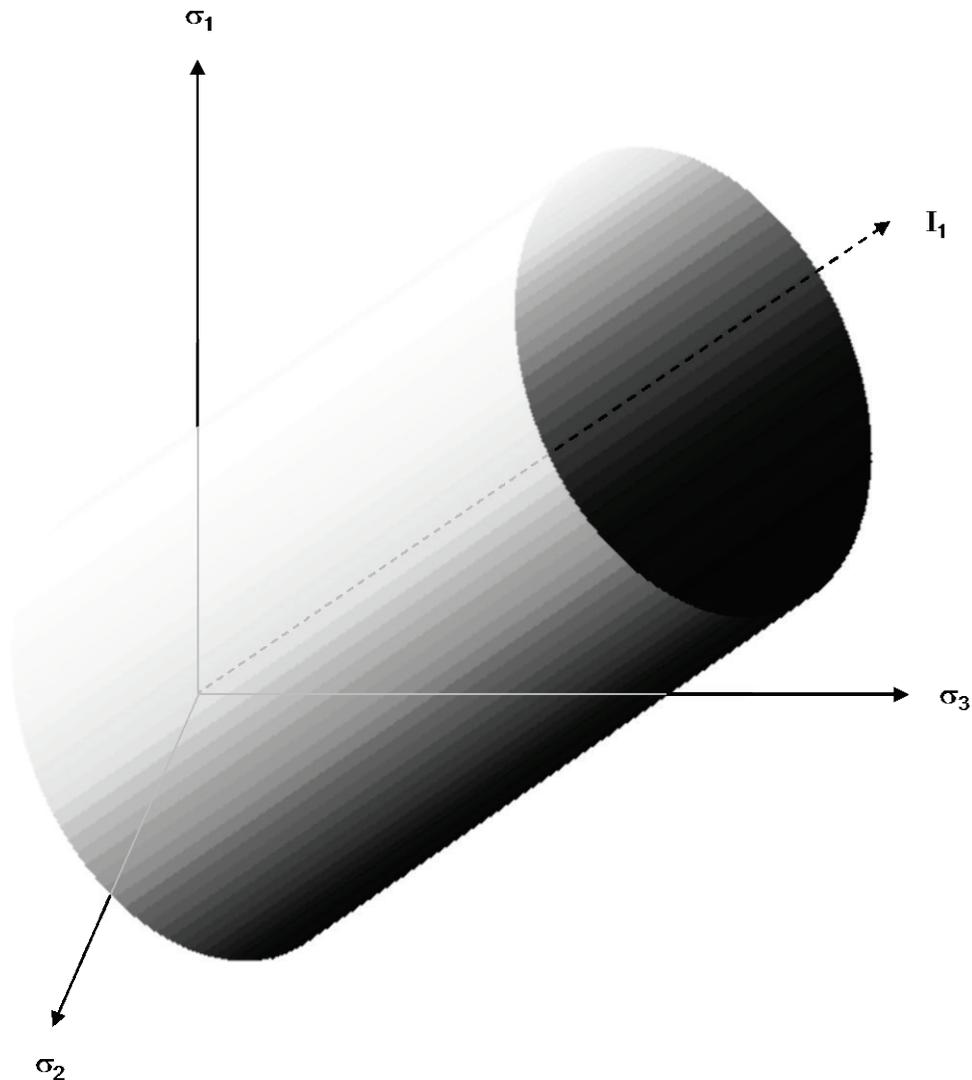


Abbildung 2-1: Fließkörper nach von Mises im Hauptspannungsraum

Nach [Mah05] ergibt sich über Umformungen aus Formel 2.17 die Fließbedingung zu:

$$F_{\text{Schlimmer/Mahnken}} = J_2 - \frac{1}{3} \left(Y_0^2 - a_1 Y_0 I_1 + a_2 I_1^2 \right) = 0 \quad \text{Formel 2.19}$$

wobei Y_0 im Allgemeinen ein Werkstoffkennwert und a_1 und a_2 experimentell zu bestimmende Ansatzfreiwerte sind.

Wie in Abbildung 2-2 dargestellt, beschreibt der Fließkörper nach Schlimmer/Mahnken im Hauptspannungsraum einen Paraboloiden.

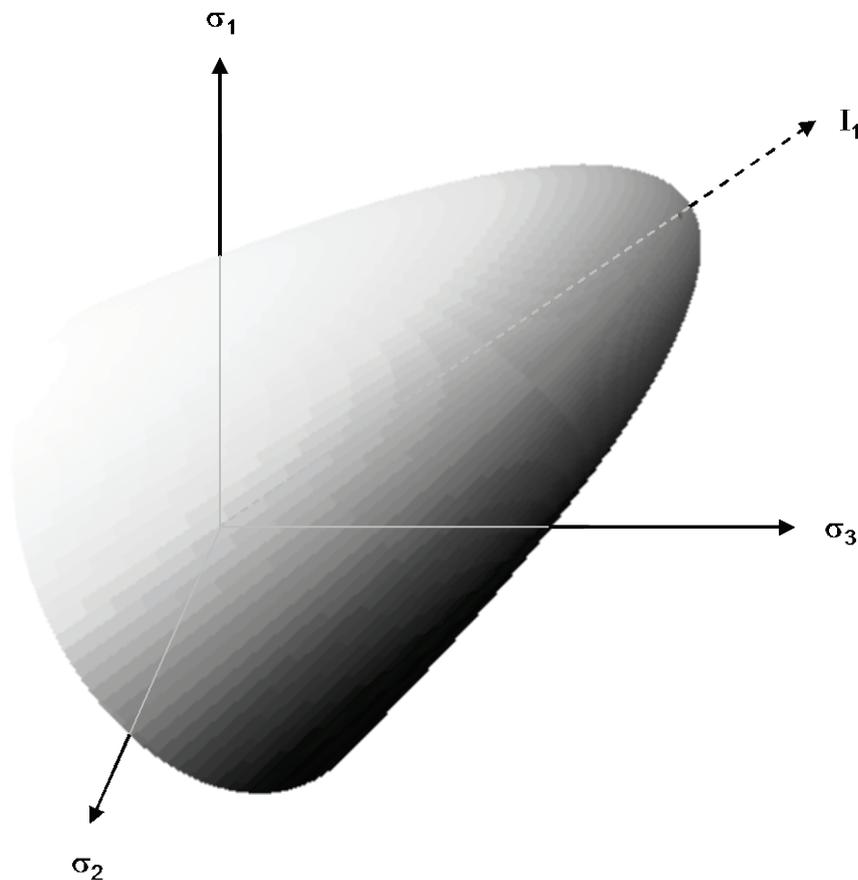


Abbildung 2-2: Fließkörper nach Schlimmer/Mahnken im Hauptspannungsraum

Ein vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg (IWM) entwickeltes Materialmodell ist eine Erweiterung des von Deshpande und Fleck [Des00] vorgeschlagenen Modells für plastisch kompressibles Fließverhalten und beschreibt die Fließbedingung wie folgt:

$$F_{IWM} = \sqrt{3J_2 + \alpha^2(I_1 - \sigma_0)^2} - Y = 0 \quad \text{Formel 2.20}$$

In dieser Gleichung ist α der Parameter, der die Form der elliptischen Fließfläche beschreibt. Die Spannung σ_0 beschreibt die Asymmetrie der Fließfläche hinsichtlich dem unterschiedlichen Fließverhalten bei Zug- und Druckbeanspruchung. Auf die Darstellung des Fließkörpers des IWM im Hauptspannungsraum wird verzichtet, da dieser von der Form dem in Abbildung 2-2 dargestellten Fließkörper nach Schlimmer/Mahnken entspricht.

Die Fließfunktion nach Lambrecht [Lam08] basiert auf einer Fließbedingung nach Schlimmer/Mahnken [Mah05] und weist eine ähnliche parabolische Charakteristik auf. Die Fließfunktion nach Lambrecht bietet die Vorteile, dass sie numerisch robuster und konsistenter ist, weil die spannungsbasierte Größe nicht quadratisch formuliert ist. Die parabolische Form der Fließfunktion, wie sie bei Schlimmer/Mahnken beschrieben wird, wird auf diesem Wege zwar nicht erreicht. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass ein realer Spannungszustand nicht im Bereich der Spitze des Fließkörpers nach Lambrecht auftritt. Die Fließfunktion nach Lambrecht lautet wie folgt:

$$F_{Lambrecht} = \sqrt{2J_2} - \sqrt{\frac{2}{3}}(Y_0 - b_1 I_1 - b_2 I_1^2) = 0 \quad \text{Formel 2.21}$$

wobei hier Y_0 den Fließbeginn aufgrund von reiner Schubbeanspruchung beschreibt und b_1 und b_2 experimentell zu ermittelnde Ansatzfreiwerte sind. Die Identifikation der Ansatzfreiwerte wird in Kapitel 3.5.6 näher erläutert.

Zur Ermittlung des Fließbeginns Y_0 sowie der Ansatzfreiwerte b_1 und b_2 dienen in der vorliegenden Arbeit, wie auch in der Literatur [Bor03, Sch03b, Sch05, Sch06a, Sch07a, Sch08] beschrieben, Zug-, Torsions- und kombinierte Versuche an der stumpf geklebten Rohrprobe. Die experimentell ermittelten Festigkeitskennwerte sind in Kapitel 3.6 dokumentiert.

Wie in Abbildung 2-3 dargestellt, ähnelt der Fließkörper nach Lambrecht im dreidimensionalen Hauptspannungsraum einem spitz zulaufenden Paraboloiden.

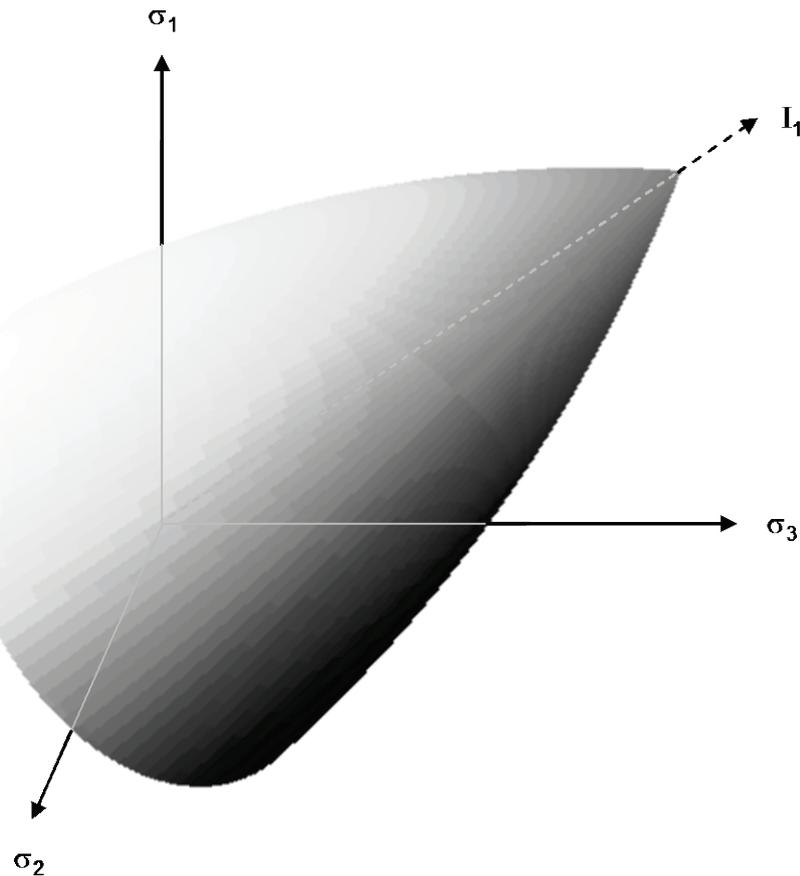


Abbildung 2-3: Fließkörper nach Lambrecht im Hauptspannungsraum

Fließgesetz/-regel

Das Fließgesetz liefert ein Gesetz für das Inkrement der plastischen Verzerrungen abhängig von den aktuellen Spannungen und den Spannungsinkrementen. Wird ein Fließgesetz abhängig von der Fließfunktion definiert, nämlich

$$d^p \varepsilon_{ij} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \quad \text{Formel 2.22}$$

so wird von einer assoziierten Fließregel, andernfalls von einer allgemeinen oder nicht-assozierten Fließregel gesprochen [Sim98].

Für das Materialmodell nach Lambrecht ergeben sich die plastischen Verzerrungen, aufgeteilt in deviatorischen und hydrostatischen Anteil, wie folgt:

$$\tilde{\varepsilon}^p = \int_{t_0}^t \lambda \frac{\partial F}{\partial \tilde{\sigma}} dt' \quad \text{Formel 2.23}$$

$$e^p = \int_{t_0}^t \lambda \frac{\partial F}{\partial s} dt' \quad \text{Formel 2.24}$$

mit

$$\lambda = \frac{F}{\eta} \quad \text{Formel 2.25}$$

wobei λ der plastische Proportionalitätsfaktor und η der plastische Viskositätsparameter nach Perzyna ist. Weiterhin treten plastische Verzerrungen erst auf, wenn die Fließspannung ($F > 0$) überschritten wird.

In der Theorie des plastischen Potentials sind Fließbedingung und plastische Stoffgleichungen über die Fließregel miteinander verknüpft. Diese Assoziation muss jedoch thermodynamisch konsistent sein und zu einer nicht-negativen Dissipationsarbeit während der plastischen Verformung führen. Da dies im Potential $F_{\text{Schlimmer}}$ (Formel 2.17) nur für $a_1 = 0$ der Fall ist [Mah05], geht man von einer nicht-assozierten Fließregel aus, für die das plastische Potential lautet [Sch04]:

$$F^*_{\text{Schlimmer}} = J_2 + \frac{1}{3} a_2 I_1^2 \quad \text{Formel 2.26}$$

Nach [Sim98] wird mit zunehmender plastischer Verformung oberhalb der Fließgrenze zwischen ideal-plastischem Verhalten, isotroper (Ausdehnen der Fließfläche) und kinematischer (Bewegen der Fließfläche im Spannungsraum, ohne die Größe zu verändern) Verfestigung und Entfestigung (Schrumpfen der Fließfläche) unterschieden. Die Ansatzfreiwerte sind je nach Verfestigungsart konstante Größen bzw. Funktionen.

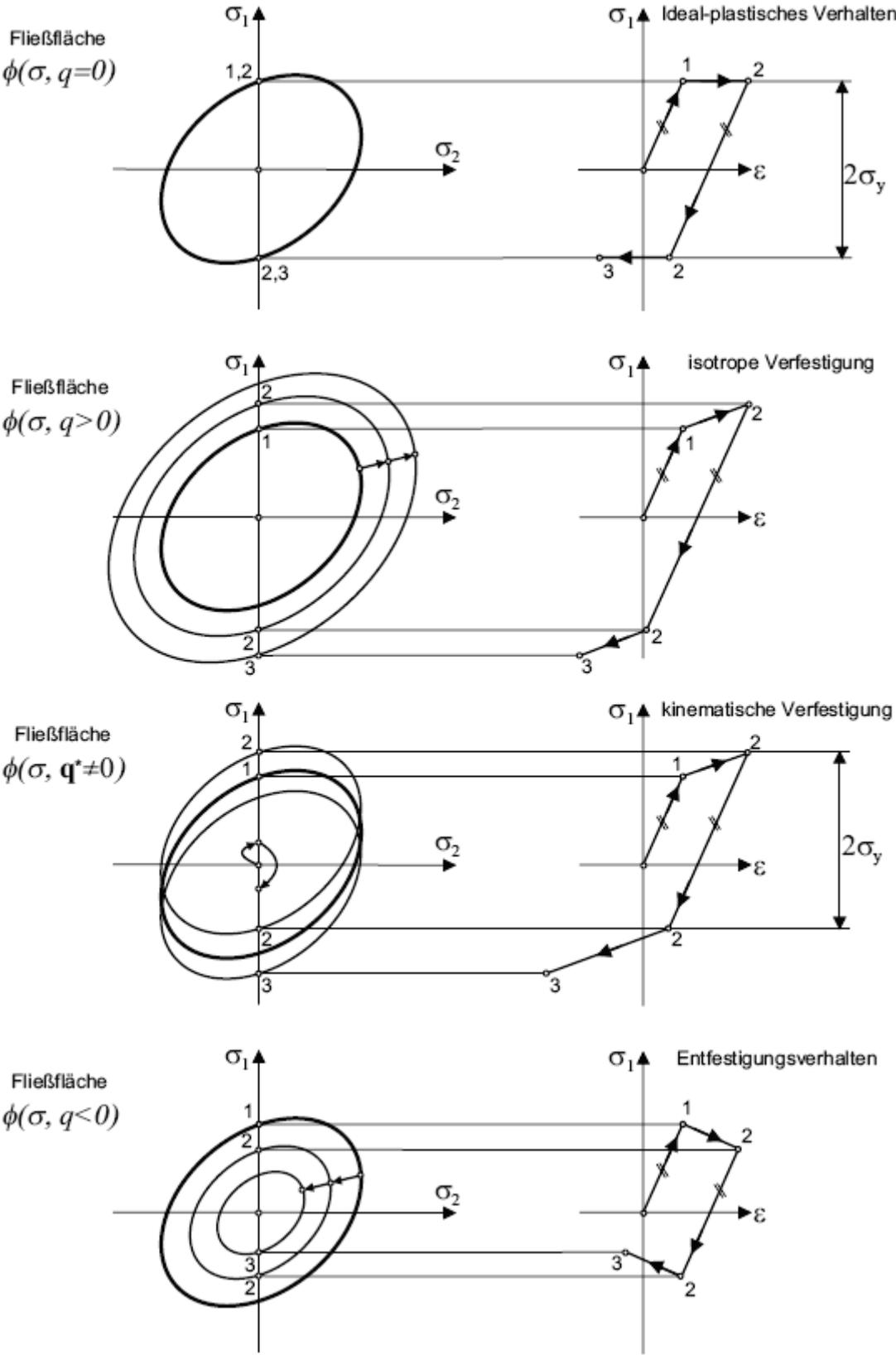


Abbildung 2-4: Plastisches Ver-/Entfestigungsverhalten [Sim98]

Im Materialmodell nach Lambrecht wird ein ideal-plastisches Verhalten (kein Ausdehnen der Fließfläche) angenommen. Da Fließfläche (Φ) und Potenzialfunktion (F) aufeinander fallen, wird von einer assoziierten Fließregel gesprochen.

2.3 Spannungs-Deformations-Beziehungen

Bei der stumpf geklebten Rohrprobe ist die Querdehnungsbehinderung der Klebschicht, die an den deutlich steiferen Fügeteilen aus Stahl vollständig haftet, zu berücksichtigen. Hierzu wird angenommen, dass sich bei Zugbeanspruchung der Rohrprobe innerhalb der dünnen Klebschicht ein einachsiger Verzerrungszustand und somit ein dreiachsiger Spannungszustand einstellen. Für linear-elastisches Werkstoffverhalten, von dem bis zum Fließbeginn ausgegangen wird, gilt das allgemeine Hookesche Gesetz:

$$\sigma_i = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_i + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right] \quad \text{Formel 2.27}$$

Bei einer Zugbeanspruchung mit vollständiger Querkontraktionsbehinderung gilt weiter:

$$\varepsilon_x \neq 0 \quad \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0 \quad \text{Formel 2.28}$$

damit ergeben die Hauptspannungen:

$$\sigma_x = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_x \left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu} \right) \quad \text{Formel 2.29}$$

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_x \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) = \sigma_x \frac{\nu}{1-\nu} \quad \text{Formel 2.30}$$

Nach Formel 2.3 und Formel 2.4 folgt für das Materialmodell nach Lambrecht relevante erste Invariante des Spannungstensors und die zweite Invariante des Spannungsdeviators:

$$I_1 = \left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \right) \sigma_x \quad \text{Formel 2.31}$$

$$J_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \right)^2 \sigma_x^2 + \tau_{xy}^2 \quad \text{Formel 2.32}$$

Technische und wahre Dehnung

Bei der Betrachtung von Dehnungen sind zwei verschiedene Bezugssysteme für die Berechnung gebräuchlich. Im Fall der linearen Theorie wird ein Gleichgewicht am unverformten System, kleine Rotationen und kleine Dehnungen, bezogen auf die Ausgangslänge l_0 vor der ersten Krafteinleitung vorausgesetzt. Diese werden dann als technische oder Cauchy-Dehnungen bezeichnet. In der numerischen Berechnung wird dann von geometrischer linearem Verhalten gesprochen. Für die technische Dehnung bzw. Gleitung in der Klebschicht bedeutet das:

$$\varepsilon_x^C = \frac{v_K}{d_K} \quad \text{Formel 2.33}$$

$$\gamma_{xy}^C = \tan(\alpha_K) \frac{D}{2} d_K \quad \text{mit} \quad \alpha_K = \frac{u_K}{D} \quad \text{Formel 2.34}$$

Die technische Dehnung weist jedoch den Nachteil der Nichtskalierbarkeit auf, d.h. die Summe zweier Teildehnungen entspricht nicht der Gesamtdehnung.

Im Gegensatz dazu wird für den Fall der nichtlinearen Theorie ein Gleichgewicht am verformten System, große Drehungen bzw. Rotationen (Green-Lagrange-Dehnung), sowie große Deformationen vorausgesetzt. Nach [Hen28] ist das Bezugssystem für die Dehnungen, die durch frühere Belastungen verformte Länge des Körpers. Diese werden als logarithmische, wahre oder Hencky-Dehnungen bezeichnet. In der numerischen Berechnung wird in diesem Fall von geometrischer nicht linearem Verhalten gesprochen. Für die wahre Dehnung bzw. Gleitung in der Klebschicht bedeutet das:

$$\varepsilon_x^H = \ln\left(1 + \frac{v_K}{d_K}\right) \quad \text{Formel 2.35}$$

$$\gamma_{xy}^H = \tan(\alpha_K) \frac{D}{2} (d_K + v_K) \quad \text{mit} \quad \alpha_K = \frac{u_K}{D} \quad \text{Formel 2.36}$$

2.4 Delta Alpha Problematik in der Mischbauweise

Bei einer werkstofflichen Mischbauweise werden artfremde Werkstoffe miteinander verbunden. In der Praxis werden dadurch verursachte Auswirkungen als Delta Alpha Problematik bezeichnet. Dabei treten auch unter isothermen Bedingungen unterschiedliche Wärmeausdeh-

nungen aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Ein Beispiel für diese Problematik ist eine Stahl-Aluminium-Mischbauweise. Der Vergleich des mittleren thermischen Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Wärmeleitfähigkeit von Aluminium und Stahl (vgl. Tabelle 2-1) zeigt, dass Aluminium sich stärker ausdehnt und schneller erwärmt als Stahl. Zu dem weisen Klebstoffe, die oft zur Verbindung von Aluminium und Stahl dienen, eine geringere Wärmeleitfähigkeit von $< 1 \text{ W (mK)}^{-1}$ auf und haben so zusätzlich eine isolierende Wirkung [Dom08]. Dadurch kann der Unterschied in der thermischen Ausdehnung zwischen Stahl und Aluminium zusätzlich verstärkt werden. Thermisch bedingte Verformungen sind jedoch nicht nur auf unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten beschränkt, sondern können auch durch ungleichmäßige Temperaturverteilung im Bauteil entstehen.

Tabelle 2-1: Thermische Eigenschaften von Stahl und Aluminium [Gro05]

Eigenschaft		Einheit	Aluminium	Stahl
mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient (zwischen 0°C und 100°C)	$\bar{\alpha}$	10^{-6} K^{-1}	23,8	11,7 -12,0
Wärmeleitfähigkeit (bei 20°C)	λ	W (mK)^{-1}	221	46 - 50

Werden beim Kleben die Klebflächen zweier Fügeiteile nicht fest zueinander fixiert, können diese sich durch thermische Ausdehnung nahezu kräftefrei zueinander verschieben, solange der Klebstoff im unvernetzten Zustand ist. Durch eine erhöhte Temperatur während der Warmaushärtung wirkt der Klebstoff wie ein Schmiermittel, da die Viskosität mit zunehmender Temperatur zunächst sinkt. Das Fügeiteil mit dem größeren thermischen Wärmeausdehnungskoeffizienten gleitet relativ auf dem anderen Fügepartner. Infolge der Klebstoffvernetzung bleibt diese Gleitung bestehen und führt in der Regel zu sichtbaren Verzügen der Fügeiteile und zu festigkeitsrelevanten Spannungen in der Klebschicht.

3 Untersuchungen zum Materialverhalten

Die Untersuchungen zum Materialverhalten werden in dieser Arbeit exemplarisch an einem einkomponentigen Epoxidklebstoff der Firma Dow Automotive durchgeführt. Nach [Dow01] wurde der Strukturklebstoff Betamate 1496V für die Verwendung im Karosserierohbau entwickelt. Der Klebstoff verfügt über sehr gute Haftungseigenschaften auf Automobil-Stählen, beschichteten Stählen und vorbehandeltem Aluminium. Weiterhin ist der Klebstoff im unvernetzten Zustand im Prozess der Katodischen Tauchlackierung (KTL) beständig. Die Vernetzung erfolgt im Lacktrocknungsofen des KTL-Prozesses. Im Allgemeinen werden Strukturklebstoffe zur Erhöhung der Steifigkeit, Crashstabilität und Betriebsfestigkeit, aber auch für den Korrosionsschutz eingesetzt. Tabelle 3-1 fasst die im Klebstoffdatenblatt [Dow01] angegebenen Klebstoffeigenschaften zusammen:

Tabelle 3-1: Klebstoffeigenschaften nach Herstellerangaben [Dow01]

Betamate 1496V			
Hersteller	Dow Automotive AG		
Chemische Basis	Epoxidharze		
Vernetzungsreaktion	Polyaddition		
	155	170	°C
	60	30	min
Zugfestigkeit	32		MPa
	DIN EN ISO 527-1 [NN96a]		
Zugscherfestigkeit	30		MPa
	DIN EN 1465 [NN08]		
E-Modul	1600		MPa
	DIN EN ISO 527-1 [NN96a]		
Bruchdehnung	15		%
	DIN EN ISO 527-1 [NN96a]		
Dichte (23°C)	1,18 ±0,03		g/cm ³
Viskosität (40°C)	500		Pas
	Kegel-Platte (1s ⁻¹)		
Farbe	blau		

3.1 Einfluss des Vernetzungsgrades

Der Vernetzungsgrad p wird hier als prozessbestimmende Größe definiert und hat entscheidenden Einfluss auf die verschiedenen Materialparameter, dazu zählen die Glasübergangs-

temperatur (Kapitel 3.1.2), der Gleichgewichtsmodul (Kapitel 3.2.3), der Gelpunkt (Kapitel 3.3), der Ausdehnungskoeffizient infolge chemischer Reaktionsschwindung (Kapitel 3.4.2), aber auch die Festigkeit des Klebstoffs (Kapitel 3.6). Der Fortschritt des Vernetzungsgrades über den Prozess kann über ein mathematisches Modell, das über die Reaktionskinetik (Kapitel 3.1.1) ermittelt wird, für beliebige Zeit- und Temperaturbedingungen beschrieben werden.

3.1.1 Ermittlung der Reaktionskinetik zur Beschreibung des Aushärteverhaltens

Definition Reaktionskinetik

Die Reaktionskinetik beschreibt den Zusammenhang zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit, Temperatur und Zeit. Die Reaktionsgeschwindigkeit erfasst die Abhängigkeit der Stoffmengen-Konzentration der an der Reaktion beteiligten Stoffe von der Zeit [Blu06]. Über die Reaktionskinetik ist es möglich, den Fortschritt des Klebstoff-Vernetzungsgrades für beliebige Temperaturrandbedingungen zu berechnen. Für die komplette reaktionskinetische Beschreibung der Vernetzungsreaktion sind mindestens drei Einzelmessungen notwendig, wobei der Einsatz dynamischer Messungen mit verschiedenen Heizraten ein größeres Reaktionsfeld abdeckt als isotherme Messungen.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Ermittlung eines Reaktionsmodells näher erläutert. Die Untersuchungen erfolgten unter Zuhilfenahme der kommerziell verfügbaren Software Netzsch Thermokinetics 3 Version 2008.05 [Net08]. Ziel ist die mathematische Beschreibung des Reaktionsverhaltens des Klebstoffs und somit die Bestimmung dessen Vernetzungsgrades bei einer beliebigen Zeit- und Temperaturhistorie.

Zur Ermittlung eines mathematischen Modells sind mindestens drei DSC-Messungen bei unterschiedlichen Heizraten erforderlich, dadurch wird eine mathematische Beschreibung mit nur wenigen Modellen möglich. Verwendet werden können isotherme bzw. dynamische Messungen oder eine Kombination aus isothermen und dynamischen Messungen. Zwingend notwendig ist, dass die Reaktion im Messbereich abgeschlossen sein muss. Der Faktor zwischen den Heizraten sollte ungefähr zwei betragen (z. B. 2, 5, 10, ... K/min). Weiterhin ist darauf zu achten, dass sich der Reaktionspeak zu höheren Temperaturen verschiebt, da es sich sonst nicht um einen kinetischen Vorgang (chemische Reaktion) handelt.

In dieser Arbeit werden drei dynamische DSC-Messungen bei drei verschiedenen Heizraten (2, 5 und 10 K/min) im Temperaturbereich von 20 °C bis 250 °C und unter Stickstoffatmosphäre verwendet. Zur Ermittlung der Messdaten wurde eine DSC-Messzelle der Firma Netzsch Gerätebau GmbH, Typ DSC 200 F3 verwendet.

Im Allgemeinen startet eine kinetische Analyse mit einer modellfreien Analyse. Nach [Net08] gehen die Isoumsatzmethoden davon aus, dass jedem Punkt der Reaktionskurve eindeutig ein Vernetzungsgrad p zuzuordnen ist. Diese Bedingung wird jedoch nur bei unverzweigten Reaktionsabläufen und bei Reaktionsabläufen, die Signale in nur einer Richtung enthalten, erfüllt. Besteht eine DSC-Messung z. B. aus der Kombination von exothermen und endothermen Reaktionsstufen, so ist eine eindeutige Zuordnung nicht mehr möglich. Ebenso werden für verzweigte Reaktionen deshalb nur teilweise korrekte Ergebnisse ermittelt. Über eine der Isoumsatzmethoden (Friedman- bzw. Ozawa-Flynn-Wall-Analyse) wird eine modellfreie Schätzung der Aktivierungsenergie vorgenommen.

Modellfreie Analyse nach Friedman und Ozawa-Flynn-Wall

Der in Abbildung 3-1 dargestellte Teil der modellfreien Analyse nach Friedman trägt die Aktivierungsenergie und den Logarithmus des Präexponentialfaktors über dem Vernetzungsgrad auf. Die Erfahrung hat gezeigt, dass aus der Friedman-Analyse mehr Information als nur die Aktivierungsenergie und der Präexponentialfaktor abzulesen sind (vgl. Abbildung 3-2).

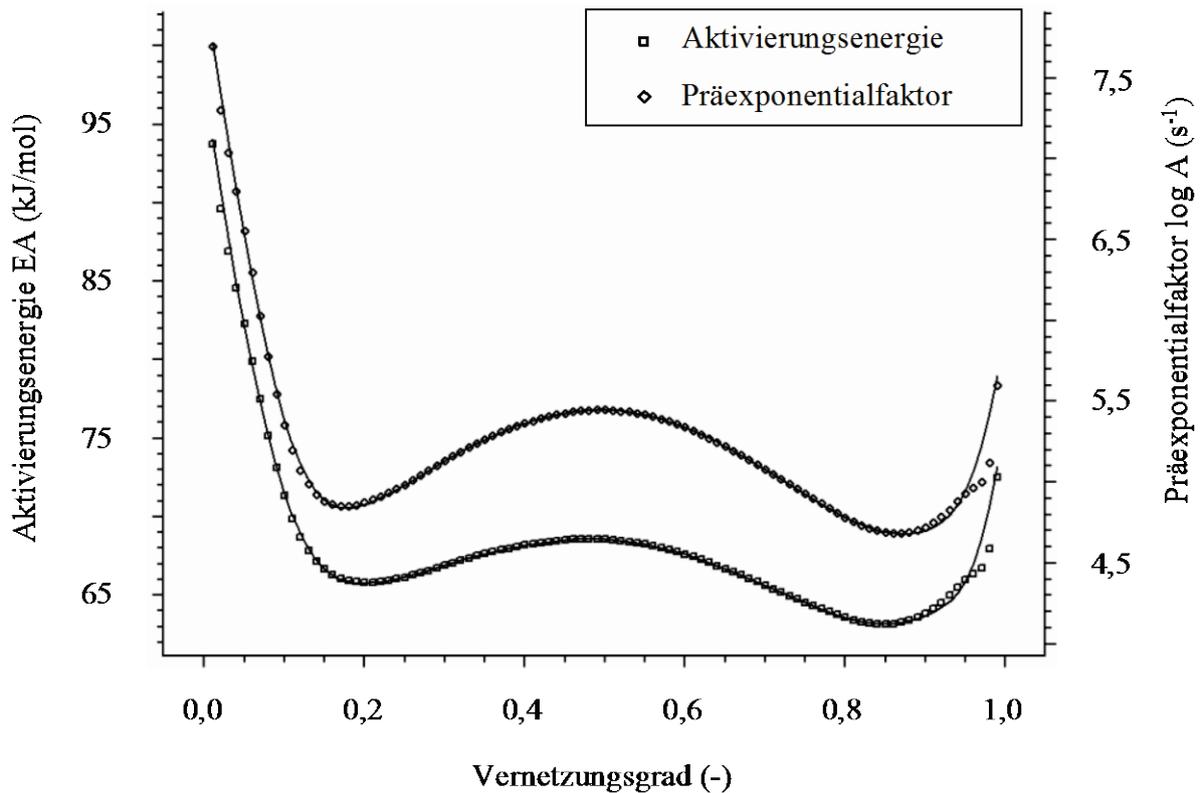


Abbildung 3-1: Aktivierungsenergie / Präexponentialfaktor als Funktion des Vernetzungsgrades für den Klebstoff Betamate 1496V (aus Friedman-Analyse) [Net08]

In Abbildung 3-2 besitzen die experimentellen Punkte zu Beginn der Reaktion, d. h. auf der Seite großer $1000 K/T$ -Werte, einen größeren Anstieg als die Isoumsatzgeraden, das weist auf das Vorliegen einer autokatalytisch aktivierten Reaktion hin. Da die Friedman-Kurven jeweils nur einen Peak aufweisen, ist von einer einstufigen Reaktion auszugehen.

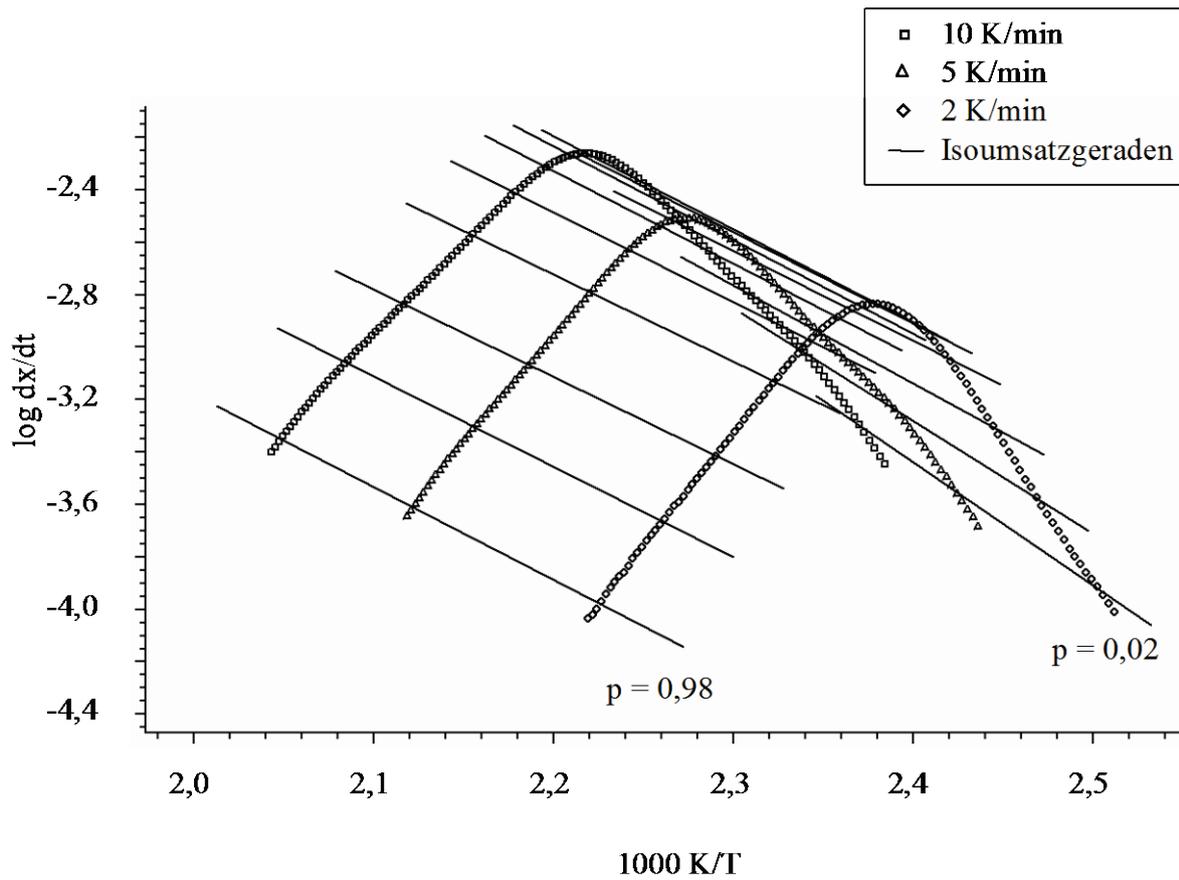


Abbildung 3-2: Modellfreie Analyse nach Friedman für den Klebstoff Betamate 1496V [Net08]

Ein Vorteil der Ozawa-Flynn-Wall-Analyse (Abbildung 3-3) ist, die Aktivierungsenergie ohne Kenntnis eines konkreten kinetischen Modells ermitteln zu können. Eine Aussage zum Reaktionstyp ist hingegen nicht möglich.

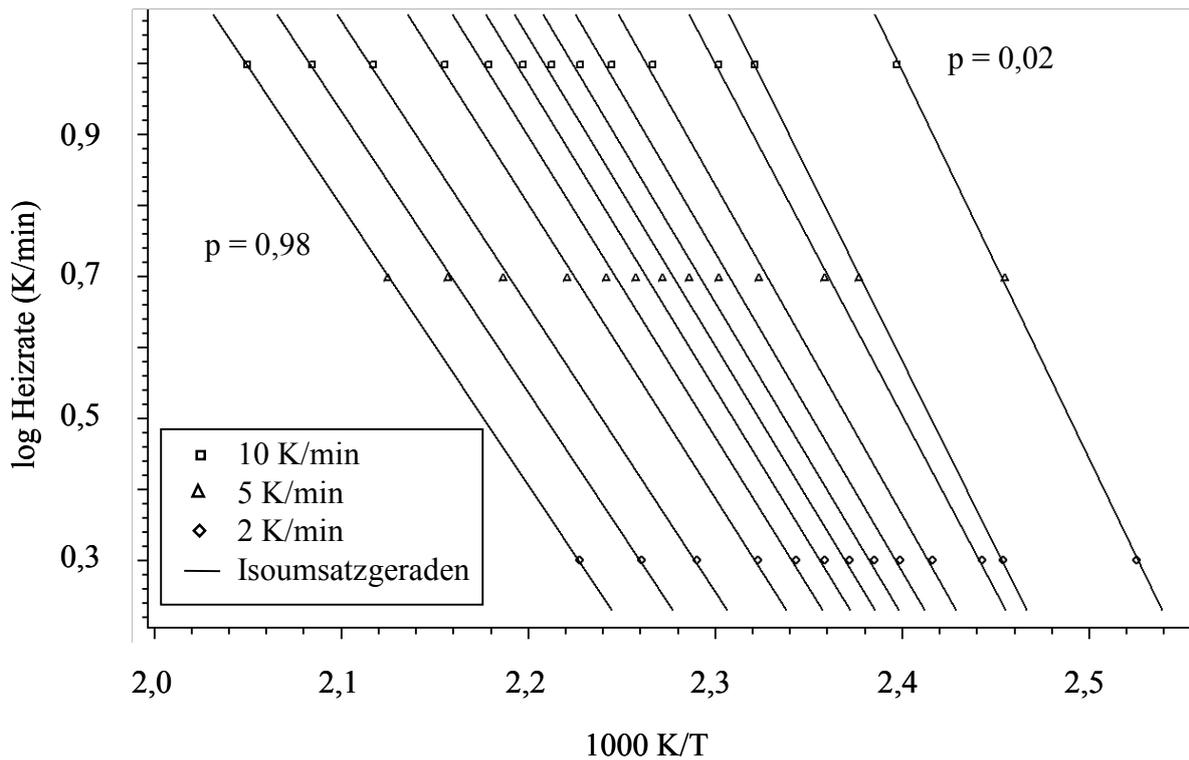


Abbildung 3-3: Modellfreie Analyse nach Ozawa-Flynn-Wall für den Klebstoff Betamate 1496V [Net08]

Bei mehrstufigen Reaktionen, deren kinetische Modelle durch nicht lineare Regression ermittelt werden, dienen die, in der Friedman-Analyse ermittelten Werte für die Aktivierungsenergie und den Präexponentialfaktor, als Startwerte.

Nach Abschluss der modellfreien Analysen wird ein Reaktionsmodell n-ter Ordnung mit Autokatalyse ausgewählt. Als Ergebnis der kinetischen Analyse wird in Abbildung 3-4 die nicht lineare Regression dargestellt. Die Regressionskurven werden dabei durch durchgehende Linien und die experimentellen Daten mittels Symbolen entsprechend der Heizraten dargestellt. In Tabelle 3-2 sind die Modellfunktion und die entsprechenden Koeffizienten angegeben.

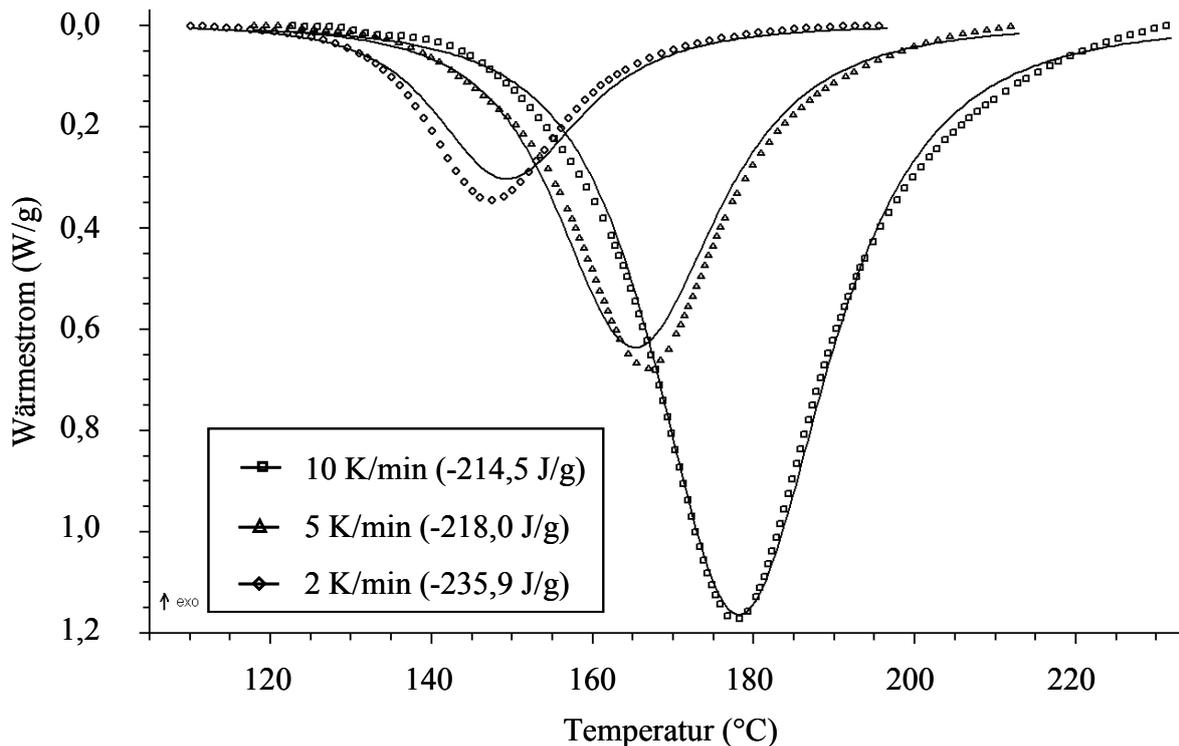


Abbildung 3-4: Nicht lineare Regression mit einem Modell n-ter Ordnung mit Autokatalyse für den Klebstoff Betamate 1496V [Net08]

Tabelle 3-2: Koeffizienten des Reaktionsmodells für den Klebstoff Betamate 1496V

Funktion n-ter Ordnung mit Autokatalyse	$p = a_1 \cdot e^{-\frac{e_1}{RT}} (1 - k_{cat} p)(1 - p)^{n_1}$		
Korrelationskoeffizient	r		0,997
Präexponentialfaktor	$\log a_1$	1/s	6,291
Aktivierungsenergie	e_1	kJ/mol	79,797
universelle Gaskonstante	R	J/(mol K)	8,314
katalytischer Faktor	$\log k_{cat}$		1,483
Reaktionsordnung	n_1		1,872

Zur Bewertung der Unterschiede des Reaktionsmodells in der Vorhersage des Vernetzungsgrades hinsichtlich der gewählten Zeitschrittweite wird ein Temperaturprofil aus dem KTL-Lacktrocknungsprozess gewählt. In Abbildung 3-5 ist der Verlauf des Vernetzungsgrades für Integrationsschrittweiten von 1 s und 60 s exemplarisch dargestellt.

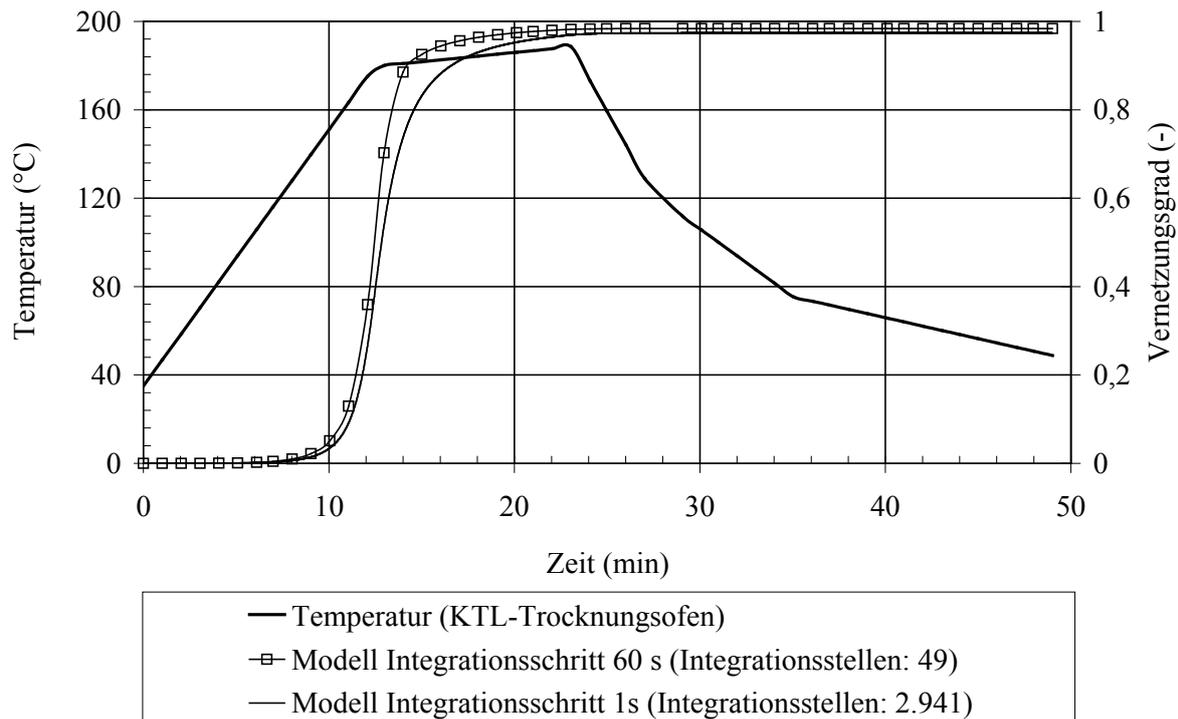


Abbildung 3-5: Vernetzungsgrad des Klebstoffs Betamate 1496V mit dem Modells n-ter Ordnung mit Autokatalyse für Integrationsrittweite 1s und 60 s, Temperaturprofil im KTL-Lack-trocknungsprozess

Die Ergebnisse zeigen, dass mit beiden Integrationsrittweiten eine vergleichbar gute Vorhersage des Vernetzungsgrades über die Zeit und Temperatur möglich ist.

3.1.2 Bestimmung der Glasübergangstemperatur

Während der chemischen Vernetzung von Polymernetzwerken ändert sich die Glasübergangstemperatur des Systems. Ausgehend von der Glasübergangstemperatur der Monomermischung steigt sie während der Vernetzung an. Ist dabei die Härtungstemperatur sehr viel höher als die maximal erreichbare Glasübergangstemperatur des Systems, so bleibt die gesamte Reaktion chemisch kontrolliert, das heißt die Konzentration der reaktiven Gruppen bestimmt die Reaktionsgeschwindigkeit [Wen05].

Die Glasübergangstemperatur T_G wird hier mittels DSC-Analysen nach DIN 53765 [NN94] ermittelt. Der Glasübergang ist durch eine Stufe in endothermer Richtung und einer damit verbundenen Änderung der Wärmekapazität charakterisiert. Die T_G ist die Temperatur, bei der die Hälfte der Änderung der Wärmekapazität erreicht ist.

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Glasübergangstemperatur vom Vernetzungsgrad werden unvernetzte, teilvernetzte und vollständig vernetzte Proben analysiert. Die Untersuchun-

gen erfolgten an einer Messzelle der Firma Mettler-Toledo, Typ DSC822e/200. Die Probe des un- und des vollständig vernetzten Klebstoffs werden unter Inertgasatmosphäre von -40 °C mit 10 K/min auf 250 °C aufgeheizt, anschließend mit 20 K/min auf 0 °C abgekühlt und wieder mit 20 K/min auf 200 °C aufgeheizt. Die letzten zwei Segmente werden jeweils zweimal wiederholt. Durch gezielte Reaktionsunterbrechung von zunächst unvernetztem Material in der ersten Aufheizphase werden teilvernetzten Proben erzeugt und anschließend untersucht. Diese Proben werden von -40 °C auf definierte Unterbrechungstemperaturen von 168 , 176 , 182 und 192 °C mit 10 K/min unter Inertgasatmosphäre aufgeheizt. Der Tiegel wird nach Erreichen der Endtemperatur entnommen und schlagartig abgekühlt. Nach Abkühlung des DSC-Ofens werden die Proben erneut eingesetzt und über den kompletten Temperaturbereich, wie er im Abschnitt weiter oben beschrieben wird, vermessen. Aus der Analyse mit einer gezielten Reaktionsunterbrechung lassen sich zwei Parameter bestimmen: zum einen der T_G des teilvernetzten Klebstoffs, zum anderen dessen Vernetzungsgrad aus dem von eins subtrahierten Verhältnisses der Restreaktionswärme Q_{rest} und der Gesamtreaktionswärme Q_{ges} [Bis92].

Tabelle 3-3: Ergebnisse der DSC-Analysen zur Bestimmung von $T_G(p)$ des Klebstoffs Betamate 1496V

Klebstoff			unvernetzt	teilvernetzt				vollständig vernetzt
Unterbrechungstemperatur		°C		168	176	182	192	
Glasübergangstemperatur	T_G	°C	-20	2	30	59	63	85
Gesamtreaktionswärme	Q_{ges}	J/g	226					
Restreaktionswärme	Q_{rest}	J/g		121	60	35	10	
Vernetzungsgrad	p		0,00	0,46	0,73	0,84	0,96	1,00

In der Literatur werden verschiedene mathematische Modelle zur Beschreibung der Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad beschrieben [Hal91, Hes96]. Für eine analytische Näherung der Messergebnisse wird hier eine Funktion nach [Hes96, Hes98] verwendet:

$$T_G(p) = (T_{G0} + 273,15K) \cdot \exp\left(\frac{G_1 \cdot p}{G_2 - p}\right) - 273,15K \quad \text{Formel 3.1}$$

Hier ist T_{G0} die Glasübergangstemperatur des unvernetzten Klebstoffs, G_1 und G_2 sind die Ansatzfreiwerte der analytischen Näherungsfunktion. In Abbildung 3-6 sind die Messwerte und die analytische Näherungsfunktion sowie deren Ansatzfreiwerte dargestellt.

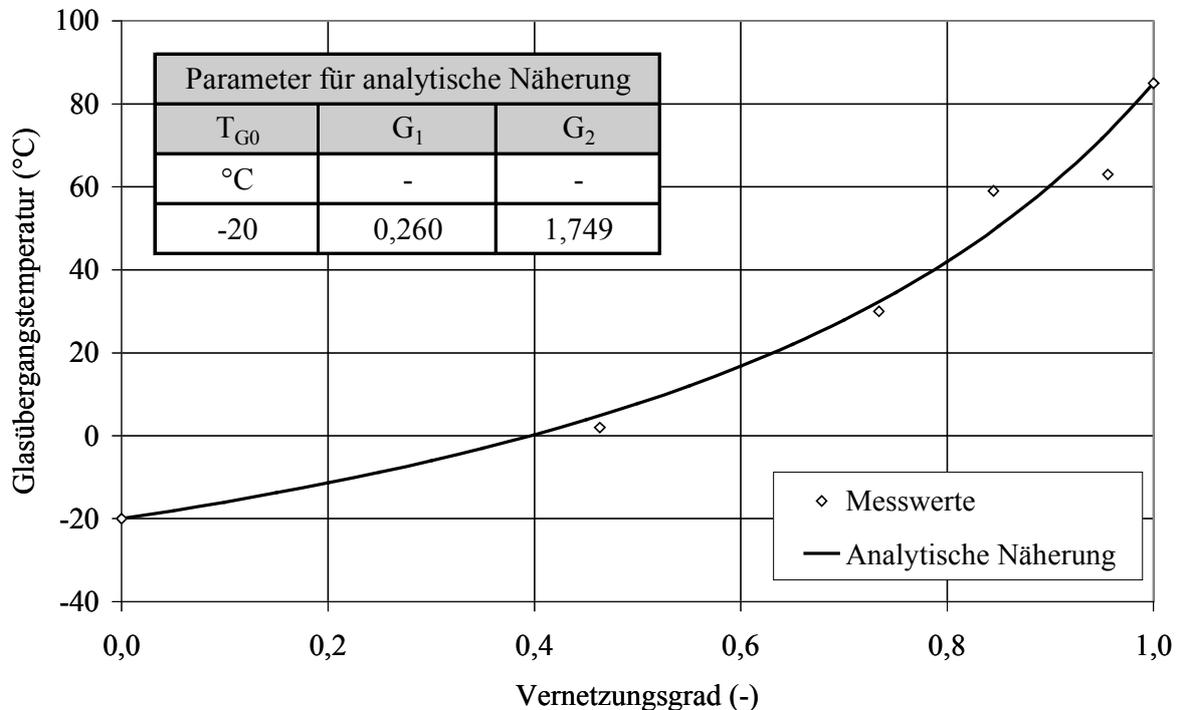


Abbildung 3-6: Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad für den Klebstoff Betamate 1496V

Der Klebstoff Betamate 1496V weist im unvernetzten Zustand eine T_G von -20 °C und im vollständig vernetzten Zustand eine T_G von 85 °C auf.

3.2 Viskoelastische Materialkennwerte

Nach [Ret91] zeigt sich der wichtigste Unterschied zwischen einem ideal-elastischen und einem viskoelastischen Material im zeitlichen Verlauf der elastischen Reaktion des Materials auf eine Belastung. Eine Konsequenz daraus ist, dass z. B. der E-Modul eines viskoelastischen Materials keine Konstante ist, sondern sich im Verlauf der Belastungszeit ändert. Die Ursache für dieses Verhalten sind relaxationszeitbehaftete kooperative Rückstellvorgänge in und zwischen den langen Kettenmolekülen der Kunststoffe.

Zur Beschreibung der Auswirkungen des Vernetzungsprozesses auf das viskoelastische Materialverhalten wurde in vielen Arbeiten [Chr82, Ado90, Ado96, Ado98] thermo- und che-

morheologisch einfaches Materialverhalten basierend auf Zeit-Temperatur-Superposition (vgl. Kapitel 3.2.2) und Zeit-Vernetzungsdichte-Superposition angenommen.

Zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens des untersuchten Klebstoffs wird die Gültigkeit der beiden oben beschriebenen Prinzipien angenommen und im Folgenden das Modell nach [Ado90, Ado96] näher erläutert.

3.2.1 Dynamisch-Mechanische Analyse

Die Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA) wird nach DIN 51 005 [NN05] als thermoanalytische Methode zur Bestimmung des Speicher- und Verlustmoduls sowie des Dämpfungsfaktors definiert, bei der unter zeitlich sich ändernder Krafteinwirkung das mechanische Verhalten einer Probe, die einem Temperaturprogramm unterworfen ist, gemessen wird.

Zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens des vollständig vernetzten Klebstoffs wird eine DMA der Firma Netzsch Gerätebau, Modell 242C verwendet. Die rechteckigen Proben mit den Abmessungen 50 mm x 10 mm wurden aus 2 mm starken Platten gefräst und im Modus „dual cantilever“ (zweiarmige Biegung) untersucht. In diesem Modus sind beide Probenenden sowie der Stempel an der Probe fest eingespannt. Für die zweiarmige Biegung errechnet sich der komplexe E-Modul nach [Net07] wie folgt:

$$E^*(\omega) = \frac{F}{a} \cdot \frac{l^3}{16bh^3} \quad \text{Formel 3.2}$$

mit der systemabhängigen freien Biegelänge l , der Probenbreite b und der -höhe h sowie der dynamischen Kraft F und der dazugehörigen Verformungsamplitude a . Die Ermittlung der temperatur- und frequenzabhängigen Größen Speicher-, Verlust- und Komplexmoduls sowie der Phasenverschiebung $\tan \delta$ erfolgte in einem Temperaturbereich von -80 °C bis $+115\text{ °C}$ und bei Belastungsfrequenzen von 0,5 bis 50 Hz.

Die Polymerwerkstoffe, zu denen der hier untersuchte Strukturklebstoff Betamate 1496V zählt, zeigen im Gegensatz zu vielen Metallen auch schon bei Raumtemperatur ein viskoelastisches Materialverhalten. Bei Polymerwerkstoffen kommt es bei einer periodischen Beanspruchung aufgrund dieses viskoelastischen Materialverhaltens zu einer Phasenverschiebung $\tan \delta$ zwischen Kraft und Auslenkung. Nach DIN EN ISO 6721-1 [NN03] kann der komplexe E-Modul E^* über die gemessene Phasenverschiebung in seine beiden Komponen-

ten, den Speichermodul E' als realer Anteil und den Verlustmodul E'' als imaginärer Anteil zerlegt werden. Dieser Zusammenhang wird in Formel 3.3 dargestellt:

$$E^* = E' + iE'' \quad \text{Formel 3.3}$$

Formel 3.4 liefert den Zusammenhang zwischen der Phasenverschiebung und dem Speicher- sowie Verlustmodul:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad \text{Formel 3.4}$$

Nach [Ret91] entspricht der Speichermodul E' in Formel 3.3 dem reversiblen Anteil des komplexen E-Moduls E^* . Der Verlustmodul E'' ist ein Maß für das viskoelastische Materialverhalten und beschreibt die irreversible Materialeigenschaft. Der Verlustmodul ist proportional zur Arbeit, die während der Belastung dissipiert wird.

Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 zeigen exemplarisch für drei Frequenzen den Speicher- und Verlustmodul sowie den Verlauf der Phasenverschiebung im untersuchten Temperaturbereich. Das Diagramm stellt aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich drei der gemessenen sieben Frequenzen grafisch dar.

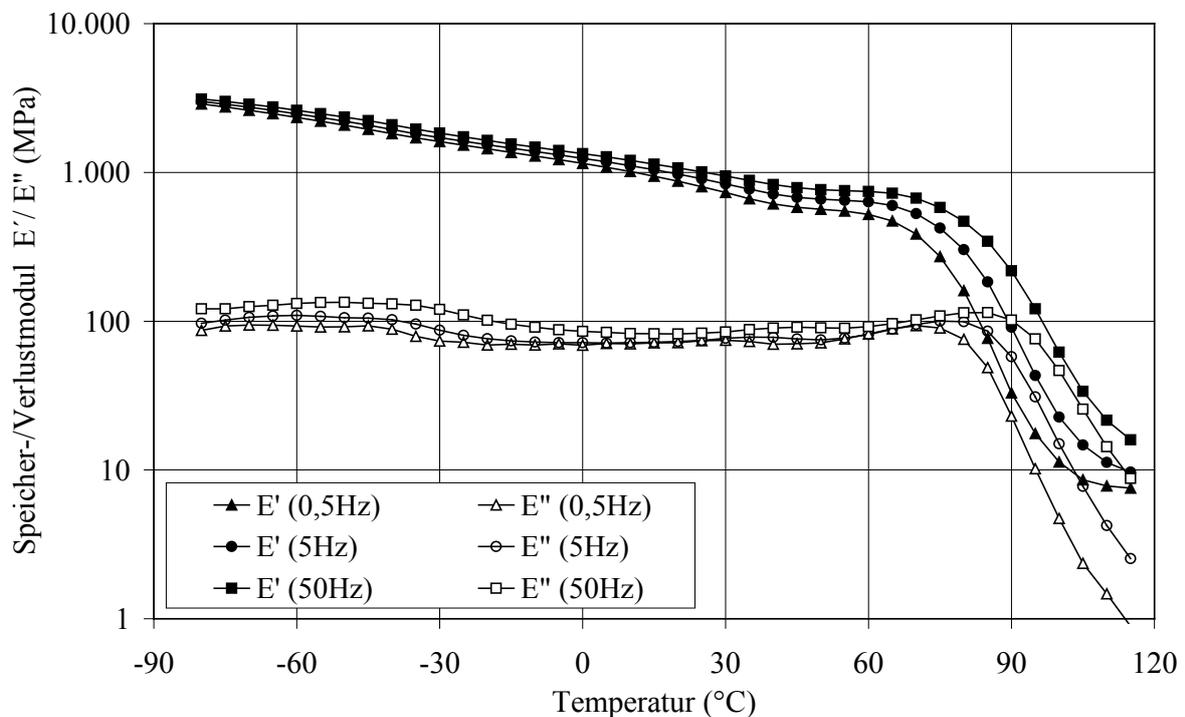


Abbildung 3-7: Speicher- (E') und Verlustmodul (E'') des Klebstoffs Betamate 1496V

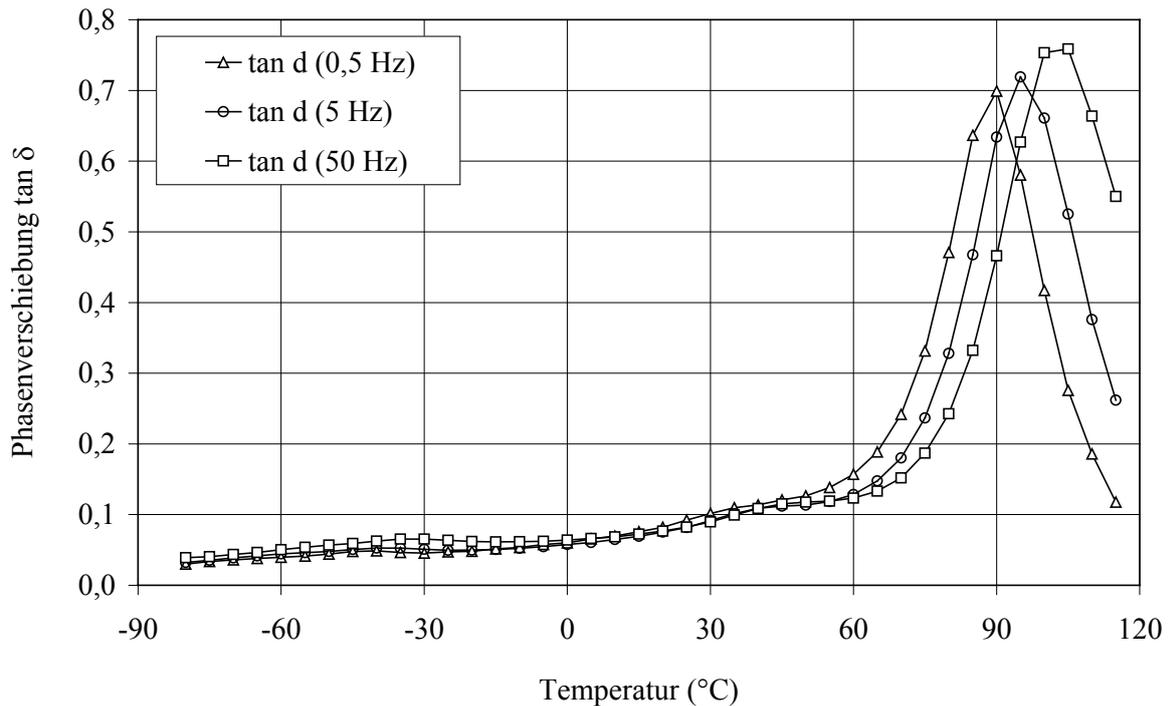


Abbildung 3-8: Phasenverschiebung ($\tan \delta$) des Klebstoffs Betamate 1496V

3.2.2 Masterkurve, Schifffunktion, Prony-Reihen

Das horizontale Verschieben der isothermen und multifrequenten DMA-Messdaten, das Erzeugen der Masterkurve sowie deren mathematische Beschreibung mittels Prony-Reihen erfolgt unter Zuhilfenahme der kommerziellen Software ViscoShift und ViscoData und wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

Masterkurve

Die Zeit- und Temperaturabhängigkeit vieler Polymere kann mittels der Zeit-Temperatur-Superposition beschrieben werden. Nach [Fer80, Ret91] basiert dieses Verfahren auf der Grundlage, dass das Werkstoffverhalten vieler polymerer Werkstoffe für kurze Belastungszeiten oder hohe Belastungsfrequenzen sich analog zum Materialverhalten bei geringen Temperaturen verhält. Umgekehrt gilt dies auch für lange Belastungszeiten und hohe Temperaturen. So kann ein Polymer, das unter bestimmten experimentellen Bedingungen gummielastisches Werkstoffverhalten zeigt, sowohl durch Absenken der Temperatur als auch durch eine Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit in den Glaszustand gebracht werden. Aufgrund dieser Eigenschaften kann das Werkstoffverhalten mittels Masterkurven beschrieben werden. Voraussetzung für die Anwendung der Masterkurventechnik ist, dass nur die Frequenzlage der Relaxationsprozesse eine Temperaturabhängigkeit zeigt. Das heißt, die Masterkurven

viskoelastischer Kenngrößen verschieben sich bei einer Temperaturänderung nur horizontal auf der logarithmischen Frequenz- bzw. Zeitachse, ohne gleichzeitig ihre Form zu ändern. Eine nach dem Prinzip der Zeit-Temperatur-Superposition abgeleitete Masterkurve setzt sich aus isothermen und multifrequenten DMA-Messdaten zusammen, die ausgehend von der Referenztemperatur nach links bzw. rechts verschoben (geschiftet) werden (vgl. Abbildung 3-9). Als Referenztemperatur wird die Glasübergangstemperatur des Polymers festgelegt.

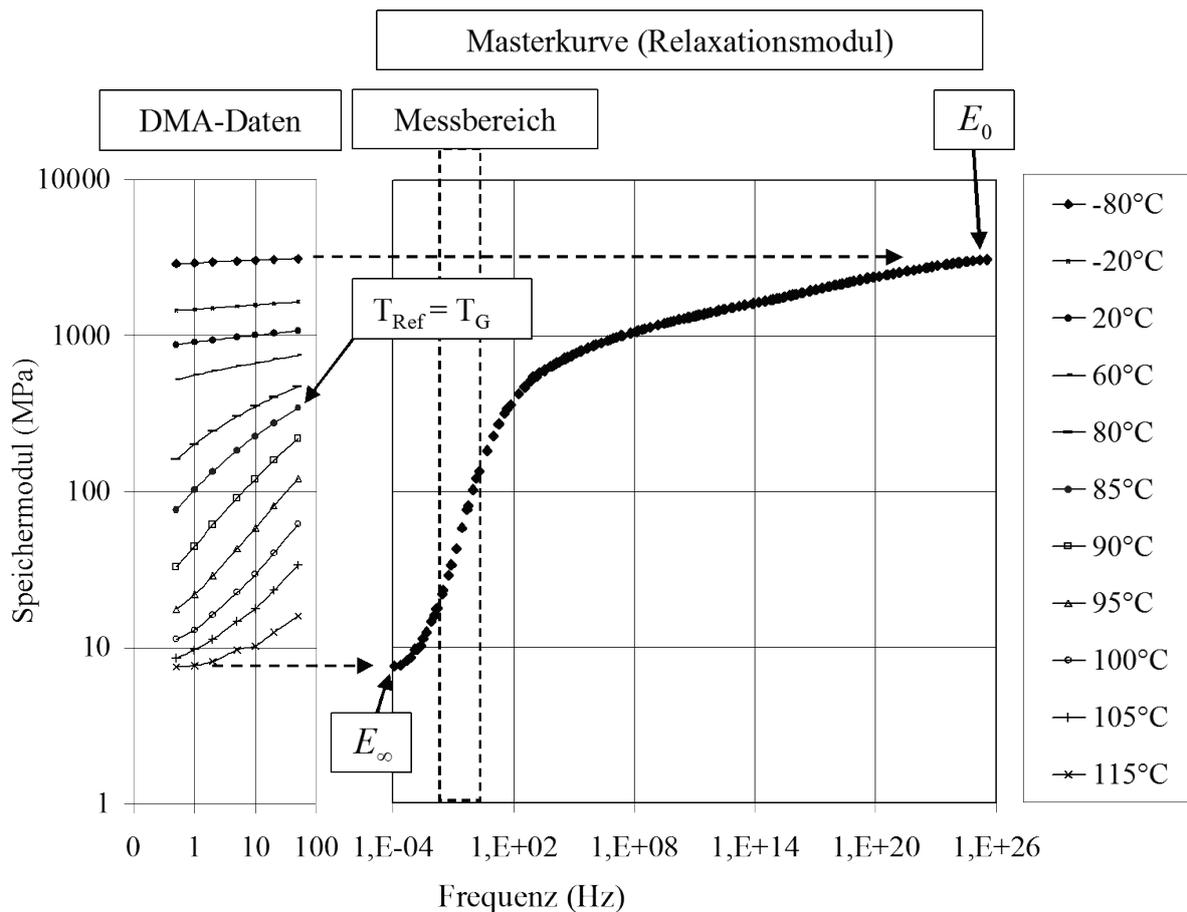


Abbildung 3-9: Isotherme DMA-Messdaten und die durch Temperatur-Zeit-Superposition abgeleitete Masterkurve, Referenztemperatur 85°C, Klebstoff Betamate 1496V

Die Generierung der Masterkurve erfolgt unter Zuhilfenahme der Software ViscoShift V 1.61 [Vis07a]. Nach Abschluss des Shiftprozesses werden der Speichermodul E' , die jeweilige Frequenz f , die relative Temperatur $(T-T_G)$ und die logarithmierten Shiftfaktoren $\ln(a_T)$ ausgegeben.

Halley [Hal96] gibt einen Überblick über die in der Literatur beschriebenen analytischen Ansätze zu Shiftfunktionen. Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz geht auf eine Arbeit von [Meu02] zurück. Die Temperaturabhängigkeit des Shiftfaktors wird dort wie folgt beschrieben:

$$a_T = \exp\left[\frac{-C_1(T - T_G)}{C_2 + T - T_G}\right], T \geq T_G \quad \text{Formel 3.5}$$

$$a_T = \exp[C_3 \ln(C_4(T - T_G))], T < T_G \quad \text{Formel 3.6}$$

Hier sind T_G die Glasübergangstemperatur, C_1 , C_2 , C_3 und C_4 die Ansatzfreiwerte der analytisch ermittelten Schiftfunktion. Formel 3.5 entspricht dabei dem Ansatz nach Williams, Landel und Ferry und wird als WLF-Gleichung bezeichnet. Die Ansatzfreiwerte C_1 , C_2 , C_3 und C_4 werden über die Minimierung der Summe der kleinsten Fehlerquadrate zwischen Messwert und analytischem Wert ermittelt.

In Abbildung 3-10 ist die Masterkurve für den Speichermodul E' in Abhängigkeit der Frequenz f für eine Referenztemperatur von $T_{\text{Ref}} = 85 \text{ °C}$ dargestellt.

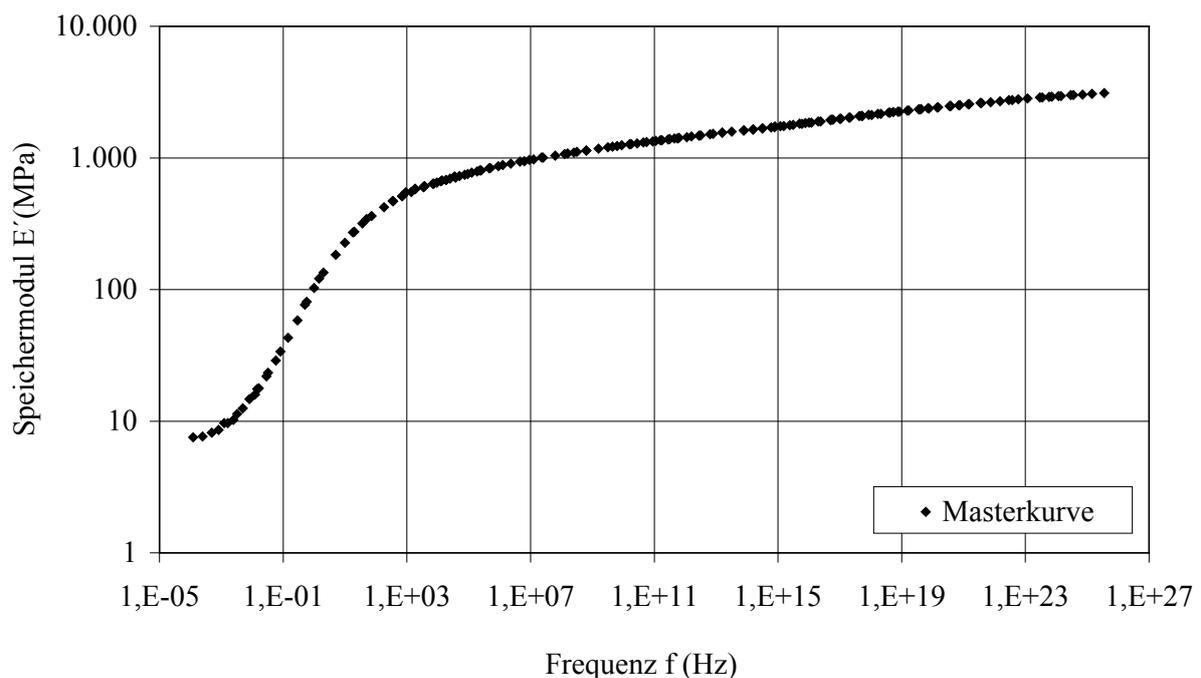


Abbildung 3-10: Masterkurve des Klebstoffs Betamate 1496V im Frequenzbereich

In Abbildung 3-11 sind die gemessenen Schiftfaktoren als auch die analytisch ermittelte Schiftfunktion dargestellt. Die Darstellung der logarithmierten Schiftfaktoren über der Temperatur zeigt zum einen, dass die analytische Beschreibung um und oberhalb der Glasübergangstemperatur $T_G = 85 \text{ °C}$ über die WLF-Gleichung (Formel 3.5) gut funktioniert. Zum anderen wird deutlich, dass die Beschreibung unterhalb T_G mit Formel 3.6 mit tolerierbaren Abweichungen ebenfalls möglich ist. Mögliche Ursachen hierfür sind Abweichungen beim

simultanen Verschieben der isothermen und multifrequenten DMA-Messdaten aus Speicher-, Verlust-, Komplexmodul und Phasenverschiebung.

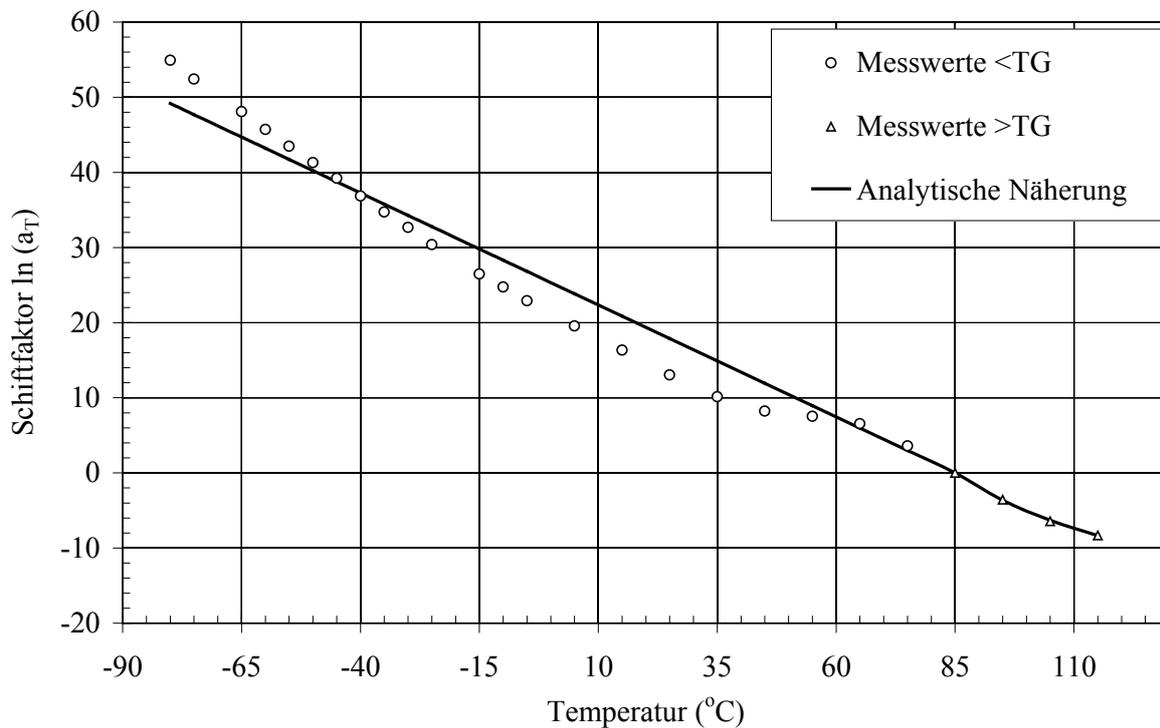


Abbildung 3-11: Schifffaktoren und analytische Näherungsfunktion für den Klebstoff Betamate 1496V

Die Transformation der frequenzabhängigen Masterkurve in den Zeitbereich erfolgt mit der kommerziell verfügbaren Software ViscoData V 1.9 [Vis08b]. Der in der Software ViscoData verwendete Fit-Algorithmus basiert auf der Evolutionsstrategie. Bei der Evolutionsstrategie, die Mitte der sechziger Jahre von Rechenberg [Rec94] entwickelt wurde, wird die Wirkungsweise des „biologischen Optimierungsverfahrens“ als stochastischer Suchverfahren in die Technik übertragen [Her99]. Auf eine detaillierte Beschreibung der Evolutionsstrategien wird an dieser Stelle verzichtet.

Abbildung 3-12 und Tabelle 3-4 stellen das mit 20 Prony-Reihen beschriebene diskontinuierliche Relaxationsspektrum bei $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die daraus ermittelten Prony-Parameter Relaxationsstärke e_i und Relaxationszeit τ_i sowie das Gleichgewichtsmodul E_{∞} und den Glasmodul E_0 dar. Es zeigt weiterhin, dass die Anzahl der Prony-Reihen auf den anwendungsspezifischen Zeitbereich reduziert werden kann.

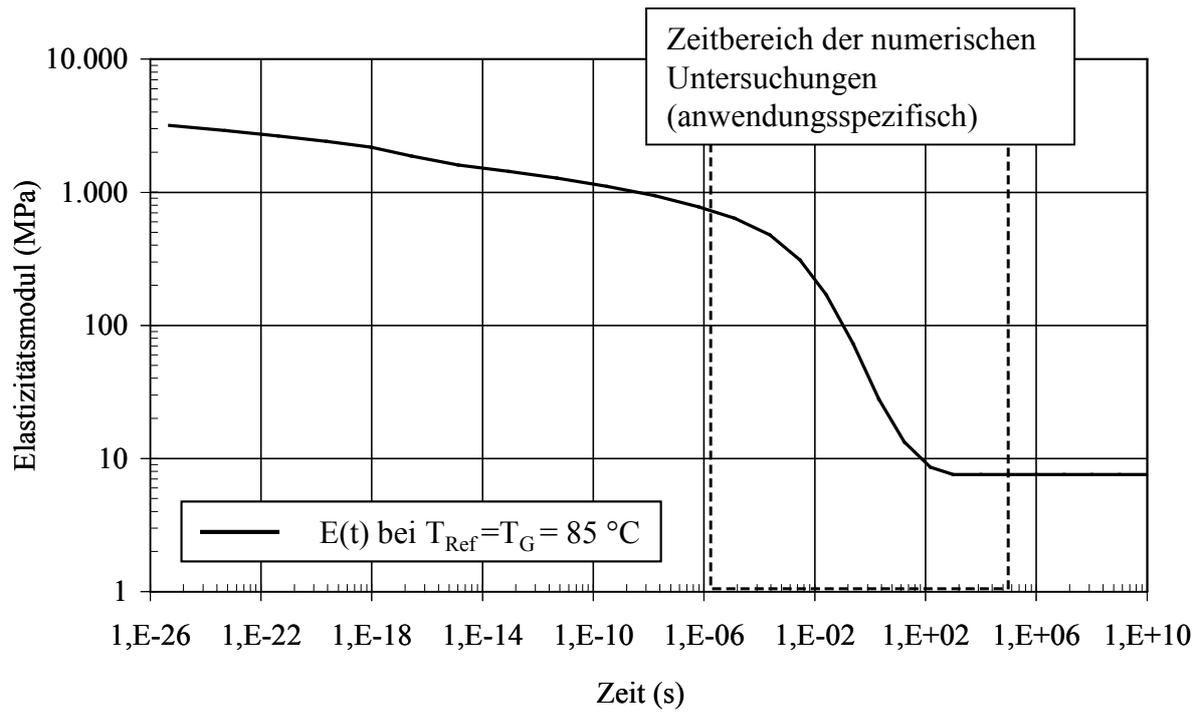


Abbildung 3-12: Diskontinuierliches Relaxationsspektrum $E(t)$ des Klebstoffs Betamate 1496V

Tabelle 3-4: Prony-Reihen-Parameter des Klebstoffs Betamate 1496V zur Ermittlung von E(t)

i	Relaxationszeit t_i (s)	Relaxationsstärke e_i (-)	E-Modul $E_i=E_0 \cdot e_i$ (MPa)
1	1,51E+02	9,28E-04	3
2	1,72E+01	2,77E-03	9
3	2,08E+00	8,54E-03	27
4	2,40E-01	2,63E-02	82
5	2,54E-02	4,48E-02	139
6	2,95E-03	5,20E-02	162
7	2,36E-04	5,49E-02	171
8	1,27E-05	4,16E-02	129
9	6,28E-07	5,06E-02	157
10	1,64E-08	5,22E-02	162
11	3,15E-10	5,49E-02	171
12	4,84E-12	5,08E-02	158
13	8,86E-14	5,39E-02	168
14	1,33E-15	5,68E-02	177
15	2,75E-17	6,31E-02	196
16	8,97E-19	6,70E-02	208
17	2,36E-20	7,48E-02	233
18	4,11E-22	7,81E-02	243
19	5,08E-24	9,29E-02	289
20	5,01E-26	7,06E-02	220
$E_0 = 3.110 \text{ MPa}$			
$E_\infty = 8 \text{ MPa}$			

Der Prony-Parameter Relaxationsstärke e_i ist dabei wie folgt definiert:

$$e_i = \frac{E_i}{E_0}$$

Formel 3.7

Die Hauptursache der verzögerten elastischen Antwort des Polymers auf mechanische Belastung (Viskoelastizität, vgl. Kapitel 2.2) ist die innere Beweglichkeit zwischen den Molekülketten [Her03]. Diese Eigenschaft ist temperaturabhängig und wird hier über die Relaxationszeit τ nach [Lam08] über folgendes Integral:

$$\tau = \int_{t_0}^t \frac{ds}{a_T}$$

Formel 3.8

definiert, wobei a_T der Schiftfaktor ist.

3.2.3 Beschreibung des Gleichgewichtsmoduls

Der Gleichgewichtsmodul E_∞ wird am Gelpunkt p_{Gel} ungleich null und steigt mit fortlaufender Vernetzungsreaktion an. Die Abhängigkeit des Gleichgewichtsmoduls E_∞ vom Vernetzungsgrad p wird nach [Ado97, Mar96, Mar90] für $p > p_{Gel}$ über folgende Beziehung:

$$E_\infty(p) = E_{\infty(p=1)} \cdot \left(\frac{p^2 - p_{Gel}^2}{1 - p_{Gel}^2} \right)^{\frac{8}{3}}$$

Formel 3.9

beschrieben. Hier ist $E_{\infty(p=1)}$ der Gleichgewichtsmodul des vollständig vernetzten Klebstoffs, p der Vernetzungsgrad und p_{Gel} der Vernetzungsgrad am Gelpunkt.

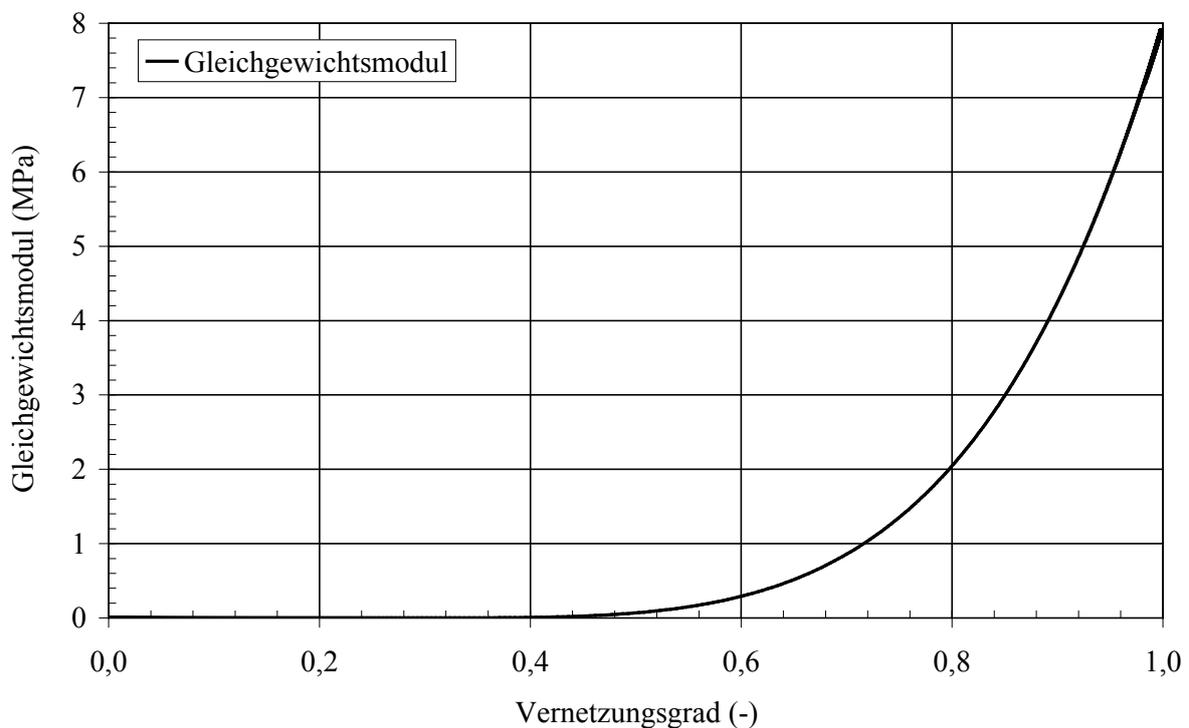


Abbildung 3-13: Gleichgewichtsmodul (E_∞) in Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad p

3.3 Rheologische Untersuchungen zur Bestimmung des Gelpunktes

Mit dem Begriff Rheologie wird die Lehre vom Verformungs- und Fließverhalten von Körpern beschrieben. Sie wurde als selbständige wissenschaftliche Disziplin von Bingham (1878–1945) und Reiner (1886–1964) begründet [Gro07].

Definition des Gelpunktes

In der Literatur existieren unterschiedliche Ansätze zur Definition des Begriffs Gel bzw. Gelpunkt. Einen guten Überblick über die verschiedenen Ansätze gibt [Win97].

Im Falle der Epoxidharzvernetzung führt nach [Wen05] eine chemische Reaktion zu einem dreidimensionalen Netzwerk. Gelierung tritt dann auf, wenn ein makroskopisches, durchgehendes Netzwerk vorliegt, das einen endlichen Schubmodul besitzt. Es handelt sich hier also um ein chemisches, nicht reversibles Gel, das durch kovalente Bindungen vernetzt ist. Als unabhängige Variable zur Beschreibung des Überganges vom flüssigen in den gelartigen Zustand bietet sich für chemisch vernetzende Systeme der Vernetzungsgrad p an.

Die folgende Definition des Gelpunktes nach [Ehr03] basiert auf einer Theorie von [Flo73]. Demnach wird der Gelpunkt erreicht, wenn das Polymersystem erstmals ein unendliches Netzwerk gebildet hat. Das heißt, dass die Moleküle von einem Ende eines Polymeransatzes bis zum anderen Ende kontinuierlich verknüpft sind. Es heißt nicht, dass alle Moleküle an diesem Netzwerk teilnehmen. Die physikalische Auswirkung dieses Effektes wird makroskopische Gelierung genannt, die beispielsweise über den Anstieg der Viskosität η definiert werden kann.

Zur Bestimmung des Gelpunktes mittels rheologischer Messungen werden unter anderen in [Meu02, Lop02] folgende Kriterien definiert:

- (1) löslicher Anteil der Solfraktion geht gegen Null
- (2) stationäre Scherviskosität strebt gegen unendlich
- (3) Gleichgewichtsmodul wird ungleich null
- (4) Verlustfaktor $\tan\delta$ wird frequenzunabhängig (Schnittpunkt von Speicher- und Verlustmodul)
- (5) Änderung der Steigung im Verlauf des Verlustfaktors $\tan\delta$

Da auch diese Kriterien Vor- und Nachteile besitzen, wird an dieser Stelle ein weiteres Kriterium, basierend auf dem Verhalten der dynamischen Viskosität, definiert:

- (6) Viskositätsmesswert, dessen positive Änderung $\Delta\eta$ größer als 500 Pas zum vorherigen Messwert beträgt.

Der Vernetzungsgrad am Gelpunkt p_{Gel} wird mittels des in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Reaktionsmodells mit der entsprechenden Heizrate und Temperatur berechnet. Für verschiedene Epoxidharze am Gelpunkt wird nach [Lop02] ein Vernetzungsgrad von 0,28 bis 0,58 angegeben.

Zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens des Klebstoffs während des Vernetzungsprozesses wird ein Rheometer der Firma Anton Paar, Modell MCR301 verwendet. In Anlehnung an die DIN EN 12 092 [NN01a] werden im Messmodus „Platte-Platte“ einheitliche Plattendurchmesser von 25 mm und eine Klebschichtdicke von 1 mm gewählt. Es werden Messungen mit konstanten Aufheizraten von 2, 4 und 6 K/min beginnend bei Raumtemperatur bis zu einer Temperatur von 200°C mit einer Frequenz von 1 Hz durchgeführt. Die Normalkraft wird bei 0 N gehalten. Ausgewertet werden die dynamische Viskosität η über der Temperatur T . Nach DIN EN 12 092 [NN01a] und [Hab06] ist die dynamische Viskosität η als der Quotient aus Scherspannung und Schergeschwindigkeit bei stetiger Strömung definiert. Zur Bestimmung der Scheramplitude wird nach [Mei03] ein Amplitudentest durchgeführt. Er dient der Ermittlung der maximalen Scheramplitude, bei der die Deformation noch im linear-elastischen Bereich ist. Dabei wird bei einer konstanten Kreisfrequenz ω von 10 Hz die Scheramplitude γ_A erhöht. Der linear-elastische Bereich wird dann verlassen, wenn der Speichermodul G' von der Scheramplitude abhängig wird. In Abbildung 3-14 ist ein entsprechender Versuch dargestellt. Es wird deutlich, dass bei einer Deformation größer 1 % der linear-elastische Bereich verlassen wird. Demnach wird bei den hier durchgeführten Untersuchungen eine Scheramplitude von 0,01 % eingestellt.

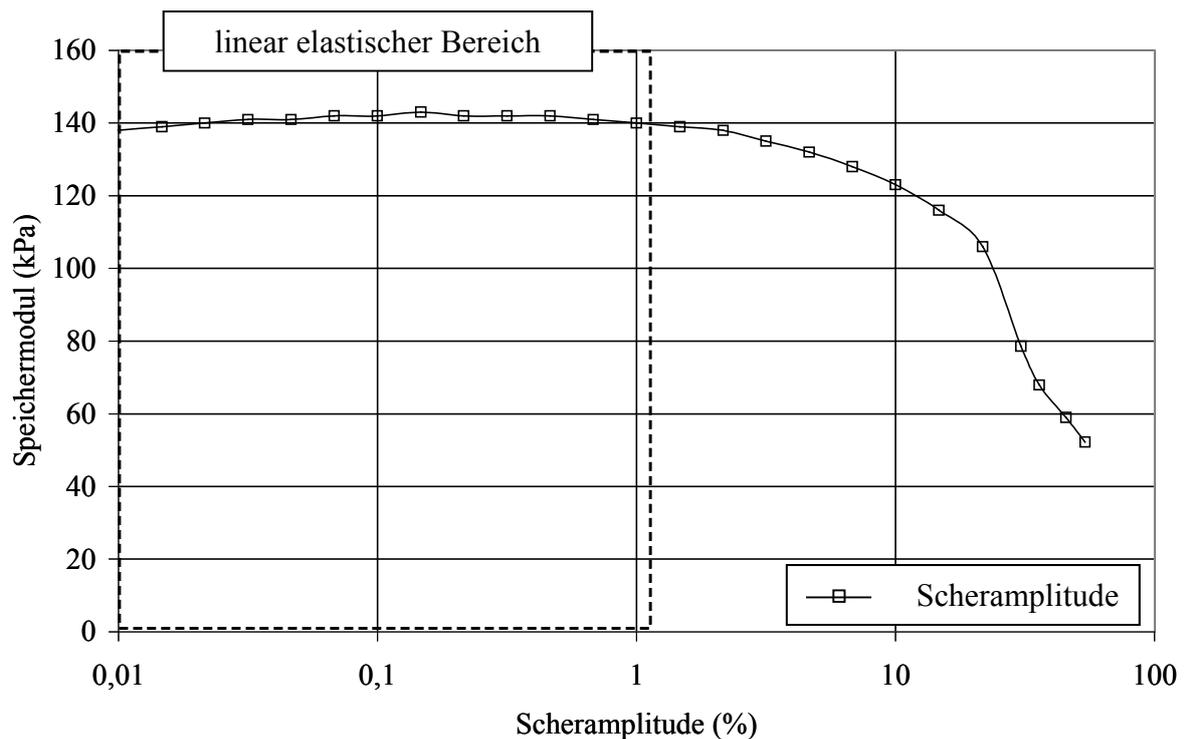


Abbildung 3-14: Ermittlung des linear-elastischen Bereichs über einen Amplitudentest für den Klebstoff Betamate 1496V

In Abbildung 3-15 ist für die Heizraten 2, 4 und 6 K/min der Verlauf der dynamischen Viskosität sowie die nach Kriterium (6) definierten Gelpunkte über der Temperatur dargestellt. Eine Auswertung nach Kriterium (5) (Änderung der Steigung des Verlustfaktors $\tan\delta$) lieferte nur für zwei der drei gemessenen Heizraten verlässliche Ergebnisse. Diese stimmen mit denen über Kriterium (6) ermittelten überein.

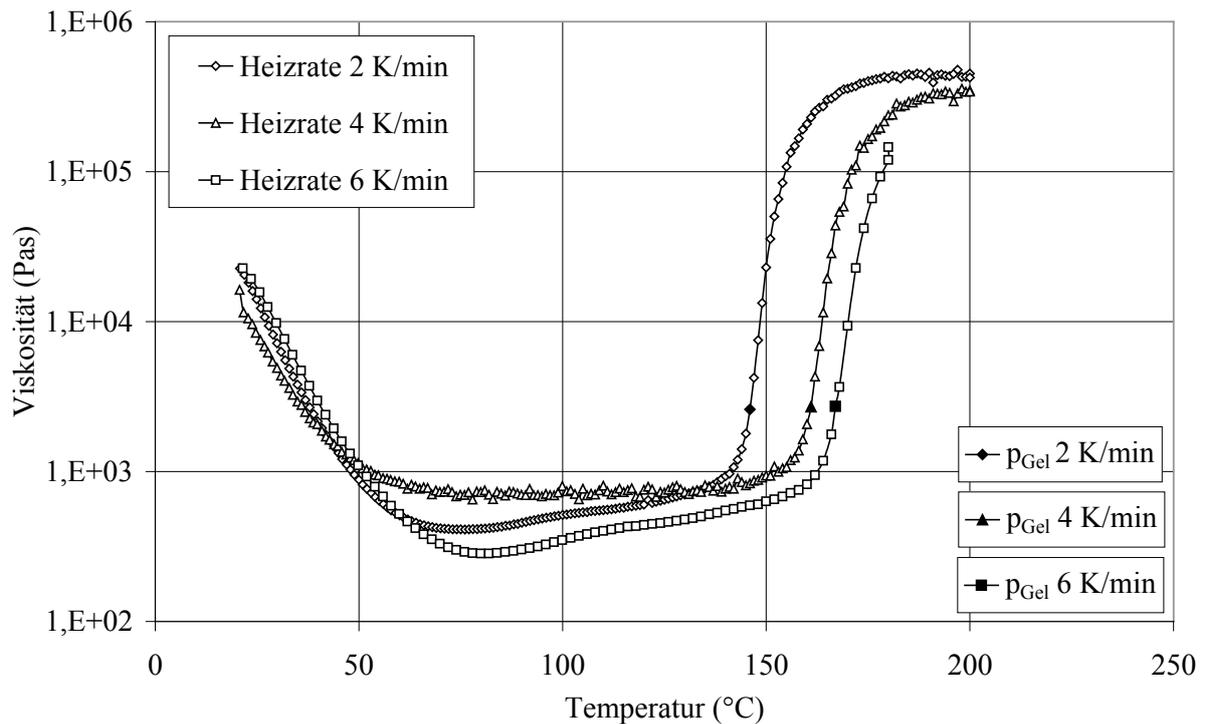


Abbildung 3-15: Dynamische Viskosität über der Temperatur T für drei Heizraten, Gelpunkte für drei Heizraten nach dem Kriterium (6) der Viskositätsänderung $\Delta\eta > 500$ Pas, Klebstoff Betamate 1496V

Der Klebstoff weist im Bereich von Raumtemperatur bis etwa 60 °C einen deutlichen Abfall der Viskosität auf. Die Verarbeitungstemperatur des Klebstoffs liegt nach Herstellerangaben bei ca. 50 °C. Durch die geringere Viskosität bei dieser Temperatur wird das Pumpen, der Transport durch die Leitungssysteme und das Applizieren an der Fugestelle durch Düsen erleichtert. Die Anlagentechnik wird aufgrund der Notwendigkeit der Beheizung allerdings aufwendiger. Im Bereich zwischen etwa 75 und 150 °C steigt die Viskosität leicht an. Dies ist durch einen chemisch eingestellten Vorgelierungsprozess, zur Erhöhung der Auswaschbeständigkeit der Klebstoffe beim Baddurchlauf im automobilen KTL-Lackprozess, begründet. Ab etwa 150 °C steigt der Verlauf der Viskosität stark an, was durch die eigentliche Vernetzungsreaktion des Klebstoffs zu erklären ist.

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst. Der aus drei Messungen gemittelte Vernetzungsgrad am Gelpunkt des Klebstoffs Betamate 1496V beträgt $p_{\text{Gel}} = 0,455$.

Tabelle 3-5: Dynamische Viskosität, Temperatur und mittels Reaktionskinetik ermittelter Vernetzungsgrad am Gelpunkt

Heizrate		K/min	2	4	6
Viskosität	η	Pas	2.600	2.700	2.720
Temperatur	T	°C	146	161	166
Vernetzungsgrad	p	-	0,394	0,525	0,446

3.4 Bestimmung der Ausdehnungskoeffizienten

3.4.1 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Der thermische Ausdehnungskoeffizient α_{th} ist insbesondere für Polymere von der Temperatur abhängig. Die Untersuchungen zur Ermittlung der thermischen Ausdehnung des vollständig vernetzten Klebstoffs Betamate 1496V erfolgen mit einem Dilatometer der Firma Netzsch Gerätebau, Modell 402 C. Die Messungen werden mit einem Probenhalter aus Quarzglas unter Helium-Atmosphäre durchgeführt. Die Ausdehnung des Probenhalters wird über eine in der Software enthaltene Ausdehnungstabelle korrigiert. Rechteckigen Klebstoffproben mit einer Länge von 24 mm, einer Breite von 10 mm und einer Höhe von 2 mm wurden mit einer konstanten Heizrate von 3 K/min im Temperaturbereich von -20 °C bis 200 °C untersucht. Der Messzyklus wurde jeweils dreimal wiederholt, um mögliche Glasübergänge bzw. Nachvernetzungen zu identifizieren.

Der für die Praxis relevante mittlere thermische Ausdehnungskoeffizient ist nach DIN 53 752 [NN80] definiert als:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad \text{Formel 3.10}$$

wobei l_0 die Ausgangsmesslänge und Δl die Längenänderung bei einer Temperaturänderung ΔT bezogen auf die festgelegte Referenztemperatur sind.

Abbildung 3-16 stellt den Verlauf des thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Referenztemperatur $T = 20$ °C) bei drei Aufheizzyklen dar. Der Kurvenverlauf der ersten Aufheizung zeigt bei 80 °C ein Maximum und bei 103 °C ein Minimum. Dieser Effekt deutet auf den Glasübergang in diesem Bereich und eine anschließende Nachvernetzung hin. Nach der zweiten und dritten Aufheizung weisen beide Kurven einen annähernd linear ansteigenden

Verlauf auf. Das bedeutet, dass es während der zweiten Aufheizung zu keiner weiteren Nachvernetzung des Klebstoffs kommt.

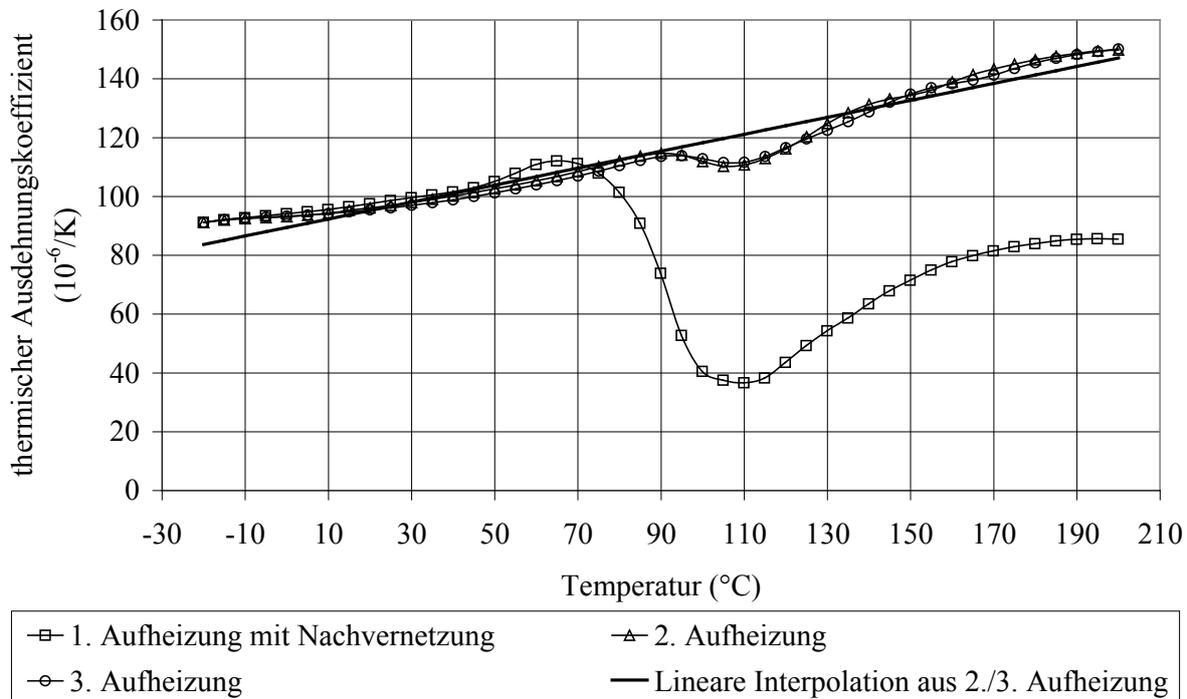


Abbildung 3-16: Thermischer Ausdehnungskoeffizient bei drei Aufheizzyklen (Referenztemperatur $20^{\circ}C$)

Über eine lineare Regression können die gemittelten Messwerte der zweiten und dritten Aufheizung einer linearen Funktion des mittleren Ausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit der Temperatur angenähert werden. Dabei werden die Regressionsparameter durch Minimierung der Summe der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt. Im Temperaturbereich gilt somit:

$$\bar{\alpha}(T) = 2,88 \cdot 10^{-7} T + 8,95 \cdot 10^{-5} \quad \text{Formel 3.11}$$

Die thermische Ausdehnung des Klebstoffs ist wie jede Beanspruchung unter mechanischer und thermischer Belastung durch Relaxationsprozesse gekennzeichnet. In [Jen04] wird gezeigt, dass der Einfluss von messtechnisch sinnvollen Heizraten (zwischen 2 und 10 K/min) auf die thermische Ausdehnung der Proben vernachlässigbar gering ist. Auf die Untersuchung mit verschiedenen Heizraten wird daraufhin verzichtet.

3.4.2 Ausdehnungskoeffizient infolge chemischer Reaktionsschwindung

Neben der thermischen Ausdehnung trägt auch die Ausdehnung des Klebstoffs infolge chemischer Reaktionsschwindung zum Eigenspannungsaufbau bei. Dieser ist auf die Verkürzung

der intermolekularen Abstände der Monomere während der Vernetzung zum Polymer zurückzuführen. Dabei gehen auf Van der Waals Kräften beruhende sekundäre Bindungen in kovalente Bindungen über, wobei sich die Bindungsabstände verringern. Als Folge der damit verbundenen höheren Dichte der vernetzten Klebschicht gegenüber den unvernetzten Monomeren ergibt sich somit ein Volumenschwindung [Hab06]. Die chemische Reaktionsschwindigkeit wird aus dem Dichteunterschied des unvernetzten und des vollständig vernetzten Klebstoffs errechnet. Die Bestimmung der Dichte des Klebstoffs erfolgte mit einer Analysewaage der Firma Mettler Toledo, Modell AX204, deren Funktionsweise auf dem archimedischen Prinzip (Auftriebsmethode) beruht.

Die Dichte eines Festkörpers wird hier mit Hilfe der bekannten Dichte einer Flüssigkeit bestimmt. In einem ersten Schritt wird das Gewicht (die Masse) der Probe durch Wägen in Luft festgestellt. Eine zweite Wägung ergibt das Volumen der Probe indirekt über das Gewicht, das die Probe in der Flüssigkeit von bekannter Dichte verdrängt. Somit ergibt sich für die Dichte des Klebstoffs:

$$\rho_K = \rho_{Fl} \frac{m_{K(a)}}{m_{K(a)} - m_{K(fl)}} \quad \text{Formel 3.12}$$

Anzumerken ist, dass nach [Met09] neben der Temperatur, dem Luftauftrieb und der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, auch Luftblasen und Porositäten des Festkörpers die Messergebnisse beeinflussen können.

Tabelle 3-6 zeigt das Ergebnis der Dichtemessungen, die als Mittelwert aus 9 (für unvernetzt) bzw. 3 Messungen (für vollständig vernetzt) angegeben werden. Die daraus resultierende Volumenschwindung ergibt sich aus:

$$S_{Vol} = \frac{\Delta V}{V} = 1 - \frac{\rho_{unvernetzt}}{\rho_{vollständig_vernetzt}} \quad \text{Formel 3.13}$$

Tabelle 3-6: Dichte des unvernetzten und vollständig vernetzten Klebstoffs Betamate 1496V, Volumenschwindung und linearer Ausdehnungskoeffizient

Dichte (unvernetzt)	Dichte (vollständig vernetzt)	Volumenschwindung	Ausdehnungskoeffizient infolge chemischer Reaktionsschwindung
$\rho_{\text{unvernetzt}}$	$\rho_{\text{vollständig vernetzt}}$	S_{vol}	α_{shr}
g/cm^3	g/cm^3	-	-
1,160	1,177	1,44E-02	4,81E-03

Bei isotropen Werkstoffen wird der lineare Ausdehnungskoeffizient infolge der chemischen Reaktionsschwindung wie folgt berechnet:

$$\alpha_{shr} = \frac{S_{Vol}}{3} \quad \text{Formel 3.14}$$

Die Abhängigkeit dieses linearen Ausdehnungskoeffizienten vom Vernetzungsgrad kann nach [Ado98] über einen linearen Zusammenhang angenähert werden.

3.5 Quasistatische Grundversuche an Rohrproben

3.5.1 Probengeometrie und -fertigung

Die stumpf geklebte Rohrprobe eignet sich in besonderer Weise zur Charakterisierung des Klebschichtverhaltens. Es können unterschiedliche Spannungszustände mit demselben Probekörper untersucht werden, wodurch die Ergebnisse direkt vergleichbar sind. Bei einem Verhältnis von Innen- zu Außenradius von mindestens 0,8 führt Torsion zu einem weitgehend homogenen Schubspannungszustand, Zugbeanspruchung (Längskraftbeanspruchung) hingegen aufgrund der Querdehnungsbehinderung in der dünnen Klebschicht zu einem dreiachsigen Normalspannungszustand, worauf in Kapitel 2.3 näher eingegangen wird. Durch gleichzeitige Torsions- und Zugbeanspruchung kann zudem das Verhalten des Klebstoffs unter kombinierten Spannungszuständen untersucht werden. [Sch07a]

Um eine nahezu vollständige Querkontraktionsbehinderung unter Zugbeanspruchung zu erzeugen beträgt die Klebschichtdicke 0,3 mm. Die verwendete Probenform mit 5 mm Wandstärke stellt einen Kompromiss zwischen der Forderung nach Dünnwandigkeit zur Reduzierung des Bauteileffektes bei Torsionsbelastung und nach Minimierung der Streuungen der Einzelergebnisse dar. Die Forderung der ISO 11003-1 [NN96b] nach einem Verhältnis von Innen- zu Außenradius von mindestens 0,8 konnte nicht eingehalten werden, da die Spannvor-

richtung der zur Verfügung stehenden Prüfmaschine sowie das verwendete Biaxial-Extensometer einen Außendurchmesser von 30 mm vorgeben. Das Verhältnis von Innen- zu Außenradius beträgt hier 0,7. Auf den dadurch verursachten systematischen Fehler wird nicht näher eingegangen, da ein inhomogener Schubspannungszustand zu eher konservativeren Spannungs-Deformations-Beziehungen führt.

In Abbildung 3-17 wird die Probengeometrie schematisch dargestellt. Die Füge­teile der stumpf geklebten Rohrprobe werden aus der Stahlsorte E235+N [NN90] gefertigt. Die Stahlrohre ($l_1 = l_2 = 100$ mm, $D = 30$ mm, $d = 20$ mm) werden mit einem in Isopropanol getränktem Tuch gereinigt und anschließend 20 min unter einem Abzug abgelüftet. Das Einstellen der Klebschichtdicke erfolgt durch die Fixierung eines Anschlages an einer Rohrprobenhälfte, dem Einstellen der Klebschichtdicke ($d_K = 0,3$ mm) über eine Blechdickenlehre und der Fixierung der zweiten Rohrprobenhälfte auf der Klebvorrichtung. Die Klebstoffapplikation erfolgt mit einer druckluftbetriebenen beheizbaren Kartuschenpistole. Der Klebstoff wird auf die Probenhälfte mit Anschlag aufgetragen. Anschließend werden beide Füge­teile liegend in einer prismatischen Vorrichtung gefügt und die zweite Probenhälfte fixiert. Der wulstartige Klebstoffaustritt in den Innenraum der Rohrprobe wird durch einen eingesetzten Polytetrafluorethylen (PTFE)-Zylinder verhindert. Der Austritt von Klebstoff im hochviskosen Zustand aus dem Klebspalt während der Erwärmung im Ofen wird durch ein umlaufendes PTFE-Dichtband verhindert. Die Wülste des beim Fügen seitlich aus dem Klebspalt verdrängten Klebstoffs werden im vernetzten Zustand mechanisch abgearbeitet.

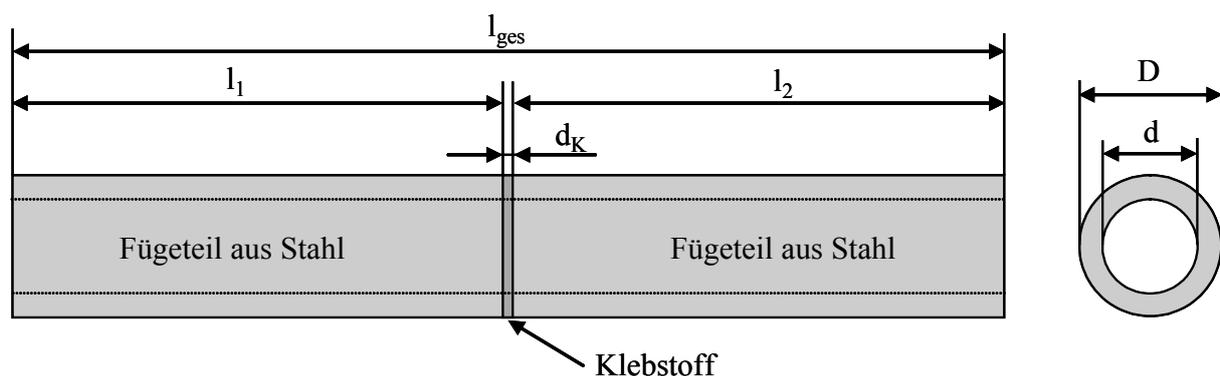


Abbildung 3-17: Probengeometrie der stumpf geklebten Rohrprobe

Der Vernetzungsgrad der nicht vollständig vernetzten Proben wird unter Zuhilfenahme einer Online-Temperaturmessung und eines Excelmakros eingestellt. Während der Vernetzung im Umluftofen wird die Temperatur in der Klebschicht einer Referenzprobe online gemessen und die Reaktionsrate und somit der Vernetzungsgrad in Echtzeit über das Excelmakro ausge-

rechnet. Die Reaktion wird nach Erreichen des Vernetzungsgrades durch schlagartiges Abkühlen der Rohrproben unterbrochen.

3.5.2 Prüfmaschine

Die dehnungs-/gleitungsgeschwindigkeitsgeregelten Versuche erfolgen auf einem servohydraulischen Prüfkomples der Firma Instron, Modell TT 8800 am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Dresden (vgl. Abbildung 3-18).

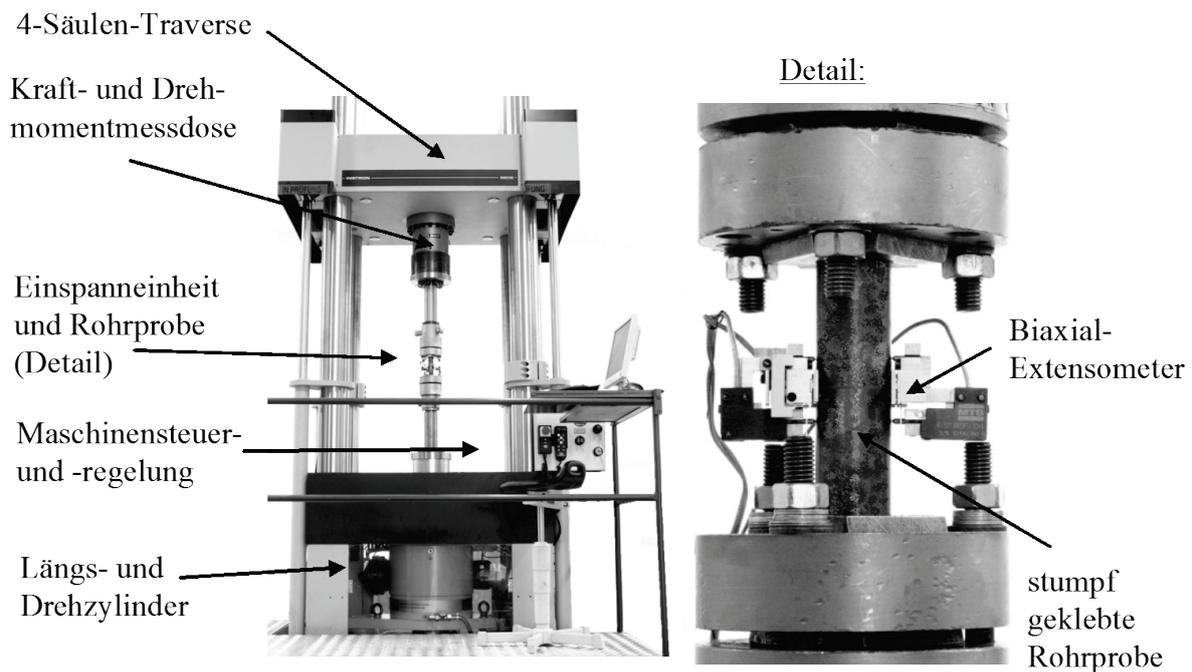


Abbildung 3-18: Servohydraulischer Prüfkomples Instron TT8800

Der Prüfkomples, bestehend aus einer leistungsstarken hydraulischen Versorgungseinheit, der Steuerungs- und Messwertverarbeitungseinheit sowie der Prüf- und Belastungseinheit erlaubt die Durchführung ein- und mehrachsiger statischer und dynamischer Zug-/Druck-Torsionsversuche mit den in Tabelle 3-7 angegebenen Maschinenparametern [Huf05]. Die Kraft- und Drehmomentenmessung erfolgt mit einer Kraft- und Drehmomentenmessdose (Messbereich: 120 kN / 750 Nm) an der oberen Probenaufnahme. Die Versuche können in einem Temperaturbereich von -70 bis +350 °C durchgeführt werden. Aufgrund der lokalen Verformungsmessung und -regelung mit einem Biaxial-Extensometer gehen die Einflüsse der Maschinensteifigkeit in die Kennwertermittlung nicht ein.

Tabelle 3-7: Maschinenparameter des servohydraulischen Prüfkomplexes Instron TT 8800

Parameter		Bereich
Axialkraft	kN	± 1.000
Drehmoment	Nm	± 4.000
Amplitude	mm	± 50
Drehwinkel	°	± 50
Prüffrequenz	Hz	1.000
Temperaturbereich	°C	-70 bis 350

3.5.3 Verformungsmessung

Die Messung der Klebschichtverformung und die Regelung der Prüfmaschine erfolgt lokal an der Probe mit einem Biaxial-Extensometer der Firma MTS, Typ 632-80/F-04, das durch folgende Spezifikationen gekennzeichnet ist:

- Klemm- bzw. Messlänge: 25 mm
- Probendurchmesser: 30 mm
- maximale axiale Verschiebung: -0,5 bis +1,2 mm
- maximale radiale Verschiebung: $\pm 5^\circ$

Abbildung 3-19 und Abbildung 3-20 stellen exemplarisch den Einfluss der lokalen Verformungsmessung einer stumpf geklebten Rohrprobe unter Zug- bzw. Schubbelastung dar. Bei beiden Belastungsarten wird deutlich, dass die an der Traverse gemessene axiale bzw. radiale Verschiebung der lokalen Wegmessung mittels Biaxial-Extensometer nicht tolerierbar voraus eilt.

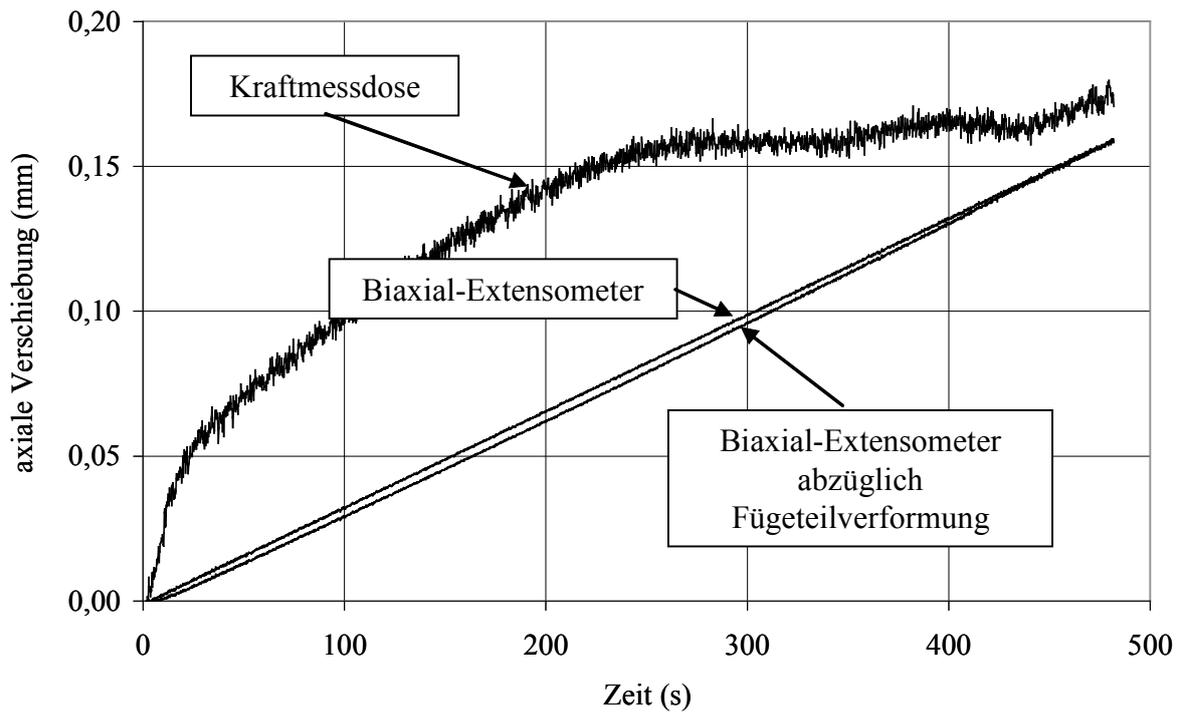


Abbildung 3-19: Einfluss der lokalen Verformungsmessung (Biaxial-Extensometer) gegenüber der Messung mittels Kraftmessdose und Einfluss der Fügeteilverformung bei Zugbelastung

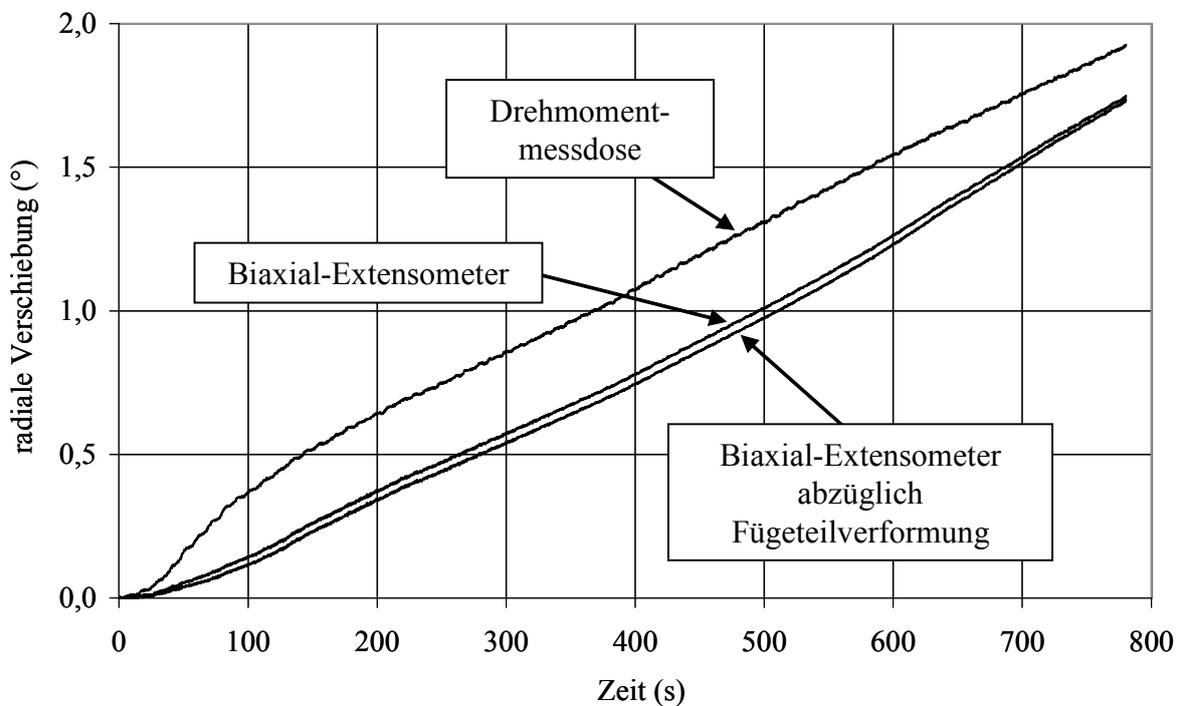


Abbildung 3-20: Einfluss der lokalen Verformungsmessung (Biaxial-Extensometer) gegenüber der Messung mittels Drehmomentmessdose und Einfluss der Fügeteilverformung bei Torsionsbelastung

Der Verformungsaufnehmer (Biaxial-Extensometer) ist mit einer Klemmlänge von 25 mm an den beiden Füge­teilen angebracht. Daher fließen in die gemessene Gesamtdeformation auch zwangsläufig kraft- und momentenabhängige Anteile der Füge­teilverformung ein, die vom Messergebnis abgezogen werden. Für eine Zugbelastung ergibt sich die Verformung der Füge­teile v_F in Längsrichtung aus der Spannung σ_x in Längsrichtung, dem Elastizitätsmodul der Füge­teile E_F , der Messlänge (Abstand der Messpins) l_{mess} , und der Klebschichtdicke d_K wie folgt:

$$\varepsilon_x = \frac{|\sigma_x|}{E_F} = \frac{v_F}{l_{mess} - d_K} \quad \text{Formel 3.15}$$

$$v_F = \frac{|\sigma_x|}{E_F} (l_{mess} - d_K) \quad \text{Formel 3.16}$$

Für die Verformung der Klebschicht unter Zugbelastung bedeutet das:

$$v_K = v_{Ges} - v_F \quad \text{Formel 3.17}$$

Analog gilt für die Füge­teilverformung u_F aufgrund der Schubbelastung mit der Schubspannung τ_{xy} , dem Schubmodul der Füge­teile G_F , der Messlänge l_{mess} und der Klebschichtdicke d_K :

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_F} = \frac{u_F}{l_{mess} - d_K} \quad \text{Formel 3.18}$$

$$u_F = \frac{\tau_{xy}}{G_F} (l_{mess} - d_K) \quad \text{Formel 3.19}$$

Für die Verformung der Klebschicht unter Schubbelastung bedeutet das:

$$u_K = u_{Ges} - u_F \quad \text{Formel 3.20}$$

3.5.4 Quasistatische Festigkeitsversuche

In Tabelle 3-8 werden die untersuchten Beanspruchungskombinationen (Biaxialverhältnisse), die Prüfgeschwindigkeiten, die Dehn-/Gleitraten, die Hauptdehnrate, die Prüftemperaturen und die eingestellten Vernetzungsgrade der durchgeführten quasistatischen Festigkeitsversuche an stumpf geklebten Rohrproben zusammengefasst. Die Prüfmatrix ist durch folgende Randbedingungen gekennzeichnet:

- vier bzw. fünf verschiedene Beanspruchungskombinationen für die vollständig vernetzten Proben, um eine ausreichend hohe Anzahl an Stützstellen zur Interpolation und zur Feststellung der Form der Fließkurve zur Verfügung zu stellen.
- drei verschiedene Beanspruchungskombinationen für die nicht vollständig vernetzten Proben zur Interpolation der Fließkurve.
- für jede Prüftemperatur-Beanspruchungskombination werden mindestens drei Probekörper untersucht.

Tabelle 3-8: Prüfmatrix der quasistatischen Festigkeitsuntersuchungen an stumpf geklebten Rohrproben

Beanspruchungsart			Zug	Kombiniert zugdominiert	Kombiniert schubdominiert	Kombiniert schubdominiert	Torsion
Biaxialverhältnis	$\xi = \frac{\dot{\gamma}_{xy}}{2\dot{\epsilon}_x}$		0	0,5	2	6	∞
Prüfgeschwindigkeiten		mm/s	3,33E-04	2,50E-04	1,17E-04	4,60E-05	0,00E+00
		°/s	0,00E+00	9,50E-04	1,78E-03	2,11E-03	2,29E-03
Dehnrates	$\dot{\epsilon}_x$	1/s	1,11E-03	8,33E-04	3,89E-04	1,53E-04	0,00E+00
Gleitrates	$\dot{\gamma}_{xy}$	1/s	0,00E+00	8,29E-04	1,56E-03	1,84E-03	2,00E-03
Hauptdehnrates	$\dot{\epsilon}_1$	1/s	0,001				
Prüftemperatur	T	°C	23				
Vernetzungsgrad	p		0,98				
			0,90				
			0,80				
			0,75				
Prüftemperatur	T	°C	50				
Vernetzungsgrad	p		0,98				
			0,90				
			0,80				
			0,75				
Prüftemperatur	T	°C	80				
Vernetzungsgrad	p		0,98				
			0,90				
			0,80				
			0,75				
Prüftemperatur	T	°C	100				
Vernetzungsgrad	p		0,98				
			0,90				
			0,80				
			0,75				

untersucht	nicht untersucht
------------	------------------

Glasübergangstemperatur	T _G	°C	
Vernetzungsgrad	p		0,98
			0,90
			0,80
			0,75

In Abbildung 3-21 wird am Beispiel des in dieser Arbeit untersuchten Klebstoffs auf Epoxidharzbasis der Prüfbereich für zulässige Temperaturen und Vernetzungsgrade (ab dem Gel-punkt) als der Bereich unterhalb der Glasübergangstemperatur definiert. Allgemeiner formuliert ergibt sich der Prüfbereich zur Ermittlung von temperatur- und vernetzungsgradabhängigen Festigkeitswerten von Klebstoffen als Fläche unter der vernetzungsgradabhängigen Glasübergangstemperaturkurve, betrachtet ab dem Gelpunkt des Klebstoffs.

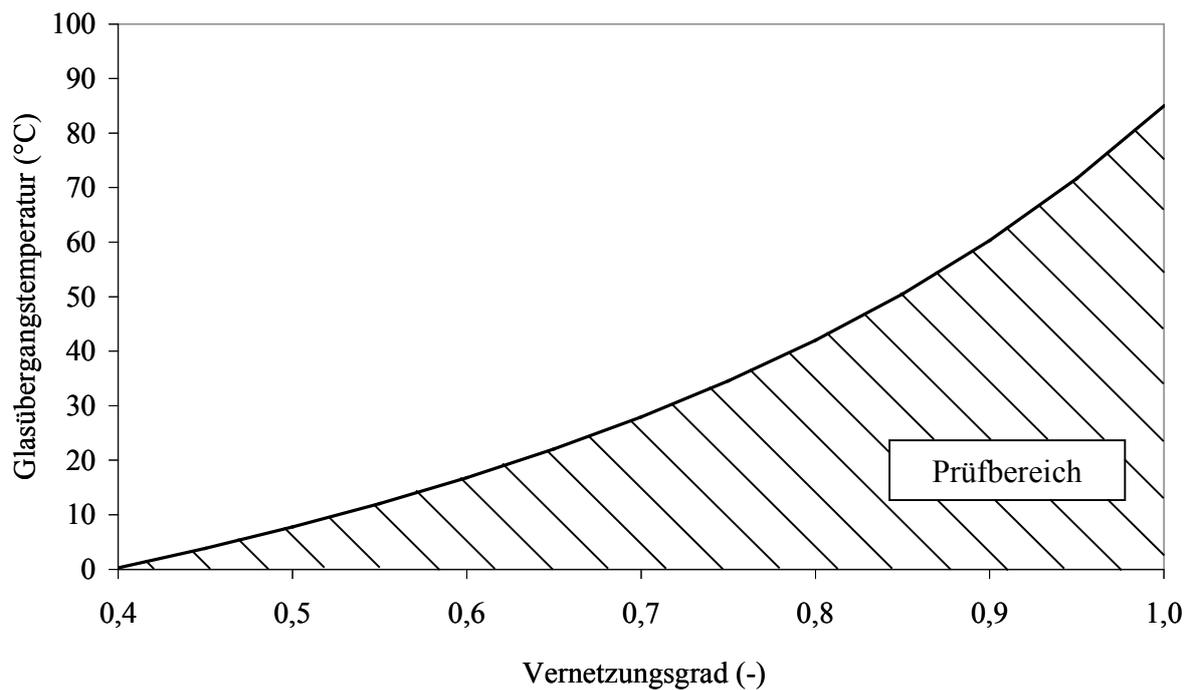


Abbildung 3-21: Prüfbereich zur Ermittlung von temperatur- und vernetzungsgradabhängigen Festigkeitskennwerten des Klebstoffs Betamate 1496V

3.5.5 Beschreibung der Spannungs-Deformations-Beziehungen

Nach [Joh39, Avr41, Pry01] beschreibt die Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorow-Gleichung (JMAK-Gleichung bzw. Avrami-Gleichung) zahlreiche Prozesse in den Materialwissenschaften, insbesondere der Metallurgie und in der physikalischen Chemie, z. B. den Ablauf einer Phasen- oder Gefügewandlung bei gleichbleibender Temperatur.

Nach [Sch06b] können die Spannungs-Deformations-Beziehungen in dünnen Klebschichten ebenfalls mit einer Avrami-Gleichung, dem sogenannten additiven Avrami-Ansatz beschrieben werden. Abbildung 3-22 stellt diesen Ansatz schematisch dar.

Für die Beanspruchung bis zum Spannungsmaximum lautet der additive Avrami-Ansatz wie folgt:

$$\sigma = A_0 \varepsilon + A_1 [1 - \exp(-k_\varepsilon \varepsilon)] \quad \text{Formel 3.21}$$

$$\tau = B_0 \gamma + B_1 [1 - \exp(-k_\gamma \gamma)] \quad \text{Formel 3.22}$$

A_0 , A_1 , k_ε , B_0 , B_1 und k_γ sind dabei Ansatzfreiwerte, die über die Minimierung der Summe der kleinsten Fehlerquadrate aus den experimentellen Versuchsdaten ermittelt werden.

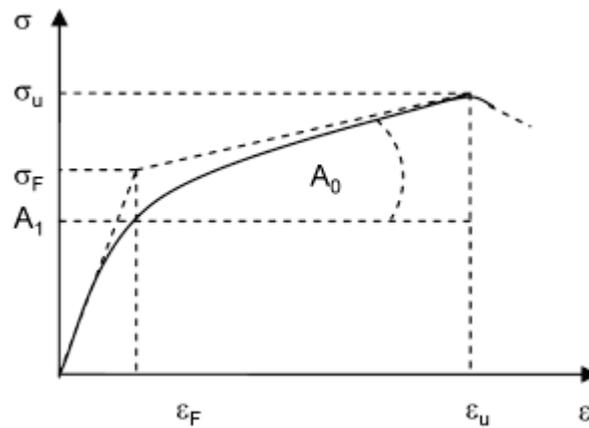


Abbildung 3-22: Schematische Darstellung des additiven Avrami-Ansatzes im Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Auf die Darstellung der analogen Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung wird an dieser Stelle verzichtet.

Der Elastizitätsmodul E und analog der Schubmodul G ergeben sich aus Formel 3.21 als Steigung der Messkurve im Ursprung wie folgt:

$$E = \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0} = A_0 + k_\varepsilon A_1 \quad \text{Formel 3.23}$$

Der Schnittpunkt der rechnerisch ermittelten Ursprungstangente (Formel 3.23) mit der Asymptote aus Formel 3.21 wird als (rechnerischer) Fließbeginn definiert. So ergeben sich Fließspannung und -dehnung wie folgt:

$$\sigma_F = \frac{A_1}{1 - \frac{A_0}{E}} \quad \text{Formel 3.24}$$

$$\varepsilon_F = \frac{\sigma_F}{E} \quad \text{Formel 3.25}$$

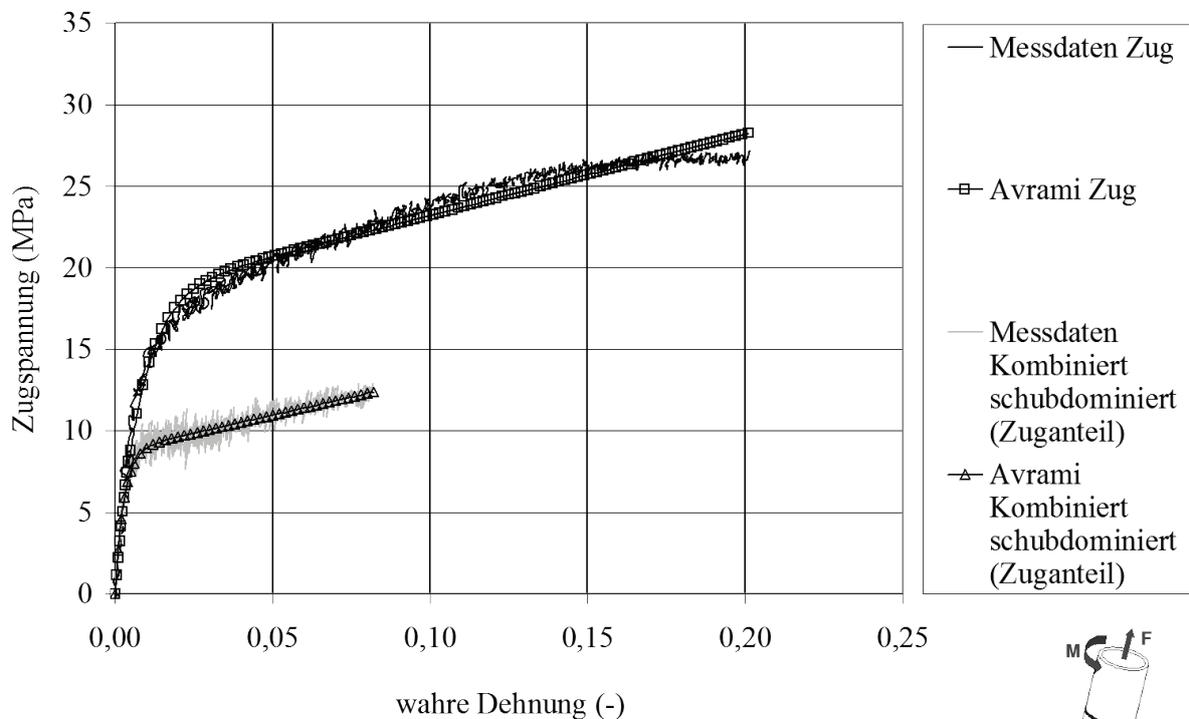
Spannungs-Dehnungs-Kurven nach additivem Avrami-Ansatz

Die gemessenen Kraft-Weg- bzw. Moment-Verdrehungs-Kurven werden über folgende Beziehungen:

$$\sigma_x = \frac{F_x}{A} \quad \text{mit} \quad A = \frac{\Pi}{4} (D^2 - d^2) \quad \text{Formel 3.26}$$

$$\tau_{xy} = \frac{M}{W_P} \quad \text{mit} \quad W_P = \frac{\Pi}{16} \left(\frac{D^4 - d^4}{D} \right) \quad \text{Formel 3.27}$$

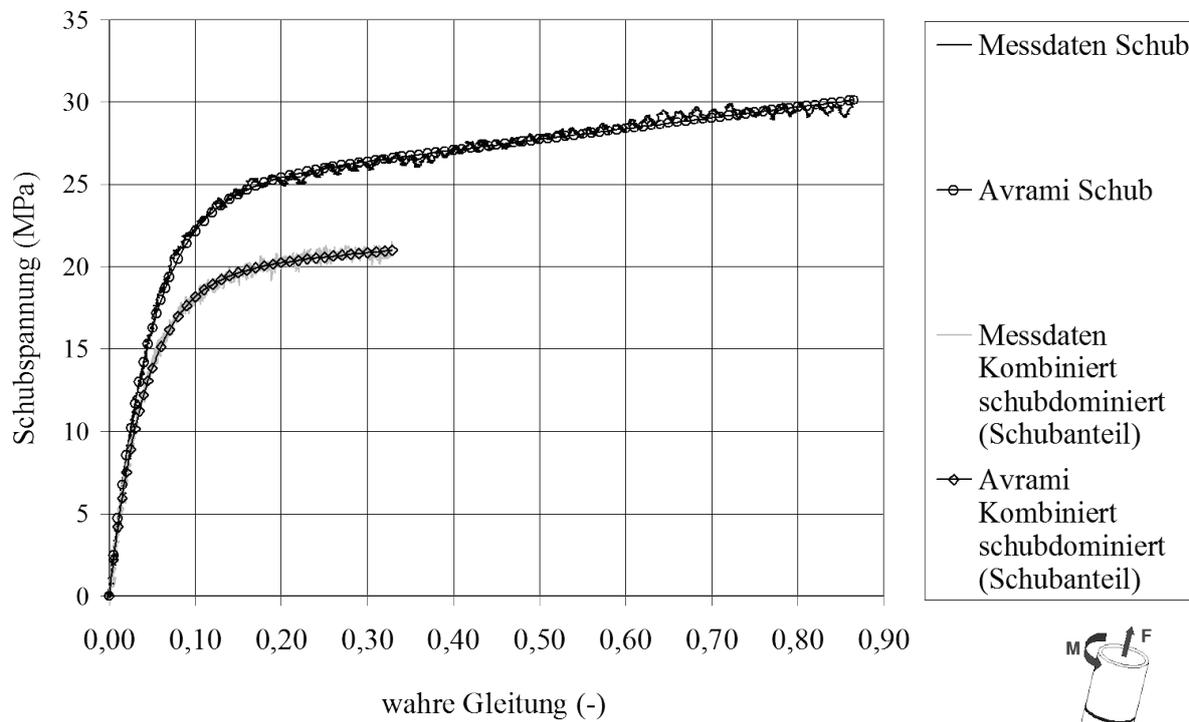
in Spannungs-Deformations-Kurven umgerechnet. Die durch Messrauschen behafteten Spannungs-Deformations-Daten werden wiederum über den additiven Avrami-Ansatz (vgl. Kapitel 3.5.5) beschrieben. Die Ansatzfreiwerte des Ansatzes (vgl. Formel 3.21 und Formel 3.22) werden über die Minimierung der Summe der Abweichungsquadrate (kleinsten Fehlerquadrate) zwischen Ansatz- und Messdaten ermittelt. Abbildung 3-23 stellt exemplarisch die Abweichung zwischen den Messdaten und der Näherung über den Avrami-Ansatz für eine Zugbeanspruchung bzw. den Zuganteil einer kombinierten Beanspruchung dar.



Probengeometrie:	Rohrprobe (E235+N, D = 30 mm, d = 20 mm)	
Prüftemperatur:	23 °C	Klebstoff: Betamate 1496V
Vernetzungsgrade:	0,98	d _K : 0,3 mm
Beanspruchung:	Zug (ξ = 0)	Kombiniert (Zuganteil) (ξ = 2)
R ² :	Zug (0,980)	Kombiniert (Zuganteil) (0,943)

Abbildung 3-23: Näherung der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehungen mit dem Avrami-Ansatz, Abweichung zwischen Messdaten und der Näherungskurve

Abbildung 3-24 stellt diesen Zusammenhang analog für eine Schubbeanspruchung bzw. den Schubanteil einer kombinierten Beanspruchung dar.



Probengeometrie:	Rohrprobe (E235+N, D = 30 mm, d = 20 mm)		
Prüftemperatur:	23 °C	Klebstoff:	Betamate 1496V
Vernetzungsgrade:	0,98	d _k :	0,3 mm
Beanspruchung:	Schub (ξ = ∞)	Kombiniert (Schubanteil)(ξ = 2)	
R ² :	Schub (0,997)	Kombiniert (Schubanteil)(0,995)	

Abbildung 3-24: Näherung der Schubspannungs-Gleitungs-Beziehungen mit dem Avrami-Ansatz, Abweichung zwischen Messdaten und der Näherungskurve

Determinationskoeffizient bzw. Bestimmtheitsmaß

Der Determinationskoeffizient R² ist ein Maß für die Abweichungen der Vorhersagen eines Näherungsmodells von den Messdaten - kurz: ein Maß für die Modellanpassung und wird wie folgt definiert:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N (\sigma_k - \sigma'_k)^2}{\sum_{k=1}^N \sigma_k^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^N \sigma_k\right)^2}{N}}$$

mit

N...Anzahl der Messpunkte

σ_k...k-ter Spannungsmesswert

σ'_k...k-ter Avrami-Spannungswert

Formel 3.28

R² nimmt Werte zwischen null und eins an. R² = 0 bedeutet, dass die Messwerte keine Vorhersage der Ansatzfreiwerte des Modells erlauben. R² = 1 weist auf eine perfekte Modellan-

passung hin. Alternativ zu der Bezeichnung Determinationskoeffizient wird auch der Begriff Bestimmtheitsmaß oder Fitgüte verwendet.

3.5.6 Bestimmung der Moduln und des Fließbeginns

Da der Klebstoff unter Bedingungen geprüft wird, unter denen er eine hohe Viskoelastizität aufweist (hier: Prüftemperaturen $> RT$) gibt es keinen linearen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Selbst bei geringen Dehnungen liegt bereits viskoelastisches Verhalten vor. Außerdem weist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter diesen Bedingungen eine hohe Abhängigkeit von der Dehnungs-/Gleitungsrate auf. Die Ableitung eines Moduls aus einer bei gleichbleibender Dehnungs-/Gleitungsrate durchgeführten Prüfung ist daher nicht geeignet. Zur Charakterisierung des viskoelastischen Verhaltens werden in Kapitel 3.2.1 dynamische mechanische Prüfungen durchgeführt.

Zum einen kann der Elastizitätsmodul E in Anlehnung an die DIN ISO 527-1 [NN96A] aus dem Zugversuch als Quotient aus dem Spannungsunterschied σ_1 und σ_2 und dem entsprechenden Dehnungsunterschied $\varepsilon_1 = 0,0005$ und $\varepsilon_2 = 0,005$ definiert werden. Zum anderen liefert auch der additive Avrami-Ansatz (vgl. Kapitel 3.5.5 , Formel 3.23) einen Wert für den E-Modul.

Nach DIN EN 14869-2 [NN04a] ist der Schubmodul gleich dem Gradienten des linearen Bereichs mit geringer Dehnung bei einer Auftragung der Schubspannung gegen die Schubverformung (Gleitung). Der Schubmodul G ist hier analog zum Elastizitätsmodul als Quotient aus Schubspannung τ_1 und τ_2 und Gleitung $\gamma_1 = 0,0005$ und $\gamma_2 = 0,005$ definiert. Eine Vorschrift zur Bestimmung des Schubmoduls enthalten die genannten Normen jedoch nicht. Auch hier liefert der additive Avrami-Ansatz analog zu Formel 3.23 einen Wert für den Schubmodul. In werden beide Methoden zur E- und G-Modulbestimmung dargestellt.

Tabelle 3-9: Methoden zur Bestimmung der E- und G-Modul

Methode	E-Modul	G-Modul
a1	nach additivem Avrami-Ansatz	nach additivem Avrami-Ansatz
a2	in Anlehnung an DIN ISO 527-1	in Anlehnung an DIN EN 14869-2

Beide Proportionalitätsfaktoren werden hier exemplarisch für die Versuche bei RT bestimmt. In Abbildung 3-25 wird der Einfluss der Methode zur Bestimmung der Moduln und die Abhängigkeit vom Vernetzungsgrad p exemplarisch an einem kombinierten Zug-/ Torsions-

versuch (Biaxialverhältnis $\xi = 2$) dargestellt. Der Modul ist nach dem additiven Avrami-Ansatz tendenziell höher als bei der Auswertung in Anlehnung an die DIN-Normen. Die Moduln nehmen mit steigendem Vernetzungsgrad erwartungsgemäß zu, eine Gesetzmäßigkeit ist nach den hier durchgeführten Untersuchungen aber nicht zu erkennen. Der E- und der G-Modul des vollständig vernetzten Klebstoffs nach Auswertung in Anlehnung nach DIN-Norm stimmen mit dem aus dem Klebstoffdatenblatt [Dow01] ($E_{ZSV} = 1.600 \text{ MPa}$) nahezu überein.

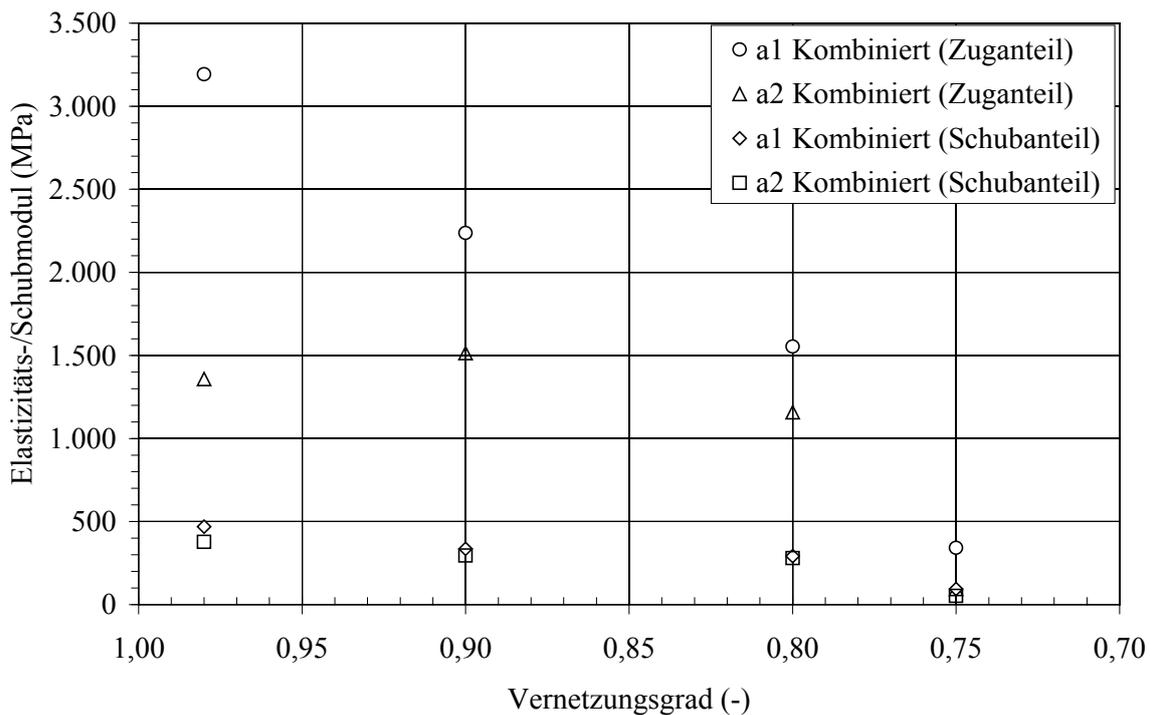


Abbildung 3-25: Einfluss des Vernetzungsgrades p und der Methode zur Bestimmung der Moduln, kombinierter Zug-/Torsionsversuch ($\xi = 2$) bei RT

Für die Definition des Fließbeginns werden hier vier Methoden vorgestellt.

Methode b1 und b2

Die Bestimmung des Fließbeginns nach Methode b1 und b2 erfolgt in Anlehnung an die DIN EN 10002-1 [NN01b] für metallische Werkstoffe. Der Fließbeginn ist für beide Methoden als Spannung bei 0,2 % plastischen Dehnung/Gleitung definiert. Der Unterschied zwischen beiden Methoden besteht in der Definition des E- bzw. G-Moduls und damit in der Definition des Beginns der Plastizität. Für Methode b1 wird der E- bzw. G-Modul nach Methode a1 (vgl. Tabelle 3-9) und für Methode b2 nach Methode a2 (vgl. Tabelle 3-9) bestimmt.

Methoden b3

Nach Methode b3 ist der Fließbeginn der Punkt im Spannungs-Verformungs-Diagramm an dem die Spannung einen Wert größer 5 % der Maximalspannung annimmt.

Methoden Avrami

Die Definition des Fließbeginns nach dem Avrami-Ansatz (Formel 3.24 und Formel 3.25) wird in Kapitel 3.5.5 ausführlich erläutert.

Abbildung 3-26 stellt den Zusammenhang der vier Methoden zusammenfassend schematisch dar.

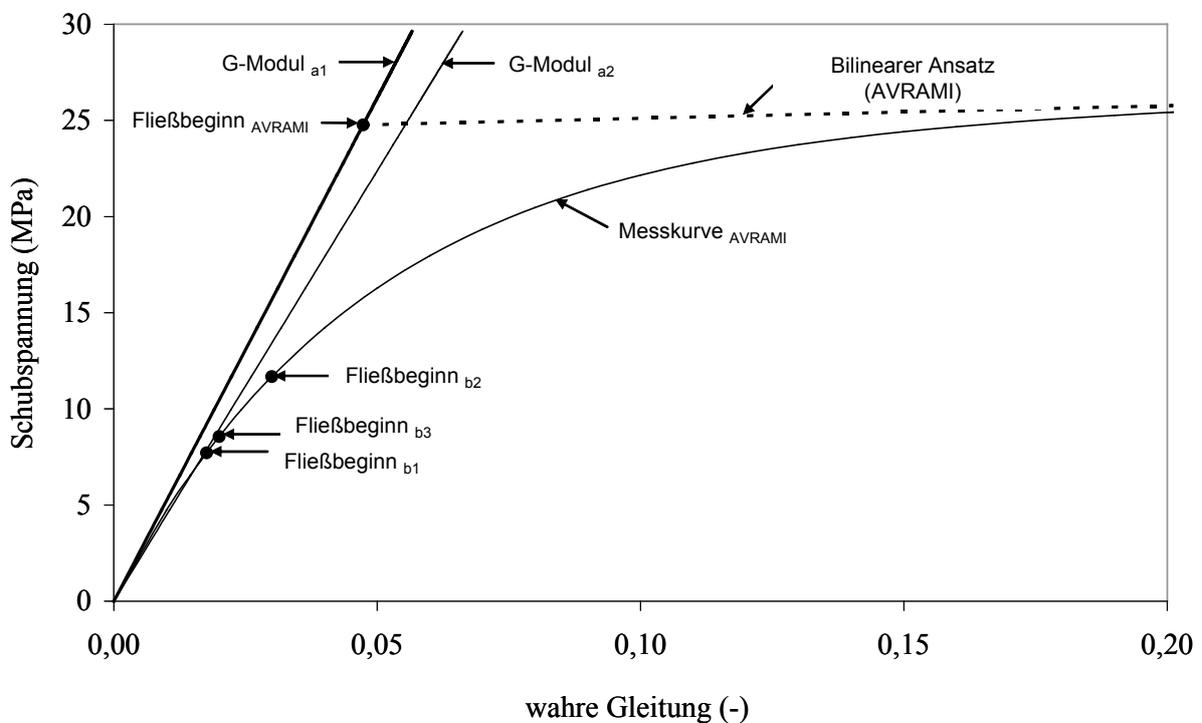


Abbildung 3-26: Methoden (b1, b2, b3, Avrami) zur Bestimmung des Fließbeginns, hier exemplarisch für einen Schubversuch

Auch hier wird das zeitabhängige viskoelastische Verhalten der Polymere deutlich. Im quasistatischen Zug- und Torsionsversuch ist das linear-elastische Verhalten der Kunststoffe sehr gering ausgeprägt. Dies wird bei den zähen Kunststoffen (z. B. Strukturklebstoffe) besonders deutlich, da sie keinen ausgeprägten Fließbeginn besitzen.

Abbildung 3-27 stellt den Einfluss der vier Methoden zur Definition des Fließbeginns bei Zug- und Schubbeanspruchungen stumpf geklebter Rohrproben ($p = 0,98$) bei RT dar. Die experimentell ermittelten Versuchsdaten werden, bis auf Methode b2, über die Fließbedin-

gung nach Lambrecht approximiert. Die experimentell ermittelten Versuchsdaten der Methode b2 lassen eine Interpolation über die Fließbedingung nach Lambrecht nicht zu.

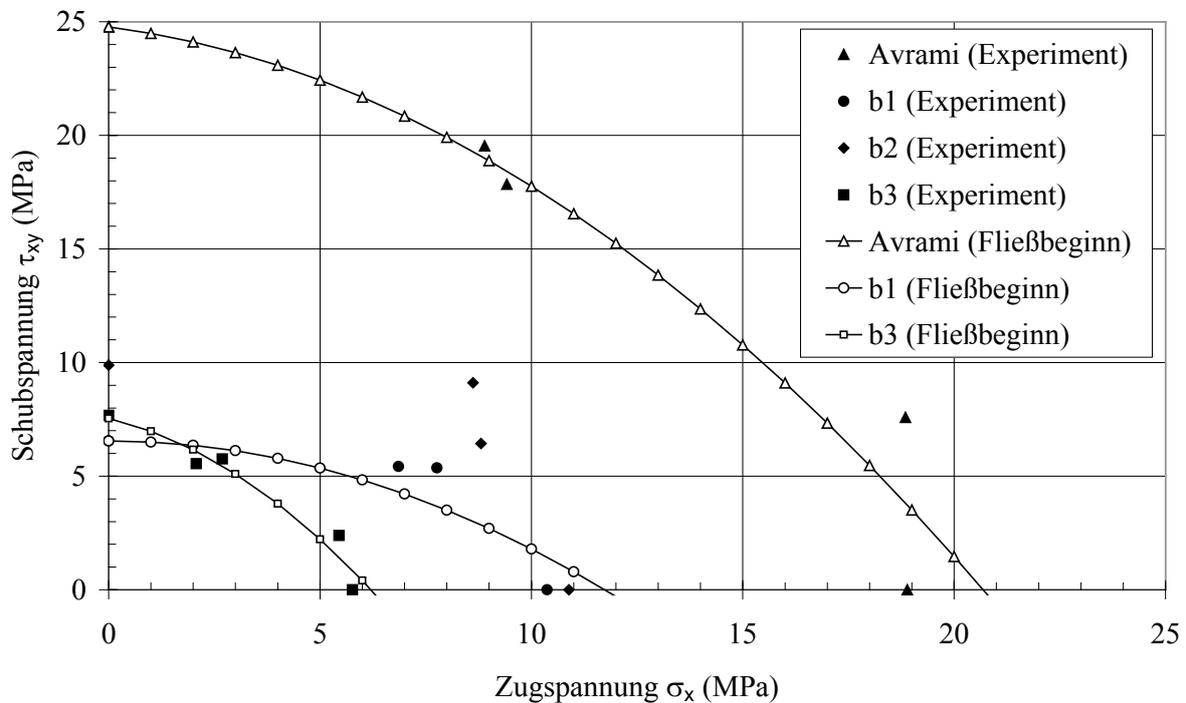


Abbildung 3-27: Einfluss der Methode bei der Bestimmung des Fließbeginns bei Zug-, Schub- und kombinierten Zug/Schubbeanspruchungen

Aufgrund der stark nichtlinearen Spannungs-Verformungs-Kurven erweisen sich die Methoden b1, b2 und b3 als ungeeignet für die Bestimmung des Fließbeginns. In den folgenden Kapiteln wird daher der Fließbeginn nach der Methode Avrami bestimmt.

Abbildung 3-28 zeigt einen Vergleich der in Kapitel 2.2 vorgestellten Fließbedingungen nach Lambrecht, Schlimmer und des IWM Freiburg am Beispiel des vollständig vernetzten Klebstoffs ($p = 0,98$) bei der Prüftemperatur $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$. Es wird deutlich, dass alle drei Bedingungen auf parabolischen Ansätzen beruhen und somit vernachlässigbar kleine Abweichungen in der Interpolation der Versuchsergebnisse entstehen.

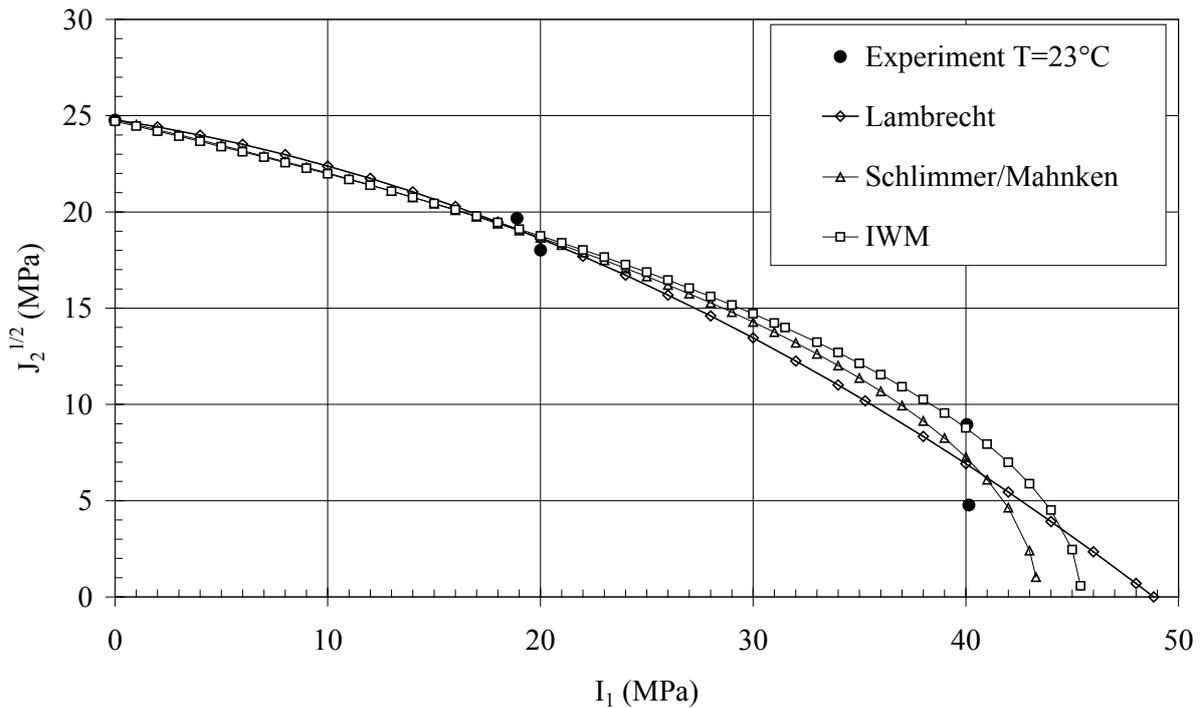


Abbildung 3-28: Vergleich der Ansätze zur Fließbedingung nach Lambrecht, Schlimmer und IWM, exemplarisch für den vollständig vernetzten Klebstoff Betamate 1496V bei 23 °C

Die Parameteridentifikation zur Beschreibung des Fließbeginns erfolgt durch die Minimierung der Summe der kleinsten Fehlerquadrate zwischen experimentell ermittelten Versuchswerten und der jeweiligen Näherungsfunktion, für den Fall der Fließbedingung nach Lambrecht nach Formel 3.29.

$$J_2 = F(I_1, Y_0, b_1, b_2) = \frac{1}{3} \left(Y_0^2 - b_1 I_1 - \frac{b_2}{Y_0} I_1^2 \right)^2 \quad \text{Formel 3.29}$$

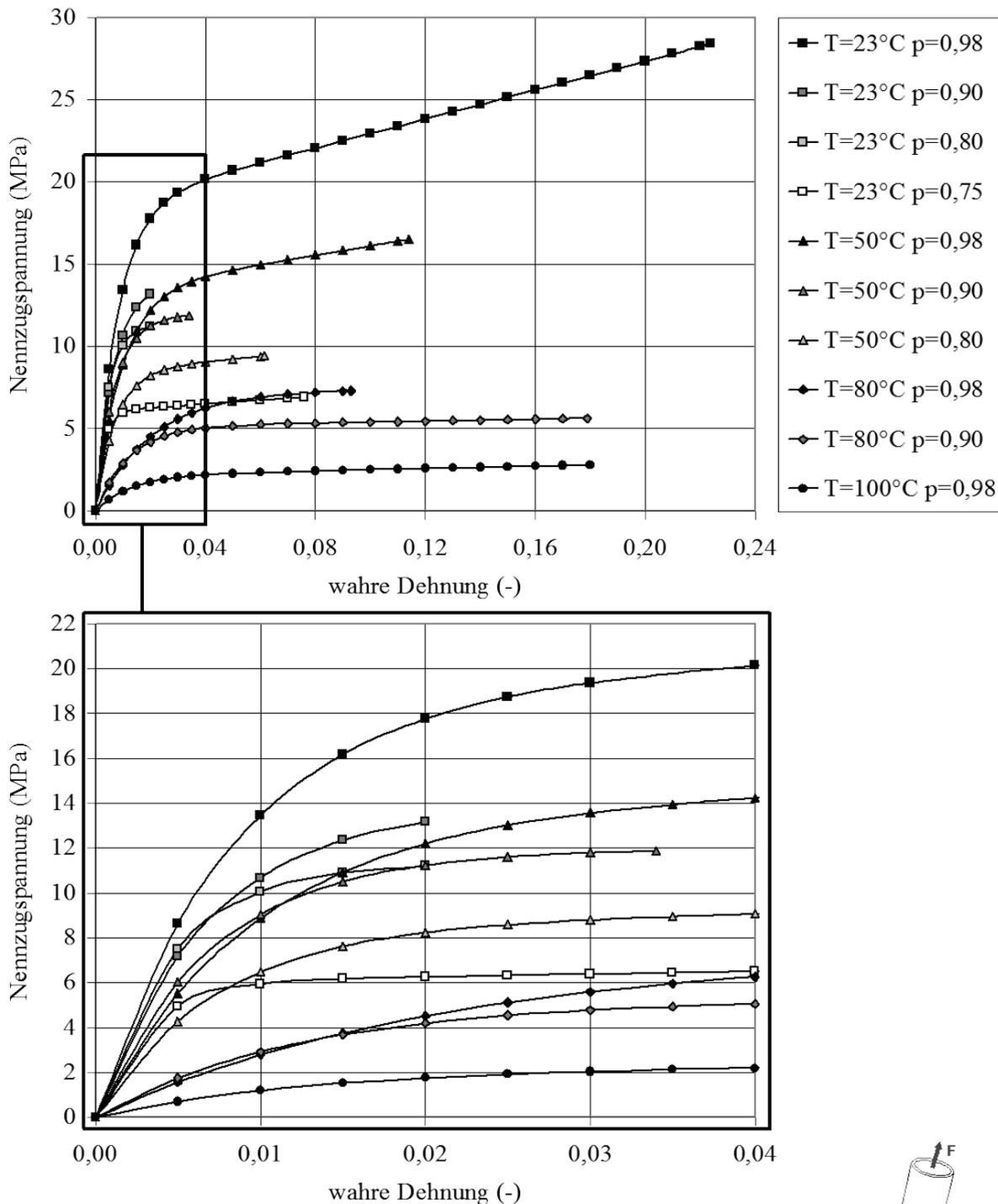
Eine einfache von Mises Fließbedingung, d. h. ohne Einfluss des hydrostatischen Spannungsanteils (erste Spannungsinvariante I_1) wird hier über $b_1 = b_2 = 0$ erfüllt.

3.6 Ergebnisse der quasistatischen Festigkeitsuntersuchungen

3.6.1 Spannungs-Verformungs-Verhalten

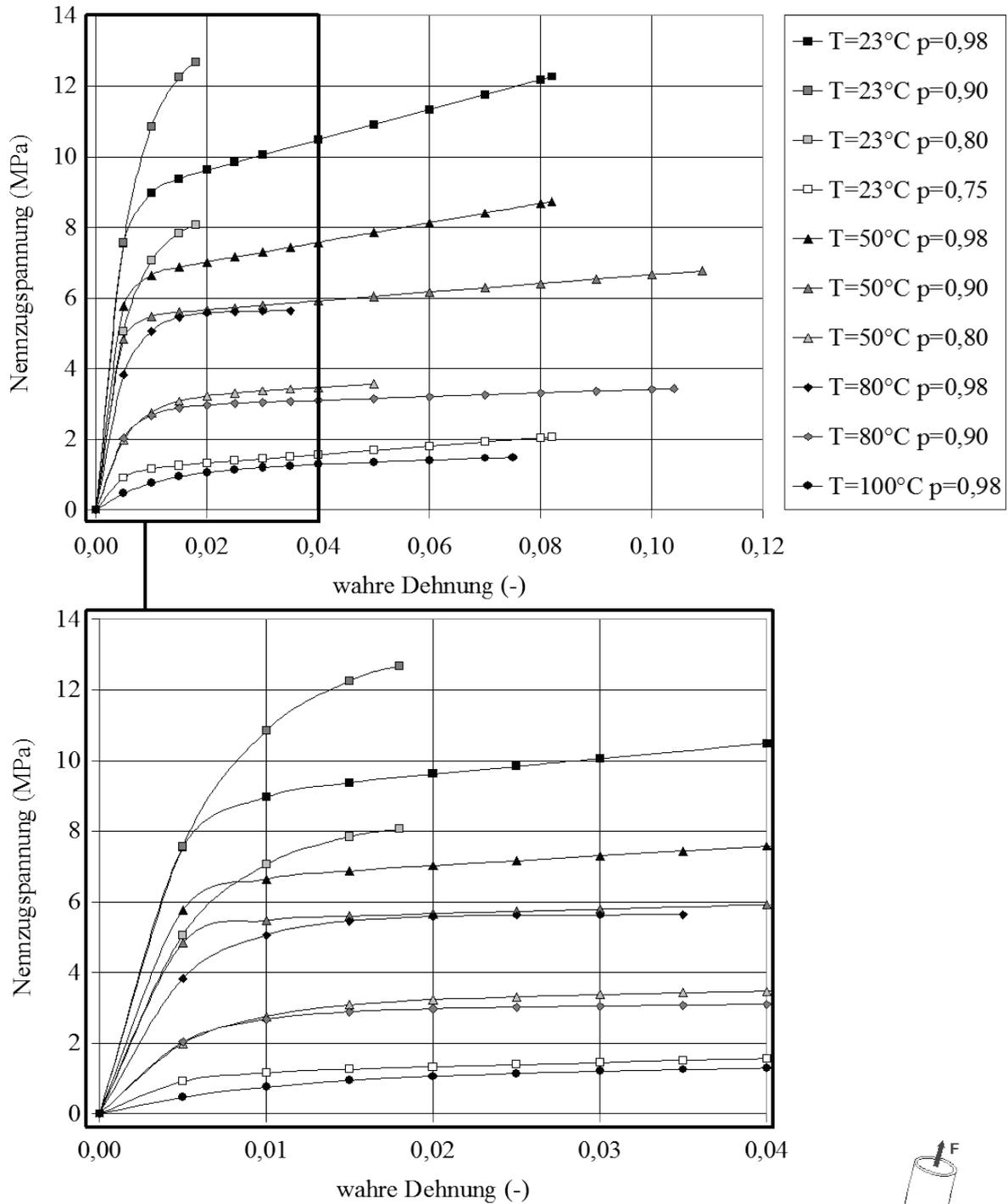
Abbildung 3-29 bis Abbildung 3-32 zeigen Spannungs-Verformungs-Kurven unter querkontraktionsbehindertem Zug, kombinierten Zug-/Schubbeanspruchung und reinem Schub. Von jeder Beanspruchungskombination werden drei Prüfungen durchgeführt ($n = 3$). Die Kurven sind nach dem additiven Avrami-Ansatz interpoliert (vgl. Kapitel 3.5.5). Auf die statistische Absicherung der durchgeführten Versuche zur Ermittlung des Fließbeginns und

des Spannungsmaximum wird in Kapitel 3.6.3 eingegangen. Auf die Darstellung der nicht interpolierten Messkurven über das Spannungsmaximum hinaus wird verzichtet, da eine analytische Beschreibung der Messkurven mit dem additiven Avrami-Ansatz nur bis zum Spannungsmaximum definiert ist (vgl. Kapitel 3.5.5).



Beanspruchung: Zug ($\xi = 0$)
 Prüftemperaturen: RT - 100 °C p: 0,75 - 0,98
 Klebstoff: Betamate 1496V d_K : 0,3 mm
 Probengeometrie: Rohrprobe Material: E235+N

Abbildung 3-29: Spannungs-Verformungs-Verhalten stumpf geklebter Rohrproben unter querkontraktionsbehindertem Zug



Beanspruchung: Kombiniert Zug/Schub ($\xi = 2$)
 Diagramm: Zuganteil
 Prüftemperaturen: RT - 100 °C p: 0,75 - 0,98
 Klebstoff: Betamate 1496V d_K : 0,3 mm
 Probengeometrie: Rohrprobe Material: E235+N

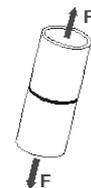
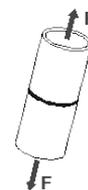
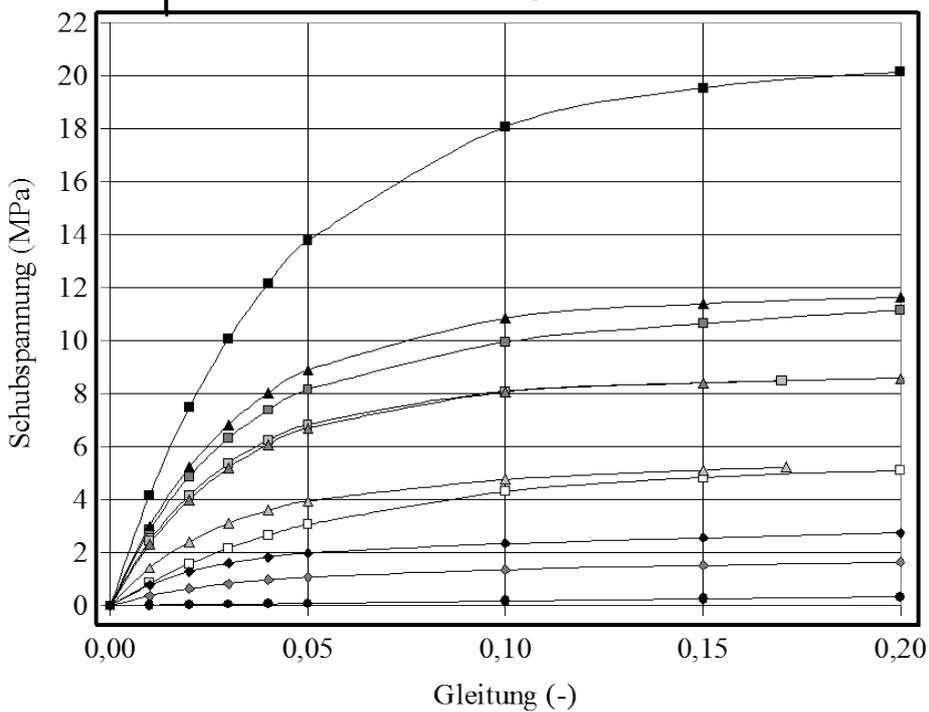
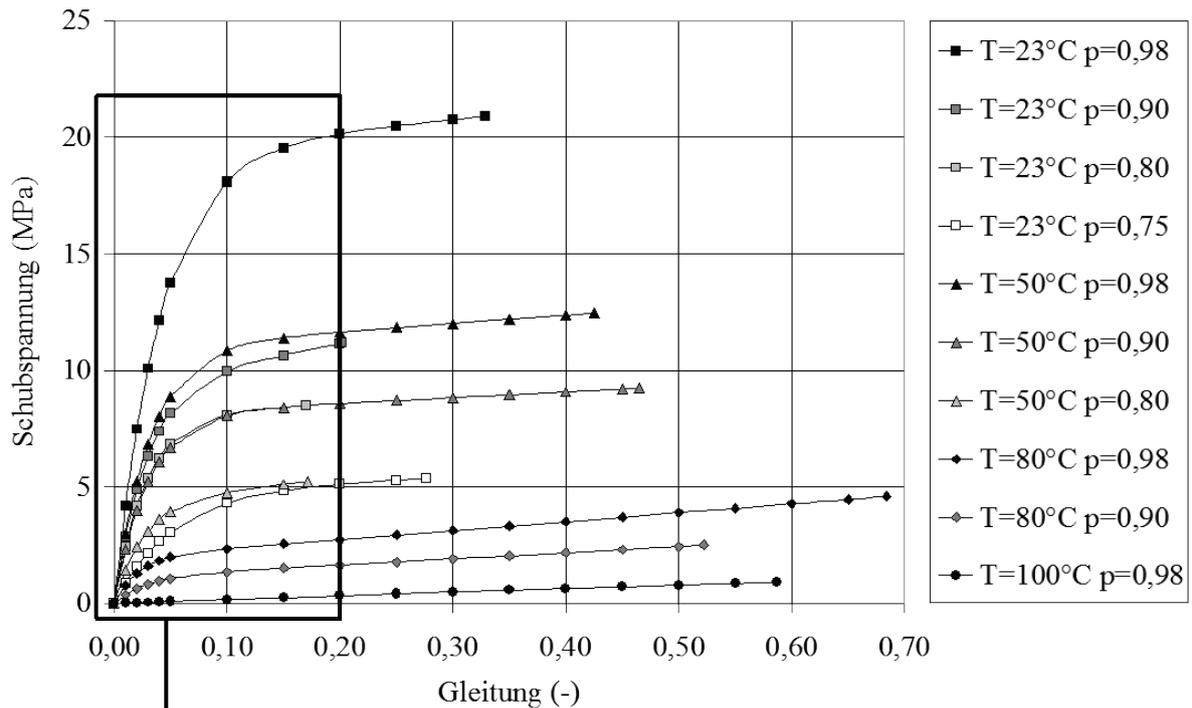
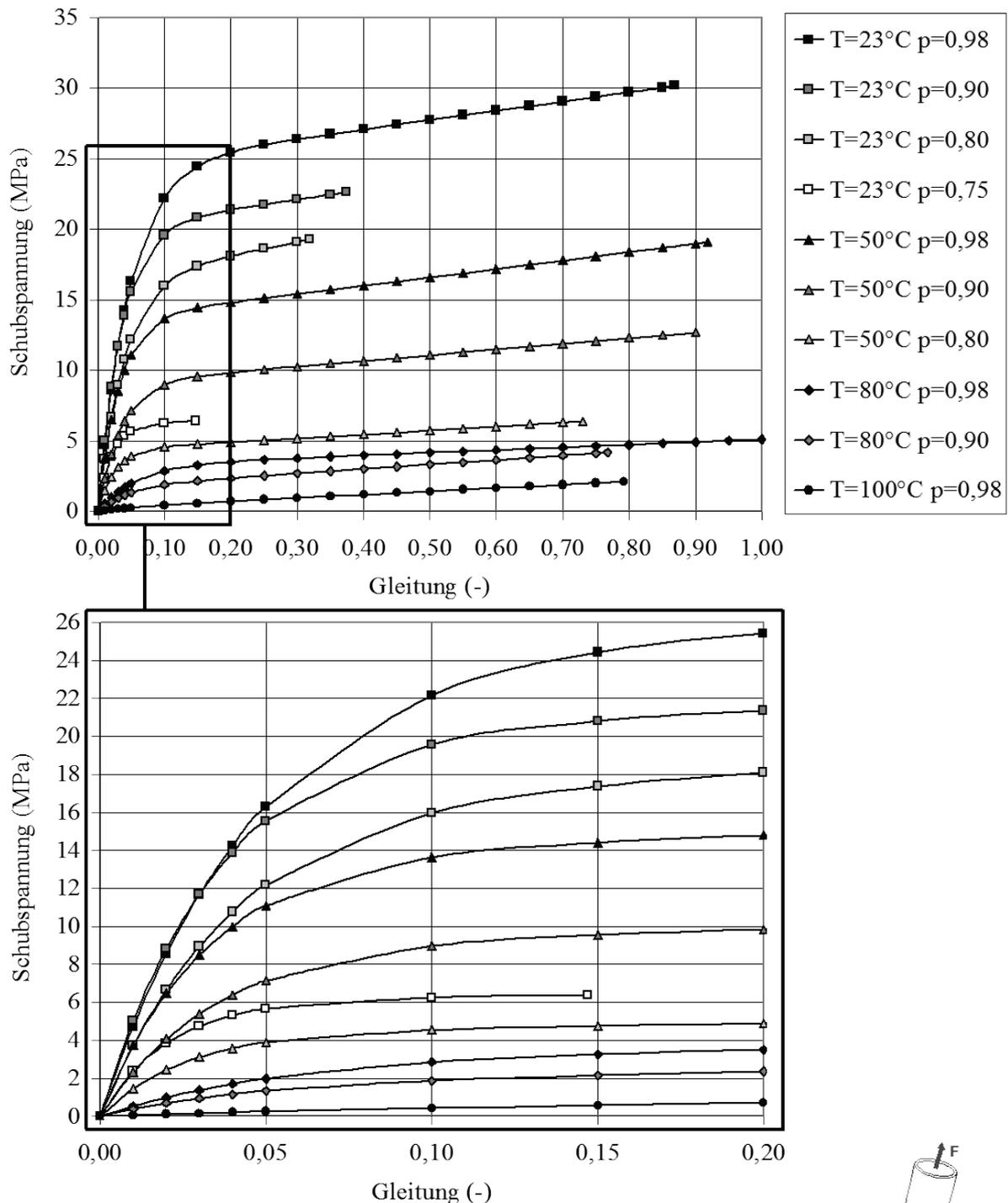


Abbildung 3-30: Spannungs-Verformungs-Verhalten stumpf geklebter Rohrproben unter kombinierter Zug-/Schubbeanspruchung (hier: Zuganteil)



Beanspruchung: Kombiniert Zug/Schub ($\xi = 2$)
 Diagramm: Schubanteil
 Prüftemperaturen: RT - 100 °C p: 0,75 - 0,98
 Klebstoff: Betamate 1496V d_K : 0,3 mm
 Probengeometrie: Rohrprobe Material: E235+N

Abbildung 3-31: Spannungs-Verformungs-Verhalten stumpf geklebter Rohrproben unter kombinierter Zug-/Schubbeanspruchung (hier: Schubanteil)



Beanspruchung:	Schub ($\xi = \infty$)	p:	0,75 - 0,98
Prüftemperaturen:	RT - 100 °C	d_K :	0,3 mm
Klebstoff:	Betamate 1496V	Material:	E235+N
Probengeometrie:	Rohrprobe		

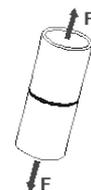


Abbildung 3-32: Spannungs-Verformungs-Verhalten stumpf geklebter Rohrproben unter reiner Schubbeanspruchung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Klebstofffestigkeiten erwartungsgemäß mit steigender Prüftemperatur und sinkendem Vernetzungsgrad abnehmen. Zudem weisen Proben

mit einem Vernetzungsgrad kleiner 75 % keine signifikanten Festigkeiten mehr auf, da die Glasübergangstemperaturen dann unterhalb der kleinsten Prüftemperatur liegen. Auch die Proben, deren Prüftemperatur (100 °C) über dem T_G liegen, weisen erwartungsgemäß keine signifikanten Festigkeiten mehr auf.

3.6.2 Bruchbilder

Die Bewertung der Bruchbilder nach DIN EN ISO 10365 [NN95] dient dem Verständnis der Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen. Dabei wird der Adhäsionsbruch (AF) als Bruch einer Klebung, bei der die Trennung an der Klebstoff-Fügeteil-Grenzfläche sichtbar ist, definiert. Der Kohäsionsbruch (CF) wird als Bruch einer Klebung definiert, bei der die Trennung im Klebstoff oder im Fügeteil sichtbar ist. Ein Sonderfall ist der substratnahe Kohäsionsbruch (SCF). Tritt im Bruchbild mehr als eine Versagensart auf, wird deren ungefährender prozentualer Anteil angegeben.

In Abbildung 3-33 werden Bruchbilder in Abhängigkeit der Prüftemperatur und des Vernetzungsgrades bei einer querkontraktionsbehinderten Zugbeanspruchung dargestellt. Die vollständig vernetzten Proben weisen bei Prüftemperaturen bis 50° C vorwiegend Kohäsionsbrüche auf, bei Temperaturen größer 50 °C überwiegen die Adhäsionsbruchanteile. Bei den teilvernetzten Proben dominieren bei einer Prüftemperatur von 23 °C die Kohäsionsbrüche. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in den unvollständig ausgebildeten Polymernetzwerken im Klebstoff, die dann versagensdominant sind (vgl. Kapitel 3.3).

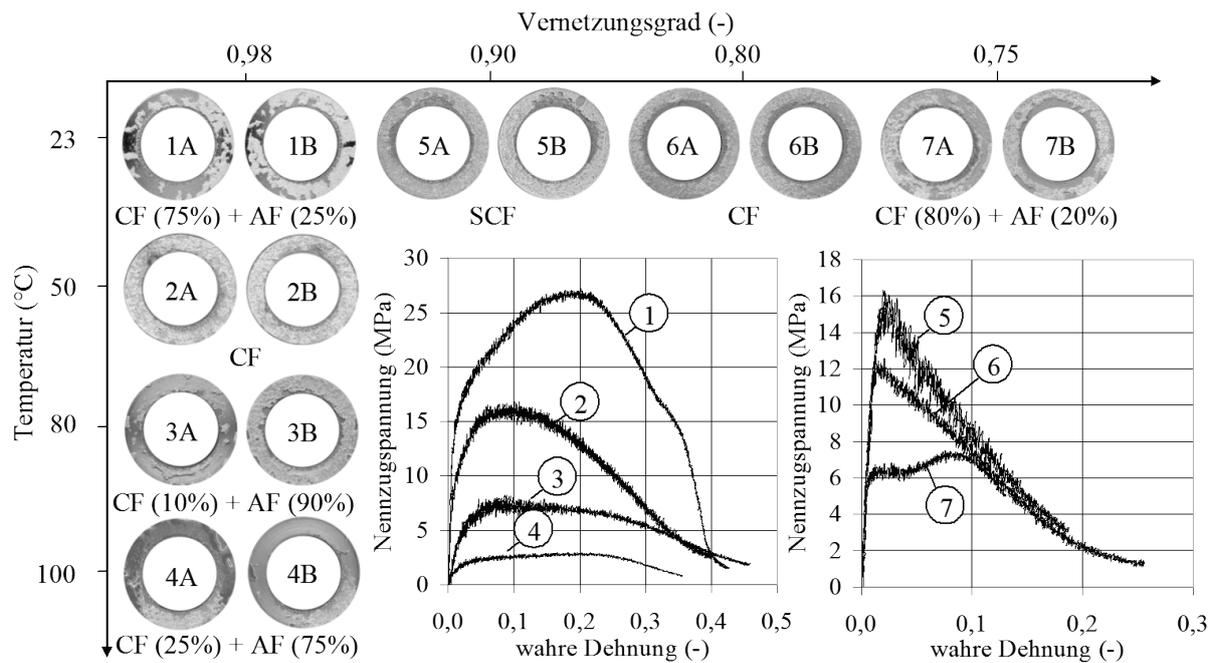


Abbildung 3-33: Bruchbilder der stumpf geklebten Rohrproben unter temperatur- und vernetzungsgradabhängiger querkontraktionsbehinderter Zugbeanspruchung

In Abbildung 3-34 werden Bruchbilder in Abhängigkeit der Prüftemperatur und des Vernetzungsgrades bei einer reinen Schubbeanspruchung dargestellt. Bei den vollständig vernetzten Proben dominieren bei allen Prüftemperaturen Adhäsionsbrüche. Die Ursache ist vermutlich auf die großen Gleitungen zurückzuführen. Auch bei Zugscherversuchen konnten hohe Adhäsionsbruchanteile festgestellt werden. Bei den teilvernetzten Proben treten nur Kohäsionsbrüche auf, das ebenfalls auf die unvollständige molekulare Netzwerkbildung im Klebstoff zurückzuführen ist.

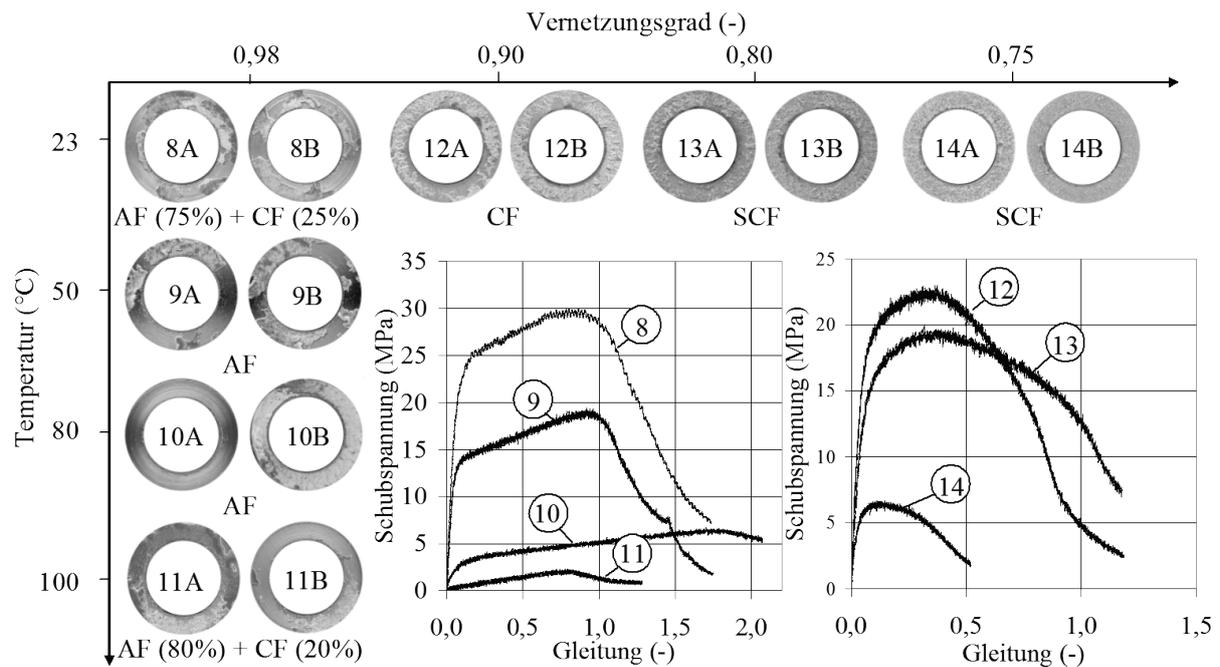


Abbildung 3-34: Bruchbilder der stumpf geklebten Rohrproben unter temperatur- und vernetzungsgradabhängiger Schubbeanspruchung

3.6.3 Fließbeginn und Spannungsmaximum

Aus den Spannungs-Verformungs-Kurven unterschiedlicher Beanspruchungskombinationen (vgl. Kapitel 3.6.1) werden in Abhängigkeit von der Temperatur und des Vernetzungsgrades der Fließbeginn und das Spannungsmaximum ermittelt. In Abbildung 3-35 und Abbildung 3-36 werden der Fließbeginn und das Spannungsmaximum als Schubspannung τ_{xy} über der Zugspannung σ_x dargestellt.

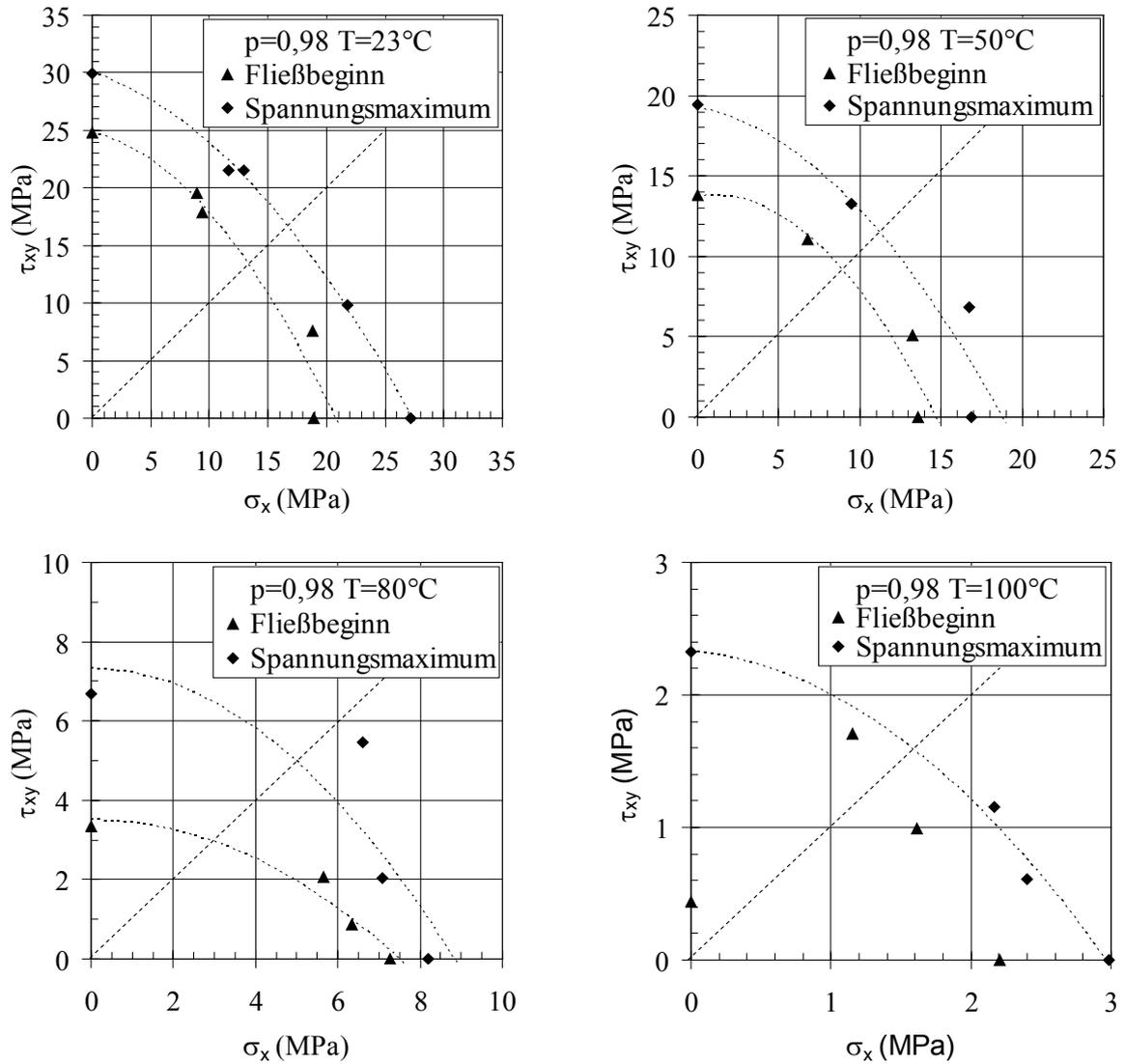


Abbildung 3-35: Temperaturabhängiger Fließbeginn und Spannungsmaxima des vollständig vernetzten Klebstoffs Betamate 1496V ($p = 0,98$)

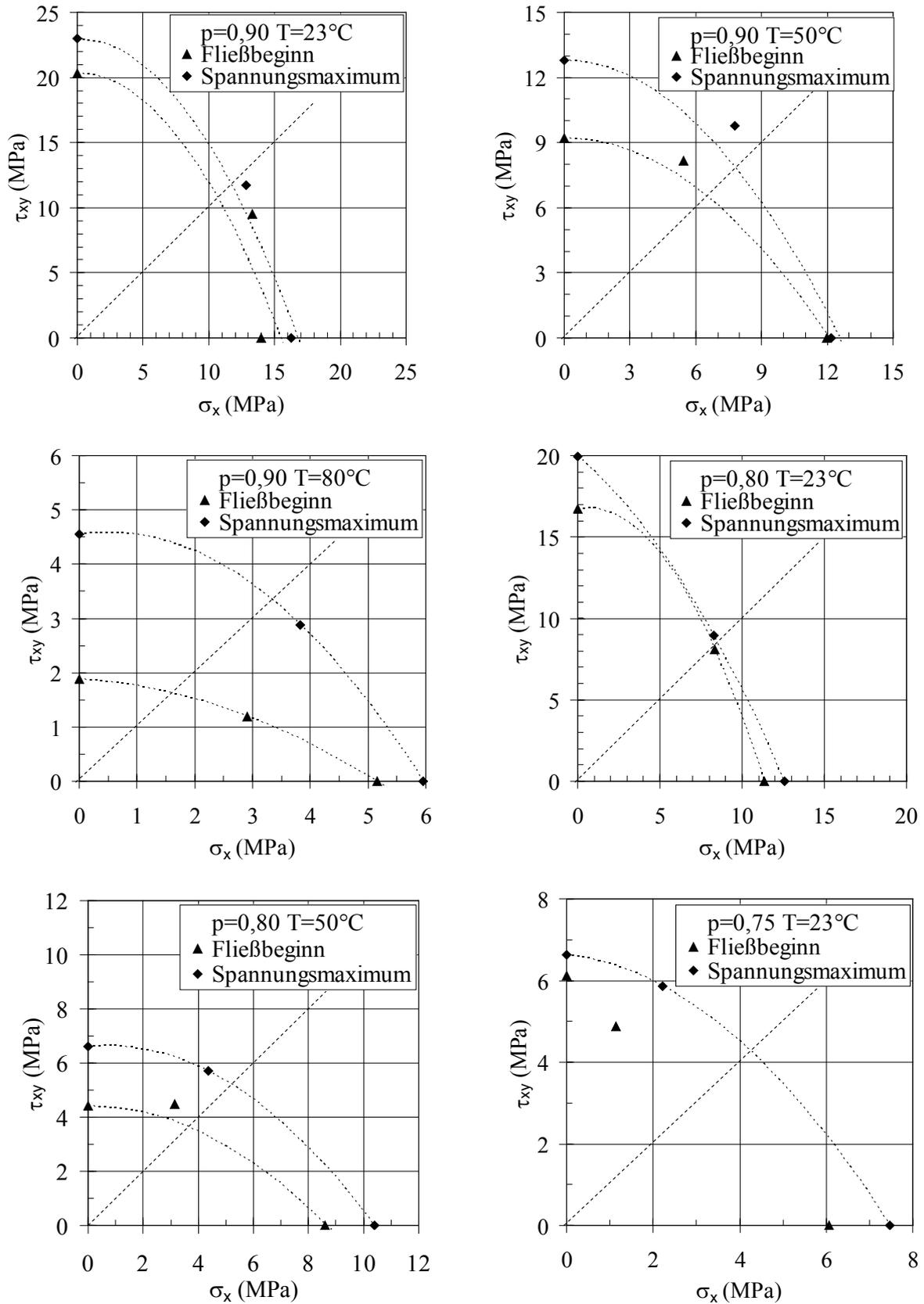


Abbildung 3-36: Temperaturabhängiger Fließbeginn und Spannungsmaxima des teilvernetzten Klebstoffs Betamate 1496V

Wie in Kapitel 3.5.6 beschrieben werden die Ansatzfreiwerte b_1 , b_2 sowie Y_0 der Fließbedingung nach Lambrecht entsprechend Formel 3.29 bestimmt. Zur statistischen Absicherung dienen jeweils drei Versuche je Beanspruchungskombination. Die Fließort- bzw. Spannungsmaximum-Kurve nach Lambrecht aus Abbildung 3-37 wird demnach über 15 Messpunkte (für fünf untersuchte Beanspruchungskombinationen) interpoliert. Da die Fließbedingung nach Lambrecht von den Spannungsinvarianten I_1 und J_2 abhängt, wird in Abbildung 3-37 die experimentell ermittelten Werte, der Fließbeginn und das Spannungsmaximum nach Lambrecht in der Invariantendarstellung gegenübergestellt. Diese erfolgt exemplarisch für eine Prüftemperatur bei vollständiger Vernetzung des Klebstoffs Betamate 1496V.

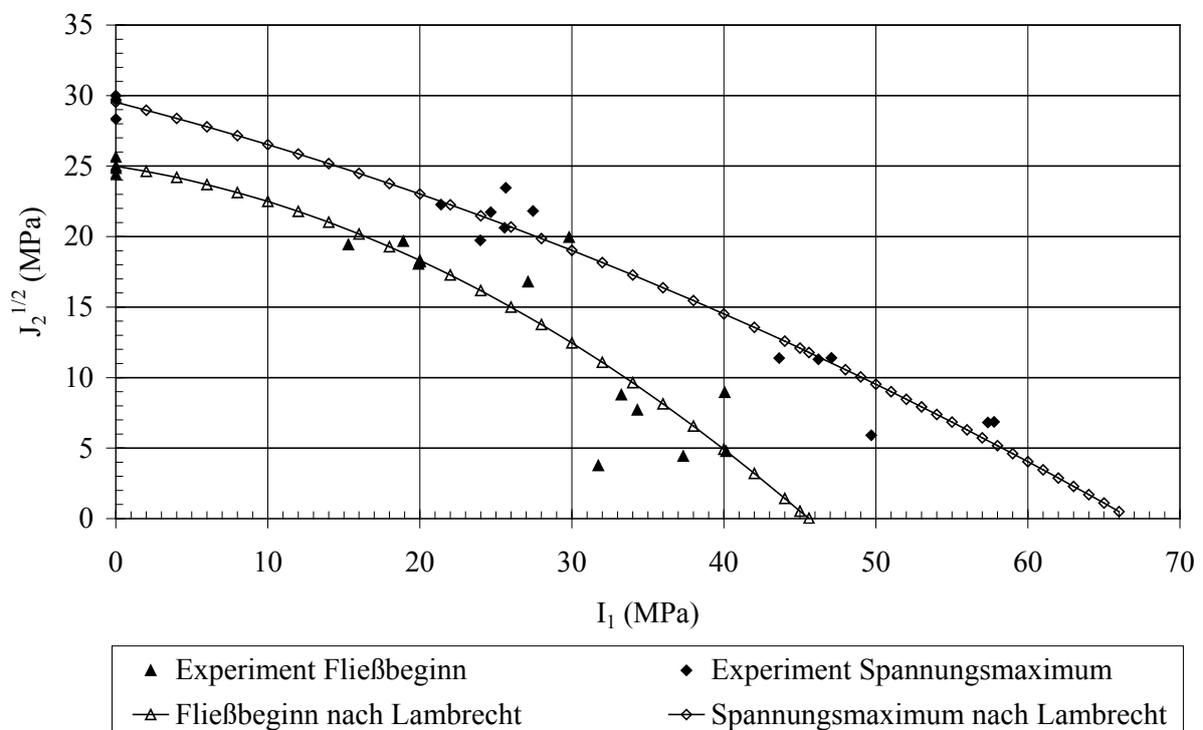


Abbildung 3-37: Gegenüberstellung des experimentell ermittelten Fließbeginns und Spannungsmaximums sowie der Fließbedingung nach Lambrecht in der Invariantendarstellung

Auf die Darstellung aller Diagramme wird an dieser Stelle verzichtet. Die über Formel 3.29 bestimmten Ansatzfreiwerte sind in Tabelle 3-10 zusammengefasst. Die Ansatzfreiwerte werden für die nachfolgenden numerischen Untersuchungen tabellarisch hinterlegt. Die jeweiligen Zwischenwerte werden über eine lineare Interpolation bestimmt. Für die Definition des Fließbeginns werden folgende Annahmen getroffen:

- Plastisches Fließen kann erst nach Überschreiten des Gelpunktes eintreten, da vorher keine Steifigkeit definiert ist und somit keine Spannungen existieren.

- Abweichend von der bisherigen Nomenklatur wird der vollständig vernetzte Klebstoff nicht mit $p = 0,98$ bezeichnet, sondern als $p = 1$ definiert.
- Der Startwert für die Fließspannung Y_0 am Gelpunkt wird mit 0,1 MPa definiert.
- Die Werte zwischen dem Startwert und dem ersten gemessenen Festigkeitswert sowie zwischen den Werten im Allgemeinen werden linear interpoliert.
- Die Ansatzfreiwerte b_2 (beschreiben die Öffnung der parabolischen Fließkurve) für die Zwischenwerte werden über eine Verschiebung der Fließkurve des vollständig vernetzten Klebstoffs bei der entsprechenden Temperatur ermittelt.
- Die Ansatzfreiwerte b_1 (beschreiben die Lage des Scheitelpunktes der parabolischen Fließkurve) werden als null definiert, da die maximale Fließspannung Y_0 unabhängig von der ersten Spannungsinvariante ist.

Tabelle 3-10: Ansatzfreiwerte der Fließbedingung nach Lambrecht für den Klebstoff Betamate 1496V

Ansatzfreiwerte der Fließbedingung nach Lambrecht		Y_0	b_1	b_2	
Prüftemperatur	T	23°C			
Vernetzungsgrad	p	1,00	41,23	0	7,60E-01
		0,90	35,69	0	1,01E+00
		0,80	28,83	0	1,20E+00
		0,75	10,59	0	5,40E-01
		0,45	<i>0,10</i>	0	1,84E-03
Prüftemperatur	T	50°C			
Vernetzungsgrad	p	1,00	24,00	0	4,80E-01
		0,90	16,42	0	3,10E-01
		0,80	8,09	0	1,30E-01
		0,75	<i>7,07</i>	0	1,41E-01
		0,45	<i>0,10</i>	0	2,00E-03
Prüftemperatur	T	80°C			
Vernetzungsgrad	p	1,00	5,86	0	1,00E-01
		0,90	3,09	0	5,00E-02
		0,80	<i>2,46</i>	0	4,20E-02
		0,75	<i>2,15</i>	0	3,67E-02
		0,45	<i>0,10</i>	0	1,71E-03
Prüftemperatur	T	100°C			
Vernetzungsgrad	p	1,00	1,88	0	7,00E-02
		0,90	<i>1,56</i>	0	5,81E-02
		0,80	<i>1,25</i>	0	4,65E-02
		0,75	<i>1,09</i>	0	4,06E-02
		0,45	<i>0,10</i>	0	3,72E-03
Fett: experimentell ermittelte Messwerte					
<i>Kursiv:</i> linear interpolierte Werte (zwischen Startwert von 0,1 MPa und erstem Messwert)					

Für ein besseres Verständnis wird die Temperatur- und Vernetzungsgradabhängigkeit der Fließspannung Y_0 in Abbildung 3-38 dargestellt.

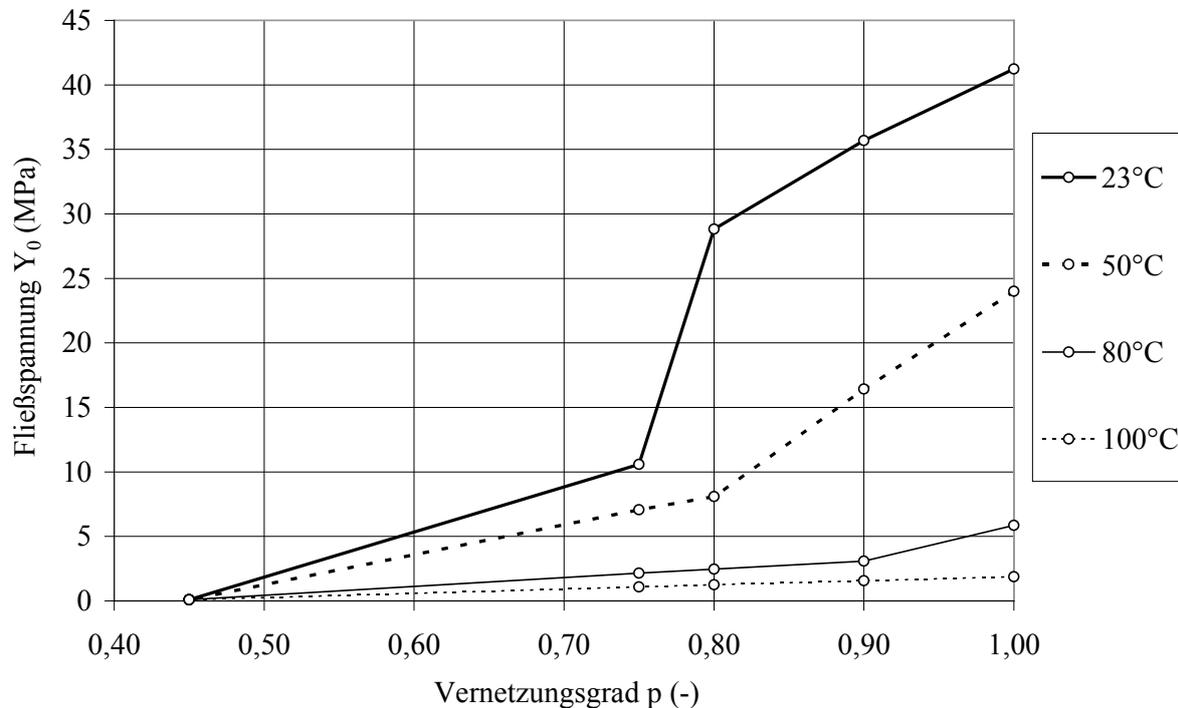


Abbildung 3-38: Temperatur- und vernetzungsgradabhängige Fließspannung Y_0

3.6.4 Ansatz zur Vernetzungsgradabhängigkeit der Fließspannung

Die Fließspannung Y_0 und somit auch die Fließfunktion nach Lambrecht $F_{\text{Lambrecht}}$ wird am Gelpunkt p_{Gel} ungleich null und steigt mit fortlaufender Vernetzung an. Ein Ansatz zur Darstellung der Vernetzungsgradabhängigkeit der Fließspannung Y_0 kann analog der Abhängigkeit des Gleichgewichtsmoduls E_∞ vom Vernetzungsgrad p basierend auf Arbeiten von [Ado97, Mar96, Mar90] für $p > p_{\text{Gel}}$ über folgende Beziehung beschrieben werden:

$$Y_0(p) = Y_{0(p=1)} \cdot \left(\frac{p^2 - p_{\text{Gel}}^2}{1 - p_{\text{Gel}}^2} \right)^n \quad \text{Formel 3.30}$$

In Abbildung 3-39 ist die Vernetzungsgradabhängigkeit der Fließspannung Y_0 für vier Temperaturen mit einem Wert für den Exponenten $n = 1,12$ dargestellt.

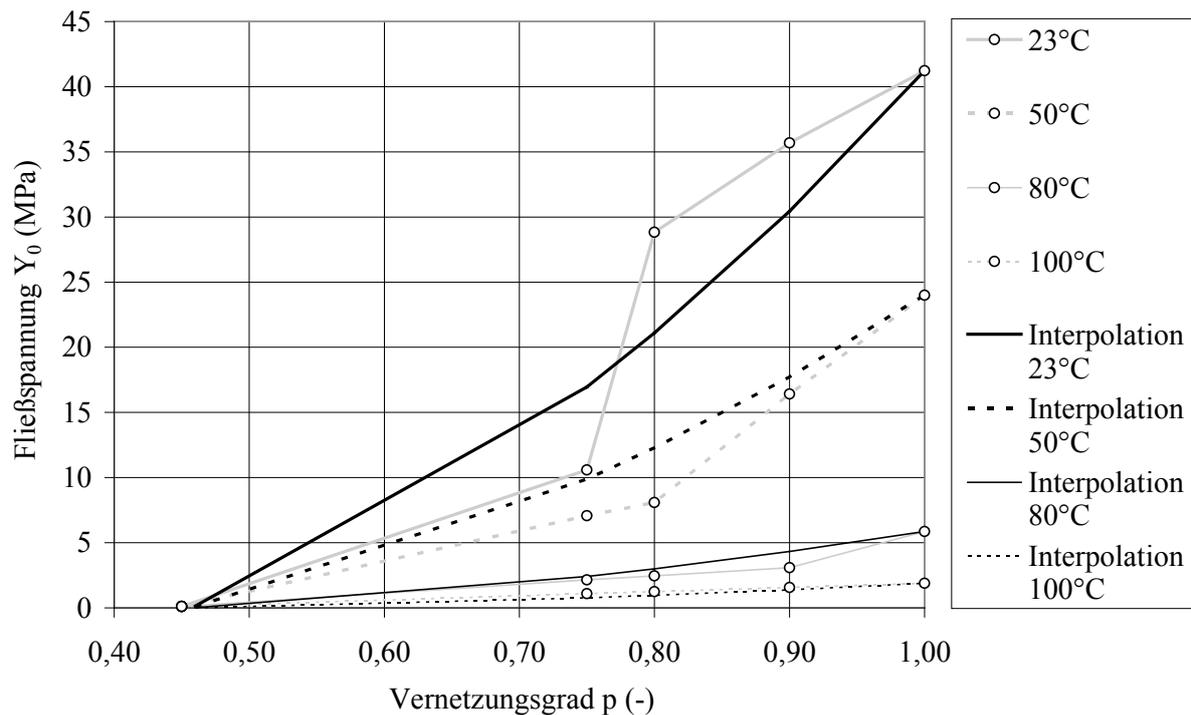


Abbildung 3-39: Vernetzungsgradabhängige Fließspannung Y_0 für $n = 1,12$

Es wird deutlich, dass die Vernetzungsgradabhängigkeit der Fließspannung Y_0 , z. B. bei einer Prüftemperatur von 50 °C, für diesen Klebstoff nicht hinreichend genau mit einem Exponenten n beschrieben werden kann. Wird für den Exponenten n eine Temperaturabhängigkeit eingeführt, ergibt sich folgendes Bild (vgl. Abbildung 3-40):

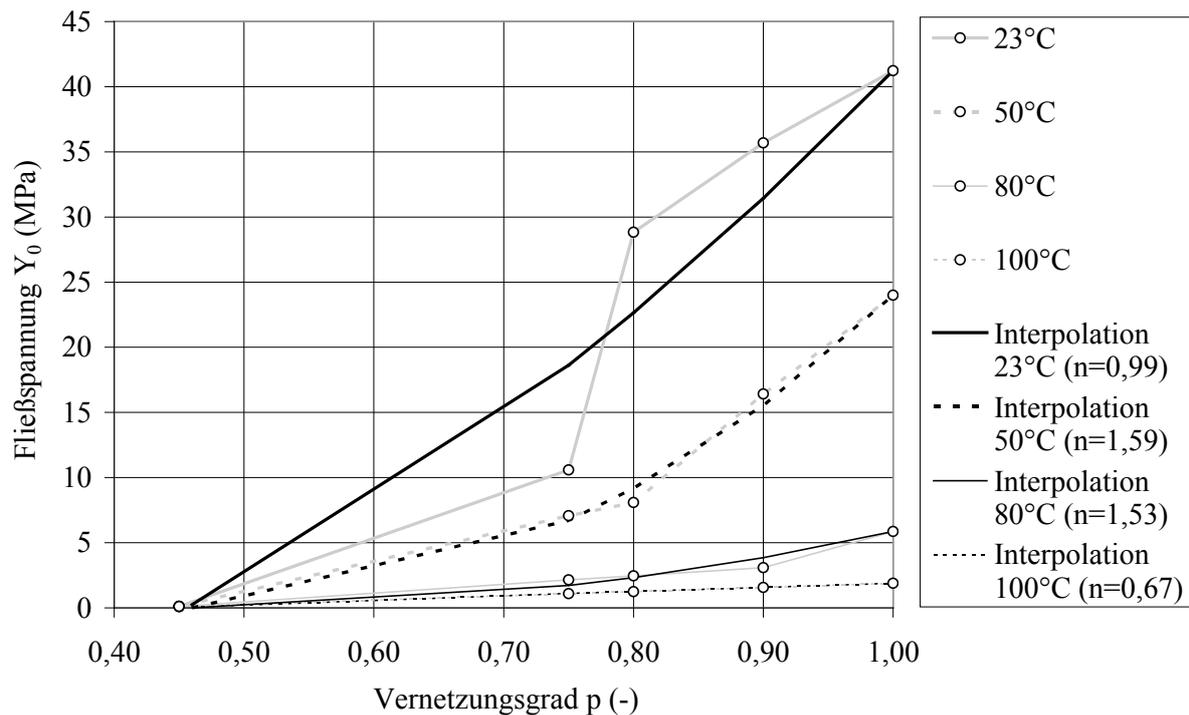


Abbildung 3-40: Vernetzungsgradabhängige Fließspannung Y_0 mit temperaturabhängigem Exponent n

Die vernetzungsgradabhängige Fließspannung Y_0 kann mit einem temperaturabhängigen variablen Exponenten n deutlich besser interpoliert werden. Die Allgemeingültigkeit dieses Ansatzes, über diesen hier untersuchten Klebstoff Betamate 1496V hinaus, sollte jedoch in weiterführenden Untersuchungen an anderen Klebstoffsystemen validiert werden.

4 Validierung des Materialmodells

Die Validierung des Materialmodells bzw. des -verhaltens des Strukturklebstoffs Betamate 1496V erfolgt unter Zuhilfenahme der Methode der Finiten Elemente. Die numerischen Berechnungen erfolgen zum einen an geometrisch einfachen Strukturen, wie stumpf geklebten Rohrproben und einfach überlappten Zugscherproben, auch in Mischverbindungen (Stahl-Aluminium), zum anderen wird die Methodik aber auch auf eine geklebte Mischbaustruktur in einem Gesamtfahrzeug übertragen. Die einfach überlappte artfremde Zugscherprobe wird hierfür als vereinfachte Ersatzgeometrie zur Klebstoffcharakterisierung angenommen. Das Aufbringen einer Gleitung während der Vernetzung ist aus der thermisch bedingten Gleitung einer Mischbaustruktur (z.B. eines Aluminiumdaches in einem Stahldachflansch, vgl. Kapitel 5) während des KTL-Lacktrocknungsprozesses abgeleitet.

Für alle numerischen Berechnungen wird der kommerzielle Solver Abaqus in der Version 6.8-EF1 verwendet. Für die FE-Berechnungsmodelle werden folgende Abaqus Elementtypen verwendet:

Tabelle 4-1: verwendete Abaqus-Elementtypen [Das09]

Element-Bezeichnung	Element-Typ	Beschreibung
S3R	Dünnes Schalenelement	3-Knotenelement, reduziert integriert, endliche Membrandehnung
S4R	Dünnes Schalenelement	4-Knotenelement, reduziert integriert, endliche Membrandehnung
C3D8	3D-Kontinuumselemente	lineares 8-Knotenelement (Quader)
CONN3D2	Verbindungselement	Verbindung von 2 Knoten mit mechanischen und kinematischen Eigenschaften
TIE	Randbedingung	Verbindung einer Master- und einer Slave-Oberfläche, Freiheitsgrade der Master-Oberfläche wird auf die Slave-Oberfläche übertragen

4.1 Grundlegende Beschreibung des Materialmodells

Das Materialmodell basiert grundlegend auf Arbeiten von [Meu01, Mah05, Mie01, Pap01]. Im Folgenden werden die Möglichkeiten und Grenzen des Materialmodells nach Lambrecht vorgestellt.

Das Modell beschreibt sowohl das elastische, viskoelastische und ideal-plastische Materialverhalten, berücksichtigt aber auch thermisch- und schwindungsinduzierte Volumenänderungen. Der Beschreibung der viskoelastischen Eigenschaften liegt als rheologisches Modell ein

verallgemeinerter Maxwell-Körper zugrunde. Durch Erweiterung um ein Reibelement wird die Beschreibung ideal-plastischen Materialverhaltens ermöglicht. Die Parameter zur Beschreibung des temperatur- und vernetzungsgradabhängigen Fließbeginns werden in Tabelle 3-10 angegeben. Das Modell berücksichtigt keine plastische Verfestigung. In Abbildung 4-1 wird ein solches Modell mit exemplarischen Materialparametern dargestellt.

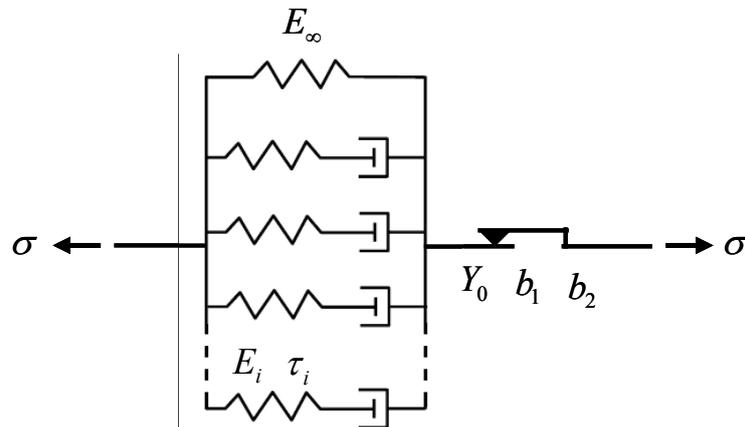


Abbildung 4-1: Erweiterter Maxwell-Körper mit Reibelement

Die Spannungen bzw. die Reaktionskräfte treten im un- bzw. teilvernetzten Klebstoff erst nach Erreichen des Gelpunkts (vgl. Kapitel 3.3) auf. Die Berechnung des Vernetzungsgrades in Abhängigkeit der Temperatur und der Zeit erfolgt über die in Kapitel 3.1.1 beschriebene Gleichung und den dort beschriebenen Parametern.

Auf die Beschreibung aller Ein- und Ausgangsgrößen des Materialmodells wird an dieser Stelle verzichtet.

4.1.1 Spannungsrelaxation

Durch Einführung der Schiftfunktion a_T (vgl. Kapitel 3.2.2) wird die Berechnung der Spannungsrelaxation bei beliebigen Temperaturen und Vernetzungsgraden möglich. Für den zeitabhängigen E-Modul bzw. die Relaxationsfunktion $E(t)$ gilt die in Kapitel 2.2 beschriebene Formel 2.9. Für den vollständig vernetzten Klebstoff bedeutet das, dass bei Temperaturen $T < T_G$ die Masterkurve nach rechts geschiftet, bei hohen Temperaturen $T > T_G$ nach links geschiftet, wird. Der Zusammenhang der Schiftfunktion zum Vernetzungsgrad wird über dessen Abhängigkeit zur Glasübergangstemperatur und zum Gleichgewichtsmodul hergestellt. So wird die Relaxationsfunktion $E(t)$ bei unvollständiger Vernetzung nicht nur temperaturbezogen horizontal, sondern auch vernetzungsgradbezogen vertikal geschiftet. Abbildung 4-2 zeigt die Abhängigkeit der Relaxationsfunktion von der Temperatur und dem Vernetzungs-

grad. Es wird weiterhin gezeigt, dass die analytische Beschreibung der Relaxationsfunktion durch die FE-Simulation eines 1-Volumenelement Würfels sehr gut abgebildet werden kann.

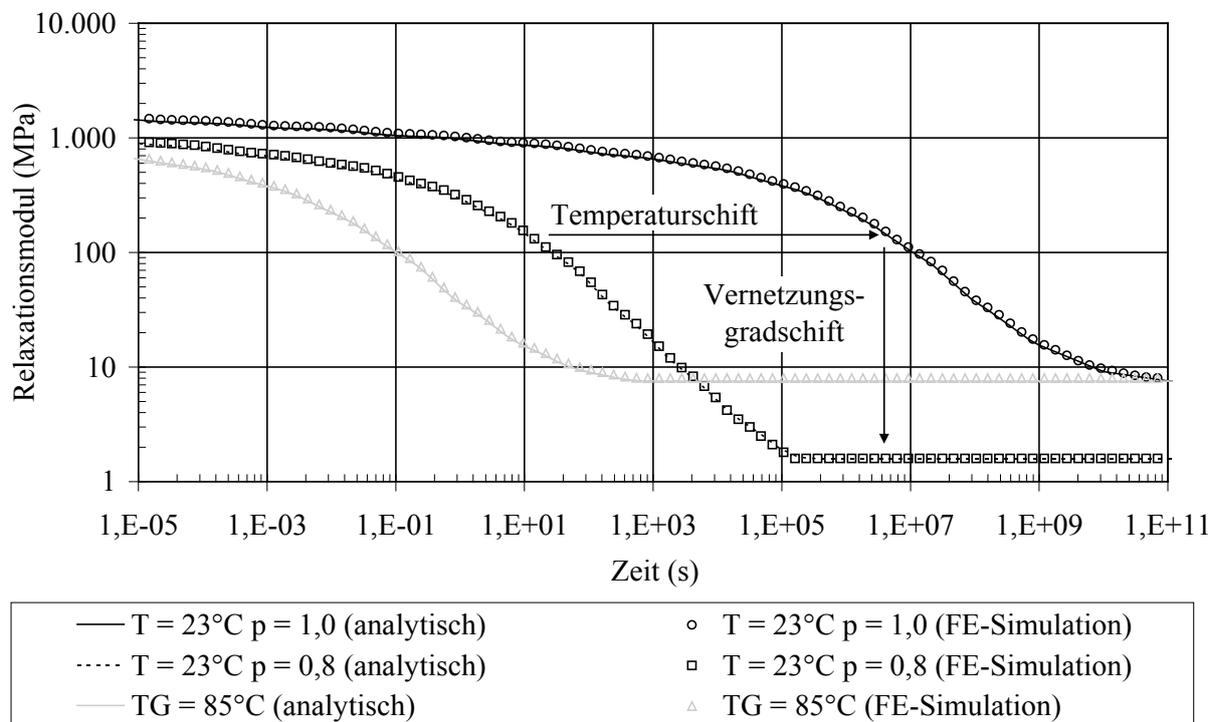


Abbildung 4-2: Relaxationsfunktion in Abhängigkeit von Temperatur und Vernetzungsgrad

4.1.2 Berücksichtigung von Einschnüreffekten

Klebung finden im Karosseriebau häufig bei der Verbindung von Flanschen Anwendung. Diese werden häufig aufgrund einer beschränkten Elementdiskretisierung nur mit einer Elementreihe über die Klebschichtdicke modelliert. Aufgrund dessen ergeben sich für den unvernetzten Klebstoff Einschnüreffekte, die in der FE-Simulation berücksichtigt werden müssen. Das Materialmodell bietet hier die Möglichkeit des Standardansatzes für Kompression und den Ansatz der Kopplung des Kompressions- an den E-Modul.

Der Standardansatz für Kompression erzeugt beim Auseinandergehen (Separation) der Flansche in der 1-FE-Modellierung im unvernetzten Klebstoff Spannungen, die aber nicht der Realität entsprechen. In der Praxis schnürt der Klebstoff bei Separation ein, dass durch eine 2-FE-Modellierung deutlich wird. Abbildung 4-3 veranschaulicht den Zusammenhang:

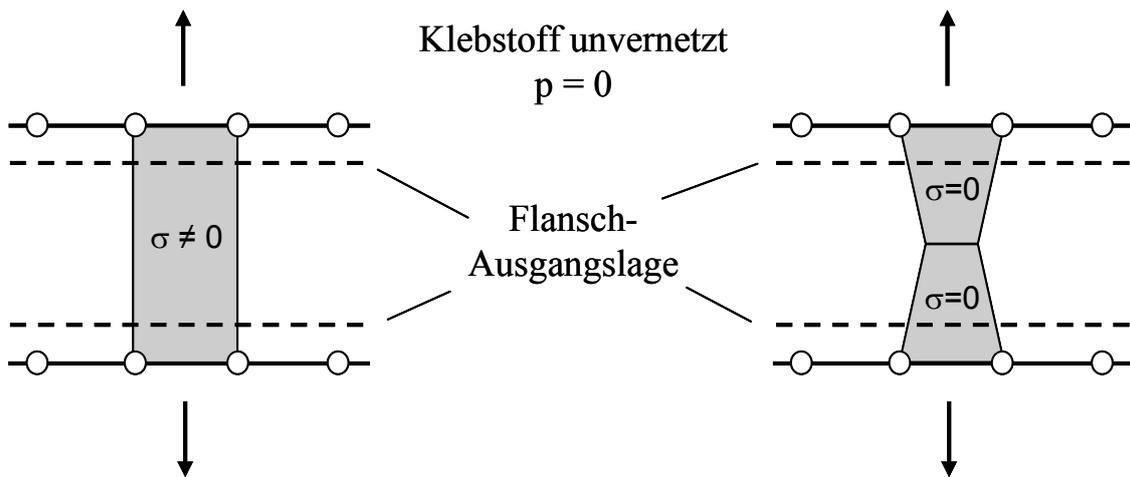


Abbildung 4-3: Standardansatz – unrealistische Spannungen bei einer 1-FE-Modellierung der Klebschicht

Im Gesamtfahrzeugmodell kann zurzeit im Bereich der Klebstoffvernetzung auf die 1-FE-Modellierungstechnik nicht verzichtet werden. Um das Auftreten unrealistischer Spannungen ($\sigma \neq 0$) bzw. Gegenkräfte zu vermeiden, bietet das Materialmodell die Option den Kompressionsmodul an den E-Modul zu koppeln. Demnach wird der Kompressionsmodul analog dem Gleichgewichtsmodul nach Formel 3.9 berechnet. Damit wird der Kompressionsmodul beim unvernetzten Klebstoff gleich null. Eine wirklichkeitsnahe Abbildung der Einschnüreffekte ist so aber nicht möglich, wie in Abbildung 4-4 schematisch dargestellt wird:

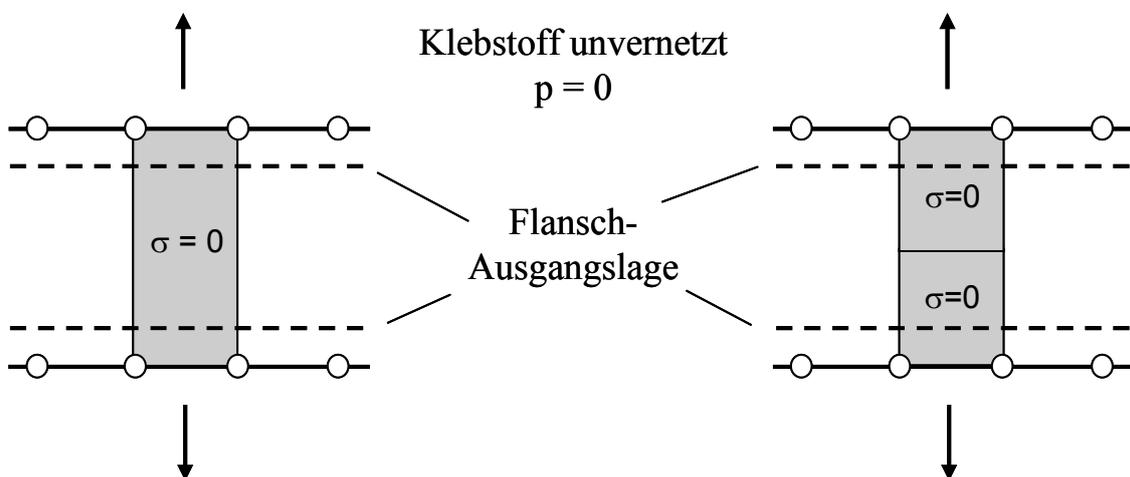


Abbildung 4-4: Kopplung des Kompressions- an den E-Modul – keine unrealistischen Spannungen bei der 1-FE-Modellierung der Klebschicht

4.1.3 Ausgabevariablen des Materialmodells

Die Ausgabe von Elementgrößen des Materialmodells für die Auswertung der FE-Simulationsergebnisse erfolgt über Solution-Dependent-State-Variables (SDV). Darüber werden der Vernetzungsgrad p sowie die in Formel 2.7 beschriebenen Dehnungsanteile ausgegeben. Die

Dehnungsanteile sind als skalare und einheitenlose Größen zu verstehen. Die isochoren Dehnungsanteile können über den Faktor Wurzel aus drei durch zwei in eine Vergleichsdehnung, wie sie aus der Metallplastizität bekannt ist, überführt werden. Die Vergleichsdehnung ist dann analog der Vergleichsspannung eine fiktive einachsige Größe, die dieselbe Beanspruchung darstellt wie der reale, mehrachsige Deformationszustand. Die Vergleichsdehnung kann so direkt mit Kennwerten aus einem einachsigen Zugversuch verglichen werden und z. B. für ein Versagenskriterium herangezogen werden.

4.2 Numerische Untersuchungen an geklebten Rohrproben

Für die numerische Überprüfung des Materialmodells nach Lambrecht werden die in Kapitel 3.6 beschriebenen experimentell ermittelten Ergebnisse an stumpf geklebten Rohrproben mit vollständig- und teilvernetzter Klebschicht herangezogen. Weiterhin wird der Einfluss der Klebschichtdiskretisierung auf die Berechnungsergebnisse untersucht.

4.2.1 Modellbeschreibung

Abbildung 4-5 zeigt den Schnitt durch das FE-Modell der stumpf geklebten Rohrprobe, das mit dem kommerziell verfügbaren Preprozessor HyperMesh (Version: 9.0b122) erstellt wird. Als axiale Abmessung wird die Messlänge des Biaxial-Extensometers gewählt (25 mm). Wie auch der reale Prüfkörper besteht das FE-Modell aus drei Komponenten. Den beiden Rohrhälften ($D = 30$ mm, $d = 20$ mm) wird die linear-elastische Materialdefinition von Stahl zu Grunde gelegt ($E = 210$ GPa, $\nu = 0,3$). Das mechanische Verhalten des Klebstoffes wird durch das Materialmodell nach Lambrecht definiert. Das Modell besteht aus Volumenelementen des Typs C3D8 (vgl. Tabelle 4-1). Bei diesem Elementtyp wird zwischen den Verschiebungen der Knoten linear interpoliert. Daraus ergeben sich ebenfalls lineare Interpolationen der Dehnungen und Spannungen zwischen den Knoten. An einer Stirnfläche werden von allen Knoten die translatorischen Freiheitsgrade (x , y , z) gesperrt. Um eine gleichmäßige Lasteinleitung auf der anderen, nicht gelagerten, Stirnseite zu gewährleisten, wird diese mit einem Kinetic Coupling versehen. Das Kinetic Coupling bietet den Vorteil, dass zum einen die Lasten über den Referenzknoten aufgebracht, und zum anderen die Reaktionskräfte am Referenzknoten ausgewertet werden können. Die Lasten werden jeweils über eine Verschiebung/Verdrehung des Referenzknotens des Kinetic Coupling zeitgesteuert aufgebracht. Diese betragen beim Lastfall Zug $3,33E-04$ mm/s, bei Torsion $3,997E-05$ rad/s sowie bei kombinierter schubdominierter Belastung $1,17E-04$ mm/s und $3,106E-05$ rad/s. Aufgrund des geometrischen Einflusses ergibt

sich bei Torsionsbelastung am Außenrand der Klebschicht eine 30 % höhere Schubgleitung als am Innenrand. Beim Lastfall Zug werden, bis auf Translation in z-Richtung, alle weiteren Freiheitsgrade gesperrt. Während des Lastfalls Torsion wird die Last durch Drehung des Referenzknotens um die z-Achse aufgebracht. Durch eine freie Bewegung in z-Richtung wird gewährleistet, dass keine zusätzlichen Zugkräfte auftreten.

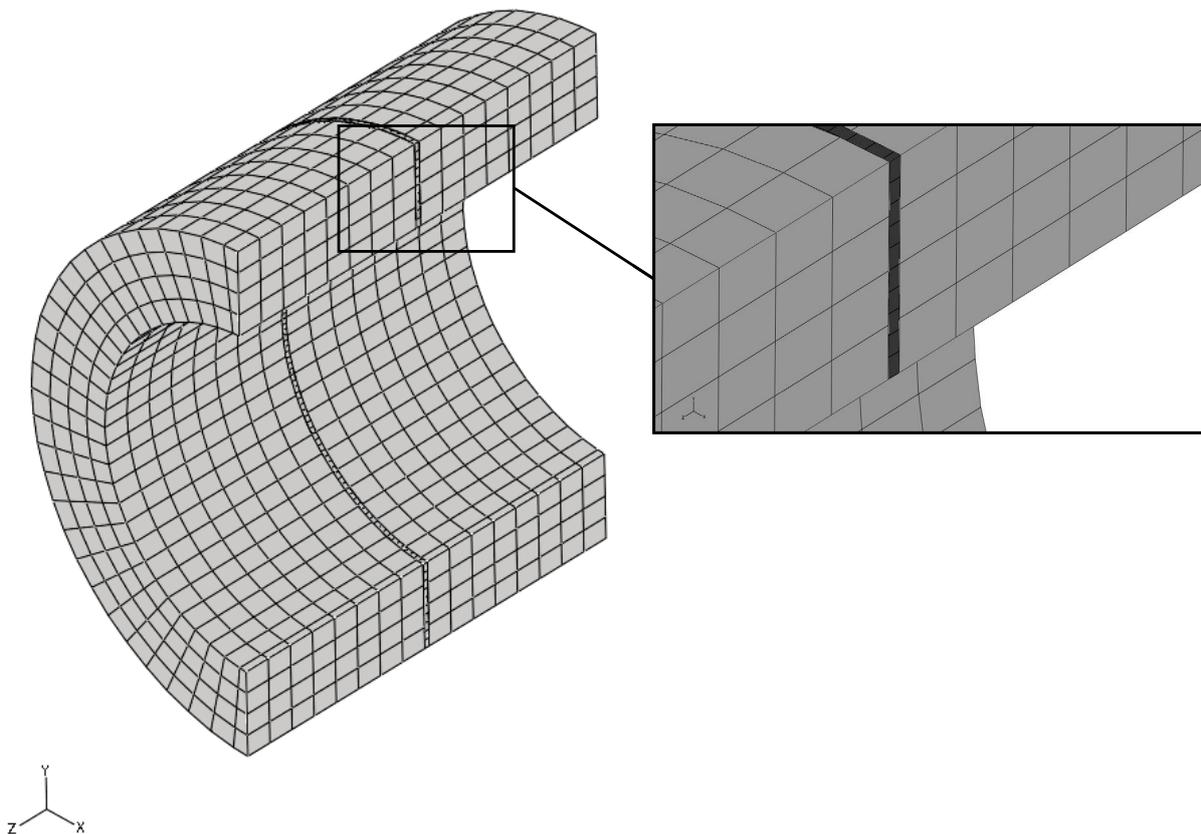


Abbildung 4-5: Schnitt durch das FE-Vollmodell der stumpf geklebten Rohrprobe

Um ein gefordertes Elementkantenverhältnis von drei zu gewährleisten, wird die 0,3 mm dicke Klebschicht durch ein Volumenelement über die Klebschichtdicke vernetzt. Aufgrund der feinen Diskretisierung der Klebschicht wird auf kongruente Netze verzichtet. Die gemeinsame Oberfläche der Rohrprobenhälften- und der Klebschicht werden daher über TIE-Constraints (vgl. Tabelle 4-1) miteinander verbunden. Da die Auswertung des Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Klebschicht mittels der Reaktionsgrößen des Referenzknotens erfolgt, kann der Steifigkeitseinfluss der TIE-Constraints vernachlässigt werden.

Der Einfluss der Klebschichtdiskretisierung wird in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Auf die Auswertung der Reaktionskräfte und -momente am Referenzknoten hat die Klebschichtdiskretisierung über die Dicke keinen signifikanten Einfluss.

Die Berechnung der Nennzugspannung bzw. -Schubspannung erfolgt aus den auftretenden Reaktionskräften bzw. -momenten am Referenzknoten des Kinetic Couplings bezogen auf die unverformte Querschnittsfläche der Klebschicht. Wie auch bei den experimentellen Untersuchungen wird die Fügeteilverformung abgezogen. Aufgrund numerischer Instabilitäten bei FE-Berechnungen mit geometrischer Nichtlinearität und großen Dehnungen wird auf die Berechnung der wahren Dehnung verzichtet. Die FE-Berechnungen erfolgen demnach geometrisch linear. Die Ergebnisse aus den Experimenten werden bis zum Spannungsmaximum, die der FE-Simulation bis zum Fließbeginn dargestellt.

4.2.2 Einfluss der Klebschichtdiskretisierung

Für die Bewertung des Einflusses der Klebschichtdiskretisierung werden, wie in Tabelle 4-2 dargestellt, exemplarisch vier Varianten an einer Rohrprobe mit vollständig vernetztem Klebstoff unter Zugbelastung bei 23 °C untersucht. Um ein maximales Elementkantenverhältnis von drei nicht zu überschreiten wird mit zunehmender Netzverfeinerung über die Klebschichtdicke, auch die Elementkantenlänge in Rohrprobenumfang und -wandstärke reduziert. Die Anzahl der Volumenelemente steigt um Faktor 64 vom grob zum fein diskretisierten Modell. Damit ist auch eine 64-fache Rechenzeit verbunden.

Tabelle 4-2: Elementkantenlänge und Anzahl der Volumenelemente für Varianten der Diskretisierung

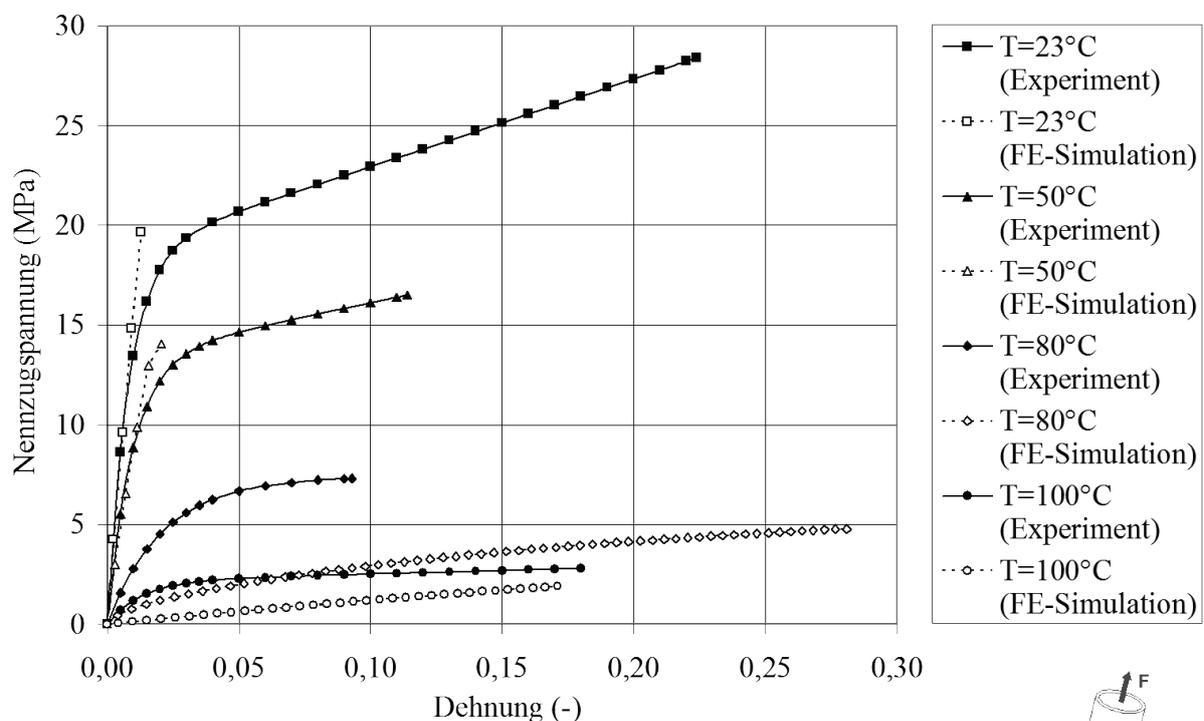
Var.	Volumenelemente			Klebschichtdicke	RP-Wandstärke	RP-Umfang	Anzahl Gesamt
	Dimension		mm	0,3	5	63-94	
01	Anzahl			1	16	125	2.000
	Länge	mm	min.	0,300	0,313	0,504	
			max.			0,752	
02	Anzahl			2	32	250	16.000
	Länge	mm	min.	0,150	0,156	0,252	
			max.			0,376	
03	Anzahl			3	50	360	54.000
	Länge	mm	min.	0,100	0,100	0,175	
			max.			0,261	
04	Anzahl			4	64	500	128.000
	Länge	mm	min.	0,075	0,078	0,126	
			max.			0,188	

Die gemittelte maximale Element-Vergleichsspannung nach von Mises (centroidal) nimmt vom grob diskretisierten Modell (Var. 01) zum fein diskretisierten Modell (Var. 04) um ca. 5 % ab. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass mit zunehmend feiner Diskretisierung die vo-

lometrischen Dehnungsanteile zu- und die isochoren Dehnungsanteile abnehmen. Auf die Spannungsberechnung basierend auf den Reaktionskräften/-momenten sowie auf die Dehnungs-/Gleitungsrechnung basierend auf den Verschiebungen am Lastangriffspunkt hat die Klebschichtdiskretisierung keinen relevanten Einfluss. Für das FE-Modell der Rohrprobe wird daher 1 Element über die Klebschichtdicke als hinreichend genau definiert.

4.2.3 Experimentelle und numerische Ergebnisse für den vollständig vernetzten Klebstoff

Der folgende Abschnitt diskutiert die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen dehnungsgeregelter Versuche bei konstanten Temperaturen und vollständig vernetztem Klebstoff.



Beanspruchung:	Zug ($\xi = 0$)	p:	0,98
Prüftemperaturen:	23°C - 100 °C	d_K :	0,3 mm
Klebstoff:	Betamate 1496V	Material:	E235+N
Probengeometrie:	Rohrprobe		

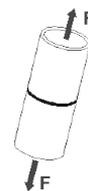
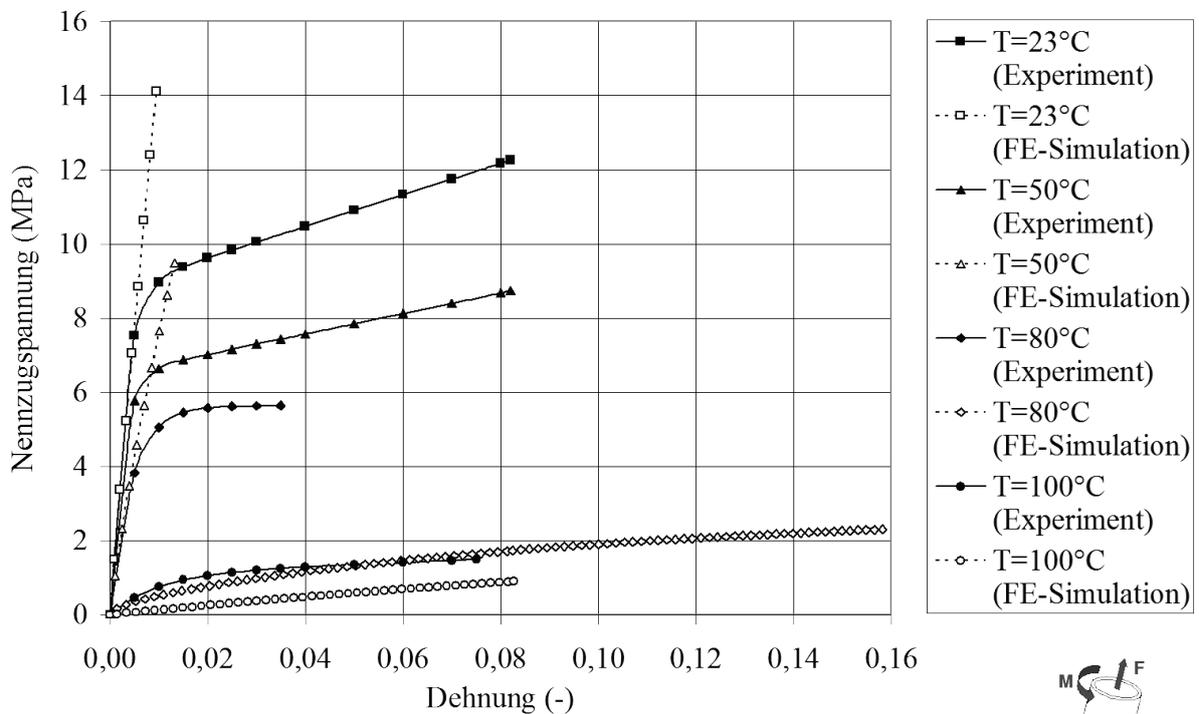


Abbildung 4-6: Experiment und FE-Simulation des querkontraktionsbehinderten Zugversuchs

Abbildung 4-6 zeigt den experimentell und numerisch ermittelten Nennzugspannung-Dehnungs-Verlauf der stumpf geklebten Rohrprobe bei querkontraktionsbehinderter Zugbeanspruchung. Der Fließbeginn und der E-Modul stimmen bei Temperaturen von 23 und 50 °C

gut überein. Auf die Abweichungen, die bei 80 und 100 °C auftreten wird am Ende dieses Abschnitts eingegangen.



Beanspruchung:	Kombiniert Zug/Schub ($\xi = 2$)		
Diagramm:	Zuganteil		
Prüftemperaturen:	23°C - 100 °C	p:	0,98
Klebstoff:	Betamate 1496V	d_K :	0,3 mm
Probengeometrie:	Rohrprobe	Material:	E235+N

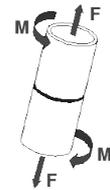
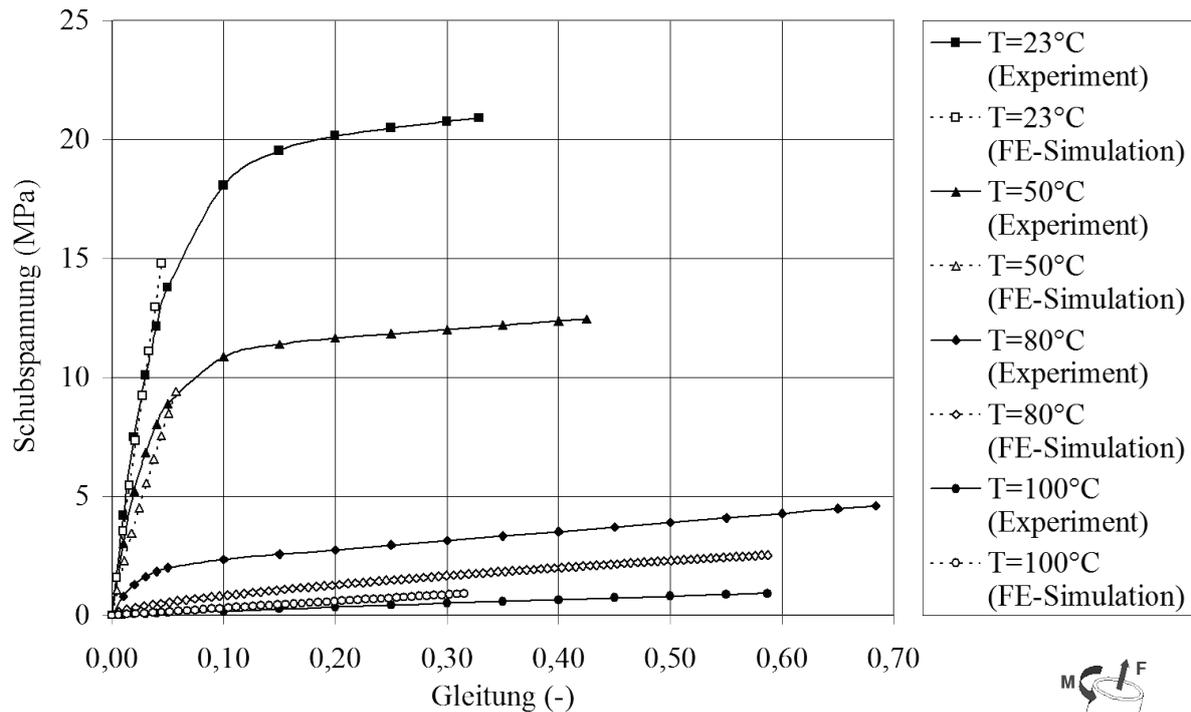


Abbildung 4-7: Experiment und FE-Simulation des schubdominierten Zug/Schubversuchs (Zuganteil)

Abbildung 4-7 zeigt den Zuganteil der stumpf geklebten Rohrprobe bei kombinierter Zug-/Schubbeanspruchung. Auch hier kann der E-Modul bei 23 und 50 °C gut abgebildet werden, jedoch liegt der Fließbeginn für diese beiden Temperaturen deutlich oberhalb der Experimente. Auch hier treten größere Abweichungen bei 80 und 100 °C auf.



Beanspruchung: Kombiniert Zug/Schub ($\xi = 2$)

Diagramm: Schubanteil

Prüftemperaturen: 23°C - 100 °C p: 0,98

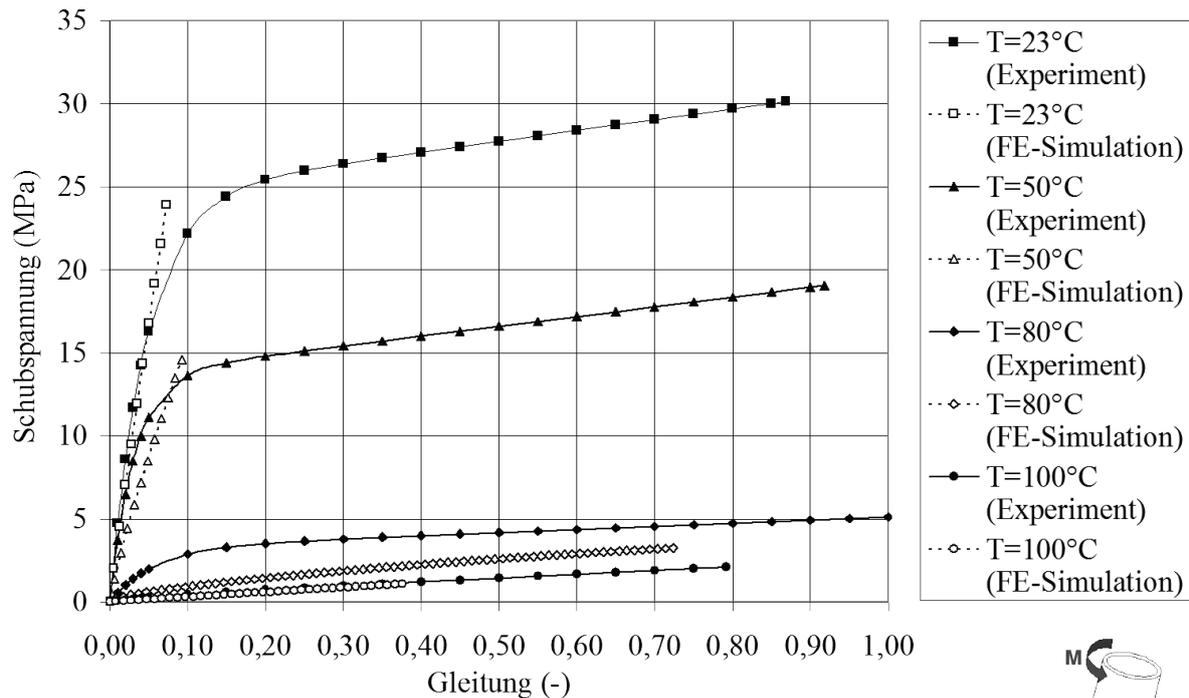
Klebstoff: Betamate 1496V d_K : 0,3 mm

Probengeometrie: Rohrprobe Material: E235+N



Abbildung 4-8: Experiment und FE-Simulation des schubdominierten Zug/Schubversuchs (Schubanteil)

Abbildung 4-8 zeigt den Schubanteil der stumpf geklebten Rohrprobe bei kombinierter Zug-/Schubbeanspruchung. Fließbeginn und E-Modul können bei 23 und 50 °C gut abgebildet werden. Größere Abweichungen treten auch hier wieder bei Temperaturen größer 80 °C auf.



Beanspruchung: Schub ($\xi = \infty$)

Prüftemperaturen: 23°C - 100 °C

Klebstoff: Betamate 1496V

Probengeometrie: Rohrprobe

p: 0,98

d_K : 0,3 mm

Material: E235+N

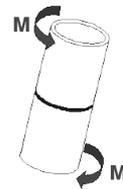


Abbildung 4-9: Experiment und FE-Simulation des reinen Schubversuchs

Abbildung 4-9 zeigt den experimentell und numerisch ermittelten Nennzugspannung-Dehnungs-Verlauf der stumpf geklebten Rohrprobe bei reiner Schubbeanspruchung. Der Fließbeginn und der E-Modul stimmen bei Temperaturen von 23 und 50 °C gut überein. Die größten Abweichungen treten bei dieser Beanspruchung bei 80 °C auf.

In der Auswertung der maximalen Dehnungsanteile an einem Element am Außenrand der Klebschicht werden die Abweichungen bei 80 °C aus den Spannungs-Verformungs-Kurven aus Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-9 ebenfalls deutlich. Eine Ursache hierfür liefern die Abbildung 4-10 und die Abbildung 4-11. In Abbildung 4-10 werden die maximalen Dehnungsanteile eines querkontraktionsbehinderten Zugversuchs dargestellt. Die totalen Dehnungen sind nahezu temperaturunabhängig, wobei die volumetrischen Dehnungsanteile noch über den isochoren Anteilen liegen, was auf den großen Querkontraktionseinfluss des Klebstoffs zurückzuführen ist. Das Absinken beider plastischer Dehnungsanteile und das gleichzeitige Ansteigen der viskoelastischen Anteile bei 80 °C sind dem relativ spät einsetzenden Fließbeginn zuschulden.

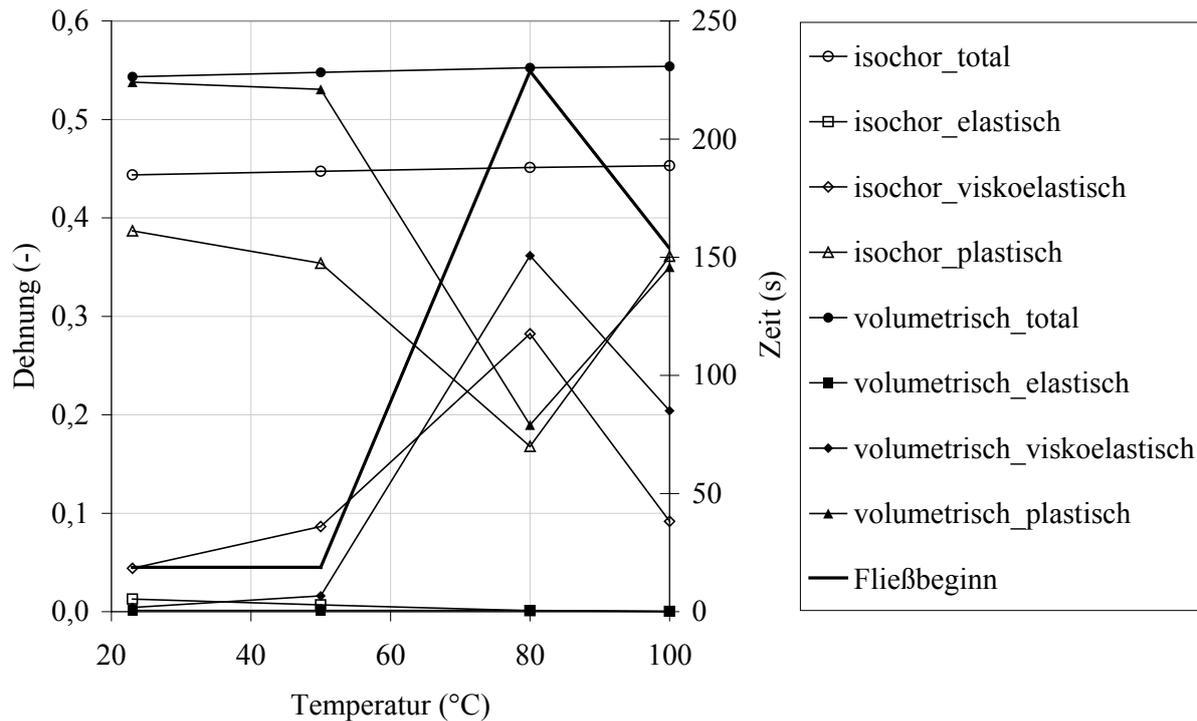


Abbildung 4-10: Temperaturabhängigkeit der maximalen Dehnungsanteile des querkontraktionsbehinderten Zugversuchs, zeitabhängiger Fließbeginn

In Abbildung 4-11 werden die maximalen Dehnungsanteile eines reinen Schubversuchs dargestellt. Die totalen isochoren Dehnungen sind auch hier nahezu temperaturunabhängig, wobei die volumetrischen Dehnungsanteile vernachlässigbar gering sind. Das Absinken der isochoren plastischen Dehnungsanteile bei 80 °C ist auch hier auf den relativ spät einsetzenden Fließbeginn zurückzuführen.

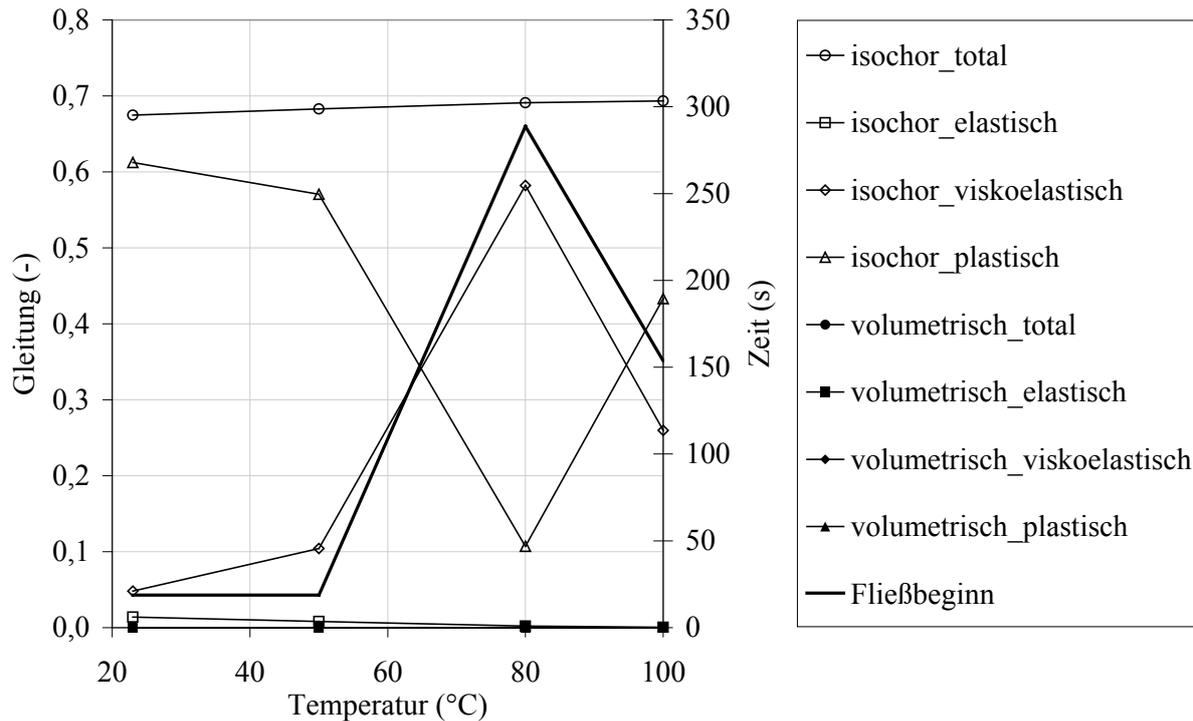


Abbildung 4-11: Temperaturabhängigkeit der maximalen Dehnungsanteile eines reinen Schubversuchs, zeitabhängiger Fließbeginn

Aufgrund der Nähe zum Glasübergangspunkt ($T_G = 85 \text{ °C}$) und den damit verbundenen größeren viskoelastischen Anteilen verlaufen die Spannungs-Verformungs-Kurven bei 80 °C flacher als im Versuch ermittelt. Der Glasübergang wird in der FE-Simulation einem Temperaturpunkt zugewiesen. In Realität wird der Glasübergang hingegen als Bereich definiert. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass im Versuch der Glasübergangspunkt noch nicht erreicht worden ist.

Die in Abbildung 4-12 dargestellten maximalen E- bzw. G-Moduli werden aus den experimentell untersuchten und numerisch berechneten Rohrproben (Klebstoff vollständig vernetzt) ermittelt. Die größten Abweichungen treten bei 80 °C bzw. 100 °C auf. Die maximalen Moduli aus der FE-Simulation sind vor allem in diesem Temperaturbereich kleiner als die in den experimentellen Untersuchungen ermittelten.

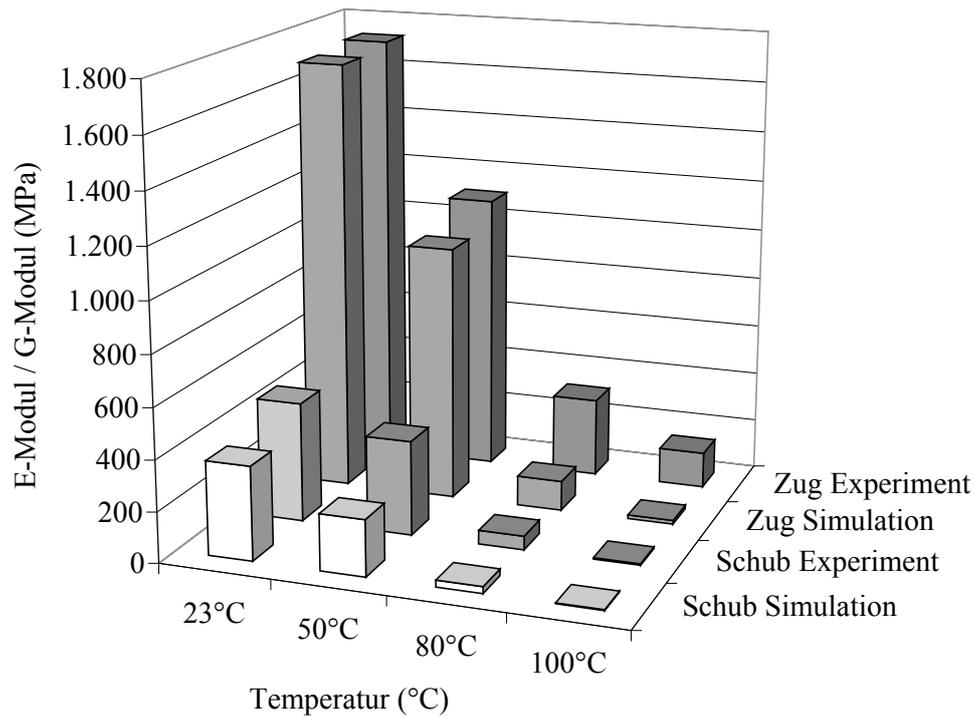


Abbildung 4-12: Maximaler E-/G-Modul für reine Zug- bzw. Schubbelastung aus Experiment und FE-Simulation

Auf den Spannungswert des Fließbeginns haben E- und G-Modul keinen Einfluss, dieser wird über die Fließbedingung nach Lambrecht definiert. Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 zeigen für den jeweiligen Temperaturbereich, dass die Spannungen, ermittelt an einem Element am Außenrand der Klebschicht, bis zum Fließbeginn linear verlaufen und danach weniger stark ansteigen. Da der Dehnungs- bzw. Gleitungswert des Fließbeginns über den E- bzw. G-Modul gekoppelt ist, weichen diese entsprechend den Abweichungen der Moduli ab. Bekanntermaßen verursacht eine Abnahme des Moduls bei konstanter Spannung eine Zunahme der Dehnung/Gleitung, wie es vor allem bei den Temperaturen 80 und 100 °C festzustellen ist (vgl. Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-9).

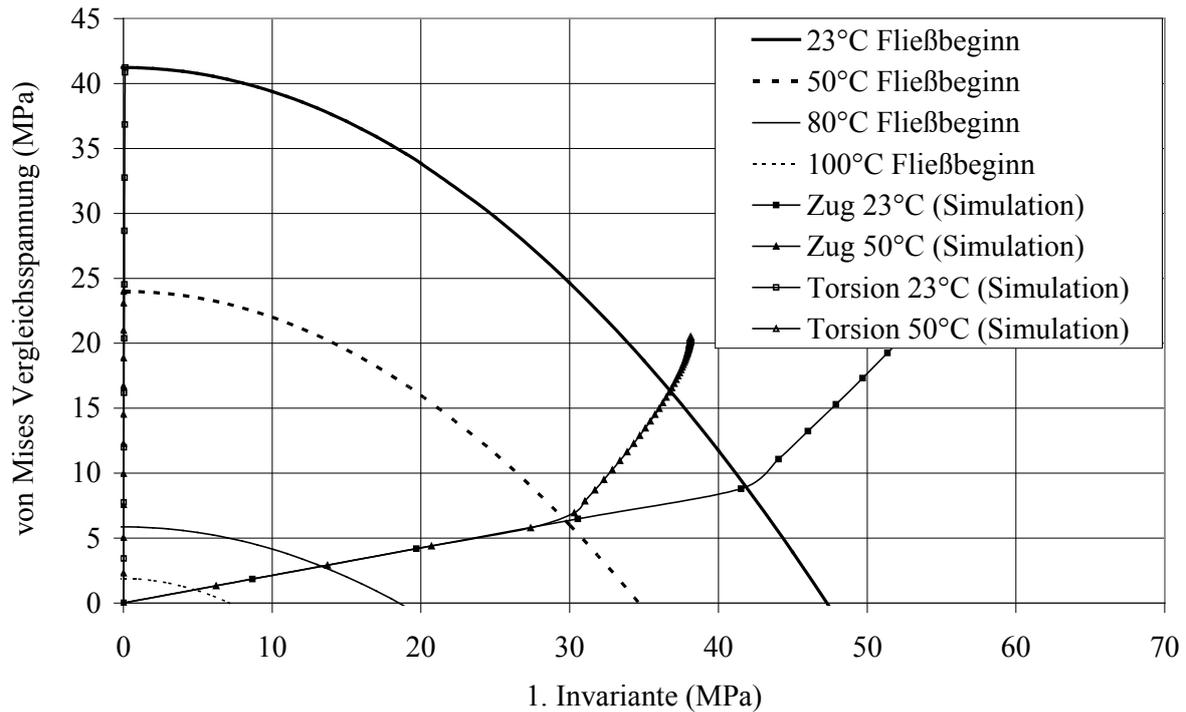


Abbildung 4-13: Invariantendarstellung der Spannungen (23 °C und 50 °C) und der jeweils dazugehörigen Fließkurve

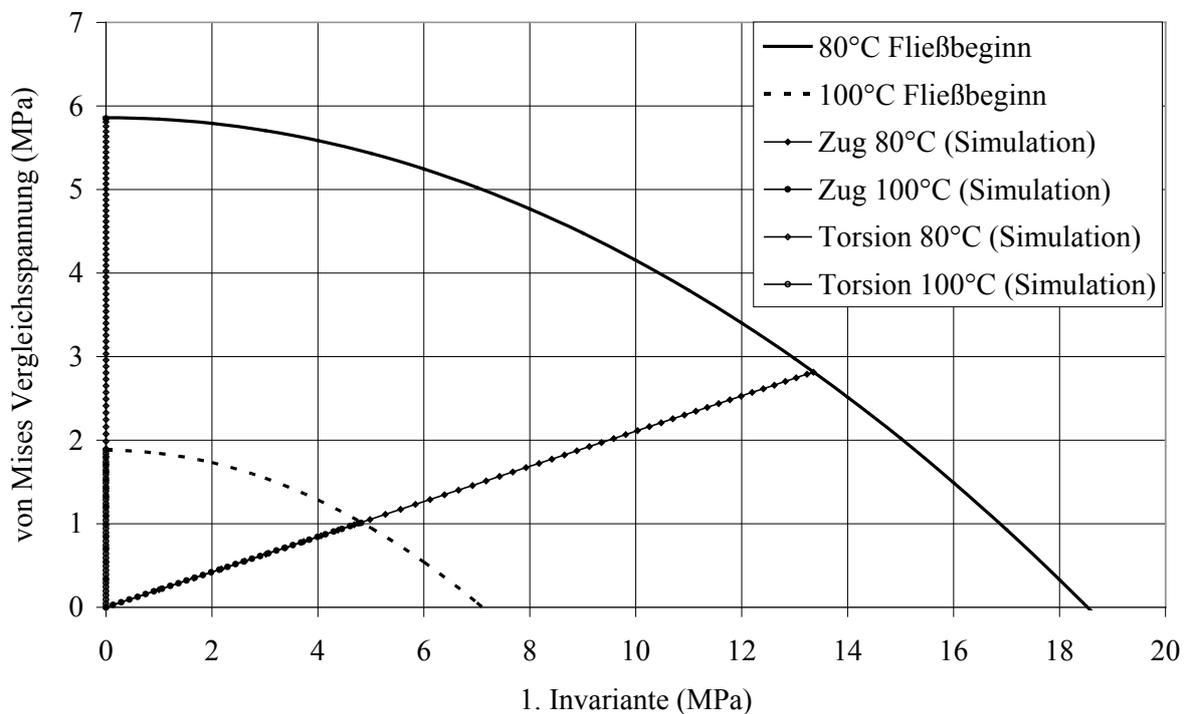


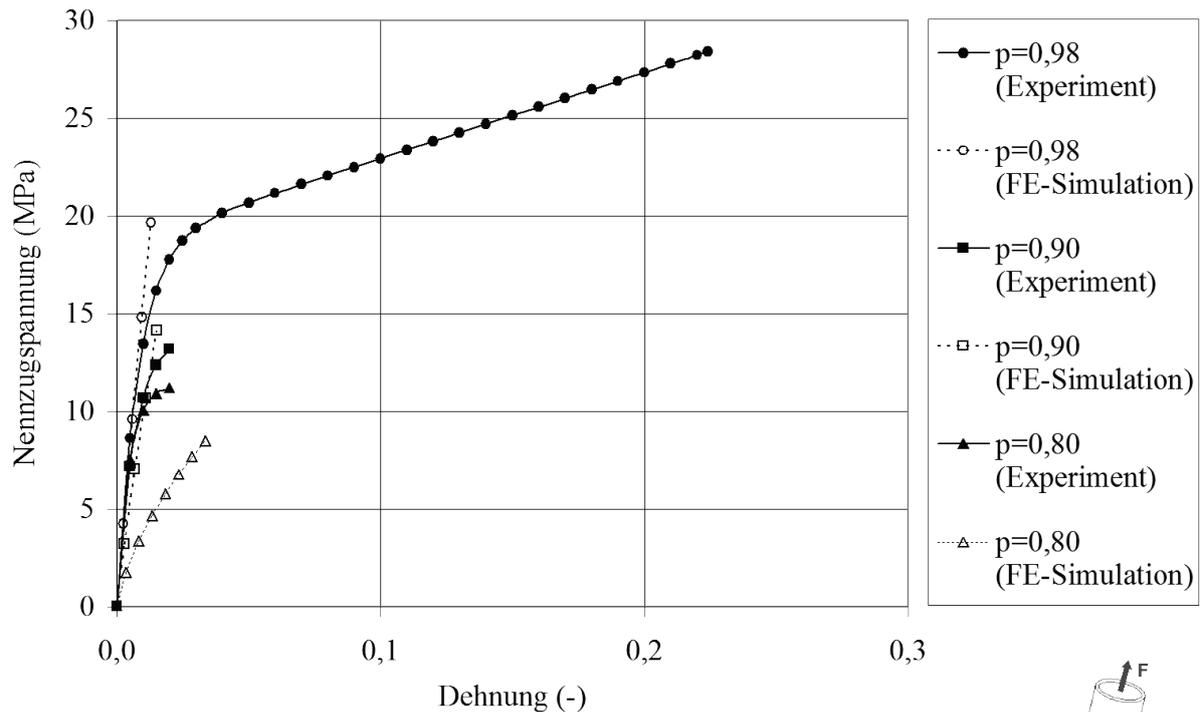
Abbildung 4-14: Invariantendarstellung der Spannungen (80 °C und 100 °C) und der jeweils dazugehörigen Fließkurve

Es konnte somit gezeigt werden, dass der im Materialmodell definierte spannungsbasierte Fließbeginn nach Lambrecht in der FE-Simulation abgebildet werden kann.

4.2.4 Experimentelle und numerische Ergebnisse des nicht vollständig vernetzten Klebstoffs

Der folgende Abschnitt bewertet die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen dehnungsgeregelter Versuche bei Raumtemperatur und nicht vollständig vernetztem Klebstoff. Aufgezeigt wird die Vernetzungsgradabhängigkeit des Spannungs-Verformungs-Verhaltens stumpf geklebter Rohrproben.

Abbildung 4-15 zeigt exemplarisch den experimentell und numerisch ermittelten Nennzugspannung-Dehnungs-Verlauf der stumpf geklebten Rohrprobe bei querkontraktionsbehinderter Zugbeanspruchung mit 80 %, 90 % und 98 % vernetztem Klebstoff. Eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse wird bei 90 % und 98 % Vernetzung erreicht. Eine Abweichung tritt erst bei 80 % Vernetzung auf. Hier wird die Steifigkeit (Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve) aus dem Versuch durch die FE-Simulation nicht korrekt abgebildet. Der vorzeitige Steifigkeitsabfall der Probe in der FE-Simulation ist dem gewählten Ansatz geschuldet. Dieser beschreibt den Vertikalschift der Relaxationsfunktion in Abhängigkeit des Vernetzungsgrades (vgl. Kapitel 4.1.1). Das Spannungsniveau, bei dem plastisches Fließen eintritt, wird davon nicht betroffen. Auf die Darstellung aller Untersuchungsergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet.



Beanspruchung: Zug ($\xi = 0$)

Prüftemperaturen: 23°C

Klebstoff: Betamate 1496V

Probengeometrie: Rohrprobe

p: 0,80 - 0,98

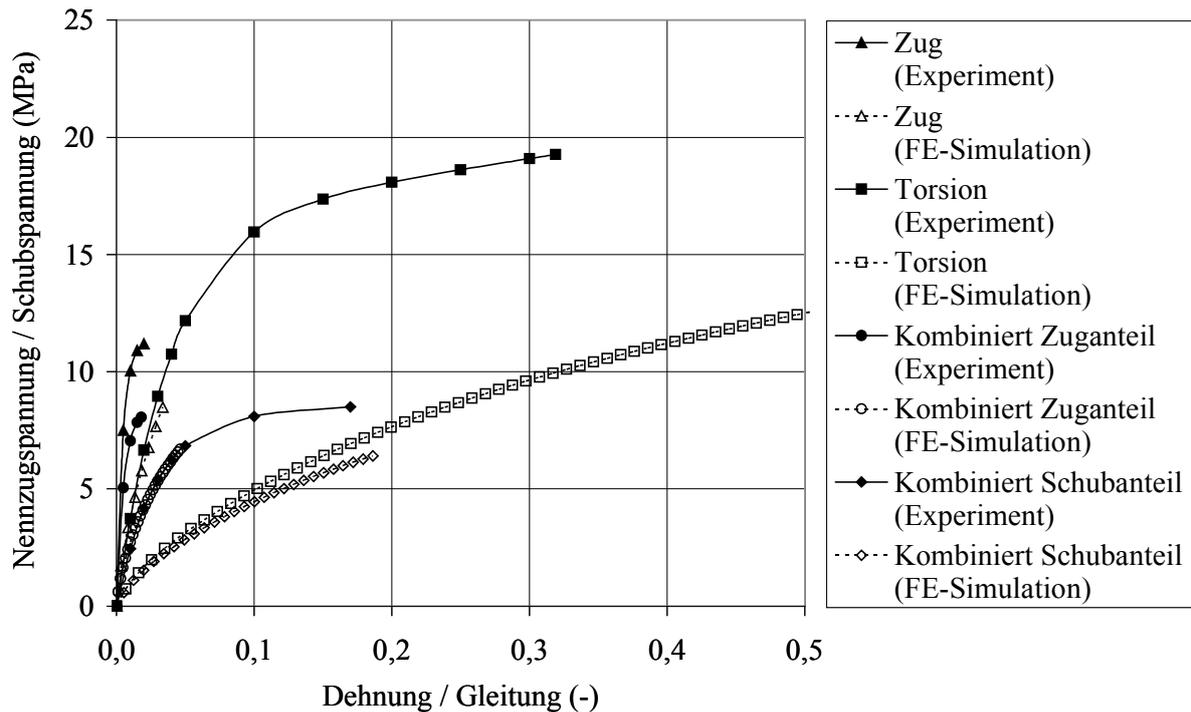
d_k : 0,3 mm

Material: E235+N



Abbildung 4-15: Experiment und FE-Simulation eines querkontraktionsbehinderten Zugversuchs bei RT und verschiedenen Vernetzungsgraden

Abbildung 4-16 zeigt exemplarisch den experimentell und numerisch ermittelten Spannungs-Verformungs-Verlauf der stumpf geklebten Rohrprobe bei Raumtemperatur, bei 80 % vernetztem Klebstoff und bei drei unterschiedlichen Beanspruchungen. Auch hier treten beanspruchungsübergreifend Abweichungen bei einem Vernetzungsgrad von 80 % auf. Die Ursache hierfür liegt ebenfalls im Ansatz zum Vertikalschiff der Relaxationsfunktion (vgl. Kapitel 4.1.1).



Beanspruchung: Zug ($\xi = 0$), Kombiniert Zug/Schub ($\xi = 2$), Schub ($\xi = \infty$)
 Prüftemperaturen: 23°C p: 0,80
 Klebstoff: Betamate 1496V d_K : 0,3 mm
 Probengeometrie: Rohrprobe Material: E235+N

Abbildung 4-16: Experiment und FE-Simulation einer stumpf geklebten Rohrprobe bei RT, 80 % Vernetzung und unterschiedlichen Beanspruchungen

4.3 Experimentelle und numerische Untersuchungen an geklebten Zugscherproben

Ein weiterer Schritt der numerischen Validierung des Materialmodells nach Lambrecht ist die Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf eine zweite Probengeometrie. In der Automobilindustrie werden häufig einfach überlappte Zugscherproben zur Klebstoffcharakterisierung verwendet. Daher werden zur Validierung numerische Untersuchungen an Zugscherproben in Mischverbindung (Stahl-Aluminium) während des Vernetzungsprozesses (Kapitel 4.3.2) sowie in Reinverbindung (Stahl-Stahl) nach vollständiger Vernetzung des Klebstoffs (Kapitel 4.3.3) herangezogen.

4.3.1 Modellbeschreibung

Abbildung 4-17 zeigt die Geometrie des FE-Modells einer einfach überlappten artfremden Zugscherprobe, die für die Untersuchungen während des Vernetzungsprozesses (Kapitel 4.3.2) verwendet wird.

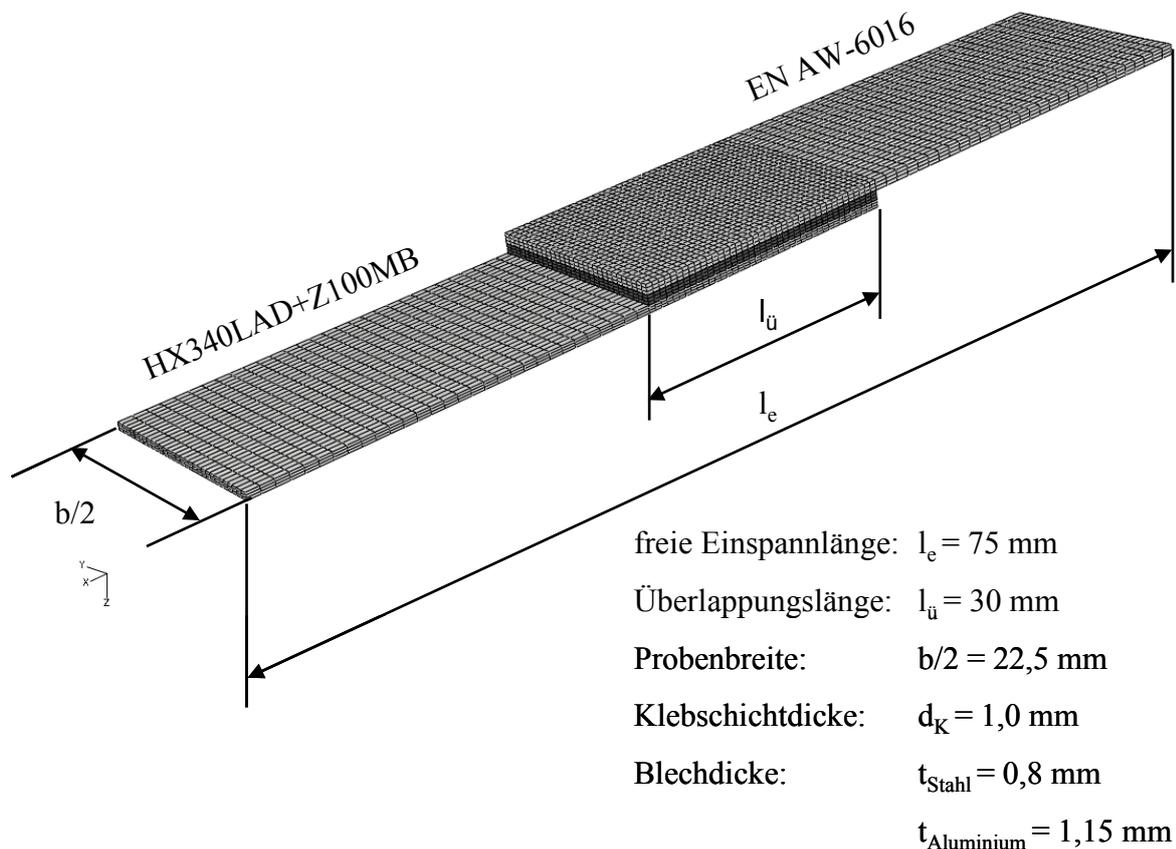


Abbildung 4-17: Geometrie einer einfach überlappten artfremden Zugscherprobe

Das FE-Modell besteht aus drei Komponenten. Beiden Blechen wird eine linear-elastische Materialdefinition, dem einen die von Stahl ($E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$) und dem anderen die von Aluminium ($E = 70 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$) zugeordnet. Das mechanische Verhalten des Klebstoffes wird durch das Materialmodell nach Lambrecht definiert. Die Lagerungs- und Lasteinleitungsbedingungen werden in Abbildung 4-18 dargestellt. Unter Ausnutzung der Symmetrie kann ein FE-Halbmodell verwendet werden. Demnach werden alle Knoten der Symmetrieebene in y-Richtung translatorisch gesperrt. Die Lagerung des FE-Modells erfolgt weiter durch eine Einspannung an der Stirnseite des Stahlblechs. Die Lasteinleitung erfolgt auf der Stirnseite des Aluminiumblechs über den Referenzknoten eines Kinetic Coupling Elements. Die Last wird über eine zeitgesteuerte Verschiebung des Referenzknotens von $0,006 \text{ mm/s}$ in x-Richtung aufgebracht. Die Verschiebung des Referenzknotens in z-Richtung wird dabei unterbunden.

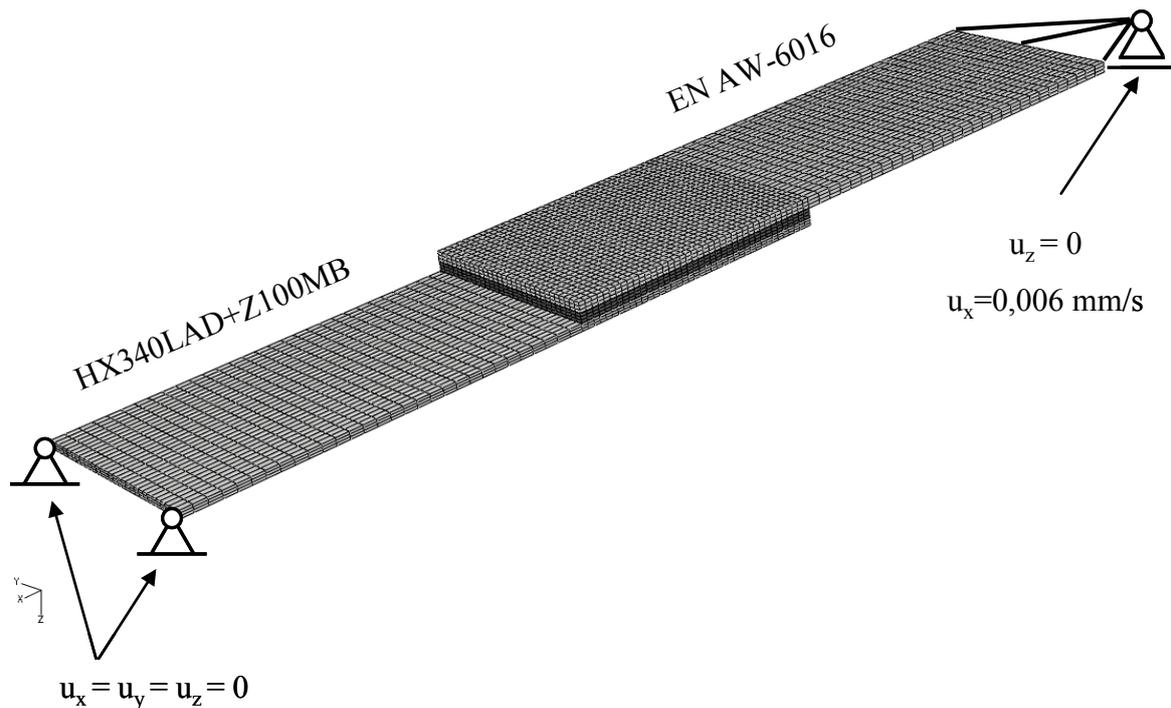


Abbildung 4-18: Lagerung und Lasteinleitung einer einfach überlappten artfremden Zugscherprobe

Das FE-Modell besteht aus Volumenelementen des Typs C3D8 (vgl. Tabelle 4-1). Die 1,0 mm dicke Klebschicht wird mit drei Volumenelementen über die Klebschichtdicke vernetzt. Auf die Auswertung der Reaktionskräfte am Referenzknoten hat die Klebschichtdiskretisierung über die Dicke keinen Einfluss. Die Netze der Fügeteile und des Klebstoffs sind in diesem Fall konkurrent.

Die Auswertung der numerischen Berechnungen ist vergleichbar mit denen aus den experimentellen Versuchen. Dabei werden die Reaktionskräfte am Referenzknoten über der Zeit aufgetragen. Die Berechnung der Schubspannung erfolgt aus der auftretenden Reaktionskraft am Referenzknoten bezogen auf die Überlappungsfläche der Zugscherprobe. Die elastische Verformung der Fügeteile in x-Richtung im Bereich der Klebschicht beträgt weniger als 0,00015 % und kann hier vernachlässigt werden.

Abbildung 4-19 zeigt die Geometrie des FE-Modells einer einfach überlappten artgleichen Zugscherprobe, die für die Untersuchungen an vollständig vernetzten Zugscherproben (Kapitel 4.3.3) verwendet wird.

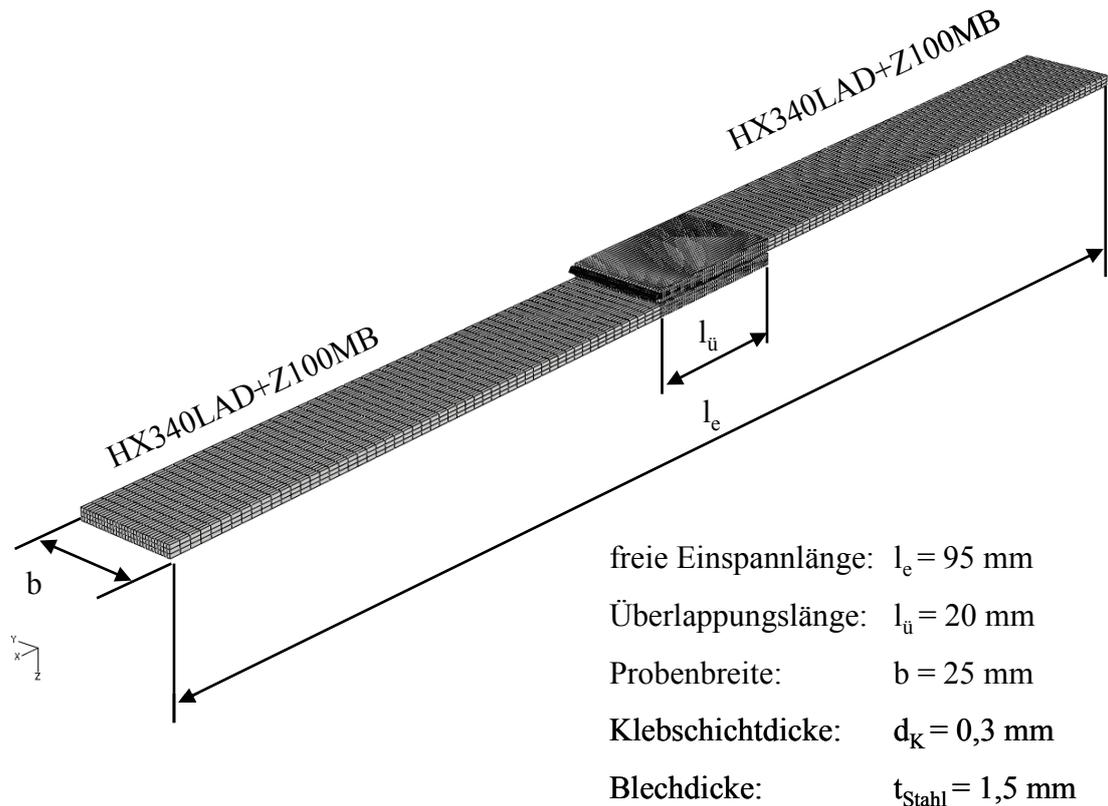


Abbildung 4-19: Geometrie einer einfach überlappten artgleichen Zugscherprobe

Das FE-Modell besteht aus drei Komponenten. Beiden Blechen wird eine linear-elastische Materialdefinition von Stahl ($E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$) zugeordnet. Das mechanische Verhalten des Klebstoffes wird durch das Materialmodell nach Lambrecht definiert. Die Lagerungs- und Lasteinleitungsbedingungen werden in Abbildung 4-20 dargestellt. Die Lagerung des FE-Modells erfolgt durch eine Einspannung an der Stirnseite des einen Stahlblechs. Die Lasteinleitung erfolgt auf der Stirnseite des anderen Stahlblechs über den Referenzknoten eines Kinetic Coupling Elements. Die Last wird über eine zeitgesteuerte Verschiebung des Referenzknotens von $0,01667 \text{ mm/s}$ in x-Richtung aufgebracht. Die Verschiebung des Referenzknotens in z-Richtung wird dabei unterbunden.

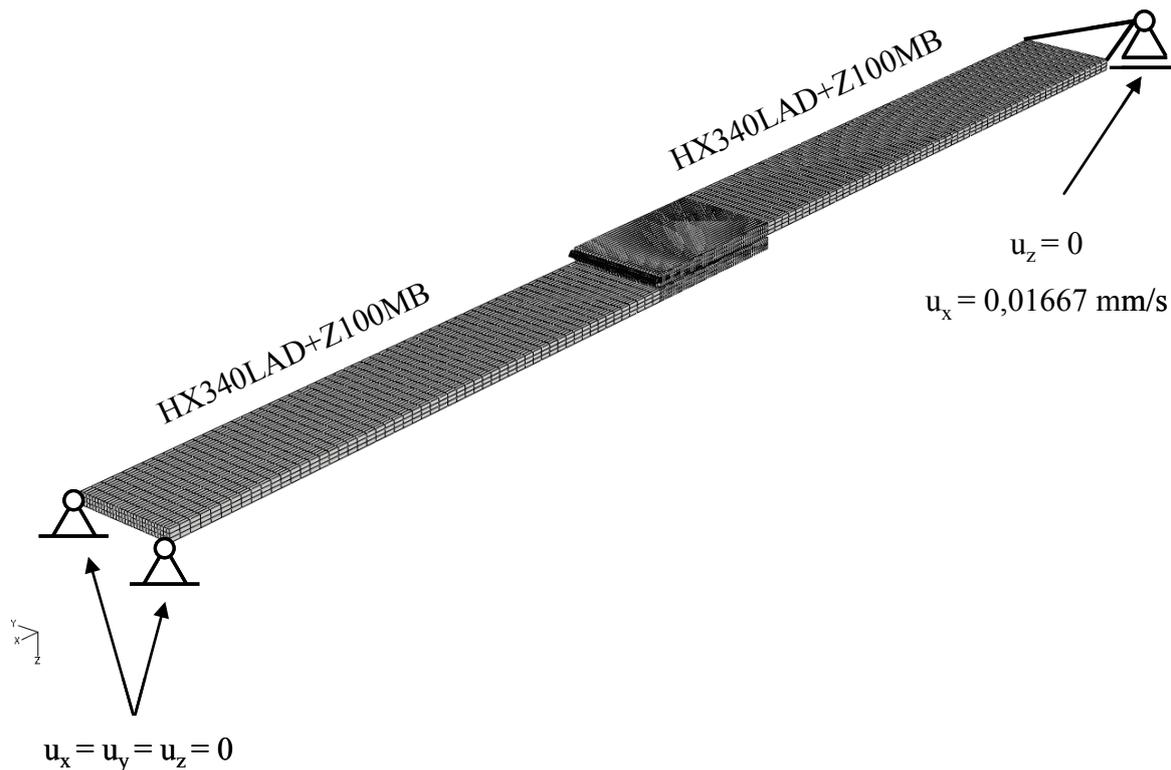


Abbildung 4-20: Lagerung und Lasteinleitung einer einfach überlappten artgleichen Zugscherprobe

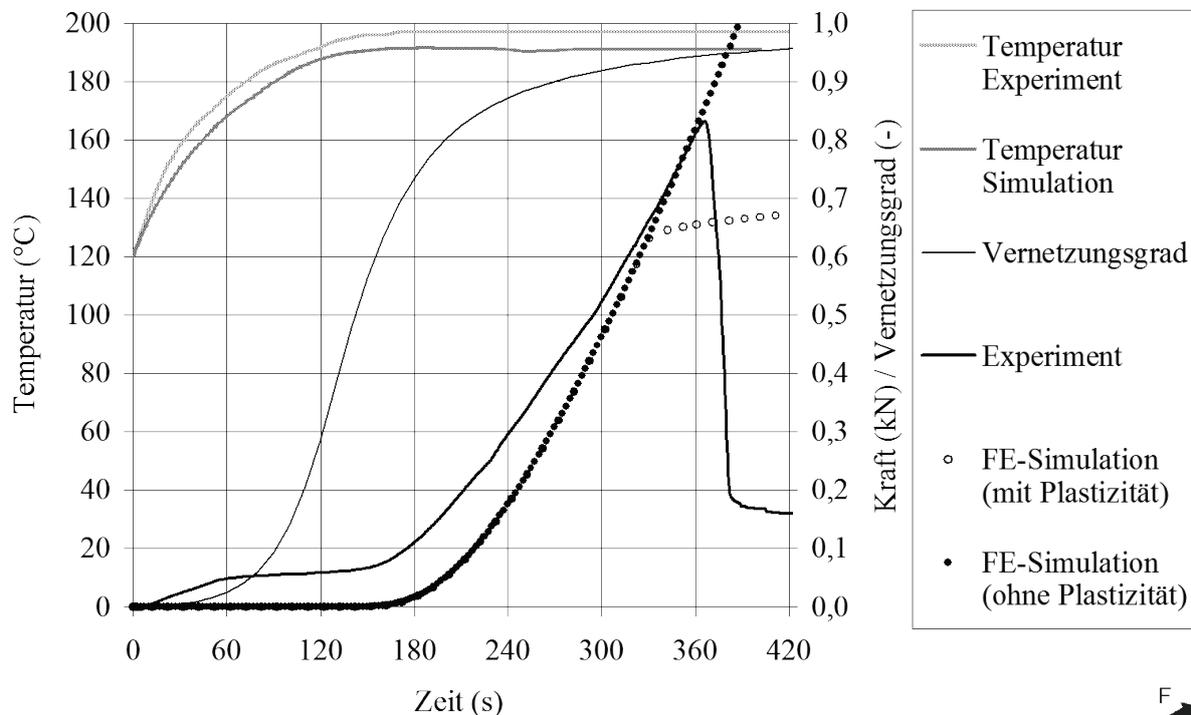
Das FE-Modell besteht aus Volumenelementen des Typs C3D8 (vgl. Tabelle 4-1). Die 0,3 mm dicke Klebschicht wird mit drei Volumenelementen über die Klebschichtdicke vernetzt. Auf die Auswertung der Reaktionskraft am Referenzknoten hat die Klebschichtdiskretisierung über die Dicke keinen Einfluss. Die Fügeteile und die Klebschicht-Elemente werden über TIE-Constraints (vgl. Tabelle 4-1) miteinander verbunden.

Die Auswertung der numerischen Berechnungen ist vergleichbar mit denen aus den experimentellen Versuchen. Die Berechnung der Schubspannung erfolgt aus der auftretenden Reaktionskraft am Referenzknoten bezogen auf die Überlappungsfläche der Zugscherprobe. Die Gleitung wird über die x-Verschiebung zweier übereinanderliegender Eckknoten der Klebschicht und der Klebschichtdicke definiert, da so die axiale Fügeteilverformung vernachlässigt werden kann.

4.3.2 Untersuchungen während des Vernetzungsprozesses

Im Folgenden werden experimentelle Untersuchungen dehnungsgeregelter Zugscherversuche während des Vernetzungsprozesses mit numerischen Berechnungen verglichen und deren Ergebnisse bewertet. Abbildung 4-21 zeigt den experimentell und numerisch ermittelten Schubspannungs-Gleitungs-Verlauf einer einfach überlappten artfremden Zugscherprobe

während des Vernetzungsprozesses. Dargestellt werden neben dem Experiment, auch die numerischen Untersuchungsergebnisse mit und ohne Plastizitätskriterium nach Lambrecht.

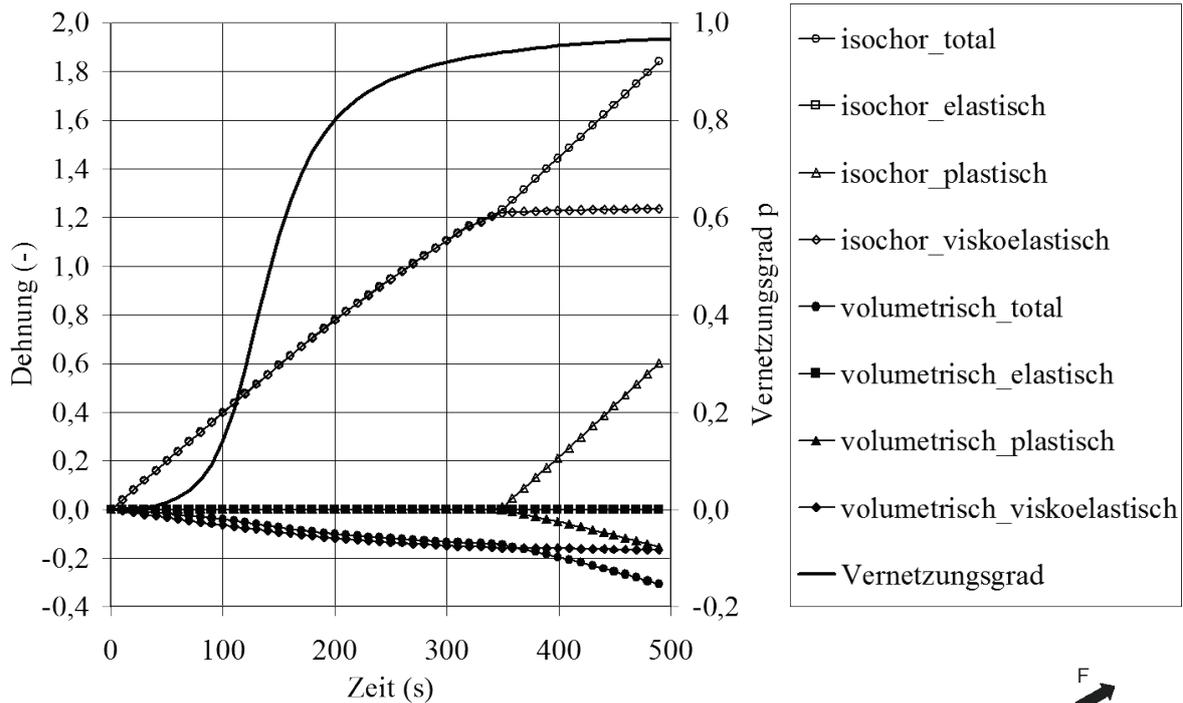


Prüftemperaturen: siehe Diagramm
 Vernetzungsgrad: siehe Diagramm
 Klebstoff: Betamate 1496V (d_K : 1,0 mm)
 Probengeometrie: Zugscheprobe
 HX340LAD+Z100MB ($t = 0,8$ mm)
 EN AW-6016 ($t = 1,15$ mm)



Abbildung 4-21: Experiment und FE-Simulation eines Zugscherversuchs während der Vernetzung

Das Ansteigen der Kraft zwischen 0 s und 160 s beim Experiment wird durch eine Klammer verursacht, die die beiden Probenhälften zueinander fixiert. Bei Vernachlässigung dieses Klemmeffektes kann sowohl bei der experimentellen Untersuchung, als auch bei den numerischen ein annähernd zeitgleicher Kraftanstieg identifiziert werden. Auch das Kraftmaximum, das beim Experimenten zum Versagen der Probe geführt hat, korreliert gut mit den numerischen Untersuchungen unter Berücksichtigung der Plastizität. Als Plastizitätskriterium wird die in Kapitel 3.6.3 beschriebene temperatur- und vernetzungsgradabhängige Fließbedingung nach Lambrecht und deren Ansatzfreiwerte verwendet.



Vernetzungsgrad: siehe Diagramm
 Klebstoff: Betamate 1496V (d_K : 1,0 mm)
 Probengeometrie: Zugscherprobe
 HX340LAD+Z100MB ($t = 0,8$ mm)
 EN AW-6016 ($t = 1,15$ mm)

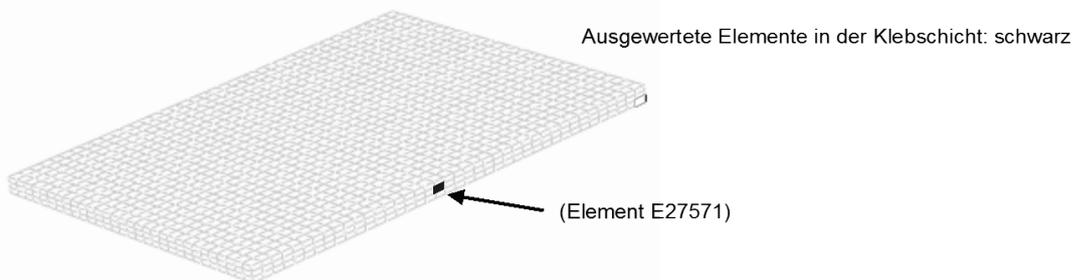
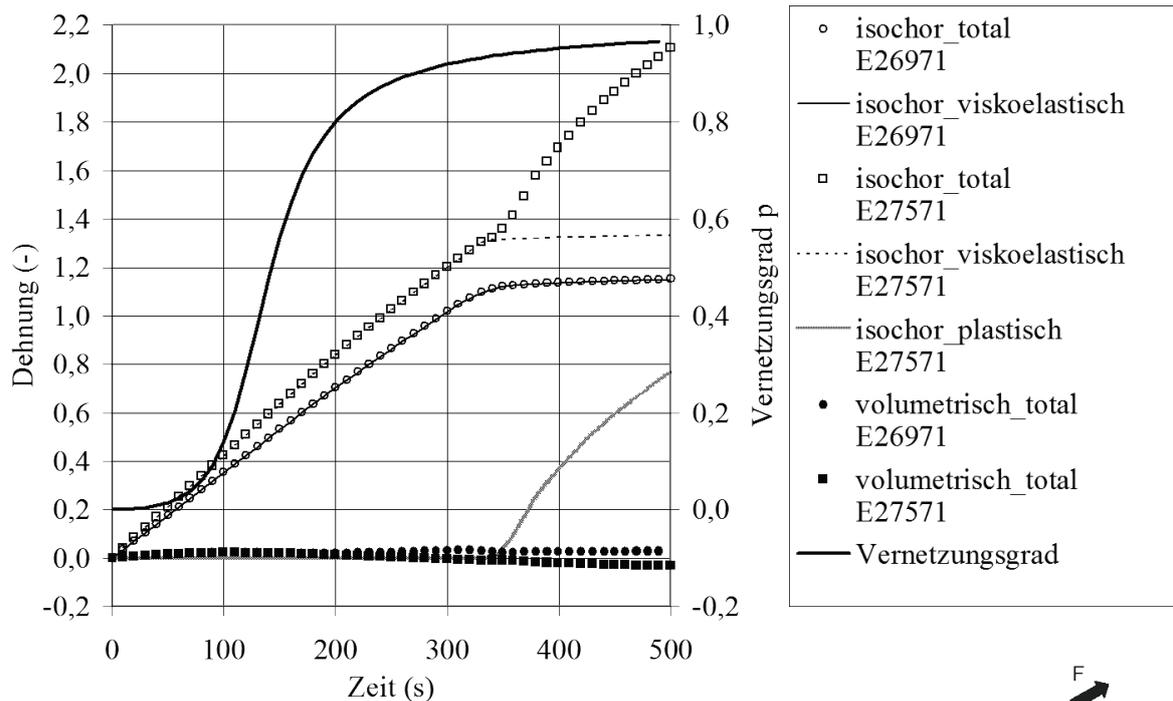


Abbildung 4-22: Verteilung der verschiedenen Dehnungsanteile eines Elements in der Klebschicht während der Vernetzung

In Abbildung 4-22 wird exemplarisch die Dehnungsverteilung während der fortschreitenden Vernetzung in einem Element (centroidal) in der Mitte der Klebschicht dargestellt. Die isochoren Dehnungsanteile sind um das 6-fache größer als die vergleichbaren volumetrischen Anteile. Elastische Dehnungsanteile treten praktisch nicht auf. Zu Beginn der FE-Simulation treten überwiegend viskoelastische Dehnungsanteile auf. Nach ca. 350 s und bei einem Vernetzungsgrad von 94 % gehen diese in plastische Dehnungsanteile über.



Vernetzungsgrad: siehe Diagramm

Klebstoff: Betamate 1496V (d_K : 1,0 mm)

Probengeometrie: Zugscherprobe

HX340LAD+Z100MB ($t = 0,8$ mm)

EN AW-6016 ($t = 1,15$ mm)

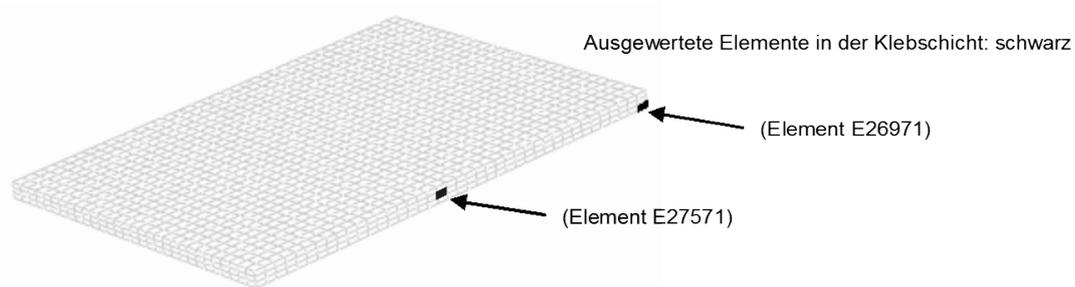


Abbildung 4-23: Vergleich der Hauptdehnungsanteile eines Klebstoffelements am Rand und in der Mitte der Klebschicht

In Abbildung 4-23 werden die Dehnungsanteile eines Elements am Rand und in der Mitte der Klebschicht miteinander verglichen. Deutlich wird das die volumetrischen Dehnungsanteile vernachlässigbar gering sind. Verglichen zum Element in der Mitte der Klebschicht weist das Randelement keine plastischen Dehnungen auf.

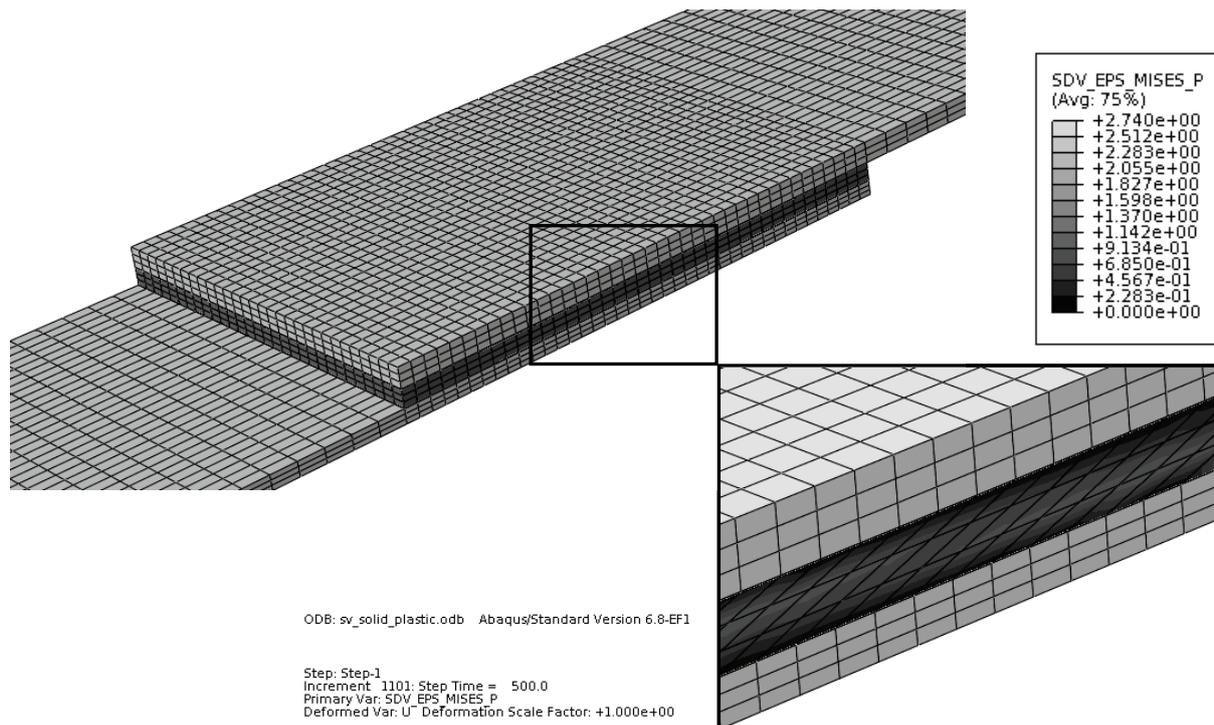
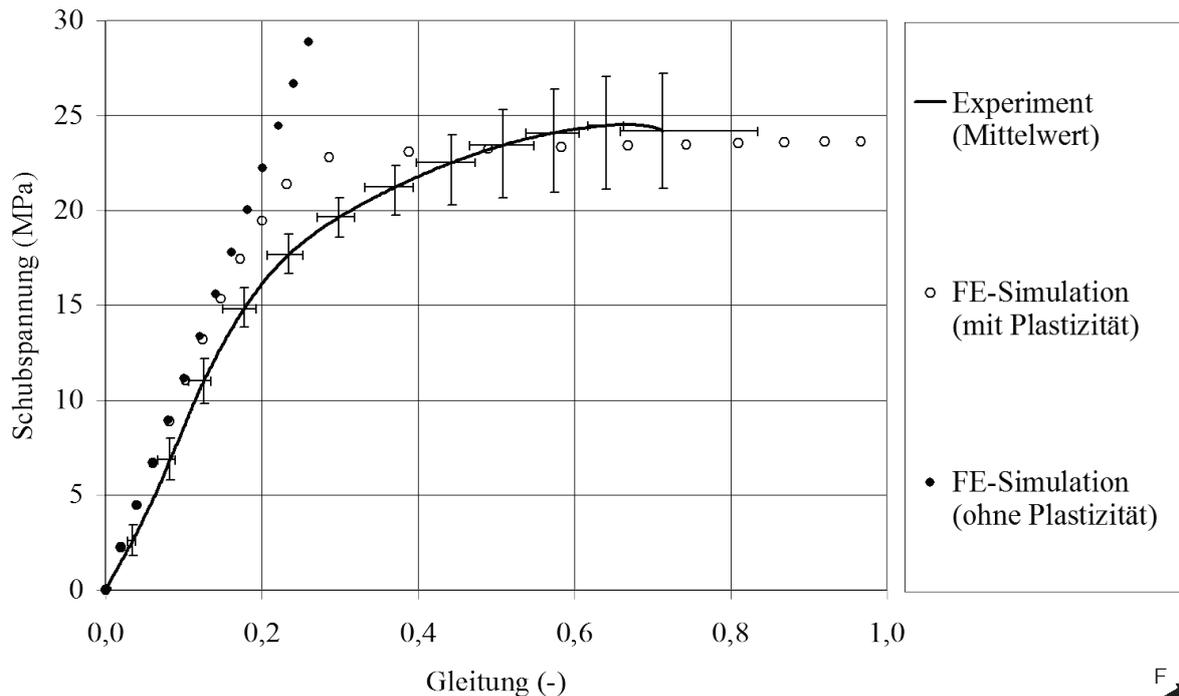


Abbildung 4-24: Verteilung der isochoren plastischen Dehnung in der Klebschicht (drei Elemente über die Klebschichtdicke)

Die Verteilung der isochoren plastischen Dehnungsanteile über die Klebschichtdicke (hier: drei Elemente) wird in Abbildung 4-24 deutlich. Danach treten die größten plastischen Verformungen in der Klebschichtmitte auf und nehmen zum Rand hin ab. An der Grenzfläche zum Fügeteil sind sie annähernd null. Die Differenzierung über die Klebschichtdicke ist allerdings nur möglich, wenn mit mehr als einem Element über die Klebschichtdicke gerechnet wird. Bei Rechnungen mit einem Element über die Klebschichtdicke werden die Dehnungsanteile dementsprechend gemittelt.

4.3.3 Untersuchungen an Zugscherproben mit vollständig vernetztem Klebstoff

Im folgenden Abschnitt werden experimentelle Untersuchungen dehnungsgeregelter Zugscherversuche bei Raumtemperatur und vollständig vernetztem Klebstoff mit numerischen Berechnungen validiert. Abbildung 4-25 zeigt den experimentell und numerisch ermittelten Schubspannungs-Gleitungsverlauf einer einfach überlappten artgleichen Zugscherprobe. Der aus fünf experimentellen Versuchen gemittelte Schubspannungs-Gleitungsverlauf wird bis über das Spannungsmaximum hinaus dargestellt. Weiterhin werden die numerischen Untersuchungen mit und ohne Plastizitätskriterium bewertet.



Prüftemperaturen: RT
 Vernetzungsgrad: 0,98
 Klebstoff: Betamate 1496V (d_k : 0,3 mm)
 Probengeometrie: Zugscherprobe
 HX340LAD+Z100MB ($t = 1,5$ mm)



Abbildung 4-25: Experiment und FE-Simulation eines Zugscherversuchs bei Raumtemperatur

Aus Abbildung 4-25 wird deutlich, dass die numerischen Ergebnisse die Anfangssteifigkeit aus den Versuchen sehr gut abbilden, aber nur unter Berücksichtigung der Plastizität auch der Beginn des plastischen Fließens der Klebschicht numerisch abgebildet werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass die Plastizitätskriterien aus den Versuchen mit stumpf geklebten Rohrproben auf einfach überlappte Zugscherproben mit hinreichender Genauigkeit übertragen werden können.

Aufgrund der exzentrischen Krafteinleitung und den damit verbundenen Biegemomenten treten Spannungsspitzen in der Klebschicht auf, die eine reine Schubbeanspruchung der Klebschicht verhindern. Abbildung 4-26 stellt diese durch Biegebeanspruchung nicht zu vernachlässigende Fügeteilverformungen dar.



Abbildung 4-26: Fügeteilverformung aufgrund exzentrischer Krafteinleitung bei Zugscherproben

Das Kapitel 4.3.4 geht auf die Fügeteilverformung bei einfach überlappten Zugscherproben ein.

4.3.4 Validierung an der einfach überlappten Zugscherprobe

Da Klebungen im Karosseriebau häufig bei der Verbindung von Flanschen Anwendung finden und die einfach überlappte Zugscherprobe zur Klebstoffauswahl und -charakterisierung weit verbreitet ist, wird diese Probengeometrie hier auch als Validierungsbeispiel herangezogen. Im Folgenden wird kurz auf die Besonderheiten der einfach überlappten Zugscherprobe eingegangen.

Eine reine Schubbeanspruchung ist mit der in DIN EN 1465 [NN08] bzw. DIN 53281 [NN96c] festgelegten Probengeometrie aufgrund der sich infolge des wirkenden Biegemomentes an den Überlappungsenden ausbildenden Spannungsspitzen nicht zu erreichen (vgl. Abbildung 4-27). Eine Eliminierung von Spannungsspitzen setzt Fügeteile mit einem quasi idealstarreren Verhalten voraus. Die Fügeteilverformung kann durch eine größere Fügeteildicke und das Biegemoment durch einen quasi-zentrischen Kraftangriff sowie eine geringere Überlappungslänge weitgehend eliminiert werden. Durch die in der Probe bei Belastung gegeneinander wirkenden und in der gleichen Ebene liegenden Kräfte tritt in der Klebschicht praktisch eine reine Schubbeanspruchung auf. Die auf diese Weise ermittelten Klebschichtkennwerte sind für die Berechnung der Spannungsverteilung in Klebungen weit besser geeignet als die nach DIN EN 1465 [NN08] ermittelten Werte der statischen Klebfestigkeit. [Hab06]

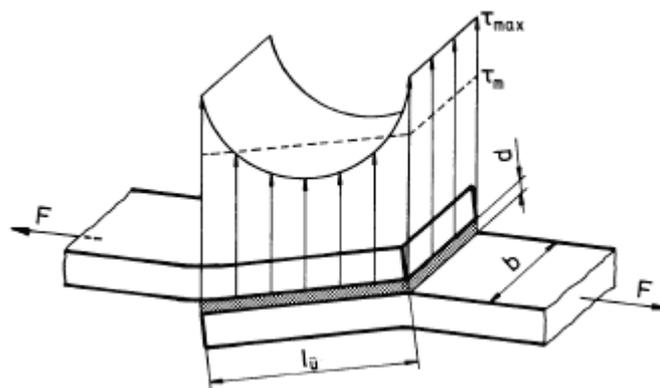


Abbildung 4-27: Spannungsverteilung einer einfach überlappten Zugscherprobe [Hab06]

Bei Betrachtung der Spannungsverhältnisse in einfach überlappten Klebungen sind demnach die beiden Einflussgrößen Fügeteilverformung und Biegemoment zu berücksichtigen. Zur Ermittlung von Festigkeitskennwerten zur numerischen Berechnung erweisen sich die Zug-

scherproben aufgrund der inhomogenen Beanspruchungen in der Klebschicht daher als ungeeignet. Zur Auswahl, Charakterisierung und Validierung von Klebstoffen ist diese einfache Probengeometrie sehr gut geeignet.

5 Berechnung einer Klebverbindung am Beispiel eines Aluminiumdaches

Der Übergang von einer werkstofflich sortenreinen Karosserie zu einer Mischbaukarosserie ist nicht durch eine reine Werkstoffsubstitution möglich. Der Mischbau ist immer auch mit einer Anpassung der Fügetechnologie verbunden. Der Einsatz verschiedener Werkstoffpaarungen in einer Karosserie erfordert neue Ansätze bei der Konstruktion der Bauteile und Auswahl der Fügetechnik. So ist z. B. die Anwendung herkömmlicher Schweißverfahren bei der Mischbauweise in Abhängigkeit der Materialpaarungen nur begrenzt möglich. Die mechanischen Fügeverfahren und das Kleben sind bei der Mischbauweise verbreitete Techniken, da diese bezüglich der Materialpaarung kaum Einschränkungen aufweisen. In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus den Validierungsuntersuchungen an den Rohr- und einfach überlappten Zugscherproben (vgl. Kapitel 4) auf eine geklebte Mischbaustruktur in einer Gesamtfahrzeugkarosserie übertragen.

5.1 Beschreibung der Fahrzeugstruktur

In dieser Arbeit wird am Beispiel des Volkswagen Passat Variant (Typ VW462) ein hybridgefügtes Aluminiumdach in einer Stahlkarosserie hinsichtlich der Klebverbindung untersucht. Das Potenzial dieses Fahrzeugdaches zur Gewichtsreduzierung ist groß. Durch den Einsatz von Aluminium ist eine Gewichtseinsparung von circa 10 kg (~56 % bezogen auf das Gesamtgewicht der Stahlausführung) möglich. Dies wirkt sich ebenfalls positiv auf den Fahrzeugschwerpunkt und somit auf die Fahrdynamik aus. Das hybride Befestigungskonzept wird im folgenden Kapitel näher erläutert. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, führen die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen der Stahlkarosserie und des Aluminiumdaches während der Klebstoffvernetzung im Lacktrocknungsprozess zu einer Gleitung des Aluminiumdaches im Stahldachflansch. Da der Klebstoff zum Zeitpunkt der größten thermischen Ausdehnung des Daches seine tragenden Eigenschaften aufbaut, kommt es bei der Abkühlung zu bleibenden Verformungen im Dach und zu festigkeitsrelevanten Spannungen in der Klebschicht.

5.2 Modellbeschreibung

Zur Berechnung der thermisch bedingten Deformationen und deren Auswirkung auf die Festigkeit der Klebverbindung wird ein FE-Modell der Rohbaukarosserie des Passat Variant verwendet. Die Karosserieblechteile werden durch Schalenelemente vom Typ S3R und S4R

(vgl. Tabelle 4-1) abgebildet. Dem Aluminiumdach (EN AW-6016, Blechdicke: 1,15 mm) und den Aluminiumdachquerträgern (EN AW-6016, Blechdicke: 1,5 mm) wird die Materialdefinition von Aluminium ($E = 70 \text{ GPa}$, $\nu = 0,34$, $\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) zu Grunde gelegt. Den anderen Blechteilen sowie dem Dachflansch des Seitenteils außen (DC06 + ZE 50/50 BPO, Blechdicke: 0,75 mm) wird die linear-elastische Materialdefinition von Stahl ($E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$, $\alpha = 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) zugeordnet. Wie in Abbildung 5-1 dargestellt, wird die 1 mm dicke Klebschicht durch Volumenelemente vom Typ C3D8 (vgl. Tabelle 4-1) abgebildet. Das mechanische Verhalten des Klebstoffes wird durch das Materialmodell nach Lambrecht definiert. Als Plastizitätskriterium werden die in Tabelle 3-10 beschriebenen Ansatzfreiwerte verwendet.

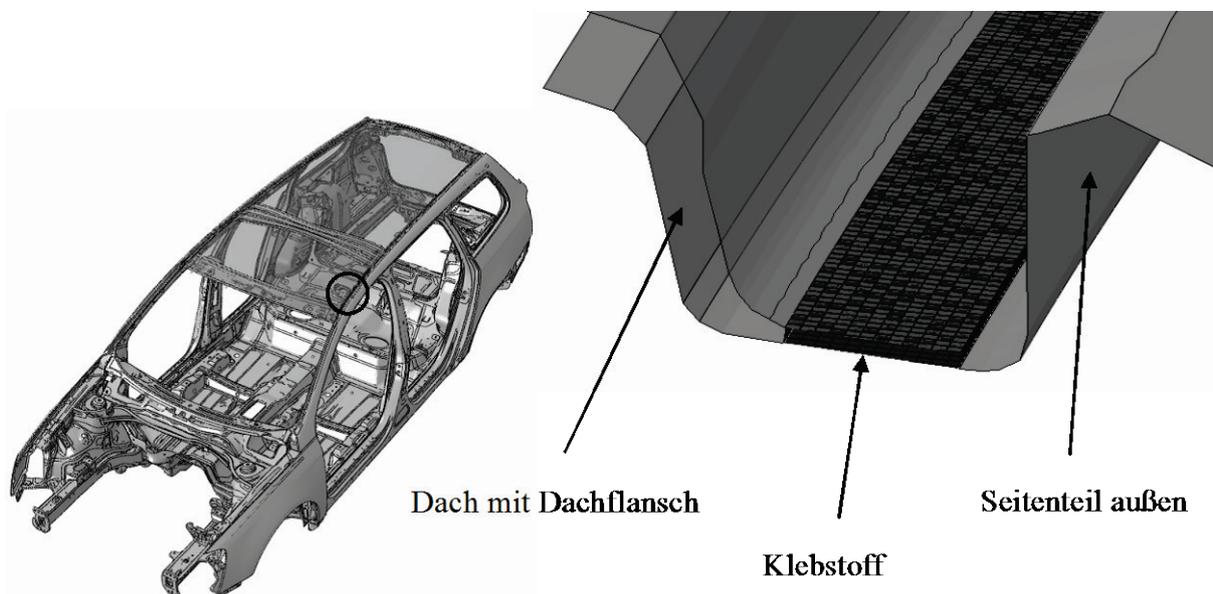


Abbildung 5-1: 1-reihige Klebstoffabbildung durch Volumenelemente vom Typ C3D8

Das Befestigungskonzept des Aluminiumdaches auf der Rohkarosserie ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Der seitliche Dachflansch weist jeweils sechs Langlöcher unterschiedlicher Dimension auf. Im Dachrahmen befinden sich an diesen Stellen aufgeschweißte Gewindebolzen, die im Idealfall mittig in den Langlöchern positioniert sind. Dadurch entsteht ein Spiel zwischen den Langlöchern und den Gewindebolzen. Innerhalb dieses Spiels wird die Ausdehnung des Daches nicht behindert. Die vertikale Fixierung des Daches für den KTL-Bad-durchlauf erfolgt über Kunststoffschraubmutter aus Polyamid. Eine zusätzliche vertikale Fixierung wird über das Bördeln von Laschen des vorderen Dachflansches erreicht. Der hintere Dachflansch wird in seiner Position zur Karosserie über Blindnieten fixiert.

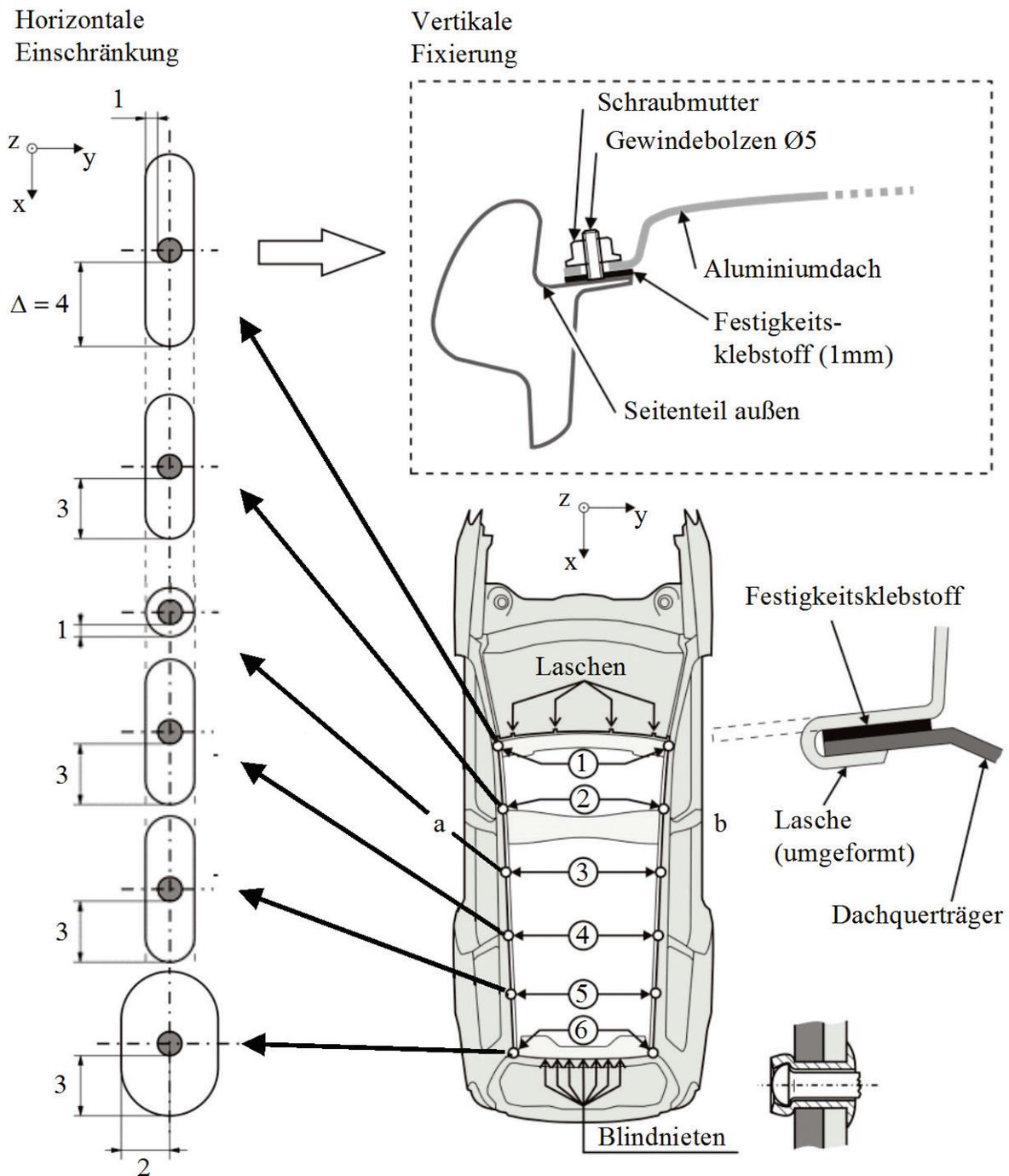


Abbildung 5-2: Befestigungskonzept eines Aluminiumdaches auf einer Stahlkarosserie

Aufgrund der vielfältigen Anforderungen an das Befestigungskonzept des Aluminiumdaches ist dieses hybridgefügt. Unter Hybridfügen ist die Kombination eines mechanischen Fügeverfahrens mit dem Kleben zu verstehen. Das mechanische Fügeverfahren hat beim Hybridfügen die Aufgabe die Bauteile zueinander zu fixieren bis der Strukturklebstoff vollständig vernetzt ist. Die eigentliche Verbindungsfestigkeit liefert der Strukturklebstoff im vernetzten Zustand.

[Mes01]

Im folgenden Abschnitt wird die numerische Umsetzung des Befestigungskonzeptes im FE-Modell beschrieben. Die Langlöcher ermöglichen dem Dach eine gewisse Toleranz gegenüber thermischer Längenausdehnung. Im FE-Modell werden die kinematischen Eigenschaften der Langlochverbindung durch ein Connector-Element des Typs CONN3D2 (vgl. Tabelle 4-1) [Das09] realisiert, das eine freie Bewegung des Gewindebolzens innerhalb des Langloches simuliert. Dieses Element verbindet zwei Punkte mit kinematischen und mechanischen Eigenschaften. Abbildung 5-3 zeigt exemplarisch für Langloch 2 den nicht stetigen Kraft-Weg-Verlauf für ein Connector-Element an. Der Abstand zwischen dem Gewindebolzen und dem Rand des Langloches beträgt 2 mm. Innerhalb des Freiraums werden keine Kräfte vom Connector-Element in Richtung z_c übertragen. Stößt der Gewindebolzen an den Langlochrand steigt die Kraft linear auf einen maximalen Endwert an. Dadurch wird die Nachgiebigkeit des Gewindebolzens dargestellt. Analog werden für die verbleibenden translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade Kraft-Weg-Beziehungen aufgestellt.

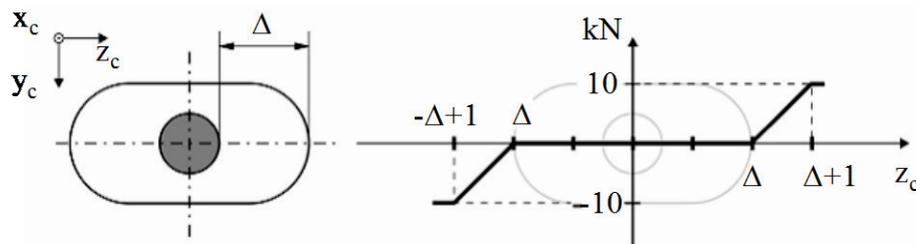


Abbildung 5-3: Simulierter Kraft-Weg-Verlauf des Langloches 2 in die Koordinatenrichtung z_c

Da die Längs- und Querachse des einzelnen Langloches im Dachflansch nicht mit den Koordinatenrichtungen des Fahrzeugkoordinatensystem zusammenfallen, wird jeweils ein lokales Koordinatensystem definiert. Die z -Komponente (hier: z_c) verläuft jeweils parallel zur Gewindebolzenlängsachse.

5.3 Temperaturverteilung in der Karosseriestruktur

Zur Abbildung des KTL-Lacktrocknungsprozesses im FE-Modell sind prinzipiell zwei Varianten möglich. Bei der ersten Variante wird ein auf Messungen an der Rohkarosserie basierender Temperaturverlauf aus dem Lacktrocknungsofen verwendet. Der Temperaturverlauf bewirkt eine homogene Temperaturbelastung des FE-Modells. Bei Anwendung des Temperaturverlaufes wird die Annahme getroffen, dass die Karosserie gleichmäßig aufgewärmt und abgekühlt wird. Bezogen auf das FE-Modell bedeutet das, dass alle Knoten zu einem bestimmten Zeitpunkt t die gleiche Temperatur aufweisen.

Eine weitere Möglichkeit den KTL-Lacktrocknungsprozess abzubilden, bietet eine thermische FE-Simulation. Temperaturmessungen an verschiedenen Messstellen zeigen, dass die Temperaturen in der Rohbaukarosserie inhomogen sind. Bei der Temperaturverteilung werden diese inhomogenen Temperaturen in der Rohbaukarosserie abgebildet und so ist die Möglichkeit geboten Karosseriebereiche unterschiedlich aufzuwärmen bzw. abzukühlen. Diese Variante spiegelt die reale Temperaturverteilung in der Rohbaukarosserie hinreichend genau wider. Bezogen auf das FE-Modell bedeutet das, dass jedem Knoten n zu einem bestimmten Zeitpunkt t eine Temperatur zugewiesen ist. Somit besteht die Temperaturverteilung aus einer Vielzahl von Temperaturverläufen. In dieser Arbeit wird die Temperaturverteilung verwendet, da diese den realen Prozess genauer abbildet. Die auf der thermischen FE-Simulation basierende Temperaturverteilung für das Modell des Passat Variant basiert auf einem KTL-Lacktrocknungssofen aus Halle 12 im Werk Wolfsburg. Abbildung 5-4 stellt die Temperaturverteilung im Modell exemplarisch nach 750 s im KTL-Lacktrocknungssofen dar.

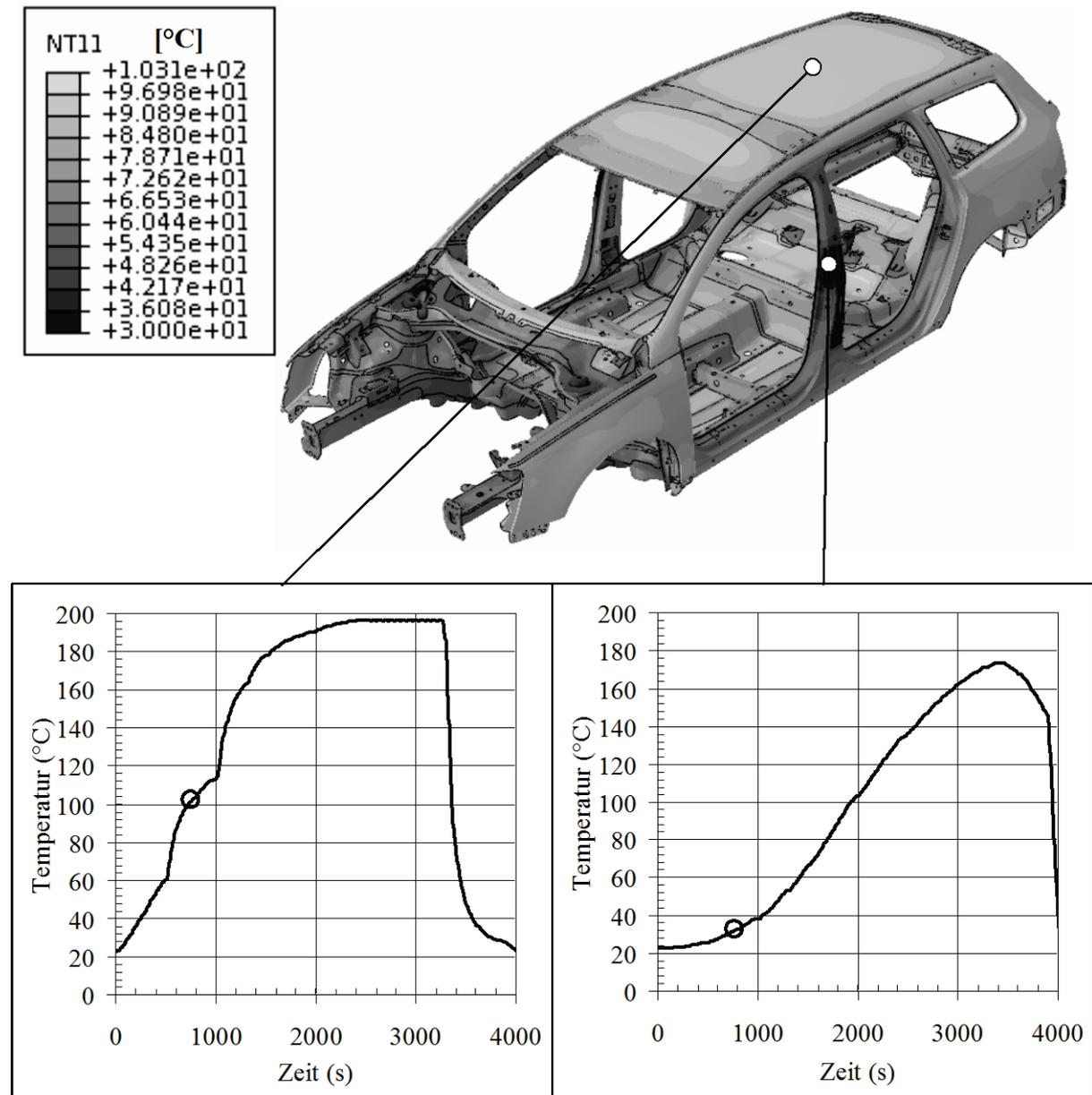


Abbildung 5-4: Temperaturverteilung im Modell des Passat Variant nach 750 s im KTL-Lacktrocknungsprozess

Deutlich wird dabei die unterschiedliche Temperaturverteilung in der Rohbaukarosserie während der Aufheizung. Während ein Bereich der B-Säule noch relativ kalt (ca. 30 °C) ist, weist die Oberseite des Daches schon eine Temperatur von ca. 100 °C auf. Das bedeutet, dass nach 750 s im KTL-Lacktrocknungssofen zwischen Bereichen des Daches und der B-Säule ein Temperaturgradient von 70 K besteht. Nach bisherigen Erkenntnissen wird daher angenommen, dass der Temperaturverlauf (homogene Temperaturbelastung) die $\Delta\alpha$ -Problematik wiedergibt. Für eine Berechnung von Deformationen heißt das, dass der Einfluss einer betrachteten Größe dargestellt werden kann. Bei der Temperaturverteilung (inhomogene Temperaturbelastung) gibt zusätzlich den Einfluss des Temperaturgradienten wieder.

5.4 Ergebnisse der numerisch berechneten Mischbaustruktur

Im folgenden Abschnitt werden die FE-Simulationsergebnisse der in Kapitel 5.1 beschriebenen Fahrzeugstruktur während und nach Abschluss des KTL-Lacktrocknungsprozesses beschrieben.

Abbildung 5-5 zeigt die berechnete bleibende Deformation des Aluminiumdaches in z-Richtung. Diese Verzüge treten auf, wenn Gleitungen infolge des KTL-Lacktrocknungsprozesses durch die damit verbundene Klebstoffvernetzung „eingefroren“ werden. Zu erkennen sind die Abzeichnungen zweier globaler Einzüge in der Mitte des Daches. Die maximale Abweichung von der Sollgeometrie beträgt 7,05 mm in negativer z-Richtung.

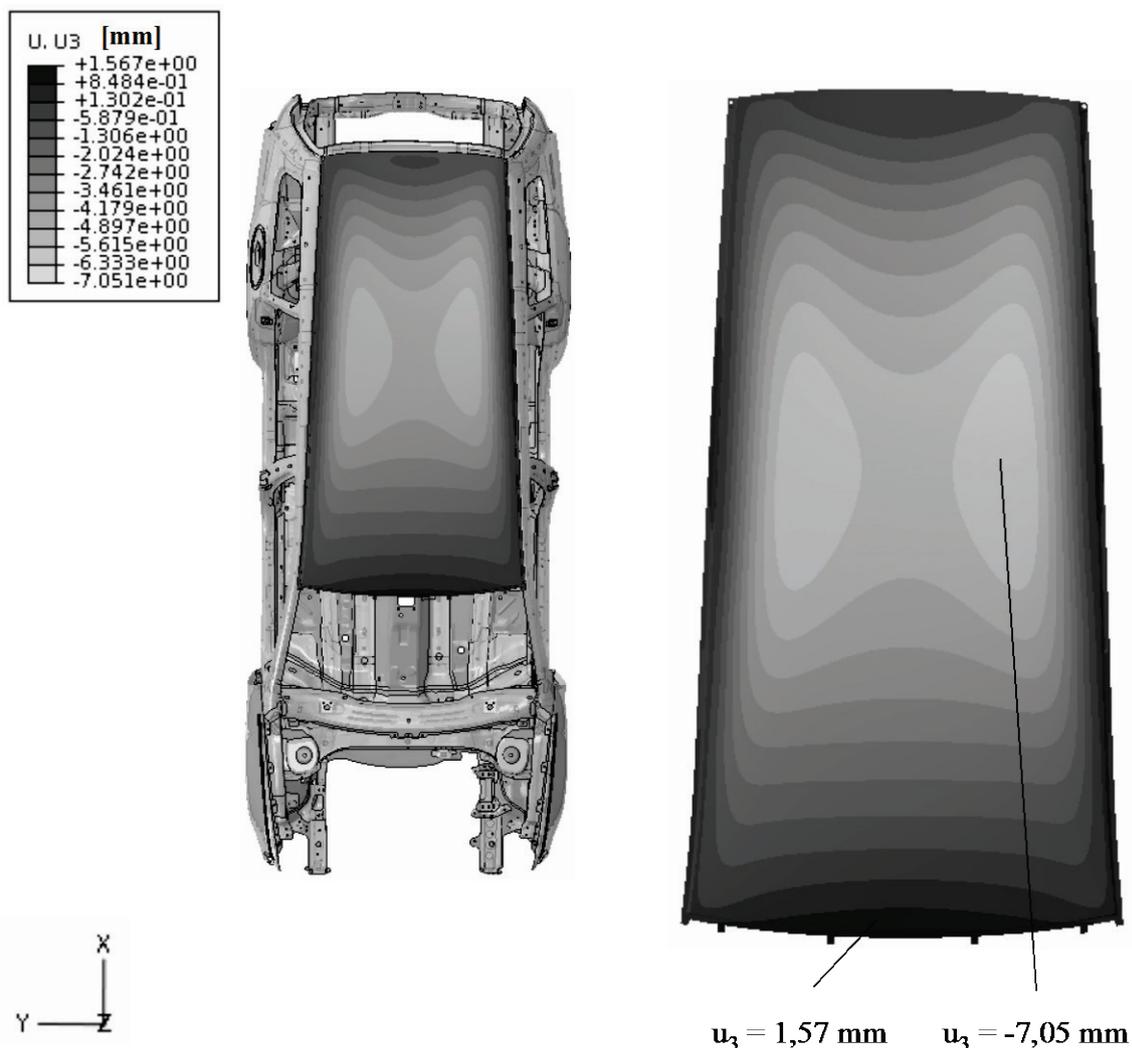
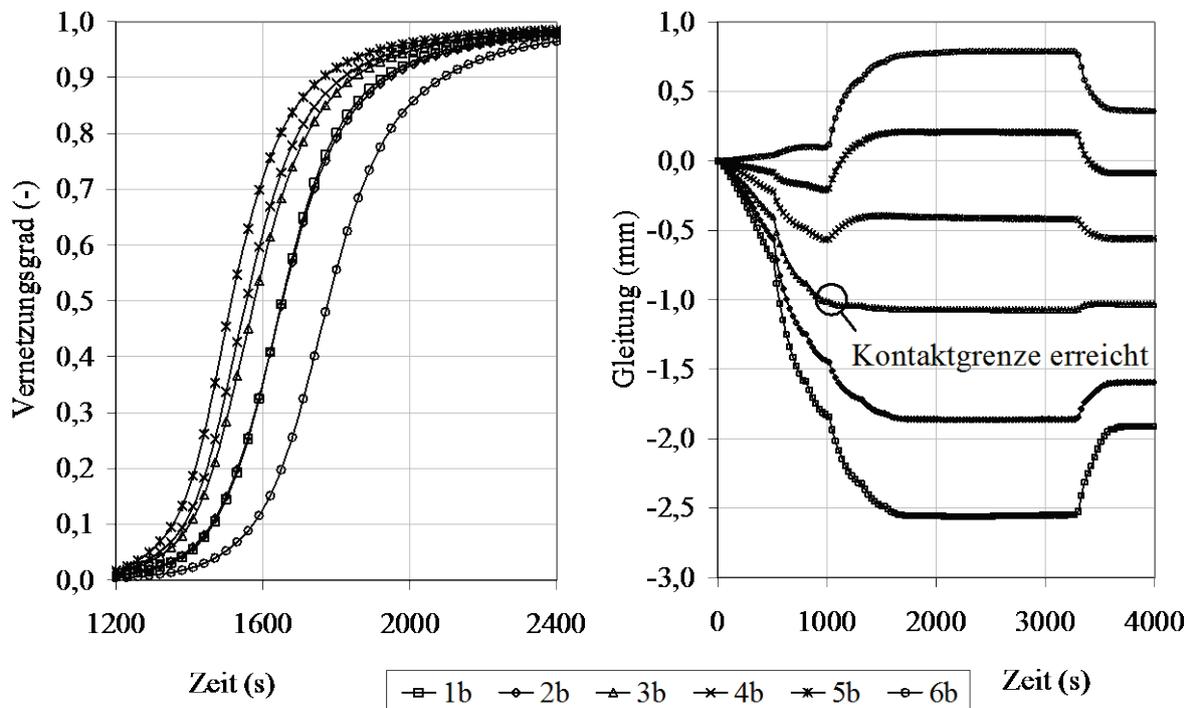


Abbildung 5-5: Berechnete bleibende Deformationen des Daches nach KTL-Lacktrocknungsprozess

Aufgrund der Temperaturverteilung im Dach und im Dachflansch vernetzt der Klebstoff zeitlich versetzt. Abbildung 5-6 zeigt die Vernetzung des Klebstoffs in den Fixierpunkten 1b bis 6b sowie deren Gleitung im Dachflansch, worauf später näher eingegangen wird. Es wird

deutlich, dass der Klebstoff im mittleren Dachbereich schneller vernetzt als im vorderen oder hinteren. Das kann auf die höhere Massekonzentration durch die Dachquerträger zurückgeführt werden. Die Fixierpunkte 1b, 2b und 6b sind in der Nähe eines Dachquerträgers. Die anderen Fixierpunkte weisen einen gewissen Abstand zu diesen Massekonzentrationen auf.



Beanspruchung: thermische Belastung aufgrund des KTL-Lackrocknungsprozesses

Klebstoff: Betamate 1496V (d_K : 1,0 mm)

Auswerteelemente: Klebschichtelemente (Position 1b - 6b)

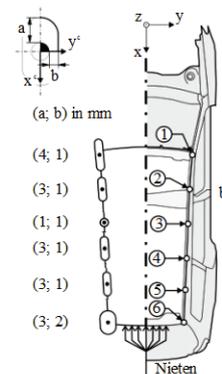
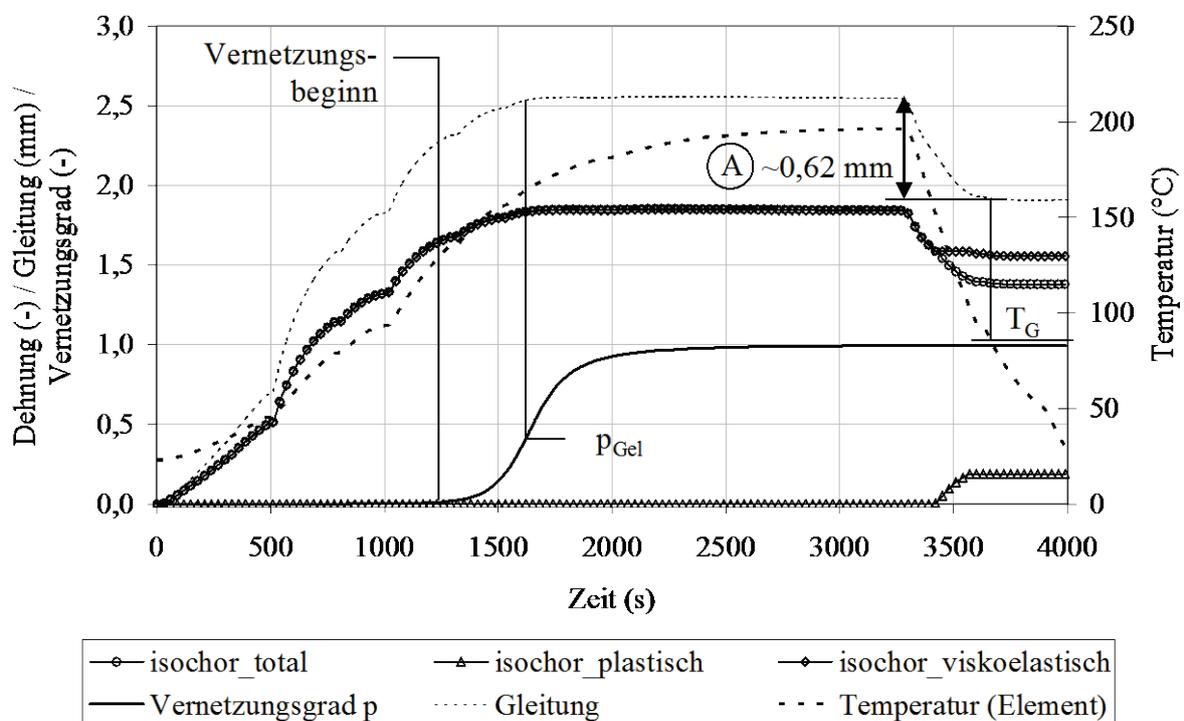


Abbildung 5-6: Unterschiedliche Klebstoffvernetzung und Gleitungen im Dachflansch während des KTL-Lackrocknungsprozesses

In dieser Arbeit wird die Gleitung im Dachflansch wie folgt definiert: Werden beim Kleben die Klebflächen zweier Fügeteile nicht fest zueinander fixiert, treten aufgrund von der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen nahezu kräftefreie Verschiebungen auf, solange der Klebstoff unvernetzt ist bzw. den Gelpunkt nicht überschritten hat. Durch die erhöhte Temperatur wirkt der Klebstoff wie ein Schmiermittel, da seine Viskosität mit zunehmender Temperatur zunächst sinkt. In einem lokalen Bezugssystem (Koordinatensystem) wird ein Fügeteil über das andere relativ dazu feststehende Fügeteil verschoben. Die Verschiebungsdifferenz in

x-Richtung (Fahrzeuginnenachse) der beiden Fügebauteile zueinander wird hier als Gleitung bezeichnet. Infolge der Klebstoffvernetzung bleibt diese Gleitung bestehen und führt in der Regel zu sichtbaren Verzügen der Fügebauteile (vgl. Abbildung 5-5) und zu Spannungen in der Klebschicht (vgl. Abbildung 5-8). Aufgrund der thermischen Belastung durch den KTL-Lacktrocknungsprozess treten im Dachflansch unterschiedlich große Gleitungen auf. Diese werden exemplarisch für die Fixierpunkte 1b bis 6b in Abbildung 5-6 dargestellt. Daraus wird deutlich, dass der Fixierpunkt 3 an seine über Kontakt definierte Grenze von 1 mm in x-Richtung stößt und somit eine weitere Gleitung des Daches unterbindet. Die größte Gleitung von 2,56 mm tritt erwartungsgemäß im vorderen Bereich des Daches (Fixierpunkt 1b) auf. Aus diesem Grund wird der Fixierpunkt 1b im folgenden Abschnitt näher betrachtet.



Beanspruchung: thermische Belastung aufgrund des KTL-Lacktrocknungsprozesses

Prüftemperaturen: siehe Diagramm

Vernetzungsgrad: siehe Diagramm

Klebstoff: Betamate 1496V (d_K : 1,0 mm)

Auswerteelemente: Klebschichtelement (Position 1b)

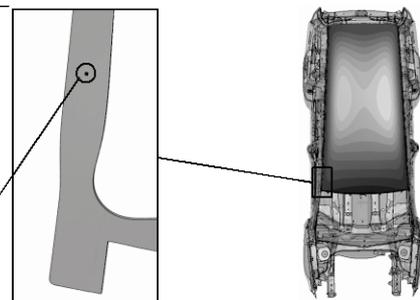
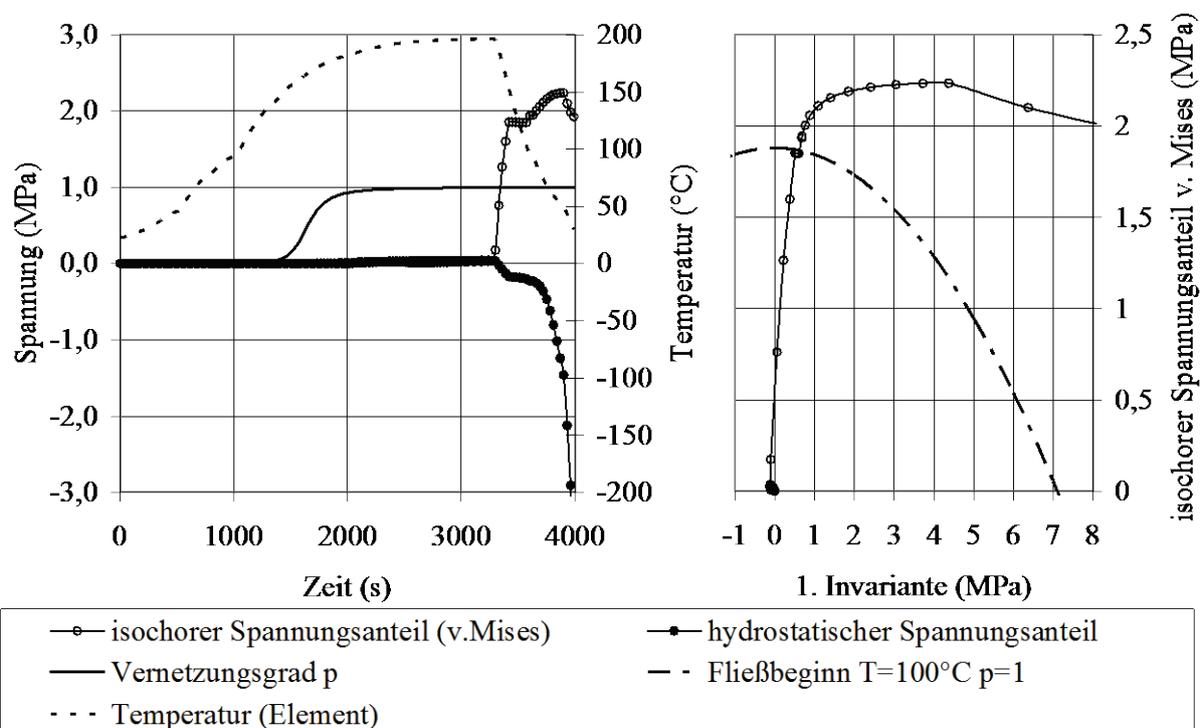


Abbildung 5-7: Gleitung im Dachflansch, isochore Déhnungsanteile, örtlicher Temperaturverlauf und Vernetzungsgrad des Klebschichtelements 1b

In der Abbildung 5-7 ist die Gleitung des Fixierpunktes 1b im Dachflansch, dessen Déhnungsanteile ($> 0,1$), der örtliche Temperaturverlauf sowie der Vernetzungsgrad des Ele-

ments dargestellt. In der Aufheizphase vor Beginn der Vernetzung bis zum Gelpunkt, das hier dem Anstoßen des Fixierpunktes 3 an dessen Kontaktgrenze (vgl. Abbildung 5-6) entspricht, gleitet der Klebstoff 2,56 mm quasi kräftefrei. Bis zu Beginn der Abkühlphase ist der Klebstoff vollständig vernetzt.

Aufgrund des Kontaktes im Fixierpunkt 3b treten nach dem Gelpunkt in der Aufheizphase keine Gleitungen mehr im Dachflansch auf, dadurch auch keine Spannungen. Erst die Rückgleitungen in der Abkühlphase führen zu Spannungen in der Klebschicht (vgl. Abbildung 5-8, linkes Diagramm). Überschreiten die Spannungen den Fließbeginn (vgl. Abbildung 5-8, rechtes Diagramm) treten im Klebschichtelement isochore plastische Dehnungsanteile auf (vgl. Abbildung 5-7 sowie Abbildung 5-9).



Beanspruchung: thermische Belastung aufgrund des KTL-Lacktrocknungsprozesses

Prüftemperaturen: siehe Diagramm

Vernetzungsgrad: siehe Diagramm

Klebstoff: Betamate 1496V (d_K : 1,0 mm)

Auswerteelemente: Klebschichtelement (Position 1b)

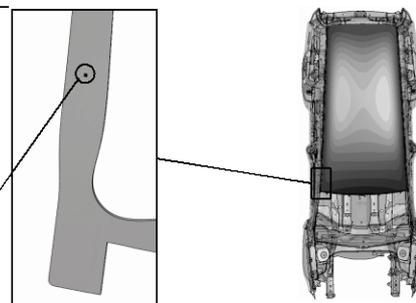


Abbildung 5-8: Spannungen, Fließbeginn, örtlicher Temperaturverlauf und Vernetzungsgrad des Klebschichtelements 1b

In Abbildung 5-9 sind die lokalen isochoren plastischen Dehnungsanteile der Klebschicht im Bereich des vorderen und hinteren Daches dargestellt. Das Auftreten plastischer Dehnungen

im vorderen Bereich der Klebschicht ist auf die Gleitung des Daches während des KTL-Lacktrocknungsprozesses zurückzuführen. Das plastische Fließen im hinteren Bereich ist auf eine Kompression des Klebstoffs aufgrund einer lokalen Abstützung des Daches zurückzuführen.

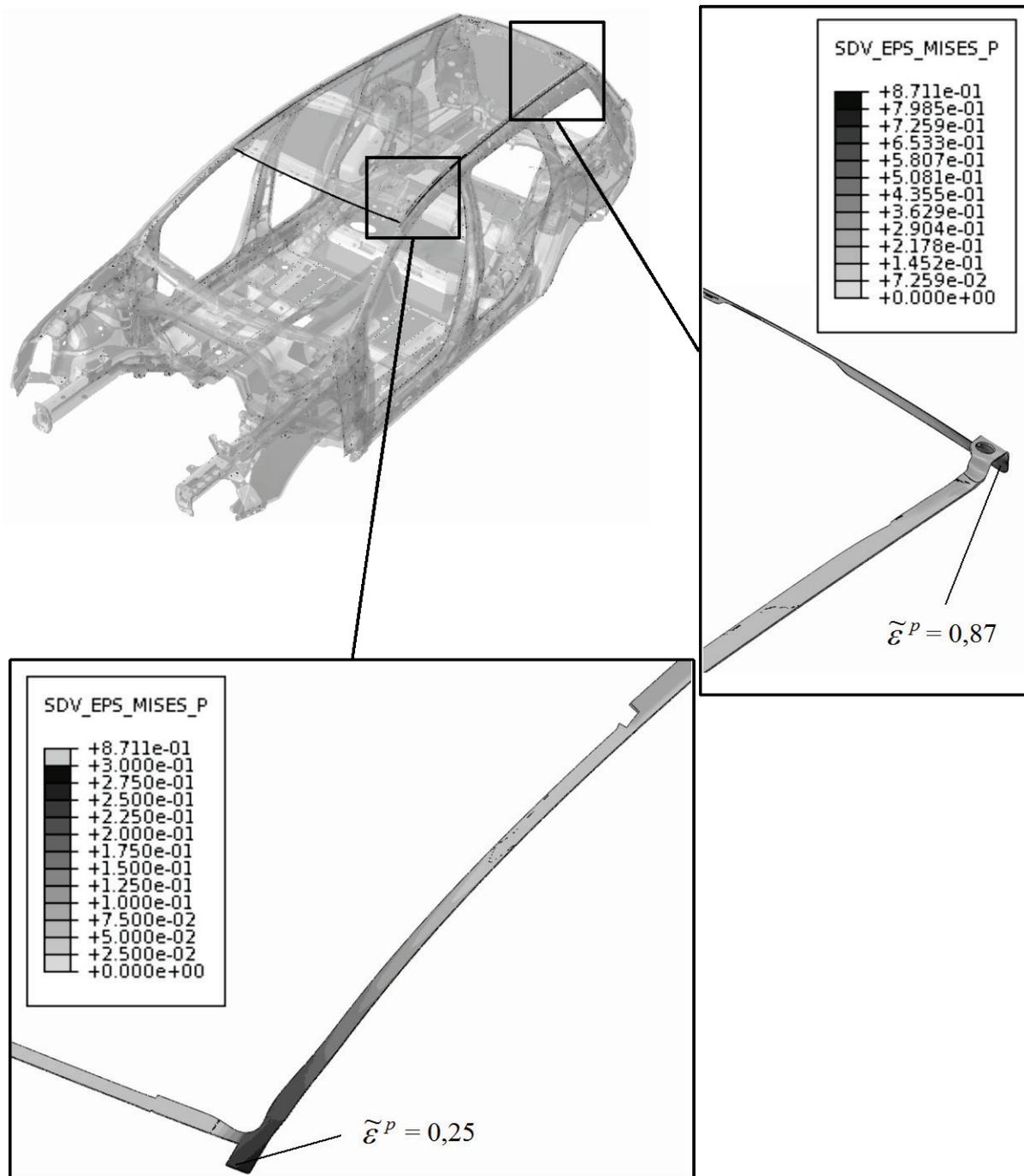


Abbildung 5-9: Lokale isochore plastische Dehnungen der Klebschicht im Bereich des vorderen und des hinteren Daches

Am Ende des simulierten KTL-Lacktrocknungsprozesses sind am Fixierpunkt 1b 1,94 mm Gleitung des Daches im Dachflansch „eingefroren“. Die viskoelastischen Dehnungsanteile

hingegen können im Laufe der Zeit zu null relaxieren. Letztendlich zeigen die plastischen Dehnungen die hochbeanspruchten Bereiche in der Klebschicht. Die durch den simulierten Prozess auftretenden Gleitungen in diesen Bereichen können von diesem Klebstoff nicht mehr übertragen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit liefert einen Beitrag zur Auslegung geklebter Karosserie-Mischbaustrukturen. Die derzeit verwendeten Strukturklebstoffe genügen komplexen mechanischen und schon im Fertigungsprozess hohen thermischen Beanspruchungen. Die Beschreibung der physikalischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs über den gesamten Prozess hinweg ist für die Auslegung der Klebverbindung vor allem in Mischbaustrukturen entscheidend. Temperaturen von bis zu 200 °C im KTL-Lacktrocknungsprozess führen zum einen zur Vernetzung der Klebstoffe, zum anderen aber auch zur thermischen Ausdehnung der artfremden Werkstoffpaarungen. Die so auftretenden Relativverschiebungen in großflächigen, geklebten Mischbaustrukturen können aufgrund der in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensweise schon in der Konzeptphase numerisch berechnet und die damit verbundenen bleibenden Deformationen sowie festigkeitsrelevanten Bereiche in der Klebschicht prognostiziert werden. Für die Dimensionierung der Klebverbindungen ist hiermit ein Nachweis der temperatur- und vernetzungsgradabhängigen Klebstofffestigkeit unter mehrachsiger Beanspruchung erbracht worden.

Im ersten Teil der Arbeit wird auf die werkstoffmechanischen Grundlagen der Klebstoffe eingegangen. Begriffe wie Festigkeit, Elastizität, Viskoelastizität und Plastizität werden in den Kontext der Klebstoffe eingeordnet. Aufgrund seiner Kompressibilität ist im werkstoffmechanischen Verhalten der Einfluss der hydrostatischen Spannungsanteile zu berücksichtigen. Dies wirkt sich zum Beispiel auf den Beginn des plastischen Fließens aus.

Um den Klebstoff im Fertigungsprozess und darüber hinaus numerisch beschreiben bzw. in einem Materialmodell formulieren zu können, sind verschiedene Untersuchungen zum Materialverhalten und die entsprechende Parameteridentifikation der Materialkennwerte durchgeführt worden. Neben der Beschreibung der viskoelastischen Eigenschaften, liegt ein Schwerpunkt der Arbeit auf der Ermittlung des temperatur- und vernetzungsgradabhängigen Spannungs-Verformungs-Verhaltens des untersuchten Klebstoffs und der Ableitung des Fließbeginns. Dazu wurden quasistatische Zug- und Torsionsversuche an stumpf geklebten Rohrproben unter verschiedenen Beanspruchungskombinationen durchgeführt. Der so ermittelte Fließbeginn berücksichtigt demnach auch den hydrostatischen Spannungszustand und somit die Mehrachsigkeit des Spannungszustandes, der bei Klebstoffen nicht zu vernachlässigen ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Klebstofffestigkeiten erwartungsgemäß mit steigender Prüftemperatur und sinkendem Vernetzungsgrad abnehmen. Weiterhin konnte festgestellt werden,

dass Proben deren Prüftemperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur liegen keine signifikanten Festigkeiten mehr aufweisen.

Im vierten Kapitel erfolgt eine Validierung des Materialmodells. Nach einer grundlegenden Beschreibung werden die quasistatischen Versuche an den stumpf geklebten Rohrproben numerisch validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Prüftemperatur von 80 °C die numerisch berechneten Spannungs-Verformungs-Kurven flacher verlaufen, als im Versuch ermittelt. Der Grund hierfür kann an der Nähe zum Glasübergangspunkt ($T_G = 85 \text{ °C}$) und den damit verbundenen größeren viskoelastischen Dehnungsanteilen liegen. Der Glasübergang wird in der numerischen Berechnung einem Temperaturpunkt zugewiesen. In Realität ist der Glasübergang hingegen als Bereich definiert. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass der Glasübergangspunkt im Versuch noch nicht erreicht worden ist. In einem zweiten Validierungsschritt erfolgt die Übertragung auf eine zweite Probengeometrie. Hierfür wird die einfach überlappte Zugscherprobe unter einer erzwungenen Gleitung während der Vernetzung und im Zugscherversuch nach vollständiger Vernetzung des Klebstoffs untersucht. Die experimentellen und numerischen Untersuchungen identifizieren einen nahezu zeitgleichen Kraftanstieg. Auch das Kraftniveau ist zwischen Experiment und numerischer Berechnung unter Berücksichtigung der Plastizität vergleichbar. Die numerischen Ergebnisse für die Zugscherversuche mit dem vollständig vernetzten Klebstoff bilden die Anfangssteifigkeit aus den Versuchen sehr gut ab. Unter Berücksichtigung der Plastizität kann auch der Beginn des plastischen Fließens der Klebschicht numerisch abgebildet werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Plastizitätskriterien aus den Versuchen mit stumpf geklebten Rohrproben auf einfach überlappte Zugscherproben mit hinreichender Genauigkeit übertragen werden können.

Im letzten Abschnitt der Arbeit wird das Materialmodell für die numerische Berechnung einer geklebten Mischbaustruktur im KTL-Lacktrocknungsprozess angewendet. Am Beispiel des Volkswagen Passat Variant (Typ VW462) wird ein hybridgefügtes Aluminiumdach in einer Stahlkarosserie hinsichtlich des Deformationsverhaltens und der Klebverbindung im KTL-Lacktrocknungsprozess numerisch untersucht. Zur Abbildung der inhomogenen Temperaturverteilung in der Rohbaukarosserie wird eine auf einer thermischen FE-Simulation beruhende Temperaturbelastung erzeugt. Die FE-Simulationsergebnisse zeigen, dass am Ende des KTL-Lacktrocknungsprozesses bleibende Deformationen im Aluminiumdach auftreten. Diese Verzüge entstehen durch thermisch bedingte Gleitungen des Daches im Dachflansch, die infolge der Klebstoffvernetzung „eingefroren“ werden. Gleitungen, die vor dem Gelpunkt des Klebstoffs auftreten, werden von diesem quasi kräftefrei übertragen, spielen demnach für die Fes-

tigkeitsbetrachtung des Klebstoffs keine Rolle. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass in der Abkühlphase im vorderen Bereich des Daches die Spannungen im Klebstoff die Fließgrenze überschreiten und dadurch plastische Dehnungen auftreten. In diesen hoch beanspruchten Bereichen der Klebschicht ist mit einer eingeschränkten Betriebsfestigkeit bis hin zum Versagen zu rechnen.

Die in dieser Arbeit beschriebene Berechnungsmethode bietet darüber hinaus eine Vielzahl von weiteren Anwendungsfeldern und Bewertungsmöglichkeiten, z. B. Befestigungskonzepte von geklebten Karosserie-Anbauteilen, Einsatz und Einfluss von Betriebsmitteln zur Fixierung von Karosseriestrukturen im Prozessdurchlauf, Abzeichnungen auf dünnen Blechstrukturen im Bereich der Klebung und Einfluss „eingefrorener“ Relativverschiebungen auf Karosseriespaltmaße und -toleranzen, um nur einige zu nennen.

Für eine zukünftige Anwendung der Methode im automobilen Produktentstehungsprozess (PEP) ist u. A. der experimentelle Nachweis der in dieser Arbeit numerisch berechneten Karosserie-Mischbaustruktur wünschenswert. Weiterhin ist die Übertragbarkeit der Methode der Kennwertermittlung auf weitere Klebstoffe bzw. Klebstoffklassen, wie Unterfütterungs- und Falzklebstoffe, zu überprüfen. Aber auch ein Bewertungskriterium für die zulässige Beanspruchung eines Klebstoffs zur betriebsfesten Auslegung dieser Verbindungen gilt es zu erarbeiten. Nach [Fuh06] kann so ein Bewertungskriterium z. B. eine plastische Vergleichsdehnung sein, die aus Schwingfestigkeitsuntersuchungen an einfach überlappten Zugscherproben bei einer zulässigen Last für eine Schwingspielzahl von $N = 10^7$ Lastwechseln ermittelt wird.

Literatur

- [Ado90] Adolf, D.; Martin, J. E.: *Time-cure superposition during crosslinking*, *Macromolecules*, Vol. 23, Issue 15, S.: 3700-3704, 1990
- [Ado96] Adolf, D.; Martin, J.E.: *Calculation of Stresses in Crosslinking Polymers*, *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 1, S.: 13-34, 1996
- [Ado97] Adolf, D.; Chambers, R.: *Verification of the capability for quantitative stress prediction during epoxy cure*, *Polymer*, Vol. 38, No. 21, S.:5481-5490, 1997
- [Ado98] Adolf, D.; Martin, J.E.; Chambers, R.; Burchett, S.; Guess, T.: *Stresses during thermoset cure*, *Journal of Materials Research* 13, S.: 530–550, 1998.
- [Avr41] Avrami, M.: *Kinetics of phase change. III: Granulation, Phase Change and Microstructures*, *Journal of Chemical Physics*, Nr. 9, S. 177–184, 1941
- [Bis92] Bischoff, J.; Hennemann, O. D.: *Thermoanalyse zur Bewertung von Klebstoffen*, *Adhäsion Kleben & Dichten*, Jg. 36, H. 12; S.: 32-36, 1992
- [Blu06] Blumenthal, G.; Linke, D.; Vieth, S.: *Chemische Kinetik (Reaktionskinetik)*, *Chemie Grundwissen für Ingenieure*, S. 197-212; 2006
- [Bor03] Bornemann, J.: *Experimentelle und numerische Untersuchung von EP-Klebstoffen im Hinblick auf die Modellbildung zur Berechnung geklebter Verbindungen*, *Dissertation*, Universität Kassel, 2003
- [Chr82] Christensen, R. M.: *Theory of viscoelasticity : an introduction*, Academic Press, New York, 1982
- [Das09] Dassault Systèmes: *Abaqus 6.9 Online Documentation - Abaqus Analysis User's Manual*, Version 6.9, 2009
- [Des00] Deshpande, V. S.; Fleck, N. A.: *Isotropic constitutive models for metallic foams*, *Journal of the mechanics and physics of solids*, Band 48, Nr.6-7, S.: 1253-1283, 2000
- [Dom08] Domininghaus, H., Elsner, P., Eyerer, P., Hirth, T.: *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [Dow01] Dow Automotive AG: *Technisches Datenblatt Betamate 1496V*, 2001
- [Ehr03] Ehrenstein, G. W.; Wacker, M.; Trawiel, P.: *Härtung von Reaktionsharzen Time-Temperature-Transition-Diagramm*, *Online-Aufsatz*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, <http://www.lkt.techfak.uni-erlangen.de/publikationen/online-aufsätze/ttt.pdf>, Stand: 15.01.2009, 2003
- [Euk07] EU Kommission: *Questions and answers on the proposed regulation to reduce CO2 emissions from cars*, MEMO/07/597, Brüssel, 2007

- [Fer80] Ferry, J.D.: *Viscoelastic Properties of Polymers*, 3. Auflage, Wiley-Verlag, New York, 1980
- [Flo73] Flory, P.J.: *Principles of Polymer Chemistry*, Cornell University Press, Ithaca / London, 1973
- [Fuh06] Fuhrmann, T.: *Zur Berechnung von Klebverbindungen in Fahrzeugstrukturen aus Faser-Kunststoff-Verbunden und Metallen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode*, Dissertation Universität Paderborn, 2006
- [Gau07] Gaul, L.; Schmidt, A.: *Bestimmung des komplexen Elastizitätsmoduls eines Polymers zur Identifikation eines viskoelastischen Stoffgesetzes mit fraktionalen Zeitableitungen*, <http://www.iam.uni-stuttgart.de/Mitarbeiter/Schmidt/papers/dgzfp01.pdf>, Stand: 05.11.2008, 2007
- [Gro05] Grote, K.-H., Feldhusen, J.: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*, 21. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [Gro07] Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.; Wriggers, P.: *Technische Mechanik Band 4, Hydro-mechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [Hab06] Habenicht, G.: *Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 5. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [Hal91] Hale, A.; Macosko, C. W.; Bair, H. E.: *Glass Transition Temperature as a Function of Conversion in Thermosetting Polymers*, *Macromolecules*, Nr. 24, S.:2610-2621
- [Hal96] Halley, P. J.; Mackay, M. E.: *Chemorheology of thermosets - an overview*, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, Nr. 5, S. 593–609, 1996
- [Hen28] Hencky, H.: *Über die Form des Elastizitätsgesetzes bei ideal elastischen Stoffen*, *Technische Physik*, Nr. 9, S. 214–247, 1928
- [Her03] Herdy, M.: *Introductory Theory Manual ViscoData&Viscoshift*, http://www.viscodata.de/Short_Introduction.pdf, Stand: 14.01.2009, 2003
- [Her99] Herdy, M., Achenbach, M.: *Ermittlung viskoelastischer Materialparameter aus thermorheologischen Messwerten mittels Evolutionsstrategie*, Tagungsband XXVI., FEM Kongress, Baden-Baden, 1999
- [Hes96] Heskamp, D.: *Chemo-Rheologie von reaktiven Epoxidharz-Klebstoffen*, Dissertation, Universität – Gesamthochschule - Paderborn, 1996
- [Hes98] Heskamp, D.; Broecker, H. C.; Pahl, M. H.: *Chemo-Rheology of Cross-Linking Polymers*, *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 21, No. 2, S.: 149-153, 1998

- [Hof99] Hoffmann, T.; Böhle, U.; Häusler, O.; Kamlah, M.: *Finite-Elemente-Untersuchungen zu einem Mikrodrucksensor*, <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA6261.pdf>, Stand: 05.11.2008, 1999
- [Huf05] Hufenbach, W.; Lustig, V.; Gude, M.; Protz, R.: *Mehrachsige Schwingfestigkeitsuntersuchungen an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen*, Tagungsband der 19. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren TECHNOMER 2005 Chemnitz, S.139, 2005
- [Huf08a] Hufenbach, W.; Adam, F.; Lepper, M.: *Möglichkeiten und Wege des automobilen Leichtbaus als Beitrag zur Reduzierung des Kraftstoff-Verbrauchs und der CO₂-Emissionen*, ATZ/MTZ Konferenz Energie, S.:23; 2008
- [Huf08b] Hufenbach, W.; Gude, M.; Freund, A.; Kläger, O.: *Simulation des Versagensverhaltens von Blindnietverbindungen in hybriden CFK/Al-Karosseriestrukturen*, Konstruktion, No.: 1-2, S.: 62-65, 2008
- [Jen04] Jendry, J.: *Entwicklung von Berechnungsmodellen zur Abschätzung der Verformung geklebter dünnwandiger Stahlbauteile in Leichtbaukonstruktionen während der Warm-aushärtung*, Dissertation, Universität Paderborn, 2004
- [Joh39] Johnson, W. A.; Mehl, R. F.: *Reaction Kinetics in processes of nucleation and growth*, Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Nr. 135, S. 416–458, 1939
- [Lam08] Lambrecht, M.; Paulke, S.: *Theorie-Manual*, P+Z Engineering GmbH, 2008
- [Lop02] López, J.; Ramírez, C.; Torres, A.; Abad, M. J.; Barral, L.; Cano, J.; Diez, F. J.: *Isothermal curing by dynamic mechanical analysis of three epoxy resin systems: gelation and vitrification*, H.: 83, S. 78-85, 2002
- [Mah05] Mahnken, R.; Schlimmer, M.: *Simulation of Strength Difference in Elasto-Plasticity for Adhesive Materials*, International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol 63, No.: 10, S.: 1461-1477, 2005
- [Mar90] Martin, J. E.; Adolf, D.: *Constitutive equation for cure induced stresses in viscoelastic material*, Macromolecules, Nr. 23, S.:5014-5019
- [Mar96] Martin, J. E.; Adolf, D.: *Calculation of stresses in crosslinking polymers*, Journal of Composite Materials, Vol.30, Nr.1, S.:13-34, 1996
- [Mei03] Meichsner, G.; Schröder, J.; Mezger, T.G.: *Lackeigenschaften messen und steuern: Rheologie- Grenzflächen- Kolloide*, Vincentz Network, 2003
- [Mes01] Meschut, G.: *Fügen durch Umformen und Kleben - Grundlagen, Technologie, Anwendungen*, Fügetechnik im Automobilbau, Berlin, 2001

- [Mes03] Meschut, G., Gänsicke, T.: *Experimentelle und rechnerische Analyse der Klebschichtbeanspruchung in Verbindungen aus thermisch inkompatiblen Werkstoffen*, Schweißen und Schneiden, No.: 7, S.: 366-372, 2003
- [Met09] Mettler Toledo AG, *Mehr über Dichte*,
http://ch.mt.com/mt/ed/brochures/More_density_0x00024670000576170008f77d.jsp,
Stand: 05.01.2009
- [Meu01] Meuwissen, M.; de Boer, H.; Steijvers, H.; Schreurs, P.; Geers, M.: *Residual Stresses in Microelectronics induced by Thermoset Packaging Materials During Cure*; Proceedings EuroSimE, Paris, S.: 163-169, 2001
- [Mie01] Miehe, C.; Lambrecht, M.: *Algorithms for Computation of Stresses and Elastic Moduli in Terms of Seth-Hill's Family of Generalized Strain Tensors*, Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol.: 17, S.: 337-353, 2001
- [Net07] Netzsch Software Proteus - Thermal Analysis, Version 4.8.4, Netzsch Gerätebau GmbH, Selb, 2007
- [Net08] Netzsch Software Thermokinetics 3, Version 2008.05, Netzsch Gerätebau GmbH, Selb, 2008
- [NN01a] N.N.: DIN 12092, *Bestimmung der Viskosität*, 2001
- [NN01b] N.N.: DIN EN 10002-1:2001, *Metallische Werkstoffe – Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*, 2001
- [NN03] N.N.: DIN EN ISO 6721-1, *Bestimmung dynamisch mechanischer Eigenschaften, Teil 1: Allgemeine Grundlagen*, 2003
- [NN04a] N.N.: DIN EN 14869-2, *Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen, Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügebauteile (ISO 11003-2:2001, modifiziert)*, 2004
- [NN04b] N.N.: DIN EN 10327, *Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus weichen Stählen zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen*, 2004
- [NN05] N.N.: DIN 51005, *Thermische Analyse (TA) – Begriffe*, 2005
- [NN07a] N.N.: DIN EN 10292, *Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen*, 2007
- [NN07b] N.N.: DIN EN 573-3, *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug, Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen*, 2007
- [NN08] N.N.: DIN EN 1465, *Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungskleblagen*, 2008

- [NN09a] N.N.: DIN EN 10305-1, *Präzisionsstahlrohre - Technische Lieferbedingungen*, Teil 1: Nahtlose kaltgezogene Rohre, 2009
- [NN09b] N.N.: DIN EN 485-2, *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bänder, Bleche und Platten*, Teil 2: Mechanische Eigenschaften, 2009
- [NN09c] N.N.: DIN EN 10152, *Elektrolytisch verzinkte kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen*, 2009
- [NN80] N.N.: DIN 53752, *Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten*, 1980
- [NN94] N.N.: DIN 53765, *Thermische Analyse: Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren*, 1994
- [NN95] N.N.: DIN EN ISO 10365, *Klebstoff – Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder*, 1995
- [NN96a] N.N.: DIN EN ISO 527-1, *Bestimmung der Zugeigenschaften*, Teil 1: Allgemeine Grundsätze, 1996
- [NN96b] N.N.: ÖNORM EN ISO 11003-1, *Klebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen*, Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpfgeklebter Hohlzylinder (ISO 11003-1:1993), 1996
- [NN96c] N.N.: DIN 53281, *Prüfung von Klebverbindungen - Probenherstellung*, 1996
- [Pap01] Papadopoulos, P.; Lu, J.: *On the Formulation and Numerical Solution of Problems in Anisotropic Finite Plasticity*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Vol.: 190, S.: 4889-4910, 2001
- [Pry01] Pryds, N.; Eldrup, M.; Schroder Pedersen, A.: *Crystallization kinetics of Mg-Cu-Y bulk amorphous alloy*, Proceedings of the 22nd Riso International Symposium on Material Science, 2001
- [Rec94] Rechenberg, I.: *Evolutionsstrategie '94*, Frommann-Holzboog-Verlag, Stuttgart, 1994
- [Ret91] Retting, W.: *Mechanik der Kunststoffe: Die mechanischen Eigenschaften von Polymerwerkstoffen*; Hanser-Verlag, München, 1991
- [Sch03a] Schlimmer, M.: *Grundlagen zur Berechnung des mechanischen Verhaltens von strukturellen Klebverbindungen des Fahrzeugbaus*, Tagungsband 10. Paderborner Symposium Fügetechnik, 2003
- [Sch03b] Schlimmer, M.: *Untersuchungen zum mechanischen Langzeitverhalten von Klebverbindungen unter hygrothermischen Bedingungen mit Berücksichtigung der Zeitraffung*, Abschlussbericht des AiF-Vorhabens Nr. 12.677N, 2003
- [Sch04] Schlimmer, M.: *Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen (Teil 4)*, Adhäsion 9, S.42-45, 2004

- [Sch05] Schlimmer, M.; Hahn, O.; Hennemann, O. –D.; *Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile im Fahrzeugbau*, Abschlussbericht des AiF-Vorhabens Nr. 76ZN (FOSTA P593), 2005
- [Sch06a] Schlimmer, M.: *Auslegung zähelastischer Metall/Faserverbandsandwich-Verbindungen*, Abschlussbericht des AiF-Vorhabens Nr. 13.762N, 2006
- [Sch06b] Schlimmer, M.: *Experimentelle Untersuchungen und Materialmodellierung zur Berechnung von Klebverbindungen*, 5. LS-Dyna Anwenderforum, Ulm, 2006
- [Sch07a] Schlimmer, M.; Hahn, O.; Hennemann, O. –D.; *Methodenentwicklung zur Berechnung und Auslegung geklebter Stahlbauteile im Fahrzeugbau bei schwingender Beanspruchung*, Abschlussbericht des AiF-Vorhabens Nr. 141ZN (FOSTA P653), 2007
- [Sch07b] Schlimmer, M.: *Klebverbindungen – Versuch und Simulation*, 6. LS-Dyna Anwenderforum, Frankenthal, 2007
- [Sch08] Schlimmer, M.; Matzenmiller, A.; Mahnken, R.; Hahn, O.; Hennemann, O. -D; Dilger, K.; Gumbsch, P.; Thoma, K.: *Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlklebverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung*, Abschlussbericht zum FOSTA-Forschungsvorhaben P676, 2008
- [Sch74] Schlimmer, M.: *Fließverhalten plastisch kompressibler Werkstoffe*, Dissertation RWTH Aachen, 1974
- [Sei08] Seiffert, U.; Rainer, G.: *Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz - Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis*, Vieweg + Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2008
- [Sim98] Simo, J. C.; Hughes T.J.R.: *Computational inelasticity*, Springer-Verlag, New York [u.a.], Vol.: XIV, S.: 392, 1998
- [Vdi96] VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik: *VDI-Richtlinie: VDI 3633, Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen – Begriffsdefinitionen*, 1996
- [Vis08a] ViscoShift V 1.61, Ingenieurbüro Herdy IBH, 2001-2008
- [Vis08b] ViscoData V 1.9, Ingenieurbüro Herdy IBH, 1999-2008
- [Wen05] Wenzel, M.: *Spannungsbildung und Relaxationsverhalten bei der Aushärtung von Epoxidharzen*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2005
- [Win97] Winter, H. H.; Mours, M.: *Rheology of polymers near liquid solid transitions*, *Advances in Polymer Science*, Jg. 136, S.: 167-230, 1997

Anhang

Tabelle A-1: Bezeichnung der stumpf geklebten Rohrproben

Beanspruchungsart			Zug		Kombiniert zugdominiert	Kombiniert schubdominiert	Kombiniert schubdominiert	Torsion		
Biaxialverhältnis	$\xi = \frac{\dot{\gamma}_{xy}}{2\dot{\epsilon}_x}$		0		0,5	2	6	∞		
Prüfgeschwindigkeiten		mm/s	3,33E-04		2,50E-04	1,17E-04	4,60E-05	0,00E+00		
		°/s	0,00E+00		9,50E-04	1,78E-03	2,11E-03	2,29E-03		
Dehnrates	$\dot{\epsilon}_x$	1/s	1,11E-03		8,33E-04	3,89E-04	1,53E-04	0,00E+00		
Gleitrate	$\dot{\gamma}_{xy}$	1/s	0,00E+00		8,29E-04	1,56E-03	1,84E-03	2,00E-03		
Hauptdehnrates	$\dot{\epsilon}_1$	1/s			0,001					
Kennung Bruchbilder				Abbildung 3-33					Abbildung 3-34	
Prüftemperatur	T	°C	23							
Vernetzungsgrad	p		0,98	C68	1A, 1B	D86	D89	D110	C2	
				C69		D87	D91	D111	C6	8A, 8B
				C70		D88	D92	D112	C8	
			0,90	D34	2A, 2B		D43		D23	
				D40			D44		D24	9A, 9B
				D116			D57		D25	
			0,80	D117						
				D118						
				E5	3A, 3B		E1		D3	
			0,75	E6			E3		D4	
				E7			E4		D15	
									D16	
			0,75	F1			F7		D35	
				F3			F11		D36	11A, 11B
				F4			F29			
0,75	F8									
	F15	4A, 4B								
Prüftemperatur	T	°C	50							
Vernetzungsgrad	p		0,98	D93	5A, 5B	D96	D99		C28	
				D94		D97	D100		C30	
			0,90	D95		D98	D101		C31	12A, 12B
				D46			D49		D53	
				D47			D51		D54	
				D48			D52		D55	
			0,80	D127						
				E11			E14		E8	
			0,75	E12			E15		E9	
				E18			E17		E10	
Prüftemperatur	T	°C	80							
Vernetzungsgrad	p		0,98	C62		D73	D70		C44	
				C63		D74	D71		C47	
			0,90	C64	6A, 6B	D75	D72		C48	13A, 13B
				D60			D63		D56	
				D61			D64		D58	
				D62			D65		D59	
			0,80							
Prüftemperatur	T	°C	100							
Vernetzungsgrad	p		0,98	D76		D102	D84		D80	
				D77		D103	D85		D81	14A, 14B
				D78	7A, 7B	D104	D107		D82	
				D79		D105	D108			
			0,90	D109		D106				

untersucht

nicht untersucht

Tabelle A-2: Chemische Zusammensetzung der Stahlsorte E235 [NN09a]

Tabelle 2 — Chemische Zusammensetzung (Schmelzenanalyse) ^a

Stahlsorte		Massenanteile in %					
Kurzname	Werkstoffnummer	C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S ^b max.	Al _{total} ^c min.
E215	1.0212	0,10	0,05	0,70	0,025	0,025	0,025
E235	1.0308	0,17	0,35	1,20	0,025	0,025	0,015
E355	1.0580	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	0,020

^a Elemente, die in dieser Tabelle nicht erwähnt sind (siehe aber Fußnote c), dürfen dem Stahl, mit Ausnahme von Elementen zum Desoxydieren und/oder Abbinden von Stickstoff, ohne Zustimmung des Bestellers nicht absichtlich zugegeben werden. Es sind alle angemessenen Vorkehrungen zu treffen, um die Zufuhr unerwünschter Elemente aus dem Schrott oder anderen Einsatzstoffen, die bei der Stahlherstellung verwendet werden, zu vermeiden.

^b Siehe Option 2.

^c Diese Anforderung ist nicht anwendbar, vorausgesetzt, dass der Stahl ausreichende Anteile an stickstoffabbindenden Elementen wie Ti, Nb oder V enthält. Falls Titan verwendet wird, muss der Hersteller die Einhaltung von $(Al + Ti) \geq 0,020$ überprüfen. Der Anteil dieser Elemente ist anzugeben.

Tabelle A-3: Mechanische Eigenschaften der Stahlsorte E235 bei RT [NN09a]

Tabelle 4 — Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur

Stahlsorte		Mindestwerte für den Lieferzustand ^a											
Kurzname	Werkstoffnummer	+C ^b		+LC ^b		+SR			+A ^c		+N		
		R _m MPa	A %	R _m MPa	A %	R _m MPa	R _{eH} MPa	A %	R _m MPa	A %	R _m MPa	R _{eH} ^d MPa	A %
E215	1.0212	430	8	380	12	380	280	16	280	30	290 bis 430	215	30
E235	1.0308	480	6	420	10	420	350	16	315	25	340 bis 480	235	25
E355	1.0580	640	4	580	7	580	450 ^e	10	450	22	490 bis 630	355	22

^a R_m: Zugfestigkeit; R_{eH}: obere Streckgrenze (siehe aber 11.1); A: Bruchdehnung. Bezüglich der Symbole für den Lieferzustand siehe Tabelle 1.

^b In Abhängigkeit vom Kaltumformgrad im letzten Stuch kann die Streckgrenze bis nahe an die Zugfestigkeit heranreichen. Für Berechnungszwecke werden folgende Verhältniszwecke empfohlen:
 — Lieferzustand +C: $R_{eH} \geq 0,8 R_m$
 — Lieferzustand +LC: $R_{eH} \geq 0,7 R_m$

^c Für Berechnungszwecke wird der folgende Verhältniszwecke empfohlen: $R_{eH} \geq 0,5 R_m$.

^d Bei Rohren mit einem Außendurchmesser ≤ 30 mm und einer Wanddicke ≤ 3 mm sind die R_{eH}-Mindestwerte um 10 MPa niedriger als in dieser Tabelle angegeben.

^e Bei Rohren mit einem Außendurchmesser > 160 mm gilt: $R_{eH} \geq 420$ MPa.

Tabelle A-4: Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften der Stahlsorte DC06 [NN09c]

Tabelle 1 — Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften von elektrolytisch verzinkten Flacherzeugnissen aus weichen Stählen^a

Bezeichnung		Symbol für die Art der Oberflächenveredelung	Einteilung nach EN 10020	Des-oxidations-art	Geltungs-dauer der mecha-nischen Eigen-schaften	Ober-flächen-art	Freiheit von Fließ-figuren	R_e MPa	R_m MPa	A_{80} % min. b	r_{90} min. c, d	n_{90} min. c	Chemische Zusammensetzung (Schmelzenanalyse) Massenanteile in %, max.				
Kurz-name	Werkstoff-nummer												C	P	S	Mn	Ti
DC01*	1.0330	+ZE	unlegierter Qualitätsstahl ^f	nach Wahl des Herstellers	—	A B	—	270 bis 410	28	—	—	0,12	0,045	0,045	0,60	—	
DC03	1.0347	+ZE	unlegierter Qualitätsstahl ^f	voll beruhigt	6 Monate	A, B	3 Monate	—/240 ^g	270 bis 370	34	1,3	—	0,10	0,035	0,035	0,45	—
DC04	1.0338	+ZE	unlegierter Qualitätsstahl ^f	voll beruhigt	6 Monate	A, B	6 Monate	—/220 ^g	270 bis 350	37	1,6	0,170	0,08	0,030	0,030	0,40	—
DC05	1.0312	+ZE	unlegierter Qualitätsstahl ^f	voll beruhigt	6 Monate	A, B	6 Monate	—/200 ^g	270 bis 330	39	1,9	0,190	0,06	0,025	0,025	0,35	—
DC06	1.0873	+ZE	legierter Qualitätsstahl	voll beruhigt	6 Monate	A, B	unbegrenzt	—/180 ⁱ	270 bis 350	41	2,1	0,210	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3 ^j
DC07	1.0898	+ZE	legierter Qualitätsstahl	voll beruhigt	6 Monate	A, B	unbegrenzt	—/160 ⁱ	250 bis 310	43	2,5	0,220	0,01	0,020	0,020	0,20	0,2 ^j

^a Die Werte für die Streckgrenze gelten bei nicht ausgeprägter Streckgrenze für die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$, sonst für die untere Streckgrenze R_{eL} . Bei Dicken $\leq 0,7$ mm, jedoch $> 0,5$ mm, sind um 20 MPa höhere Maximalwerte für die Streckgrenze zulässig. Bei Dicken $\leq 0,5$ mm sind um 40 MPa höhere Maximalwerte für die Streckgrenze zulässig.

^b Bei Dicken $\leq 0,7$ mm, jedoch $> 0,5$ mm, sind um 2 Einheiten niedrigere Mindestwerte für die Bruchdehnung zulässig. Bei Dicken $\leq 0,5$ mm sind um 4 Einheiten niedrigere Mindestwerte für die Bruchdehnung zulässig.

^c Die r_{90} - und n_{90} -Werte, ermittelt nach 7.5.2.3, gelten nur für Erzeugnisdicken $\geq 0,5$ mm.

^d Für Dicken $> 2,0$ mm vermindert sich der r_{90} -Wert um 0,2.

^e Es wird empfohlen, Erzeugnisse aus der Stahlsorte DC01+ZE innerhalb von 6 Wochen nach der Verfügbarkeit zu verarbeiten.

^f Sofern bei der Anfrage und Bestellung nichts anderes vereinbart wurde, können die Stahlsorten DC01+ZE, DC03+ZE, DC04+ZE und DC05+ZE als (z. B. mit Bor oder Titan) legierte Stähle geliefert werden.

^g Für Berechnungszwecke kann für die Stahlsorten DC01, DC03, DC04 und DC05 ein unterer Grenzwert von 140 MPa angerechnet werden.

^h Der obere R_e -Grenzwert von 280 MPa bei der Stahlsorte DC01+ZE gilt nur für eine Frist von 8 Tagen nach der Verfügbarkeit des Erzeugnisses.

ⁱ Für Berechnungszwecke kann für R_e ein unterer Grenzwert von 130 MPa für die Stahlsorte DC06 und von 110 MPa für die Stahlsorte DC07 angenommen werden.

^j Titan kann durch Niob ersetzt werden. Kohlenstoff und Stickstoff müssen vollständig abgebunden sein.

Tabelle A-5: Technische Lieferbedingungen für die Zinkauflage ZE50/50 [NN09c]

Tabelle 2 — Elektrolytische Zinküberzüge (siehe auch 6.9.4 und 6.9.5)

Auflagen-kennzahl	Nennzinkauflage auf jeder Seite ^a		Mindestwert der Zinkauflage auf jeder Seite ^b	
	Dicke μm	Masse g/m^2	Dicke μm	Masse g/m^2
ZE25/25	2,5	18	1,7	12
ZE50/50	5,0	36	4,1	29
ZE75/75	7,5	54	6,6	47
ZE100/100	10,0	72	9,1	65

^a Eine Auflagenmasse von 50 g/m^2 entspricht einer Schichtdicke von etwa 7,1 μm .

^b Siehe 7.4.4 und 7.5.4.

Tabelle A-6: Chemische Zusammensetzung der Stahlsorte HX340LAD [NN07a]

Tabelle 1 — Chemische Zusammensetzung (Schmelzenanalyse)

Bezeichnung			Massenanteile in %							
Stahlsorte		Symbole für die Art des Schmelztauchüberzugs	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb
Kurzname ^a	Werkstoffnummer		max.	max.	max.	max.	max.	min.	max.	max.
HX180YD	1.0921	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,01	0,15	0,70	0,06	0,025	–	0,12	0,09
HX180BD	1.0914	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,1	0,50	0,70	0,06	0,025	0,015	0,12	0,09
HX220YD	1.0923	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,01	0,20	0,90	0,08	0,025	–	0,12	0,09
HX220BD	1.0919	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,1	0,50	0,70	0,08	0,025	0,015	0,12	0,09
HX260YD	1.0926	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,01	0,25	1,60	0,10	0,025	–	0,12	0,09
HX260BD	1.0924	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,1	0,50	0,80	0,10	0,025	0,015	0,12	0,09
HX260LAD	1.0929	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,12	0,50	0,60	0,030	0,025	0,015	0,12	0,09
HX300YD	1.0927	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,01	0,30	1,30	0,10	0,025	–	0,12	0,09
HX300BD	1.0930	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,11	0,50	0,80	0,12	0,025	0,015	0,12	0,09
HX300LAD	1.0932	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,11	0,50	1,00	0,030	0,025	0,015	0,15	0,09
HX340LAD	1.0933	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,11	0,50	1,00	0,030	0,025	0,015	0,15	0,09
HX380LAD	1.0934	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,11	0,50	1,40	0,030	0,025	0,015	0,15	0,09
HX420LAD	1.0935	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	0,11	0,50	1,40	0,030	0,025	0,015	0,15	0,09

^a **H** Flacherzeugnisse aus höherfesten Stählen zum Kaltumformen; **X** Walzzustand (warm gewalzt oder kalt gewalzt) nicht festgelegt; **nnn** Mindestwert der Dehngrenze $R_{p0,2}$, in MPa; **B** Bake-hardening; **Y** IF-Stahl; **LA** niedriglegiert (mikrolegiert); **D** für Schmelztauchüberzüge.

Tabelle A-7: Mechanische Eigenschaften der Stahlsorte HX340LAD bei RT [NN07a]

Tabelle 3 — Mechanische Eigenschaften (in Querrichtung) von kontinuierlich schmelztauchveredelten Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen^a

Bezeichnung			0,2 %-Dehngrenze ^a	Bake-Hardening-Index BH_2	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Senkrechte Anisotropie	Verfestigungs-exponent
Stahlsorte		Symbol für die Art des Schmelztauchüberzugs	$R_{p0,2}$	BH_2	R_m	$A_{80}^{b,c}$	r_{90}^c	n
Kurzname	Werkstoffnummer		MPa	MPa min.	MPa	% min.	min.	min.
HX180YD	1.0921	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	180 bis 240	–	340 bis 400	34	1,7 ^d	0,18
HX180BD	1.0914	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	180 bis 240	35	290 bis 360	34	1,5	0,16
HX220YD	1.0923	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	220 bis 280	–	340 bis 420	32	1,5 ^d	0,17
HX220BD	1.0919	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	220 bis 280	35	320 bis 400	32	1,2	0,15
HX260YD	1.0926	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	260 bis 320	–	380 bis 440	30	1,4 ^d	0,16
HX260BD	1.0924	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	260 bis 320	35	360 bis 440	28	–	–
HX260LAD	1.0929	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	260 bis 330	–	350 bis 430	26	–	–
HX300YD	1.0927	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	300 bis 360	–	390 bis 470	27	1,3 ^d	0,15
HX300BD	1.0930	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	300 bis 360	35	400 bis 480	26	–	–
HX300LAD	1.0932	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	300 bis 380	–	380 bis 480	23	–	–
HX340LAD	1.0933	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	340 bis 420	–	410 bis 510	21	–	–
HX380LAD	1.0934	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	380 bis 480	–	440 bis 560	19	–	–
HX420LAD	1.0935	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	420 bis 520	–	470 bis 590	17	–	–

^a Bei ausgeprägter Streckgrenze gelten die Werte für die untere Streckgrenze (R_{eL}).

^b Verminderte Mindestwerte der Dehnung gelten für Dicken ≤ 5 mm (minus 4 Einheiten) und für Dicken > 5 mm und $\leq 0,7$ mm (minus 2 Einheiten).

^c Bei AS-, AZ- und ZF-Überzügen verringern sich die A_{80} -Werte um 2 Einheiten und die r_{90} -Werte um 0,2.

^d Bei Dicken $> 1,5$ mm vermindern sich die r_{90} -Werte um 0,2.

Tabelle A-8: Technische Lieferbedingungen für die Zinkauflage Z100MB [NN04b]

Tabelle 3 — Lieferbare Auflagen

Auflagen- kennzahl	Mindestauflagenmasse ^a in g/m ² , beidseitig		Theoretische Anhaltswerte für Schichtdicken je Seite bei der Einzelflächenprobe in µm		Dichte g/cm ³
	Dreiflächen- probe	Einzelflächen- probe	Typischer Wert ^b	Bereich ^c	
Zink-Auflagenmasse (Z)					
Z100	100	85	7	5 bis 12	7,1
Z140	140	120	10	7 bis 15	
Z200	200	170	14	10 bis 20	
Z225	225	195	16	11 bis 22	
Z275	275	235	20	15 bis 27	
Z350	350	300	25	19 bis 33	
Z450	450	385	32	24 bis 42	
Z600	600	510	42	32 bis 55	
Auflagenmasse der Zink-Eisen-Legierung (ZF)					
ZF100	100	85	7	5 bis 12	7,1
ZF120	120	100	8	6 bis 13	
ZF140	140	120	10	7 bis 15	
Auflagenmasse der Zink-Aluminium-Legierung (ZA)					
ZA095	95	80	7	5 bis 12	6,9
ZA130	130	110	10	7 bis 15	
ZA185	185	155	14	10 bis 20	
ZA200	200	170	15	11 bis 21	
ZA255	255	215	20	15 bis 27	
ZA300	300	255	23	17 bis 31	
Auflagenmasse der Aluminium-Zink-Legierung (AZ)					
AZ100	100	85	13	9 bis 19	3,8
AZ150	150	130	20	15 bis 27	
AZ185	185	160	25	19 bis 33	
Auflagenmasse der Aluminium-Silicium-Legierung (AS)					
AS060	60	45	8	6 bis 13	3,0
AS080	80	60	14	10 bis 20	
AS100	100	75	17	12 bis 23	
AS120	120	90	20	15 bis 27	
AS150	150	115	25	19 bis 33	
^a Siehe 7.9. ^b Die Schichtdicken können aus den Auflagenmassen berechnet werden (siehe 7.9.1). ^c Der Verbraucher kann davon ausgehen, dass diese Grenzwerte auf der Ober- und Unterseite eingehalten werden.					

Tabelle A-9: Chemische Zusammensetzung der Aluminiumsorte EN AW-6016 [NN07b]

Tabelle 6 — Aluminiumlegierungen — Serie 6000 — Al MgSi

Bezeichnung der Legierung		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Bemerkungen	Andere Beimengungen ^a		Alu- minium min.
Numerisch	Chemische Symbole													Einzel	Ins- gesamt ^b	
EN AW-6003	EN AW-Al Mg1Si0,8	0,35-1,0	0,6	0,10	0,8	0,8-1,5	0,35	—	0,20	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6005	EN AW-Al SiMg	0,6-0,9	0,35	0,10	0,10	0,40-0,6	0,10	—	0,10	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg	0,50-0,9	0,35	0,30	0,50	0,40-0,7	0,30	—	0,20	0,10	—	—	0,12-0,50 Mn + Cr	0,05	0,15	Rest
EN AW-6005B	EN AW-Al SiMg	0,45-0,8	0,30	0,10	0,10	0,40-0,8	0,10	—	0,10	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6008	EN AW-Al SiMgV	0,50-0,9	0,35	0,30	0,30	0,40-0,7	0,30	—	0,20	0,10	—	0,05-0,20	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6011	EN AW-Al Mg0,9Si0,9Cu	0,6-1,2	1,0	0,40-0,9	0,8	0,6-1,2	0,30	0,20	1,5	0,20	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6012	EN AW-Al MgSiPb	0,6-1,4	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,30	—	0,30	0,20	—	—	0,7 Bi; 0,40-2,0 Pb	0,05	0,15	Rest
EN AW-6012A	EN AW-Al MgSiSn	0,6-1,4	0,50	0,40	0,20-1,0	0,6-1,2	0,30	—	0,30	0,20	—	—	0,7 Bi; 0,40-2,0 Sn	0,05	0,15	Rest
EN AW-6013	EN AW-Al Mg1Si0,8CuMn	0,6-1,0	0,50	0,6-1,1	0,20-0,8	0,8-1,2	0,10	—	0,25	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6014	EN AW-Al Mg0,6Si0,6V	0,30-0,6	0,35	0,25	0,05-0,20	0,40-0,8	0,20	—	0,10	0,10	—	0,05-0,20	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6015	EN AW-Al Mg1Si0,3Cu	0,20-0,40	0,10-0,30	0,10-0,25	0,10	0,8-1,1	0,10	—	0,10	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6016	EN AW-Al Si1,2Mg0,4	1,0-1,5	0,50	0,20	0,20	0,25-0,6	0,10	—	0,20	0,15	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6018	EN AW-Al Mg1SiPbMn	0,50-1,2	0,7	0,15-0,40	0,30-0,8	0,6-1,2	0,10	—	0,30	0,20	—	—	c	0,05	0,15	Rest
EN AW-6023	EN AW-Al Si1Sn1MgBi	0,6-1,4	0,50	0,20-0,50	0,20-0,6	0,40-0,9	—	—	—	—	—	—	0,30-0,8 Bi; 0,6-1,2 Sn	0,05	0,15	Rest
EN AW-6025	EN AW-Al Mg2,5SiMnCu	0,8-1,5	0,7	0,20-0,7	0,6-1,4	2,1-3,0	0,20	—	0,50	0,20	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6056	EN AW-Al Si1MgCuMn	0,7-1,3	0,50	0,50-1,1	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	—	0,10-0,7	d	—	—	d	0,05	0,15	Rest
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	0,30-0,6	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,6	0,05	—	0,15	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	—	0,25	0,15	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6061A	EN AW-Al Mg1SiCu	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	—	0,25	0,15	—	—	e	0,05	0,15	Rest
EN AW-6063	EN AW-Al Mg0,7Si	0,20-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10	—	0,10	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6063A	EN AW-Al Mg0,7Si	0,30-0,6	0,15-0,35	0,10	0,15	0,6-0,9	0,05	—	0,15	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6065	EN AW-Al Mg1Bi1Si	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,15	—	0,25	0,10	—	—	0,50-1,5 Bi; 0,05 Pb; 0,15 Zr	0,05	0,15	Rest
EN AW-6081	EN AW-Al Si0,9MgMn	0,7-1,1	0,50	0,10	0,10-0,45	0,6-1,0	0,10	—	0,20	0,15	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6082	EN AW-Al Si1MgMn	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	—	0,20	0,10	—	—	—	0,05	0,15	Rest
EN AW-6082A	EN AW-Al Si1MgMn	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	—	0,20	0,10	—	—	e	0,05	0,15	Rest

Tabelle A-10: Mechanische Eigenschaften der Aluminiumsorte EN AW-6016 [NN09b]

Tabelle 37 — Legierung EN AW-6016 [Al Si1,2Mg0,4]

Werkstoff- zustand	Nennstärke mm		Zugfestigkeit R_m MPa		Dehngrenze $R_{p0,2}$ MPa		Bruchdehnung % min.		Biegeradius ^a		Härte HBW ^a
	über	bis	min.	max.	min.	max.	$A_{50\text{ mm}}$	A	180°	90°	
T4	≥ 0,4	3,0	170	250	80	140	24	—	0,5 t	0,5 t	55
T6	≥ 0,4	3,0	260	300	180	260	10	—	—	—	80

^a Nur zur Information.