

Eingefrorene Spannungen: Konsequenzen für die Simulation am Beispiel von Klebverbindungen

Gerhard Schmöller

immersive SIM engineering GmbH, Ballaufstr. 3, 81735 München

Tel.: (089) 35805890, gsch@immersive-sim.de

www.immersive-sim.de

Inhalt

1	Abstract	1
2	Einleitung.....	1
3	Grundlagen.....	2
3.1	Klebstoffe und ihre Aushärtung	2
3.2	Herstellungsschritte einer Klebverbindung	3
3.3	Eigenspannungen	3
4	Analytische Modellrechnung.....	4
4.1	Fall 1: Klebschicht ohne Fügeteile.....	4
4.2	Fall 2: Starre Fügeteile und Verhinderung der Dehnung in Dickenrichtung..	5
4.3	Fall 3: Starre Fügeteile ohne Verhinderung der Dehnung in Dickenrichtung	6
4.4	FEM Vergleichsrechnung	7
4.5	Diskussion der Ergebnisse der Modellrechnung	7
5	Abbildung der Aushärtung in der FEM.....	8
5.1	Pseudo thermische Modellierung der Reaktionsschwindung in der FE Berechnung.....	8
5.2	Vereinfachte Abbildung des Herstellungsablaufs	9
5.3	Vereinfachte Abbildung des spannungsrelevanten Teils des Herstellungsablaufs.....	10
6	Auswirkungen der eingefrorenen Spannungen in der Klebschicht bei unterschiedlichen Auslegungsszielen	10
7	Folgerungen für die Gestaltung von Klebungen	11
8	Zusammenfassung	11
9	Literatur	12
10	Stichwortverzeichnis	13

1 Abstract

Die Verwendung eines 3D-Modells als Ausgangsbasis für eine Vielzahl von Anwendungen und Simulationen ist heute Standard. Unterschiedliche Simulationen werden jedoch häufig völlig getrennt voneinander basierend auf diesem Master durchgeführt. Erkenntnisse aus der Fertigungssimulation haben in vielen Fällen jedoch das Potential, die Genauigkeit struktureller oder thermomechanischer Berechnungen zu verbessern. Die Berücksichtigung der Faserorientierung aus der Spritzgussimulation bei Bauteilen aus kurzfaserverstärkten Kunststoffen zur Beschreibung nicht isotropen Verhaltens, resultierende Blechdicken und Umformgrade beim Tiefziehen sind nur zwei Beispiele. Viele Fügeverfahren bringen prinzipbedingt ebenfalls eine zumindest lokale zusätzliche Belastung in das Werkstück mit ein, die jedoch in Simulationen oft vernachlässigt werden. Das liegt oft daran, dass nicht alle Verfahren so einfach in ein Simulationsmodell übertragen werden können, wie eine Vorspannung bei Verschraubungen. So bedeuten Schweißsimulationen nach wie vor einen Berechnungsaufwand, der für Standardberechnungen nicht zu rechtfertigen ist. Bei Klebverbindungen existiert jedoch bis heute kein geschlossener Ansatz zur Beschreibung der Aushärtung, viele beobachtete Effekte sind ungeklärt.

Ziel dieses Vortrags ist es daher, den Stand der Erkenntnisse über die Entstehung von eingefrorenen Spannungen während der Herstellung des Verbundbauteils aus Klebstoff und Fügeteilen vorzustellen und ihre Auswirkungen auf die Berechnungsgrundlagen einer Klebverbindung zu diskutieren.

2 Einleitung

Kleben gilt zwar im Vergleich zum Schweißen als spannungsarmes Verfahren. Die Behinderung der Schwindung des Klebstoffs während der Aushärtung kann jedoch zu beachtlichen Spannungen in der und um die Klebverbindung führen. Ein großes Problem stellt die Tatsache dar, dass sich diese eingefrorenen Spannungen zwar phänomenologisch nachweisen lassen, aber nicht oder nur schwer messtechnisch quantifizieren lassen.

Die Einbeziehung der Schwindung in die Überlegungen zur Gestaltung einer Klebverbindung ist ein relativ junges und nach wie vor nicht allzu bekanntes Thema (ca. 15 Jahre). Die Problematik der Klebschichtmarkierung bei der Verklebung von dünnen Karosserieblechen kann als Aufhänger betrachtet werden, dass dieses Thema überhaupt Beachtung gefunden hat [Folie 1]. Daher existieren hierzu mittlerweile auch eine Reihe von Veröffentlichungen. Allerdings handelt es sich hier um ein zum größten Teil rein optisches Problem, festigkeitsrelevante Aspekte spielen nur eine geringe Rolle.

Im Falle struktureller Klebungen spielt neben der resultierenden Verformung natürlich auch der durch die Herstellung im Verbund verbleibende Beanspruchungszustand eine große Rolle. Steife Füge Teile bieten sich zur Untersuchung dieser Problematik an, da sie die Füge teilverformung als einen der sich überlagernden Effekte ausschließen und damit gleichzeitig den worst case hinsichtlich der Klebschichtbelastung darstellen.

3 Grundlagen

3.1 Klebstoffe und ihre Aushärtung

Die Aushärtung eines in monomerer oder prepolymerisierter Form vorliegenden Klebstoffs wird in Abhängigkeit von seiner chemischen Zusammensetzung aktiviert (Härterzugabe, Wärme, UV-Strahlung, usw.). Diese Aktivierung stößt eine chemische Reaktion an, die zu einer Vernetzung zu einem Polymer führt. In vielen Fällen ist diese Reaktion exotherm.

Der Ablauf dieser chemischen Reaktion wird durch ihre Reaktionskinetik beschrieben. Kennzeichnende Größe für den Fortschritt einer Reaktion ist der Umsatz p , der prozentual beschreibt, wieviel Edukt bereits reagiert hat. Für die Änderungsrate des Umsatzes p einer chemischen Reaktion gilt allgemein:

$$\frac{dp}{dt} = k f(p)$$

Die Funktion $f(p)$ ist von der Ordnung der Reaktion abhängig. Die Geschwindigkeitskonstante k ist nur bei konstanter Temperatur konstant. Ihre Abhängigkeit von der Temperatur wird durch die Arrhenius Gleichung beschrieben.

$$k = k_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$$

Sie beschreibt allgemein die Abhängigkeit der Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion von der Temperatur.

Für eine ausführliche Beschreibung der Reaktionskinetik und ihre Bestimmung ihrer Kenngrößen bei Epoxidharzen sei auf die Arbeiten von Holst ([4], physikalisch) und Wenzel ([5], chemisch) verwiesen. Blumenstock [6] beschreibt ein viskoelastisches Materialmodell in Abhängigkeit von den Aushärtebedingungen.

Mit der Vernetzung geht eine Dichtezunahme und damit eine Volumenabnahme einher, die als Schwindung bezeichnet wird. Diese Schwindung liegt bei Systemen auf Epoxidharzbasis zwischen 1 und 5%. Bei Acrylaten kann sie sogar 10% erreichen.

Findet der Übergang von einer viskosen Flüssigkeit zu einem Festkörper unbehindert und gleichmäßig im gesamten Klebstoffvolumen statt, darf man davon ausgehen, dass diese Volumenänderung wie eine thermische Dehnung maßstabsgetreu und spannungsfrei abläuft. Ein flüssig-fest Übergang tritt auch beim Erstarren einer Schmelze auf, wobei eine Reihe ähnlicher Effekte zu beobachten sind [Folie 4].

Im Gegensatz zu einer thermischen Dehnung und einer Erstarrung läuft die Aushärtung und damit auch die Volumenänderung eines Klebstoffs jedoch auch bei einer konstanten Temperatur ab, kann in der Regel bei konstanter Temperatur nicht mehr gestoppt werden und ist meist irreversibel. Die Materialeigenschaften eines Klebstoffs während der Aushärtung sind also nicht nur eine Funktion der Temperatur, sondern zusätzlich eine Funktion der Zeit, bzw. des Umsatzes.

Einen bedeutenden Unterschied zur thermischen Dehnung haben Aushärtung und Erstarrung gemeinsam: Wird ein Körper ungleichmäßig erwärmt/abgekühlt kommt es innerhalb des Körpers zu unterschiedlichen thermischen Dehnungen, die Spannungen innerhalb des Körpers und einen Verzug hervorrufen. Sind diese Spannungen klein genug, dass sie keine Schädigung des Material verursachen, verschwinden diese Effekte wieder beim Erreichen einer homogenen Temperatur. Eine ungleichmäßige Temperatur beim Erstarren ein Schmelze, bzw. eine unterschiedliche Reaktionsgeschwindigkeit bei der Aushärtung eines Klebstoffs führt zu zeitgleich existierenden festen und viskosen Bereichen. Die dadurch hervorgerufenen Verzüge und inneren Spannungen bleiben erhalten. Diesen Verzug kann man oft bei Gussbautei-

len beobachten, innere Spannungen äußern sich in ungleichmäßigen Brechungsindizes bei optischen Bauteilen [Folie 3].

3.2 Herstellungsschritte einer Klebverbindung

Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich auf warmhärtende 1K Klebstoffsysteme, wie sie z.B. im Karosserierohbau eingesetzt werden. Diese Gruppe ist für die hier angestellten Überlegungen besonders interessant, da neben der Schwindung noch thermische Dehnungen beim Abkühlen von Härtungstemperatur auf Raumtemperatur zu berücksichtigen sind.

Nach dem Auftragen des viskosen Klebstoffs, dem Zusammenführen mit dem zweiten Füge teil und der Fixierung der Verbindung lässt sich der Fertigungsablauf entsprechend der Temperaturführung mit folgenden drei Prozessschritten beschreiben:

1. Erwärmung des Bauteils auf Härtungstemperatur HT (KTL, Umluftofen,...)
2. isotherme Aushärtung des Klebstoffs für eine gewisse Haltezeit
3. Abkühlung des Bauteils auf Raumtemperatur RT

Bei der Erwärmung ist der Klebstoff noch viskos, Änderungen der Klebspaltgeometrie können ausgeglichen werden. Mit dem Fortschreiten der chemischen Reaktion wird nach einer gewissen Zeit der Gelpunkt, also eine erste durchgängige Vernetzung innerhalb des Klebstoffvolumens erreicht. Ab diesem Zeitpunkt ist die Klebverbindung in der Lage, Kräfte zu übertragen, aber auch innere Spannungen aufgrund der von den Füge teilen behinderten chemischen Schwindung aufzubauen. Am Ende der Haltezeit ist die chemische Reaktion zum Großteil abgeschlossen, der Klebstoff ein Festkörper. Durch die meist sehr unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Klebstoffs und der Füge teile entstehen thermische Spannungen während des Abkühlens des Bauteils auf Raumtemperatur. In der Realität lassen sich die einzelnen Phasen natürlich nicht so streng in ihre zeitliche Abfolge einteilen. So wird die Reaktion bereits vor Erreichen der Härtungstemperatur einsetzen und sich damit die Volumenschwindung die thermische Expansion überlagern. Ebenfalls kann nach der Haltephase noch eine Nachvernetzung erfolgen [Folie 5,6].

3.3 Eigenspannungen

Eigenspannungen sind per Definition Spannungen, die in einem Bauteil ohne Einwirkung äußerer Belastung vorhanden sind. Je nach Betrachtungsmaßstab unterscheidet man Eigenspannungen 1. Art (Makro-Eigenspannungen), 2. Art (Mikro-Eigenspannungen) und 3. Art (Nano-Eigenspannungen). Die oben beschriebenen eingefrorenen Spannungen bei ungleichmäßiger Aushärtung/Erstarrung zählen zu den Eigenspannungen 1. Art. Eigenspannungen 2. Art treten z.B. an Korngrenzen auf, Eigenspannungen 3. Art z.B. durch Versetzungen auf Kristallebene.

Spannungen, die durch eine Behinderung der Klebstoffschwindung durch die Füge teile hervorgerufen werden, gehören demnach strenggenommen ebenso wenig zu den Eigenspannungen, wie Spannungen die durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Füge teil und Klebstoff verursacht werden. Daher wird hier der Begriff eingefrorene Spannung für die Summe aus Eigenspannungen, Spannungen aus behinderter Schwindung und Spannungen aus behinderter thermischer Dehnung verwendet.

4 Analytische Modellrechnung

Zunächst soll eine sogenannte Stumpfprobe betrachtet werden, die aus zwei verklebten Stahlzylindern besteht. Verglichen werden sollen dabei die zwei unterschiedlichen Fixierungsmöglichkeiten während der Aushärtung: Dehnungen in Dickenrichtung sind möglich (Fall 3)/nicht möglich (Fall 2). Als Referenz (Fall 1) wird die freie (also völlig unbehinderte) Klebschicht ohne Füge­teile in die Betrachtungen mit einbezogen.

Für die Berechnungen werden folgende Maße und Kennwerte angesetzt:

Radius	$r =$	8 mm
=> Klebfläche	$A =$	201.6193 mm ²
Klebschichtdicke bei T = 180°C	$H_{180^\circ} =$	0.5 mm
Härtetemperatur	$HT =$	180 °C
Raumtemperatur	$RT =$	23 °C
=>	$\Delta T =$	-157 °C
Thermischer Längenausdehnungskoeffizient	$\alpha =$	$10 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Volumenschwindung	$\varepsilon_{chem, vol} =$	2%
Elastizitätsmodul bei T = 23°C	$E_{23^\circ} =$	3000 MPa
Elastizitätsmodul bei T = 180°C	$E_{180^\circ} =$	100 MPa
Querkontraktionszahl	$\nu =$	0.35
Glasübergangstemperatur des ausgehärteten Klebstoffs	$T_G =$	80 °C
Materialverhalten		<i>linear elastisch</i>

Die Maße und Temperaturen, sowie die Randbedingungen orientieren sich an den Proben, die Schäfers [3] in seinen experimentellen Untersuchungen verwendet.

4.1 Fall 1: Klebschicht ohne Füge­teile

Nach den beschriebenen Zusammenhängen kann die Gesamtdehnung für ein Klebstoffsystem durch

$$\varepsilon_{ges} = \varepsilon_{mech} + \varepsilon_{therm} + \varepsilon_{chem} = \frac{\sigma}{E} + \alpha \Delta T + \varepsilon_{chem}$$

beschrieben werden. Für die Spannung gilt entsprechend

$$\sigma_{ges} = E(\varepsilon_{mech} - \alpha \Delta T - \varepsilon_{chem})$$

Für die Berechnung muss zunächst die dreidimensionale chemisch Volumenschwindung auf eine eindimensionale Längsdehnung umgerechnet werden.

Hierfür gilt mit guter Näherung

$$\varepsilon_{längs} = \frac{\varepsilon_{vol}}{3}$$

Im vorliegenden Fall berechnet sich die anzusetzende Längsdehnung zu

$$\varepsilon_{chem} = -\frac{0.02}{3} \approx -0.00667$$

Während der Abkühlung von Härtungstemperatur auf Raumtemperatur erfährt der Klebstoff eine thermische Dehnung von

$$\varepsilon_{therm} = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \Delta T = 0.0001 \cdot (-157^\circ) = -0.0157$$

die Gesamtdehnung beträgt

$$\varepsilon = \varepsilon_{therm} + \varepsilon_{chem} = -0.0157 - 0.00667 = -0.02237$$

Damit verändert sich die Geometrie der freien Klebschicht wie folgt:

Für die Klebschichtdicke gilt:

$$\Delta h = h_{180^\circ} \varepsilon = -0.02237 \cdot 0.5 \text{ mm} = 0.011185 \text{ mm}$$

$$h_{23^\circ} = h_{180^\circ} - \Delta h = 0.489 \text{ mm}$$

Entsprechend der neue Radius:

$$\Delta r = r_{180^\circ} \varepsilon = -0.02237 \cdot 8 \text{ mm} = 0.179 \text{ mm}$$

$$r_{23^\circ} = r_{180^\circ} - \Delta r = 7.82 \text{ mm}$$

Da die Volumenänderung völlig unbehindert erfolgen kann, entstehen keine Spannungen.

4.2 Fall 2: Starre Füge­teile und Verhinderung der Dehnung in Dicken­richtung

Bei einer Kleb­verbindung wird die Dehnung in der Füge­fläche durch die Füge­teile behindert. Werden die Stahl­zylinder als unendlich starr angenommen gilt

$$\Delta x = \Delta y = 0$$

an den Grenz­flächen zu den Füge­teilen. Da über die freie Fläche am Außenrand bei der geringen Klebschicht­dicke nur ein minimaler Volumenausgleich stattfinden kann, ist die Vereinfachung zulässig, $\Delta x = \Delta y = 0$ über die komplette Klebschicht­dicke anzusetzen (dies wird weiter unten durch FEM Berechnungen unterstützt).

Wird zusätzlich eine Änderung der Klebschicht­dicke durch eine Fixierung beider Füge­teile verhindert, also zusätzlich $\Delta z = 0$ angenommen, muss die komplette chemische und thermische Dehnung durch eine entsprechende elastische Dehnung kompensiert werden. Damit sind die Dehnungen bekannt:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon_{\text{mech}} = -(\varepsilon_{\text{chem}} + \varepsilon_{\text{therm}}) = 0.02237$$

Nach dem erweiterten Hooke'schen Gesetz gilt für diesen dreiachsigen Spannungszustand

$$\sigma_x = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right) = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{\text{mech}} \left(1 + \frac{3\nu}{1-2\nu} \right) \right) = \sigma_y = \sigma_z$$

Die Volumenschwindung während der Aushärtung verursacht also eine Spannung

$$\sigma_{x,\text{chem}} = \frac{E_{180^\circ}}{1+\nu} \left(\varepsilon_{\text{mech}} \left(1 + \frac{3\nu}{1-2\nu} \right) \right) = \sigma_{y,\text{chem}} = \sigma_{z,\text{chem}} = 2.22 \text{ MPa}$$

Während der Abkühlung auf RT verursacht die behinderte thermische Dehnung folgende Spannungen:

$$\sigma_{x,\text{therm}} = \frac{E_{23^\circ}}{1+\nu} \left(\varepsilon_{\text{mech}} \left(1 + \frac{3\nu}{1-2\nu} \right) \right) = \sigma_{y,\text{therm}} = \sigma_{z,\text{therm}} = 157 \text{ MPa}$$

Diese extrem hohen Werte dürfte kein Klebstoff ertragen können. Die Diskussion sei aber vorerst zurückgestellt. Der im Vergleich zur thermischen Spannung geringe Wert aus der Schwindung muss mit den geringen zulässigen Belastungen bei hohen Temperaturen in Relation gesetzt werden.

Da keine Schubspannungen vorliegen, sind die Spannungen in den Achsrichtungen gleichzeitig die Hauptspannungen. Durch die Gleichheit der Beträge herrscht also ein hydrostatischer Spannungszustand und die Vergleichsspannung nach v. Mises ergibt 0 MPa, was offensichtlich der wirklichen Werkstoffanstrengung nicht gerecht wird. Dieser Zusammenhang ist vor allen Dingen bei der Auswertung von FEM Berechnungen zu berücksichtigen.

Fall 2 tritt in der Praxis z.B. bei einer überlappten Rohrverklebung auf und sollte unbedingt vermieden werden [Folie 2]. Bereits eine leicht kegelige Anstellung der Fügefläche kann diese Situation deutlich entschärfen.

4.3 Fall 3: Starre Füge Teile ohne Verhinderung der Dehnung in Dickenrichtung

Eine niedrigere Belastung in der Klebschicht ist für den dritten hier betrachteten Fall zu erwarten, bei dem zwar ebenfalls eine vollständige Behinderung der Dehnung in Radiusrichtung angenommen wird, aber die Dehnung in Dickenrichtung zugelassen wird. Es gilt also weiterhin:

$$\varepsilon_{x,chem} = \varepsilon_{y,chem} = -0.00667, \quad \varepsilon_{x,therm} = \varepsilon_{y,therm} = -0.0157 \text{ und } \Delta x = \Delta y = 0.$$

Für die Spannungen gilt

$$\sigma_x = \sigma_y$$

und wegen der unbehinderten Dehnung in Dickenrichtung

$$\sigma_z = 0.$$

Damit lassen sich die Spannungen in der Fügefläche berechnen:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) = \sigma_y$$

Damit wird

$$\sigma_{x,chem} = \frac{E_{180^\circ}}{1-\nu^2} (\varepsilon_{x,chem} + \nu \varepsilon_{y,chem}) = \sigma_{y,chem} = 1.026 \text{ MPa}$$

und

$$\sigma_{x,therm} = \frac{E_{23^\circ}}{1-\nu^2} (\varepsilon_{x,therm} + \nu \varepsilon_{y,therm}) = \sigma_{y,therm} = 72.46 \text{ MPa}$$

und die mechanische Dehnung in Dickenrichtung

$$\varepsilon_{z,mech,chem} = -\frac{\nu}{E_{180^\circ}} (\sigma_{x,chem} + \sigma_{y,chem}) = -\frac{\nu}{E_{180^\circ}} 2\sigma_{x,chem} = -0.00718$$

und

$$\varepsilon_{z,mech,therm} = -\frac{\nu}{E_{23^\circ}} (\sigma_{x,therm} + \sigma_{y,therm}) = -\frac{\nu}{E_{23^\circ}} 2\sigma_{x,therm} = -0.0169$$

Da sich in diesem Fall die mechanischen Dehnungsanteile die thermischen und chemischen nicht kompensieren, ergibt sich eine Gesamtdickenänderung von

$$\begin{aligned} \Delta h &= (\varepsilon_{z,mech,chem} + \varepsilon_{z,chem} + \varepsilon_{z,mech,therm} + \varepsilon_{z,therm}) h_{180^\circ} = \\ &= (-0.00718 - 0.0067 - 0.0169 - 0.0157) 0.5 \text{ mm} = -0.0232 \text{ mm} \end{aligned}$$

Fall 3 kann also als Fall 1 mit nachfolgender mechanischer Dehnung in der Klebfläche auf den Ausgangsradius interpretiert werden, wobei durch die Querdehnung die Klebschichtdicke weiter abnimmt.

Zusammenfassung chemische Schwindung

	Δr [mm]	Δh [mm]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_z [MPa]	$\varepsilon_{x,mech}$	$\varepsilon_{y,mech}$	$\varepsilon_{z,mech}$
Fall 1	0.05336	0.003335	0	0	0	0	0	0
Fall 2	0	0	2.22	2.22	2.22	0.0067	0.0067	0.0067
Fall 3	0	0.00694	1.026	1.026	0	0.0067	0.0067	0.0072

Zusammenfassung thermische Dehnung

	Δr [mm]	Δh [mm]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_z [MPa]	$\epsilon_{x,mech}$	$\epsilon_{y,mech}$	$\epsilon_{z,mech}$
Fall 1	0.1256	0.00785	0	0	0	0	0	0
Fall 2	0	0	157	157	157	0.0157	0.0157	0.0157
Fall 3	0	0.0163	72.5	72.5	0	0.0157	0.0157	0.0169

4.4 FEM Vergleichsrechnung

Zur Klärung der Frage, welchen Einfluss die in den Fällen 2 und 3 verhinderte radiale Verformung über die Dicke der Klebschicht hat, wurden die thermische Dehnung für diese Fälle an einem entsprechenden axisymmetrischen FE Modell nachgerechnet. Wie in [Folie 7] zu erkennen ist, beträgt die maximale radiale Verschiebung am Klebschichtrand in Klebschichtmitte 0.016 mm. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Verschiebungen in Richtung Zentrum sehr schnell abnehmen.

Die Ausprägung des seitlichen Einzugs ist offensichtlich von der Klebschichtdicke abhängig, der Einfluss auf den gemittelten Spannungs/Dehnungszustand in der gesamten Klebschicht auch vom Durchmesser.

Durch die radialen Verschiebungen existiert im Randbereich kein homogener Spannungszustand mehr. Im Inneren unterscheiden sich die berechneten Werte nur für Fall 3 geringfügig von den analytischen.

Thermische Dehnung (FEM Berechnung, freier Aussenrand)

	Δr [mm]	Δh [mm]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]	σ_z [MPa]	$\epsilon_{x,mech}$	$\epsilon_{y,mech}$	$\epsilon_{z,mech}$
Fall 2	0.0 - 0.0066	0	157	157	157	0.0157	0.0157	0.0157
Fall 3	0.0 - 0.014	0.01599	74.1	74.1	3.06	0.0157	0.0157	0.0162
Fall 3 analytisch	0	0.0163	72.5	72.5	0	0.0157	0.0157	0.0169

4.5 Diskussion der Ergebnisse der Modellrechnung

Interessant ist der Betrag der Gesamtvolumenänderung aus Schwindung und Abkühlung

$$\Delta V_{ges} = \Delta V_{therm} + \Delta V_{chem} = 3 \alpha \Delta T - 2\% = 3 \cdot 0.0001 \cdot (-157^\circ) - 0.02 = -0.0471 - 0.02 = -0.0671$$

Es tritt also trotz einer recht niedrig angesetzten chemischen Schwindung eine Volumenänderung von fast 7% auf, die bei einer unveränderlichen Klebfugengeometrie auf irgendeine Weise aufgefangen werden muss. Hierfür sind mehrere Thesen denkbar:

1. die Volumenabnahme wird durch Nachfließen des Klebstoffs vom Rand zur Mitte ausgeglichen
2. innerhalb des Klebstoffs bilden sich noch während der Erstarrung Hohlräume oder Poren
3. die Volumenabnahme wird durch eine entsprechende mechanische Dehnung kompensiert (Annahme in den obigen Modellrechnungen), Spannungen werden durch Relaxation und/oder Mikrorisse im Gefüge und an der Grenzschicht zu den Fügeteilen abgebaut
4. Durch die Zwangsbedingungen entsteht ein „anderer“ Werkstoff mit unterschiedlicher Dichte. Je nach Richtung der Zwangsbedingung können auch nicht isotrope Strukturen entstehen.

Gegen These 1 spricht die Beobachtung in der Praxis, außerdem werden die Randbereiche als erstes erwärmt und härten daher auch als erste aus, was das Nachfließen verhindert. Außerdem ist die Schwindungsproblematik auch bei Vergussmassen ein Thema, obwohl ein Nachfließen hier in der Regel wesentlich einfacher wäre. Von einem vollständigen Ausgleich des Schwindungsvolumens kann also auf keinen Fall ausgegangen werden.

These 2 kann in der Praxis vor allen Dingen bei dickeren Klebschichten beobachtet werden. Strenggenommen muss dies aber bereits als schadhafte Verklebung bezeichnet werden [Folie 9].

These 3 entspricht den Annahmen der Modellrechnung. Eine reine Speicherung der Dehnung in elastischen Spannungen würde mit Sicherheit bereits während der Herstellung zu einem Versagen der Klebverbindung führen (Fall 3 im Rechenbeispiel). Eine vollständige Spannungsrelaxation über das gesamte Klebstoffvolumen wird aber zumindest unterhalb der Glasübergangstemperatur deutlich erschwert und somit nicht zeitnah erfolgen. Die Existenz beträchtlicher (Rest-) Spannungen wird auch durch eine Reihe dem Autor vorliegender Schadensfälle bestätigt.

Die Wahrscheinlichkeit von These 4 ist sicherlich von der chemischen Zusammensetzung des Klebstoffs abhängig (bei amorphen Thermoplasten wird z.B. durch Verstrecken eine Ausrichtung der Molekülketten erreicht. Bei dreidimensional vernetzten Duromeren erscheint dies weniger plausibel, es ist jedoch bekannt, dass ausgehärtete Epoxidharze Inhomogenitäten in Dichte und Struktur aufweisen, die auf die anfängliche Bildung von Gelkeimen zurückgeführt werden ([4], S.13). Welchen Einfluss die mechanische Behinderung der Schwindung auf die Ausbildung dieser Inhomogenitäten hat, dürfte jedoch bisher weitgehend unerforscht sein). Für das Vorliegen eines unterschiedlichen Materials spricht die Erfahrung, dass sich Werkstoffkennwerte aus Substanz- (Bulk-) Proben vor allem bei dünnen Klebschichten sehr von denen aus InSitu-Proben unterscheiden. Auf das Vorliegen einer Richtungsabhängigkeit

Da mit keiner These eine durchgängig logische und durch praktische Erfahrung nachvollziehbare Erklärung gelingt, muss von einer Überlagerung verschiedener Effekte ausgegangen werden. Hierbei sprechen eine Reihe von Anhaltspunkten für eine Kombination aus These 3 und 4.

5 Abbildung der Aushärtung in der FEM

5.1 Pseudo thermische Modellierung der Reaktionsschwindung in der FE Berechnung.

Eine direkte Vorgabe einer (isothermen) chemischen Volumenänderung ist in keinem kommerziellen FE Programm möglich. Es ist jedoch einfach, sie unter Einführung eines chemischen Reaktionskoeffizienten α_r in eine thermische Dehnung innerhalb einer kleinen Temperaturänderung ΔT_{chem} zu überführen [7,8]¹.

Beispiel: Mit $\Delta T_{chem} = 1K$ und einer chemischen Schwindung von 2% folgt

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon_{chem,vol}}{3 \Delta T_{chem}} = \frac{0.02}{3} \approx 0.00666 K^{-1}$$

Etwas unschön an diesem Workaround ist die Tatsache, dass die eigentlich für die FEM benötigte Steifigkeitsgleichung

$$[K]\{u\} = \{f_{mech}\} + \{f_{therm}\} + \{f_{chem}\}$$

auf

¹ Ergänzung: Diese Methode kann natürlich auch zur Beschreibung von ähnlichen Vorgängen wie eine Volumenänderung durch Feuchtediffusion verwendet werden.

$$[K]\{u\} = \{f_{mech}\} + \{f_{therm} + f_{chem}\}$$

reduziert wird. Damit ist es schwierig bis unmöglich, die Effekte aus chemischer und thermischer Volumenänderung im Postprocessing zu trennen.

5.2 Vereinfachte Abbildung des Herstellungsablaufs

Um den kompletten Härtingsprozess näherungsweise in einer FE-Berechnung abzubilden kann folgende Temperaturführung und Materialzuweisung verwendet werden:

1. Erwärmung auf $HT+1^\circ$ (Schwindung). Dem Klebstoff sollte hier ein Material zugewiesen werden, das die Ausdehnung der Fügeteile möglichst wenig behindert (z.B. E-Modul 1MPa, Querkontraktionszahl 0, thermischer Ausdehnungskoeffizient wie Fügeteile). Die Mitführung der Klebstoffelemente in diesem Schritt ist vor allen Dingen dann nötig, falls sich durch die Erwärmung des Bauteils die Lage oder Geometrie der Klebfuge verändert. Bei einer mehrschichtigen Klebstoffmodellierung werden dadurch die Knoten innerhalb der Klebschicht auf einfache Art und Weise in die richtige Position mitgenommen.
2. Abkühlung um 1° auf HT. Hier härtet der Klebstoff schlagartig aus und schwindet entsprechend dem zugewiesenen α_r . Zu Beginn dieses Steps ist es wichtig, einen spannungs- und dehnungsfreien Zustand im Klebstoff sicherzustellen (in ABAQUS können hierfür z.B. die Klebstoffelemente mit: *MODEL CHANGE, REMOVE und *MODEL CHANGE, ADD=STRAIN FREE ausgetauscht werden).
3. Abkühlung des Bauteils auf RT. In diesem Schritt werden dem Klebstoff die Materialeigenschaften des ausgehärteten Klebstoffs zugewiesen. Als Bezugstemperatur für die thermische Dehnung ist HT einzusetzen, da er ja bei dieser Temperatur „entstanden“ ist. Falls genauere Daten vorhanden sind, spricht natürlich nichts dagegen, in diesem Schritt ein Materialmodell zu verwenden, das eine Spannungsrelaxation ermöglicht und beim Passieren der Glasübergangstemperatur die Materialbeschreibung anzupassen.
4. beliebige weitere Lastfälle

Falls die Härtungstemperatur in nachfolgenden Rechenschritten nochmals erreicht wird, muss durch programmspezifische Maßnahmen sichergestellt werden, dass diese Pseudodehnung nicht wieder durchlaufen wird. In ABAQUS gelingt dies z.B. durch die Einführung einer zusätzlichen Abhängigkeit der Materialbeschreibung von einer Statusvariable, die nach dem Härtungsschritt entsprechend anders gesetzt wird.

Mit diesem Berechnungsablauf lassen sich die auftretenden Dehnungen gut erfassen. Bei Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens ist jedoch davon auszugehen, dass die auftretenden Spannungen in der Klebschicht stark überschätzt werden.

Diese Vorgehensweise bildet mit hoher Wahrscheinlichkeit den „worst case“ ab, benötigt lediglich den Betrag der reaktiven Volumenschwindung als Eingangswert und ist rechnerisch billig, da keine transienten Vorgänge berücksichtigt werden. Zudem ist sie in gängigen FEM Programmen mit „Bordmitteln“ umsetzbar. Auch wenn damit die realen Vorgänge nur qualitativ erfasst werden, können Klebverbindungen damit schwindungstechnisch optimiert werden. [Folie 8].

5.3 Vereinfachte Abbildung des spannungsrelevanten Teils des Herstellungsablaufs

Geht man davon aus, dass Spannungen oberhalb der Glasübergangstemperatur des ausgehärteten Klebstoffs sehr schnell relaxieren, bietet sich eine Vorgehensweise an, die diese Berechnung noch weiter vereinfacht: Man lässt die Schritte 1 und 2 aus und beginnt die Berechnung mit einer Abkühlung von der Glasübergangstemperatur des ausgehärteten Klebstoffs auf RT. Man sollte sich aber darüber im Klaren sein, dass damit die Gesamtdehnung des Klebstoffs und möglicherweise die Fügeiteilbelastung unterschätzt wird.

6 Auswirkungen der eingefrorenen Spannungen in der Klebschicht bei unterschiedlichen Auslegungsszielen

Verformungsanalyse mit linearelastischem oder viskoelastischem Materialverhalten:

In beiden Fällen ist die Verformungsantwort unabhängig von einem bestehenden Lastniveau. Falls kein Bauteilverzug durch die Klebverbindung zu erwarten ist oder dieser für das Berechnungsziel unerheblich ist, können die Schwindungseffekte ignoriert werden.

Verformungsanalyse mit spannungs-/dehnungsabhängigem Materialverhalten:

In diesem Fall ist die Werkstoffantwort vom Lastniveau abhängig, eingefrorene Spannungen sind also von Bedeutung. Im Falle von dünnen metallischen Fügeiteilen kann die Belastung durch die Klebstoffschwindung in den Fügeiteilen Spannungen nahe der oder sogar über der Streckgrenze hervorrufen. Abgesehen von der Klebschicht kann es also schon bei geringer zusätzlicher Belastung zu plastischen Verformungen in den Fügeiteilen kommen.

Spannungsberechnungen:

Hier gelten grundsätzlich die Aussagen des vorigen Abschnitts. Wie bereits erwähnt, ist zu beachten, dass ein hydrostatischer Spannungszustand durch die Schwindung in der Klebschicht bei der Verwendung der v.Mises Vergleichsspannung unberücksichtigt bleibt.

Fatigue:

Grundsätzlich sind Lebensdauerberechnungen für Kunststoffe und damit auch für Klebstoffe ein höchst problematisches Thema mit hohem Forschungsbedarf. Aus den Erfahrungen mit anderen Werkstoffen ist möglicherweise die Annahme gerechtfertigt, dass die konstante Grundbelastung durch die eingefrorenen Spannungen geringere Auswirkungen auf die Materialermüdung hat, als die wechselnden Belastungsanteile. Treten in dünnen metallischen Fügeiteilen Belastungen durch die Klebstoffschwindung über der Streckgrenze auf, kann nicht einmal der statische Festigkeitsnachweis geführt werden, ein Ermüdungsfestigkeitsnachweis z.B. nach der FKM Richtlinie erübrigt sich.

Alterung:

Mikrorisse oder Porosität fördern das Eindringen von Feuchtigkeit und können damit vor allen Dingen der sogenannten Unterwanderungskorrosion Vorschub leisten.

7 Folgerungen für die Gestaltung von Klebungen

- Der thermische Ausdehnungskoeffizient eines warmhärtenden Klebstoffs ist auch bei Bauteilen ein wesentlicher Gesichtspunkt, die im Betrieb keinen großen Temperaturänderungen ausgesetzt sind, da er wesentlichen Einfluß auf die während der Abkühlung von Härtungstemperatur auf Raumtemperatur entstehenden thermischen Dehnungen hat.
- Die Fixierung der zu verklebenden Einzelteile hat maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der entstehenden Eigenspannungen. Aus diesem Grund sollten auch keine Glaskugeln, Drähte oder ähnliches zum Einstellen einer definierten Klebschichtdicke verwendet werden.
- Eine Dickenänderung der ausgehärteten Klebschicht sollte konstruktiv ermöglicht werden.
- Die Gestaltung der Klebfuge kann erheblichen Einfluss auf die Eigenspannungen haben.
- Eine Beurteilung der Konstruktion hinsichtlich dieses Einflusses kann auch mit relativ groben Simulationen erfolgen.
- Je geringer die Aushärtetemperatur, desto geringer die Eigenspannungen
- Eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung um die Klebfuge während der Aushärtung verhindert die Entstehung zusätzlicher Eigenspannungen innerhalb der Klebschicht

8 Zusammenfassung

Während der Aushärtung von Klebstoffen kommt es durch die Polymerisation zu einer Volumenabnahme der Klebstoffsubstanz. Diese führt zusammen mit der durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Füge­teil und Klebstoff verursachten thermischen Spannungen zu einem eingefrorenen Spannungszustand in der unbelasteten Klebverbindung. Ganzheitliche Ansätze zur Beschreibung der hierbei ablaufenden Vorgänge sind im Prinzip realisierbar, ihre Kalibrierung für unterschiedliche Klebstoffsysteme jedoch aufwändig. In Anbetracht der enormen Vielfalt an Klebstoffsystemen haben solche Ansätze in der Praxis nur dann eine Chance, wenn verlässliche Kochrezepte (Normen) zur Bestimmung der nötigen Kennwerte erarbeitet werden und Software entwickelt wird, die diese Kennwerte automatisch simulationstauglich aufbereitet.

9 Literatur

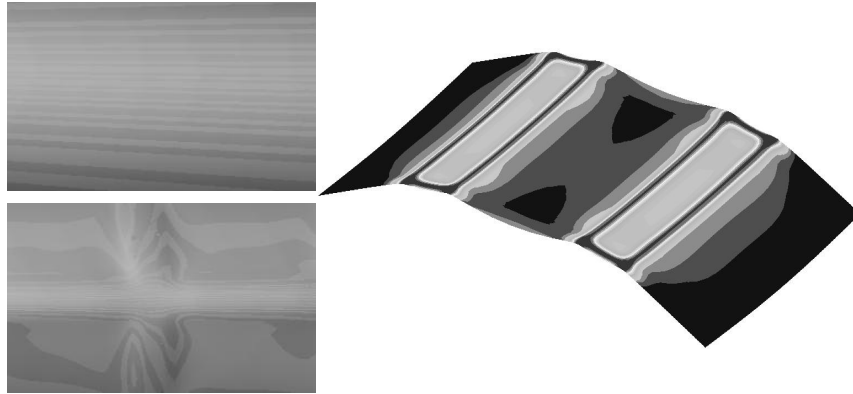
1. Chudaska, A. „Untersuchungen zu schwindungsabhängigen Eigenspannungen und Schädigungsmechanismen in Klebverbindungen“, Diss. Univ. Paderborn, 1995
2. Eis M. „Fertigungsbedingte Bauteilverformungen beim Kleben dünnwandiger Stahlbauteile: Analyse der Entstehungsmechanismen und Hinweise zur Minimierung“, Diss. Univ. Paderborn, 2000
3. Schäfers C. „Einfluss klebstoffspezifischer Eigenspannungs- und Schädigungszustände auf das Festigkeits- und Beständigkeitsverhalten von Metallklebverbindungen“, Diss. Univ. Paderborn, 2004
4. Holst M. „Reaktionsschwindung von Epoxidharz-Systemen“, Diss. TU Darmstadt, 2001
5. Wenzel M.: „Spannungsbildung und Relaxationsverhalten bei der Aushärtung von Epoxidharzen“, Diss., TU Darmstadt, 2005
6. Blumenstock, T.: „Analyse der Eigenspannungen während der Aushärtung von Epoxidharzmassen“, Diss. Univ. Stuttgart, 2003
7. Schmöller G.: „Simulation des thermomechanischen Verhaltens verklebter Bauteile aus kurzfaserverstärkten Thermoplasten“, Diss., TU München, 1998
8. Böger T., Dilger K., Schmöller G.: „FE-Simulation der Klebstoffschwindung während des Aushärtevorgangs“ Adhäsion Kleben & Dichten 10.01

10 Stichwortverzeichnis

Arrhenius Gleichung	2	Nachvernetzung.....	3
Aushärtebedingungen.....	2	Prozessschritte	3
Aushärtung	1, 2, 3, 4, 5, 11	Querdehnung.....	6
Eigenspannungen.....	3, 11	Reaktionskinetik.....	2
Epoxidharzen.....	2	Relaxation.....	7
Erstarren.....	2	Schwindung	2
FEM Berechnung.....	5	Spannungen, eingefrorene 1, 3, 10, 11	
Fügeteilverformung.....	1	Spannungszustand, hydrostatischer..	5
Gelpunkt	3	Stumpfprobe	4
Glasübergangstemperatur	8, 10	Temperaturführung	3
Grenzschicht.....	7	Umsatz.....	2
Härtungstemperatur.....	3	Unterwanderungskorrosion.....	10
Hooke'schen Gesetz, erweitertes	5	Vergleichsspannung	5, 10
Klebschichtmarkierung	1	Vernetzung	2, 3
Klebstoff.....	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11	Verzug	2
Klebverbindung.....	1	viskoelastisch.....	2
Lebensdauerberechnung.....	10	Volumenschwindung.....	4, 9
Materialermüdung.....	10	warmhärtend.....	3, 11
Materialmodell	2, 9	Werkstoffanstrengung.....	5

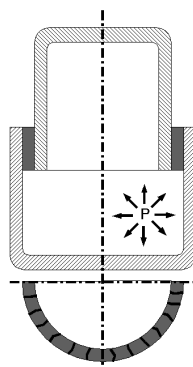
Beispiel

Klebschichtmarkierung bei Karosserieblechen



Beispiel

Undichtigkeit eines Druckbehälters



halbunendliche Klebschicht, extrem
steife Konstruktion, kein Ausgleich
über die Dicke möglich

“Kaltrisse”

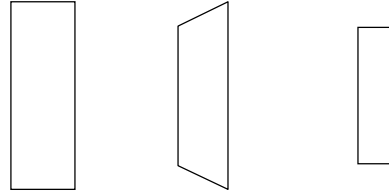
Problem:
Spannungsrisse parallel zur
Achse nach der Herstellung

Lösung:
Absenkung der Prozeßtemperatur

Ungleichmäßige ...

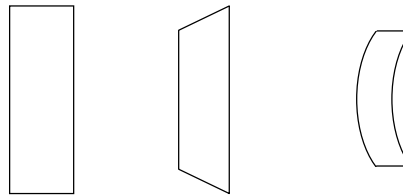
... Abkühlung

Q →



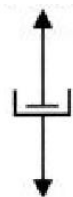
... Erstarrung,
... Aushärtung

Q →

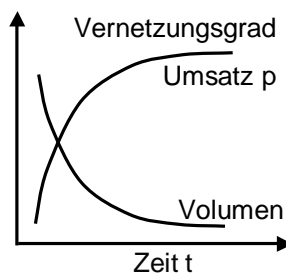


Materialänderung während der Polymerisation

viskos
(Newton'sches Fluid)



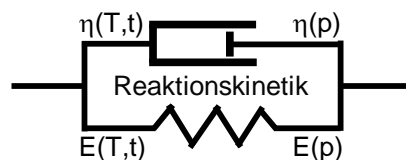
Viskosität η



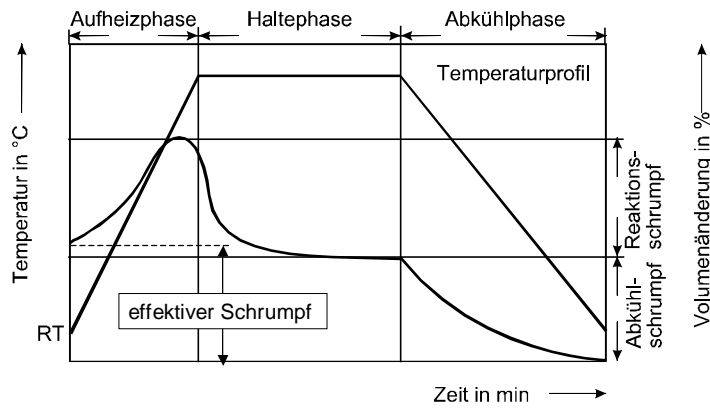
fest
(Hooke'scher Körper)



E-Modul E



Temperaturintervalle (KTL, Wärmeofen) schematisch



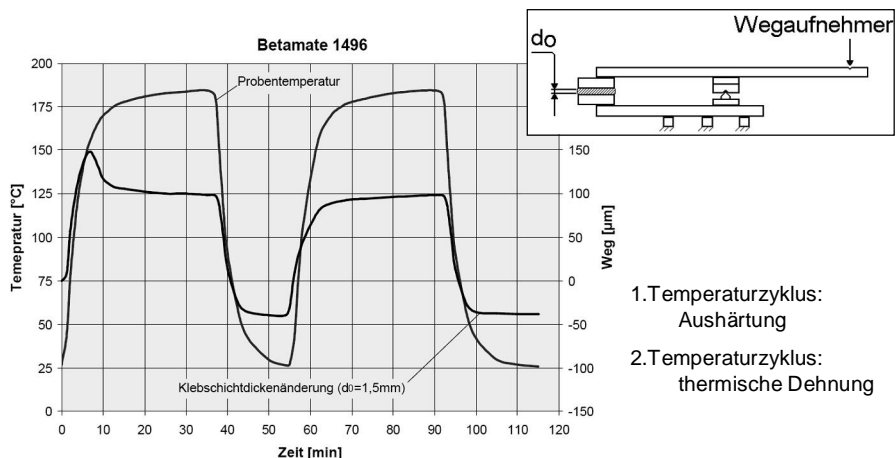
Chudaska, A.; Hahn, O.

Tagung „Werkstoffmodelle für Finite Elemente“
7./8. Nov. 2006 München

© immersive SIM engineering GmbH

immersive
sim
engineering

Temperaturintervalle Experiment



- 1. Temperaturzyklus: Aushärtung
- 2. Temperaturzyklus: thermische Dehnung

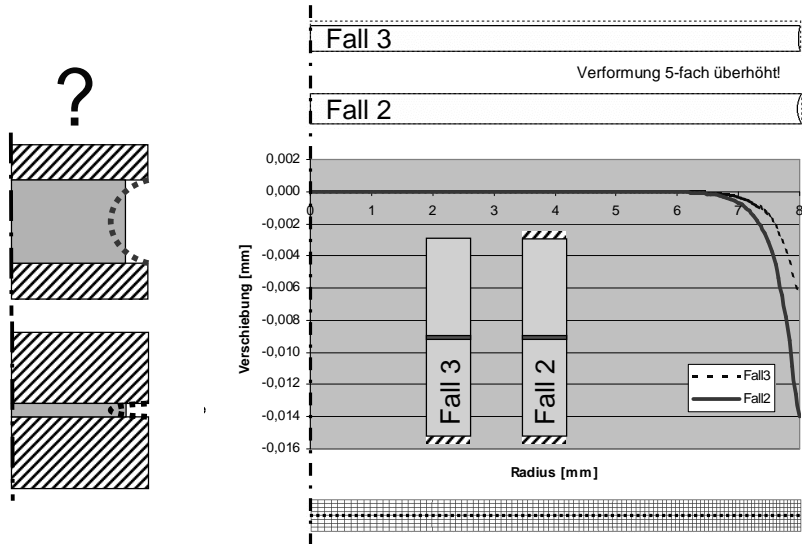
Quelle: Schäfers C. „Einfluss klebstoffspezifischer Eigenspannungs- und Schädigungszustände auf das Festigkeits- und Beständigkeitsverhalten von Metallklebverbindungen“, Diss. Univ. Paderborn, 2004

Tagung „Werkstoffmodelle für Finite Elemente“
7./8. Nov. 2006 München

© immersive SIM engineering GmbH

immersive
sim
engineering

radiale Verschiebung in Klebschichtmitte

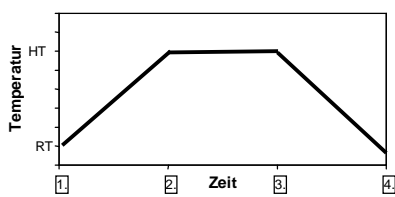


Tagung „Werkstoffmodelle für Finite Elemente“
7./8. Nov. 2006 München

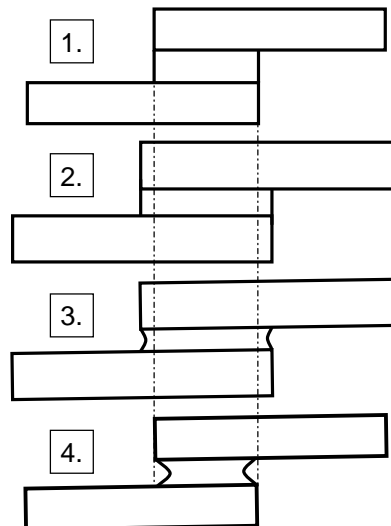
© immersive SIM engineering GmbH

immersive
sim
engineering

Prozeßschritte mit Fügeteilen



1. Auftragen + Fügen
2. Aufheizen
3. Aushärten
4. Abkühlen

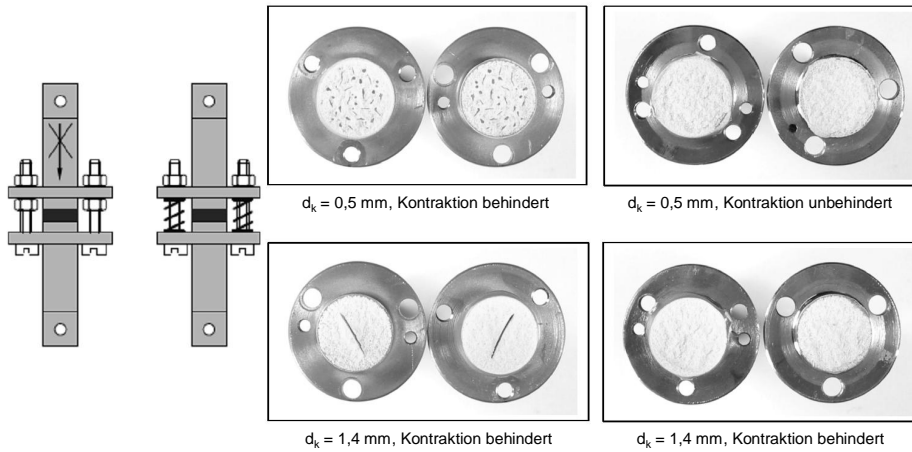


Tagung „Werkstoffmodelle für Finite Elemente“
7./8. Nov. 2006 München

© immersive SIM engineering GmbH

immersive
sim
engineering

Behinderung der Kontraktion in Dickenrichtung



Quelle: Schäfers C. „Einfluss klebstoffspezifischer Eigenspannungs- und Schädigungszustände auf das Festigkeits- und Beständigkeitsverhalten von Metallklebverbindungen“, Diss. Univ. Paderborn, 2004

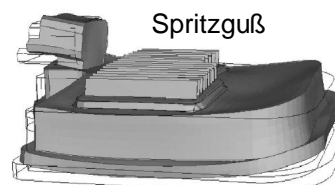
Tagung „Werkstoffmodelle für Finite Elemente“
7./8. Nov. 2006 München

© immersive SIM engineering GmbH

immersive
sim
engineering

Verwandte Problembereiche

- Spritzguß
- Stereolithographie
- Zahnmedizin
- Mikroelektronik
- Optik
- Faseroptik
- Faserverbundwerkstoffe



http://www.bastf.de/bastf/img/produkte/kunststoffe/pk_k2001/Glaser_e.pdf?id=15bt-4Noobsf-XG

Tagung „Werkstoffmodelle für Finite Elemente“
7./8. Nov. 2006 München

© immersive SIM engineering GmbH

immersive
sim
engineering