MARTIN DIRK BUES

Ein Beitrag zur Auslegung tragender Klebverbindungen im Fassadenbau

KIT Scientific Publishing

Martin Dirk Bues

Ein Beitrag zur Auslegung tragender Klebverbindungen im Fassadenbau

BAND 14

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Berichte zum Stahl- und Leichtbau

Ein Beitrag zur Auslegung tragender Klebverbindungen im Fassadenbau

von
Martin Dirk Bues

KIT Scientific Publishing

Karlsruher Institut für Technologie
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine

Ein Beitrag zur Auslegung tragender Klebverbindungen im Fassadenbau

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
von der KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Martin Dirk Bues, M.Eng.

Tag der mündlichen Prüfung: 27. April 2020
Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christian Schuler

Impressum

KIT Scientific Publishing

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu

This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs – is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0): https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en

The cover page is licensed under a Creative Commons Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0): https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en

Print on Demand 2022 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2198-7912
ISBN 978-3-7315-1122-9
DOI 10.5445/KSP/1000136073

Zusammenfassung

Die Dimensionierung von tragenden Klebverbindungen ist normativ nicht geregelt. Dies erschwert die Anwendung dieser Fügetechnologie. In der vorliegenden Dissertation werden Untersuchungen zur Auslegung tragender Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau beschrieben.
Das wesentliche Kernelement ist hierbei die Analyse des zeit- und temperaturabhängigen Tragverhaltens der Klebverbindungen unter Berücksichtigung der Einwirkungsvorgänge.
Es wird zunächst der Stand der Technik mit dem Fokus auf das Trag- und Versagensverhalten von Klebverbindungen aufgearbeitet. Das mechanische Verhalten der Klebschicht wird anhand relevanter theoretischer Grundlagen der Polymermechanik sowie der Werkstofftechnik erläutert. In Ergänzung werden Methoden zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens dargelegt und Vorgehensweisen zur Versagensprognose sowie Dimensionierung aufgeführt.
Auf dieser Basis werden ausgewählte klimatische Einwirkungsvorgänge analysiert. Dies geschieht zunächst durch systematische Analyse des Temperaturverlaufs in geklebten Verbindungen durch Freiluftmessungen. Hierbei werden Temperaturen in Klebschichten unter Einwirkung solarer Strahlung sowie der Lufttemperatur messtechnisch erfasst und analysiert. Anhand der Erkenntnisse werden Rückschlüsse sowohl auf auftretende Temperaturänderungsraten als auch auf die Wirkungsdauer ermittelt. Auf Basis dieser Ergebnisse wird anhand historischer Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes die Wirkungsdauer klimatischer Einwirkungsgrößen in Abhängigkeit von der Lasthöhe analysiert und in Form von Lastkollektiven beschrieben.
An drei verschiedenen Klebstoffen werden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Hierzu werden diese zunächst mit Hilfe verschiedener Experimente werkstofftechnisch charakterisiert. In der anschließenden Hauptversuchsreihe wird das Verhalten von querdehnbehinderten Klebverbindungen unter Zugbeanspruchung untersucht. Durch die Verwendung verschiedener Querschnittsvariationen (Breite-/Höhe-Verhältnisse) wird der Einfluss der Geometrie auf das Trag- und Versagensverhalten untersucht. Die Experimente werden unter Einfluss verschiedener Parameter (Temperaturen, Dehnrate, Feuchte) durchgeführt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird das Tragverhalten der linienförmigen Klebverbindung analytisch wie auch numerisch untersucht. Zunächst werden sowohl analytisch als auch numerisch die Beanspruchungszustände im querdehnbehinderten Zugexperiment analysiert. Auf dieser Grundlage wird ein analytisches Modell zur Prognose des geometrieabhängigen Eintretens von Kavitationseffekten unter Zugbeanspruchung hergeleitet. Die Prognosefähigkeit dieses Modells wird anhand der durchgeführten experimentellen Untersuchungen validiert. Ferner wird der Einfluss von Zeit und Temperatur auf das Eintreten dieser Kavitationseffekte betrachtet. Hierzu wird durch die Anwendbarkeit der Zeit-Temperatur-Verschiebung gezeigt, dass verschiedene Experimente und Probenformen den identischen Relaxationsmechanismen folgen. Anhand eines abschließenden Berechnungsbeispiels unter Anwendung eines zuvor zeit-und temperaturabhängig kalibrierten visko-elastischen Werkstoffmodells wird der Einfluss der Temperatur auf den Ausnutzungsgrad eines Fugenabschnittes unter Windbelastung aufgezeigt.

Summary

The dimensioning of load-bearing adhesive joints is not regulated within codes, which complicates the use of this joining technology in glass and façade construction. In this dissertation, investigations into the design of load-bearing adhesive joints in glass and façade construction are described.
The main element here is to analyze of the time- and temperature-dependent properties of the load scenarios as well as the mechanical properties of the considered adhesive bonds.
First of all, the state of the art is outlined with a focus on the load-carrying and failure behavior of adhesive joints. The mechanical behavior of the adhesive layer is explained based on relevant theoretical fundamentals of polymer mechanics and materials engineering. In addition, methods for describing this material behavior are described and failure prediction procedures are listed.
On this basis, selected climatic loads are analyzed. This is achieved first through systematic analysis of the temperature profile in bonded joints by an open-air measurement. Here, temperatures in adhesive layers under the influence of solar radiation and air temperature are measured and analyzed. Based on these findings, conclusions are drawn on occurring temperature change rates as well as the duration of the load. Based on these results, the duration of effect of climatic influence variables as a function of the load height is analyzed using historical weather data of the German Meteorological Service and described in the form of load collectives.
Extensive experimental investigations are carried out on three different adhesives. For this purpose, these are first materially characterized by means of various experiments. In the following main series of experiments, the behavior of joint-like specimen under tensile stress is investigated. By using different cross-sectional variation (width / height ratios), the influence of geometry on load-bearing and failure behavior is investigated. The experiments are carried out under the influence of various parameters (temperatures, strain rate, humidity). Based on these findings, the bearing behavior of the linear adhesive bond is investigated analytically and numerically. First, the stress states are analyzed analytically as well as numerically in the transversaly-constrained tensile experiments. On this basis, an analytical model for predicting the geometry-dependent

occurrence of cavitation effects under tensile stress is derived. The predictive capability of this model is validated by experimental studies. Furthermore, the influence of time and temperature on the occurrence of these cavitation effects is investigated. For this purpose, based on the applicability of the time-temperature shift it is shown that different experiments and sample forms follow similar relaxation mechanisms. Based on a final calculation example using a previously calibrated visco-elastic material model, the influence of temperature on the degree of load capability of a joint section under wind load is shown.

Vorwort

Wie die Tragkapazität einer Klebverbindung ist auch das Gelingen einer Dissertation von zahlreichen Randbedingungen abhängig. An dieser Stelle möchte ich daher allen denjenigen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Bearbeitung meiner Dissertation unterstützt haben.

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer für die Übernahme des Hauptreferats, seine Unterstützung in allen Phasen der Arbeit sowie für die kritische Durchsicht der Ausarbeitung. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Schuler für die Übernahme des Koreferats, seine vorbildliche Unterstützung und Motivation sowie seine wertvollen Anregungen bedanken. Außerdem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Wagner für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken. Auch möchte ich den Mitgliedern der Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Betsch und Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Knödel, meinen Dank aussprechen. Mein Dank gilt ebenfalls den vielen Kollegen, die ich kennenlernen und mit denen ich arbeiten durfte. Dieser gilt besonders meinen Institutskollegen am KIT, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Matthias Albiez, der mir stets mit Rat und wertvollen Anregungen zur Seite stand. Auch bei meinen ehemaligen Kollegen in München möchte ich mich ganz ausdrücklich für die gute Zeit bedanken. Ganz besonders möchte ich mich bei meinem langjährigen Zimmerkollegen, Herrn Marcus Illguth, für den produktiven Austausch und das inspirierende Arbeitsklima in der frühen Phase dieser Arbeit bedanken. Des Weiteren möchte ich den verschiedenen Mitarbeitern anderer Institute meinen Dank äußern, die diese Arbeit durch gemeinsame Diskussionen und alternative Standpunkte positiv beeinflusst haben. An dieser Stelle sei hier stellvertretend Herr Dr. Till Vallée vom Fraunhofer IFAM genannt, der mir vollkommen neue Herangehensweisen vorgelebt und dadurch neue Sichtweisen eröffnet hat. Ferner möchte ich auch meinem alten Chef im Labor für Stahl- und Leichtmetallbau, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ömer Bucak, danken, der mich schon während meines Studiums zur Klebtechnik gebracht hat und von dem ich Dinge der Arbeitswelt lernen durfte, die mir mein ganzes Berufsleben helfen werden. Ebenso möchte ich mich bei Frau Anneliese Hagl, Herrn Dr.-Ing. Stefan Brendler, Frau Prof. Dr.-Ing. Imke Engelhardt und Herrn Dr. Jürgen Meier bedanken. Darüber hinaus

möchte ich ganz ausdrücklich der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. sowie den Firmen Seele GmbH, Dow Corning, TESA und Kömmerling für die Unterstützung meiner Forschungsarbeit danken. Ein besonderer Dank gilt hier Herrn Dr. Wolfgang Wittwer für sein Interesse an dem Thema und seinem positiven Zuspruch, der mir sehr geholfen hat.

Meinen Eltern danke ich für ihre Unterstützung und dafür, dass sie mir diese Ausbildung ermöglicht haben. Meinen Freunden danke ich für die notwendige Ablenkung, die während der Ausarbeitung einer solchen Arbeit sehr wichtig ist.

Der größte Dank gilt meiner Familie, meiner Frau und meinen Kindern für das große Verständnis und die bedingungslose liebevolle Unterstützung während der Ausarbeitung dieser Dissertation.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung i

Summary iii

Vorwort v

Abkürzungen und Symbole xi

1 Einleitung 1
1.1 Ausgangssituation 1
1.2 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise 2

2 Kenntnisstand 5
2.1 Klebtechnik 5
2.1.1 Definition und Einteilung 5
2.1.2 Anwendung im Ingenieurwesen 6
2.1.3 Tragende Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau 8
2.1.4 Grundlagen der zur Anwendung kommenden Klebverbindungen . . 8
2.2 Mechanische Grundlagen elastischer Klebverbindungen 11
2.2.1 Modellvorstellung des Aufbaus einer Klebschicht 11
2.2.2 Polymerphysikalische Grundlagen 12
2.2.3 Modelle zur Abbildung des Werkstoffverhaltens 21
2.3 Auslegung von Klebverbindungen 35
2.3.1 Beanspruchbarkeit von Klebverbindungen 35
2.3.2 Methoden der Versagensprognose für Klebverbindungen 39
2.4 Dimensionierung von Bauteilen im Bauwesen 43
2.4.1 Grundlagen der Bauteildimensionierung im Bauwesen 43
2.4.2 Ermittlung von Lastgrößen aus klimatischen Einwirkungen 44
2.4.3 Behandlung zeitabhängiger Werkstoffeigenschaften 52
2.4.4 Dimensionierung von Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau 54
2.5 Stand der Forschung im Glas- und Fassadenbau 57
2.6 Zusammenfassung und Darstellung des Forschungsbedarfs 60

3 Wirkungsdauer klimatischer Einwirkungen 61
3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise 61
3.2 Untersuchte Parameter 62
3.2.1 Definitionen 62
3.2.2 Einteilung 62
3.2.3 Ersatzlastbild für die Windlast 63
3.3 Freiluftmessung 65
3.3.1 Aufbau des Messstandes 65
3.3.2 Ergebnisse der Messung 69
3.3.3 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Freiluftmessung 76
3.4 Analyse der Wirkungsdauer klimatischer Einwirkungsparameter 78
3.4.1 Methodische Vorgehensweise und Datenbasis 78
3.4.2 Wirkungsdauer von Lufttemperaturen 84
3.4.3 Wirkungsdauer von Luftdruckabweichungen 96
3.4.4 Wirkungsdauer von Luftfeuchtigkeitsperioden 102
3.4.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse 106
3.5 Analyse der Wirkungsdauer der Bauteiltemperatur 107
3.5.1 Ausgangssituation 107
3.5.2 Grundlagen zur effektiven Strahlungseinwirkung 108
3.5.3 Rechnerische Grenzwertbetrachtung zur Bauteiltemperatur 110
3.5.4 Diskussion der Ergebnisse 117
3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Transfer zur Praxisbemessung . 119
3.6.1 Temperaturlast auf geklebte Verbindungen im Fassadenbau 119
3.6.2 Beanspruchung von Klebfugen infolge klimatischer Einwirkungen . 120

4 Experimentelle Untersuchungen 129
4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise 129
4.2 Experimente zur Werkstoffcharakterisierung 130
4.2.1 Ziel und Aufbau der Experimente zur Werkstoffcharakterisierung . 130
4.2.2 Dynamisch-mechanisch-thermische Analyse (DMTA) 132
4.2.3 Quasi-statische Zugexperimente in Anlehnung an DIN EN 527 135
4.2.4 Zugscherexperimente in Anlehnung an DIN EN 1465 143
4.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Werkstoffcharakterisierung 155
4.3 Experimente an fugenähnlichen Proben 156
4.3.1 Ziel und Aufbau der Experimente 156
4.3.2 Experimentelle Randbedingungen 158
4.3.3 Experimente zum Einfluss der Geometrie 165
4.3.4 Experimente zum Einfluss der Nenndehnrate bei Raumtemperatur 168
4.3.5 Experimente nach Feuchteimmersion 172

4.3.6 Experimente unter Tief- und Hochtemperatur 175
4.3.7 Kombinierte raten- und temperaturabhängige Scher- und Zugexperimente (Werkstoff HKB) 179
4.3.8 Diskussion der Ergebnisse an fugenähnlichen Proben 187
4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse 197
4.4.1 Experimente zur Werkstoffcharakterisierung 197
4.4.2 Experimente an der modifizierten H-Probe 197

5 Tragverhalten von 2-Flankenklebungen 201
5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise 201
5.2 Analyse des Einflusses der Probegeometrie auf das Tragverhalten 202
5.2.1 Ausgangssituation 202
5.2.2 Bestimmung von Werkstoffparametern aus uniaxialen Zugversuchen 204
5.2.3 Anwendbarkeit der Parameter auf die modifizierte H-Probe 207
5.2.4 Numerische Analyse 210
5.2.5 Analytische Betrachtung der effektiven Steifigkeit 221
5.2.6 Zusammenfassung und Diskussion 226
5.3 Analyse von Grenzkriterien 228
5.3.1 Ausgangssituation 228
5.3.2 Scherbeanspruchung 229
5.3.3 Zugbeanspruchung 240
5.3.4 Analytische Betrachtung des geometrieabhängigen Kavitationseintritts 247
5.3.5 Zusammenfassung und Diskussion 258
5.4 Analyse des Einflusses von Zeit und Temperatur auf das Tragverhalten . 260
5.4.1 Ausgangssituation 260
5.4.2 Untersuchungen zur Anwendbarkeit des ZTV-Prinzips 261
5.4.3 Kalibrierung eines Werkstoffmodells 268
5.4.4 Simulation einer Windsogeinwirkung bei verschiedenen Temperaturen 279
5.5 Zusammenfassung und Transfer zur Praxisbemessung 283
5.5.1 Diskussion der Randbedingungen ETAG 002 283
5.5.2 Diskussion von Grenzkriterien 285
5.5.3 Diskussion der Bedeutung des Zeit-Temperatur-Einflusses für andere Klebstoffsysteme 287

6 Zusammenfassung 289

A Anhang 295

Abbildungsverzeichnis **303**

Tabellenverzeichnis **315**

Literaturverzeichnis **319**

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

DMTA	Dynamisch-Mechanisch-Thermische-Analyse
DWD	Deutscher Wetterdienst
ETA	European Technical Approval
ETAG	European Technical Approval Guideline
FEM	Finite-Elemente-Methode
GEH	Gestaltänderungsenergiehypothese
GIB	Scheibentyp Freiluftmessung Ipachrome Design
GIC	Scheibentyp Freiluftmessung Ipasolbright neutral Design
GZE	Grenzzustand der Ermüdung
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
H – Probe	Standardprobe nach ETAG 002
HKB	Klebstoff TESA® SE ACX 7078plus
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MEK	Methylethylenketon
PSA	Pressure Sensitive Adhesive
RT	Raumtemperatur
sd	Schätzwert der Standardabweichung (Annahme: normalverteilte Grundgesamtheit)
SG	Structural Glazing

SGA	Klebstoff Dow Corning DC993
SGB	Klebstoff SIKA Sikasil SG-550
UK	Unterkonstruktion (Freiluftmessung)
VarK	Variationskoeffizient
ZTV	Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip
ø	Bohrungsdurchmesser

Lateinische Symbole und Variablen

a	Geometrieparameter nach (99)
a_{ETAG}	Parameter der Glasscheibe (81)
b	Geometrieparameter nach (99)
b_{ij}	Datenmatrix Ergebnis (Zählalgorithmus)
b_K	Klebschichtbreite
c_{Glas}	spezifische Wärmekapazität Glas
c_{ij}	Datenmatrix Sequenz (Zählalgorithmus)
c_p	aerodynamischer Beiwert
d_{AM}	Dicke der Glasscheibe (Analogiemodell)
d_K	Klebschichtdicke/-höhe
$d_{K,H-Probe}$	Klebschichtdicke H-Probe (81)
e_{ETAG}	berechnete Fugenhöhe (81)
f_1, f_2, f_3	Frequenzen (DMTA)
$f_{1,x}, f_{2,x}, f_{3,x}$	Frequenzen (DMTA) im reduzierten Frequenzbereich (ZTV)
g_∞	Gleichgewichtsmodul
h_c	Fugenbreite nach (81)
h_{Probe}	Probenhöhe

i	Laufparameter
j	Laufparameter
k_{mod}	Modifikationsfaktoren
$\vec{k_j}$	Klassenvektor (Zählalgorithmus)
k_b	Boltzmann-Konstante
l_0	Ausgangslänge/Einspannlänge
l_K	Klebschichtlänge
$l_{Lager,oben/unten}$	Lagerabstand oben/unten (Zugscherexperiment)
$t_{Klebschicht}$	Höhe der Klebschicht (Ersatzfeder)
n	Anzahl einer Grundgesamtheit
p_0	isochorer Druck (Isolierglas)
p_{met}	Luftdruck
$p_{met,Tag}$	mittlerer Luftdruck (Mittelungsintervall: Tag)
$p_{Kavitation}$	kritischer hydrostatischer Zug (Kavitationskriterium)
$\overline{p}_(x,y)$	gemittelte hydrostatische Druckverteilung nach (99)
p	hydrostatischer Druck
p_f	Versagenswahrscheinlichkeit
p_{HKB}	Applikationsdruck Herstellung
$\dot{p}$	Luftdruckänderung pro Zeiteinheit
q_p	Böenstaudruck
$q_{b,0}$	Geschwindigkeitsstaudruck
q_{Diff}	Staudruckdifferen
$\dot{q}$	Böenstaudruckrate
$\log s$	ZTV-Verschiebungsfaktor (vertikal)
t_K	Dicke der Substanzprobe

t_{Bezug}	Bezugszeitraum (Wahrscheinlichkeit)
t_{Boe}	Böendauer
t	Geometrieparameter nach (99)
t'	Ersatzzeit
u	Verschiebungsgröße
u_x, u_y, u_z	Verschiebungsgrößen in X-,Y- und Z-Richtung
$v_{b,0}$	Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit
v_b	Basiswindgeschwindigkeit
v_T	Traversengeschwindigkeit
v	Geschwindigkeit (Wind)
v_m	mittlere Windgeschwindigkeit
v_p	Böengeschwindigkeit
w_d	Staudruck
x, y, z	Achsenbezeichnung Koordinatensystem
$\vec{x_i}$	Parametervektor (Zählalgorithmus)
$\log x$	reduzierter Zeitbereich (ZTV)
$\overline{x}_i$	Mittelwert
$\tilde{x}$	Median
z	Gebäudehöhe (55)
A_0	Nennscherfläche
A_1, A_2, A_3	Abminderungsbeiwerte nach (193)
A_n	Querschnittssollfläche
A_{AM}	Fläche der Glasscheibe (Analogiemodell)
A_{frei}	freie Querschnittsfläche (Shape-Faktor)
A_{Last}	belastete Querschnittsfläche (Shape-Faktor)

$A_{Klebschicht}$	Fläche der Klebschicht (Ersatzfeder)
A_{Probe}	Probenquerschnitt
A_S	Spannungsquerschnitt M10-Gewindestange
C_1, C_2	WLF-Parameter
$C_{Testaufbau}$	Steifigkeit Testaufbau
$C1$	Parameter Neo-Hooke-Modell
$C1, C2$	Parameter Mooney-Rivlin-Modell (205)
$D1$	Parameter Neo-Hooke-Modell
E	Elastizitätsmodul
E_d	Bemessungswert Einwirkung
E_{diff}	Bestrahlungsstärke Diffusstrahlung
E_{eff}	effektiver Elastizitätsmodul
$E_{eff,V}$	effektive Bestrahlungsstärke
E_{glob}	Bestrahlungsstärke Globalstrahlung
$E_{h,glob}$	effektive Bestrahlungsstärke (Globalstrahlung)
$E_{h,diff}$	effektive Bestrahlungsstärke (Diffusstrahlung)
E_k	Charakteristischer Wert der Einwirkung
E_m	Mittelwert der Einwirkung
$E_{querdehnbehindert}$	Elastizitätsmodul (querdehnbehindert)
$E_{uniaxial}$	Elastizitätsmodul (uniaxial)
$E_{Aktivierung}$	Arrhenius-Aktivierungsenergie
$E_{Arrhenius}$	Arrhenius-Parameter
E_{Bezug}	Bezugsmodul zur Berechnung von E_{eff} (26)
E_{ETA}	Elastizitätsmodul nach (81)
$E_{Klebschicht}$	E-Modul der Klebschicht (Ersatzfeder)

$E(t)$	Relaxationsmodul (E-Modul)
F	Kraft
G	Schubmodul
G_0	initialer Schubmodul
G_k	Charakteristischer Wert der ständigen Einwirkung
G''	Verlustmodul (Schub/Zug, DMTA)
G'/E'	Speichermodul (Schub/Zug, DMTA)
G''/E''	Verlustmodul (Schub/Zug, DMTA)
G^*/E^*	Komplexmodul (Schub/Zug, DMTA)
G'_{DMTA}	Speichermodul (Masterkurve DMTA)
G''_{DMTA}	Verlustmodul (Masterkurve DMTA)
G_{ETA}	Schubmodul nach (81)
$G(t)$	Relaxationsmodul (Schubmodul)
I	Einheitstensor
I_1, I_2, I_3	1., 2. und 3. Invariante
I_1^*	1. reduzierte Invariante
I_y	Flächenträgheitsmoment
J	Jacobimatrix
$J_K(t)$	Kriechnachgiebigkeit
$J_R(t)$	Relaxationsnachgiebigkeit
K	Kompressionsmodul
K_x, K_y, K_z	Federsteifigkeit X,Y, Z-Richtung
$K(t)$	Relaxationsmodul (Kompressionsmodul)
N_n	Netzwerkdichte pro Volumeneinheit
P	Wahrscheinlichkeit

Q_P	Quantil für die Wahrscheinlichkeit P
$Q_{h,glob}$	Stundensumme Globalstrahlungsarbeit (horizontale Fläche)
$Q_{h,diff}$	Stundensumme Diffusstrahlungsarbeit (horizontale Fläche)
R	Widerstand
R	allgemeine Gaskonstante
R_d	Bemessungswert Widerstand
$R_{se/si}$	Wärmeübergangswiderstand außen/innen
R_k	Charakteristischer Wert des Widerstandes
R_m	Mittelwert des Widerstandes
T	Temperatur
T_g	Glasübergangstemperatur
T_{min}, T_{max}	minimale und maximale Temperatur
T_m	mittlere Temperatur
$T_{m,Stunde}$	mittlere Temperatur (Mittelungsintervall: Stunde)
$T_{m,Tag}$	mittlere Temperatur (Mittelungsintervall: Tag)
$T_{Aussenluft}$	Außentemperatur
$T_{Bauteil}$	berechnete Bauteiltemperatur
$T_{\infty,Bauteil}$	berechnete Bauteiltemperatur (Langzeit)
$T_{Erwaermung}$	berechnete Temperaturerhöhung infolge Strahlungseinwirkung (Freiluftmessung)
$T_{Glas/Klebschicht/Halter}$	gemessene Temperatur an den Messstellen Glas/Klebschicht/Halter (Freiluftmessung)
$T_{Strahlung}$	berechnete Temperaturerhöhung infolge Strahlungseinwirkung (Analogiemodell)
T_{Luft}	Lufttemperatur
T_S	Schmelztemperatur

T_x, T_y, T_z	Translationsfreiheitsgrad in X-,Y- und Z-Richtung
$\dot{T}$	Temperaturänderungsrate (Freiluftmessung)
$\dot{T}_{Stunde}$	Temperaturänderungsrate (Mittelungsintervall: Stunde)
$\dot{T}_{Tag}$	Temperaturänderungsrate (Mittelungsintervall: Tag)
$Q_{k,1}$	Charakteristischer Wert der dominierenden veränderlichen Einwirkung
$Q_{k,i}$	Charakteristischer Wert der begleitenden veränderlichen Einwirkung
W	Formänderungsenergiedichte Neo-Hooke
W_{ETAG}	Windlast nach (81)
W_{vol}	volumetrische Formänderungsenergiedichte Neo-Hooke

Griechische Symbole und Variablen

α	Formparameter nach (99)
α	Wärmeausdehnungskoeffizient
α_{Gent}	Parameter zur Berechnung von E_{eff} (26)
$\log \alpha_T$	ZTV-Verschiebungsfaktor (horizontal)
β	Abklingkonstante (2)
β_{k_i}	Abklingkonstante (2)
β_n	Formparameter nach (99)
β_s	Sonnenwinkel

$\beta_{operativ}$	operativer Ausnutzungsgrad
$\overline{\beta}_n$	Formparameter nach (99)
β_{Gent}	Verhältnisfaktor zur Berechnung von E_{eff} (26)
γ	Gleitwinkel
γ_n	Formparameter nach (99)
γ_v	Neigungswinkel Verglasung
γ_{global}	globaler Sicherheitsbeiwert
$\gamma_{Q,1}$	Teilsicherheitsbeiwert für die dominierende veränderliche Einwirkung
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für die ständige Einwirkung
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert Werkstoff
$\tan\gamma$	nominelle Gleitung
$\dot{tan\gamma}$	Nenngleitrate
$\overline{\gamma}_n$	Formparameter nach (99)
δ	Phasenwinkel (DMTA)
$\epsilon_{n,yy}$	nominelle Dehnung (Querrichtung)

ϵ_1	1. Hauptdehnung
ϵ	Dehnung
ϵ_n	nominelle Dehnung
ϵ_w	wahre Dehnung
ϵ_1	wahre Hauptdehnung
ϵ_v	volumetrische Dehnung
$\epsilon_{xx/yy/zz}$	Dehnungskomponenten
ϵ_{xy}	Schergleitung
$\epsilon_{Kavitation}$	Deformationsgrenze Kavitationseintritt
$\epsilon_{St.Venant}$	St.Venant-Hauptdehnung
$\dot{\epsilon}$	Nenndehnrate (nominelle/technische Dehnrate)
$\dot{\epsilon}_n$	Nenndehnrate
$\dot{\epsilon}_{n,x}$	Nenndehnrate im reduzierten Zeitbereich (ZTV)
η	Triaxialität
η_D	Viskosität (Dämpfer)

ϑ_{min}	Lufttemperatur nach (82)
ϑ	Lufttemperatur nach (82)
λ_{AM}	Wärmeleitfähigkeit
λ	Streckgrad
$\lambda_{1,2,3}$	Streckgrad in Hauptrichtung 1, 2, 3
ν	Querdehnzahl
$\nu(t)$	Querdehnzahl als Funktion der Zeit
ρ_{Glas}	Dichte Glas
ρ_{Luft}	Dichte Luft
σ_R	Charakteristischer Wert der Beanspruchbarkeit
σ_k	Charakteristischer Wert der einwirkenden Spannung
$\sigma_{vorhanden}$	wirkende Spannung
σ_{zul}	zulässige Spannung
$\sigma_{Rankine}$	Rankine-Hauptspannung
$\sigma_{Rankine,Scherung}$	Rankine-Hauptspannung (Scherung)

σ	Spannung
σ_n	nominelle Spannung
σ_0	initiale Spannung
$\sigma_{xx/yy/yy}$	Normalspannungskomponenten
σ_{xy}	Scherspannungskomponente
σ_m	hydrostatische Spannung
$\sigma_{eff,kav}$	nominelle Spannung (Kavitation)
σ_{centre}	Bemessungsspannung (Wind) (81)
$\dot{\sigma_n}$	Nennspannungsrate
τ_i	Relaxationszeit Maxwell-Modell
τ_{xy}	Scherspannungskomponente
τ_n	Nennscherspannung
τ	Scherspannung
τ_{des}	Bemessungsspannung (Temperatur) nach (81)
ϕ_v	Ausrichtung der Verglasung

φ_m	relative Luftfeuchtigkeit (Mittelungsintervall: Tag)
$\psi_{0,i}$	Kombinationsbeiwert einer veränderlichen Einwirkung
ψ_s	Azimutwinkel
ω	Kreisfrequenz
Δl	Längenänderung
Δt	Zeitintervall
Δp_m	Luftdruckabweichung
$\Delta p_{m,charakteristisch}$	charakteristische Luftdruckabweichung
Δp_{met}	Änderung des atmosphärischen Luftdrucks
Δp_{geo}	Druckänderung aus Höhenänderung
Δ_{ETAG}	Differenzverschiebung Fügepartner nach (81)
Δu	gemessene Verschiebung (Traverse/Video)
Δu_K	berechnete Verschiebung Klebschicht
$\Delta u_{Traverse}$	Traversenverschiebung
ΔT	Temperaturdifferenz/-änderung

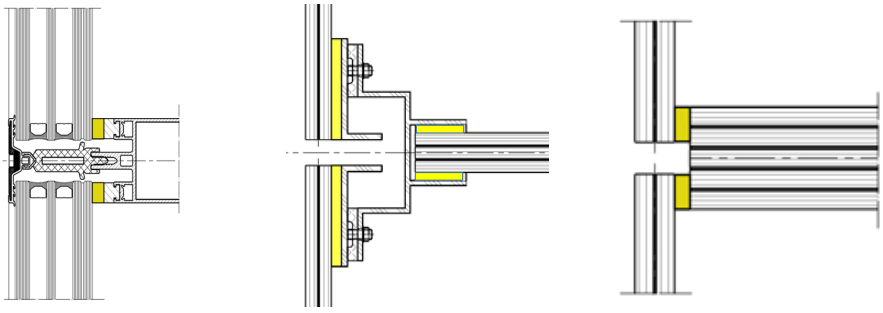
ΔT_∞	dauerhafte Temperaturdifferenz
Δv	gemessene Verschiebung Querrichtung (Video)
Θ_s	Parameter Scheibenneigung (Bestrahlung)
Θ_N	Parameter Himmelsrichtung (Bestrahlung)
Φ_B	Winkel der Bruchebene
$\Phi(T)$	temperaturabhängige Verschiebungsfunktion

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Im konstruktiven Glas- und Fassadenbau kommen tragende Klebverbindungen als Verbindungstechnik zur Anwendung. Diese werden oft zur Anbindung plattenartiger Fassadenelemente an die tragende Unterkonstruktion genutzt. Diese Klebverbindungen werden meist linienförmig und mit rechteckigen Querschnitten zwischen planmäßig parallel gegenüberliegenden Fügepartnerflächen ausgeführt (2-Flankenklebung). Dies geschieht unter Anwendung von Dickschichtklebungen. Die hierfür zur Anwendung kommenden Werkstoffe kennzeichnen sich durch große Verformungsfähigkeit und ein elastomerähnliches Werkstoffverhalten. Diese Klebverbindungen werden neben Nutzlastanteilen (z.B. Holmlasten) insbesondere durch klimatische Einwirkungen (z.B. Temperatur, Wind) belastet. Die aus diesen Lasten resultierenden Beanspruchungen müssen durch die Klebverbindung dauerhaft in die Unterkonstruktion übertragen werden können.

Zur Dimensionierung dieser Verbindungen existierten keine allgemeingültigen Regeln



(a) Anbindung von Isoliergläsern **(b)** Anbindung von Metallprofilen **(c)** Verbindung von Glaselementen

Abbildung 1.1: Schema verschiedener Konstruktionsvarianten linienförmiger Klebverbindungen (Quelle: eigene Zeichnungen)

der Technik. Aus diesem Grund wird meist bei der Nachweisführung dieser Verbindungen Gebrauch von Kenndaten und Methoden gemacht, die auf der Zulassungsleitlinie für geklebte Adapterrahmen, ETAG 002 (81), basieren. Die hier definierten Methoden zur Kennwertermittlung sind an Anwendungsrandbedingungen, wie beispielsweise das Einhalten von Breite-/Höhe-Verhältnissen des Fugenquerschnitts oder definierte Lagerungsrandbedingungen, gebunden. Viele moderne Konstruktionen weichen jedoch von den Randbedingungen dieser Richtlinie ab ((170), (135), (94)). Dies liegt oft an einer Veränderung der Art der Lagerungsrandbedingungen, so sind bereits vermeintlich einfache Glasstöße im Hausbau (siehe Abbildung 1.2, links) oder klebtechnisch gelagerte Dachkonstruktionen (siehe Abbildung 1.2, rechts) nicht mehr durch den Geltungsbereich abgedeckt. Diese Vorgehensweise führt zu Unkenntnis hinsichtlich des



(a) Isolierglasecken im Häuserbau



(b) strukturelle Verbindungen im Glasfassadenbau



(c) linienförmige Dachlagerung im konstruktiven Glasbau

Abbildung 1.2: Anwendungsbeispiele für Klebverbindungen im konstruktiven Glasbau (Quelle: eigene Aufnahmen)

realen Ausnutzungsgrades der Klebverbindung. Diese resultiert neben den Fragestellungen zur Beständigkeit vor allem aus der Ungewissheit hinsichtlich der Auswirkung des zeit- und temperaturabhängigen Werkstoffverhaltens der Klebfuge. Dies gilt insbesondere für Einwirkungen, die eigene zeit- und temperaturabhängige Vorgänge darstellen. Dies erschwert die Dimensionierung und behindert bautechnische Nachweis- und Zulassungsverfahren.

1.2 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Arbeit werden analytische, experimentelle sowie numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von 2-Flankenklebungen durchgeführt. Der zentrale Beitrag dieser Arbeit sind die Analyse und Diskussion klimatischer Einwirkungsgrößen

als zeit- und temperaturabhängige Vorgänge und die wissenschaftliche Betrachtung der Tragfähigkeit auf dieser Grundlage. Die Arbeit ist in sechs Kapitel gegliedert, deren Aufbau und Inhalt nachfolgend beschrieben werden.
Zunächst wird in **Kapitel 2** der aktuelle Stand der Technik und Forschung wiedergegeben. Hierzu werden zunächst die Klebtechnik und ihre industrielle Anwendung beschrieben sowie die Modellvorstellung zum Aufbau polymerer Netzwerke. Weiterführend werden Methoden der Beschreibung des mechanischen Verhaltens vorgestellt. Aufbauend auf diesen Kenntnissen werden Trag- und Versagensmechanismen für Klebverbindungen erläutert, zudem wird ein Überblick über aktuelle Methoden der Versagensprognose gegeben. Zum Verständnis der im Bauwesen geltenden Dimensionierungsmethoden erfolgt anschließend eine Aufarbeitung der wesentlichen Grundlagen des bautechnischen Sicherheitskonzeptes und der Behandlung klimatischer Lastgrößen. Abschließend wird auf Basis dieser Ausgangssituation der Forschungsbedarf aufgeführt. In **Kapitel 3** wird die Wirkungsdauer ausgewählter klimatischer Parameter

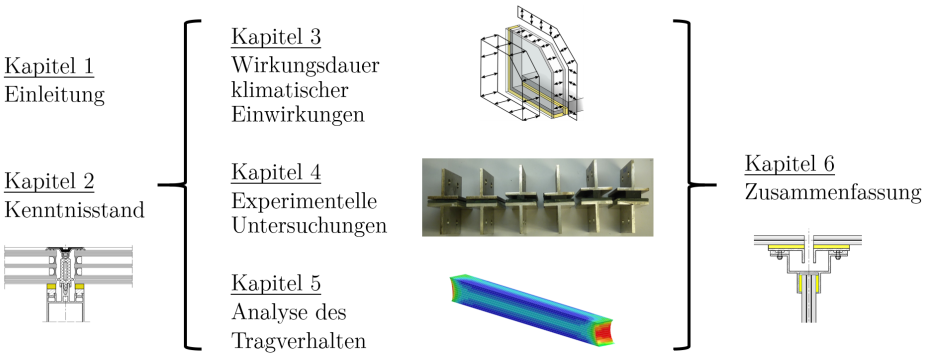


Abbildung 1.3: Schematischer Aufbau der Arbeit (Quelle: eigene Darstellung)

untersucht. Mit Hilfe einer Freiluftmessung an geklebten Glas-Aluminium-Elementen wird die Temperatur in der Klebschicht in situ messtechnisch erfasst. Das Ziel ist es, Rückschlüsse auf das zeitliche Auftreten von sommerlichen Hochtemperatur- sowie winterlichen Tieftemperaturereignissen in Klebverbindungen zu ermitteln. Auf Basis dieser Ergebnisse wird mit Hilfe eines programmierten Zählalgorithmus die Wirkungsdauer verschiedener klimatischer Parameter in Abhängigkeit von der Lasthöhe ermittelt. Hierzu werden in Abhängigkeit von dem jeweiligen Parameter jeweils die Daten von über 10 verschiedenen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) analysiert. Die Ergebnisse werden in Klimalastkollektive überführt. Zum Abschluss dieses Kapitels erfolgt eine Auseinandersetzung mit der Behandlung der zeitlichen Wirkung

von Temperaturlasten unter Freibewitterung. Hierzu wird eine Grenzwertbetrachtung unter Anwendung einer bauphysikalischen Analogiebetrachtung durchgeführt.
In **Kapitel 4** erfolgt auf Basis der zuvor erarbeiteten Ergebnisse die experimentelle Analyse des Tragverhaltens von drei ausgewählten Fugenwerkstoffen. Das Kernelement dieser Untersuchungen stellen experimentelle Untersuchungen an realitätsnahen, fugenähnlichen Probekörpern dar. Diese werden als 2-Flankenklebungen ausgebildet, die Modifikationen hinsichtlich des Breite-/Höhe-Verhältnisses der H-Probe nach ETAG 002 darstellen. Anhand dieser Proben wird ein umfangreiches Versuchsprogramm zum Einfluss der Geometrie, der Temperatur sowie der Testgeschwindigkeit auf das Tragverhalten durchgeführt. Die Analyse der Einflüsse dieser Parameter auf das Eintreten des für gummielastische Werkstoffe relevanten Versagenskriteriums der Kavitation steht hierbei im Vordergrund.
In **Kapitel 5** wird das Tragverhalten linienförmiger 2-Flankenklebungen auf Basis analytischer wie auch numerischer Betrachtungen untersucht. Hierbei wird die Versteifung infolge der Querdehnbehinderung unter Zugbeanspruchung analysiert und mit Hilfe analytischer Methoden hinsichtlich der beeinflussenden Parameter beschrieben. Mit Hilfe numerischer Analysen wird der interne Beanspruchungszustand der modifizierten H-Probe unter Scherung wie auch Zugbeanspruchung untersucht. Für diesen beiden Belastungsmoden werden ferner Analysen hinsichtlich geeigneter ingenieurpraktisch nutzbarer Prognosemodelle zur Beanspruchungsbewertung durchgeführt. Auf dieser Grundlage werden zwei analytische Prognosemodelle aufgestellt und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Zum Abschluss des Kapitels findet eine ausführliche Betrachtung zum zeit- und temperaturabhängigen Verhalten und zu seiner Bedeutung für die Auslegung von Klebverbindungen statt.
Die Ergebnisse werden in **Kapitel 6** zusammengefasst.

2 Kenntnisstand

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Stand der Kenntnisse aus Forschung und Anwendung dargestellt, der für die Untersuchungen in dieser Arbeit relevant ist. Hierbei wird zunächst das Fügeverfahren Kleben in der industriellen Anwendung beschrieben und definiert (Abschnitt 2.1). Ferner werden theoretische Grundlagen aus der Mechanik sowie der Werkstofftechnik dargestellt, die zur Durchführung und Interpretation der experimentellen und der numerischen Untersuchungen notwendig sind (Abschnitt 2.2). Ergänzend wird die Grundlage der Bemessung im Bauingenieurwesen beschrieben (Abschnitt 2.3). Dies betrifft insbesondere die Ermittlung von Lastgrößen aus klimatischen Einwirkungen sowie die Behandlung von Werkstoffen mit zeitabhängigen Eigenschaften. Abgeschlossen wird das Kapitel durch die Darstellung des aktuellen Standes der Forschung im Glas- und Fassadenbau (Abschnitt 2.5) sowie eine Zusammenfassung mit Ableitung des Forschungsbedarfs (Abschnitt 2.6).

2.1 Klebtechnik

2.1.1 Definition und Einteilung

Für die Verbindung verschiedenartiger Werkstoffe ist in vielen Industriezweigen die Klebtechnik ein wichtiges Fügeverfahren. Als Kleben wird das Verbinden von Fügeteilen über Adhäsionskräfte (Oberflächenhaftung) und Kohäsionskräfte (Festigkeit des Klebstoffes) mit einem nicht metallischen Bindemittel (= Klebstoff) bezeichnet ((61), (8)). Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, verschiedenartige Werkstoffe und Oberflächen (= Fügepartner) miteinander verbinden zu können. Die zwischen den Fügepartnern wirkende Verbindung wird als Klebfuge, Klebschicht oder Klebnaht bezeichnet. Neben der Klassifizierung nach der physikalischen Beschaffenheit, den chemischen Grundstoffen oder den Abbindemechanismen bieten sich zahlreiche weitere Möglichkeiten zur Einteilung verschiedener Klebverfahren an (84). Normativ sind in

(61) weitere Einteilungsvarianten aufgeführt. Hier sind beispielsweise die Abbindegeschwindigkeit („Sekundenkleber“), die Art der Anwendung („Montageklebstoff“) oder die zu klebenden Werkstoffe („Holzklebstoff“, „Glasklebstoff“) genannt. Dies zeigt, dass viele Bezeichnungen nicht eindeutig sind, ineinander übergehen und oft dazu dienen, dem Anwender die wesentlichen Eigenschaften zu vermitteln.
Eine weitere praktikable Möglichkeit bildet aus ingenieurtechnischer Sicht die Unterscheidung zwischen den strukturellen Klebstoffen, den elastischen Klebstoffen sowie den Dichtstoffen. Diese drei Arten werden normativ nach (8) wie folgt definiert:

- strukturelles Kleben: Kleben zur Übertragung von Kräften
- Dickschichtkleben: Kleben zum Ausgleich von Differenzverformungen und unterschiedlichen Fügeteildynamiken
- Dichten: Abdichten gegenüber Medien (z.B. Isolierglasrandverbund)

Zu diesen Definitionen muss ergänzt werden, dass viele Dickschichtklebungen ebenso strukturelle Klebungen darstellen. Das bedeutet, dass planmäßig Lasten über diese Verbindungen übertragen werden. Die Definition einer Dickschichtklebung kann daher auch durch die Befähigung zur dauerhaften Aufnahme großer Scherwechselverformungen erfolgen. Eine Definition dieser Art auf Basis dieses Eigenschaftsprofil ist in (63) wie folgt zu finden:

> Elastische Dickschichtklebverbindungen im Sinne dieses Merkblatts sind Klebverbindungen, deren Klebspaltdicke größer als 1,5 mm ist. Dabei kommt ein Klebstoff zur Anwendung, der im abgebundenen Zustand gummielastische Eigenschaften besitzt und Schub-(wechsel-)verformungen von mehr als 15 % der Klebspaltdicke auf Dauer schädigungsfrei ertragen kann.

Diese Befähigung zur Aufnahme großer Deformationen ist als ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der strukturellen Dickschichtklebungen zu den strukturellen Klebverbindungen mit dünnen Schichten (Dünnschichtklebungen) anzusehen.

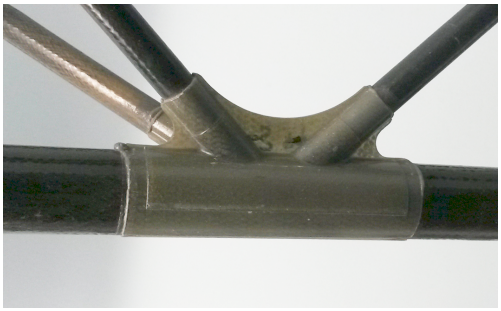
2.1.2 Anwendung im Ingenieurwesen

Klebverbindungen werden in zahlreichen Ingenieurdisziplinen in verschiedenen Variationen, Größenskalen und Anwendungsfeldern genutzt. Besonders durch den zunehmenden Einsatz von Verbundwerkstoffen und Multi-Material-Konstruktionen werden

die vorteilhaften technologischen Eigenschaften zunehmend genutzt. Mit der Klebtechnik und ihren zahlreichen Produkten und Chemien ist eine Verbindung vieler Werkstoffe grundsätzlich möglich. Dies gilt insbesondere für Werkstoffe mit hoher industrieller Relevanz wie Metalle, Kunststoffe, Keramiken oder Verbund- und Naturwerkstoffe wie beispielsweise Holz. Die Eigenschaften der Fügepartner werden durch das Kleben zum großen Teil nicht beeinflusst, was einen wesentlichen Vorteil gegenüber anderen Fügeverfahren darstellt (84). Nachfolgend werden ausgewählte technologische Eigenschaften klebtechnischer Verbindungen aufgeführt:

- flächige Lastübertragung, Schwingungsdämpfung
- thermische und akustische Isolation
- Aufnahme von Differenzverschiebungen
- Kompensation von toleranzbedingten Imperfektionen der Fügepartner
- gestalterische Freiheit
- geringe Beeinflussung der Fügepartnereigenschaften
- hoher Grad werksseitiger Vorfertigung möglich

Die Nutzung dieser Eigenschaften ist in zahlreichen Disziplinen des Ingenieurwesens zu finden. Die Anwendungsfelder unterscheiden sich teilweise wesentlich hinsichtlich des Einwirkungsprofils sowie der Nutzungsdauer. Neben kleinskaligen Klebverbindungen wie beispielsweise in der Verpackungstechnik oder der Elektronik steigt die Zahl der Klebverbindungen großer Abmessungen in planmäßig beanspruchter Funktion stetig an. Diese Art der tragenden Klebverbindungen ist insbesondere im Maschinenwesen in der Serienfertigung (Schienenfahrzeugbau, Automobilbau, Luft- und Raumfahrttechnik), im Schiffsbau oder im Bauwesen zu finden. Zwei exemplarische Anwendungsfälle sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Insbesondere im Fahrzeugbau ist die Anwendung tragender Klebverbindungen Stand der Technik. So werden beispielsweise Glasscheiben zur Aussteifung von Karosserien planmäßig über elastische Klebfugen tragend gekoppelt (172). Dieses Verfahren hat sich auch im Schiffsbau für die Anbindung von Glaselementen an Schiffsaufbauten in den letzten Jahren etabliert (113). Bei Leichtbaukonstruktionen, wie Fahrzeugen und Flugzeugen, werden Strukturklebstoffe zur planmäßigen Kraftübertragung genutzt (44). Die hervorragenden Dämpfungseigenschaften von Klebverbindungen sowie das geringe spezifische Gewicht kommen den hier wirkenden Einwirkungsprofilen entgegen.



(a) Geklebter CFK-Strebenanschluss im Zeppelinbau (Quelle: eigene Aufnahme)



(b) Geklebte Verglasung im Schiffbau (Quelle: www.brombach-gess.de)

Abbildung 2.1: Anwendungsbeispiele für Klebverbindungen aus dem Ingenieurbau

2.1.3 Tragende Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau

Die Anwendung der Klebtechnik als tragendes Verbindungsmittel ist auch zunehmend in Konstruktionen des Glas- und Fassadenbaus zu finden. Hier werden elastische Klebverbindungen zur Anbindung von Fassadenelementen an Unterkonstruktionen genutzt. Diese Verbindungstechnik wird als SG oder Structural Sealant Glazing bezeichnet. Diese Technik kommt im Glasfassadenbau seit den 1970er Jahren in den USA zur Anwendung (173) und wurde Mitte der neunziger Jahre auf dem europäischen Markt etabliert (122). Insbesondere wird hiermit das klebtechnische Verbinden metallischer Adapterrahmen mit Glaselementen über umlaufend linienförmige Klebfugen bezeichnet. Hierbei werden die Fugen planmäßig zum Ausgleich regelmäßiger Differenzverschiebungen der Glasscheibe und der Unterkonstruktion infolge veränderlicher Temperatureinwirkungen eingesetzt. Diese tritt auf, da bei gleicher Erwärmung oft Werkstoffe mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zur Anwendung kommen. Neben dieser Belastung werden planmäßig Windlasten über diese Klebnähte abgetragen, die auf die aufgeklebte Glasscheibe wirken.

2.1.4 Grundlagen der zur Anwendung kommenden Klebverbindungen

Die im Glas- und Fassadenbau eingesetzten Klebverbindungen bestehen zumeist aus zwei parallel gegenüber angeordneten Fügepartnern (2-Flankenklebung). Diese werden meist mit einem gummiartigen, weitmaschig vernetzten Klebwerkstoff verbunden.



Abbildung 2.2: SG-Anwendung am Haus der barmherzigen Schwestern, München (Quelle: Alexander Lorenz)

Für diese Anwendungen werden aufgrund ihrer hohen Alterungsbeständigkeit weitestgehend Silikonelastomere eingesetzt. Darüber hinaus kommen ebenso Haftklebebänder zum Einsatz. Ferner sind Anwendungen im Fassadenbau zu finden, bei welchen nicht-transparente Paneele mit Polurethan-Klebstoffen (173) an Unterkonstruktionen angebunden sind.
Im Rahmen dieser Arbeit werden drei verschiedene Klebstoffsysteme untersucht (siehe Kapitel 4.1.0.0.1), die im Fassadenbereich ihre Anwendung finden. Dabei handelt es sich um zwei zweikomponentige Silikonelastomere und ein Haftklebeband. Diese unterscheiden sich in der Art des Abbindemechanismus.

2.1.4.1 Silikonelastomere

Eine Klebverbindung mit Silikonelastomeren entsteht durch chemische Vernetzung infolge einer Polykondensationsreaktion (84). Dieser Vorgang ist irreversibel. Der vernetzte Endwerkstoff zeigt sich weder löslich noch durch hohe Temperaturen schmelzbar (199) kann jedoch reversibel quellen (84). Silikone zeichnen sich durch ihre besondere Einordnung zwischen der anorganischen und organischen Chemie aus. Das Hauptmerkmal der Silikon-Molekülkette ist eine Silizium-Sauerstoff-Bindung, die Siloxan-Bindung (199). Der schematische Molekülaufbau dieser Verbindung ist gekennzeichnet von sich abwechselnden Silizium- (Si) und Sauerstoffatomen (O), dies ist schematisch in 2.3 dargestellt. Die Aushärtung kann nach (84) wie folgt unterteilt werden:

- RTV-1 Raumtemperaturvernetzung einkomponentig

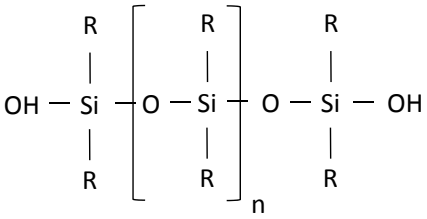


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der chemischen Formel für Silikone (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (199))

- RTV-2 Raumtemperaturvernetzung zweikomponentig

Bei RTV-1-Systemen findet die Vernetzung durch die Luftfeuchtigkeit statt. Hierbei werden sogenannte Vernetzer genutzt. Dies sind im Allgemeinen hydrolyseempfindliche Substanzen, die mehrere Aufgaben erfüllen. Zum einen verhindern diese ein vorzeitiges Reagieren durch das Blockieren der OH-Gruppen, zum anderen werden gleichzeitig die funktionellen Gruppen vermehrt ((199), (84)). Da die Geschwindigkeit der Vulkanisation durch die Diffusion der Wassermoleküle bestimmt wird und diese mit höherer Temperatur ansteigt, ist eine Abhängigkeit von der Temperatur gegeben. Die auf diese Weise reagierenden Produkte werden im Fachjargon als 1K-Silikone bezeichnet. Die als 2K-Silikone bezeichneten Produkte sind RTV-2-Systeme. Diese finden vornehmlich dort ihre Anwendung, wo RTV-1-Systeme aufgrund großer Schichtdicken nicht mehr vollständig oder nicht in technisch annehmbaren Zeitspannen aushärten können.

2.1.4.1.1 Haftklebstoffe Gegenüber den chemisch vernetzenden Klebstoffen können Haftklebebänder der Gruppe der physikalisch abbindenden Klebstoffe zugeordnet werden (84). Die Gruppe der drucksensitiven Klebstoffe umfasst eine große Gruppe von Klebstoffsystemen unterschiedlicher Chemien (101). Die wesentlichen Leistungsparameter sind hier der Anpreßdruck, die Anpreßzeit (182) sowie die rheologischen Eigenschaften (101). Hieraus begründet sich die Bezeichnung drucksensitiver Klebstoff (englisch: PSA, pressure sensitive adhesive). Eine gemeinsame Charakteristik für Haftklebstoffe ist ein Glasübergangsbereich T_g von -20 $°C$ bis -70 $°C$ (84). Hieraus ergibt sich eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit für Anwendungen im Bauwesen. Im Fassadenbau ist die Anwendung von Haftklebstoffen auf beidseitig klebfähigen Klebebändern üblich, wobei meist ein Acrylatwerkstoff mit elastomeren Eigenschaften das Trägermaterial darstellt.

2.2 Mechanische Grundlagen elastischer Klebverbindungen

2.2.1 Modellvorstellung des Aufbaus einer Klebschicht

Für mechanische Betrachtungen wird die Klebschicht in der Regel als homogener isotroper Körper idealisiert. Eine Alternative ist die Einteilung in zwei wesentliche Bereiche: die Randzone, die sogenannte Interphase, sowie der eigentliche Klebstoff (84). Dies ist schematisch in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Eigenschaften der Klebschicht in den Randbereichen weichen von den mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs ab (139). Für Dickschichtklebungen wird in (139) gezeigt, dass diese Abweichungen eine

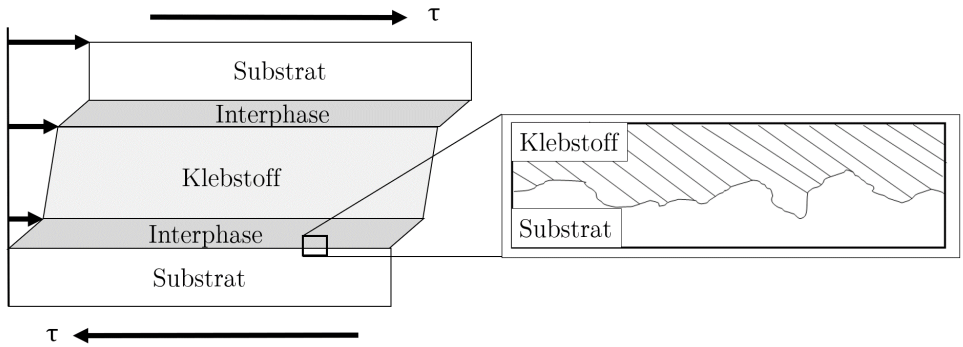


Abbildung 2.4: Modellvorstellung des Aufbaus einer Klebschicht (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (139))

untergeordnete Rolle spielen. In (180) wird dies auf Basis der Ergebnisse aus (139) diskutiert und festgehalten, dass diese Annahme für Polyurethanklebverbindungen mit Klebschichtdicken über $d_K > 1$ mm gültig ist. Es wird daher für den vorliegenden Fall von einer untergeordneten Rolle des Interphasen-Einflusses auf die mechanischen Eigenschaften ausgegangen.

2.2.2 Polymerphysikalische Grundlagen

2.2.2.1 Aufbau polymerer Netzwerke

Allgemein werden die zur Anwendung kommenden Klebstoffe der Werkstoffgruppe der Kunststoffe zugeordnet, was abgesehen von vereinzelten Ausnahmen (z.B. keramische Klebstoffe) gerechtfertigt erscheint. Die Bezeichnungen Kunststoffe und Polymere sind nach (92) gleichwertig verwendbar. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Unterscheidung zwischen diesen Begriffen vorgenommen. Die Modellvorstellung des Aufbaus von Polymerwerkstoffen kennzeichnet sich dadurch, dass sie aus Makromolekülen unterschiedlicher Struktur und Länge aufgebaut sind. Diese Makromoleküle können hochgradig miteinander vernetzt sein oder in amorpher Knäuelstruktur unvernetzt vorliegen. Ein wesentliches Merkmal zur Einteilung dieser Werkstoffe kann daher der Vernetzungsgrad der Polymerwerkstoffe darstellen. Dieser steht direkt im Zusammenhang mit charakteristischen mechanischen Eigenschaften. Hier können nach (92) verschiedene Hauptgruppen eingeteilt werden; Die der Duromere (Duroplaste), die sich durch dichtmaschige Netzwerke kennzeichnen, sowie die Gruppen der Thermoplaste, die in amorpher oder teilkristalliner Form ohne chemische Vernetzungspunkte vorliegen können. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Klebwerkstoffe können der Gruppe der Elastomere zugeordnet werden. Diese kennzeichnen sich durch einen amorphen Aufbau des polymeren Netzwerkes, welches an wenigen Stellen chemisch vernetzt ist. Der eigentliche Klebstoff besteht neben dem

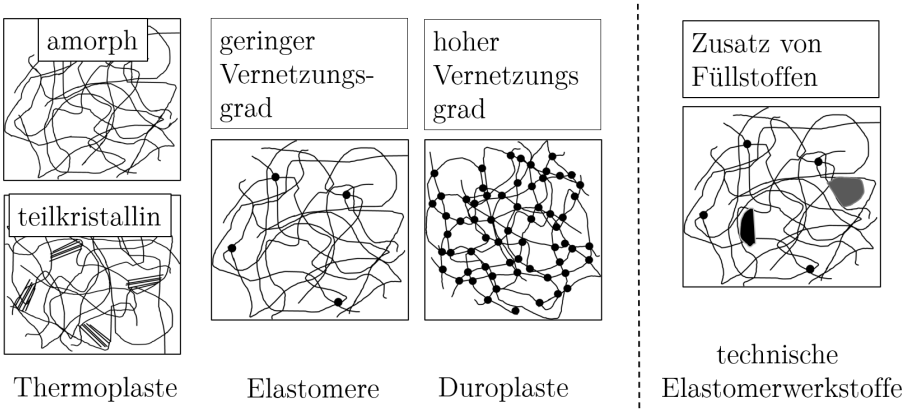


Abbildung 2.5: schematischer Aufbau verschiedener Kunststoffe (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (147))

Grundpolymer aus Zusätzen (Füllstoffen), welche die technologischen Eigenschaften in Abhängigkeit von dem gestellten Anforderungsprofil verändern können (13). Man spricht hier von technischen Polymerwerkstoffen. Diese Grundformen sind in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt.

2.2.2.2 Mechanik der Polymernetzwerke

Das Verhalten der Klebverbindung wird stark von den mechanischen Eigenschaften des zur Anwendung kommenden Polymerwerkstoffes beeinflusst. Nachfolgend werden die wichtigsten Mechanismen und Zusammenhänge wiedergegeben. Dies geschieht in vereinfachter Form und adressiert die notwendigsten Elemente der Mechanik der Polymernetzwerke. Tiefergehende Informationen der Polymermechanik sind beispielsweise in (77), (37) oder (129) zu finden.

2.2.2.2.1 Aggregatszustände Das mechanische Verhalten eines polymeren Netzwerkes kann mit Hilfe verschiedener physikalischer Theorien beschrieben werden. Eine der wichtigsten ist die Theorie des freien Volumens (37). Hierbei wird angenommen, dass das gesamte Werkstoffvolumen auf molekularer Ebene in besetztes und freies Volumen einteilbar ist. Das besetzte Volumen ist hierbei der von Molekülketten eingenommene Bereich. Die Bereiche zwischen den Molekülketten sind das freie Volumen. Die Anordnung ist ungeordnet und beliebig. Dabei führen die Molekülketten eine um ihre Position im Netzwerk stattfindende Bewegung aus, ohne dass hierbei Positionswechsel im Polymernetzwerk stattfinden. Dies wird als mikrobrownsche Bewegung bezeichnet (77). Die Intensität dieser Bewegung steht in Abhängigkeit zu der Temperatur. Der Begriff Temperatur ist hierbei nicht absolut zu sehen, sondern polymerspezifisch in Relation zu der sogenannten Glasübergangstemperatur T_g. In Abhängigkeit von dieser Temperatur können nach (77) folgende Aggregatszustände eines Polymernetzwerkes definiert werden:

- energieelastischer Bereich $T < T_g$ (Glaszustand)
- Glasübergangsbereich T_g
- entropieelastischer Bereich $T > T_g$ (gummielastischer Zustand)
- Schmelzbereich $T_S > T > T_g$

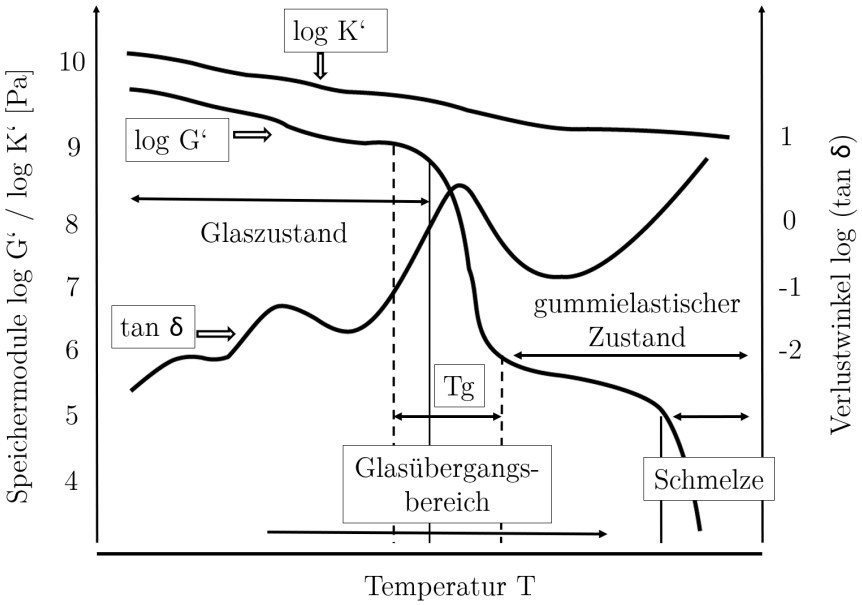


Abbildung 2.6: schematische Darstellung der Aggregatszustände eines amorphen unvernetzten Polymers (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (77))

Die Aggregatszustände unterscheiden sich durch die Intensität der mikrobrownschen Bewegung. Kommt diese zum Erliegen, wird dies als Glaszustand bezeichnet. Ist diese voll entwickelt, spricht man vom gummielastischen Zustand. Den Übergangsbereich zwischen diesen Zuständen stellt der Glasübergangsbereich dar. Die mittlere Temperatur dieses Bereiches wird als Glasübergangstemperatur T_g bezeichnet. Für das mechanische Verhalten polymerer Werkstoffe ist dieser Bereich eine der wichtigsten Kenngrößen. Dies begründet sich daraus, dass in diesem Bereich wesentliche Änderungen ingenieurtechnisch relevanter Eigenschaften dieser Werkstoffe auftreten (34). Ferner ist dieser Punkt meist Bezugsmaß für die Beurteilung der temperaturabhängigen Eigenschaften der elastischen Module. Bei bestimmten Polymeren kann oberhalb des gummielastischen Bereiches ein Schmelzen auftreten. Dies spielt für Elastomerwerkstoffe jedoch eine untergeordnete Rolle (199). Diese Zustände sind für ein amorphes unvernetztes Polymer in Abbildung 2.6 dargestellt.

2.2.2.2.2 Polymernetzwerke unter Einwirkung mechanischer Beanspruchungen

Die verschiedenen Aggregatszustände haben unterschiedliche Wirkmechanismen, die sich bei der Einwirkung externer mechanischer Beanspruchungen zeigen. Dies wird

nachfolgend zur Erklärung relevanter Werkstoffeigenschaften der Elastomere erläutert. Es wird an einem Werkstoff mechanische Arbeit verrichtet, wenn dieser unter Einwirkung einer Kraft mit einer Deformation reagiert. Aus dieser Arbeit können im Polymernetzwerk Wechselwirkungen und molekulare Platzwechsel resultieren, die wiederum energetisch günstige Gleichgewichtszustände erzeugen (119). Das im technischen Gebrauch zu beobachtende mechanische Verhalten eines Werkstoffes steht im Zusammenhang mit der Geschwindigkeit und der zeitlichen Dauer dieser Umlagerungsvorgänge im Polymernetzwerk. Diese hängt wiederum vom momentanen Aggregatszustand des Polymerwerkstoffes ab.
Bei Werkstoffen im Glaszustand treten die beschriebenen Umlagerungsvorgänge in kurzen Zeiträumen auf. Die mikrobrownschen Bewegungen sind in diesem Bereich zum Erliegen gekommen, externe Arbeit wird vorwiegend an der molekularen Struktur direkt verrichtet (77), man spricht von Energieelastizität. Hieraus resultiert die Annahme eines elastischen Werkstoffverhaltens. Die einwirkende Arbeit (extern) ist bei einem ideal elastischen Werkstoff vollständig als innere Energie gespeichert und befähigt diesen nach Entlastung zur reversiblen Rückstellung der Deformation. Dieses Verhalten wird beispielsweise bei vielen duroplastischen Polymerwerkstoffen bei Raumtemperatur und kurzen Belastungszeiten angenommen.
Im gummielastischen Bereich sind die mikrobrownschen Bewegungen voll ausgeprägt. Das Polymernetzwerk ist aus diesem Grund beweglich. Liegt bei Werkstoffen gummielastisches Verhalten vor, erwirkt die externe Arbeit eine Abnahme der Entropie. Die Entropie ist ein physikalisches Maß der Unordnung eines Systems (67). In diesem Fall ist hiermit der Zustand der Anordnung der Makromoleküle gemeint. Nimmt die Entropie des Netzwerkes ab, entfalten sich die Ketten und werden ausgerichtet. Für diesen Vorgang benötigen Makromolekülketten Zeit, man spricht hier von Relaxationszeiten bzw. -spektren (146). Diese Zeiten korrelieren für viele technische Elastomerwerkstoffe mit im technischen Gebrauch auftretenden Belastungszeiten (13). Das erklärt das Auftreten dieser zeitabhängigen Effekte im technischen Gebrauch und das zu beobachtende zeitabhängige Werkstoffverhalten.
Bei diesem Vorgang wird Energie dissipiert, was in Form von Wärmeabgabe zu beobachten ist (67). Dies hat zur Folge, dass sich ein ideal entropieelastisches Material bei Wärmezufuhr zusammenziehen muss. Für technische Elastomerwerkstoffe, die mit verschiedenen Zusatzstoffen versehen sind, muss das jedoch nicht gelten (13).
Aufgrund dieser Unterschiede im mechanischen Verhalten können die Aggregatszustände messtechnisch erfasst werden. Dies kann mit Messverfahren wie beispielsweise der DMTA oder einem Rheometer erfolgen (117). Mit Hilfe dieses Messverfahrens kann das Frequenz- und temperaturabhängige Verhalten von Werkstoffen bestimmt werden. Charakteristische Messgrößen sind hier der Komplex-(G^*), der Speicher-(G')



Abbildung 2.7: Veränderung des Bruchbildes eines Kopfzugprobe infolge der Erhöhung der Testgeschwindigkeit (links: v_t = 5 mm/min, rechts: v_t = 3 m/s, Klebstoff DC993) (Quelle: eigene Aufnahmen)

und der Verlustmodul (G'') sowie der Verlustwinkel tan δ. Der Zusammenhang dieser Größen wird in Abschnitt 4.2.2 detaillierter beschrieben.
Die dargestellten thermomechanischen Eigenschaften beeinflussen neben den Steifigkeitseigenschaften auch die Bruchmechanismen, was exemplarisch durch die Darstellung der Bruchbilder zweier Kopfzugproben dargestellt ist. In Abbildung 2.7 ist hierfür die Veränderung des Bruchbildes einer Kopfzugprobe (Durchmesser 60 mm, Klebstoff DC993) dargestellt. Die Abbildung 2.7 links zeigt das Bruchbild bei quasi-statischer Testgeschwindigkeit (v_t = 5 mm/min), die Abbildung 2.7 rechts das Bruchbild einer gleichen Probe im Schnellzerreißversuch (v_t = 3 m/s).

2.2.2.3 Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung

Für viele Polymerwerkstoffe kann mit hinreichender Genauigkeit ein Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Ablauf der in Abschnitt 2.2.2.2.2 beschriebenen Relaxationsmechanismen und der vorherrschenden Temperatur identifiziert werden (77). Dieser Zusammenhang besagt, dass sich bei Erhöhung der Temperatur eine charakteristische Kennfunktion eines Polymerwerkstoffes auf der logarithmischen Zeitachse (z.B. der Relaxationsfunktion $G(t)$ zu $\log t$) zu kürzeren Zeiten verschiebt, wobei ihre Form in erster Näherung erhalten bleibt (77). Es findet eine Parallelverschiebung auf der logarithmischen Zeitachse statt (77). Die Höhe dieser Parallelverschiebung wird hierbei

durch einen temperaturabhängigen Faktor log $\log \alpha_T$ bestimmt. Dieser Zusammenhang wird als ZTV bezeichnet.
Dies ist schematisch in Abbildung 2.8 dargestellt. Mit Hilfe dieses Faktors kann eine reduzierte Zeit log x ermittelt werden.

$$\log x = \log t - \log \alpha_T \tag{2.1}$$

Die Gültigkeit dieses Prinzips basiert auf wesentlichen Anwendungsvoraussetzungen (77):

- Durch Erhöhung der Temperatur laufen Prozesse mit höheren Raten ab
- Die Art sowie die Anzahl der Prozesse bleiben dabei unverändert

Diese Voraussetzungen ermöglichen es, dass die Zeiträume, in denen diese Prozesse auftreten, reduziert werden können, wenn die Temperatur im Betrachtungszeitraum des Experimentes erhöht wird und die daraus resultierende Werkstoffantwort zu tieferen Temperaturen verschoben wird. Mit dieser Vorgehensweise kann durch Variation der Temperatur das effektive Beobachtungszeitfenster, der Zeitbereich, der experimentell abbildbar ist, wesentlich erweitert werden. Auf Basis dieser Verschiebung

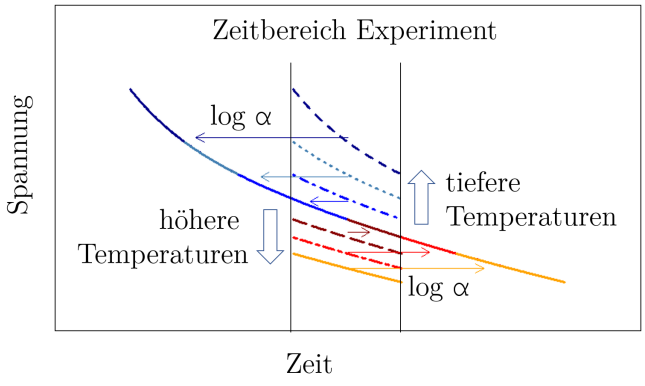


Abbildung 2.8: schematische Darstellung des ZTV-Prinzips (Quelle: eigene Darstellung)

kann eine sogenannte Masterkurve für eine konstante Temperatur erstellt werden, welche die gesuchte Werkstoffantwort bei einer bestimmten Nutzungstemperatur für

eine breite Zeitskala repräsentiert. Ist das Verfahren anwendbar, spricht man von rheologisch einfachen Werkstoffen. Bei technischen Kunststoffen kann in Ergänzung zur Zeit-Temperatur-Verschiebung auch eine Amplituden-Zeit-Verschiebung angewendet werden (13). Hierbei wird mit einem Verschiebungsfaktor $\log s$ auch die Amplitude zeitabhängig verschoben. Die Notwendigkeit wird auf den Einfluss der Füllstoffe auf die Eigenschaften des Polymernetzwerkes zurückgeführt (66).

2.2.2.3.1 WLF-Gleichung Um welchen Verschiebungsfaktor log α_T die ursprüngliche Kurve verschoben wird, kann mit Hilfe verschiedener Ansätze ermittelt werden. Ein bekanntes Modell ist die Williams-Landel-Ferry-Gleichung (WLF-Gleichung) (150). Dieses basiert auf Untersuchungen zur temperaturabhängigen Flexibilität von Kettensegmenten und beschreibt den Zusammenhang der Relaxationszeiten bei einer Ausgangs- und Referenztemperatur (13).

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \tag{2.2}$$

In dieser Gleichung stellen C_1 und C_2 Werkstoffkonstanten und T_0 und T die Ausgangs- bzw. Referenztemperatur dar. Für eine Vielzahl von Polymeren besitzen die Konstanten C_1 = 8,86 [-] und C_2 = 101,6 K Gültigkeit. Die diesem Ansatz zugrunde liegenden Annahmen zur Temperaturabhängigkeit des freien Volumens verlieren bei Temperaturen unterhalb von T_g ihre Gültigkeit (13).

2.2.2.3.2 Arrhenius-Gleichung Eine zweite Gleichung zur Bestimmung des Verschiebungsfaktors ist die Arrhenius-Gleichung (13):

$$\log \alpha_T = \frac{E_{Aktivierung}}{2,30 * R} * (\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}) \tag{2.3}$$

wobei $E_{Aktivierung}$ die für den Prozess notwendige Aktivierungsenergie darstellt und R die allgemeine Gaskonstante. Die Arrhenius-Gleichung kann für einen Temperaturbereich weit über T_g angewendet werden. Der im Rahmen dieser Arbeit ermittelte Parameter $E_{Arrhenius}$ ist der Quotient aus der Aktivierungsenergie $E_{Aktivierung}$ und der allgemeinen Gaskonstante in der Einheit Kelvin K nach Gleichung 2.4:

$$E_{Arrhenius} = \frac{E_{Aktivierung}}{R} = \frac{[J] * [K * mol]}{[mol] * [J]} = [K] \tag{2.4}$$

2.2.2.3.3 Anwendung des Verfahrens Die Anwendung des ZTV ist für technische Kunststoffe ein etabliertes Verfahren zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur. In der Literatur sind für unterschiedliche Polymerwerkstoffe die verschiedensten Ansätze zu finden. Diese sind insbesondere im Bereich des Maschinenwesens und der Kunststofftechnik Stand der Technik (z.B.(98), (26), (46)). Ausführliche Zusammenfassungen für die Anwendung dieser Verfahren sowie die Anwendungsmöglichkeiten für gefüllte und ungefüllte Elastomere sind in (146) oder (13) zu finden. So beispielsweise für die Rissenergie (146) im Rahmen von bruchmechanischen Untersuchungen an elastomeren Werkstoffen oder für die Parameteridentifikation im uniaxialen Zugexperiment (13). Eine ausführliche Diskussion zu Vorgehensweisen bei der Erstellung von Masterkurven aus Messdaten ist beispielsweise in (21) zu finden. Direkt für das Verhalten von Klebverbindungen im Langzeitbereich (179) werden Methoden zur Lebensdauerprognose auf Basis dieses Verfahrens untersucht und ausführlich diskutiert. Für Haftklebstoffe nutzt (31) eine WLF-Verschiebung der maximalen Zug- und Scherfestigkeiten zur Erstellung von Masterkurven. Für Epoxidharzklebstoffe identifiziert (109) auf Basis von DMTA-Untersuchungen Parameter für ein dreidimensionales Werkstoffmodell. Für verschiedene Zwischenschichten im Glasfassadenbau nutzt (110) diese Vorgehensweise zur Identifikation der Zeit- und Temperaturabhängigkeit des Schubmoduls für verschiedene Zwischenschichtwerkstoffe über einen großen Temperatur- und Frequenzbereich mit dem Ziel der Simulation der Werkstoffeigenschaften unter Kurzzeiteinwirkung.

2.2.2.4 Weitere Eigenschaften der elastomeren Klebschicht

Neben den beschriebenen Effekten zur Zeit- und Temperaturabhängigkeit existieren weitere für den technischen Gebrauch wichtige Eigenschaften. Zwei der wichtigsten Effekte werden nachfolgend beschrieben.

2.2.2.4.1 Inkompressibilität Im Kontext der Anwendung von Elastomerwerkstoffen ist oft von inkompressiblem Werkstoffverhalten die Rede. Diese Bezeichnung ist in erster Linie nicht auf eine reale Inkompressibilität zurückzuführen, sondern vielmehr auf den markanten Unterschied in der Größenordnung von Kompressionsmodul K und Schubmodul G im gummielastischen Bereich. In Abbildung 2.6 ist hierzu der Verlauf dieser Kenndaten für einen amorphen Kunststoff in Abhängigkeit von den Aggregatzuständen dargestellt. Hier ist die Entwicklung des Unterschiedes der beiden Module in Abhängigkeit von der Temperatur schematisch dargestellt. Anhand dieser Darstellung

ist ersichtlich, warum die Inkompressibililtät insbesondere für Elastomerwerkstoffe, die sich bei Raumtemperatur meist im gummielastischen Bereich befinden, besonders relevant ist. Nach (77) folgt daher für Temperaturen wesentlich oberhalb der Glasübergangstemperatur (gummielastischer Bereich) ein inkompressibles Werkstoffverhalten aus:

$$G \ll K \tag{2.5}$$

Hiermit wird in erster Linie der starke Einfluss des Kompressionsmoduls auf das resultierende mechanische Verhalten definiert. Dies ist für die Beschreibung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Klebwerkstoffe sowie insbesondere der querdehnbehinderten Fugen unter Zugbeanspruchung von großer Bedeutung. Dieser Effekt wird entsprechend bei der Modellierung dieser Werkstoffe meist mit eigenen Annahmen berücksichtigt (siehe hierzu Abschnitt 2.2).

2.2.2.4.2 Mullins-Effekt Bei der mechanischen Werkstoffprüfung von technischen Elastomerwerkstoffen kann eine Abweichung zwischen dem Spannungs-Dehnungs-Verlauf der Erstbelastung sowie dem der Zweitbelastung festgestellt werden (127). Dieses Verhalten ist ein charakteristisches Merkmal dieser Art von Werkstoffen und wird als Mullins-Effekt bezeichnet. Der Effekt wird in der Literatur unter Betrachtung des typischen Elastomeraufbaus mit langen Polymerketten erklärt. Wirkt eine Belastungsgröße, die eine Deformation erzeugt, strecken sich Kettensegmente in Abhängigkeit von ihrer Struktur und Anordnung sowie auftretender Reibung mit Füllstoffen mehr oder weniger stark (146). Ferner können in Abhängigkeit von der Belastungshöhe auch Schädigungseffekte auftreten (175). Endet die Wirkung der Belastungsgröße, hat das zur Folge, dass die darauf folgende Belastungsgröße auf ein bereits vorkonditioniertes Polymernetzwerk trifft, welches weicher reagiert. Die Steifigkeit des Elastomerbauteils sinkt folglich. Es ist zu beobachten, dass dieser Effekt sich immer jeweils bis zu der höchsten Konditionierungsgrenze (Dehnung) einstellt, demnach ein von der Deformationsgeschichte abhängiger Vorgang ist. Dies ist schematisch in Abbildung 2.9 dargestellt. Bei Belastungsgrößen über diese Grenze hinweg erreicht die Kennlinie das ursprüngliche Niveau. Dieser Effekt ist daher nicht zu beobachten, wenn der Lastprozess hinsichtlich der resultierenden Dehnung einen Wert überschreitet, der in der vorherigen Lastgeschichte noch nicht erreicht wurde (119). Für die Auslegung von tragenden Elastomerfugen im Fassadenbau ergeben sich hieraus zwei wichtige Unterscheidungsmerkmale. Ist das Ziel, die Steifigkeit einer Fuge während der Nutzungszeit korrekt abzubilden, ist die Verwendung einer Betriebskennlinie notwendig. Hierzu wird üblicherweise eine Werkstoffkennlinie im vorkonditionierten Zustand verwendet (z.B. (98), (146), (87)).

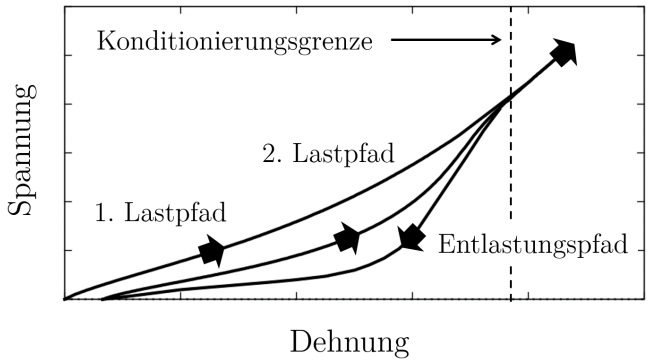


Abbildung 2.9: schematische Darstellung der Auswirkung des Mullins-Effektes in einem uniaxialen Zugexperiment (Quelle: eigene Darstellung)

Die Betrachtung von maximal ertragbaren Beanspruchungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann weitestgehend auf Basis des ersten Lastpfades erfolgen. Dies begründet sich daraus, dass bemessungsrelevante Beanspruchungen im GZT stets über Deformationsbereichen auftreten, die im Betrieb erreicht wurden (156).

2.2.3 Modelle zur Abbildung des Werkstoffverhaltens

Das beschriebene Verhalten der Polymerwerkstoffe ist komplex und kann nicht werkstoffübergreifend unter Berücksichtigung aller denkbaren Effekte durch ein Werkstoffmodell allgemein beschrieben werden. Vielmehr muss für Berechnungen eine Idealisierung durch ein Werkstoffmodell erfolgen, welches die abzubildenden Effekte mit hinreichender Genauigkeit beschreiben kann. Die Wahl des Modells ist abhängig von der jeweiligen Zielsetzung der Berechnung.
Für die Modellierung der dargestellten Phänomene sind in der Literatur verschiedene Ansätze zu finden, die beispielsweise die große Verformungsfähigkeit sowie die beschriebene Zeit- und Temperaturabhängigkeit abbilden können. Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen der im Rahmen dieser Arbeit angewendeten Werkstoffmodelle beschrieben. Hierbei sind neben der linearen Elastizitätstheorie für die betrachteten Klebverbindungen die Theorie der großen Verzerrungen (Hyperelastizität) sowie aufgrund der Zeit- und Temperaturabhängigkeit die lineare Viskoelastizität relevant. Der Aufbau der folgenden Zusammenstellungen orientiert sich hier bewusst

kompakt an den konkret genutzten Werkstoffmodellen und Vorgehensweisen zur Parameteridentifikation. Für Herleitungen sowie einen erweiterten theoretischen Hintergrund sei an dieser Stelle auf Standardwerke aus der Kontinuumsmechanik (z.B. (91)), die Theorie des gummielastischen Verhaltens (z.B. (129), (146)) sowie der Viskoelastizitätstheorie (z.B. (151)) verwiesen. Zunächst werden hierfür allgemeine Grundbegriffe definiert.

2.2.3.1 Grundbegriffe der Mechanik

Für die Bewertung der mechanischen Eigenschaften der Klebverbindung ist die Kenntnis verschiedener Grundlagen aus der Polymer- sowie der Kontinuumsmechanik notwendig. Im Zuge dieser Arbeit werden verschiedene Verzerrungs- und Spannungsmaße verwendet, die nachfolgend beschrieben werden. Ferner werden ausgewählte Grundlagen zur Deformation sowie zu den elastischen Konstanten beschrieben, welche die Grundlage der Betrachtungen in Kapitel 5 bilden.

2.2.3.1.1 Spannungs- und Verzerrungsmaße Die Dehnung mit Bezug auf die Ausgangsabmessungen eines Körpers wird als nominelle Dehnung ϵ_n bezeichnet. Sie ist definiert als die Längenänderung Δl bezogen auf die Ausgangslänge l_0:

$$\epsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{2.6}$$

Die auf den Ausgangsquerschnitt A_0 bezogene Kraft F wird als nominelle Spannung σ_n (technische Spannung) bezeichnet.

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \tag{2.7}$$

Ein für gummielastische Werkstoffe übliches Dehnungsmaß ist der Streckgrad λ. Dieser steht mit der nominellen Dehnung in folgendem Zusammenhang:

$$\lambda = 1 + \epsilon_n \tag{2.8}$$

Die Spannungs- und Verzerrungsmaße, die sich nicht auf die Ausgangsgrößen beziehen, werden in dieser Arbeit als wahre Spannungen σ_w und wahre Dehnungen

ϵ_w bezeichnet. Die wahren Dehnungen (Hencky-Dehnung) können hier auf Basis des Streckgrades (Gleichung 2.8) ermittelt werden:

$$\epsilon_w = \ln \lambda = \ln(\epsilon_n + 1) \tag{2.9}$$

In Analogie wird die wahre Spannung durch den Bezug auf die aktuelle Querschnittsfläche definiert. Die wahre Spannung kann unter der Annahme isochorer Verformung (volumenkonstante Verformung, $\nu \approx 0,5$) aus dem Streckgrad λ und der nominellen Spannung σ_n mit Gleichung 2.10 berechnet werden.

$$\sigma_w = \lambda * \sigma_n = (\epsilon_n + 1) * \sigma_n \tag{2.10}$$

2.2.3.1.2 Zusammenhang von Spannung und Verzerrung Die Zusammenhänge zwischen auftretenden Verzerrungsgrößen sowie den resultierenden Spannungen werden mit Werkstoffmodellen beschrieben. Hierbei sind für die Beschreibung des Verhaltens von Polymerwerkstoffen nach (77) drei wesentliche Kenngrößen wichtig, der Schubmodul G, der Kompressionsmodul K sowie das Dämpfungsmaß δ. Das Dämpfungsmaß ist hierbei keine Konstante aus der Elastizitätstheorie, sondern ist ein Maß aus der Rheologie (77). Die wesentlichen Zusammenhänge werden nachfolgend dargestellt, diese sind gültig für kleine Dehnungen. Der Schubmodul ist die Proportionalitätskonstante, die Gestaltänderungen bei volumenkonstanter Verzerrung mit den Spannungsgrößen verbindet. Unter diesen Annahmen herrscht zwischen der auftretenden Schergleitung $\tan \gamma$ und der daraus resultierenden Beanspruchung τ folgender Zusammenhang:

$$G = \frac{\tau}{tan\gamma} \tag{2.11}$$

In Analogie wird der Kompressionsmodul definiert, der die Veränderung des Volumens ϵ_{vol} den hydrostatischen Spannungsgrößen σ_m zuordnet (siehe Gleichung 2.12).

$$K = \frac{\sigma_m}{\epsilon_{vol}} \tag{2.12}$$

Neben diesen Grundkonstanten können weitere elastische Konstanten berechnet werden. Hierzu zählt die Querdehnzahl. Für viele gummielastische Werkstoffe ist die Annahme einer Querdehnzahl von $\nu \approx 0,5$ (22) gerechtfertigt:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{yy}} \tag{2.13}$$

Ferner ist ein gebräuchliches Maß der Elastizitätsmodul E, der in Abhängigkeit von der Querdehnzahl ν berechnet werden kann.
Für Polymerwerkstoffe kann zunächst nicht davon ausgegangen werden, dass es sich bei den aufgeführten Kennwerten um konstante Werte handelt ((77), (152)).

2.2.3.1.3 Räumliche Beanspruchung Für die Behandlung räumlicher Beanspruchungszustände sind die beschriebenen Größen tensoriell aufgebaut. Üblicherweise wird ferner eine Trennung zwischen den durch Gleichung 2.11 (= deviatorische Anteile) und Gleichung 2.12 (= volumetrische Anteile) beschriebenen Anteilen vollzogen. Gilt materielle Isotropie, kann sowohl für den Spannungs- als auch den Verzerrungstensor eine Zerlegung erfolgen (147). Hierbei wird zwischen der volumetrischen Dehnung sowie dem Dehnungsdeviator (Anteile der Gestaltänderung) unterschieden. Dies gilt in Analogie für die Spannungstensoren. Unter diesen Voraussetzungen lautet das Werkstoffmodell unter Verwendung der elastischen Konstanten der linearen Elastizitätstheorie (147):

$$\sigma_{ij} = K * \epsilon_{vol} * I + 2 * G * \epsilon_{ij} \tag{2.14}$$

Hierbei stellen die zuvor definierten Elastizitätskonstanten G (Gleichung 2.11) sowie K (Gleichung 2.12) die Proportionalitätskonstanten zwischen den Verzerrungen und Spannungen dar (147).

2.2.3.2 Hyperelastische Werkstoffmodelle

2.2.3.2.1 Grundlage Große Verformungen werden in der Werkstoffmodellierung meist mit hyperelastischen Modellen beschrieben. Die kontinuumsmechanischen Grundlagen der hyperelastischen Materialmodellierung sind umfangreich in der Literatur dokumentiert (z.B. (91), (171), (146), (160)) und werden an dieser Stelle nur in den wesentlichen Punkten aufgeführt, die für die durchgeführten Betrachtungen in Kapitel 5 relevant sind.
In der Werkstoffmodellierung wird gummielastisches Verhalten mit Hilfe der Theorie der großen Verformungen beschrieben. Hierzu wird eine polare Zerlegung des Deformationsgradienten angewendet (146). Mit dieser Vorgehensweise können Strecktensoren beschrieben werden. Für diese Strecktensoren können Invarianten I, das heißt Größen, die unabhängig gegenüber einer Änderung des Koordinatensystems sind, definiert werden:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \tag{2.15}$$

$$I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2 \tag{2.16}$$

$$I_3 = \lambda_1^2 * \lambda_2^2 * \lambda_3^2 \tag{2.17}$$

In vielen hyperelastischen Modellen wird die Formänderungsenergiedichte W als Funktion dieser Invarianten beschrieben. Mit Hilfe der Ableitung der Formänderungsenergiedichte W nach den Hauptstreckungen $\frac{\delta W}{\delta \lambda}$ kann die Spannung in die jeweilige Hauptrichtung ermittelt werden.
Eine wichtige Kenngröße ist in Analogie zu Gleichung 2.12 die Kompressibilität. Die Beschreibung der Volumenänderung erfolgt über die Determinante des Deformationsgradienten und wird als Jacobimatrix J bezeichnet:

$$J = \sqrt{I_3} = \frac{dv}{dV} \tag{2.18}$$

Für viele Betrachtungen wird aufgrund der in Abschnitt 2.2.2.4 dargestellten Eigenschaft der Inkompressibilität ein konstantes Volumen unterstellt. Unter diesen Annahmen (isochore Deformation, $I_3 = 1$) kann ein einfaches hyperelastisches Modell, das inkompressible Neo-Hooke-Modell, beschrieben werden:

$$W_{NH,inkompressibel} = C1(I_1 - 3) \tag{2.19}$$

Dieser Ansatz wird für die analytische Ermittlung der hyperelastischen Werkstoffparameter in Kapitel 5 verwendet. Die Konstante $C1$ ist hierbei mit dem Schubmodul über den Zusammenhang $G = 2 * C1$ verbunden. Für diese Größe gibt es nach (129) ferner eine direkte Herleitung aus der molekularstatistischen Theorie der folgenden Form:

$$G = N_n * k_b * T_{abs} \tag{2.20}$$

Hierbei fließen die Netzwerkdichte N_n, die Boltzmann-Konstante k_b sowie die absolute Temperatur T_{abs} mit ein. Wesentlich für die Betrachtung der mechanischen Eigenschaften ist die Unabhängigkeit des Schubmoduls vom Grad der Verzerrung. Damit entsteht eine Verbindung der Theorie der kleinen und der großen Verzerrungen (139). In Analogie zur Aufteilung in die deviatorischen und volumetrischen Anteile für das Hooke'sche Gesetz erfolgt dies auch für die hyperelastische Werkstoffformulierung. Dies geschieht durch Verwendung von Invarianten in reduzierter Form für den deviatorischen Anteil $W(I^*)$ und Einbindung eines Arbeitsterms für die volumetrischen Anteile W_{vol}. Für die

Betrachtungen zu idealisierten Randbedingungen wird folgende kompressible Form des Neo-Hooke-Modells genutzt:

$$W_{NH,kompressibel} = W(I_1^*) + W_{vol} = C1(I_1^* - 3) + 2 * (D1 * J)^2 \tag{2.21}$$

Der volumetrische Term beinhaltet hierbei die Volumenänderung durch Gleichung 2.18 sowie eine Proportionalitätskonstante D1. Diese steht mit dem Kompressionsmodul im Zusammenhang ($2 * D1 = K$). Der Arbeitsterm der Volumenarbeit kann auch in nicht linearer Form definiert sein (160).
In dieser kompressiblen Form sind viele hyperelastische Werkstoffmodelle in kommerzielle Finite-Elemente-Programme integriert, so auch in das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Programm LS-DYNA. Der Aufbau der jeweiligen Arbeitsterme kann sich hier in Abhängigkeit von dem jeweiligen Werkstoffmodell jedoch unterscheiden.

2.2.3.2.2 Anwendung Die hyperelastische Materialmodellierung findet in zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die sich mit der Abbildung gummielastischer Werkstoffe unter großen Verzerrungen befassen, seine Anwendung ((146), (156), (32), (139), (149), (186), (180)). Ein ausführlicher Überblick ist beispielsweise in (148) zu finden. Darüber hinaus existieren Ansätze zur Abbildung elastomerspezifischer Effekte wie der Mullins-Effekt (z.B. (168), (138)) oder bleibender Deformation (z.B. (11)).

2.2.3.3 Zeitabhängige Werkstoffmodelle - lineare Viskoelastizität

Werden Polymerwerkstoffe durch Kraft- oder Weggrößen belastet, ist neben einer sofortigen auch eine zeitabhängige Werkstoffantwort zu beobachten. Das Verhalten ist zu gewissen Anteilen elastisch und gleichzeitig viskos. Dies wird als Viskoelastizität bezeichnet und stellt eine charakteristische Eigenschaft der Polymerwerkstoffe dar. Nachfolgend werden die für diese Arbeit wichtigsten Grundlagen dargestellt. Für Zusammenhänge und Herleitungen der nachfolgend aufgeführten Formeln wird auf Standardwerke verwiesen (z.B. (77), (151)).

2.2.3.3.1 Relaxation und Kriechen Die im technischen Gebrauch wichtigsten Effekte sind die Relaxation sowie das Kriechen (Retardation). Wirken konstante Kraftgrößen σ, ist eine zeitabhängige Deformation $\epsilon(t)$ zu beobachten. Man spricht von Kriechen.

Der Zusammenhang zwischen der zeitabhängigen Deformation sowie der konstanten Spannung wird über die Kriechnachgiebigkeit $J_K(t)$ nach Formel 2.22 beschrieben.

$$J_K(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma} \tag{2.22}$$

Wirkt eine konstante Deformation ϵ über einen Zeitbereich, ist ein Abfallen der Spannung $\sigma(t)$ über die Zeit zu beobachten. Dies wird als Relaxation bezeichnet. Durch den Quotienten der konstanten Deformation sowie der zeitabhängigen Spannung ist die Relaxationsnachgiebigkeit definiert:

$$J_R(t) = \frac{\epsilon}{\sigma(t)} \tag{2.23}$$

Der reziproke Wert der Relaxationsnachgiebigkeit $J_R(t)$ ergibt den Relaxationsmodul $E(t)$

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon} \tag{2.24}$$

In Analogie zum Aufbau einer 3D-Materialgleichung (Gleichung 2.14) kann auch eine Relaxationsfunktion für den Schubmodul ($G(t)$) oder den Kompressionsmodul ($K(t)$) ermittelt werden.
Nachfolgend sind die Effekte Kriechen (2.10) und Relaxation (2.11) in Schaubildern dargestellt. Diese zeigen die zeitliche Abhängigkeit der Kraftgröße (Spannung-Zeit-Diagramm) sowie der Weggröße (Dehnung-Zeit-Diagramm).

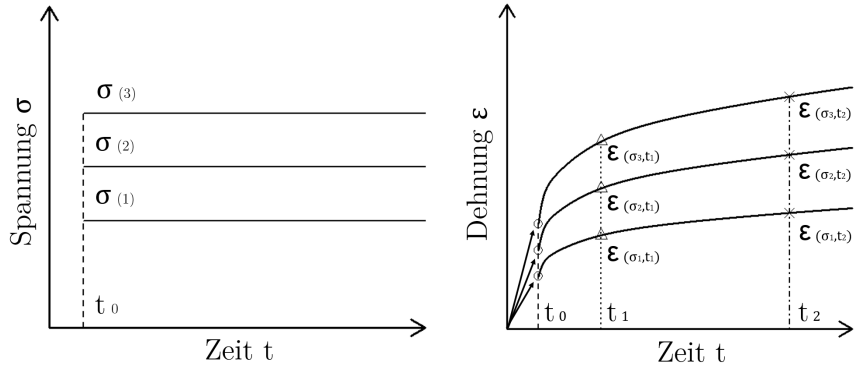


Abbildung 2.10: Kriechen (Quelle: eigene Darstellung)

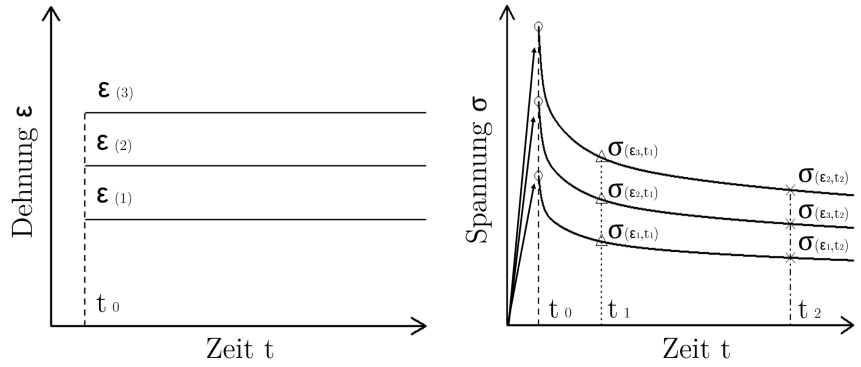


Abbildung 2.11: Relaxation (Quelle: eigene Darstellung)

2.2.3.3.2 Lineare Viskoelastizität Für bestimmte Werkstoffe und Beanspruchungsbereiche kann ein linear-viskoelastisches Verhalten angenommen werden. Das bedeutet, dass sich die zeitabhängige Deformation stets proportional zur wirkenden Beanspruchung verhält. Diese Annahme ist gerechtfertigt im Rahmen sogenannter Linearitätsgrenzen, die als Schwellwerte von Spannungs- und Verzerrungszuständen definiert sind (77). Diese Grenzen liegen nach (77) bei hochvernetzten Polymeren im Bereich kleiner 1 % Dehnung und können bei Elastomeren bis in Bereiche von 100 % Dehnung liegen. Unterhalb dieser Grenzwerte ist die lineare Viskoelastizität gültig, es gilt das Boltzmann'sche Superpositionsprinzip. Dieses besagt, dass zeitabhängige Verzerrungen und Spannungen linear abhängig sind (77). Das bedeutet, dass eine beliebige zeitabhängige Verzerrung $\epsilon(t)$ eine Spannung $\sigma(t)$ hervorrufen muss ($\epsilon(t) \rightarrow \sigma(t)$), die gleich der Summe der Spannungen ($\sigma(t) = \sigma(t,1) + \sigma(t,2)$) ist, die sich aus der summierten unabhängigen Wirkung der Verzerrungen ($\epsilon(t) = \epsilon(t,1) + \epsilon(t,2)$) ergibt.

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \epsilon(t,1) + \epsilon(t,2) \\ \sigma(t) &= \sigma(t,1) + \sigma(t,2) \\ \epsilon(t) &\rightarrow \sigma(t) \\ \epsilon(t,1) &\rightarrow \sigma(t,1) \\ \epsilon(t,2) &\rightarrow \sigma(t,2) \end{aligned} \tag{2.25}$$

2.2.3.3.3 Rheologische Ersatzmodelle Das beschriebene Verhalten wird für technische Anwendungszwecke idealisiert. Eine Form, dieses Verhalten abzubilden, ist die der rheologischen Ersatzmodelle (151). Diese bestehen meist aus Parallel- und Reihenschaltungen von Feder- und Dämpferelementen. Bekannte Modelle sind das

Kelvin-Modell, Kelvin-Voigt-Modell oder das Maxwell-Modell. Nachfolgend werden

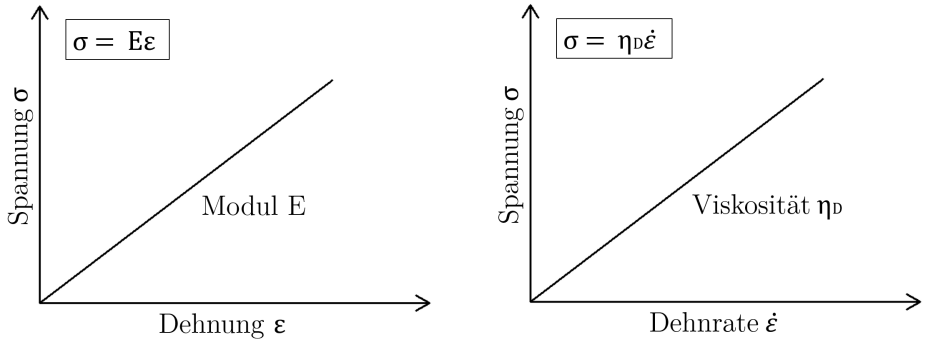


Abbildung 2.12: Feder- und Dämpfer-Elemente (Quelle: eigene Darstellung)

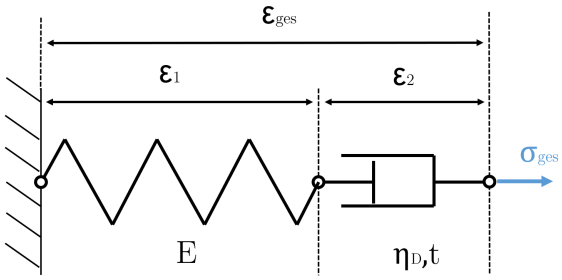


Abbildung 2.13: Maxwell-Element (Quelle: eigene Darstellung)

die Eigenschaften anhand des Maxwell-Modells erläutert. Dieses besteht aus einer linear-elastischen Feder sowie einem viskosen Dämpferelement. Hierbei gilt, dass beide Elemente die gleiche zeitabhängige Beanspruchungsgröße erfahren. Die Verzerrungsgrößen müssen additiv wiederum die Gesamtverzerrung ergeben. Es muss gelten:

$$\sigma_{ges}(t) = \sigma_1(t) = \sigma_2(t) \tag{2.26}$$

$$\epsilon_{ges}(t) = \epsilon_1(t) + \epsilon_2(t) \tag{2.27}$$

Hiermit ergibt sich die Verzerrung pro Zeitinkrement in der folgenden Form:

$$\dot{\epsilon}_{ges}(t) = \dot{\epsilon}_1(t) + \dot{\epsilon}_2(t) \tag{2.28}$$

Hieraus kann die Differentialgleichung des Maxwell-Elementes berechnet werden.

$$\dot{\sigma} + \frac{\eta_D}{E} * \sigma = E * \dot{\epsilon} \tag{2.29}$$

Diese Gleichung ist mit der Randbedingung $\sigma_{ges}(t = 0) = \sigma_0$ mit Hilfe der Integrationskonstanten $C_{int} = \sigma_0$ lösbar. Man erhält die folgende Form der zeitabhängigen Spannung für ein Maxwell-Element:

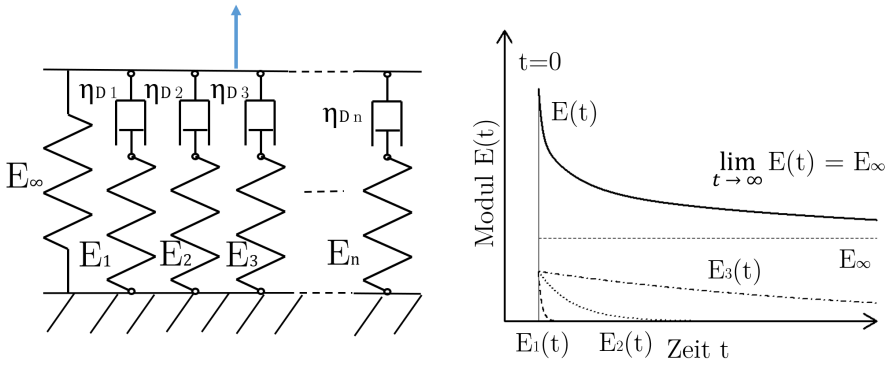
$$\sigma(t) = \sigma_0 * e^{-\frac{E}{\eta_D} * t} \tag{2.30}$$

Das zeitabhängige Werkstoffverhalten kann durch diese Grundform nur unzureichend abgebildet werden, da anhand von Gleichung 2.30 ersichtlich ist, dass die Funktion komplett abklingt. Es wird daher eine generalisierte Form dieses Zusammenhangs verwendet, die nachfolgend beschrieben wird.

2.2.3.3.4 Generalisiertes Maxwell-Element Für die Abbildung des linear-viskoelastischen Verhaltens wird ein generalisiertes Maxwell-Element (maxwell-wiechert-Modell) verwendet. Dieses besteht aus mehreren parallel geschalteten Maxwell-Elementen sowie einem linearen Federelement. Das Federelement bildet hierbei den elastischen Anteil, die Feder-Dämpfer-Elemente bilden die viskosen Anteile des Modells ab. Der elastische Anteil stellt hierbei die Gleichgewichtselastizität bzw. den Gleichgewichtsmodul E_∞ dar. Diese Kombination dieses Moduls mit einer beliebigen Anzahl von e-Funktionen (Prony-Reihe) ergibt folgende Darstellungsform für den zeitabhängigen E-Modul (1):

$$E(t) = E_\infty + \sum_{n=i}^{n} E_i * e^{-\beta_i * t} \tag{2.31}$$

Hierbei stellt β_i die Abklingkonstante des jeweiligen Relaxationsmoduls E_i dar. Der Verlauf des Relaxationsmoduls $E(t)$ ergibt sich hierbei summativ in Abhängigkeit vom Abklingen der Einzelelemente E_i jeder Reihe. Die Konstanten β_i können hierbei unter Betrachtung der abzubildenden Zeitbereiche frei gewählt werden. Eine übliche Anordnungsform ist hierbei die der dekadischen Steigerung. Unter diesen Voraussetzungen kann für die abzubildenden Zeitdekaden die Anzahl der notwendigen Kettenglieder



(a) Aufbau **(b)** Wirkprinzip

Abbildung 2.14: Aufbau und Wirkprinzip des generalisierten Maxwell-Elements (Quelle: eigene Darstellungen)

bestimmt werden, da hierbei ein vollständiges Abklingen der Funktionsantwort pro Zeitdekade auftritt.

2.2.3.3.5 Räumliche Beanspruchung Für die dreidimensionale Verwendung im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse ist eine Aufteilung der Gleichung in deviatorische sowie volumetrische Anteile in Analogie zu Gleichung 2.14 üblich. Hieraus ergibt sich für das in LS-DYNA implementierte und im Rahmen von Kapitel 5 genutzte Werkstoffmodell die folgende Form(195):

$$\sigma_{ij} = \int_0^t K(t-x) * \epsilon^{vol}(x) * I + \int_0^t 2 * G(t-x) * \epsilon_{ij}(x) \tag{2.32}$$

Hierbei muss die Kompressibilität über die Zeitabhängigkeit der Querdehnzahl ν oder des Kompressionsmoduls K beschrieben werden (153).

2.2.3.4 Kalibrierung von Werkstoffmodellen

Die dargestellten Werkstoffmodelle enthalten verschiedene Konstanten, die experimentell bestimmt werden müssen. In Experimenten werden hierzu Kräfte und Verformungen gemessen, um auf Spannungen und Verzerrungen zu schließen, die durch die Modelle beschrieben werden. Dies schafft die Möglichkeit zur Parameteridentifikation über Regressionsanalysen, z.B. mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

Hierzu wird eine Funktion definiert, welche die Summe des quadratischen Fehlers jeder experimentellen Beobachtung mit der Modell-Vorhersage minimiert. Dies ist durch Gleichung 2.33 dargestellt.

$$f = \sum [\sigma_{Model,i} - \sigma_{Experiment,i}]^2 \rightarrow min \tag{2.33}$$

Dies stellt ein Optimierungsproblem dar, dessen Lösung auf verschiedene Weise erfolgen kann. Die Wahl einer geeigneten Methodik richtet sich nach der Komplexität des Modellaufbaus.
Unter Anwendung von Optimierungsprogrammen können so Parametersätze ermittelt werden. Vorgehensweisen dieser Art finden beispielsweise bei komplexen Werkstoffmodellen und Verzerrungszuständen ihre Anwendung (siehe z.B. (131),(73)). Hierfür wird meist versucht, das komplexe dreidimensionale Verhalten durch verschiedene Grundexperimente abzubilden, die wiederum repräsentativ für bestimmte Beanspruchungszustände sein sollen. Die Vorgehensweisen sind hier in Abhängigkeit von den zur Anwendung kommenden Modellen unterschiedlich und werden getrennt nach der Art der Werkstoffmodellierung beschrieben:

2.2.3.4.1 Hyperelastische Werkstoffmodelle Für hyperelastische Werkstoffe wird oftmals die Annahme der Inkompressibilität getroffen. Hierdurch lassen sich die in Abschnitt 2.2.3.2 dargestellten Zusammenhänge wesentlich vereinfachen. Hierfür werden experimentelle Aufbauten gewählt, deren Randbedingungen dem jeweiligen idealisierten Maß in einem hohen Maß entsprechen sollen (147). Für gummielastische Werkstoffe werden insbesondere uniaxiale, biaxiale sowie Scherexperimente durchgeführt (133). Auf diesem Gebiet sind nicht nur wesentliche Erfahrungen vorhanden, auch die Grundgleichungen typischer hyperelastischer Modelle für diese experimentellen Randbedingungen sind analytisch zugänglich (149).
Eine Herausforderung bei der Kalibrierung zeitunabhängiger Werkstoffmodelle auf Basis verschiedener Grundexperimente kann die Relaxation darstellen, die während der Durchführung des Experimentes auftritt. Für eine Vergleichbarkeit der experimentell ermittelten Verbindungskenndaten muss unter gleichen Randbedingungen getestet werden. Dies gilt neben der Temperatur auch für die Belastungsgeschwindigkeit (siehe 2.2.2.2). Hierzu sind in der Literatur verschiedene Ansätze dokumentiert. In (156) werden für den Abgleich von Zug- und Zugscherexperimenten und die Übertragung auf die Rohrprobe Hauptdehnungen verwendet. Ein alternativer Ansatz zum Abgleich von Testgeschwindigkeiten bei ratenabhängigen Werkstoffen zwischen verschiedenen Experimenten und Probekörpergeometrien wird in (186) präsentiert. Hier werden konstante Testgeschwindigkeiten verschiedener Experimente so angepasst, dass sich

konstante Raten der mechanischen Arbeit W ergeben. Hierbei wird ein linearer Verlauf der Arbeitslinie unterstellt. Dieser Ansatz wird (209) für Experimente an Silikonproben mit unterschiedlichen Klebschichtdicken genutzt.

2.2.3.4.2 Viskoelastische Werkstoffmodelle Die Parameteridentifikation kann für diese Modelle auch über Kriech- oder Relaxationsexperimente erfolgen (195). Für linear-viskoelastische Modelle ist die Parameteridentifikation mit Hilfe von Messergebnissen aus DMTA-Analysen Stand der Technik (147). Bei vielen dieser Modelle wird die Theorie der kleinen Verzerrungen als Grundelastizität für das generalisierte Maxwell-Element verwendet. Die Parameter für dieses Modell können aus den im Frequenzbereich ermittelten Speicher- und Verlustmodulen berechnet werden. Hierfür müssen die im Frequenzbereich ermittelten Werte in den Realzeitbereich umgerechnet werden. Um dies zu ermöglichen, existieren Formelwerke zur Umrechnung in den Zeitbereich (77).

$$G'(\omega) = G_0 + \sum_{i=1}^{n} \frac{G_i * \omega^2 * \tau_i^2}{1 + \omega^2 * \tau_i^2} \tag{2.34}$$

$$G''(\omega) = \sum_{i=1}^{n} \frac{G_i * \omega * \tau_i}{1 + \omega^2 * \tau_i^2} \tag{2.35}$$

Da beide Größen miteinander verbunden sind, müssen die Gleichung 2.34 und 2.35 durch den gleichen Parametersatz abgebildet werden können. In (110) werden Verfahren und Messungen dieser Art zur Kalibrierung von Prony-Parametern für Zwischenschichtwerkstoffe aus Polyvinylbutyral erfolgreich auf einen ausgeprägten Frequenzbereich angewendet.
Alternativ zu diesem Ansatz können zur Überführung der Module aus dem Frequenz- in den Zeitbereich Näherungsansätze verwendet werden (siehe (147),(77)).

2.2.3.4.3 Identifikation von Beanspruchungszuständen Eine Möglichkeit, unterschiedliche Beanspruchungszustände bewerten zu können, ist die Spannungsmehrachsigkeit η. Die Spannungsmehrachsigkeit kann auf verschiedene Arten definiert werden. In (180) wird dies für kombinierte Festigkeitshypothesen angewandt. Hier wird η durch die Normierung der Vergleichsspannung $\sigma_{v,v.Mises}$ auf den hydrostatischen Druck σ_m berechnet.

In der vorliegenden Arbeit wird der reziproke Wert verwendet. Dieser wird mit Hilfe folgender Gleichung berechnet.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{v,v.Mises}} \tag{2.36}$$

Hierbei werden die mittlere Hauptspannung σ_m (Gleichung 2.37) sowie die Vergleichspannung $\sigma_{v,v.Mises}$ (Gleichung 2.38) verwendet.

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \tag{2.37}$$

$$\sigma_{v,v.Mises} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \tag{2.38}$$

Diese Art der Darstellung wird auch in verschiedenen Materialmodellen im zur Anwendung kommenden FE-Programmpaket LS-DYNA verwendet (1). Diese Definition führt dazu, dass das Bewertungsmaß η gegen den Wert null konvergiert, wenn die betrachteten Beanspruchungszustände von Gestaltänderungsanteilen dominiert werden.
Der Wert der Spannungsmehrachsigkeit η kann somit für beliebige Beanspruchungszustände bestimmt werden. Innerhalb eines Probekörpers während eines Experimentes ist jedoch für viele Fälle zu erwarten, dass der Wert nicht konstant ist. Dies liegt darin begründet, dass sich die Beanspruchungszustände infolge der fortschreitenden Verzerrung in jedem Zeitschritt ändern können und darüber hinaus eine Vielzahl verschiedener Zustände in einem Probekörper zu erwarten sind. Eine Ausnahme bilden hier gewisse Grundzustände, wie

- der uniaxiale Zug (σ_1 = 1, σ_2 = σ_3 = 0, σ_m = 1/3 und $\sigma_{v,v.Mises}$ = 1), welcher unabhängig vom Verzerrungsgrad stets eine Spannungsmehrachsigkeit nach Gleichung 2.36 von $\eta = \frac{1}{3}$ aufweist.
- Für äquibiaxiale Beanspruchungen (σ_1 = σ_2 = 1, σ_3 = 0, σ_m = 2/3 und $\sigma_{v,v.Mises}$ = 1) ist die Spannungsmehrachsigkeit $\eta = \frac{2}{3}$.
- Für die für die Bewertung des Tragverhaltens wichtigen Schubzustände gilt per Definition ($\sigma_m = 0$) $\eta = 0$.

2.3 Auslegung von Klebverbindungen

2.3.1 Beanspruchbarkeit von Klebverbindungen

2.3.1.1 Formen der Beanspruchung

Als Beanspruchung werden die aus einer Einwirkung resultierenden inneren Größen in einer Klebschicht bezeichnet. Diese können infolge mechanischer Einwirkung als Spannung und Verzerrung auftreten. Ferner kann das Einwirken umwelt- oder betriebsbedingter medialer Einflüsse für Polymerwerkstoffe eine signifikante Beanspruchung darstellen (90).
Nach (84) können Beanspruchungen auf Klebverbindungen in erster Näherung in die mechanischen sowie die medialen unterteilt werden. In der Realität ist meist mit einer komplexen Überlagerung beider Beanspruchungsformen zu rechnen. Dies ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Darüber hinaus ist die Zeitabhängigkeit einer Beanspruchung bei der Bewertung dieser Größen von hoher Wichtigkeit. Es ist davon

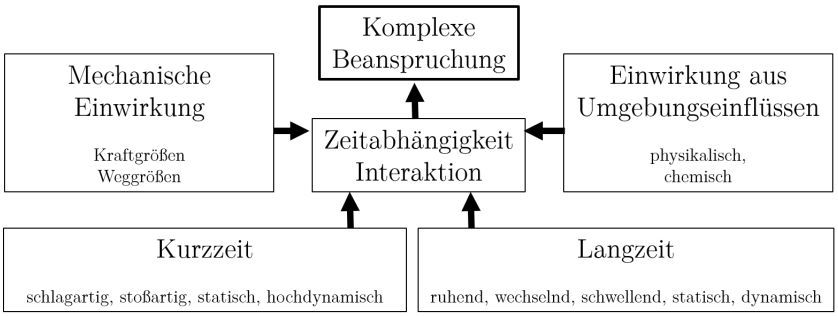


Abbildung 2.15: Formen der Beanspruchung von Klebverbindungen (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (84))

auszugehen, dass Klebverbindungen im Betrieb verschiedenen mechanischen und chemisch-physikalischen Einflussfaktoren ausgesetzt sind. Das gleichzeitige Wirken dieser Parameter induziert Schäden und schädigungsmechanische Effekte. Die Gesamtheit aller dieser im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge wird als Alterung bezeichnet (49). Diese werden verursacht bzw. beschleunigt durch die Kombination verschiedener Faktoren, die während der Nutzungszeit auftreten. Das Auftreten dieser Faktoren kann hierbei

konstant, periodisch wechselnd oder in beliebiger stochastischer Reihenfolge erfolgen. Für elastische Klebverbindungen werden in (143) die nachfolgend aufgeführten Parameter als die wichtigsten Elemente der Beanspruchungsbewertung bezeichnet:

- Zutritt von Feuchtigkeit
- Wärme
- UV-Belastung
- mechanische Belastungen
- Chemikalien
- biologische Belastungen

Der Einfluss von Alterungsparametern auf das mechanische Verhalten im Kurzzeitexperiment ist in zahlreichen Veröffentlichungen aufgezeigt (z.B. (4), (134), (196)). Ferner ist bekannt, dass auch eine unmittelbare Veränderung der mechanischen Eigenschaften von Klebfugen durch Feuchteexposition eintreten kann ((132), (187)). Darüber hinaus können ungünstige Verträglichkeitsrandbedingungen zwischen Werkstoffen vorliegen (203), die zu einer Beanspruchung führen können.

2.3.1.2 Versagensursachen elastischer Dickschichtklebungen

Aus den im vorherigen Abschnitt dargestellten Grundformen der Beanspruchung lassen sich die für den technischen Gebrauch wesentlichen Versagensursachen ableiten. Nach (8) können die folgenden Hauptversagensursachen für Dickschichtklebungen definiert werden:

- Bruch durch einmalige Überbeanspruchung
- Bruch durch Kriechverformung bei langer statischer Beanspruchung mit konstanten Lasten
- Bruch durch Relaxationsverformung nach relativ schnell angelegter und dann statischer Deformation
- Ermüdungsbruch durch Schwingbeanspruchung

Der Bruch der Klebschicht kann hier durch verschiedene Formen des Versagens erfolgen. Viele dieser Versagensformen werden daher direkt auf das Versagen des Klebstoffs zurückgeführt. Die Ermittlung und Beschreibung des Langzeitverhaltens von Kunststoffen und Klebverbindungen sind ein wesentliches Thema aktueller Forschung auf diesem Gebiet (z.B. (185)). Neben der Temperatur sowie den mechanischen Beanspruchungen ist die Feuchtigkeit ein entscheidender Beanspruchungsparameter für Klebverbindungen (84). Es ist davon auszugehen, dass für Klebfugen im Glasfassadenbau hier ein enger Zusammenhang zwischen der Feuchte in der Fuge am Bauwerk und der vorherrschenden Luftfeuchtigkeit vorliegt (76). Für baukonstruktive Anwendungen kann die Kombination aus hygrothermisch-mechanischen Einwirkungen versagensmaßgebend sein (33). Insbesondere feucht-warme Umgebungsbedingungen sind dafür bekannt, degradative Effekte in der Klebschicht zu beschleunigen. Neben dieser Langzeitauswirkung ist auch die unmittelbare Beeinflussung der visko-elastischen Eigenschaften ((132)) sowie der Widerstandseigenschaften ((23)) von Klebverbindungen durch den Feuchteeinfluss nachweislich zu beobachten. In (39) werden hierzu verschiedene mechanische und mediale Faktoren, die das Versagen von Klebfugen beeinflussen, untersucht. Die Autoren stellen fest, dass die Kombination verschiedener Faktoren maßgebenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit hat. Dies steht im Einklang mit Erkenntnissen aus dem Bereich der Werkstoffermüdung in der Kautschuktechnik (siehe z.B. (26), (105)).

2.3.1.3 Versagensmechanismen der Elastomerwerkstoffe

Aufgrund der Bedeutung der Kenntnis der Versagensmechanismen der Elastomerwerkstoffe für die in den Kapiteln 4 und 5 durchgeführten Untersuchungen werden nachfolgend wesentliche Merkmale der Versagensmechanismen beschrieben.

2.3.1.3.1 Mechanische Versagensinitiierung Bei der Betrachtung des Versagensvorgangs infolge mechanischer Einwirkung ist für Elastomerwerkstoffe zwischen der Rissentstehung und dem Risswachstum zu unterscheiden (200). Die Risse in einem Elastomerkörper beginnen typischerweise an vorhandenen Imperfektionen im Inneren des Werkstoffs sowie an den Grenzflächen und wachsen mit zunehmender mechanischer Beanspruchung bei Überschreitung einer Beanspruchungsgrenze (z.B.(26), (105)). Das Eintreten eines Risses ist oftmals dadurch definiert, dass dieser eine endliche und sichtbare Größe einnimmt. Solche makroskopisch zu beobachtenden Risse wachsen hierbei sukzessiv orthogonal zu der mechanischen Zugbeanspruchung, was

auf das Überstrecken von Makromolekülketten zurückgeführt wird (26). Dieser Vor-

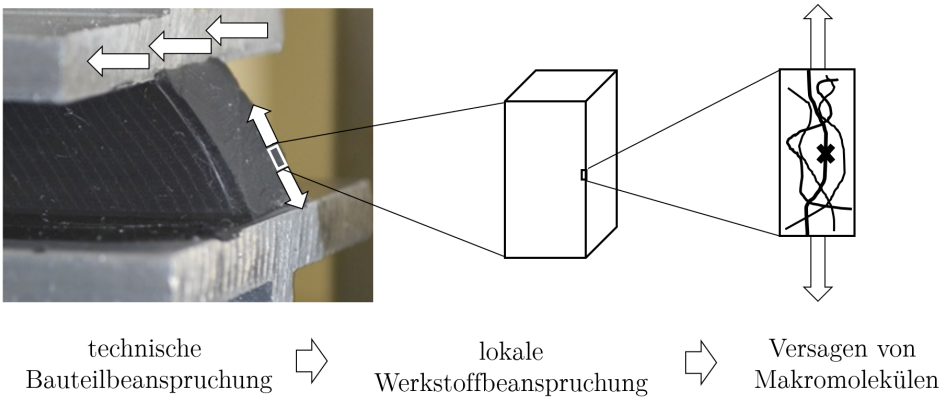


Abbildung 2.16: schematische Darstellung des Versagensmechanismus von Elastomerwerkstoffen (Quelle: eigene Darstellung)

gang benötigt Zeit. Darüber hinaus wird in der Modellvorstellung davon ausgegangen, dass die Makromoleküle unterschiedliche Längen haben (129). Die Überstreckung und der Riss erfolgen daher nicht gleichzeitig für alle Ketten. Ein instantanes Versagen von Elastomerwerkstoffen infolge einer Überbeanspruchung ist aus diesen Gründen unüblich. Das eigentliche Versagen tritt infolge des Risswachstums ein. Insbesondere bei Elastomerbauteilen unter zyklischer Beanspruchungen ist dieser sukzessive Versagensvorgang relevant und wird hier durch bruchmechanische Methoden unter Anwendung von Risswachstumsraten beschrieben ((26), (146)). Hier ist bekannt, dass die Erhöhung von Temperaturen sich negativ auf die Fähigkeit auswirkt, das Einreißen dieser Risse zu unterbinden (118). Die lokal ertragbare Bruchdehnung des Werkstoffs ist eine werkstoffspezifische Größe und steht im Zusammenhang mit der Molmasse, der Dichte sowie dem Vernetzungsgrad (181) und der Temperatur.

2.3.1.3.2 Kavitation Ein weiterer charakteristischer Mechanismus im Umgang mit Elastomerwerkstoffen ist Kavitation. Als Kavitation wird das Anwachsen von vorhandenen Mikrolöchern im Polymervolumen infolge hydrostatischer Zugbeanspruchung bezeichnet (27). Das Eintreten dieses Effektes wird darauf zurückgeführt, dass infinitesimale Einschlüsse auf eine endliche Größe wachsen, wenn ein Schwellwert der hydrostatischen Spannung $p_{Kavitation}$ überschritten wird. Dies ist schematisch in Anlehnung an (154) in Abbildung 2.17 dargestellt. Der Schwellwert $p_{Kavitation}$ hängt

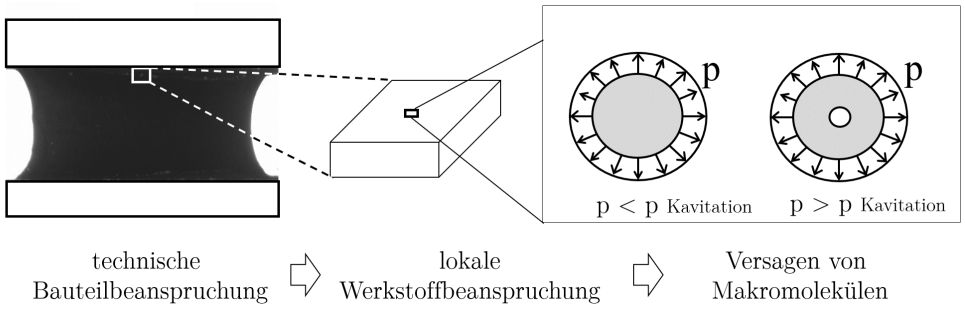


Abbildung 2.17: schematische Darstellung des Eintretens von Kavitation (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (154))

hierbei aus werkstoffwissenschaftlicher Sicht von zahlreichen Faktoren wie der Mehrachsigkeit der Beanspruchungszustandes, der Form der Kavitäten sowie der Füllstoffe ab (25). Im Rahmen dieser Arbeit wird folgender Näherungsansatz ((25)) für die Bestimmung des kritischen hydrostatischen Zugs $p_{Kavitation}$ verwendet.

$$p_{Kavitation} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{5 * G}{2} = \frac{5 * E}{6} \tag{2.39}$$

Dieser basiert auf den Arbeiten in (27) und wird in zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen verwendet. Dieser Effekt gilt als ein wesentlicher Faktor bei der Dimensionierung von Elastomerwerkstoffen, wird eng mit dem Werkstoffversagen verbunden und für viele elastomere Werkstoffe im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten untersucht (siehe u.a. (10), (184), (17), (18)). Ein sehr guter Überblick hierzu ist in (154) ausführlich wiedergegeben. Auch für Haftklebstoffe ist dies ein bekannter Versagensmechanismus (68).

2.3.2 Methoden der Versagensprognose für Klebverbindungen

Das Versagen einer Klebverbindung zu prognostizieren ist aufgrund der dargestellten Einflussparameter eine große Herausforderung und seit Jahren eine zentrale Fragestellung in Forschung und Entwicklung. Für die strukturierte Darstellung bestehender Verfahren bietet es sich an, zunächst eine Einteilung von Modellen der Versagensprognose durchzuführen, auch wenn nicht in jedem Fall eine direkte Trennung der

Verfahren möglich ist bzw. Kombinationen ihre Anwendung finden können. Dies erfolgt im Rahmen dieser Arbeit auf Basis der folgenden zwei Gruppen:

- Versagensprognose auf Klebstoff-Ebene (lokale Verfahren) Die lokalen Verfahren beschreiben den Beanspruchungszustand meist auf Basis lokaler Spannungs- und Verzerrungskomponenten, die für den Klebstoff auf Grundlage meist kontinuumsmechanischer Modellansätze ermittelt werden. Auf Basis dieser Ergebnisse wird auf den Beanspruchungszustand in der Klebverbindung geschlossen.
- Versagensprognose auf Ebene der Klebverbindungen (zonenorientierte Verfahren). Zonenorientierte Verfahren für Klebverbindungen behandeln die Klebverbindung als geschlossenes Element zwischen zwei Fügepartnern, ohne die internen Beanspruchungszustände zu beschreiben.

Die Unterschiede definieren sich hierbei durch die methodische Vorgehensweise bei der Bewertung der Beanspruchung in einer Klebverbindung. Nachfolgend werden diese Vorgehensweisen vorgestellt.

2.3.2.1 Versagensprognose auf Klebstoff-Ebene

Viele Modelle zur Versagensprognose basieren auf Methoden der höheren Festigkeitslehre. So ist für metallische Werkstoffe die quasi-statische Auslegung von Bauteilen auf eine Fließgrenze auf Basis von Vergleichsspannungen (GEH) ein ingenieurpraktisch weitläufig etabliertes Verfahren. Die Modellvorstellung der Plastizität findet auch bei elasto-plastischen Strukturklebstoffen ihre Anwendung (41). Aufgrund der Notwendigkeit der Berücksichtigung von hydrostatischen Beanspruchungszuständen sind in der Literatur oftmals Modelle mit erweiterten Fließbedingungen zu finden (z.B. (165), (144)). Diese bilden in verschiedenen Werkstoffmodellen die Grundlage der Beurteilung von mehraxialen Beanspruchungszuständen (z.B. (73), (174)). Typischer Einsatzbereich dieser Modelle ist die numerische Simulation von kurzzeitigen kontinuierlichen Impactvorgängen, wie die Crash-Simulation.
Für Elastomerwerkstoffe wird die Modellvorstellung der Plastizität nicht angewendet. Hier sind zur Vorhersage der Risseinleitung zumeist die RANKINE-Hypothese der maximalen Hauptspannung oder die St.Venant-Hauptdehnungshypothese sowie die Formänderungsenergiedichte zu finden (z.B. (146), (13), (88), (200)). Ferner wird in (147) der Formänderungsbetrag als prognosefähiges Kriterium zur Beurteilung mehraxialer Beanspruchungszustände erwähnt. Hier sind insbesondere im Bereich der Ermüdung

von Kautschukwerkstoffen umfangreiche Erkenntnisse zur Vorhersage des Risseintritts sowie des Rissfortschrittsverhaltens vorhanden (siehe hierzu u.a.(26), (105), (200), (201)). Im Rahmen der Untersuchungen von (28) werden gummielastische Klebverbindungen hinsichtlich der ertragbaren Lasten unter Verwendung verschiedener Probekörpergeometrien und Anwendung verschiedener Festigkeitshypothesen untersucht. In Analogie zu diesen Untersuchungen für Elastomerwerkstoffe sind für elastische Klebverbindungen aus Polyurethanen in der Literatur oft Anwendungen von Hypothesen auf Basis der Hauptspannung sowie der Hauptdehnung zu finden (siehe z.B. (156)). Aktuelle Arbeiten bewerten den Beanspruchungszustand auch auf Basis von Invarianten (z.B. (186)) oder kombinierten Festigkeitshypothesen (z.B. (180)). Für zweidimensionale Beanspruchungen werden in (17) verschiedene experimentelle Untersuchungen durchgeführt und verschiedene Versagenshypothesen unterschiedlicher Anpassungsgüte diskutiert. In (197) wird ein biaxiales dehnungsbasiertes Versagenskriterium vorgestellt. In (30) werden aktuelle kontinuumsmechanische Ansätze, Wirksamkeit und Anwendbarkeit diskutiert. Ferner werden richtungsorientierte Energieansätze (137) diskutiert. Darüber hinaus sind Methoden der Energiebegrenzung ((123), (124)) in der Literatur zu finden. Die Kombination verschiedener Hypothesen zur Prognose des Versagens von Polyurethanverbindungen wurde aktuell in (180) untersucht. Hierbei kamen Hauptdehnung, Hauptspannung sowie kombinierte Kriterien zur Anwendung, es konnte mit der gewählten Vorgehensweise kein allgemeingültiges Kriterium ermittelt werden. Für Klebverbindungen mit gummielastischem Werkstoffverhalten werden hierzu gegenwärtig im Rahmen eines aktuellen AiF-Forschungsprojektes Untersuchungen durchgeführt (86).
Dennoch kann aufgrund des oftmals hohen experimentellen Aufwands und der Vielfalt der Werkstoffe keine allgemeingültige Hypothese validiert werden.

2.3.2.2 Versagensprognose auf Ebene der Klebverbindung

Neben den Bestrebungen zur lokalen Erfassung des Klebstoff-Versagens mit Hilfe der Finite-Elemente-Methoden und der Anwendung lokaler Festigkeitshypothesen sind in der Literatur auch zahlreiche Prognosemodelle zu finden, welche das Versagen sowie den Beanspruchungszustand der Klebverbindung als Gesamtelement betrachten. Neben den in der Crash-Simulation im Automobilbereich angewendeten Kohäsivzonenmodellen (siehe z.B. (176)) sind hier analytische Verfahren sowie die Anwendung von Schnittgrößen (Nenngrößen) zu finden. Die Fachartikel von Volkersen ((157), (158)) können als die ersten wesentlichen Arbeiten auf diesem Gebiet bezeichnet werden. Diese behandeln die Schubübertragung in einer geschlossen formulierten

Gleichung unter Berücksichtigung elastischer Fügepartnerdeformation. Diese Art des Ansatzes erfuhr in den folgenden Jahren eine stetige Weiterentwicklung hinsichtlich der Berücksichtigung verschiedener Berechnungseinflüsse und ist in vielfältiger Modifikation und Erweiterung Stand der Technik bei der Auslegung dieser Verbindungen. Ein zusammenfassender Überblick über eine große Anzahl dieser Modelle ist in (126) zu finden. Für elastische Paneelklebungen wurden in (173) praktikable Ansätze zur Überlagerung von Quer- und Normalbeanspruchungen vorgestellt. Hierbei wurde als Vergleichskriterium einer vektoriellen analytischen Spannungsanalyse die Hauptspannungshypothese nach RANKINE auf Schnittgrößenbasis verwendet. Die Versagensprognosen unter kombinierter mechanisch-thermischer oder -hygrothermischer Beanspruchung sind hingegen meist analytisch aufgebaut. So wurde in (33) im Hinblick auf bautypische Beanspruchungen ein Ansatz zur Prognose der gekoppelten mechanisch-hygrothermischen Beanspruchung für Klebverbindungen im Bauwesen entwickelt. Zur Charakterisierung der mechanischen Beanspruchbarkeit unter mehrachsialer Lastwirkung wurden unter anderem von Sandberg und Vallabahn (89) wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt. In (134) ist ein Ansatz für punktgehaltene Verbindungen vorgestellt. Für Silikonwerkstoffe wird in (170) ein makroskopischer Ansatz zur ingenieurmäßigen Abbildung des Verhaltens von Silikonfugen vorgeschlagen. Ferner sind in der Literatur verschiedene Ansätze zu finden, die mehraxiale Beanspruchungen in geklebten Komponenten diskutieren. Hier sind die Arbeiten von (43) und (42) zu nennen, welche den Temperatur- und Zeiteinfluss mit Hilfe systematischer Testreihen beschreiben und mit Hilfe des Nennspannungskonzeptes in ein analytisches Modell überführen. Ferner sind probabilistische Versagensmodelle zu finden ((189), (130)). Darüber hinaus werden dieser Gruppe Methoden der Finiten Bruchmechanik zugeordnet (108), deren Anwendbarkeit für die Versagensprognose gegenwärtig untersucht wird. Für Haftklebstoffe sind zur Versagesprognose aufgrund der vorgegebenen Geometrie ebenso bruchmechanische Konzepte und Kohäsivzonenmodellierungen zu finden (z.B. (192)). Für das Bauwesen ist auch aus Sicht der praktischen Anwendbarkeit auf Großstrukturen eine zonenorientierte Vorgehensweise sinnvoll (3). Dies ist an aktuellen AiF-Forschungsprojekten (z.B. (96), (97), (188)) sowie wissenschaftlichen Arbeiten aus diesem Bereich ersichtlich (130), wo entsprechende Ansätze verfolgt werden.

2.4 Dimensionierung von Bauteilen im Bauwesen

Für die Dimensionierung von Bauteilen im Bauwesen werden bautechnische Nachweise geführt. Diese sind in Form und Aufbau in entsprechenden Normen definiert. Zum Verständnis der Behandlung der Klebverbindung bedarf es der Kenntnis von Grundlagen dieser Nachweisverfahren. Dies gilt insbesondere für die Behandlung der klimatischen Einwirkung.

2.4.1 Grundlagen der Bauteildimensionierung im Bauwesen

An die Errichtung baulicher Anlagen sind grundlegende Anforderungen gestellt. Bei der Beurteilung der Tragfähigkeit bautechnischer Konstruktionen sind die Sicherheit und Zuverlässigkeit ein zentrales Thema im Ingenieurbau. Das bedeutet, dass bauliche Anlagen so ausgelegt werden müssen, dass die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit sowie die Dauerhaftigkeit gewährleistet werden können. Darüber hinaus müssen Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit beachtet werden.
Die Auslegung von baulichen Anlagen und Konstruktionen basiert auf dem Kriterium der Zuverlässigkeit als Maß für die Beurteilung der Sicherheit eines Bauwerks. Diese Zuverlässigkeit ist definiert als die Befähigung eines Bauteils, seine Funktion mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in einem vorgegebenen Zeitraum zu erfüllen (112). Als Maß der Zuverlässigkeit eines Systems wird eine operative Versagenswahrscheinlichkeit (p_f) verwendet. Diese stellt nicht eine reale Wahrscheinlichkeit des Versagens eines Systems dar, sondern ist vielmehr als ein operatives Maß anzusehen. Die reale Versagenswahrscheinlichkeit steht in engem Zusammenhang mit menschlichem Versagen (112). Jedoch wird durch dieses Maß die Möglichkeit zur normen- und bauartübergreifenden Definition eines Sicherheitsniveaus gegeben.
Ein Bauteil ist demnach gegen ein Versagen ausreichend dimensioniert, wenn die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens eines Grenzzustandes für eine definierte Nutzungsdauer auf ein akzeptierbares Maß begrenzt ist. Dies wird mit Hilfe der Betrachtungen von Grenzzuständen erreicht.

- Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)
- Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)
- Grenzzustand der Ermüdung

Für diese Zustände sind in Abhängigkeit von Schadensfolgen Wahrscheinlichkeiten des Versagens definiert (103). Dass diese Grenzzustände eingehalten werden, wird mit Grenzzustandsgleichungen erreicht. Hierzu wird zwischen einwirkenden Größen, die zu Beanspruchungen führen E_d (Einwirkung), und der Eigenschaft des Bauteils, diese zu kompensieren R_d (Widerstand), unterschieden. Hierzu werden die einwirkenden Größen den Widerstandsgrößen gegenübergestellt.

$$E_d \leq R_d \tag{2.40}$$

Es wird im Rahmen der Nachweisführung gezeigt, dass die Auswirkung der Einwirkung E_d (z.B. die aus der Windlast resultierende Hauptzugspannung) kleiner ist als der Bauteilwiderstand R_d (z.B. die rechnerische Biegezugfestigkeit). Hierbei wird berücksichtigt, dass sowohl die Einwirkungsgrößen als auch die Widerstandsgrößen keine deterministisch ermittelbaren Größen sind, sondern vielmehr eigenen stochastischen Verteilung folgen.

2.4.2 Ermittlung von Lastgrößen aus klimatischen Einwirkungen

Die bei Klebfugen im Glas- und Fassadenbau für die Dimensionierung zu berücksichtigenden Beanspruchungen können aus unterschiedlichen Belastungszuständen resultieren.
Hierbei wird unterschieden zwischen ständigen, veränderlichen und außergewöhnlichen Einwirkungen. Dies sind nach (53) Kraft- oder Weggrößen und werden im Rahmen der Eurocode-Reihe getrennt nach der Art der Einwirkung definiert. Aus diesen resultieren Kräfte bzw. Differenzverschiebungen, die durch die Bauteile teils temporär und teils dauerhaft aufgenommen werden müssen. Wirken verschiedene Schnittkräfte gleichzeitig, sind in (52) Kombinationsregeln definiert. Diese Einwirkungen führen wiederum zu Beanspruchungsgrößen im Bauteil, die in Form von Schnittkräften in die Nachweisgleichungen einfließen. Dies ist schematisch in Abbildung 2.18 dargestellt.

2.4.2.1 Lastkombination

Ferner sind in (52) verschiedene Konzepte zur Behandlung der Sicherheit und Zuverlässigkeit definiert, die grundsätzlich in Abhängigkeit von der Bemessungsfragestellung angewendet werden können (103). Für Anwendungen im Glas- und Fassadenbau

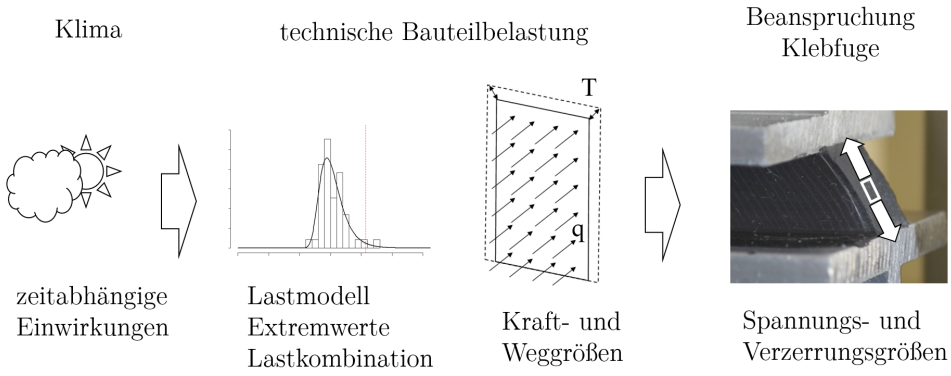


Abbildung 2.18: Schema der Behandlung klimatischer Größen (Quelle: eigene Darstellung)

ist das semi-probabilistische Konzept oder Teilsicherheitskonzept Stand der Technik. Im Teilsicherheitskonzept wird das akzeptierte Maß der Wahrscheinlichkeit des Versagens mit Hilfe von (Teil-)Sicherheitsbeiwerten reguliert. Dies geschieht sowohl auf der Einwirkungsseite (z.B. der Spannung resultierend aus einer Windbelastung) durch Teilsicherheitsbeiwerte als auch durch die Modifikation des Widerstandes (z.B. der Materialfestigkeit) auf der Widerstandsseite durch Einführung unterschiedlichster Faktoren in Abhängigkeit von der betrachteten Konstruktion bzw. des Lastfalls. Die zu berücksichtigende Einwirkungsgröße setzt sich hierbei meist aus einer Kombination verschiedener Einzeleinwirkungen zusammen und kann allgemein nach folgendem Schema ermittelt werden:

$$E_d = \sigma_{max,d} = \sigma_{max}(\gamma_G * G_k \oplus \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1}(\gamma_{Q,1} * \psi_{0,i} * Q_{k,i})) \leq \frac{\sigma_R}{\gamma_M} = R_d \quad (2.41)$$

Dieses Konzept ist Grundlage aktueller Bemessungnormen für den Glas- und Fassadenbau wie (47) sowie von Regeln zur Auslegung tragender Kunstoffbauteile (193) (142).
Die ETAG 002 folgt nicht dieser Vorgehensweise, sondern basiert auf einem mittlerweile veralteten Konzept, dem der zulässigen Spannungen. Hierbei werden die charakteristischen Einwirkungen nicht durch Teilsicherheitsfaktoren verändert. Der Abstand zwischen den Einwirkungs- und Widerstandsgrößen wird hier mit einem globalen Sicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite reguliert.

$$\sigma_{vorhanden} = \sigma_{max}(G_k \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1}(\psi_{0,i} * Q_{k,i})) \leq \frac{\sigma_R}{\gamma_{global}} = \sigma_{zul} \quad (2.42)$$

Die Unterschiede beider Konzepte sind nachfolgend schematisch dargestellt, hierbei ist aus Gründen der Veranschaulichung die Notation nach Eurocode für die Einwirkung E_m bzw. den Widerstand R_m für beide Konzepte übernommen. Die Gemeinsamkeit

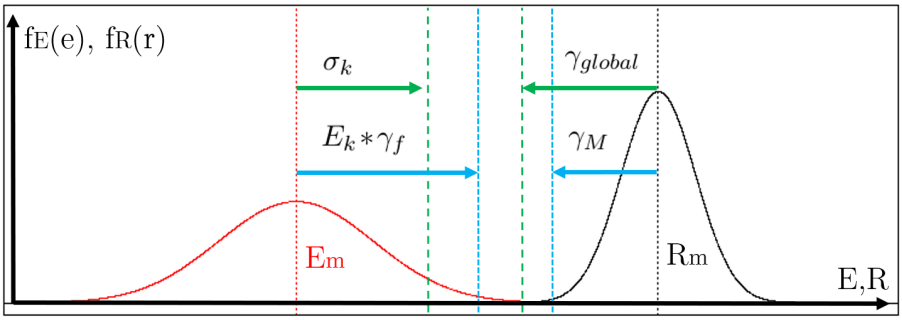


Abbildung 2.19: Schema der Sicherheitskonzepte nach ETAG 002 sowie Eurocode (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (206))

beider Verfahren zeigt sich bei der Ermittlung der Einwirkungsgrößen. Diese werden stets aus der Kombination von charakteristischen Größen der ständigen Anteile G_k sowie der veränderlichen Anteile $Q_{k,i}$ ermittelt. Zu den ständigen Größen zählen beispielsweise das Eigengewicht, zu den veränderlichen Größen die Nutzlasten (z.B. Holmlasten) sowie die aus klimatischer Einwirkung resultierenden Lastgrößen.

2.4.2.2 Charakteristische Lastgrößen klimatischer Einwirkungen

Im Eurocode sind die charakteristischen Werte für Wind und Schnee nach bestimmten Zonen und für Lufttemperaturen deutschlandweit auf Grundlage festgelegter Wiederkehrperioden auf Basis der Jahresextremwerte definiert. Hier gilt übergreifend eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren, welche sich aus den jeweiligen 0,02-Quantilen der Jahresextremwerte des Ereignisses ergeben. Auf Basis der Größen in Tabelle 2.1 wird für klimatische Einwirkungen mit Hilfe von Kombinationsbeiwerten (52) eine Belastungsgröße ermittelt.

Tabelle 2.1: klimatische Einwirkung und ihre Definition nach Eurocode

Einwirkung	Grundlage	Norm
Wind	charakteristisch (50-Jahre-Wiederkehr)	DIN EN 1991-1-4 (55)
Temperatur	charakteristisch (50-Jahre-Wiederkehr)	DIN EN 1991-1-5 (57)
Schnee	charakteristisch (50-Jahre-Wiederkehr)	DIN EN 1991-1-3 (54)
Luftdruck	-	DIN 18008-2 (48)
Globalstrahlung	-	-

Die zur Auslegung zu verwendenden Werte sind als charakteristische Werte der jeweiligen Einwirkungen definiert und werden in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern in Designlasten überführt. Diese gilt für alle typischen klimatischen Einwirkungen wie beispielsweise Wind- (55), Schnee- (54) und Temperatureinwirkung (57) sowie für Nutzlasten, das Eigengewicht oder außergewöhnliche Einwirkungen (53). Das Sicherheitskonzept des Eurocodes bietet Kombinationsregeln bei der gleichzeitigen Wirkung verschiedener Einwirkungsgrößen. Vorgehensweisen zur Bestimmung von konstruktionsspezifischen Einwirkungen, wie der Druck im Scheibenzwischenraum in Isolierglasscheiben, sind in den entsprechenden Anwendungsnormen zu finden (47).

2.4.2.2.1 Wind Die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Größe der Windlasten sind das lokale Windklima und die Topographie (140). Ferner muss zwischen turbulenten und statischen Anteilen der Windlast unterteilt werden ((191), (100)). Das Windklima in Deutschland wird in der Windlastnorm (55) durch eine Windzonenkarte erfasst. Für verschiedene geographische Regionen sind in dieser Grundwerte der Basiswindgeschwindigkeit sowie des Geschwindigkeitsstaudruckes definiert. Dies ist in Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Windzonen nach DIN EN 1991-1-4

Windzone	**Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit** $v_{b,0}$	**Geschwindigkeitsstaudruck** $q_{b,0}$
[-]	**[**m/sec**]**	**[**kN/m^2**]**
1	22,5	0,32
2	25,0	0,39
3	27,5	0,47
4	30,0	0,56

Aus diesen Werten wird mit Hilfe von Modifikationsfaktoren für die Windrichtung und die Jahreszeit die Basiswindgeschwindigkeit v_b ermittelt, beide Faktoren sind in (55) mit dem Wert 1 festgelegt. Die Basiswindgeschwindigkeit für Deutschland ist richtungs- und jahreszeitunabhängig definiert. Hierzu wird die Windgeschwindigkeit mit Hilfe der Dichte der Luft ρ_{Luft} = 1,25 kg/m^3 (Annahme: +23 °C und Meereshöhe) in einen Staudruck überführt, welcher wiederum unter Berücksichtigung eines dimensionslosen aerodynamischen Beiwertes (c_p) in eine Flächenlast w_d umgerechnet wird (Gleichung 2.43).

$$w_d = c_p * \frac{\rho_{Luft}}{2} * v^2 \tag{2.43}$$

Diese normativen Grundwerte basieren auf mittleren Windgeschwindigkeiten. Diese sind deutschlandweit nach meteorologischen Standards erfasst und stellen 10-minütige mittlere Windgeschwindigkeiten dar. Diese gelten für die Geländekategorie 2 in 10 Meter Höhe und sind charakteristische Größen mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren (191).
Für schwingungsanfällige Konstruktionen bietet die Windlastnorm ferner erweiterte Methoden zur Windlastbeurteilung (191). Im Rahmen dieser Arbeit werden quasi-statische Lastanteile betrachtet, die dynamische Auswirkung auf Glasscheiben ist beispielsweise in (208) untersucht.

2.4.2.2.2 Lufttemperatur Die Temperatur der Luft variiert im Tages- und Jahresgang (95). Für baukonstruktive Anwendungen kann darüber hinaus ein Unterschied zwischen der Art und Dichte der Besiedlung in der sich ergebenden Lufttemperatur festgestellt werden (95).

Die für die Bemessung relevante charakteristische Lufttemperatur ist in (57) definiert. Diese stellt sowohl für minimale als auch maximale Temperaturen den charakteristischen 50-Jahres-Wert für Deutschland dar. Dieser basiert, wie zuvor beschrieben, auf dem 2%-Quantil (bzw. 98%-Quantil) der Jahresextremwerte des Stundenmittels der Lufttemperatur. Dies gilt vereinheitlicht für ganz Deutschland, eine weitere Unterteilung in klimatische Zonen oder Bereiche wird nicht vollzogen. Im Rahmen der Zulassungs- und Anwendungsrichtlinien (81) und (38) sind ähnliche Grenzwerte der minimalen und maximalen Lufttemperatur definiert (siehe Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Regelfälle für extremale Temperaturen

Periode	**Definition**	**ETAG 002**	**ASTM C1401**	**DIN EN 1991-1-5**
[-]	**[-]**	**[$^{\circ}C$]**	**[$^{\circ}C$]**	**[$^{\circ}C$]**
Winter	T_{min} = $T_{Auenluft}$	-20	-16	-24
Sommer	T_{Luft}		+33	+37
	T_{max}	+80	+79,5	+79

2.4.2.2.3 Luftdruck Auf Dickschichtklebungen im Randverbund von planmäßig gasdicht abgeschlossenen Isolierglasscheiben wirken infolge der isochoren Druckänderung Beanspruchungen. Die hydrostatisch wirkende Gewichtskraft der Luftsäule über einem Ort wird als Luftdruck bezeichnet. Dieser wird maßgebend von der Höhe des Messortes sowie dem lokalen und globalen Klima beeinflusst. Diese Druckgröße setzt sich nach (47) aus dauerhaft wirkenden wie auch wechselnden Anteilen zusammen. In (48) und (83) werden Berechnungsansätze zur Bestimmung des isochoren Druckes im Scheibenzwischenraum aufgeführt, welche die Grundlagen zur Auslegung der Glasscheiben darstellen.

$$p_0 = \Delta p_{Geo} + \Delta p_{met} + 0,34 \frac{kN}{K * m^2} * \Delta T \tag{2.44}$$

Hierbei wird durch p_{met} die Veränderung des Luftdruckes infolge von wetterbedingten Einflüssen berücksichtigt. Die Änderung des atmosphärischen Druckes infolge der unterschiedlichen Standorthöhen zwischen Produktions- und Einsatzort wird hier überschlägig ermittelt. Auf dieser Basis kann in Kombination mit extremen, fiktiven Temperaturereignissen ein kritischer Luftdruck, der als maßgebende Bemessungsgröße benutzt wird, berechnet werden. Die Grenzwerte von p_{met} werden hier für die zwei zu berechnenden Grenzzustände Sommer und Winter wie in Tabelle 2.4 definiert.

Tabelle 2.4: operative Werte des Luftdruckes nach DIN 18008 (48)

Bemessungszustand	**Luftdruck**
[-]	**[**kN/m^2**]**
Sommer	-2,0
Winter	+4,0

2.4.2.3 Behandlung der Wirkungsdauer

Die Wirkungsdauer von Einwirkungen wird im Eurocode nicht einheitlich behandelt. Eine direkte Angabe von Wirkungsdauern gibt es nicht, dies erfolgt über die Definition von Lasteinwirkungsklassen. Diese richten sich nach den auszulegenden Werkstoffen. Dies ist für ausgewählte Dokumente in Tabelle 2.5 dargestellt.

Tabelle 2.5: Auswahl normativer Lastwirkungen

Einwirkung	**DIN 18008-1 Glas im Bauwesen (47)**	**DIN EN 1995-1-1:2010-12 Holz im Bauwesen (58)**	**BUEV-Empfehlung Tragende Kunststoffteile im Bauwesen (193)**
Eigengewicht	ständig	ständig	ständig
Wind	kurz	kurz/sehr kurz	kurz
Temperaturänderung	mittel	-	mittel (tägliche Amplitude)
Schnee	mittel	mittel/kurz	kurz (Höhen $<$ 1000 m NHN))

Die definierten Lasteinwirkungsklassen samt der angegebenen Größenordnung sowie Zuordnung typischer Lasten nach (53) auf Basis von (58) sowie des nationalen Anhangs ((59)) sind in 2.6 aufgeführt.

Ferner ist im nationalen Anhang definiert, dass Einwirkungen aus Temperatur und Feuchteänderungen der Lasteinwirkungsdauer „mittel“ zuzuordnen sind. Für die Berechnung von Verbundgläsern sind im Normenentwurf (161) vergleichbare Zeitangaben zu finden.
Neben den normativen Verweisen wurde die Andauer von Schneelasten bereits detailliert untersucht (106).
Neben diesen Angaben ist im Bereich der bauphysikalischen Gebäudesimulation

Tabelle 2.6: KLED nach (58)

Klasse der Lasteinwirkungs-dauer	Größenordnung der akkumulierten Dauer der charakteristischen Lasteinwirkung	Beispiele für die Lastwirkung
ständig	länger als 10 Jahre	Eigengewicht
lang	6 Monate - 10 Jahre	Lagerstoffe
mittel	1 Woche - 6 Monate	Verkehrslasten, Schnee
kurz	kürzer als eine Woche	Schnee, Wind
sehr kurz	((59): unter einer Minute)	Wind und außergewöhnliche Einwirkungen

die Verwendung von Klimareferenzjahren üblich. Diese wurden im Rahmen von Forschungsprojekten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) generiert (siehe (107), (120)). Hierbei werden unterschiedliche klimatische Parameter hinsichtlich ihres kritischen Auftretens beschrieben (64).

2.4.3 Behandlung zeitabhängiger Werkstoffeigenschaften

Zur Berücksichtigung zeitabhängig veränderlicher Werkstoffeigenschaften werden im Bauwesen verschiedene Konzepte angewendet. Diese werden nachfolgend aufgrund ihrer Relevanz für die durchgeführten Untersuchungen sowie ihres Potentials für zukünftige Auslegungsmethoden für Klebverbindungen kurz beschrieben.

2.4.3.0.1 Verbundglas Im Glasfassadenbau kommen Verbundgläser mit verschiedenen Polymerwerkstoffen (z.B. Polyvinylbutyral) als Zwischenschichtwerkstoff zum Einsatz, die durch die Kopplung mehrerer Scheiben einen Kopplungseffekt (= Verbundwirkung) und somit ein günstiges Tragverhalten der Glasscheibe hervorrufen können. Das thermisch-mechanische Verhalten dieser Zwischenschichten ist jedoch komplex und geprägt von zeit- und temperaturabhängigen Effekten, die zu Relaxations- und Retardationsvorgängen unter Lasteinwirkung führen können (34). Der Ansatz der Verbundwirkung zur Berücksichtigung dieser Effekte geschieht hier über Ersatzmodule. Das bedeutet, dass eine operative, lastfallabhängige Zwischenschichtsteifigkeit verwendet wird. Diese wird in Abhängigkeit vom Einwirkungsszenario entsprechend versuchstechnisch ermittelt (35). Für diese Zwischenschichtwerkstoffe ist hier jedoch

keine Fragestellung der Festigkeit vorhanden oder definiert, da die zur Anwendung kommenden Glaswerkstoffe nachweisbestimmend sind.

2.4.3.0.2 Ingenieurholzbau Spielt die zeitabhängige Festigkeit eine Rolle, wird meist die Widerstandsseite des Werkstoffes modifiziert. Im konstruktiven Ingenieurholzbau finden bereits normativ gültige Konzepte zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften ihre Anwendung. Darüber hinaus werden negative Beeinträchtigungen der Werkstoffeigenschaften gegenüber Referenzzuständen berücksichtigt. Bei Holzwerkstoffen sind dies insbesondere die Andauer der Lastwirkung sowie die korrelierende Feuchte des Werkstoffes. Diese beiden Parameter werden praktikabel mit Hilfe von Abminderungsfaktoren unter Berücksichtigung der Zeit-Last-Charakteristik sowie der sich durch die im Rahmen der Nutzung zu erwartenden Bauteilexposition bestimmt. So wird die Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegrad mit Modifikationsfaktoren berücksichtigt. Der Bemessungswert kann mit Hilfe des Modifikationsfaktors k_{mod}, des experimentell ermittelten charakteristischen Wertes R_k der Festigkeit sowie des Teilsicherheitsbeiwertes γ_M nach (58) wie folgt ermittelt werden:

$$R_d = k_{mod} * \frac{R_k}{\gamma_M} \tag{2.45}$$

Der Modifikationsfaktor k_{mod} wird infolge der Dauer der einwirkenden Last, welche durch Klassen der Lasteinwirkungsdauer (KLED) definiert ist, sowie der zu erwartenden Intensität der Feuchteexposition während der Nutzungszeit, definiert durch Nutzungsklassen, gewählt. Mit der gleichen Vorgehensweise wird der Einfluss der Feuchte auf die Bauteileigenschaften von Holzelementen berücksichtigt. Dies wird mit Hilfe der Nutzungsklasse (NKL) berücksichtigt, welche verschiedene Klassen klimatischer Exposition definiert. Die Kombination beider maßgebender Einflussgrößen ergibt die Abminderung der Bauteileigenschaften durch k_{mod}. Die Höhe und Festlegung dieser Faktoren basieren auf verschiedenen Forschungsprojekten (siehe hierzu ((29)). Die Grundlage der Abminderung lieferten Pearson- bzw. Sugiyama-Linien (142), die ein zeitabhängiges Verhältnis zwischen k_{mod} und γ_M beschreiben.

2.4.3.0.3 Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen Für tragende Kunststoffteile im Bauwesen liegt gegenwärtig kein bauaufsichtlich eingeführtes Dokument vor, welches die allgemeine Bemessung von Konstruktionen ermöglicht. Durch den Arbeitskreis des Bau-Überwachungsvereins wurde die BÜV-Empfehlung „Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen“ erarbeitet, die sich in erster Linie an Konstruktionen aus Faserverbundwerkstoffen orientiert.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M * A_1 * A_2 * A_3} \tag{2.46}$$

Aufgrund der zum Holzbau ähnlichen Problematik hinsichtlich des zeitabhängigen Verhaltens der Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe orientiert sich die Vorgehensweise in diesem Dokument stark an der Methodik nach (58). Um dem besonderen Einfluss der für Kunststoffe maßgebenden Alterung sowie der Temperatur nachzukommen, wurde der Ansatz aus (58) in der Empfehlung entsprechend um Abminderungsfaktoren (A_1, A_2, A_3) erweitert (siehe Gleichung 2.46).

2.4.4 Dimensionierung von Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau

2.4.4.0.1 Technische Richtlinien zur Dimensionierung Für geklebte Glaskonstruktionen für Türe, Fenster und Vorhangfassaden wurde mit der (162) ein Normenentwurf veröffentlicht. Weiterhin ist mit der (6) ein europäisches Dokument für geklebte Verglasungen veröffentlicht. Beide Dokumente beinhalten Kernelemente der Leitlinie zur Erlangung europäisch-technischer Zulassungen für geklebte Glaskonstruktionen ETAG 002 (81). Die ETAG 002 ist eine Richtlinie, die den Einsatz geklebter Verbindungen zur Anbindung von Glasscheiben an metallische Adapterrahmen regelt. Auf Basis dieser Richtlinie kann eine Klebstoffqualifizierung (ETA) zur Anwendung im Rahmen dieser Konstruktionsart erfolgen. Für diese Konstruktionsart sind auf Basis dieser Richtlinie oft ETA-Dokumente für Silikon-Klebstoffe (z.B. (72), (69) oder (70)), jedoch auch eine mittlerweile abgelaufene für Haftklebstoffe (71) erstellt worden. Im angloamerikanischen Raum ist mit der ASTM C1401 (38) ein korrelierendes Dokument als Anwendungsrichtlinie für Structural Glazing zu finden. In anderen Industriebereichen existieren zwar Normen und Richtlinien, die Randbedingungen sind jedoch auf den vorliegenden Fall nicht direkt übertragbar (z.B. (8), (63)), da sich die Einwirkungsszenarien unterscheiden.

2.4.4.0.2 Nachweisgleichungen Das Dimensionierungsverfahren nach ETAG 002 orientiert sich an dem definierten Geltungsbereich für SG-Anwendungen. Dieser umfasst das Kleben von rechteckigen Glasscheiben auf Adapterrahmen aus nicht rostendem Stahl oder Aluminium. Die Vorgehensweise unterliegt wesentlichen Einschränkungen hinsichtlich verschiedener Faktoren. So muss die Fuge durch zwei parallele Flächen (2-Flankenklebung) begrenzt und im Querschnitt rechteckig sowie kontinuierlich umlaufend ausgebildet sein. Ferner dürfen Mindest- und Höchstwerte der Fugenabmessung (minimale Höhe 6 mm, maximale Breite 20 mm, maximales Aspektverhältnis von 1:3) nicht überschritten werden. Auf dieser Basis müssen zwei getrennte Nachweisformate erfüllt werden, die nachfolgend dargestellt sind. Dabei fließt die größere Kantenlänge der rechteckigen Scheiben (Symbol a_{ETAG}), die Windbelastung W_{ETAG}, die Breite der Klebschicht h_c sowie die resultierende Differenzverschiebung der Fügepartner (Δ_{ETAG}) ein.

$$\sigma_{centre} = \frac{a_{ETAG} * W_{ETAG}}{2 * h_c} \tag{2.47}$$

$$e_{ETAG} = \frac{G_{ETA} * \Delta_{ETAG}}{\tau_{des}} \tag{2.48}$$

Hierbei wird ein spannungsbasiertes Kriterium (Gleichung 2.47) für die Normalbeanspruchungen sowie ein Deformationskriterium (Gleichung 2.48) für die Querbeanspruchungen verwendet. Nachweise dieser Art sind auch in (6) zu finden. Für eine praxisnahe Bemessung sind diese Informationen als keineswegs ausreichend anzusehen. Statische Berechnungen im Bauwesen werden auf Basis von Schnittgrößen geführt. In der ingenieurpraktischen Anwendung wird daher meist das Steifigkeitsverhalten dieser Verbindungen durch Ersatzfedern idealisiert (183). Dies geschieht nach folgendem Schema

$$K_{x,y} = \frac{G_{ETA} * A_{Probe}}{h_{Probe}} \tag{2.49}$$

und für die Normalenrichtung auf Basis des elastischen Moduls:

$$K_z = \frac{E_{ETA} * A_{Probe}}{h_{Probe}} \tag{2.50}$$

Für die statische Berechnung fehlen für diese Vorgehensweise Kenndaten, die das Steifigkeitsverhalten sowie die Beanspruchbarkeit dieser Verbindungen korrekt beschreiben. Diese Problematik ist auch den Herstellern der Klebstoffsysteme bekannt, was sich durch entsprechende Zusatzdokumente (205) zeigt. Entsprechende Leitlinien

befinden sich in diversen Fachverbänden zwar in der Entwicklung, ein Anwendungsdokument für den Anwender zur allgemeinen Regelung dieser Verbindungen existiert jedoch nicht. Daher ist in Ermangelung an alternativen Vorgehensweisen für viele bautechnische Bemessungen eine Auslegung auf Basis der im Rahmen von ETA-Dokumenten dokumentierten Kenndaten üblich (170) (135).

2.4.4.0.3 Kenndaten nach ETAG 002 Klebstoffe können auf Basis der in der ETAG beschriebenen Vorgehensweisen für den definierten Anwendungsrahmen zur Erlangung einer ETA qualifiziert werden. Die hierfür benötigten Kennwerte für den Klebstoff können durch im Rahmen von (81) definierte experimentelle Verfahren ermittelt werden. Diese sehen vor, dass anhand H-förmiger Probekörper unter Verwendung der einzusetzenden Substratwerkstoffe Festigkeits- und Steifigkeitsparameter bei Raumtemperatur im Zug- und Scherexperiment ermittelt werden. Die Vorgaben zur Testgeschwindigkeit im Rahmen der Zulassungsleitlinie (81) setzen hier auf einheitliche Testgeschwindigkeiten im Zug- und Scherexperiment (v = 5 mm/min). Die Probekörpergeometrie (Höhe 12 mm, Breite 12 mm, Länge 50 mm) ist hierbei vorgegeben. Der Einfluss verschiedener Parameter wie Alterung und Temperatur wird in separaten Testreihen untersucht. Hierbei müssen zur Eignungsfeststellung vorgegebene Verhältnisse der Steifigkeit und der Festigkeit zu den bei Raumtemperatur ermittelten Werten eingehalten werden. Die Einflüsse von Zeit und Temperatur werden durch diese Kennwerte nur indirekt berücksichtigt. Hier folgt lediglich eine Separierung der Kenndaten zwischen denjenigen für nicht ständige Einwirkungen (Wind und Temperatur) und denen für Langzeiteinwirkungen (Eigengewicht).

2.4.4.0.4 Finite-Elemente-Simulation Für die Einbindung der ermittelten Parameter in Berechnungsmodelle bedarf es einer Übertragung in die Nennspannungsdarstellung. Die Basis dieser Darstellungsform bilden elastische Kenndaten, welche die Grundlage für diese Art von Werkstoffmodellierung bilden. Hier steht im Vordergrund, dass der Zusammenhang zwischen den nominellen Verzerrungs- und Spannungsgrößen korrekt abgebildet werden kann.

Dies geschieht meist über Strukturfedermodelle, die das mechanische Verhalten von Fugenabschnitten in globalen Berechnungsmodellen repräsentieren (z.B. (183)). Der Ansatz der Ermittlung der Federkenngrößen ist für die Zug- sowie die Scherbeanspruchung identisch:

$$K = \frac{F}{u} = \frac{E_{Klebschicht} * A_{Klebschicht}}{t_{Klebschicht}} \tag{2.51}$$

Neben den im Rahmen von den ETAs definierten Kennwerte sind zumeist durch die jeweiligen Klebstoffhersteller erweiterte Parameter beziehbar. Für den Werkstoff DC 993 sind in (205) die in Tabelle 2.7 definierten Parameter zur Verwendung im Rahmen von Finite-Elemente-Berechnungen angegeben.

Tabelle 2.7: Werkstoffparameter nach Herstellerangaben der Firma Dow Corning nach (205)

Werkstoffmodell	**Parameter**	**Querdehnzahl**
$[-]$	$[N/mm^2]$	**[-]**
Neo-Hooke	C1 = 0,335	ca. 0,49
Mooney-Rivlin	C1 = 0,33; C2 = 0,005	ca. 0,49

Die Nutzung der Finite-Elemente-Methode zur Auslegung der Klebverbindung wird durch die (81) eingeräumt, ein Verfahren zur Kalibrierung entsprechender Modelle sowie des Vorgehens beim Festigkeitsnachweis ist jedoch nicht definiert.

2.5 Stand der Forschung im Glas- und Fassadenbau

Nachfolgend wird der Stand der Forschung zur Auslegung tragender Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau wiedergegeben. Dies geschieht gegliedert nach den im Rahmen dieser Arbeit adressierten Punkten.

2.5.0.0.1 Tragende Klebverbindungen Tragende Klebverbindungen im konstruktiven Glasbau sind in der Literatur in zahlreichen architektonischen Forschungsarbeiten zu finden. Hierzu zählen beispielsweise das Kleben von GFK und Glas ((178)) oder

Machbarkeitsstudien zum Einsatz hochfester Dünnschichtklebungen in Glasschalen ((125)).
Im Rahmen von AiF-Forschungsprojekten wurden alternative Tragkonstruktionen, wie geklebte Glasträger ((4)) oder geklebte Punkthalter ((134)), versuchstechnisch und numerisch untersucht. Frühe Grundlagenuntersuchungen zum Tragverhalten von SG-Elementen sowie zum mehraxialen Tragverhalten sind in (89) und (128) zu finden. Der Fokus bei einer der ersten rechnerisch ausgerichteten Arbeiten von Völkel und Krüger (85) lag auf der numerischen Untersuchung der Auflagerreaktion vierseitig gelagerter SG-Elemente unter Flächenlasten. Hierdurch wurden Unterschiede in der Beanspruchungsverteilung infolge einwirkender Flächenlasten (Windsog und Winddruck) bestimmt. Des Weiteren konnten Tendenzen zum Einfluss der geometrischen Abmessungen der Fügepartner auf die Spannungsverteilung ausgearbeitet werden. Begleitende versuchstechnische Untersuchungen zeigten eine gute Übereinstimmung der Fügepartnerverformung und der numerischen Simulation unter der Verwendung einer detaillierten Abbildung der Fuge und der Unterkonstruktion. Die aussteifende Wirkung von Glasscheiben unter Anwendung der Klebtechnik wird in (80) und aktuell für den Holzbau in (75) untersucht. Untersuchungen zur Anwendung geklebter Punkthalter mit verschiedenen Klebstoffsystemen werden beispielsweise in (16) oder (134) vorgestellt. Hierbei kommen hochfeste Klebstoffe zur Anwendung. Die Anwendung der Dickschichttechnik unter Verwendung von PU-Klebstoffen im konstruktiven Glasbau wird in (36) präsentiert.

2.5.0.0.2 Beanspruchungsermittlung und Bemessung In vielen Arbeiten im Fassadenbau ((20), (14), (169), (15), (102), (159)) findet die Finite-Elemente-Methode zur Analyse lokaler Beanspruchungen in SG-Fugen ihre Anwendung. Die Grundlage bilden hierbei meist uniaxiale Zugexperimente, an denen hyperelastische Werkstoffmodelle kalibriert werden. Dies erfolgt meist mit quasi-statischen Grundversuchen bei Raumtemperatur, die Lastidealisierung erfolgt unabhängig von zeit- und temperaturabhängigen Einflüssen. Bezüge zur Versagensvorhersage von Klebverbindungen im konstruktiven Glasbau werden in (170) diskutiert. Die Finite-Elemente-Methode in Kombination mit analytischen Verfahren wurde in ((4)) zur Analyse des Beanspruchungszustandes von geklebten Hybridträgern genutzt. Im Rahmen dieses Projektes wurden auch zeitabhängige Einflussfaktoren (Kriechen unter Dauerlast) erkannt, jedoch nicht ausführlich weiter verfolgt. Mit Orientierung hin auf die baupraktische Anwendbarkeit von numerischen Berechnungsverfahren wurden im Rahmen von (136), (186), (209) Untersuchungen hinsichtlich der Identifikation geeigneter Festigkeitshypothesen durchgeführt. Hierbei kamen verschiedene hyperelastische Materialmodelle

zur Anwendung, auf deren Basis der Beanspruchungszustand in der Klebfuge bewertet wurde. In (210) konnte die Eignung des Formänderungsbetrags (siehe Abschnitt 2.3.2.1) zur Bewertung von Scherbeanspruchungen in Silikonfugen gezeigt werden. In (40) werden Grenzen der Parameteridentifikation anhand des Scherexperimentes diskutiert. In (177) wurde der Einfluss der Relaxation auf die Scherkraftverteilung am Beispiel eines Stahl-Glas-Verbundtragwerks untersucht.
In einem aktuellen Forschungsprojekt (187) wird der Einfluss verschiedener Parameter auf das Tragverhalten von 2-Flankenklebungen untersucht. Hierbei wurden verschiedene Testreihen an modifizierten H-Proben unter dem Einfluss von Alterung, Temperatur und Geschwindigkeit durchgeführt.
Ferner ist die Realisierung Eurocode-konformer Konzepte Bestandteil aktueller Untersuchungen im Fassadenbau (siehe (104), (111), (207), (206)). Im Rahmen dieser Arbeit werden umfangreiche Untersuchungen zur Anwendbarkeit des semi-probabilistischen Bemessungskonzeptes auf die Auslegung von Klebverbindungen untersucht.Die Grundlage bilden quasi-statische Versuche.

2.5.0.0.3 Zeitabhängige Einwirkung Neben den Anwendungen im Holzbau sind auch im Fassadenbau Bestrebungen zu finden, die sich dem zeitabhängigen Verhalten von Werkstoffen sowie dem der Einwirkungen widmen. So wurde für Verbundgläser mit Polyvinylbutyralzwischenschichten, die sich durch ein ausgeprägtes visko-elastisches Werkstoffverhalten mit typischen Glasübergangstemperaturen von 0 $°C$ bis +25 $°C$ und somit im Gebrauchstemperaturbereich kennzeichnen, bereits umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (siehe z.B. (35), (34)). Hinsichtlich der Wirkung klimatischer Einwirkungen wurden hierzu in (78) Korrelationsanalysen von Lufttemperatur und Windgeschwindigkeiten für verschiedene Standorte in Deutschland durchgeführt. Ausführliche Messungen zu auftretenden Temperaturen an Glasscheiben in Freiluftmessungen wurden von (198) oder von (19) durchgeführt. Im Rahmen von (198) wurden Messungen an monolithischen Glasscheiben hinsichtlich resultierender Temperaturen unter Berücksichtigung verschiedener Glasscheiben und Hinterlüftungen durchgeführt. Für Dichtstoffe sind im angloamerikanischen Raum zahlreiche Untersuchungen zu finden (siehe z.B. (46)). So ist die Ermittlung der Werkstoffeigenschaften unter dem Einfluss von Temperatur in verschiedenen Arbeiten zu finden ((115), (116)). Für strukturelle Klebverbindungen wird in (33) ein Zeitstandmodell untersucht, welches in Abhängigkeit von hygrothermisch-mechanischer Einwirkungen kalibriert wird. In (164) wird für Klebverbindungen ein Testverfahren entwickelt, welches die klimatische Beanspruchung mit Hilfe eines zeitraffenden Verfahrens realitätsnah abbilden soll. Mit dem Ziel der Ermittlung realer Einwirkungsprofile wurden im Projekt Speedcoll

(121) Temperaturmessungen an Photovoltaikelementen an verschiedenen Standorten durchgeführt. Mit Hilfe von Extrapolationsverfahren wird in (114) die Alterung von verschiedenen Klebverbindungen untersucht. Im Rahmen von (74) wird ein reales mechanisches Einwirkungsprofil für windbeanspruchte Klebverbindungen im Fassadenbau untersucht.

2.6 Zusammenfassung und Darstellung des Forschungsbedarfs

Die Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Klebverbindungen im Fassadenbau ist aufgrund der charakteristischen zeit- und temperaturabhängigen Eigenschaften der zur Anwendung kommenden Klebstoffe als komplex anzusehen. Demgegenüber besteht im Fassadenbau der Bedarf für eine Erweiterung des Kenntnisstandes zur Dimensionierung dieser Art von Verbindungen. Für dieses Ziel bedarf es erweiterter Aussagen über die zeit- und temperaturabhängige Lastwirkung wie auch der zugehörigen Werkstoffantwort unter der Berücksichtigung realitätsnaher mechanischer Randbedingungen. Hier setzt die vorliegende Arbeit an.

3 Wirkungsdauer klimatischer Einwirkungen

3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Wirkungsdauer klimatischer Einwirkungen analysiert. Hierbei steht die Temperatureinwirkung mit dem Ziel im Vordergrund, die Beurteilungsgrundlage für die Beanspruchungen auf Klebverbindungen in Multi-Material-Konstruktionen im Fassadenbau zu erweitern. Hierbei wird die folgende methodische

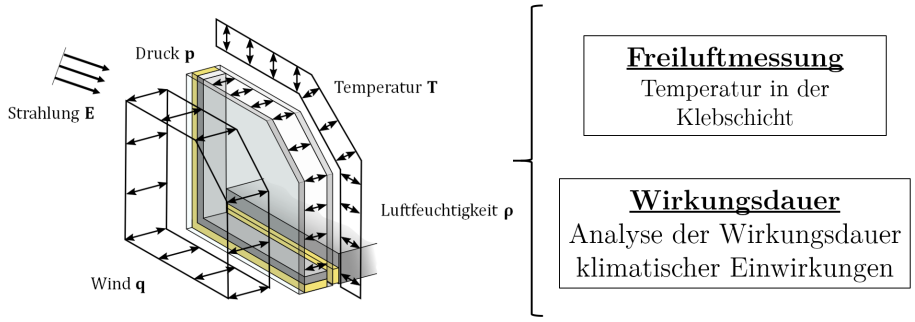


Abbildung 3.1: Inhalt des Kapitels (Quelle: eigene Darstellung)

Vorgehensweise verfolgt:

- Zunächst werden **Freiluftmessungen** zur Analyse der Temperatur in Klebschichten durchgeführt. Dies geschieht in Abschnitt 3.3. Das Ziel ist die Messung des zeitlichen Auftretens der Temperatur in der Klebschicht für die Lastszenarien tiefe Temperaturen sowie hohe Temperaturen.
- Auf Basis der Erkenntnisse der Freiluftmessung wird eine **Analyse der Wirkungsdauer klimatischer Parameter** durchgeführt. Dies geschieht in Abschnitt

3.4 unter Verwendung historischer Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes. Dies wird für verschiedene Wetterstationen in Deutschland durchgeführt. Hierbei werden die klimatischen Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Luftdruck gesondert betrachtet.

- Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird die daraus resultierende **Bauteiltemperatur** diskutiert. Dies geschieht auf Basis einer Grenzwertanalyse unter Anwendung einer bauphysikalischen Analogiebetrachtung in Abschnitt 3.5. Diese wird mit Hilfe der Ergebnisse der Freiluftmessung kalibriert.

3.2 Untersuchte Parameter

3.2.1 Definitionen

Unter dem Überbegriff klimatische Parameter sind in dieser Arbeit sowohl atmosphärische Zustandsgrößen (der Luftdruck, die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit, die relative Luftfeuchtigkeit) sowie abgeleitete Größen (der Staudruck) als auch eine extraterrestrische Größe (die einwirkende Strahlung) vereint. Wird von klimatischen Parametern gesprochen, wird die Gesamtheit dieser Parameter als veränderliche, von den klimatischen Bedingungen abhängige Einwirkungsgröße beschrieben. Diese Abhängigkeit gilt streng genommen für die Globalstrahlungsleistung zunächst nicht. Die effektive auf Fassaden einwirkende Strahlungsleistung ist jedoch durch die Witterung wiederum indirekt vom Klima beeinflusst. Für die Lufttemperatur ϑ wird nachfolgend, im Einklang mit der Bezeichnung im Eurocode für Bauteiltemperaturen, das Symbol T verwendet. Für einen vertieften meteorologischen Hintergrund und die Ursachen der untersuchten klimatischen Parameter sei auf beispielsweise (95) oder (202) verwiesen.

3.2.2 Einteilung

Tragende Klebfugen können durch das Wirken klimatischer Einflussparameter temporär oder ständig beansprucht werden. Dies wird nachfolgend wie folgt unterschieden:

- Nicht ständig wirkende Größen (z.B. Wind, Schnee) kennzeichnen sich dadurch, dass die Belastung hier meist von einer Nulllage aus auftritt. Im Rahmen dieser Arbeit spielen diese Größen eine untergeordnete Rolle. Für die Analyse der Tragfähigkeit in Kapitel 5 wird jedoch eine Last-Zeit-Funktion für den Staudruck

verwendet. Hierfür wird in Abschnitt (3.2.3) ein Ersatzlastbild diskutiert und ermittelt.

- Ständig wirkende Größen treten meist infolge wesentlicher Abweichungen von Referenzwerten auf (z.B. Temperaturen).

Für diese ständig wirkenden Größen wird in diesem Abschnitt eine Analyse der Wirkungsdauer durchgeführt.

3.2.3 Ersatzlastbild für die Windlast

3.2.3.1 Grundlagen

Für die Beurteilung der Wirkungsdauer der Windlast zur Analyse des Tragverhaltens von Klebverbindungen müssen Annahmen getroffen werden. In (79) wird für die Wirkungsdauer auf Basis von Grundlagenuntersuchungen ((140)) zwischen den Zeitintervallen: Böe, 10-Minuten-Wind und 4-Tage-Sturm unterschieden.
Die Beschreibung des realen zeitlichen Verlaufs steht in direkter Abhängigkeit von zahlreichen Einflussparametern (100). Diese sind von den aerodynamischen Eigenschaften der jeweiligen Konstruktion sowie den lokalen Gegebenheiten beeinflusst (74) und können nicht allgemeingültig beschrieben werden.
Es wird daher für die Untersuchungen in Kapitel 5 ein Ersatzlastbild verwendet. Hierfür wird die Vorgehensweise aus (136) aufgegriffen, wo der Böenverlauf als Last-Zeit-Funktion beschrieben wird. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Windböe nicht direkt aus einem belastungsfreien Zustand auftritt, sondern innerhalb eines 10-Minuten-Mittelungsintervalls wirkt. Mit dieser Annahme kann ein Böenersatzlastbild ermittelt werden. Dies wird nachfolgend als Grundlage der numerischen Simulation in Kapitel 5 durchgeführt.

3.2.3.1.1 Staudruckdifferenz Dies geschieht unter vereinfachten Annahmen exemplarisch für die Geländekategorie 2 auf Basis der Modifikation nach (55) und (56) zur Bestimmung der mittleren Windgeschwindigkeit $v_m(v_b, z)$ sowie der Böengeschwindigkeit $v_p(v_b, z)$. Diese sind in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe z wie folgt definiert ((56), Tabelle NA.B.2).

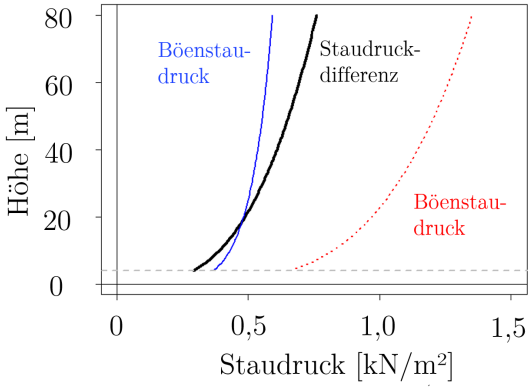
$$v_m(v_b, z) = 1,00 * v_b * (\frac{z}{10})^{0,16} \tag{3.1}$$

$$v_p(v_b, z) = 1,45 * v_b * (\frac{z}{10})^{0,120} \tag{3.2}$$

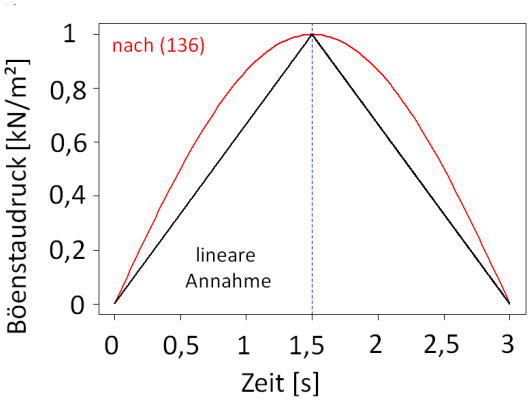
Mit Hilfe von Gleichung 2.43 können für beide Geschwindigkeiten Staudrücke berechnet werden. Die Differenz dieser beiden Drücke wird als Staudruckdifferenz definiert.

$$q_{Diff} = (q_p - q_b) \tag{3.3}$$

Unter Annahme einer Basiswindgeschwindigkeit von v_b = 25 m/s nach Tabelle 2.2 und konstanter Dichte der Luft kann die Staudruckdifferenz als Funktion der Höhe z dargestellt werden (siehe Abbildung 3.2a).



(a) Prinzip der Staudruckdifferenz



(b) Idealisierung des Böenverlaufs (rot: nach (136), schwarz: lineare Annahme)

Abbildung 3.2: Ersatzlastbild für den Böenverlauf (Quelle: eigene Darstellungen)

3.2.3.1.2 Diskussion der Wirkungsdauer Die Dauer der Windböe ist in (55) mit einer Wirkungsdauer t_{Boe} von 2-4 Sekunden definiert. Zur Abbildung des Kraft-Zeit-Verlaufs sind in Abbildung 3.2b ein lineares sowie ein sinusförmiges Böenmodell nach (136) dargestellt. Für den vorliegenden Fall wird vereinfacht unterstellt, dass der Böenverlauf mit einer linearen Abbildung hinreichend genau beschreibbar ist. Hieraus ergibt sich unter Berücksichtigung der Staudruckdifferenz nach Gleichung 3.3 sowie der halben Böendauer $\frac{1}{2} * t_{Boe}$ folgender Zusammenhang für die zeitliche Veränderung des Staudrucks:

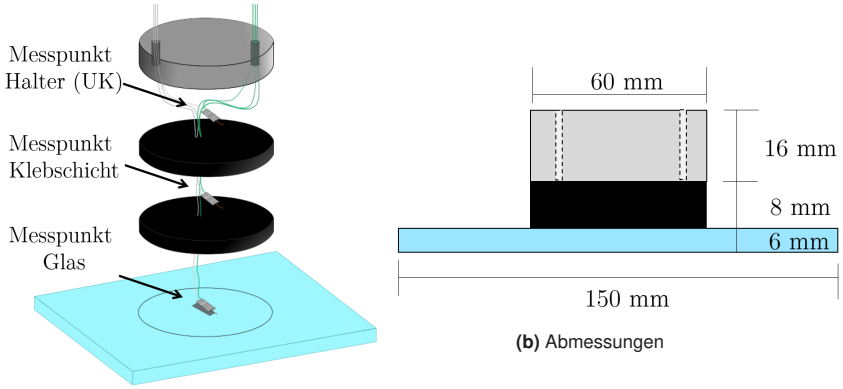
$$\dot{q} = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{2 * \Delta q_{Diff}}{t_{Boe}} \tag{3.4}$$

Mit dem vorgegebenen Zeitintervall Δt kann die Geschwindigkeit der Lastaufbringung nach Gleichung 3.3 berechnet werden.
Es ist ersichtlich, dass unter dieser Annahme zunächst nur eine zeitabhängige Kraftgröße ermittelbar ist. Dies wird als Grundlage der angesetzten Last-Zeit-Funktion für die numerischen Berechnungen in Abschnitt 5.4.4 so verwendet.

3.3 Freiluftmessung

3.3.1 Aufbau des Messstandes

Zur Analyse der Temperatur in Klebschichten werden Freiluftmessungen durchgeführt. Hierzu werden drei Messstände auf dem Dach der Hochschule München (geographischer Breitengrad 48,14 °; geographischer Höhengrad 11,56 °) errichtet, die jeweils mit 5 geklebten Elementen bestückt sind. Ein geklebtes Element besteht jeweils aus einer Glasscheibe, einer zylindrischen Klebschicht sowie einem zylinderförmigen Aluminiumhalter. Zur Temperaturmessung werden Thermoelemente in die geklebten Elemente integriert. Die schematische Anordnung dieser Messstellen ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Hierbei wird die Temperatur in der Klebschicht am Halter, in der Mitte (Mittelpunkt der zylindrischen Klebschicht) sowie an der Glasscheibe erfasst. Die Messstände sind nach Süden ausgerichtet und mit unterschiedlichen Neigungswinkeln (horizontal, $30°$-Neigung, vertikal) so ausgeführt, dass die Glasscheibe dabei stets direkt bestrahlt werden kann. Die horizontale Anordnung wird als Referenzmessung verwendet. In $30°$-Anordnung soll sich so bei einem Sonnenhöhenwinkel von ca. $60°$ ein Zustand mit quasi-orthogonaler Bestrahlungseinwirkung auf die Glasscheibe einstellen. Die Vertikalanordnung soll in Ergänzung eine typische Einbausituation für geklebte Glaselemente darstellen. Ein Überblick über die Neigungswinkel der drei Messaufbauten



(a) Sensorenanordnung im Schnittbild

(b) Abmessungen

Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Sensoranordnung sowie der Abmessungen (Quelle: eigene Darstellungen)

kann Tabelle 3.1 entnommen werden. In jedem Messstand sind fünf Glasscheiben mit verschiedenen Varianten der Glasveredelung verwendet. Diese verfügen wiederum über unterschiedliche Absorptionseigenschaften. Die Produktbezeichnungen und Erscheinungsformen sind in Tabelle 3.2 dokumentiert.

Tabelle 3.1: Messaufbauten und Neigungswinkel bezogen auf die Horizontale

Messaufbau	Anzahl Probekörper	Neigung
Aufbau 1	5	0°
Aufbau 2	5	30°
Aufbau 3	5	90°

Die einwirkende Globalstrahlung wird mit Hilfe eines Pyranometers des Typs SMP3 der Firma KIPP & ZONEN erfasst. Das Pyranometer ist vor Ort eingerichtet. Im Rahmen von Testmessungen unter verschiedenen Verschattungsszenarien durch die systematische Verdeckung naheliegender Bauteile kann keine messbare Beeinflussung der Messergebnisse infolge von Reflexionen oder Sekundärstrahlung festgestellt werden.

Tabelle 3.2: Verwendete Scheibentypen

Produkt	Farbton / Erscheinung	Bezeichnung
ohne Beschichtung	transparent	transparent
Siebdruck RAL 9010	Weiß	RAL 9010
Siebdruck RAL 9005	Schwarz	RAL 9005
Ipachrome Design	spiegelartig	GIB
Ipasolbright neutral Design	leicht transparent, spiegelartig	GIC

Die Temperatur wird mit Hilfe von Thermoelementen (Typ K, CiCr-Ni, Klasse 2) gemessen und mit einem Datenlogger (Agilent Typ 34970A) aufgezeichnet, die Messdaten sind mit einem Intervall von $\Delta t_{Messung}$ = 10 Minuten erfasst. Aus der Güteklasse der Thermoelemente ergibt sich eine Genauigkeit von $\pm$0,525 K für eine gemessene Temperatur von T = $+70\ °C$ (0,0075 * T nach (60)). Darüber hinaus wird an drei verschiedenen Positionen die Lufttemperatur gemessen. Hierzu wird zur Reduzierung des Einflusses der Windeinwirkung auf die Lufttemperaturmessung eine belüftete Einhausung für den Temperatursensor an der Luftmessstelle eingesetzt.

3.3.1.0.1 Herstellung des Messstandes Für die Herstellung der Elemente wurde der Klebstoff DC993 ((69)) der Firma Dow Corning verwendet. Die Klebschicht ist für alle Halter zylinderförmig (Durchmesser 60 mm, Höhe 16 mm) und beidseitig flächig durch die beiden Fügepartner begrenzt. Es befinden sich jeweils 3 Sensoren in jedem Probekörper, einer an der inneren Glasscheibe (Ebene Glasscheibe-Klebschicht), einer im Mittelpunkt des geklebten Zylinders (Ebene Klebschicht) sowie einer am Aluminiumzylinder (Ebene Klebschicht-Aluminium). Für die Durchführung der Messung

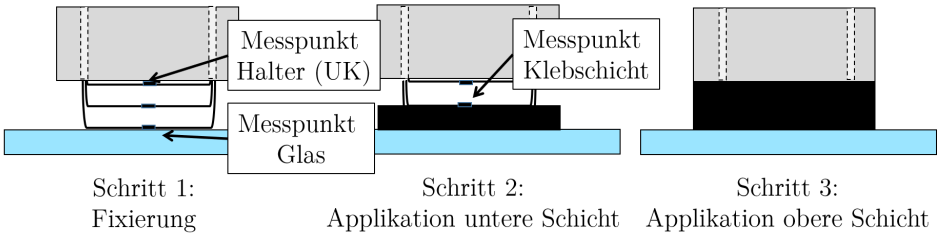
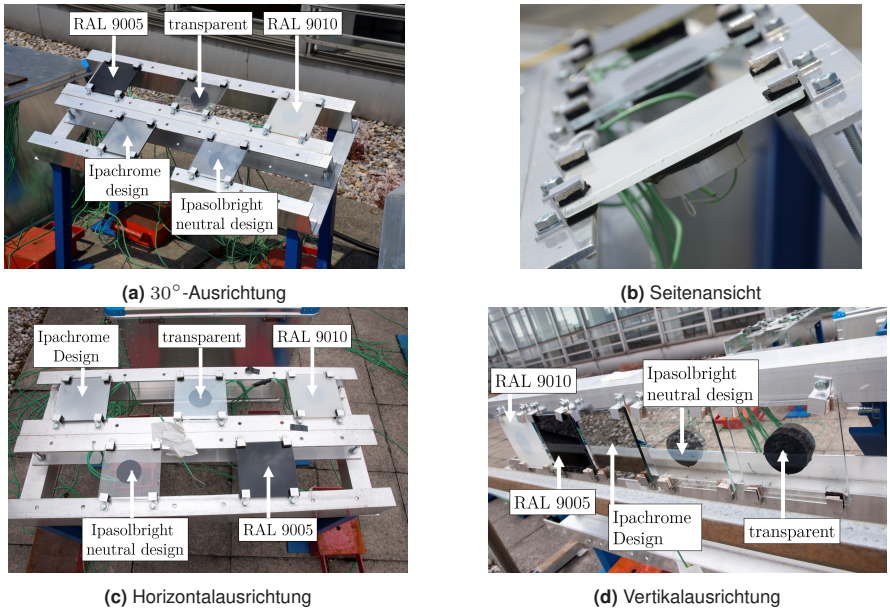


Abbildung 3.4: Schema der Fertigung der Halter mit eingeklebten Sensoren (Quelle: eigene Darstellung)

soll eine reproduzierbare Positionierung der Messsensoren gewährleistet werden. Hierzu wurde eine Fertigungsvorrichtung konzipiert, die aus zwei Negativformen sowie einer Halterungsvorrichtung besteht. Das Prinzip ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Zuleitungen der Thermosensoren sind hierbei so konzipiert, dass sie durch eigens mittig in den Aluminiumzylinder integrierte Bohrungen verlaufen. So soll verhindert werden, dass die Homogenität der Klebschicht in radialer Richtung durch die Leitungen beeinflusst wird. Es wurden im Zeitraum von April 2016 bis April 2017 Messdaten



(a) $30°$-Ausrichtung

(b) Seitenansicht

(c) Horizontalausrichtung

(d) Vertikalausrichtung

Abbildung 3.5: Messaufbauten zur Messung der Temperatur (Quelle: eigene Aufnahmen und Darstellungen)

erfasst. Die Messung erfolgte in diesem Zeitraum in kontinuierlichen Abständen von 2 bis 4 Wochen an insgesamt 185 Tagen des Messjahres. In Zeiträumen, die potentiell für Spitzentemperaturen relevant waren (direkte Sonneneinstrahlung Ende Juni auf die $30°$-Anordnung), sowie in Kälteperioden wurde kontinuierlich gemessen. In Zeiträumen, wo keine Extremtemperaturen (Hoch- und Tieftemperaturereignisse) zu erwarten gewesen sind, wurden keine Messungen durchgeführt.

3.3.2 Ergebnisse der Messung

3.3.2.1 Allgemein

3.3.2.1.1 Einfluss der Scheibenneigung Die Probekörper sind unterschiedlich ausgerichtet und erfahren somit eine unterschiedliche Strahlungseinwirkung. Aufgrund dieser Randbedingung können auch unterschiedliche Maxima der gemessenen Temperaturen messtechnisch ermittelt werden. Dies ist insbesondere deutlich erkennbar durch die Unterschiede der Horizontal- und 30°-Anordnung hinsichtlich der maximal gemessenen Temperaturen. Dies ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Demgegenüber

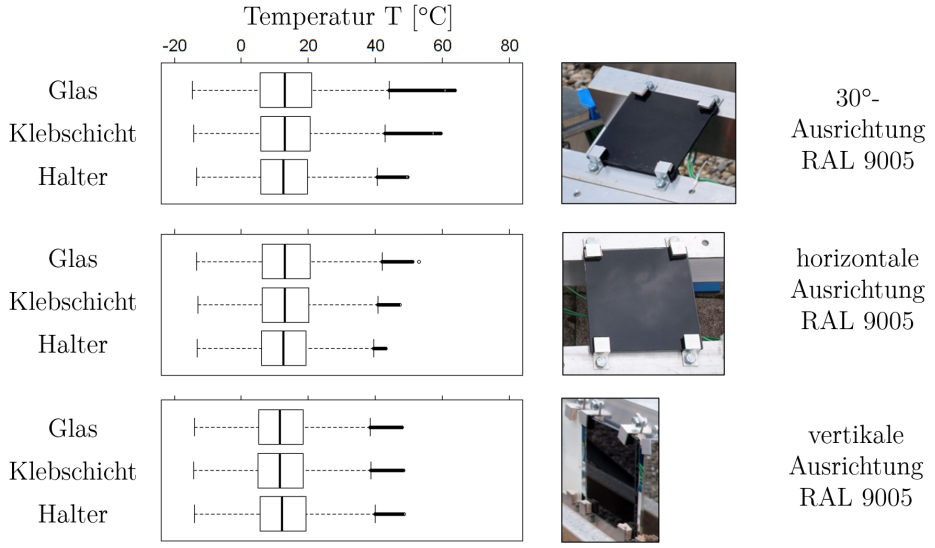


Abbildung 3.6: Boxplot-Darstellung der gemessenen Temperaturen am Messpunkt Glas, Messpunkt Klebschicht sowie am Messpunkt Halter in Abhängigkeit von der Ausrichtung (Standort München: geographischer Breitengrad 48,14°; geographischer Höhengrad 11,56°) (Quelle: eigene Darstellung)

wurde auf die vertikalen Flächen mit Südausrichtung messtechnisch eine geringere Maximaltemperatur ermittelt. Dies wird auf den ungünstigeren Bestrahlungswinkel zurückgeführt, der insbesondere bei hohen Sonnenständen im Sommer erreicht wird. Dieser Einfluss wird in Abschnitt 3.5 weiter diskutiert.

3.3.2.1.2 Gemessene Temperaturmaxima und -minima Die höchsten Temperaturen in der Klebschicht werden am 25.06.2017 in den Mittagsstunden an der schwarzen Scheibe (RAL 9005 tiefschwarz) bei $30°$-Anordnung gemessen. Dieser Tag ist gekennzeichnet von sehr hohen Lufttemperaturen von T_{Luft} = +36,5 °C in Kombination mit wolkenfreiem Himmel. Im Messzeitraum Ende Juni ergibt sich für die $30°$-Anordnung in den Mittagsstunden für den Messstandort München aufgrund des hohen Sonnenstandes eine quasi-orthogonale Strahlungseinwirkung auf die Scheibe. Die minimale Temperatur wird am 07.01.2017 um 4:35 Uhr mit T_{min} = -14,28 °C gemessen. Für die tiefen Temperaturen kann im vorliegenden Fall kein Unterschied zwischen den Scheibentypen messtechnisch ermittelt werden. Für die folgenden Betrachtungen zum zeitlichen Auftreten der Temperatur wird daher die schwarze Scheibe in $30°$-Anordnung betrachtet. Die zeitliche Entstehung dieser Extremtemperaturereignisse, Maximal- und Minimaltemperaturen, wird im nachfolgenden Abschnitt 3.3.2.2 genauer beschrieben und diskutiert.

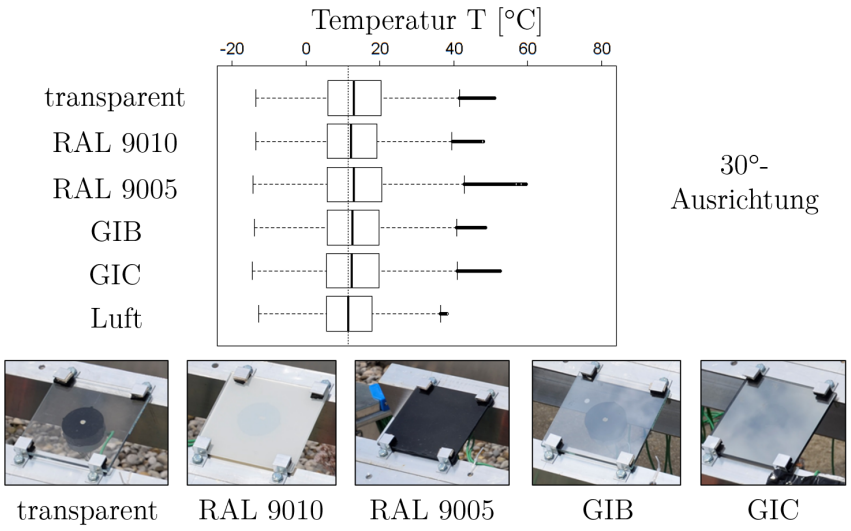


Abbildung 3.7: Boxplot-Darstellung der gemessenen Temperaturen in der Klebschicht in Abhängigkeit der Beschichtung (Quelle: eigene Darstellung)

3.3.2.2 Temperaturverlauf in sommerlicher Periode

Auf Basis der gemessenen Daten wird zunächst die zeitliche Veränderung der Temperaturmesswerte berechnet. Unter Berücksichtigung der durch die Messintervalle von

10 Minuten vorgegebenen Zeitintervalle Δt kann die Temperaturänderung ΔT in Kelvin pro Messintervall i mit Hilfe des Differenzenquotienten wie folgt berechnet werden.

$$\dot{T} = \frac{T_{i+1} - T_i}{t_{i+1} - t_i} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \tag{3.5}$$

Dies wird als Temperaturänderungsrate $\dot{T}$ bezeichnet und dient als Bewertungsgröße der Geschwindigkeit des Lastprozesses Temperatur. Diese Größe wird nachfolgend unter gesonderter Betrachtung von hohen (T_{max}) und tiefen Temperaturen (T_{min}) auf Basis der ermittelten Messwerte diskutiert. Die höchste Temperatur (T_{max}) in der Klebschicht wird im Sommer gemessen (siehe Abschnitt 3.3.2.1.1). Der Tag mit dem Maximalwert ist die Folge einer Entwicklung über mehrere Tage. Diese beginnt zunächst mit einem Zeitabschnitt mit teilweiser Bewölkung, gefolgt von zwei Tagen mit wolkenfreiem Himmel. Ein kontinuierlicher Anstieg der mittleren Tageslufttemperatur ist über diese Tage zu beobachten. Der Verlauf der gemessenen Temperaturen an drei Messpunkten (Glas, Klebschicht, Halter) in diesem Zeitraum ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Während dieser Periode kann in Analogie zum Verlauf der mittleren Lufttemperatur ein stetiger Anstieg der Temperatur in der Klebschicht gemessen werden. Insbesondere in den Tagesstunden infolge der Strahlungseinwirkung werden Temperaturen in der Klebschicht ermittelt, die nahe der Temperatur der Glasscheibe liegen. Die sich auf Basis der Strahlungseinwirkung ergebenden Temperaturunterschiede zur Lufttemperatur können mit Hilfe folgender Formel für jeden Messwert i berechnet werden.

$$T_{Erwaermung,i} = T_{Glas/Klebschicht/Halter,i} - T_{Luft,i} \tag{3.6}$$

Der Verlauf von $T_{Erwaermung,i}$ für die Sommerperiode ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Aus dieser Darstellung der Differenz der gemessenen Temperatur und der Lufttemperatur nach Gleichung 3.6 ist ersichtlich, dass die Strahlungseinwirkung einen maßgebenden Faktor für die hohen Temperaturen in der Klebschicht (Bauteiltemperaturen) darstellt. Ferner kann festgestellt werden, dass sich bei wolkenfreien Nächten Werte berechnen lassen (Gleichung 3.6), die unterhalb der Lufttemperatur liegen (Markierungen A). Dies wird auf Nachtabstrahlung der erwärmten Scheibe zurückgeführt. Wirkt ein Sturmereignis mit Niederschlag (Markierung B), kann dieser Unterschied nicht in dieser Ausprägung festgestellt werden. Die größten Änderungen der Temperaturmesswerte pro Zeitintervall an der Messstelle Glas können in kurzen Perioden von 1-2 Messintervallen von jeweils 10 Minuten an den Tagen mit wechselnder Bewölkung erfasst werden. Dies ist anhand der Temperaturänderungsrate $\dot{T}$ auf Basis von Formel 3.5 in Abbildung 3.10 dargestellt. Die größten Änderungen können folglich an Tagen mit teilweiser Bewölkung bei der $30°$-Anordnung festgestellt werden. Dies gilt sowohl

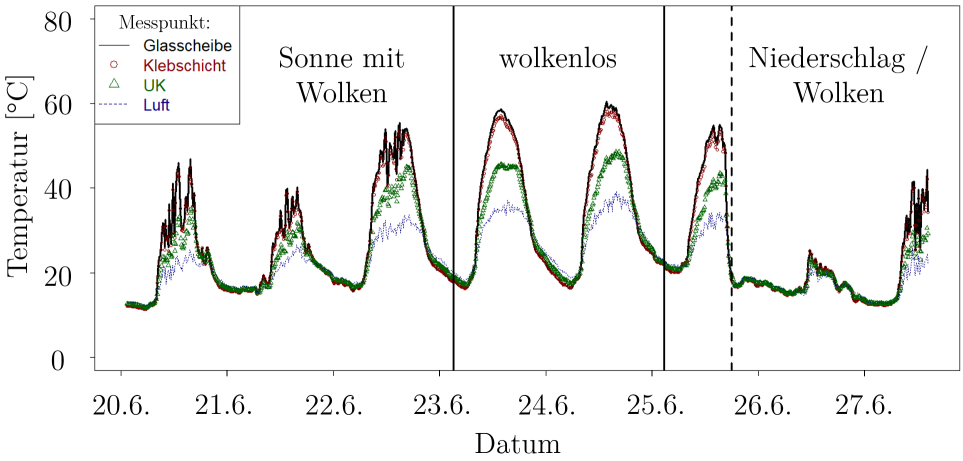


Abbildung 3.8: Gemessene Temperaturen an den Messstellen Glas, Klebschicht, Halter (UK) und Luft (Sommerperiode)

für Veränderungen der Temperatur an der Glasscheibe als auch der Temperatur an der Messstelle der Klebschicht. Bei auftretender Verschattung infolge einer Wolke kann ein zeitnahes Absinken der gemessenen Temperatur innerhalb eines Messintervalls festgestellt werden. War diese Verschattung vorüber, können hohe Aufwärmraten von bis zu $\dot{T}$ = 9,5 K/10min gemessen werden. Für die wolkenlosen Tage können maximale Aufwärmraten von $\dot{T}$ = 4,2 K/10min gemessen werden, die über mehrere Messintervalle konstant waren.

Die betrachtete Hochtemperaturperiode wird durch ein Sommergewitter beendet. Dieses Gewitter ist gekennzeichnet von einem hohen Bewölkungsgrad, verbunden mit erhöhten Windereignissen. In diesem Zeitbereich wird eine rasche Veränderung der Temperaturmesswerte aller Scheibentypen beobachtet. Dies wird auf die Kombination der ausgesetzten Strahlungseinwirkung, verbunden mit der Erhöhung der Windgeschwindigkeit, zurückgeführt. Hierzu sind Daten der Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit sowie des Niederschlags für die Wetterstation München-Stadt den gemessenen Werten gegenübergestellt. Die Wetterstation ist ca. 3 km Luftlinie vom Messstandort entfernt. Dieser Abgleich ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

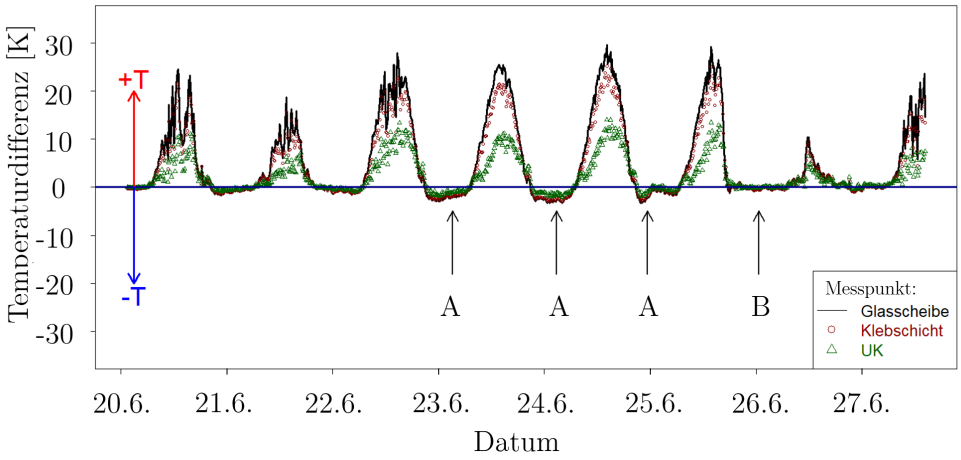


Abbildung 3.9: Differenz der Temperatur an den drei Messstellen Glas, Klebschicht und Halter (UK) gegenüber dem Referenzwert Lufttemperatur nach Gleichung 3.6 (Sommerperiode)

3.3.2.3 Verschattung

Die durchgeführten Messungen wurden ohne planmäßige Verschattung der Messstellen durchgeführt. Zur Beurteilung von Aufblenderaten wird ein Versuch unter Anwendung eines Verschattungsszenarios durchgeführt. Hierzu wird die Scheibe in $30°$-Anordnung (RAL 9005) bis 12:00 Uhr (Datum: 3.8.2016) durch eine belüftete Vorrichtung vor direkter Strahlung geschützt. In diesem Zustand wurden bis 12:00 Uhr identische Temperaturen an allen Messstellen gemessen (Abbildung 3.12). Nach dem Entfernen des Bestrahlungsschutzes können hohe Aufwärmraten der Glastemperaturmesspunkte von $\dot{T}$ = 20 K/10min und $\dot{T}$ = 18 K/10min an der Messstelle Klebschicht gemessen werden (siehe Abbildung 3.12). Diese Werte liegen oberhalb der Werte, die unter direkter Strahlung messtechnisch erfasst werden konnten. Nach 1,5 Stunden wurde die Verschattung wieder appliziert. Dieser Vorgang führt wiederum zu einer raschen Abkühlung der Scheibe in einem Zeitbereich von ca. 30 Minuten auf ein Niveau vergleichbar der Lufttemperatur. Die gemessenen Werte sowie die Temperaturänderungsrate sind in Abbildung 3.13 dargestellt.

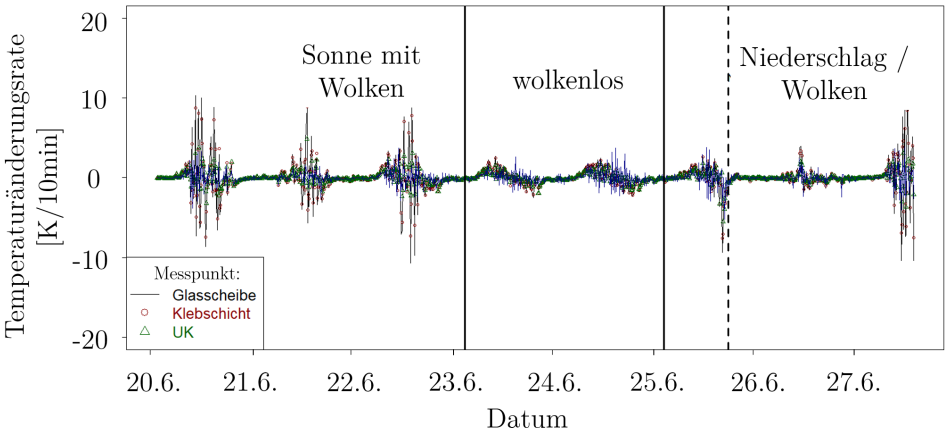


Abbildung 3.10: Verlauf der zu Abbildung 3.8 gehörigen Temperaturänderungsrate auf Basis von Gleichung 3.5 (Sommerperiode)

3.3.2.4 Temperaturverlauf in winterlichen Perioden

Für die Betrachtung der tiefen Temperaturen T_{min} werden zwei verschiedene Perioden im Winter identifiziert. Diese werden für die gleichen Messpunkte wie in der Sommerperiode (RAL 9005, $30°$-Anordnung) ausgewertet.

3.3.2.4.1 Tiefe Temperaturen mit Bewölkung Die tiefsten Temperaturen wurden in einem Zeitbereich erfasst, der gekennzeichnet ist von Lufttemperaturen, die sich im Mittel um
0 °C bewegen und über mehrere Tage anhielten. Innerhalb dieses Zeitraums kann beobachtet werden, dass die Messwerte in der Klebschicht kontinuierlich von einem Höchstwert $T_{Klebschicht}$ = +2,48 °C zum Messperiodenminimum absinken. Dieser Vorgang hat eine Dauer von 78,9 Stunden und wird von zwei Tagesgängen mit Strahlungseinwirkung überlagert. Dies ist in Abbildung 3.14 dargestellt.
Die höchsten Absolutwerte der Änderung der Temperaturmesswerte wurden hierbei durch die Abkühlung der infolge der Strahlungseinwirkung erwärmten Scheibe erreicht (Abbildung 3.15). Dies kann durch die Differenz der Messwerte und der Lufttemperatur unter Anwendung von Gleichung 3.6 in Abbildung 3.16 gezeigt werden.

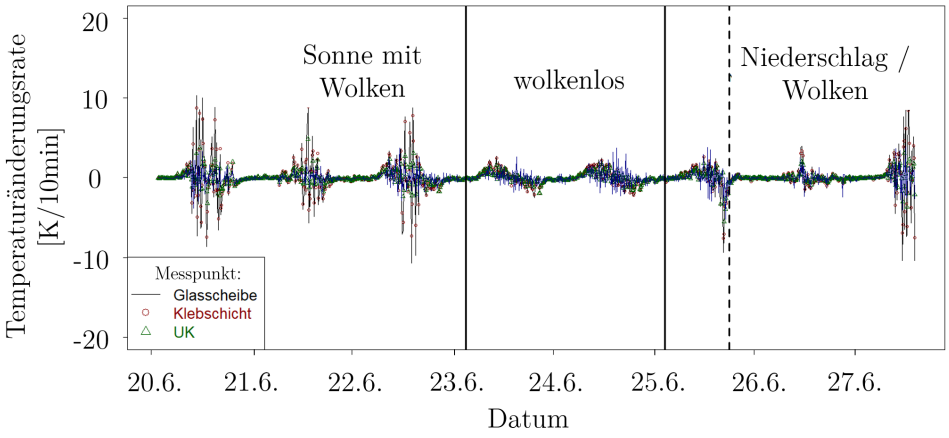


Abbildung 3.11: Abgleich der gemessenen Temperaturen in der Klebschicht und DWD-Daten des Niederschlags sowie der Windgeschwindigkeit während eines Sommergewitters am 25.06.2016 (Datenbasis: eigene Messung und DWD-Daten (204))

3.3.2.4.2 Tiefe Temperaturen mit Sonnenschein Die zweite hier erläuterte Tieftemperaturmessperiode ist gekennzeichnet von tiefen Lufttemperaturen mit Sonnenschein bei freiem Himmel. Die Messstelle in der Klebschicht erfasst hier eine minimale Temperatur von $T_{Klebschicht}$ = -14,02 °C um 7:33 Uhr. Diesem Minimalereignis geht wiederum eine Periode von mehreren Tagen voraus, in denen in den Nachtstunden jedes Tags stets ein neues Minimum der Temperatur gemessen werden kann (siehe Abbildung 3.17). Es ist zu beobachten, dass die Temperaturen an diesen Messstellen absolut gesehen niedriger liegen, jedoch hinsichtlich des Spitzenwertes der Temperaturerhöhung (siehe Abbildung 3.19) infolge der Strahlungseinwirkung ähnliche Werte erzielen wie in der Hochsommerperiode (siehe Abbildung 3.9). Aufgrund des kürzeren Sonnentages und des geringeren Sonnenstandes zu dieser Jahreszeit ist die zeitliche Dauer dieses Erwärmungsereignisses jedoch wesentlich kürzer. Die Messwerte sinken nach Beendigung der Strahlungseinwirkung sehr schnell ab, hierbei werden Temperaturänderungsraten auf Basis von Gleichung 3.6 von bis zu $\dot{T}$ = -5,2 K/10min an der Messstelle Klebschicht gemessen. Wiederum können, wie in den Sommernächten (siehe Abschnitt 3.3.2.2), in den klaren Nächten Temperaturen an den Messstellen des Halters erfasst werden, die um 2-3 K unterhalb der Lufttemperatur liegen (siehe Abbildung 3.9).

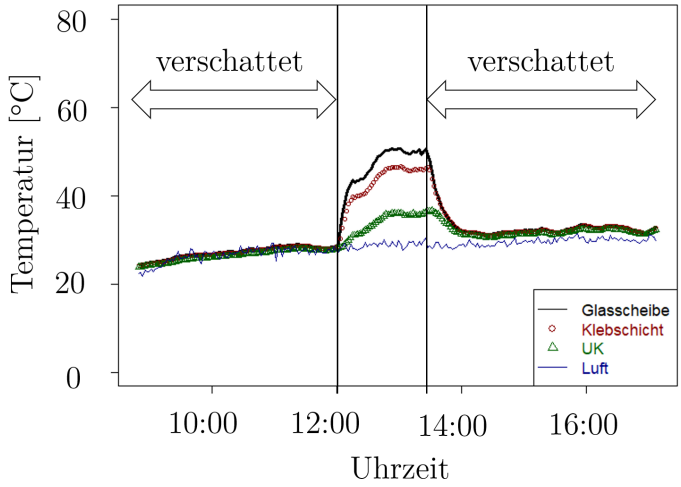


Abbildung 3.12: Gemessene Temperaturen im Verschattungsszenario am 3.8.2016

3.3.3 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse der Freiluftmessung

Es wurde mit Hilfe eines Freiluftmessstandes das In-situ-Temperaturverhalten einer geklebten Verbindung messtechnisch analysiert. Hierbei wurden die Temperaturveränderungen in einer Klebverbindung für Hoch- und Tieftemperaturereignisse gemessen.

- Es können im Rahmen der durchgeführten Messungen unter sommerlichen Bedingungen maximale Erwärmungsraten von +20 K/10min messtechnisch ermittelt werden. Diese stellten sich unter einem Verschattungsszenario ein, welches die Erwärmung der Verglasung, der Klebschicht sowie der Unterkonstruktion innerhalb weniger Minuten von Lufttemperatur auf Maximaltemperaturen zur Folge hatte. Demgegenüber kann unter freier Bestrahlung eine maximale Erwärmungsrate von bis zu +9,5 K/10min ermittelt werden. In (76) werden maximale Heizraten von Oberflächen unter Sonnenstrahlung von $\dot{T}$ = 8 K/min (entspricht 480 K/h) angegeben, über die Andauer der Erwärmung wird jedoch keine Angabe gemacht.
- In Abwesenheit von Strahlungseinwirkungen kann festgestellt werden, dass die Temperaturen an den Messstellen Glas, Klebschicht und Halter nahe den Werten der gemessenen Lufttemperatur liegen.

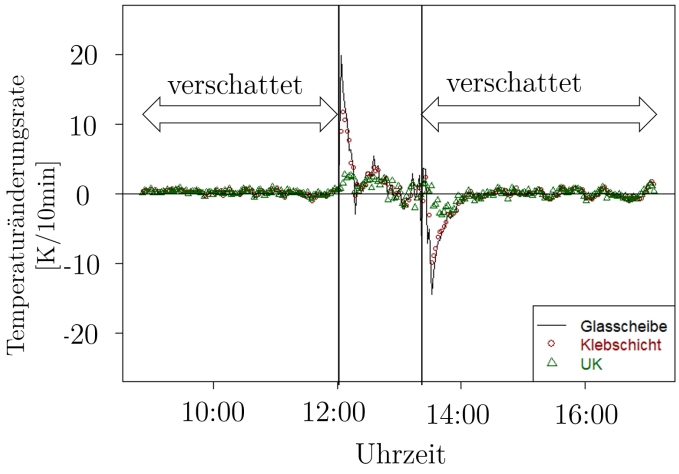


Abbildung 3.13: Verlauf der zu Abbildung 3.12 gehörigen Temperaturänderungsrate im Verschattungsszenario am 3.8.2016

- Niedrigtemperaturereignisse in der Klebschicht können in Zeitperioden mit konstant niedriger Lufttemperatur ermittelt werden. Die geringste messtechnisch erfasste Temperatur beträgt T = -14,28 °C und ist innerhalb von 78,9 Stunden entstanden. Die zeitweise Erwärmung durch Strahlungstagesgänge hatte keinen nachhaltigen Einfluss auf diese Temperaturentwicklung in der Klebschicht.
- Die Spitzentemperaturereignisse können an Tagen mit hoher Lufttemperatur in Kombination mit Strahlungseinwirkungen und günstigen Einstrahlwinkeln gemessen werden.

Die Erkenntnisse bilden die Basis zum Verständnis des Verhaltens der Klebverbindung für das untersuchte System und die damit verbundenen bauphysikalischen Charakteristika ab. Insbesondere für komplexe Fassadenverglasungen unter Anwendung von Isolierverglasungen kann mit Abweichungen hinsichtlich der zeitlichen Abläufe gerechnet werden.

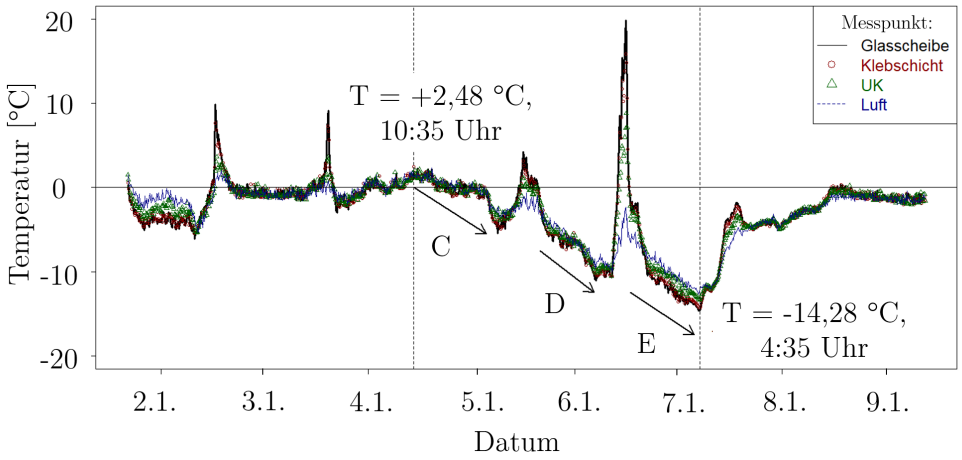


Abbildung 3.14: Gemessene Temperaturen an den Messstellen Glas, Klebschicht, Halter (UK) und Luft (Winterperiode mit Bewölkung)

3.4 Analyse der Wirkungsdauer klimatischer Einwirkungsparameter

3.4.1 Methodische Vorgehensweise und Datenbasis

Im Rahmen der Freiluftmessungen wurde messtechnisch festgestellt, dass Temperaturen unterhalb der Extremwerte über längere Zeiträume einwirken können. In diesem Abschnitt wird daher analysiert, wie lange klimatische Lastgrößen in Abhängigkeit von ihrer Höhe typischerweise wirken können.
Zur Analyse dieser Wirkungsdauer wird eine Zählung der konsekutiven Überschreitung bestimmter Einwirkungsniveaus durchgeführt, die durch Klassengrenzen definiert werden. Dies orientiert sich vom Aufbau an dem einparametrischen Zählverfahren der Klassengrenzenüberschreitung aus dem Bereich der Betriebsfestigkeit (141). Für diese Analyse wird ein modulares Scriptsystem entwickelt und programmiert. Das Kernelement ist hier ein Zählalgorithmus. Hierzu wird die Scriptsprache R (167) verwendet. Die hierfür verwendeten Datensätze sowie die Funktionsweise des Zählalgorithmus werden nachfolgend beschrieben.

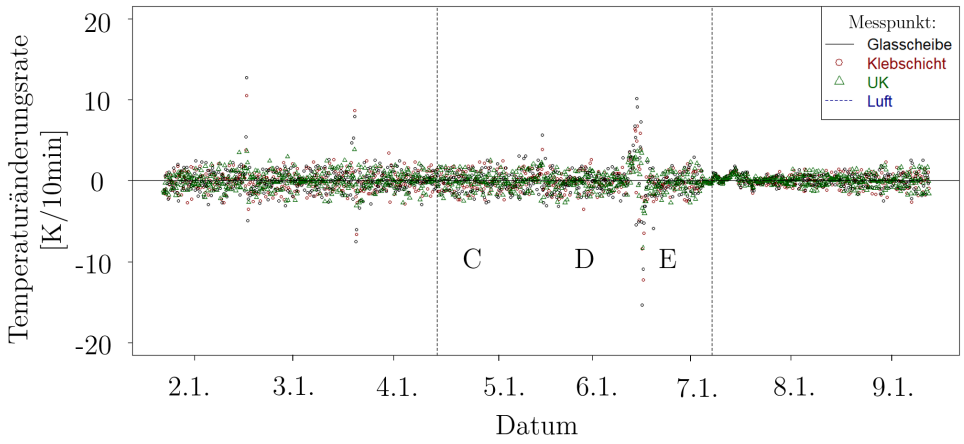


Abbildung 3.15: Verlauf der zu Abbildung 3.14 gehörigen Temperaturänderungsrate auf Basis von Gleichung 3.5 (Winterperiode mit Bewölkung)

3.4.1.1 Datenbasis des Deutschen Wetterdienstes

Die im Rahmen der Datenanalyse verwendeten Klimaelemente sind in Tabelle 3.3 wiedergegeben.

Tabelle 3.3: Verwendete Klimaelemente des DWD zur Analyse der Wirkungsdauer

Einwirkung	Klimaelement	Auflösung	Einheit
Lufttemperatur	Mittelwert der Lufttemperatur	Tageswert	°C
Lufttemperatur	Mittelwert der Lufttemperatur	Stundenwert	°C
Luftdruck	Tagesmittel Luftdruck	Tagesmittel	hPa
rel. Luftfeuchte	Tagesmittel	Tagesmittel	%

Die Daten wurden nach meteorologischen Standards in Wetterstationen des DWD erfasst. Die im Rahmen der Auswertung berücksichtigten Stationen werden mit Angabe des Standortes und der Bezugszeiträume tabellarisch wiedergegeben (Tabelle 3.4). Die Daten wurden am 3.7.2015 vom Climate Data Center (204) des DWD heruntergeladen. Nicht alle Standorte konnten aufgrund der unterschiedlichen Datenbasis für

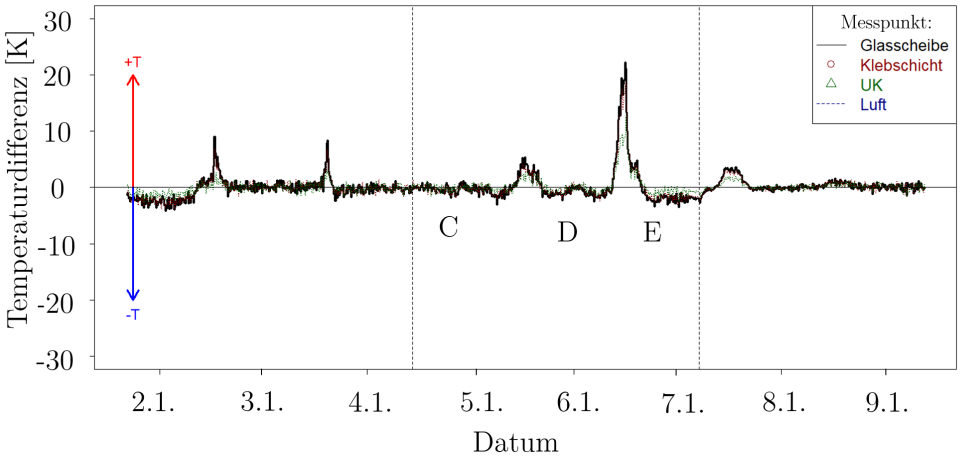


Abbildung 3.16: Differenz der Temperatur an den drei Messstellen Glas, Klebschicht und Halter gegenüber dem Referenzwert Lufttemperatur nach Gleichung 3.6 (Winterperiode mit Bewölkung)

alle Untersuchungen genutzt werden. Die für den jeweiligen klimatischen Parameter genutzten Standorte sind in den folgenden Abschnitten eigens beschrieben. Die Messzeiträume der Stundenwerte der Lufttemperatur sind im Anhang dokumentiert.

3.4.1.2 Entwicklung eines Zählalgorithmus

Für die Analyse der Datensätze wird ein Zählalgorithmus entwickelt. Die Vorgehensweise wird nachfolgend beschrieben. Zunächst werden die Datensätze im Textformat durch ein Modul eingelesen und einem standortabhängigen Datensatz zugewiesen. Das Organisationsschema dieser Daten ist in Tabelle 3.5 dargestellt. Hierbei repräsentiert x_i ein Element der Spalte $\vec{x_i}$ eines klimatischen Parameters.

Diese Datenreihe wird mit Hilfe des Zählalgorithmus untersucht und die Ergebnisse werden mit Hilfe einer Matrix c_{ij} gespeichert. Der Aufbau der Datenmatrix c_{ij} ergibt sich aus den Elementen $x_{i=1,\ldots,n}$, wobei n das jeweilig letzte Element darstellt sowie die Anzahl der definierten Klassengrenzen j. Diese sind in einem Vektor $\vec{k_j}$ organisiert. Aus der Länge des Vektors $\vec{k_j}$ ergibt sich die Spaltenanzahl j. Für jede Spalte j wird

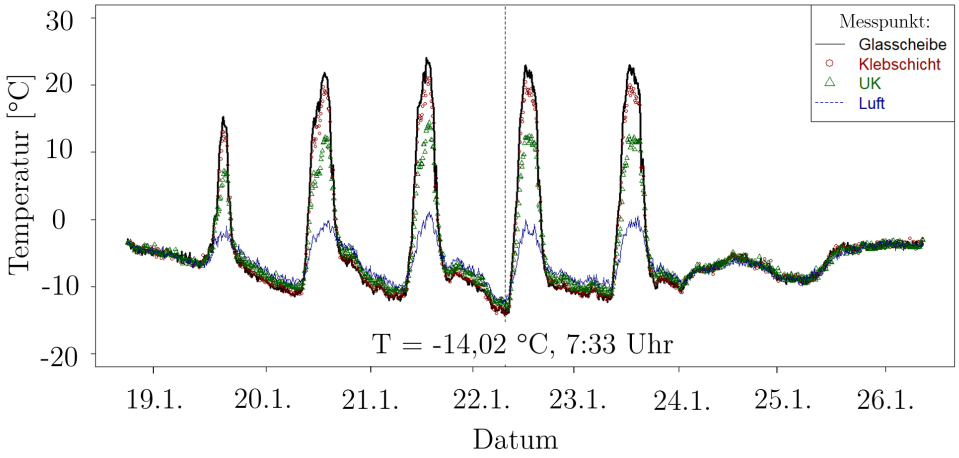


Abbildung 3.17: Gemessene Temperaturen an den Messstellen Glas, Klebschicht, Halter (UK) und Luft (Winterperiode mit Sonnenschein)

eine logische Abfrage des Momentanwertes über alle Elemente x_i nach der Bedingung 3.7 durchgeführt.

$$x_i > k_j \tag{3.7}$$

Die Wahl des mathematischen Operators kann hierbei für jedes Element k_j frei gewählt werden. Diese orientiert sich an der jeweiligen Klassengrenze j und testet auf Wahr oder Falsch. Ist das Kriterium Wahr erfüllt, wird die Variable c_{ij} jeweils um den Wert $+1$ erhöht. Ist das Kriterium Falsch, wird der Wert auf null gesetzt. Mit dieser Methodik können konsekutive Überschreitungen der Messwerte in Bezug zu den Klassengrenzen k_j erfasst werden. Die Länge der konsekutiven Überschreitungsdauer einer Klassengrenze j ergibt sich jetzt aus den lokalen Maxima der Werte in Spalte j der Ergebnismatrix c_{ij}. Diese wird in der Ergebnismatrix b_{ij} gespeichert. Der schematische Ablauf ist tabellarisch in 3.5 dargestellt. Hierbei hat der Klassenvektor nur ein Element $k_{j=2}$. Der Zählalgorithmus registriert daher alle Elemente $x_{i=1,\ldots,n}$, für die gilt $x_i > k_j = x_i > 2$.

3.4.1.3 Diskussion der gewählten Klassendefinition

Die Wahl der zur Anwendung kommenden Klassendefinition kann im vorliegenden Fall auf zwei Arten erfolgen, die unterschiedliche Ergebnisse liefern. Der Unterschied ist hierbei die Begrenzung der Klassengrenzen:

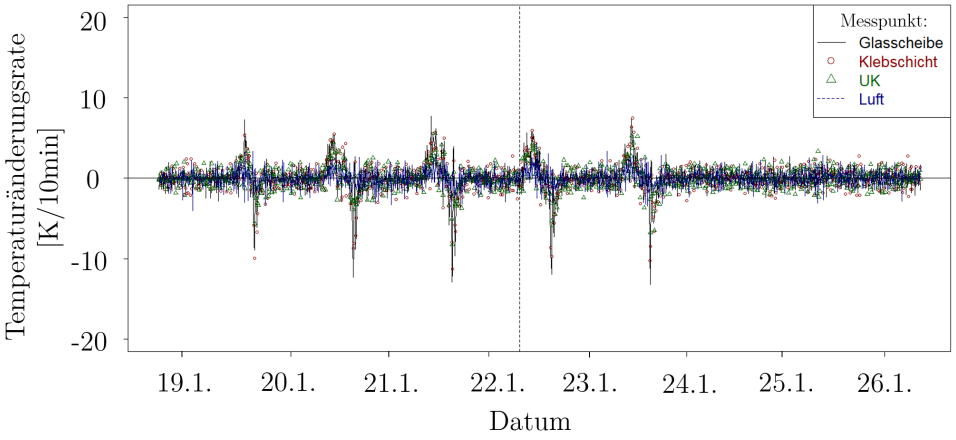


Abbildung 3.18: Verlauf der zu Abbildung 3.17 gehörigen Temperaturänderungsrate auf Basis von Gleichung 3.5 (Winterperiode mit Sonnenschein)

- geschlossene Klassengrenzen $k_j > x_i > k_{j+1}$: alle Werte **innerhalb**: WAHR
- offene Klassengrenzen $x_i > k_j$: alle Werte **oberhalb**: WAHR

Die Auswirkung dieser unterschiedlichen Klassendefinitionen auf die Ermittlung der Wirkungsdauer wird nachfolgend diskutiert.

- **geschlossene Klassen** Auf diese Weise können Andauern ermittelt werden, die nur innerhalb der Klassengrenze stattfinden. Dies führt dazu, dass wesentlich geringere Andauern mit höherer Häufigkeit ermittelt werden, da im Zuge der Tages- und Jahresgänge eine ständige Über- und Unterschreitung der Klassengrenzen der klimatischen Parameter stattfindet.
- **offene Klassen** Bei der Verwendung offener Klassen können mehrere Zähler parallel aktiviert werden, wenn das Kriterium erfüllt ist. Das bedeutet, offene Klassen können Werte anderer Klassen beinhalten. Als Beispiel, eine Temperaturandauer von über +20 $°C$ ist auch gleichzeitig eine Andauer von über +10 $°C$.

Es wurde aufgrund dieser Zusammenhänge mit offenen Klassengrenzen gearbeitet. Mit dem Ziel der Beurteilung eines kritischen Grenzzustandes der Wirkungsdauer wird dies auf der sicheren Seite liegend als die sinnvollere Vorgehensweise betrachtet. Das Prinzip wird nachfolgend anhand eines Beispiels erläutert.

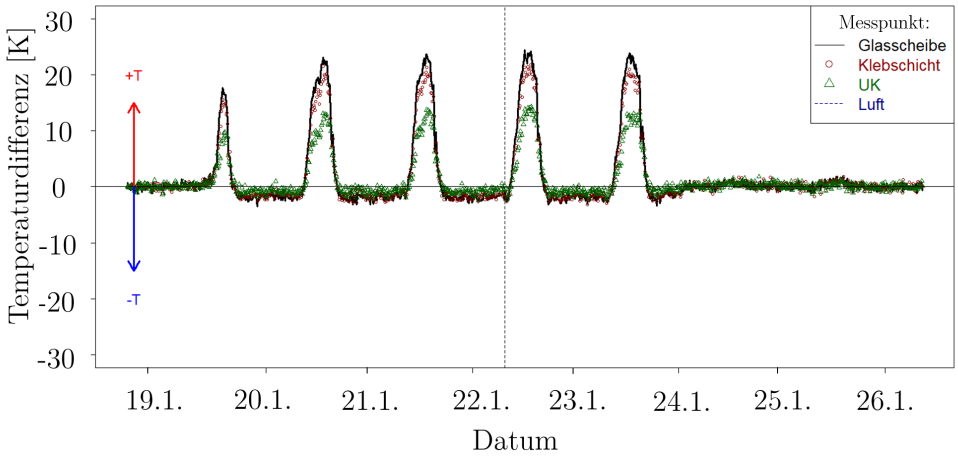


Abbildung 3.19: Differenz der Temperatur an den drei Messstellen Glas, Klebschicht und Halter (UK) gegenüber dem Referenzwert Lufttemperatur (tiefe Temperaturen mit Sonnenschein) nach Gleichung 3.6 (Winterperiode mit Sonnenschein)

3.4.1.4 Beispielzählung

Mit Hilfe eines Minimalbeispiels soll die Funktionsweise der Zählung nachfolgend an Realdaten weiter verdeutlicht werden. Hierzu wird der Verlauf der Lufttemperatur x_i (Tagesmittelwerte) über einen Zeitraum von 150 Tagen $(i = 1, ..., 150)$ betrachtet. Der Klassenvektor $k_{10,0,-10}$ enthält hier drei Elemente j. Die Zählmatrix ergibt sich hier mit drei Spalten $j = 1, 2, 3$ mit jeweils der Länge $i = 150$. In jeder Spalte wird für alle Elemente eine Abfrage nach folgendem Kriterium überprüft.

$$x_i < k_{10,0,-10} \tag{3.8}$$

Folglich werden konsekutive Unterschreitungen der jeweiligen Temperaturstufen gezählt. Das Ergebnis der unterschiedlichen Zähler sind in Abbildung 3.21 dargestellt. Aus dem Verlauf der Lufttemperatur ist ersichtlich, dass diese sich für 87 Tage hintereinanderliegend unterhalb der Klassengrenze j = 1 (T $< 10\ °C$) einstellt. Der Zähler steigt bis zu diesem Wert an. An Tag 88 wird die Klassengrenze überschritten, der Zähler wird auf den Wert 0 gesetzt, In Analogie ist eine konsekutive Überschreitung der Klassengrenze j = 2 (T $< 0\ °C$) für 33 Tage festzustellen. Hierfür sind der Beginn des Zählers sowie die Andauer markiert. Weitere Überschreitungen sind durch den Verlauf der Zählerwerte einsehbar. Die vorgestellte Methodik ist in dieser Form für verschiedene klimatische Parameter in separate Script-Module integriert, die einzeln

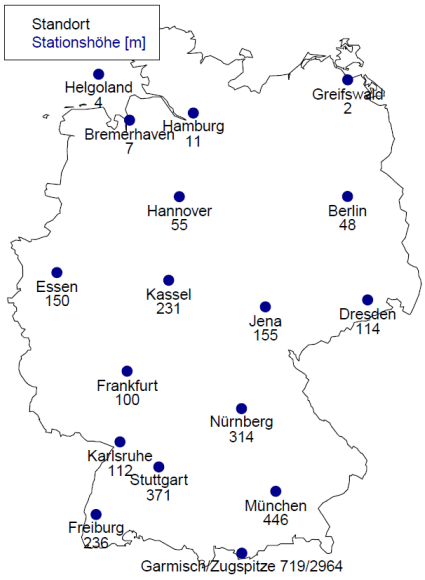


Abbildung 3.20: Darstellung der untersuchten Standorte (Quelle: eigene Darstellung)

auf die Hauptdatensätze zugreifen können, Fehlerroutinen zur Kontrolle der Abfragen hinsichtlich der Konsistenz und Homogenität der Datensätze sind hierbei identisch aufgebaut. Hierdurch soll ausgeschlossen werden, dass insbesondere die Sequenzanalyse zur Andauer verschiedener Ereignisse durch fehlende Messtage falsche Ergebnisse liefert. Darüber hinaus werden Zeiträume nicht berücksichtigt, die aufgrund von Umbaumaßnahmen oder Migration der Messgeräte keine Messwerte enthalten.

3.4.2 Wirkungsdauer von Lufttemperaturen

3.4.2.1 Ermittlung von Referenzdaten

Für die Beurteilung der maximalen Wirkungsdauer von Lufttemperaturen müssen Klassen und Referenzwerte definiert werden, welche als Ausgangswerte der Klassenzählung nach Abschnitt 3.4.1.2 dienen können. Die Referenzwertermittlung sowie die Klassenfestlegung geschehen in den nachfolgenden Abschnitten.

Tabelle 3.4: Stationsdaten der untersuchten Standorte (Klimadaten Tageswerte) (Quelle: DWD (204))

Bezeichnung Wetterstation	Messzeitraum	Stationshöhe
[-]	[-]	[m NHN]
München	17.05.1992 - 31.12.2013	446
Berlin	01.01.1948 - 31.12.2013	48
Essen-Bredeney	01.01.1935 - 31.12.2013	150
Bremerhaven	01.01.1949 - 31.12.2013	7
Stuttgart-Echterdingen	31.12.1953 - 31.12.2013	371
Frankfurt/Main	31.12.1949 - 31.12.2013	100
Jena	01.01.1824 - 31.12.2013	155
Karlsruhe	01.01.1876 - 31.12.2013	112
Freiburg	01.05.1949 - 31.12.2013	236
Nürnberg	01.01.1955 - 31.12.2013	314
Hamburg	01.01.1891 - 31.12.2013	11
Greifswald	01.03.1898 - 31.12.2013	2
Garmisch-Partenkirchen	01.01.1876 - 31.12.2013	719
Dresden	01.01.1949 - 31.12.2013	114
Hannover	01.01.1936 - 31.12.2013	55
Kassel	01.01.1951 - 31.12.2013	237
Helgoland	01.05.1952 - 31.12.2013	4

3.4.2.1.1 Jahresgang der Lufttemperatur Zunächst wird die jahreszeitliche Veränderung der Lufttemperatur für den Standort Berlin-Tempelhof analysiert. Hierzu werden die Daten nach dem Organisationsschema in Tabelle 3.6 angeordnet.

Auf Basis dieser Organisation wird zunächst für alle Stunden (1 bis 8784) ein Mittelwert $\overline{x}_i$ der Lufttemperatur auf Basis aller Jahre des Datensatzes berechnet. In Ergänzung dazu werden der maximale wie auch der minimale Wert jeder Jahresstunde ermittelt. Die Verläufe dieser Werte sind in Abbildung 3.22 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die mittlere Temperatur jeweils in ähnlichen Anteilen durch den Verlauf des Mittelwertes über- und unterschritten wird.

Tabelle 3.5: Schema der Datenorganisation sowie der Ermittlung der Dauer am Beispiel einer Klassengrenze von $x_i > 2$

DWD-Datensatz			Skriptvariablen	
Index i	**Datum**	**Parameter** x_i	**Variable** c_{i1}	**Variable** b_{i1}
-	**[dd.mm.yyyy]**	**[hPa]**	**[-]**	**[-]**
1	01.01.1948	00	0	0
2	02.01.1948	03	1	0
3	03.01.1948	03	2	0
4	04.01.1948	07	3	0
5	04.01.1948	02	4	4
6	04.01.1948	06	0	0
7	04.01.1948	03	0	0

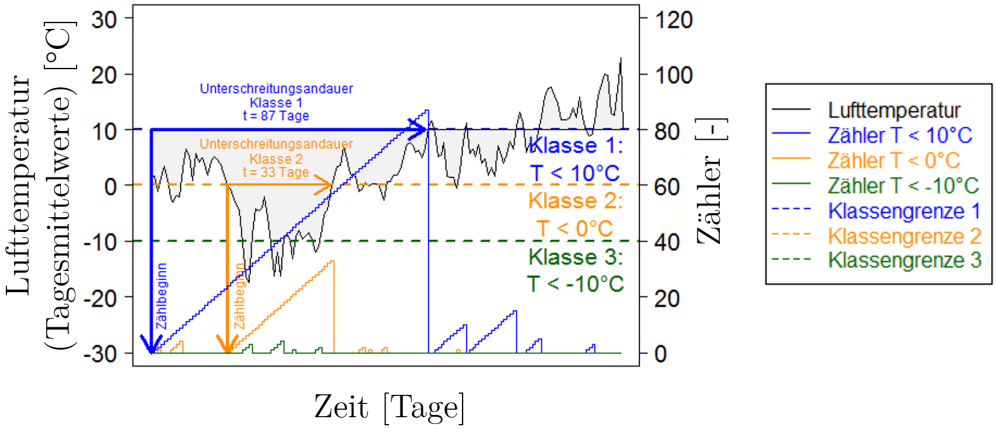


Abbildung 3.21: Schematische Darstellung des Prinzips der Folgezählung anhand von Messwerten und der jeweiligen Zählerwerte dreier unterschiedlicher Klassengrenzen (Quelle: eigene Darstellung)

3.4.2.1.2 Analyse der Standortabhängigkeit der mittleren Lufttemperatur Zur Festlegung eines Referenzniveaus für die Einteilung von Klassengrenzen zur Bestimmung der Wirkungsdauer wird die Temperaturverteilung für verschiedene Standorte in Deutschland nach Tabelle 3.4 analysiert. Es werden hier zunächst folgende Werte der Lufttemperatur $T_{m,Stunde}$ für jeden Standort bestimmt:

Diese Ergebnisse sind in Tabelle 3.8 tabellarisch dargestellt. In Ergänzung zu den hier ermittelten Werten ist die Verteilung der Daten standortabhängig als Boxplot in

Tabelle 3.6: Schema der Datenorganisation für die Stundenmittelwerte

Nummer i	Parameter x	Inhalt Datensatz
[-]	[°C]	[hh-dd.mm.yyyy]
1	$T_{m,Stunde}$	00-01.01.1948, 00-01.01.1949,...
2	$T_{m,Stunde}$	01-01.01.1948, 01-01.01.1949,...
...	$T_{m,Stunde}$	...
8784	$T_{m,Stunde}$	23-31.12.1948, 23-31.12.1949,...

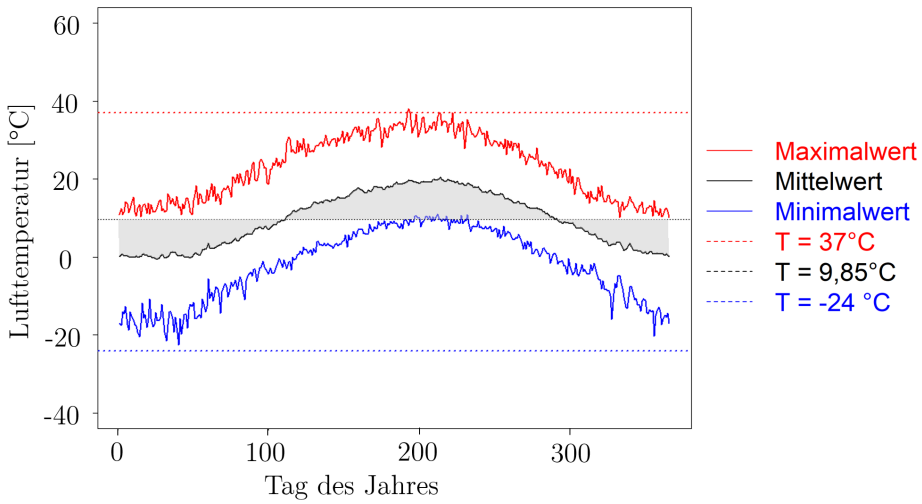
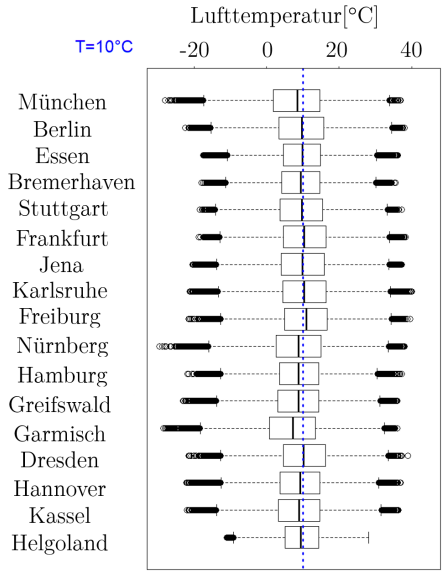


Abbildung 3.22: Jahresgang der Minimal-, Maximal- und der Mittelwerte der Lufttemperatur Berlin-Tempelhof (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

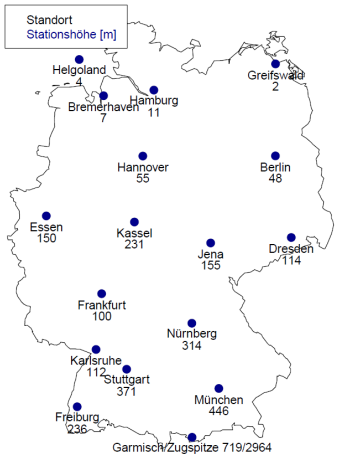
Abbildung 3.23 zu sehen. Die Maximal- und Minimalwerte liegen hierbei für alle Standorte außerhalb des 0,98-Quantils (bzw. 0,02-Quantils) der Jahresextremwerte. Für die weiteren Betrachtungen wird auf Basis dieser Ergebnisse als Referenztemperatur die Temperatur T_0 = +10 °C in Anlehnung an (57) verwendet. Die Wahl dieses Wertes wird als gemeinsamer Referenzwert aller Standorte zur Auswertung von Wirkungsdauern der Lufttemperatur als plausibel angesehen. Die größten Abweichungen zu diesem Wert treten am Standort Garmisch ($\tilde{x}$ = 7,2 °C) auf.

Tabelle 3.7: Standortabhängig ermittelte Parameter

Parameter	Beschreibung
Minimalwert	geringster Messwert des Datensatzes
Maximalwert	größter Messwert des Datensatzes
Q(0,02)	0,02-Quantil der minimalen Jahresextremwerte (quantile-Funktion (167), Typ 4 (163))
Q(0,98)	0,98-Quantil der maximalen Jahresextremwerte (quantile-Funktion (167), Typ 4 (163))
Median	Median der Lufttemperatur



(a) Boxplot der mittleren Lufttemperatur $T_{m,Stunde}$ (Mittelungsintervall Stunde)



(b) untersuchte Standorte

Abbildung 3.23: Standortabhängige Verteilung der Lufttemperatur (Mittelungsintervall Stunde, Datenbasis DWD) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

Tabelle 3.8: Ermittelte Extremwerte der Lufttemperatur für verschiedene Standorte (Stundenmittelwerte) (Datenbasis: DWD (204))

Standort	minimale Temperatur $T_{m,Stunde}$	Q(0,02) $T_{m,Stunde}$	**Median** $T_{m,Stunde}$	Q(0,98) $T_{m,Stunde}$	maximale Temperatur $T_{m,Stunde}$
[-]	$[°C]$	$[°C]$	**$[°C]$**	$[°C]$	$[°C]$
München-Flughafen	-28,1	-25,45	**8,4**	+35,78	+37,0
Berlin-Tempelhof	-22,5	-20,48	**9,7**	+37,46	+38,1
Essen-Bredeney	-17,5	-16,85	**9,8**	+35,81	+36,2
Bremerhaven	-18,0	-16,16	**9,4**	+34,47	+35,6
Stuttgart-Echterdingen	-18,4	-18,14	**9,7**	+36,16	+37,3
Frankfurt/Main	-18,8	-17,94	**10,4**	+37,74	+38,4
Jena	-20,5	-20,43	**9,9**	+37,16	+37,2
Karlsruhe	-21,2	-19,52	**10,4**	+38,38	+40,1
Freiburg	-21,6	-18,29	**11,0**	+37,95	+39,6
Nürnberg	-29,6	-24,54	**8,8**	+37,80	+38,1
Hamburg	-21,9	-19,10	**8,8**	+35,79	+37,2
Greifswald	-23,1	-23,03	**8,8**	+35,97	+36,1
Garmisch-Partenkirchen	-28,6	-24,57	**7,2**	+35,27	+36,1
Dresden	-21,6	-21,47	**10,2**	+38,57	+39,0
Hannover	-22,2	-21,95	**9,2**	+35,93	+37,0
Kassel	-22,2	-19,60	**8,9**	+35,99	+36,3
Helgoland	-11,1	-10,40	**9,4**	+27,78	+28,1

3.4.2.1.3 Lufttemperaturänderungsrate Auf Basis der DWD-Daten kann als Maß für die Aufblendegeschwindigkeit der Temperaturlast die Temperaturänderungsrate $\dot{T}$ in Analogie zu der Vorgehensweise bei der Freiluftmessung bestimmt werden. Hier wurde der Differenzenquotient verwendet. Dies wird nachfolgend auf die DWD-Daten angewendet. Das Zeitintervall definiert sich hier durch das Mittelungsintervall der Messdaten. Das Ergebnis ist die Temperaturänderung pro Tag bzw. pro Stunde.

$$\dot{T}_{Stunde} = \frac{T_{i+1} - T_i}{t_{i+1} - t_i} = \frac{\Delta T}{Stunde} \tag{3.9}$$

Zunächst erfolgt eine Bestimmung der Messdatendifferenz, die durch das Mittelungsintervall (1 Stunde) als Temperaturänderungsrate $\dot{T}_{Stunde}$ interpretiert wird. Diese Werte werden tagesweise nach dem in Tabelle 3.9 dargestellten Schema organisiert. Für jedes Element werden die maximalen und die minimalen Werte sowie ein Mittelwert berechnet. Der Verlauf dieser Größen ist in Abbildung 3.24 dargestellt.

Tabelle 3.9: Schema der Datenorganisation für den Jahresgang

Nummer i	**Parameter x**	**Inhalt Datensatz**
[-]	$[°C]$	**[dd.mm.yyyy]**
1	$\dot{T}_{Stunde}$	01.01.1948, 01.01.1949,..., 01.01.2013
2	$\dot{T}_{Stunde}$	02.01.1948, 02.01.1949,..., 02.01.2013
...	$\dot{T}_{Stunde}$	„,
366	$\dot{T}_{Stunde}$	31.12.1948, 31.12.1949,..., 31.12.2013

Hieraus ist ersichtlich, dass die größten negativen Änderungen $-\dot{T}_{Stunde}$ in den Sommermonaten auftreten, dies wird mit dem Abkühlen infolge von sommerlichen Gewitterstürmen in Zusammenhang gebracht. Dieses Abfallen der Temperatur wird auch im Rahmen der Freiluftmessungen in Sommerperioden während des Sommergewitters in Abschnitt 3.3.2.2 messtechnisch beobachtet,
Für den Lastfall tiefe Temperaturen sind die Wintermonate relevant. Hierbei sind Werte von bis zu $\dot{T}_{Stunde}$ = -2,5 K/h und $\dot{T}_{Tag}$ = -10 K/d zu beobachten.

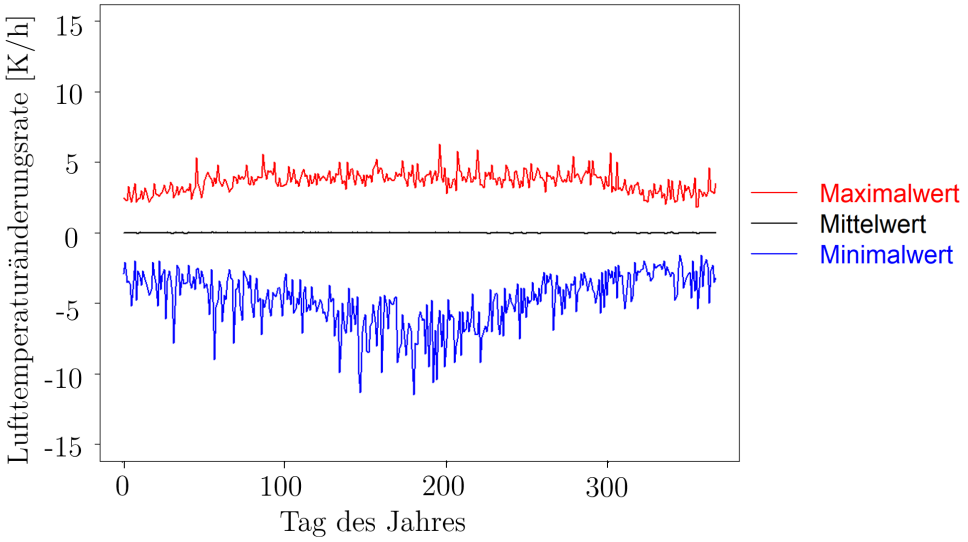


Abbildung 3.24: Jahresgang der maximalen und minimalen Änderungen der Lufttemperatur (Mittelungsintervall Stunde, Standort Berlin-Tempelhof) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

3.4.2.2 Bestimmung eines Wirkungsdauerkollektivs

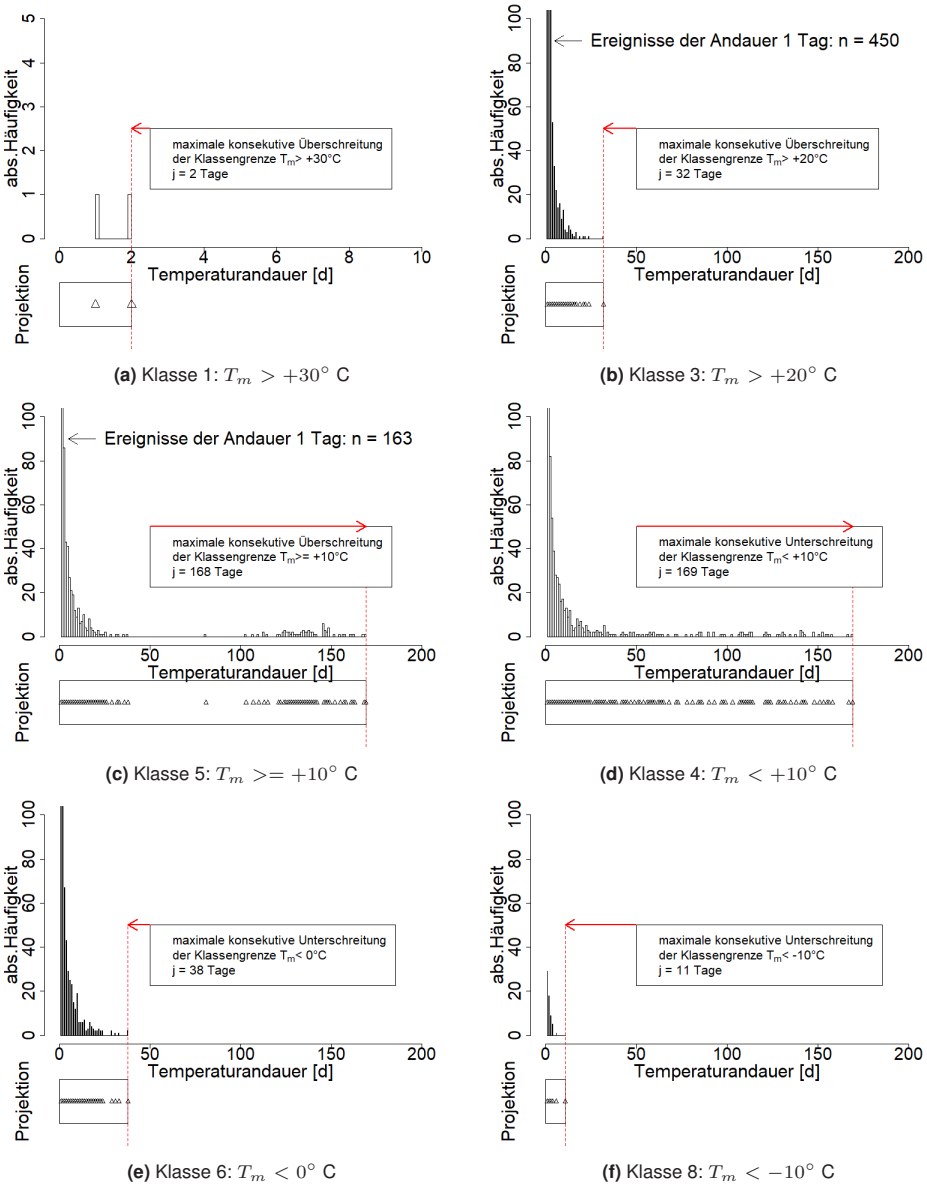
Für die Lufttemperatur wird einheitlich für alle Standorte als Basis der Betrachtungen zur mittleren Temperatur der Wert T_0 = 10 °C als Referenzwert verwendet. Für die konsekutive Abweichung von diesem Wert werden Klassen in Klassenbreiten von Δ T = 5 K eingeteilt. Diese teilen sich nach Tabelle 3.10 in Unter- und Überschreitungen des Referenzwertes in die Klassen 1 bis 13 auf und bilden die Elemente des Klassenvektors k_j für das Zählverfahren nach Abschnitt 3.4.1.2. Die Klassen sind in Tabelle 3.10 dargestellt.

Nachfolgend wird der Algorithmus zur Analyse der Andauer von Werten auf die Zeitreihen des DWD angewendet. In Abhängigkeit von jeder Klasse nach Tabelle 3.10 ergeben sich unterschiedliche Anzahlen von Andauereignissen der Temperatur. Nachfolgend sind für ausgewählte Klassen (Klasse 1, Klasse 3, Klasse 4, Klasse 5, Klasse 6, Klasse 8) die Ergebnisse dieser Analyse dargestellt (Abbildung 3.25). Dabei sind alle Einzelereignisse mit ihrer Häufigkeit dargestellt, die am Standort Berlin-Tempelhof für den untersuchten Zeitraum 01.01.1948 - 31.12.2013 ermittelt werden konnten.

Tabelle 3.10: Klasseneinteilung zur Analyse der konsekutiven Andauer von Lufttemperaturen

Klassenbezeichnung	Klassengrenzen
Klasse 1	$T_{m,Tag} > 35$ °C
Klasse 2	$T_{m,Tag} > 30$ °C
Klasse 3	$T_{m,Tag} > 25$ °C
Klasse 4	$T_{m,Tag} > 20$ °C
Klasse 5	$T_{m,Tag} > 15$ °C
Klasse 6	$T_{m,Tag} \geq 10$ °C
Klasse 7	$T_{m,Tag} < 10$ °C
Klasse 8	$T_{m,Tag} < 5$ °C
Klasse 9	$T_{m,Tag} < 0$ °C
Klasse 10	$T_{m,Tag} <$ -5 °C
Klasse 11	$T_{m,Tag} <$ -10 °C
Klasse 12	$T_{m,Tag} <$ -15 °C
Klasse 13	$T_{m,Tag} <$ -20 °C

Dargestellt sind die absolute Häufigkeit sowie die Andauer eines Ereignisses. Es ist ersichtlich, dass sich die Ereignishäufigkeit sowie die konsekutive Andauer bei hohen Abweichungen zur Referenztemperatur verringern (siehe Klasse 1: $T_{m,Tag} >$ +30 °C in Abbildung 3.25). Dieser Beobachtung gegenüber steigen die Häufigkeit wie auch die Andauer in Klassen an, die nahe an der Referenztemperatur liegen. Das wesentliche Ergebnis ist hierbei jeweils der Maximalwert jeder Klasse, die längste konsekutive Überschreitung der Klassengrenze in Tagen. Jede Klasse ist hierfür mit einer projektierten Darstellung der Ereignisse versehen (siehe Abbildung 3.25). In dieser Darstellungsform geht die Information der Häufigkeit verloren, es besteht jedoch immer noch der Bezug zu den jeweiligen Maximalereignissen. Auf Basis der Maximalereignisse jeder Klasse nach Darstellung 3.25 kann so ein Wirkungsdauerkollektiv erstellt werden. Hierzu werden die Ergebnisse der Klassenüberschreitung nach der Überschreitungsdauer sowie der jeweiligen Klassendefinition aufgetragen. Für den Standort Berlin-Tempelhof ist das Ergebnis dieser Vorgehensweise in Abbildung 3.26 dargestellt.



(a) Klasse 1: $T_m > +30^\circ$ C

(b) Klasse 3: $T_m > +20^\circ$ C

(c) Klasse 5: $T_m >= +10^\circ$ C

(d) Klasse 4: $T_m < +10^\circ$ C

(e) Klasse 6: $T_m < 0^\circ$ C

(f) Klasse 8: $T_m < -10^\circ$ C

Abbildung 3.25: Darstellung der ermittelten Klassenhäufigkeit ausgewählter Klassen am Beispiel Berlin-Tempelhof (Tagesmittelwerte) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

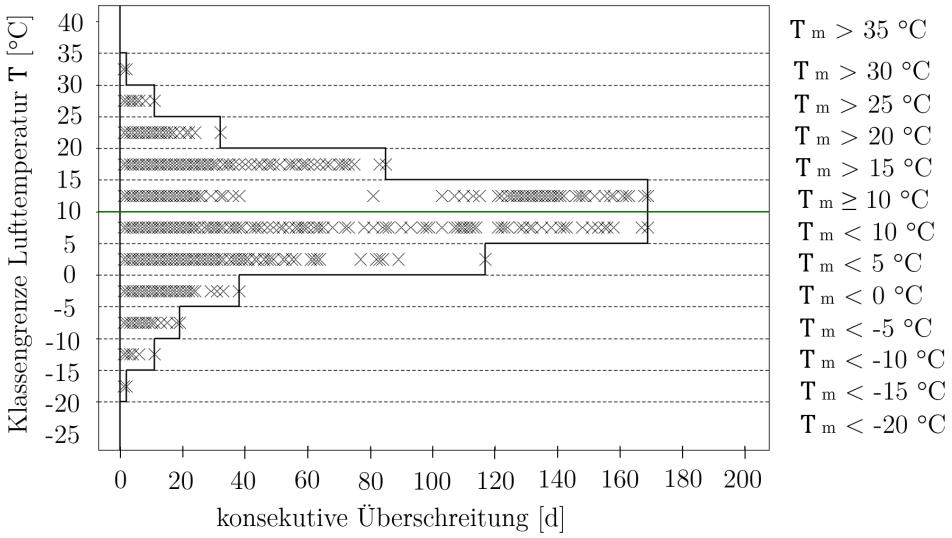


Abbildung 3.26: Wirkungsdauerkollektiv für Lufttemperaturen (Tagesmittelwerte, Berlin-Tempelhof) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

3.4.2.3 Anwendung der Methodik auf verschiedene Standorte in Deutschland

Die vorgestellte Vorgehensweise wird nachfolgend auf verschiedene Standorte in Deutschland nach Tabelle 3.4 angewendet. Die Klasseneinteilung erfolgt hier in Analogie zu Abschnitt 3.10. In Tabelle 3.11 sind die Ergebnisse dokumentiert. Hierbei sind die maximalen konsekutiven Tage der Überschreitung der definierten Klassengrenzen für verschiedene Standorte dargestellt. Hier kann festgestellt werden, dass Temperaturen in den Klassen 1-3 (Wirkungsdauer der Temperatur, die über der Referenztemperatur T_0 = +10 °C) in vergleichbarer Ausprägung bei allen Standorten auftreten. Die am Standort Berlin-Tempelhof festgestellte Wirkungsdauer von Lufttemperaturen im Tagesmittel über $T_{m,Tag} > 30$ °C wird jedoch nur bei wenigen Standorten erreicht. Die höchste konsekutive Wirkungsdauer von Lufttemperaturen des Kriteriums $T_{m,Tag} > 30$ °C kann für den Standort Freiburg mit drei aufeinanderfolgenden Tagen von über $T_{m,Tag} > 30$ °C bestimmt werden. Alle anderen Standorte liegen mit der Wirkungsdauer unter diesem Wert. Für die Klassen der Unterschreitung der Referenztemperatur (Klasse 4-5) könnten teilweise erhebliche Wirkungsdauern von bis zu 78 konsekutiven Tagen, welche die Bedingung $T_{m,Tag} < 0$ °C erfüllen, ermittelt werden. Für das Kriterium $T_{m,Tag} < -10$ °C reduzieren sich die maximalen Andauern auf 16 Tage für den Standort Jena. Aufeinanderfolgende Tieftemperaturen von kleiner als

$T_{m,Tag}$ < -20 °C werden für die untersuchten Standorte nur noch maximal 3 Tage hintereinander am Standort München sowie am Standort Jena erreicht (siehe Tabelle 3.11).
Die maximalen konsekutiven Überschreitungen jeder Klasse werden nachfolgend für alle Standorte in einem kombinierten Schaubild (Abbildung 3.27) dargestellt. Hierbei sind für alle untersuchten Standorte und Zeiträume die längsten konsekutiven Überschreitungen aller Klassengrenzen dargestellt.

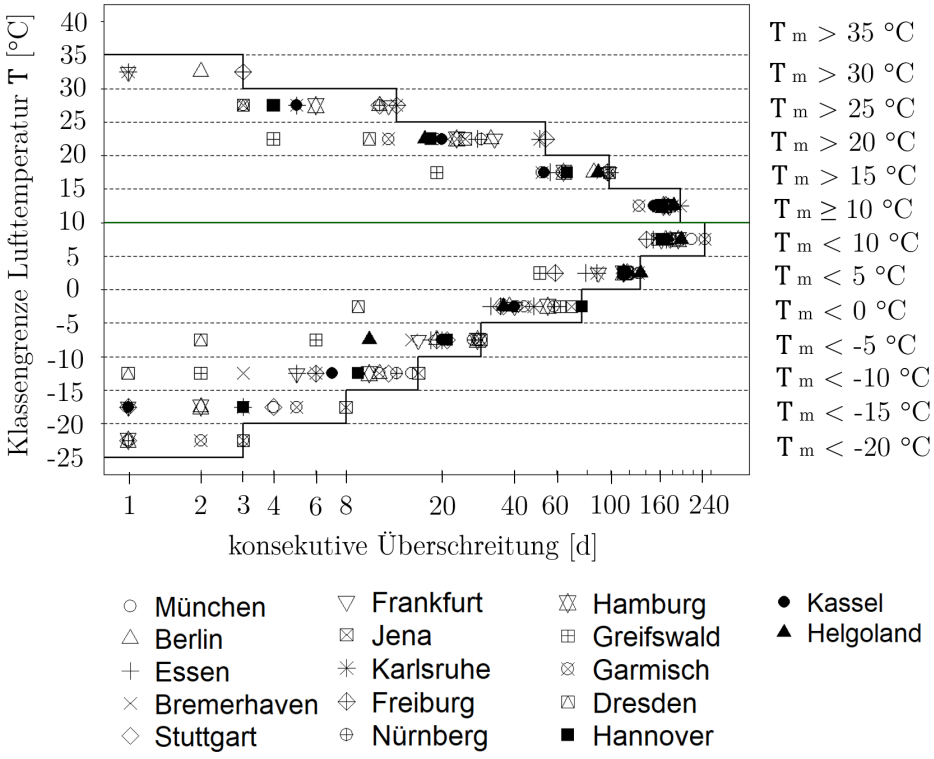


Abbildung 3.27: Wirkungsdauerkollektiv für die maximale konsekutive Überschreitung von Lufttemperaturen an den untersuchten Standorten in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

Tabelle 3.11: Konsekutive Über- und Unterschreitungstage ausgewählter Klassen für verschiedene Standorte in Deutschland (Tagesmittelwerte, Datenbasis: DWD (204))

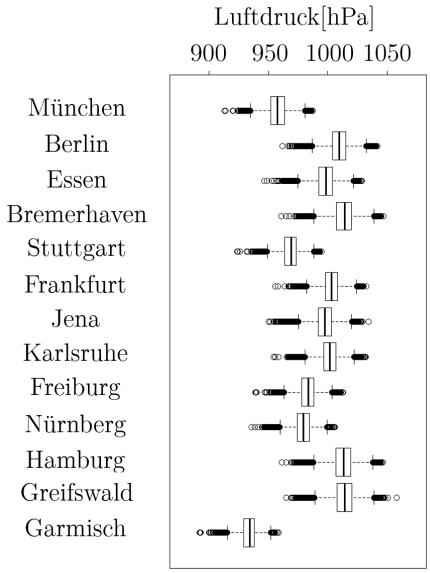
Klasse	1	2	3	4	5	6	7
Wetterstation	**$>$ +30 °C**	**$>$ +20 °C**	**$\geq$ +10 °C**	**$<$ +10 °C**	**$<$ 0 °C**	**$<$ -10 °C**	**$<$ -20 °C**
München-Flughafen	0	19	159	217	41	15	3
Berlin-Tempelhof	2	32	168	169	38	11	0
Essen-Bredeney	0	28	168	150	32	5	0
Bremerhaven	0	23	181	185	37	3	0
Stuttgart-Echterdingen	0	23	165	177	36	12	1
Frankfurt/Main	1	33	175	162	40	5	0
Jena	0	25	146	190	69	16	3
Karlsruhe	1	51	195	170	48	6	0
Freiburg	3	54	173	141	35	6	0
Nürnberg	0	33	175	162	40	5	0
Hamburg-Fuhlsbüttel	0	23	166	191	55	10	1
Greifswald	0	4	167	175	62	2	0
Garmisch-Partenkirchen	0	12	118	246	44	11	2
Dresden-Hosterwitz	0	10	165	157	9	1	0
Hannover	0	18	165	164	78	9	0
Kassel	0	20	150	171	40	7	0
Helgoland	0	17	183	196	17	0	0

3.4.3 Wirkungsdauer von Luftdruckabweichungen

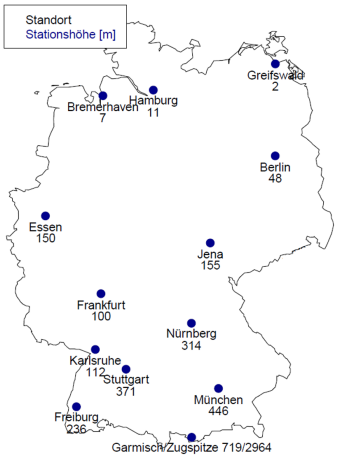
Neben der zeitlichen Veränderung der Lastgröße (= Aufblenderate der Last) ist die Wirkungsdauer von besonderem Interesse bei der Anwendung tragender Klebverbindungen im Fassadenbau. Hierzu wurde die Wirkungsdauer des Luftdrucks in Abhängigkeit von der Lasthöhe analysiert. Dies geschieht in Analogie zu der Vorgehensweise nach Abschnitt 3.4.1.2.

3.4.3.1 Ermittlung von Referenzdaten

Zur Analyse von Referenzdaten für den Luftdruck wurden Wetterdaten des deutschen Wetterdienstes verwendet. Hierbei werden 14 Stationen untersucht. Als Klimaparameter des DWD wird der Luftdruck auf Stationshöhe als Stunden- und Tagesmittelwert verwendet. Die Daten liegen in Hektopascal (hPa) vor und unterscheiden sich hinsichtlich des Medians wie auch der Verteilung in Abhängigkeit von der Standorthöhe. So ist erwartungsgemäß ersichtlich, dass küstennahe Standorte (z.B. Greifswald, Helgoland) eine höhere Belastung infolge der Luftsäule erfahren als Standorte in höheren Lagen. Dies ist unter Verwendung einer Boxplot-Darstellung in Abhängigkeit vom Standort in Abbildung 3.28 dargestellt.



(a) Boxplot des Luftdrucks $p_{met,Tag}$



(b) untersuchte Standorte

Abbildung 3.28: Luftdruckverteilung für verschiedene Standorte in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

Für die Beurteilung der Verteilung der Daten mit dem Ziel der Analyse charakteristischer Werte erfolgt zunächst eine Umrechnung der Einheiten von $[hPA]$ in $[kN/m^2]$ für alle Standorte. Für die Berechnung der Luftdruckabweichung jedes Messwertes $\Delta p_{m,i}$ werden von allen Werten p_i die jeweiligen arithmetischen Mittelwerte des Luftdrucks p_{met} jedes Standortes subtrahiert. Als Ergebnis stehen standortabhängige Datensätze der Abweichung Δp_i in Abhängigkeit vom Messintervall zur Verfügung.

3.4.3.1.1 Saisonale Klassifizierung des charakteristischen Luftdrucks Es kann ein Jahresgang mit ausgeprägten Unterschieden zwischen Sommer und Winter für den Standort Berlin festgestellt werden (siehe Abbildung 3.29). Dies ist auch normativ im Rahmen der (47) berücksichtigt. In (95) wird zudem von einem Tagesgang mit zwei Wendepunkten berichtet. Die Bestimmung von charakteristischen Werten

Tabelle 3.12: Einteilung in Sommer- und Wintermonate

Periode	Monate	Zeitraum
Sommer	April, Mai, Juni, Juli, August, September	1. April bis 30. September
Winter	Oktober, November, Dezember, Januar, Februar, März	1. Oktober bis 31 .März

orientiert sich an der Vorgehensweise nach (52). Für den Luftdruck liegen operative Grenzwerte vor, jedoch ist im Rahmen von (47) kein Bezug zur Eurocode-orientierten Lastmodellierung enthalten. Es wird daher eine Ermittlung dieser Größen auf Basis der vorgegebenen Wiederkehrperiode von 50 Jahren und einer Jahresextremwertstatistik durchgeführt. Der Vorteil der Jahresextremwertstatistik ist, dass sich die zu ermittelnden Zeiträume nach (52) aus den Datensätzen bestimmen lassen. Mit der Vorgabe einer Überschreitung in einem Bezugszeitraum t_{Bezug} von 50 Jahren ergibt sich die Wahrscheinlichkeit (103):

$$P(\Delta p_m > \Delta p_{m,charakteristisch}) = 1 - \frac{n}{t_{Bezug}} = 1 - \frac{1}{50} = 0,98 \qquad (3.10)$$

Diese Vorgehensweise kann für Sommer- und Winterperioden übernommen werden. Der Bezugszeitraum t_{Bezug} bezieht sich hierbei auf die jeweiligen Periodenextremwerte. Die Einteilung der Perioden erfolgt hier in Analogie zu der Unterscheidung saisonaler Einflüsse für die Bemessung von Isoliergläsern nach (47) (bzw. (83)) in Sommer und Winter (siehe Tabelle 3.12). Es werden folglich zwei separate Datensätze eingeteilt, die jeweils Messdaten für die Sommermonate sowie die Wintermonate beinhalten. Hierbei sind dargestellt die Schätzungen der empirischen Quantile (quantile-Funktion

(167), Typ 4 (163)) sowie der theoretischen Quantile (fitdistr-Funktion (167)) unter der Annahme normalverteilter Daten der Jahresextremwerte. Zur Überprüfung der Annahme einer Normalverteilung der Periodenextremwerte wird ein Shapiro-Wilk-Test (shapiro.test-Funktion (167)) durchgeführt. Mit diesem Test kann überprüft werden, ob eine Stichprobe normalverteilt ist. Das Testergebnis $p < 0{,}5$ bestätigt diese Annahme.

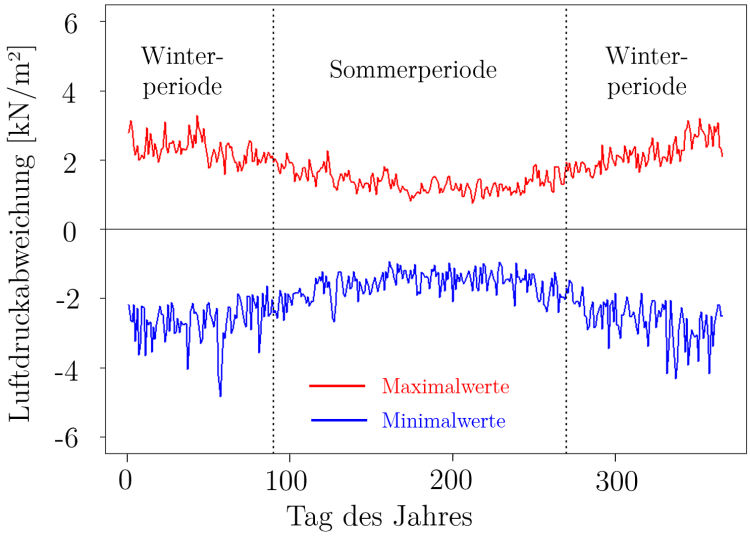


Abbildung 3.29: Ermittelter Jahresgang der minimalen und maximalen Werte der Luftdruckabweichung (Standort: Berlin-Tempelhof, Tagesmittelwerte) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

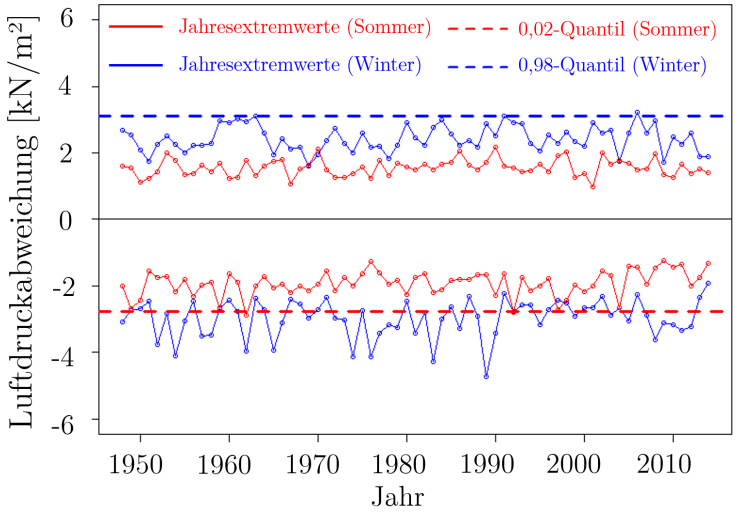


Abbildung 3.30: Ermittelte Jahresextremwerte der Winter- und Sommerperioden nach Tabelle 3.12
(Standort: Berlin-Tempelhof, Tagesmittelwerte)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

Tabelle 3.13: Periodenextremwerte der Luftdruckabweichung Δp_m (Tagesmittelwerte) für verschiedene Standorte in Deutschland (Datenbasis: DWD (204))

Ergebnisse	**Sommermonate**			**Wintermonate**		
Standorte	empirisch	**theoretisch**		empirisch	**theoretisch**	
	$Q(0,02)$	$Q(0,02)$	p-Wert	$Q(0,98)$	$Q(0,98)$	p-Wert
[-]	$[kN/m^2]$	$[kN/m^2]$	[-]	$[kN/m^2]$	$[kN/m^2]$	[-]
München-Flughafen	-2,58	-2,78	0,046	+2,85	+2,93	1,8e-05
Berlin-Tempelhof	-2,77	-2,69	0,05	+3,12	+3,22	0,33
Essen-Bredeney	-2,76	-2,80	0,16	+2,92	+2,89	0,22
Bremerhaven	-3,07	-2,97	0,04	+3,15	+3,29	0,66
Stuttgart-Echterdingen	-2,36	-2,53	0,38	+2,46	+2,46	0,37
Frankfurt/Main	-2,63	-2,60	0,48	+2,69	+2,71	0,59
Karlsruhe	-2,72	-2,59	0,01	+2,87	+2,75	0,02
Freiburg	-2,59	-2,65	0,43	+2,76	+2,68	0,0027
Nürnberg	-2,56	-2,53	0,58	+2,57	+2,54	0,22
Garmisch-Partenkirchen	-2,34	-2,39	0,86	+2,14	+2,21	0,37
Hannover	-2,81	-2,78	0,004	+3,05	+3,14	0,67
Kassel	-2,92	-2,94	0,61	+3,29	+3,22	0,44
Helgoland	-2,77	-2,96	0,23	+3,19	+3,32	0,94
Zugspitze	-2,21	-2,36	0,13	+1,79	+1,83	0,053

Hierbei ist auffallend, dass insbesondere die Q(0,98)-Werte in Sommerperioden in Tabelle 3.13 von den Angaben der (48) abweichen. Die Auswirkung dieser Abweichung kann jedoch nur im Gesamtkontext unter Zuhilfenahme der korrelierenden Temperatur zur Berechnung des daraus resultierenden Drucks beurteilt werden. Hier können weitere Untersuchungen ansetzen.

3.4.3.2 Bestimmung eines Wirkungsdauerkollektivs

Gegenüber der Klassifizierung in Sommer- und Winterperioden bei der Betrachtung der Maximalwerte nach geltenden Regelwerken (siehe Abschnitt 2) wird bei der Analyse der Wirkungsdauer der Luftdruckabweichung bewusst keine saisonale Klassifizierung durchgeführt. Dies begründet sich daraus, dass eine unveränderte Beurteilungsgrundlage geschaffen werden soll und sich der maßgebende Beanspruchungszustand erst infolge der Strahlungseinwirkung ergibt. Zur Darstellung der Lastwirkungsdauer in

Form eines Kollektivs wird zwischen negativen ($-\Delta p_m$) und positiven ($+\Delta p_m$) Druckänderungsperioden unterschieden. Der Referenzwert ist hierbei das Dauerlastniveau, der ständig wirkende mittlere Luftdruck. Die Klassen sind in Tabelle 3.14 dargestellt.

Tabelle 3.14: Einteilung der Klassengrenzen zur Analyse der konsekutiven Überschreitung von Luftdruckabweichungen

Klassenbezeichnung	Klassengrenzen
Klasse 1	$\Delta p_m > 5\ kN/m^2$
Klasse 2	$\Delta p_m > 4\ kN/m^2$
Klasse 3	$\Delta p_m > 3\ kN/m^2$
Klasse 4	$\Delta p_m > 2\ kN/m^2$
Klasse 5	$\Delta p_m > 1\ kN/m^2$
Klasse 6	$\Delta p_m \geq 0\ kN/m^2$
Klasse 7	$\Delta p_m < 0\ kN/m^2$
Klasse 8	$\Delta p_m < -1\ kN/m^2$
Klasse 9	$\Delta p_m < -2\ kN/m^2$
Klasse 10	$\Delta p_m < -3\ kN/m^2$
Klasse 11	$\Delta p_m < -4\ kN/m^2$
Klasse 12	$\Delta p_m < -5\ kN/m^2$

Die durch die Anwendung des Zählalgorithmus ermöglichte Überführung in Kollektivform ist in Abbildung 3.31 dargestellt. Sowohl die Höhe als auch die Wirkungsdauer ist für diese Lastgröße nicht symmetrisch. Das ist standortübergreifend feststellbar. So sind negative Abweichungen vom mittleren Luftdruck von unter -4 kN/m^2, die bis zu 3 Tage wirken, mit der hier angewandten Vorgehensweise ermittelbar. Demgegenüber sind maximale positive Abweichungen von über +3 kN/m^2 mit einer Dauer bis maximal 4 Tage identifizierbar.

3.4.4 Wirkungsdauer von Luftfeuchtigkeitsperioden

Für die Bewertung der unmittelbaren mechanischen Leistungseigenschaften von Klebverbindungen ist der Feuchtegehalt der Klebschicht ein entscheidender Parameter

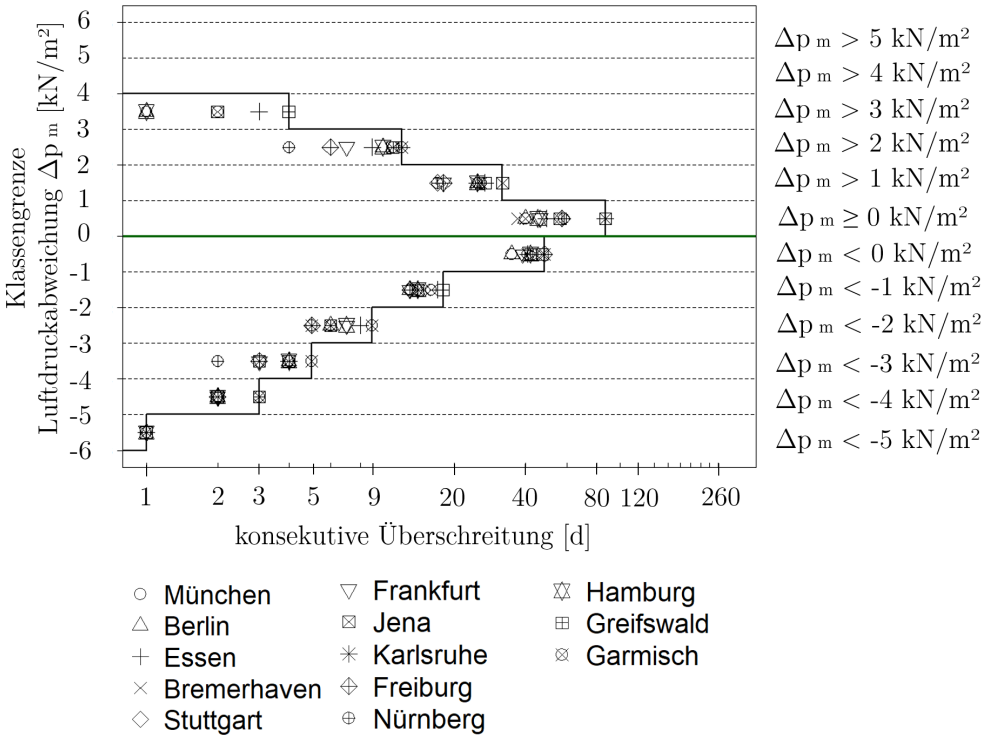


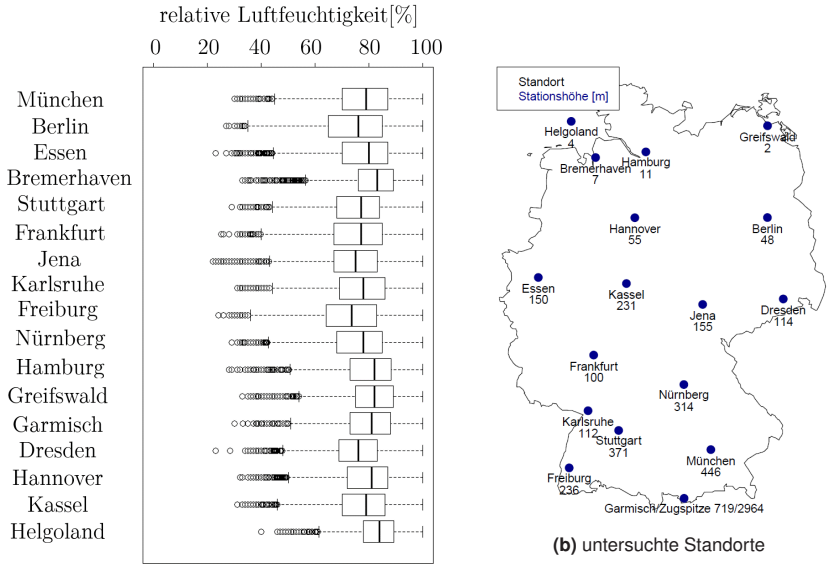
Abbildung 3.31: Wirkungsdauerkollektiv für die maximale konsekutive Überschreitung von Luftdruckabweichungen (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

((187), (132)). Es wird angenommen, dass die Expositionsdauer sowie die konstruktive Ausbildung der Klebfuge maßgebend den realen Feuchtegehalt der Klebfuge beeinflussen. Als Indikator für in der Realität zu berücksichtigende Expositionsdauern wird nachfolgend die Wirkungsdauer in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit untersucht.

3.4.4.1 Bestimmung von Referenzwerten

Die standortabhängige Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit ist in Abbildung 3.32 dargestellt. Gegenüber den vorher behandelten Parametern liegt bei der relativen Luftfeuchtigkeit ein Grenzwert (100 %) vor. Die Klasseneinteilung und die Referenzwertermittlung orientieren sich daher an diesem Wert. Hinsichtlich der jahreszeitlichen Veränderung (siehe Abbildung 3.33) ist ein Jahresgang mit Unterschieden zwischen

den Sommer- und Wintermonaten feststellbar. Dies ist exemplarisch für den Standort Berlin in Abbildung 3.33 dargestellt.



(a) Boxplot der relativen Luftfeuchtigkeit φ_m

(b) untersuchte Standorte

Abbildung 3.32: Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit für verschiedene Standorte in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

3.4.4.2 Bestimmung eines Wirkungsdauerkollektivs

Die Klasseneinteilung für die Bestimmung des Wirkungsdauerkollektivs erfolgt in 5%-Schritten. Hieraus resultieren 10 Klassen, beginnend vom gewählten Minimum ($\varphi_m > 50\ \%$, Klasse 10) bis zum Maximum ($\varphi_m > 95\ \%$, Klasse 1). Diese sind in Tabelle 3.15 dargestellt.

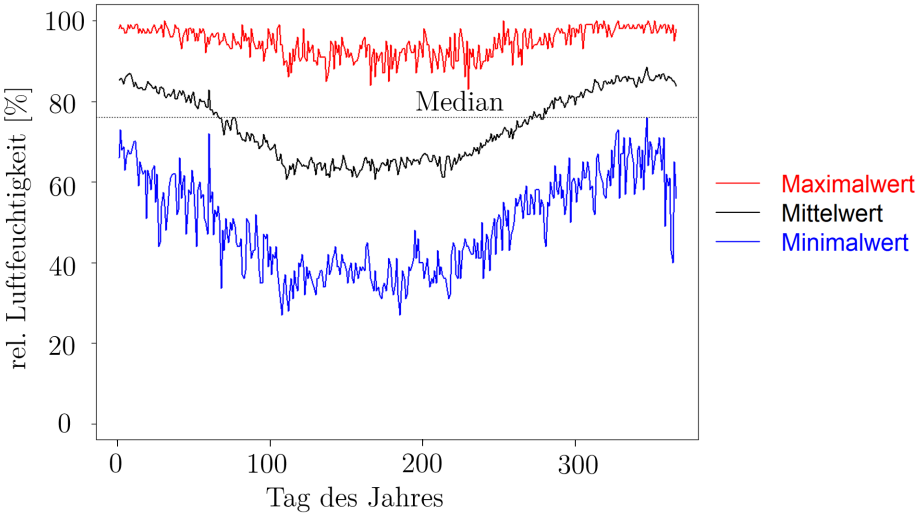


Abbildung 3.33: Jahresgang minimaler, mittlerer und maximaler relativer Luftfeuchtigkeiten (Tagesmittelwerte, Berlin-Tempelhof) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

Tabelle 3.15: Klasseneinteilung zur Analyse der konsekutiven Wirkungsdauer von Klassen der relativen Luftfeuchtigkeit

Klassenbezeichnung	Klassengrenzen
Klasse 1	$\varphi_m > 95\ \%$
Klasse 2	$\varphi_m > 90\ \%$
Klasse 3	$\varphi_m > 85\ \%$
Klasse 4	$\varphi_m > 80\ \%$
Klasse 5	$\varphi_m > 75\ \%$
Klasse 6	$\varphi_m > 70\ \%$
Klasse 7	$\varphi_m > 65\ \%$
Klasse 8	$\varphi_m > 60\ \%$
Klasse 9	$\varphi_m > 55\ \%$
Klasse 10	$\varphi_m > 50\ \%$

Unter Anwendung der in Abschnitt 3.4.1.2 beschriebenen Methodik kann das in Abbildung 3.34 dargestellte Wirkungsdauerkollektiv ermittelt werden. Konsekutive Tage der

relativen Luftfeuchtigkeit der Klasse 1 ($\varphi_m > 95\%$) wurden mit dieser Vorgehensweise maximal für 12 Tage am Standort Hannover ermittelt. In der Klasse 2 (Klassengrenze: $\varphi_m > 90\%$) steigt die maximale Wirkungsdauer auf bis zu 39 Tage am Standort Greifswald an.

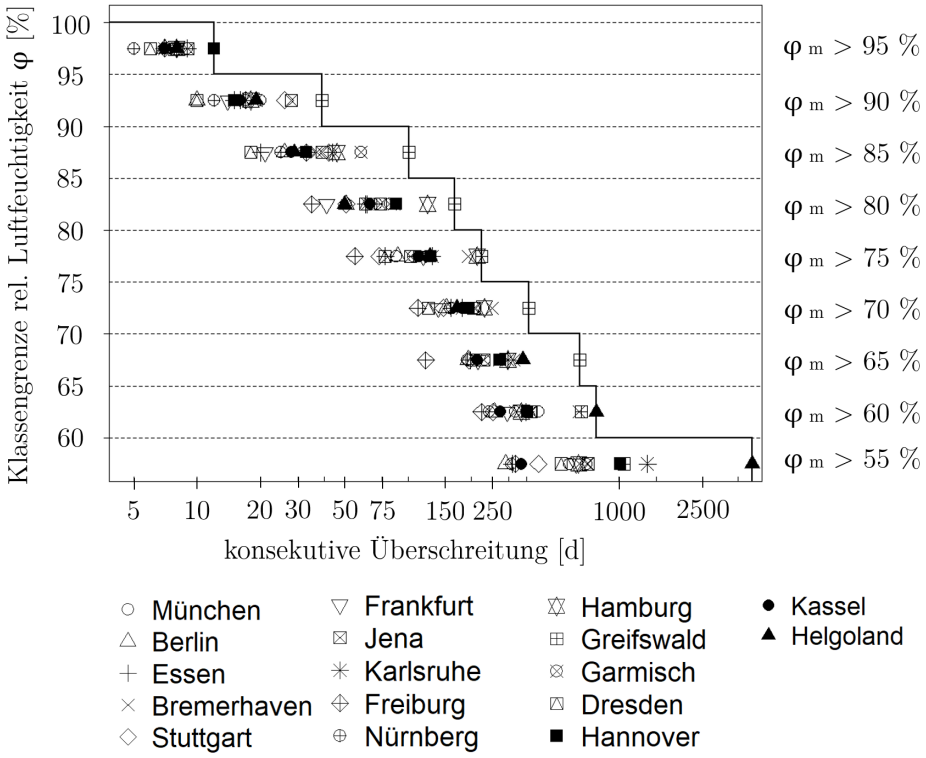


Abbildung 3.34: Wirkungsdauerkollektiv für die maximale konsekutive Überschreitungsandauer von Luftfeuchtigkeitsklassen für verschiedene Standorte in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

3.4.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Mit Hilfe eines Skriptsystems wurde die konsekutive Überschreitung von definierten Klassengrenzen für verschiedene klimatische Parameter untersucht. Dies geschah mit dem Ziel, eine Beurteilungsgrundlage zur Definition von Grenzzuständen für zeit- und

temperaturabhängige Werkstoffe in Multi-Material-Bauweisen unter dem Einfluss klimatischer Einwirkungen zu erhalten. Hierbei konnten die folgenden Ergebnisse erzielt werden:

- Die Wirkungsdauer von Lufttemperaturen liegt im Spitzenbereich der Hochtemperatur sowie der Tiefsttemperatur im Bereich von wenigen Stunden. Tieftemperaturen unter T = -10 °C konnten demgegenüber mit konsekutiven Wirkungsdauern von bis zu 20 Tagen ermittelt werden. Für geklebte Multi-Material-Konstruktionen, die keine Erwärmung im Tagesgang erfahren, wird dies als eine beträchtliche Zeitperiode angesehen. Auf dieser Basis muss kritisch hinterfragt werden, ob gegenwärtige Verfahren der Kennwertermittlung diese Randbedingung ausreichend berücksichtigen.
- Die Wirkungsdauer von positiven wie auch negativen Luftdruckabweichungen von $\pm 3\ kN/m^2$ zum mittleren Luftdruck liegt im Zeitbereich von bis zu 5 Tagen, Spitzenereignisse in einem geringeren Zeitbereich von 1-4 Tagen. Hier muss insbesondere die zeitliche Überlagerung mit der Erwärmung infolge Strahlungseinwirkung zur Beurteilung der Beanspruchung herangezogen werden.
- Für die Andauer der Spitzenwerte $\varphi > 95\ \%$ der relativen Luftfeuchtigkeit konnten in Abschnitt 3.4.4 Wirkungsdauern von bis zu 12 Tagen einer konsekutiven Überschreitung ermittelt werden.

3.5 Analyse der Wirkungsdauer der Bauteiltemperatur

3.5.1 Ausgangssituation

Nachfolgend wird die Wirkungsdauer der Bauteiltemperatur, das heißt die Temperatur in einer Klebverbindung im Fassadenbau, diskutiert.
Auf Grundlage der Ergebnisse der Freiluftmessungen in Abschnitt 3.3 und der Betrachtungen zur Wirkungsdauer der Lufttemperatur in Abschnitt 3.4.2 können hierfür folgende Randbedingungen angenommen werden:

- In Zeitperioden ohne Strahlungseinwirkung nimmt die Bauteiltemperatur die Lufttemperatur an. Dies kann messtechnisch durch die Ergebnisse der durchgeführten Freiluftmessungen gezeigt werden (siehe Abschnitt 3.3).

- Die mittlere Jahres-Lufttemperatur liegt für viele Standorte in Deutschland im Bereich um T = +10 °C. Dies ist ein Ergebnis der Analyse der Lufttemperaturen auf Basis von DWD-Daten (siehe Abschnitt 3.4).
- Für viele geklebte Verbindungen im Fassadenbau ist davon auszugehen, dass sie durch Strahlungseinwirkung eine direkte oder indirekte Erwärmung (z.B. durch Wärmeleitung) erfahren.

Für die Beurteilung der Bauteiltemperatur können auf Basis dieser Feststellungen zwei Arbeitshypothesen aufgestellt werden:

- **Höhe der mittleren Bauteiltemperatur** Zwischen den Fügepartnern kann infolge der unterschiedlichen Temperaturausdehnungskoeffizienten α eine Differenzdehnung entstehen. Diese Differenzdehnung wirkt dauerhaft, wenn die aus dem wiederkehrenden Jahresgang resultierende mittlere Bauteiltemperatur $T_{\infty,Bauteil}$ von einer Referenztemperatur T_0 (= Temperatur bei Montage) abweicht.

$$\Delta T_\infty = |T_0 - T_{\infty,Bauteil}| \tag{3.11}$$

- **Wirkungsdauer der hohen Bauteiltemperaturen** Nach (57) wird angenommen, dass hohe Bauteiltemperaturen aus der kombinierten Wirkung der maximalen Lufttemperatur sowie infolge der Strahlungseinwirkung auftreten. Die Wirkungsdauer der strahlungsinduzierten Erwärmung ist hierbei abhängig von der Ausrichtung der Konstruktion zur Sonne (siehe Abschnitt 3.3).

Beide Punkte können nicht ohne die Berücksichtigung der zeitlichen Veränderung der Strahlungseinwirkung sowie der Ausrichtung der Konstruktion geklärt werden.

3.5.2 Grundlagen zur effektiven Strahlungseinwirkung

Für die weitere Diskussion sowie die durchgeführte Grenzwertbetrachtung ist die Kenntnis der Grundlage der Strahlungseinwirkung und ihrer Veränderung infolge der Jahres- und Tageszeiten wichtig. Aus diesem Grund werden ausgewählte Grundlagen zu dieser Thematik nachfolgend beschrieben.
Die dargestellten Zusammenhänge sind angelehnt an die Formelwerke aus (93) und stellen teilweise praktische Approximationen der realen Zusammenhänge dar (166). Für die im vorliegenden Fall durchgeführten Grenzwertbetrachtungen dienen die Grundlagen zur Darstellung der wesentlichen Zusammenhänge.

Für Hintergrundinformationen sei auf (166) verwiesen.
Neben den bauphysikalischen Parametern ist die Erwärmung der geklebten Konstruktion abhängig von der effektiven Bestrahlungsstärke $E_{eff,V}$. Diese kann nach (166) analytisch auf Basis der Globalstrahlungsstärke E_{glob} auf eine horizontale Fläche bestimmt werden. Diese wird infolge einer Scheibenneigung cos Θ_s sowie der Veränderung der Ausrichtung zu verschiedenen Himmelsrichtungen cos Θ_N nach Gleichung 3.12 modifiziert:

$$E_{eff,V} = E_{glob} * \frac{\cos \Theta_N}{\cos \Theta_s} \tag{3.12}$$

Hierbei beschreiben die beiden Winkel Θ_N und Θ_s Abweichungen der Bestrahlungsstärke gegenüber dem Referenzwert auf eine horizontale Fläche. Diese Winkel beziehen sich auf die Bauteilausrichtung sowie die Tages- und Jahreszeit, dies wird nachfolgend beschrieben.

3.5.2.0.1 Abweichung durch Bauteilausrichtung Der Einfluss der Scheibenneigung sowie der Ausrichtung auf die effektive Bestrahlungsstärke $E_{eff,V}$ basiert auf verschiedenen Winkeln. Diese Winkelbeziehungen sind in Abbildung 3.35 dargestellt. Hierbei ist nach (166) der Stand der Sonne in Abhängigkeit vom Höhenwinkel β_s (Sonnenwinkel) bzw. von seinem Supplementwinkel $\Theta_s (= 90 - \beta_s)$ sowie vom Azimutwinkel Ψ_s definiert. Der Sonnenwinkel β_s beschreibt die Höhe der Sonne über dem Horizont. Der Azimutwinkel $+\Psi_s$ oder $-\Psi_s$ beschreibt die Abweichung des Sonnenstandes von der Südausrichtung ($\Psi = 0$) infolge eines Tagesganges der Sonne. Die Lage der Verglasung kann durch den Neigungswinkel γ_v gegen die Horizontale sowie die Ausrichtung der Verglasung Ψ_v als Abweichung von der Südausrichtung berücksichtigt werden. Die Abweichungen zur Bestrahlungsstärke infolge des Standes Sonne (Θ_N) können auf Basis dieser Größen ermittelt werden. Die wichtigste unbekannte Größe ist der Sonnenwinkel β_s. Dieser ist sowohl abhängig von der Tageszeit, der Jahreszeit als auch vom Standort.

3.5.2.0.2 Abweichung durch Tages- und Jahreszeit Die Abhängigkeit der Strahlungseinwirkung vom Standort resultiert aus der Veränderung von flachen (z.B. an den Polkappen) und steilen Einfallswinkeln der Sonne von Polkappe zu Äquator. Für Deutschland werden die Einflüsse dieser Winkeländerungen vom nördlichsten zum südlichsten Punkt als gering angesehen. Einen wesentlich größeren Einfluss hat daher die Jahreszeit. Dieser resultiert aus der Schiefstellung der Erdrotationsachse zur

Ebene der Rotation um die Sonne. Dies geht einher mit einer in Abhängigkeit vom Jahreszeitpunkt (= des Umschreitens der elliptischen Umlaufbahn um die Sonne) wahrgenommenen Sonnenhöhe β_s (Sonnenwinkel), welcher die effektive Bestrahlungsstärke beeinflusst (siehe Abbildung 3.36).

Die zu berücksichtigenden Größen können über den geographischen Breitengrad (Standort) sowie unter Berücksichtigung der Tages- und Jahreszeit berechnet werden.
Die dargestellten Zusammenhänge zeigen auf, dass für die Beurteilung der Höhe der Bauteiltemperatur verschiedene zeitabhängige Faktoren berücksichtigt werden müssen. Ferner kann keine Beurteilung ohne die Berücksichtigung der Bauteilausrichtung sowie der Jahres- und Tageszeit erfolgen. Aus diesem Grund wird nachfolgend eine Grenzwertbetrachtung durchgeführt.

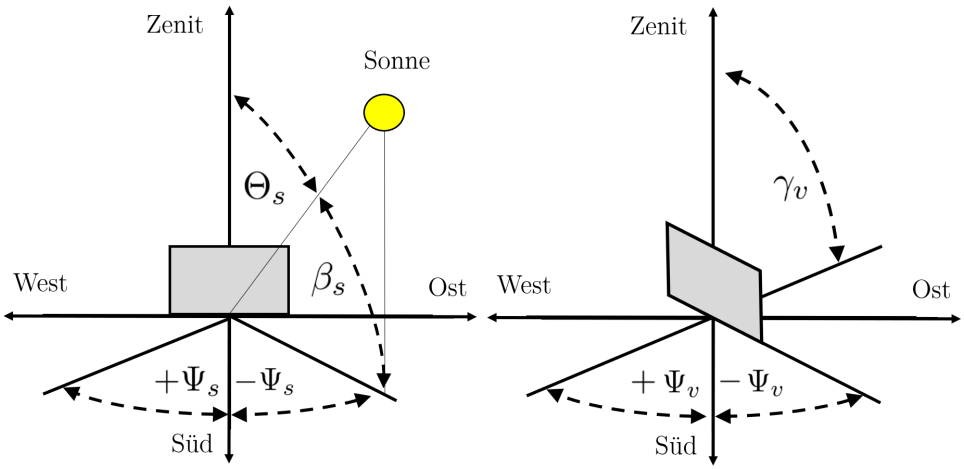


Abbildung 3.35: Darstellung der Winkelbeziehungen (Quelle: eigene Darstellung)

3.5.3 Rechnerische Grenzwertbetrachtung zur Bauteiltemperatur

Unter Berücksichtigung der dargestellten Winkelbeziehungen muss angenommen werden, dass hohe Strahlungseinwirkungen in Abhängigkeit von der Ausrichtung des geklebten Bauteils zu jeder Jahreszeit auftreten können. Um dies zu quantifizieren, wird

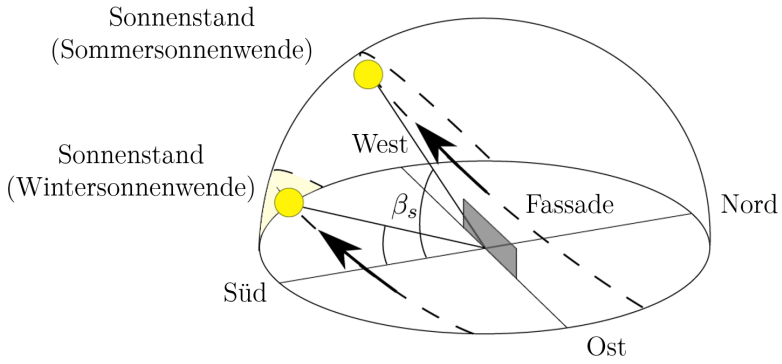


Abbildung 3.36: Schematische Darstellung der Sonnenbahn zur Sommer- und Wintersonnenwende (Quelle: eigene Darstellung)

eine rechnerische Grenzwertbetrachtung unter Berücksichtigung des kompletten Jahresgangs und verschiedener Ausrichtungen des geklebten Elementes durchgeführt. Dies basiert auf der Analyse der folgenden zwei Grenzzustände:

- Grenzzustand 1: Es gibt keine Erwärmung durch solare Strahlung - die Bauteiltemperatur nimmt unabhängig von der Ausrichtung mit hinreichender Näherung die Temperatur der Luft an. Die mittlere Bauteiltemperatur entspricht der mittleren Lufttemperatur.
- Grenzzustand 2: Es scheint an jedem Tag des Jahres die Sonne und es gibt keine konvektiven Verluste durch Wind - die Bauteiltemperatur wird in Abhängigkeit von der Ausrichtung des geklebten Elementes sowie des Tages- und Jahresganges infolge der Strahlungseinwirkung erwärmt.

Das Schema ist in nachfolgender Abbildung 3.37 dargestellt. Mit Hilfe der bauphysikalischen Simulation kann mit diesen Eingangsdaten eine mittlere Bauteiltemperaturantwort über den Jahresverlauf bestimmt werden.

3.5.3.1 Bauphysikalische Analogiebetrachtung

Für die Grenzwertbetrachtung wird ein bauphysikalisches Analogiemodell verwendet. Dieses idealisiert die Auswirkung lokaler instationärer Wärmewechselwirkungsmechanismen durch für Zeitinkremente konstante stationäre Vorgänge. Es basiert auf Idealisierungen zu Wärmegewinn- und verlustvorgängen. Diese Methode ist für die Ermittlung von Grenzzuständen eine praktikable Vorgehensweise (76).

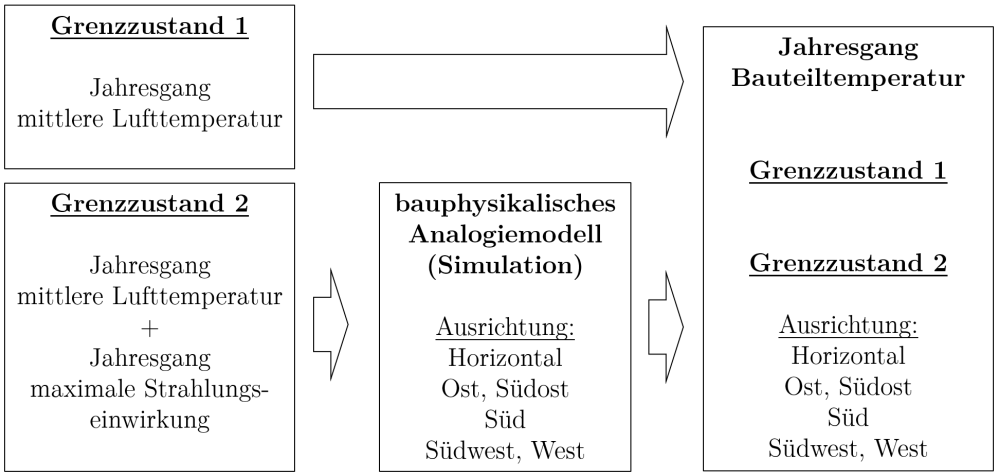


Abbildung 3.37: Schema der Nachweisführung (Quelle: eigene Darstellung)

3.5.3.2 Ermittlung von Referenzjahren kritischer Bestrahlungsstärke

Für die Analyse der mittleren Bauteiltemperatur für den Grenzzustand 2 bedarf es Jahresgänge, die als Eingangsparameter für die bauphysikalische Simulation dienen. Im vorliegenden Fall werden hierzu kritische Jahresgänge der Bestrahlungsstärke aus Wetterdaten des DWD ermittelt. Diese werden weiterführend als Modelljahre bezeichnet.

3.5.3.2.1 Ermittlung kritischer Modelljahre Die Ermittlung eines Modelljahresganges geschieht auf Basis der Datenbasis des Deutschen Wetterdienstes. Zu diesem Zweck wurden Strahlungs- und Temperaturdaten der DWD-Station Weihenstephan ausgewertet. Der Deutsche Wetterdienst stellt Strahlungsdaten in Stundenauflösung für verschiedene Standorte zur freien Verfügung. Es sind Daten für die kurzwellige Globalstrahlung, die diffuse Himmelstrahlung sowie die atmosphärische Strahlung verfügbar. Für die Auswertung wird die Globalstrahlung herangezogen. Die zur Verfügung stehenden Daten des DWD liegen als Stundensummen der Globalstrahlungsarbeit $Q_{h,glob}$ sowie der Diffusstrahlungsarbeit $Q_{h,diffus}$ in J/cm^2 (bzw. kWh/m^2) vor. Für die numerische Simulation unter Nutzung des Analogiemodells wird die Bestrahlungsstärke als momentaner Wert in W/m^2 benötigt. Aufgrund dessen wird zunächst ein operativer Momentanwert stundenweiser konstanter Bestrahlungsstärken $E_{h,glob}$ und $E_{h,diff}$ in W/m^2 ermittelt. Dieser Wert wird im Anschluss jahresübergreifend nach

Stunden des Modelljahres von 1 bis n sortiert. Dieses Schema ist in Tabelle 3.16 dargestellt.

Tabelle 3.16: Schema der Datenorganisation für die Bestimmung von Modelljahren der Bestrahlungsstärke

Nummer	Parameter	Inhalt Datensatz
[-]	$[W/m^2]$	**[hh-dd.mm.yyyy]**
1	$E_{h,glob}$, $E_{h,diff}$	00-01.01.1948, 00-01.01.1949,...
2	$E_{h,glob}$, $E_{h,diff}$	01-01.01.1948, 01-01.01.1949,...
...	$E_{h,glob}$, $E_{h,diff}$	...
n	$E_{h,glob}$, $E_{h,diff}$	23-31.12.1948, 23-01.01.1949,...

Hieraus können durch die Ermittlung der Jahresstundenmaxima, -mittelwerte sowie der -minima Jahresgänge der Globalsstrahlungsleistung sowie der Diffusstrahlungsleistung ermittelt werden. Diese gelten für die Strahlungseinwirkung auf horizontale Flächen. In Abbildung 3.39 sind die hieraus resultierenden maximalen, mittleren sowie minimalen Jahresgänge der Global- und der Diffusstrahlungsarbeit dargestellt. Mit Hilfe der zuvor ermittelten stundenweise operativen Bestrahlungsstärken kann somit ein Modelljahr aus 8164 Stunden maximaler Bestrahlungsstärke generiert werden. Dies besteht aus dem maximalen Globalstrahlungsgang und dem minimalen Diffusstrahlungsgang, was einem fiktiven Jahr ohne Bewölkung entsprechen soll.

3.5.3.3 Randbedingungen der Simulation

Für die Temperaturberechnung wird das Programmpaket WUFI des Fraunhofer Institutes für Bauphysik verwendet. Das Programm wird im Bereich der Gebäudesimulation zur bauphysikalischen Analyse der Wärme und Feuchte in Bauwerken eingesetzt.

3.5.3.3.1 Modellaufbau Der Wärmeübergangswiderstand ist für die Simulation zu ermitteln, die anderen Parameter werden in Anlehnung an Datenblattkennwerte sowie die geometrischen Abmessungen der Proben in der Freiluftmessung gewählt. Zur Kalibrierung werden die Messwerte aus der Freiluftmessung verwendet. Die bauphysikalischen Parameter des Analogiemodells sind in Tabelle 3.17 dokumentiert.

Tabelle 3.17: simulierte Scheibenausrichtungen

Parameter	Wert
Dicke der Glasscheibe d_{AM}	6 mm
Fläche A_{AM}	22500 mm^2
Rohdichte ρ_{Glas}	2500 kg/m^3
spezifische Wärmekapazität c_{Glas}	720 $J/(kg * K)$
Wärmeleitfähigkeit λ_{AM}	6 $W/(m * K)$
Absorptionsgrad	0,6 [-]
Wärmeübergangswiderstand Außen/Innen $R_{se/si}$	0,046 $(m^2 * K)/W$

Die für die Simulation notwendigen Eingangsparameter sind hierbei die Modellparameter aus Tabelle 3.17 sowie die ermittelten zeitabhängigen Werte der Lufttemperatur sowie der Bestrahlungsstärke (Global- und Diffusstrahlung). Die Modellparameter werden nachfolgend auf Basis der gemessenen Werte aus der Freiluftmessung validiert.

3.5.3.3.2 Validierung In Abbildung 3.17 sind die im Rahmen der Freiluftmessung experimentell ermittelten sowie die simulierten Bauteilteiltemperaturen für zwei unabhängige Tage dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass mit dieser Vorgehensweise der Einfluss der Strahlungseinwirkung auf die Bauteiltemperatur mit hinreichender Genauigkeit erfasst werden kann. Lokale Effekte sowie der Einfluss der Windgeschwindigkeit werden hier nicht berücksichtigt. Wirkt keine Strahlungsleistung auf das Modell, konvergiert die Modellantwort zur Lufttemperatur (siehe Abbildung 3.41). Ferner sind Abweichungen zwischen Modell und Experiment zu beobachten. Dies wird auf die Nachtabstrahlung zurückgeführt, welche durch das verwendete Analogiemodell nicht erfasst werden kann.

3.5.3.4 Einfluss der Ausrichtung

Für die Analyse des Einflusses der Fassadenausrichtung auf die Erwärmung kommen die ermittelten Modelljahresgänge zur Anwendung. Dies ist der Jahresverlauf der mittleren Lufttemperatur in Stundenauflösung sowie das Modelljahr mit den höchsten

Werten der Globalstrahlungsanteile in Stundenauflösung $E_{h,glob}$ sowie den geringsten Diffusstrahlungsanteilen $E_{h,diff}$. Es werden die in Tabelle 3.18 beschriebenen Ausrichtungen simuliert.

Tabelle 3.18: Modellparameter des Analogiemodells

Bezeichnung	Ausrichtung
H	Horizontal (Neigungswinkel γ_v = 0 °)
O	Ost-Ausrichtung (Neigungswinkel γ_v = 90 °)
SO	Süd-Ost-Ausrichtung (Neigungswinkel γ_v = 90 °)
S	Süd-Ausrichtung (Neigungswinkel γ_v = 90 °)
SW	Süd-West-Ausrichtung (Neigungswinkel γ_v = 90 °)
W	West-Ausrichtung (Neigungswinkel γ_v = 90 °)

Zunächst werden die Einflüsse der Scheibenausrichtung für den längsten und den kürzesten Tag des Modelljahres bestimmt (siehe Abbildung 3.42 und Abbildung 3.43). Die Ergebnisse der Simulation sind hierbei nach Tageszeitschritt aufgetragen. Dargestellt ist der Temperaturverlauf der Bauteiltemperatur $T_{Bauteil,i}$ im Tagesgang in Stundenauflösung für zwei verschiedene Tage im Jahr.

3.5.3.5 Analyse der mittleren Bauteiltemperatur

Zur Bestimmung der mittleren Bauteiltemperatur für die vorliegende Konstruktion werden alle Bauteiltemperaturen $T_{Bauteil,i}$ über alle Zeitschritte arithmetisch gemittelt. Hieraus folgen mittlere Bauteiltemperaturen $T_{Bauteil,m}$, die infolge der Ausrichtung (siehe Tabelle 3.18) unter Einwirkung des Strahlungsmodelljahres erreicht wurden. In Tabelle 3.19 sind diese Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 3.19: Ergebnisse der Bauteiltemperaturermittlung in Abhängigkeit von der Ausrichtung

Bezeich-nung	mittlere Bauteil-temperatur	mittlere Lufttemperatur	Erhöhung gegenüber der Lufttemperatur
[-]	$[°C]$	$[°C]$	$[K]$
H	+14,21	+8,39	+5,81
O	+12,51	+8,39	+4,12
SO	+13,86	+8,39	+5,47
S	+13,99	+8,39	+5,59
SW	+13,26	+8,39	+4,87
W	+11,86	+8,39	+3,47

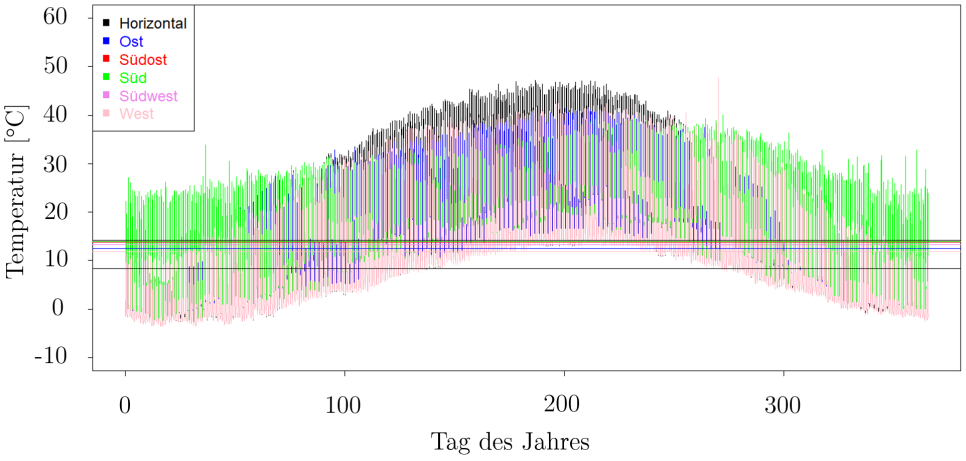


Abbildung 3.44: Ergebnisse der berechneten Bauteiltemperatur im Jahresgang mit den berechneten mittleren Bauteiltemperaturen aus Tabelle 3.19 für unterschiedliche Ausrichtungen (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204))

Es ist ersichtlich, dass die horizontale Ausrichtung (H) die höchste Erwärmung erfährt. Das ist plausibel, da keine Abminderung infolge der Scheibenneigung stattfindet. Insbesondere Diffusstrahlungsanteile wirken demnach voll ausgeprägt. Die drei Ausrichtungen nach Süden (Südost, Süd und Südwest) erfahren eine ähnliche Erwärmung. Die Ost- und Westausrichtung erfahren die geringste mittlere Bauteiltemperatur.

3.5.3.6 Analyse der Wirkungsdauer hoher Bauteiltemperaturen

In Ergänzung zu dem Wirkungsdauerkollektiv der Lufttemperatur wird auf Basis der durchgeführten Simulationen eine Analyse der Wirkungsdauer von Hochtemperaturereignissen in Abhängigkeit von der Ausrichtung durchgeführt. Aus Abbildung 3.44 ist ersichtlich, dass die unterschiedlichen Scheibenausrichtungen unterschiedliche Bauteiltemperatur-Zeit-Verläufe erfahren. Hierzu wird die Differenz der Bauteiltemperatur sowie der Lufttemperatur für jeden Zeitschritt und jede Scheibenausrichtung nach Gleichung 3.13 berechnet.

$$T_{Strahlung,i} = T_{Bauteil,i} - T_{Luft,i} \tag{3.13}$$

Im Anschluss wird auf die Zeitreihen der Zählalgorithmus nach Abschnitt 3.4 angewendet. Es ergibt sich ein Wirkungsdauerkollektiv der maximalen Wirkungsdauer der Erwärmung auf Basis der mit Hilfe der Simulation ermittelten Daten. Dies ist für die 6 verschiedenen Ausrichtungen in Abbildung 3.45 dargestellt. Unter Anwendung dieser Vorgehensweise kann festgestellt werden, dass die Wirkungsdauer von strahlungsbedingten Hochtemperaturen in den simulierten Tagesgängen unter Berücksichtigung verschiedener Ausrichtungen und Jahreszeiten auf wenige Stunden beschränkt ist.

3.5.4 Diskussion der Ergebnisse

3.5.4.1 Mittlere Bauteiltemperatur

Die in Abhängigkeit von der Ausrichtung ermittelten mittleren Bauteiltemperaturen sind berechnete Werte auf Basis von getroffenen Annahmen.
Für den vorliegenden Fall werden diese Werte als obere Grenzwerte der jeweiligen mittleren Bauteiltemperatur für diese unterschiedlichen Modelle interpretiert. Dies wird hauptsächlich aus den folgenden Randbedingungen begründet:

- die Verwendung des Modelljahres der Bestrahlungsstärke. Diese wurde so ermittelt, dass sich ein Jahresgang einstellt, welcher jeden Tag eine Strahlungseinwirkung beinhaltet. Ein Auftreten eines realen Jahresganges mit den Eigenschaften dieses Modelljahres wird als unwahrscheinlich eingeschätzt.
- keine Berücksichtigung konvektiver Einflüsse. Ferner sind abmindernde Ereignisse wie erhöhte Konvektion infolge von Windereignissen nicht berücksichtigt.

Es ist anzunehmen, dass diese Einflüsse aufgrund der Veränderung der konvektiven Wärmeübergangswiderstände die mittlere Temperatur weiter absinken lassen würden.

Es wird aus diesen Gründen angenommen, dass für reale Konstruktionen geringere mittlere Temperaturen zu erwarten sind, die sich nahe an den Werten der standortabhängigen mittleren Lufttemperatur einstellen.

3.5.4.2 Temperatur als Dauerlastfall

Die Ergebnisse lassen den Rückschluss zu, dass es sich bei der Temperaturlast unter gewissen Umständen um einen dauerhaften Lastfall handeln kann. Für die Beurteilung dieser Größe ist ein Referenzniveau notwendig. Dies wird nachfolgend anhand der Temperatur bei der Montage diskutiert, was als eine plausible Wahl angesehen wird. Als Montagetemperatur der Klebverbindungen wird die Temperatur bezeichnet, die während des Applikationsvorgangs vorliegt. Genau genommen der Temperaturbereich, der während der Aushärtung des flüssigen Klebstoffs zu einem Festkörper vorliegt. Bei den im Rahmen dieser Arbeit behandelten Werkstoffen ist mit einer Aushärtung bei Raumtemperatur zu rechnen. Dieser Vorgang kann auf der Baustelle erfolgen, wie beispielsweise bei Glasecken notwendig. Bei Fassadenelementen ist jedoch die Annahme gerechtfertigt, dass Werkstattrandbedingungen vorliegen. Als Referenz für die hier vorherrschenden Temperaturen können Werte der definierten minimalen und maximalen Temperaturen aus der Arbeitsstättenverordnung (82) genannt werden. Diese können Tabelle 3.20 in Abhängigkeit von der Arbeitsschwere entnommen werden.
Es muss festgestellt werden, dass zwischen diesen Werten und den ermittelten mittleren Bauteiltemperaturen nach Tabelle 3.19 eine Differenz von $\Delta T > 5$ K ermittelt werden kann.
Unter den getroffenen Annahmen muss davon ausgegangen werden, dass für Multi-Material-Klebverbindungen in Außenanwendungen eine dauerhafte Temperaturdifferenz zu den Fertigungsrandbedingungen vorliegt. Dies wird als ein wesentlicher und zu berücksichtigender Faktor bei der Auslegung von Klebverbindungen angesehen. Entscheidende Faktoren stellen hier die Schichtdicken, der vorliegende Unterschied in den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügepartner, die Relaxationseigenschaften der Klebwerkstoffe sowie die Abmessungen der Klebverbindung dar.

Tabelle 3.20: Mindestwerte der Lufttemperatur in Arbeitsräumen für stehende Körperhaltung nach (82)

Arbeitsschwere der körperlichen Arbeit	**minimale Lufttemperatur** ϑ_{min}
[-]	$[^{\circ}C]$
leicht	19
mittel	17
schwer	12

3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse und Transfer zur Praxisbemessung

3.6.1 Temperaturlast auf geklebte Verbindungen im Fassadenbau

Durch die Analyse von Zeitreihen der Lufttemperatur konnten Andauerperioden für Tief- und Hochtemperaturereignisse ermittelt werden. Es kann festgestellt werden, dass beide Ereignisse im Spitzenlastbereich wenige Tage wirken können. Reduziert sich dieser Wert, sind Andauerperioden von mehreren Wochen nicht ungewöhnlich und bei nahezu allen untersuchten Standorten zu identifizieren. Insbesondere bei Betrachtungen im Tieftemperaturbereich ist dies durch entsprechende experimentelle Untersuchungen zu berücksichtigen. Bezüglich der Grenzzustände, hohe Temperaturen und niedrige Temperaturen, kann festgestellt werden:

- hohe Temperaturen im Bereich der Spitzentemperaturen sind Auswirkungen der solaren Strahlungseinwirkung. Die Einwirkungsdauer der Strahlung auf ein geklebtes Fassadenelement ist bei stationären Objekten wie im Fassadenbereich vorliegend begrenzt. Dies begründet sich aus der Veränderung des Einfallwinkels der Strahlung infolge der Erdrotation. In Abwesenheit dieser Strahlungseinwirkung stellt sich in erster Näherung ein Niveau ähnlich der Umgebungstemperatur ein. Hieraus lässt sich schließen, dass die Wirkungsdauer dieser Spitzenlastereignisse im Bereich weniger Stunden liegt. Dies wurde mit Hilfe einer bauphysikalischen Simulation unter Anwendung eines Analogiemodells gezeigt (siehe Abbildung 3.45).

- Aufblendegeschwindigkeit hoher Temperaturen: Die Spitzentemperaturlast blendet am schnellsten in Szenarien mit quasi-instantaner orthogonal wirkender Bestrahlung auf. Szenarien dieser Art konnten im Verschattungsexperiment ($\dot{T} = 15\ K/h$) identifiziert werden. Aus diesen Richtwerten können mit Hilfe der jeweiligen Fugenabmessungen geeignete Geschwindigkeiten ermittelt werden, die eine einwirkungsgerechte Kennwertermittlung gestatten. Hier wird festgestellt, dass die auf diese Weise ermittelten Geschwindigkeiten sich für viele Fugenkonfigurationen wesentlich unterhalb der üblichen normativ vorgegebenen Dehnraten und Testgeschwindigkeiten einfinden. Verglichen mit diesen Geschwindigkeiten ist die reale Temperaturlast ein langsamer Prozess, der sich in einem diskontinuierlichen Vorgang über lange Zeiten aufbauen kann.
- Die Situation im Spitzenlastbereich tiefe Temperaturen stellt sich gegenüber den hohen Temperaturen unterschiedlich dar. Das Lastszenario tiefe Temperaturen muss als Lastfall interpretiert werden, welcher über Zeitperioden von mehreren Stunden wirken kann. Insbesondere Temperaturen, die vor und nach Spitzenereignissen niedriger Temperaturen liegen, können über Tage und Wochen wirken. Dies ist als ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zu dem Szenario hoher Temperaturen anzusehen, welches maßgeblich von zeitlich begrenzten Strahlungseinwirkungen beeinflusst ist.
- Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen ist davon auszugehen, dass die Temperaturlast für viele geklebte Multi-Material-Konstruktionen im Fassadenbau einen Dauerlastfall darstellen kann. Dies begründet sich aus der hohen Beeinflussung der Bauteiltemperatur außenliegender Elemente infolge der Lufttemperatur. Diese liegt für viele Standorte in Deutschland bei einem Wert von ca. +10 °C (siehe Abbildung 3.23). Gegenüber dieser permanenten Wirkung treten Strahlungsereignisse aufgrund des Tages- und Jahresganges des Einfallwinkels sowie witterungsbedingt in vergleichsweise zeitlich reduzierter Ausprägung auf. Aus der Differenz der üblicherweise in Arbeitsstätten vorherrschenden Temperatur und der mittleren Bauteiltemperatur ergibt sich auf Basis dieser Annahme ein permanenter Temperaturunterschied.

3.6.2 Beanspruchung von Klebfugen infolge klimatischer Einwirkungen

Neben den Temperaturlasten konnten auch maximale konsekutive Wirkungsdauern der Luftfeuchtigkeit sowie der Luftdruckabweichung ermittelt werden. In Analogie zu

den Temperaturlasten ist auf Basis der durchgeführten Untersuchungen davon auszugehen, dass diese Größen über längere Zeitperioden einwirken. Hierfür wurden Lastkollektive erarbeitet. Die Untersuchungen werden in Abgrenzung zu Betrachtungen für den Grenzzustand der Ermüdung durchgeführt. Für diesen ist die Betrachtung der Last-Zeit-Funktionen hinsichtlich der Auftretenshäufigkeit sowie der Schadensakkumulation infolge der Interaktion von Zeit-Temperatur sowie der infolge der Alterung auftretenden Größen notwendig.

- Neben der alterungswirksamen Veränderung der Eigenschaften der Klebschicht ist von einer unmittelbaren und ggf. reversiblen Veränderung der Klebschichteigenschaften auszugehen. Diese kann infolge der Wirkungsdauer der Luftfeuchtigkeit in Kombination mit maßgebenden Temperatureinwirkungen auftreten.
- Der Beanspruchungszustand sollte im Gesamtkontext der kombinierten Einwirkung der klimatischen Größen Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie der mechanischen Beanspruchung bewertet werden.

Zur Definition geeigneter Grenzzustände der Beanspruchung mit dem Ziel der Bemessung muss insbesondere das gemeinsame Wirken betrachtet werden. Dies ist nachfolgend exemplarisch durch die Darstellung der Häufigkeit des gemeinsamen Auftretens (Tageswerte) ausgewählter klimatischer Größen (Datenbasis DWD (204), München Stadt 1972-2013) dargestellt. Hierbei umfassen die einhüllenden Bereiche gleiche Auftretenshäufigkeiten.

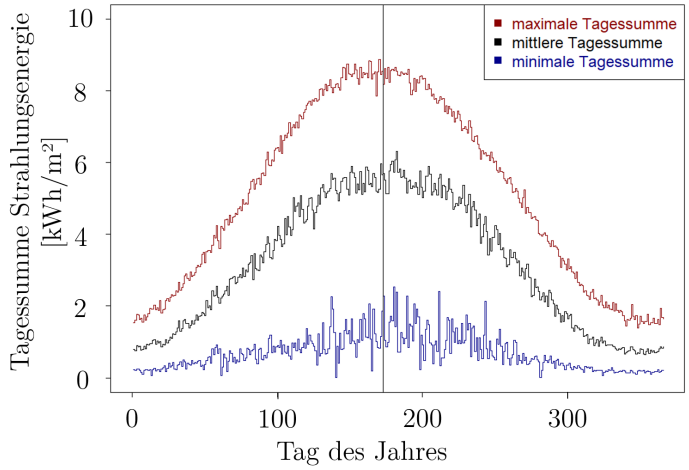


Abbildung 3.38: Jahresgang minimaler, mittlerer sowie maximaler Globalstrahlung (Standort: Weihenstephan)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

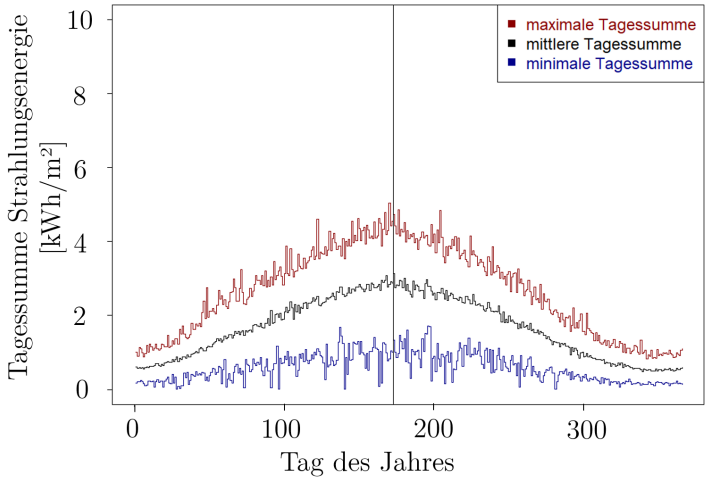


Abbildung 3.39: Jahresgang minimaler, mittlerer sowie maximaler Diffusstrahlung (Standort: Weihenstephan)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

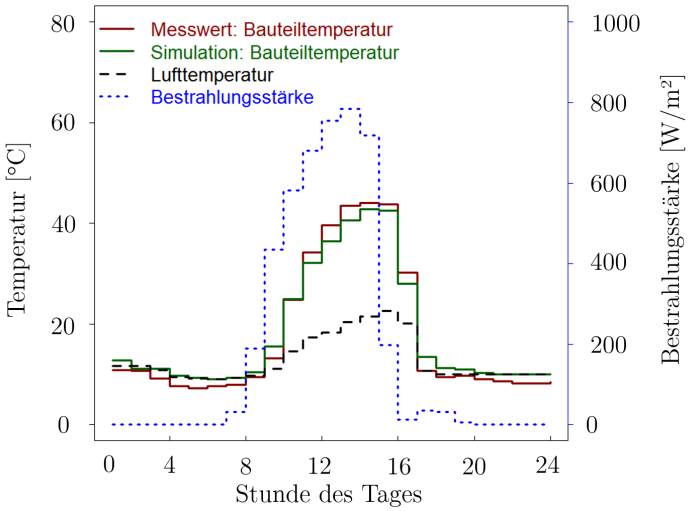


Abbildung 3.40: Abgleich der bauphysikalischen Simulation mit den experimentell ermittelten Bauteiltemperaturen in der Freiluftmessung an einem bewölkten Tag (14.04.2016)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204))

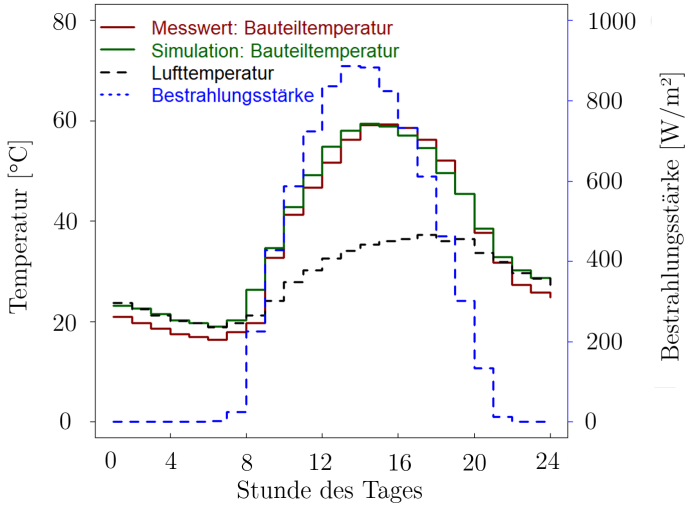


Abbildung 3.41: Abgleich der bauphysikalischen Simulation mit den experimentell ermittelten Bauteiltemperaturen in der Freiluftmessung an einem sonnigen Tag (24.06.2016)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204))

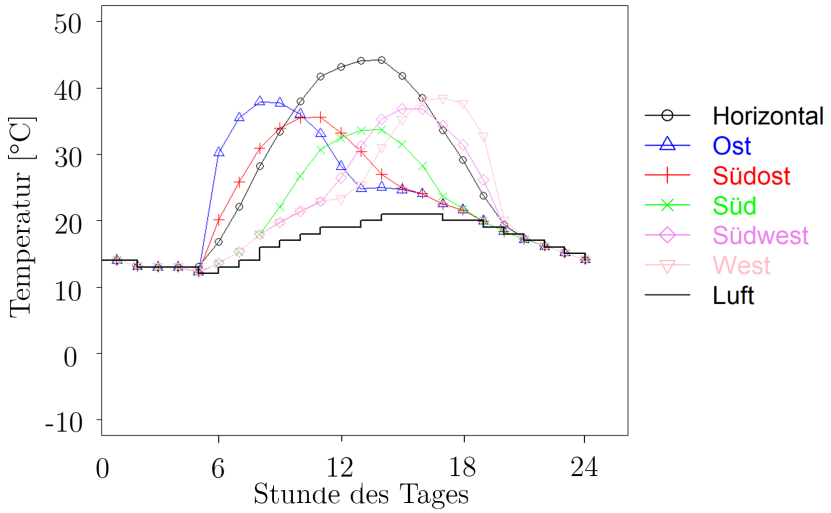


Abbildung 3.42: Verlauf der simulierten Modelltemperatur am 179. Tag des Modelljahres für verschiedene Scheibenausrichtungen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

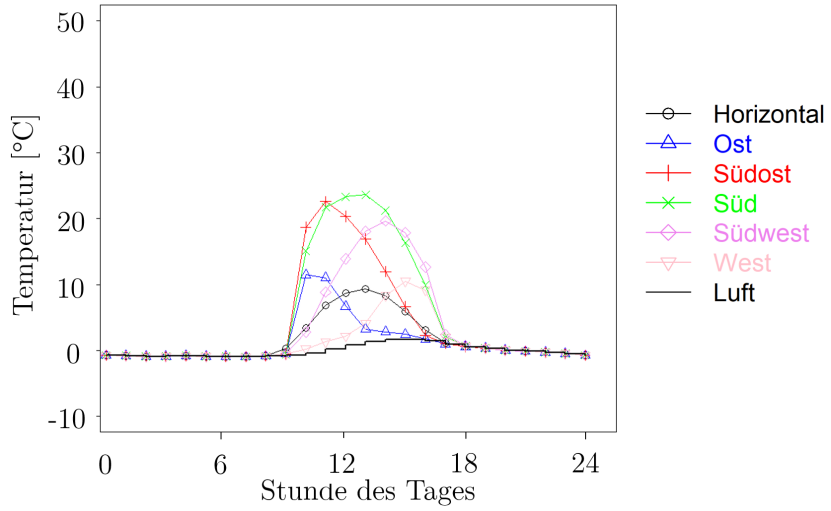


Abbildung 3.43: Verlauf der simulierten Modelltemperatur am 352. Tag des Modelljahres für verschiedene Scheibenausrichtungen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204))

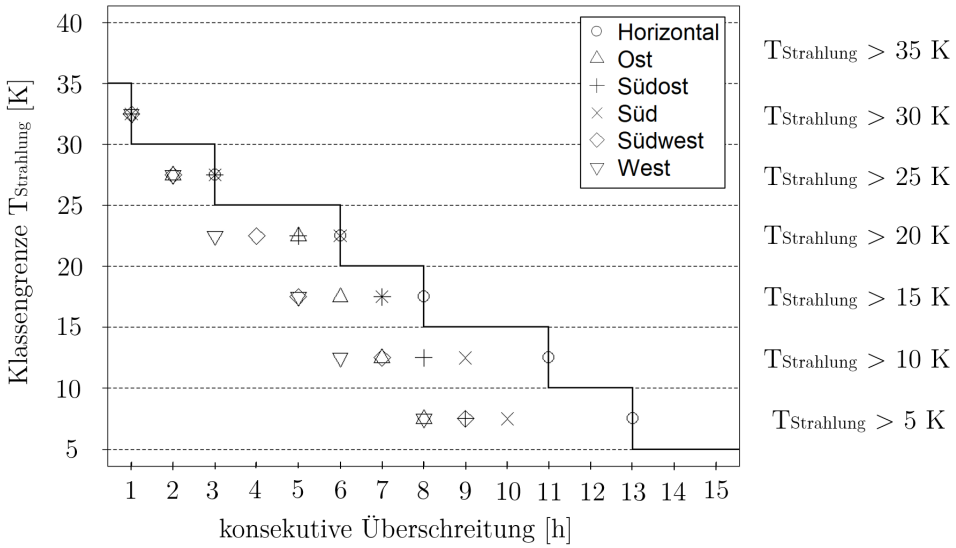


Abbildung 3.45: Wirkungsdauerkollektiv für die maximale konsekutive Überschreitung von Temperaturstufen nach Gleichung 3.13 für verschiedene Ausrichtungen (Simulation Analogiemodell) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204))

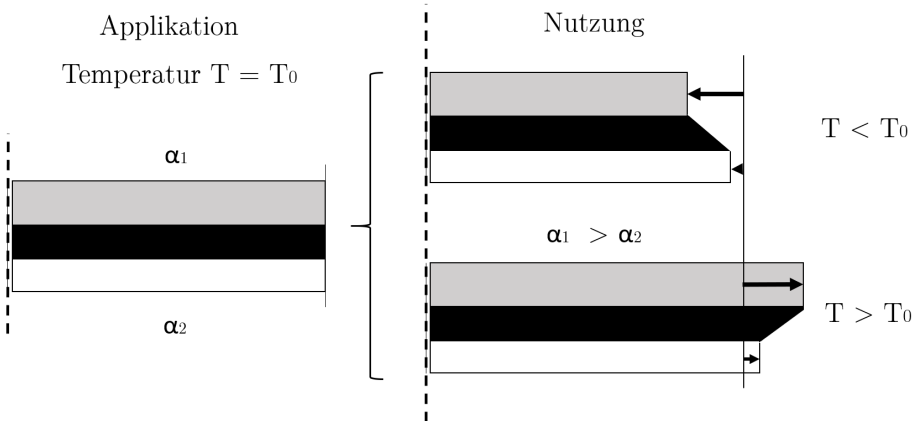


Abbildung 3.46: Schema einer dauerhaften Beanspruchung auf eine Klebfuge infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten α der Fügepartner (Quelle: eigene Darstellung)

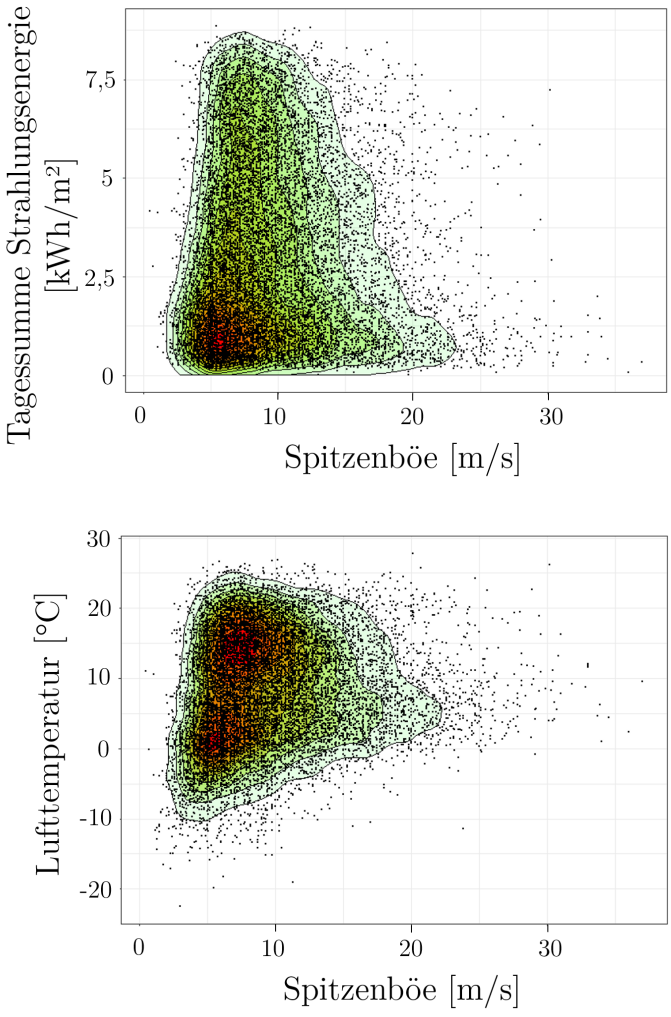


Abbildung 3.47: Korrelation Tagesspitzenböe mit mittlerer Tageslufttemperatur (oben) sowie der Tagessumme der Globalstrahlungseinwirkung (unten)
(Standort München Stadt, 1972-2013)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

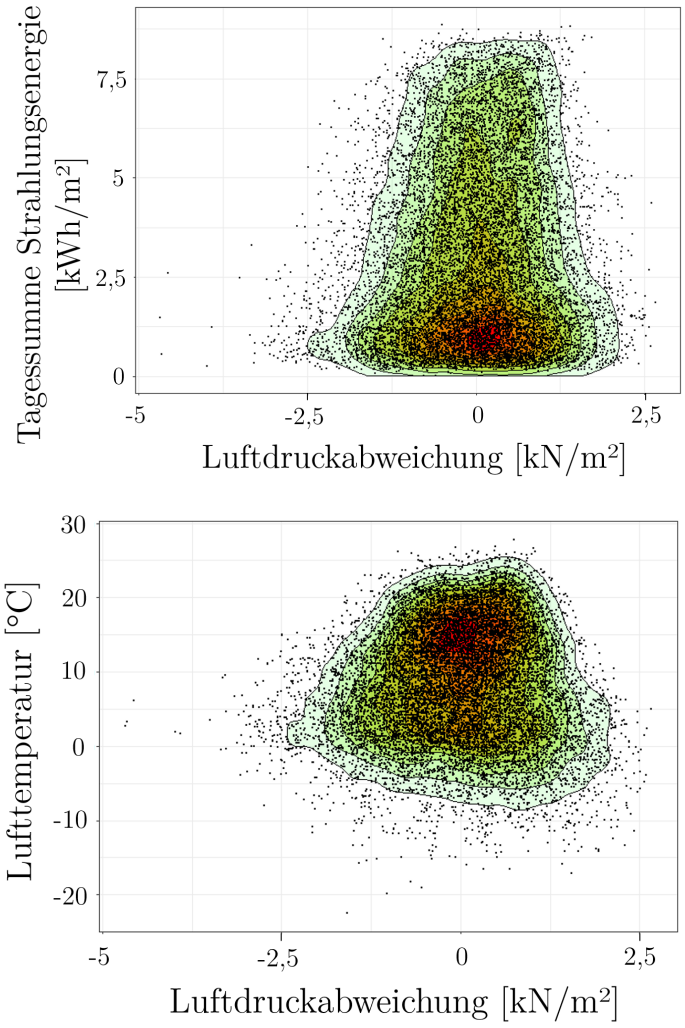


Abbildung 3.48: Korrelation Luftdruckabweichung mit mittlerer Tageslufttemperatur sowie der Tagessumme der Globalstrahlungseinwirkung
(Standort München Stadt, 1972-2013)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204))

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Rahmen dieses Kapitels werden experimentelle Untersuchungen an Klebstoff- sowie Verbundproben durchgeführt. Das Ziel ist hierbei die Analyse des Trag- und Versagensverhaltens von 2-Flankenklebungen unter praxisnahen Randbedingungen. Hierbei wird folgende methodische Vorgehensweise angewendet:

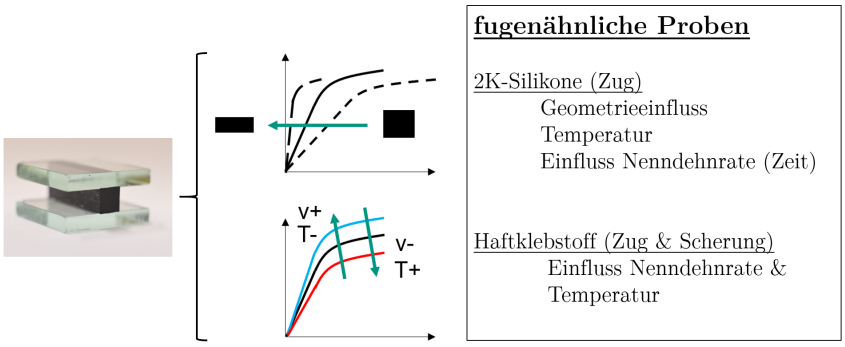


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Inhalts des Kapitels (Quelle: eigene Darstellung)

- Zunächst erfolgt eine quasi-statische (Klebstoff- und Verbundproben) sowie eine thermisch-mechanische Charakterisierung (DMTA). Darüber hinaus werden aus den Zugexperimenten Kenndaten der mechanischen Beanspruchbarkeit (Bruchspannung und Bruchdehnung) bestimmt.
- In einem zweiten Schritt wird untersucht, in welcher Form eine zeitabhängige Veränderung (Alterung) der zuvor bestimmten mechanischen Eigenschaften ermittelt werden kann.

- Durch Testreihen mit modifizierten H-Proben wird das Tragverhalten der Fuge realitätsnah untersucht. Hierzu wird der Einfluss der Querdehnbehinderung durch Variation der Aspektverhältnisse (Breite-/Höhe-Verhältnisse), der Nenndehnrate (= technische Dehnrate), der Feuchte sowie der Testtemperatur auf das Tragverhalten untersucht.
- Auf Basis dieser Experimente wird ferner der kombinierte Einfluss von Zeit und Temperatur durch gleichzeitige Variation der Nenndehnrate sowie der Temperatur untersucht.

4.1.0.0.1 Untersuchte Klebstoffsysteme Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei verschiedene 2K-Silikonelastomere sowie ein drucksensitives Haftklebeband untersucht. Diese werden durch die Firma SIKA, die Firma Dow Corning sowie die Firma TESA® zur Verfügung gestellt. Für die untersuchten Produkte werden im weiteren Verlauf die nachfolgenden Bezeichnungen genutzt:

- SGA: Dow Corning DC993, 2K Silikon
- SGB: SIKA Sikasil SG-550, 2K Silikon
- HKB: TESA® SE ACX 7078plus, Acrylat-Haftklebeband

Bei den beiden Silikonklebstoffen handelt es sich um Klebstoffsysteme, die für SG im Rahmen der Zulassungsleitlinie (81) eine europäisch-technische Zulassung besitzen. Die im Rahmen dieser Zulassungen definierten Kenndaten sind in Tabelle 4.1 wiedergegeben. Diese Werte wurden am Standardprüfkörper (H-Probe, 12 mm x 12 mm x 50 mm) auf Basis der experimentellen Randbedingungen nach (81) ermittelt.

4.2 Experimente zur Werkstoffcharakterisierung

4.2.1 Ziel und Aufbau der Experimente zur Werkstoffcharakterisierung

Zunächst werden die drei Klebstoffe durch die Durchführung von Grundexperimenten charakterisiert. Hierzu zählen DMTA-Untersuchungen, uniaxiale Zugversuche sowie

Tabelle 4.1: Mechanische Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe nach den europäisch-technischen Zulassungen ((69) und (72))

Bezeichnung	**DC993**	**Sikasil SG-550**
ETA	(69)	(72)
zulässige Zugspannung [N/mm^2]	0,14	0,20
zulässige dynamische Schubspannung [N/mm^2]	0,11	0,13
zulässige statische Schubspannung [N/mm^2]	0,011	0,013
Elastizitätsmodul bei Zug oder Druck [N/mm^2]	1,47	1,87
Schub-Elastizitätsmodul [N/mm^2]	0,47	0,63

Zugscherversuche. Diese Experimente wurden im Rahmen des Projektes (187) am Fraunhofer IFAM durchgeführt.

4.2.1.0.1 Ziel der uniaxialen Zugversuche Das uniaxiale Zugexperiment bietet aufgrund der definierten Randbedingungen die Möglichkeit, grundlegende Werkstoffkenndaten des Klebstoffs zu ermitteln. Hierzu werden zwei verschiedene Versuchsprogramme mit unterschiedlichen Ausrichtungen in Anlehnung an DIN EN 527 (62) durchgeführt. Es werden die folgenden Ziele verfolgt:

- Analyse des Einflusses der Testgeschwindigkeit auf die Klebstoffeigenschaften.
- Untersuchung der zeitabhängigen Veränderung der Klebstoffeigenschaften infolge der Alterungsauslagerung.

4.2.1.0.2 Ziel der Zugscherversuche Gegenüber dem quasi-statischen Zugexperiment stellt die Zugscherprobe in Anlehnung an DIN EN 1465 (50) eine Verbundprobe dar. Insbesondere die Alterungseigenschaften der Klebverbindung werden von der Eigenschaft zur beständigen Haftung des Klebwerkstoffes auf den zur Anwendung kommenden Substraten beeinflusst. Im vorliegenden Fall kommen zwei verschiedene Substrate (Floatglas aus Kalk-Natronsilikatglas (7) und nichtrostender Stahl 1.4301 (5) mit der Oberflächengüte 2B) zur Anwendung. In Analogie zu den Experimenten an den Klebwerkstoffen werden Experimente mit unterschiedlichen Testgeschwindigkeiten sowie Experimente zur Alterungsbeständigkeit durchgeführt:

- Analyse des Einfluss der Testgeschwindigkeit auf die Verbundeigenschaften.
- Untersuchung der zeitabhängigen Veränderung der Verbundeigenschaften in Abhängigkeit von verschiedenen Auslagerungszeiten und -parametern.

Die jeweiligen detaillierten Versuchsprogramme, die experimentellen Randbedingungen sowie die erzielten Ergebnisse sind in den folgenden Unterkapiteln dokumentiert.

4.2.2 Dynamisch-mechanisch-thermische Analyse (DMTA)

4.2.2.1 Grundlagen des Verfahrens

Zur Werkstoffcharakterisierung von Polymerwerkstoffen ist die Anwendung der DMTA ein etabliertes Verfahren. Diese Analysemethode gestattet die Ermittlung des frequenz- und temperaturabhängigen mechanischen Verhaltens von Werkstoffen. Bei der Durchführung der Messung wird eine Werkstoffprobe mit einer sinusförmigen oszillierenden Kraft- oder Weggröße bei gleichzeitiger Messung der Testtemperatur beaufschlagt. Das Prinzip ist in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt. Das Experiment kann in Abhängigkeit von den technischen Merkmalen des jeweiligen Gerätes über verschiedene Temperaturbereiche bei konstanter Frequenz bei gleichzeitiger Veränderung der Temperatur (= Temperatursweep) wie auch bei konstanter Temperatur über verschiedene Frequenzen erfolgen (= Frequenzsweep) (117). Die Beanspruchungsamplitude wird hierbei üblicherweise auf einen kleinen Verzerrungsbereich ($\epsilon_n < 0{,}01$) begrenzt. Die Ermittlung der Werkstoffeigenschaften erfolgt bei Kraftregelung über die gemessene Kraft, die Wegantwort, die Temperatur sowie die zeitliche Verzögerung der Werkstoffantwort. Mit diesen Größen können Übergangsbereiche (Glasübergangstemperatur T_g) zwischen Energie- und Entropieelastizität in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur quantifiziert werden. Auf Basis von DMTA-Experimenten kann darüber hinaus das visko-elastische Werkstoffverhalten untersucht werden. Dieses kann durch den Speichermodul G', den Verlustmodul G'' sowie den Verlustwinkel δ (Phasenwinkel) beschrieben werden (117). Dies kann als Grundlage zur Ermittlung der elastischen Module und der Dämpfungscharakteristik eines Werkstoffes genutzt werden (46). Für die Durchführung von DMTA-Untersuchungen können grundsätzlich verschiedene Probekörper- und Lagerungsformen und somit Beanspruchungsmoden (z.B. Torsion, Scherung, Zug) gewählt werden. Die Auswahl richtet sich in erster Linie nach den zu untersuchenden Werkstoffen und den hierbei vorliegenden Steifigkeiten. In Abhängigkeit von der Versuchsdurchführung lassen sich entsprechend

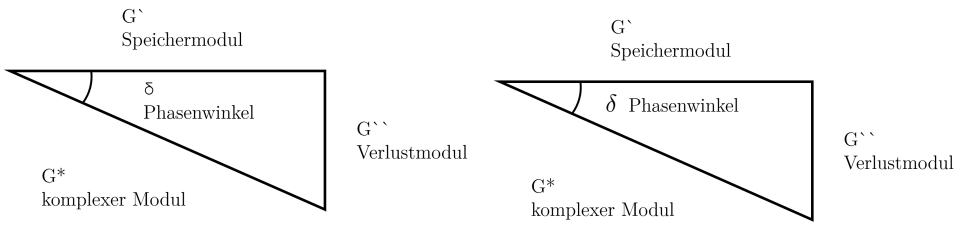
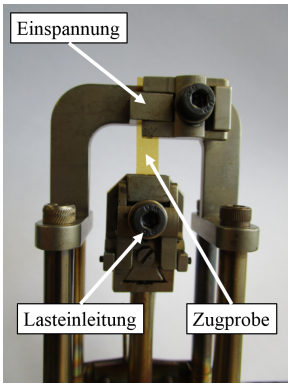


Abbildung 4.2: Prinzip einer DMTA-Messung (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (117))

Werkstoffantworten als Speicher- und Verlustmodule aus den unterschiedlichen Messmoden bestimmen. Gelten die Gesetzmäßigkeiten der linearen Elastizitätstheorie im Bereich kleiner Verzerrungen, können die Größen mit Hilfe der Zusammenhänge der elastischen Module ineinander umgerechnet werden. Hierbei muss angemerkt werden, dass die angenommenen Randbedingungen von mechanisch idealen Zuständen abweichen können. Ferner können Unschärfen durch die Geometrieerfassung auftreten. Dies kann zu Abweichungen in der Modulermittlung führen.

4.2.2.2 Randbedingungen und Herstellung der Probekörper

Die experimentellen Untersuchungen werden am Fraunhofer IFAM in Anlehnung an (9) mit einem DMA 2000 Dynamic Mechanical Analyzer der Firma TA Instruments durchgeführt. Für die Untersuchungen werden rechteckige Klebstoffproben (Länge x Breite = 85 mm x 5 mm) des jeweiligen Klebstoffes im Modus Zug getestet. Die Proben werden aus ausgehärteten Klebstofffellen (2K-Silikone) bzw. Klebstoffstreifen (Haftklebeband) ausgestanzt. In Abhängigkeit von der Ausgangsschichtdicke d_K vor dem Ausstanzen ergeben sich Probendicken von $d_{K,SGA}$ = 1,1 mm (SGA), $d_{K,SGB}$ = 1,9 mm (SGB) sowie $d_{K,HKB}$ = 1,9 mm (HKB). Alle Proben werden jeweils oben und unten ca. 30 mm in die Testvorrichtung eingespannt, woraus sich ein Testbereich von 25 mm ergibt. Die Nennabmessungen und das Lagerungsschema sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Für alle drei Werkstoffe werden jeweils Temperatursweeps im Bereich von T_{min} = -20 $°C$ bis T_{max} = + 80 $°C$ durchgeführt. Diese Temperaturgrenzen orientieren sich an den minimalen und maximalen Einsatztemperaturen im Bauwesen. Für die Analyse der Zeitabhängigkeit werden die Temperatursweeps bei unterschiedlichen Frequenzen (f_1 = 0,1 Hz, f_2 = 1 Hz, f_3 = 10 Hz) durchgeführt. Die Heizrate ist bei allen Experimenten 1 K/min. Nachfolgend ist in Tabelle 4.2 die Versuchsmatrix der Experimente mit den begleitenden Randbedingungen zusammengefasst.



Werkstoff	Nennabmessungen
	Dicke t_K x Länge l_0 x Breite b_K
SGA	1,1 mm x 25 mm x 5 mm
SGB	1,9 mm x 25 mm x 5 mm
HKB	1,9 mm x 25 mm x 5 mm

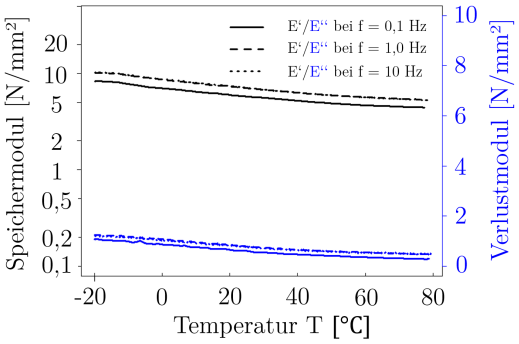
Abbildung 4.3: Schema der Probeneinspannung und Nennabmessungen der Proben (Quelle: eigene Darstellung, Bildquelle: IFAM (187))

Tabelle 4.2: Versuchsmatrix der DMTA-Untersuchungen

Werkstoff	Versuchsart	Modus	Frequenzen
SGA	Temperatursweep	Zug	0,1 Hz/ 1 Hz / 10 Hz
SGB	Temperatursweep	Zug	0,1 Hz/ 1 Hz / 10 Hz
HKB	Temperatursweep	Zug	0,1 Hz/ 1 Hz / 10 Hz

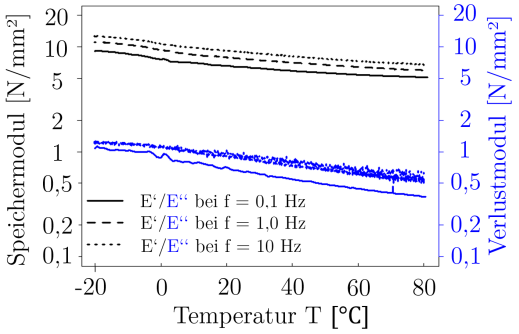
4.2.2.3 Ergebnisse der Messungen

Die Ergebnisse zeigen im untersuchten Frequenz- und Temperaturbereich für die beiden Silikonwerkstoffe eine geringe Veränderung der Speicher- und Verlustmodule (siehe Abbildung 4.4). Dennoch ist auch zwischen den beiden Silikonwerkstoffen ein Unterschied ermittelbar, der sich durch die höheren Verlustanteile beim Werkstoff SGB (Abbildung 4.5) zeigt. Gegenüber den Silikonklebstoffen ist für den Werkstoff HKB eine wesentlich ausgeprägtere Abhängigkeit gegenüber der Temperatur- und der Messfrequenz zu beobachten. Diese zeigt sich durch das starke Abfallen der Verlust-(E'') und Speicheranteile (E') über den Temperaturbereich von T_{min} = -20 $°C$ bis T_{max} = +80 $°C$. Ferner ist eine deutliche Frequenzabhängigkeit (siehe Abbildung 4.6) erkennbar, die sich durch das Ansteigen der Speichermodulkurven bei steigender Frequenz zeigt. Aus diesem Grund werden die kombinierten Versuche zur Zeit- und Temperaturabhängigkeit in Abschnitt 4.3 mit dem Werkstoff HKB durchgeführt.



Probe	DMTA
Breite b_K	5 mm
Dicke t_K	1,1 mm
Länge l_0	25 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7 d RT
Modus	Zug
Frequenzen f	0,1 / 1 / 10 Hz

Abbildung 4.4: Ergebnis der DMTA (Werkstoff SGA)



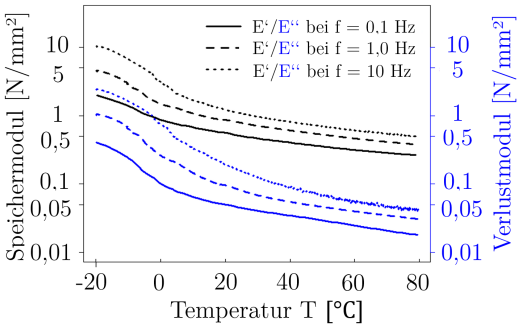
Probe	DMTA
Breite b_K	5 mm
Dicke t_K	1,9 mm
Länge l_0	25 mm
Klebstoff	SGB
Härtung	7 d RT
Modus	Zug
Frequenzen f	0,1 / 1 / 10 Hz

Abbildung 4.5: Ergebnis der DMTA (Werkstoff SGB)

4.2.3 Quasi-statische Zugexperimente in Anlehnung an DIN EN 527

4.2.3.1 Randbedingungen und Versuchsprogramm

Die Experimente werden in Anlehnung an DIN EN ISO 527 Teil 2 (62) mit der Probekörperform 5A durchgeführt. Ein ebenso für Elastomere geeigneter Probekörper ist der Typ S2 nach (62) (siehe z.B. (146), (145)). Alternativ ist die Anwendung von Typ 1B mit rechteckigem Querschnitt (4 mm x 10 mm) und einem parallelen Bereich von 60 mm ebenso verbreitet (siehe z.B. (186), (180), (4), (134)). Die Herstellung der Proben erfolgt durch Ausstanzen. Dies wird mit Klebstofffellen bzw. im Falle des Werkstoffes HKB mit der Rollenware durchgeführt.



Probe	DMTA
Breite b_K	5 mm
Dicke t_K	1,9 mm
Länge l_0	25 mm
Klebstoff	HKB
Härtung	-
Modus	Zug
Frequenzen f	0,1 / 1 / 10 Hz

Abbildung 4.6: Ergebnis der DMTA (Werkstoff HKB)

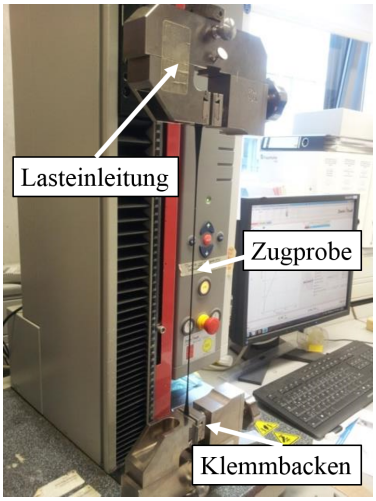


Abbildung 4.7: Zugprobe (Quelle: eigene Darstellung, Bildquelle: IFAM (187))

Die Experimente werden mit konstantem Vorschub der Traverse $v_T = \Delta u / \Delta t$ geregelt. Unter Berücksichtigung der Ausgangslänge l_0 kann eine Nenndehnrate $\dot{\epsilon}_n$ nach dem folgenden Zusammenhang bestimmt werden:

$$\dot{\epsilon}_n = \frac{\Delta u}{\Delta t * l_0} \tag{4.1}$$

Hierbei bezieht sich Δu auf die pro Zeitintervall Δt auftretende Verschiebung der Einspannbacken, welche auf die Einspannlänge l_0 normiert wird. Für alle drei Werkstoffe liegen konstante Einspannlängen vor. Die daraus resultierenden Nenndehnraten sind in Tabelle 4.4 dokumentiert. Gegenüber dieser Nenndehnrate nimmt die wahre

Tabelle 4.3: Geometrische Abmessungen der Zugproben

Parameter	SGA	SGB	HKB
	[mm]	[mm]	[mm]
Breite b_K	4	4	4
Dicke t_K	1,1	2,8	1,9
Länge l_0	50	50	50

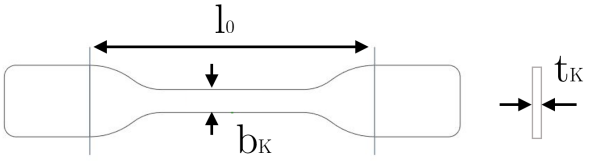


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Zugprobe (Quelle: eigene Darstellung)

lokale Dehnrate mit zunehmender Dehnung und gleichzeitig konstanter Traversengeschwindigkeit ab. Da im vorliegenden Fall keine ratenabhängigen Steifigkeitsparameter durch die Experimente ermittelt werden sollen, wird dieser Einfluss hier vernachlässigt. Dargestellt sind nachfolgend die nominellen Spannungs-Dehnungs-Verläufe sowie die nominellen Bruchspannungen σ_n (technischen Bruchspannungen) und nominellen Bruchdehnungen ϵ_n (technischen Bruchdehnungen). Der Wert der Bruchdehnung ϵ_n wird hierbei aus dem gemessenen Traversenweg Δu, bezogen auf die Einspannlänge l_0, berechnet. Hierbei handelt es sich um Nennwerte, die sich von den lokalen Dehnungswerten unterscheiden. Die nominellen Bruchspannungen σ_n werden aus dem Quotienten der maximal gemessenen Kraft und den Querschnittssollflächen ($A_n = b_K * t_K$) der Probekörper bestimmt.

4.2.3.2 Zugexperimente bei Raumtemperatur

4.2.3.2.1 Versuchsprogramm Zur Analyse des Einflusses der Testgeschwindigkeit auf die Werkstoffeigenschaften wird das in Tabelle 4.5 dargestellte Versuchsprogramm durchgeführt. Jede der drei Messreihen wird jeweils mit einer anderen Geschwindigkeit und für alle drei Werkstoffe durchgeführt.

4.2.3.2.2 Ergebnisse Nachfolgend werden die Ergebnisse der Zugversuche wiedergegeben. Dies geschieht für jeden der drei Werkstoffe separat.

Tabelle 4.4: Traversengeschwindigkeiten der Zugexperimente und daraus resultierende Nenndehnraten

Traversengeschwindigkeit	Einspannlänge	Nenndehnrate
v_T	l_0	$\dot{\epsilon}_n$
$[mm/min]$	$[mm]$	$[min^{-1}]$
1	50	0,02
10	50	0,2
100	50	2

Tabelle 4.5: Testprogramm der Zugexperimente

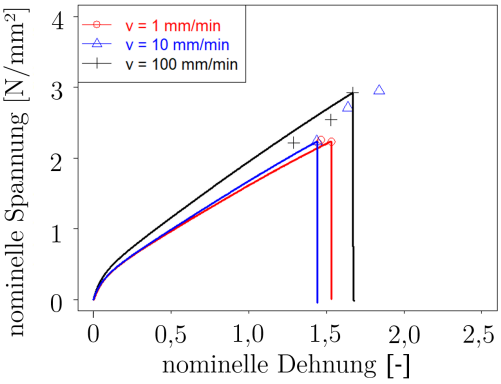
Geschwindigkeit v_T	Anzahl der Experimente		
[mm/min]	SGA	SGB	HKB
1	3	3	3
10	3	4	3
100	3	5	3

4.2.3.2.3 Werkstoff SGA Die nominellen Spannungs-Dehnungs-Kennlinien zeigen einen nichtlinearen Verlauf. Dieser ist gekennzeichnet durch einen steilen Anstieg der Steifigkeit bis in einen Bereich von ϵ_n = 0,2 , auf welchen ein weniger starker linearer Anstieg bis zum Versagen folgt (siehe Abbildung 4.9). Dies ist über alle untersuchten Testgeschwindigkeiten in dieser Form ersichtlich. Es zeigt sich im Vergleich zu den anderen Klebstoffen ein geringer Einfluss der unterschiedlichen Testgeschwindigkeiten auf die Festigkeit sowie die Bruchdehnung. Das Versagen tritt ab einem Dehnungsbereich von ϵ_n = 0,9 auf, ein Nenndehnrateneinfluss ist auf Basis der durchgeführten Versuche nicht messtechnisch quantifizierbar.

4.2.3.2.4 Werkstoff SGB In Analogie zu den Ergebnissen am SGA-Werkstoff zeigen die Kennlinien für den SGB-Werkstoff einen ähnlichen nichtlinearen Verlauf in der $\sigma_n - \epsilon_n$-Darstellung. Der Einfluss der drei Testgeschwindigkeiten zeigt sich hier jedoch deutlicher. Dies ist erkennbar durch die geringeren Steifigkeiten, die in den Experimenten bei den geringsten Testgeschwindigkeiten erzielt werden. Demgegenüber kann zwischen den beiden höheren Geschwindigkeitsstufen kein Unterschied messtechnisch erfasst werden. Die erzielten Bruchspannungen und Bruchdehnungen zeigen entsprechende Tendenzen. Dies ist in Abbildung 4.10 und Tabelle 4.7 dargestellt und zeigt sich durch das Ansteigen der ermittelten Bruchspannungen von σ_n = 2,46 N/mm^2 bei der geringsten Geschwindigkeit bis auf σ_n = 3,36 N/mm^2 bei der

höchsten. Einen Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Bruchdehnung kann in diesen Versuchen nicht ermittelt werden, da die Streuung eine belastbare Quantifizierung nicht gestattet.

4.2.3.2.5 Werkstoff HKB Die nominelle Spannungs-Dehnungs-Kennlinie des HKB-Werkstoffes ist stark nichtlinear und unterscheidet sich wesentlich von den Kennlinien der beiden Silikonwerkstoffe. Es ist zunächst bis zu einem Dehnungsniveau von $\epsilon_n = 0,2$ ein Bereich identifizierbar, der annähernd linear verläuft. Dies gilt unabhängig von den drei untersuchten Geschwindigkeiten. Über diesem Dehnungsniveau fällt die Steigung aller Kurven ab. Das Versagen durch das Durchreißen der Proben tritt homogen und mit geringen Streuungen (siehe Tabelle 4.8) auf. Eine Tendenz zur Ratenabhängigkeit der Bruchdehnung wie auch der Bruchspannung ist im Rahmen dieser Experimente ersichtlich (siehe Tabelle 4.8). Dies zeigt sich anhand des Anstiegs der mittleren Bruchspannungen. Mit diesem Anstieg ist ebenso eine erhöhte Bruchdehnung festzustellen (siehe Abbildung 4.8).

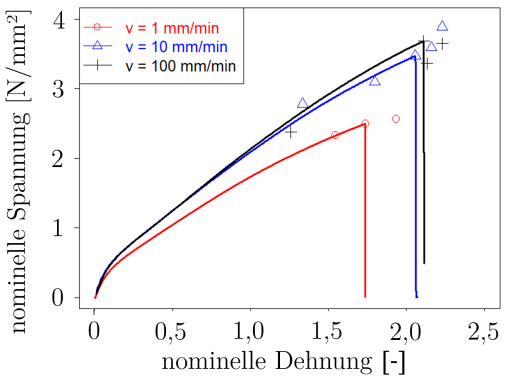


Probe	Zugprobe 5A DIN EN ISO 527
Breite b_K	4 mm
Dicke t_K	1,1 mm
Länge l_0	50 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7d RT
Modus	Zug
Geschwindigkeit v_t	1 / 10 / 100 mm/min
Temperatur	RT

Abbildung 4.9: Kurvenverläufe und Parameter der Zugexperimente (Werkstoff SGA)

Tabelle 4.6: Ergebnisse Zugexperimente SGA

Geschwindigkeit	**Bruchspannung**			**Bruchdehnung**		
v_t	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[mm/min]	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
1	2,23	0,03	0,01	1,48	0,04	0,03
10	2,63	0,36	0,14	1,63	0,19	0,12
100	2,56	0,35	0,14	1,49	0,19	0,13

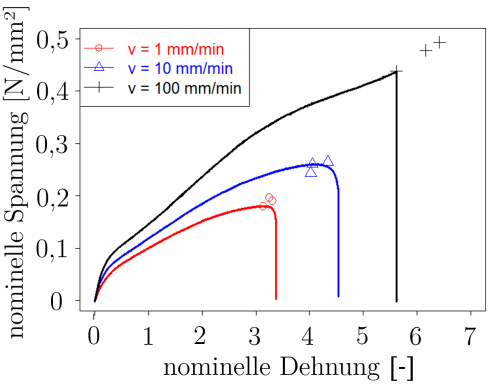


Probe	Zugprobe 5A DIN EN ISO 527
Breite b_K	4 mm
Dicke t_K	2,8 mm
Länge l_0	50 mm
Klebstoff	SGB
Härtung	7d RT
Modus	Zug
Geschwindigkeit v_t	1 / 10 / 100 mm/min
Temperatur	RT

Abbildung 4.10: Kurvenverläufe und Parameter der Zugexperimente (Werkstoff SGB)

Tabelle 4.7: Ergebnisse Zugexperimente SGB

Geschwindigkeit	**Bruchspannung**			**Bruchdehnung**		
v_t	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[mm/min]	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
1	2,46	0,11	0,05	1,73	0,20	0,11
10	3,27	0,61	0,18	1,93	0,45	0,23
100	3,36	0,43	0,13	1,92	0,36	0,19



Probe	Zugprobe 5A DIN EN ISO 527
Breite b_K	4 mm
Dicke t_K	1,9 mm
Länge l_0	50 mm
Klebstoff	HKB
Aufziehzeit	-
Modus	Zug
Geschwindigkeit v_t	1 / 10 / 100 mm/min
Temperatur	RT

Abbildung 4.11: Kurvenverläufe und Parameter der Zugexperimente (Werkstoff HKB)

Tabelle 4.8: Ergebnisse Zugexperimente HKB

Geschwindigkeit	**Bruchspannung**			**Bruchdehnung**		
v_t	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[mm/min]	**[N/mm^2]**	**[N/mm^2]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
1	0,19	0,01	0,05	3,23	0,08	0,03
10	0,26	0,01	0,04	4,14	0,18	0,04
100	0,46	0,03	0,06	6,07	0,41	0,07

4.2.3.3 Zugexperimente nach Alterungsauslagerung

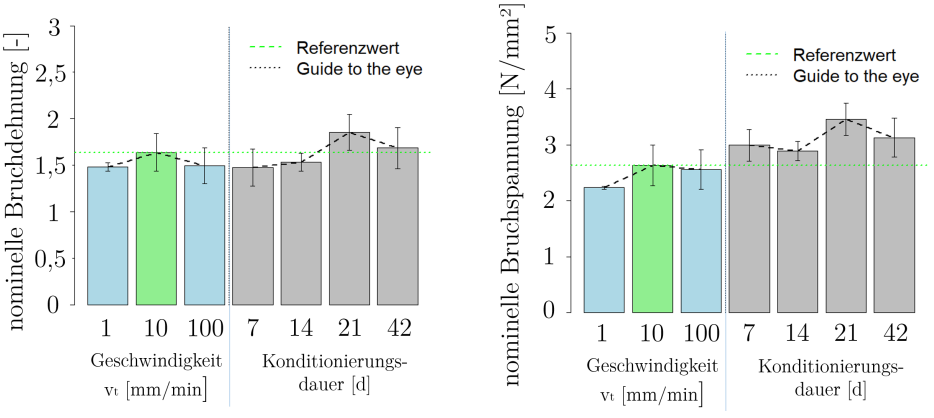
4.2.3.3.1 Versuchsprogramm Die Analyse der Veränderung der Klebstoffeigenschaften infolge der Alterungsauslagerung erfolgt durch gesonderte Versuchsreihen. Hierzu werden Zugproben jedes Werkstoffes in einem Wasserbecken mit entmineralisiertem Wasser bei T = +45 $°C$ ausgelagert (WF: Wärme-Feuchte-Lagerung in Anlehnung an (81)) und zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommen. Diese Zeitpunkte sind in Tabelle 4.9 dargestellt. Nach der Entnahme werden die Proben 24 Stunden bei Normklima rekonditioniert. Im Anschluss erfolgt eine Versuchsdurchführung in Anlehnung an den vorherigen Abschnitt.

4.2.3.3.2 Ergebnisse Die Veränderung der Bruchdehnung sowie der Bruchspannung infolge der unterschiedlichen Auslagerungsdauer ist in Kombination mit den Ergebnissen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit in Abbildung 4.13 dargestellt. Die Referenzwerte stellen hierbei die Ergebnisse bei Raumtemperatur und einer Geschwindigkeit von v_t = 10 mm/min dar.

Tabelle 4.9: Testprogramm der Zugexperimente zur Auslagerungsart

Geschwindigkeit	Vorkonditionierung	Anzahl		
[mm/min]	[-]	SGA	SGB	HKB
10	7 Tage Wasserlagerung bei +45 $°C$	3	3	3
10	14 Tage Wasserlagerung bei +45 $°C$	3	3	3
10	21 Tage Wasserlagerung bei +45 $°C$	3	3	3
10	42 Tage Wasserlagerung bei +45 $°C$	3	3	3

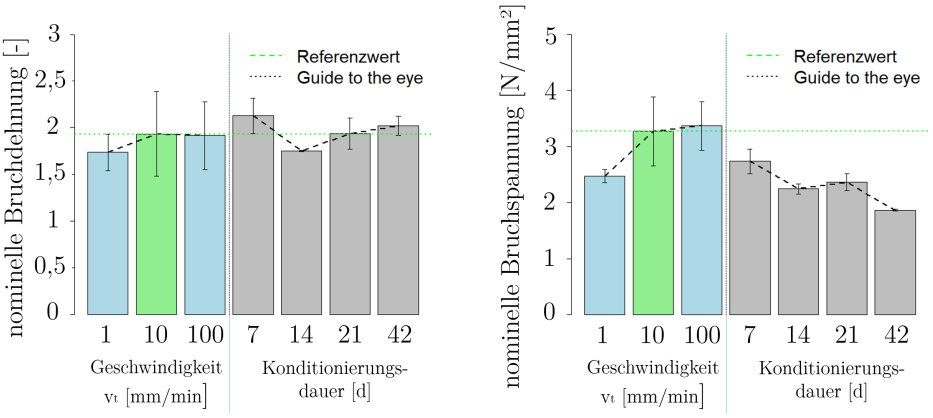
Es kann beobachtet werden, dass im Rahmen der Testreihen die ermittelte Bruchdehnung nahezu unbeeinflusst durch die gewählte Alterungsauslagerung bleibt. Dies kann so für alle drei Werkstoffe unabhängig von der Konditionierungsdauer beobachtet werden (siehe Abbildungen 4.12, 4.13, 4.14). Für die ertragbare Bruchspannung gilt dies in einer ähnlichen Weise. Hier ist lediglich für den Werkstoff SGB (Abbildung 4.13) eine Reduzierung der Bruchspannung infolge der Alterungsauslagerung zu verzeichnen. Für den Werkstoff SGA ist demgegenüber eine Erhöhung der Endfestigkeiten festzustellen, was jedoch auch als ein Effekt der Nachhärtung interpretiert werden kann. Das bedeutet, dass nach die Aushärtung noch nicht vollständig abgeschlossen ist und infolge der erhöhten Temperatur fortschreitet. Die Ergebnisse der Versuche mit dem Werkstoff HKB sind stärker von der Variation der Testgeschwindigkeiten geprägt als durch die Konditionierungsdauer (siehe Abbildung 4.14).



(a) Bruchdehnung (SGA)

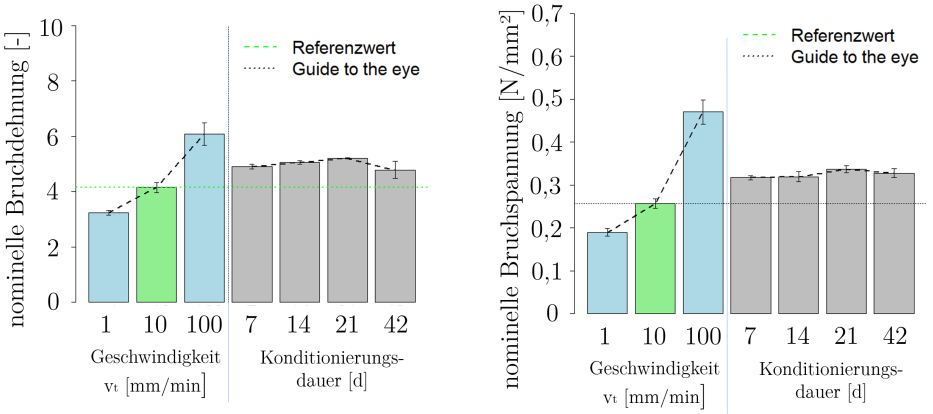
(b) Bruchspannung (SGA)

Abbildung 4.12: Bruchspannung und Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Testgeschwindigkeit sowie verschiedenen Entnahmezeitpunkten der Alterungsauslagerung (SGA)



(a) Bruchdehnung (SGB) **(b)** Bruchspannung (SGB)

Abbildung 4.13: Bruchspannung und Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Testgeschwindigkeit sowie verschiedenen Entnahmezeitpunkten der Alterungsauslagerung (SGB)



(a) Bruchdehnung (HKB) **(b)** Bruchspannung (HKB)

Abbildung 4.14: Bruchspannung und Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Testgeschwindigkeit sowie verschiedenen Entnahmezeitpunkten der Alterungsauslagerung (HKB)

4.2.4 Zugscherexperimente in Anlehnung an DIN EN 1465

4.2.4.1 Randbedingungen und Versuchsprogramm

In Ergänzung zu den experimentellen Untersuchungen unter uniaxialen Randbedingungen werden am Fraunhofer IFAM Zugscherexperimente in Anlehnung an DIN EN

1465 (50) durchgeführt. Zur Herstellung der Probekörper werden Stahlproben (Abmessungen: 25 mm x 100 mm x 5 mm) aus dem Werkstoff 1.4301 (nichtrostender Stahl (5)) mit der Oberflächengüte 2B auf Floatglasscheiben (Kalk-Natronsilikatglas (7)) appliziert. Die Anordnung der Proben erfolgt in Reihe zu jeweils 5 Stahllaschen auf einer Scheibe (siehe Schema in Abbildung 4.15). Zur Durchführung des Experimentes wird die Glasscheibe im unteren Bereich mit Hilfe von Klemmbacken eingespannt und die Stahllaschen an ihrem oberen Ende. Die Einspannung der Glasscheiben sowie der Stahllaschen erfolgt dabei so, dass kein planmäßiges Biegemoment aus dem Versatz der Fügepartner resultiert. Die Klebschicht wird über den konstanten Vorschub der Traverse bis zum Versagen beansprucht. Die Experimente werden mit allen drei Klebstoffen durchgeführt.

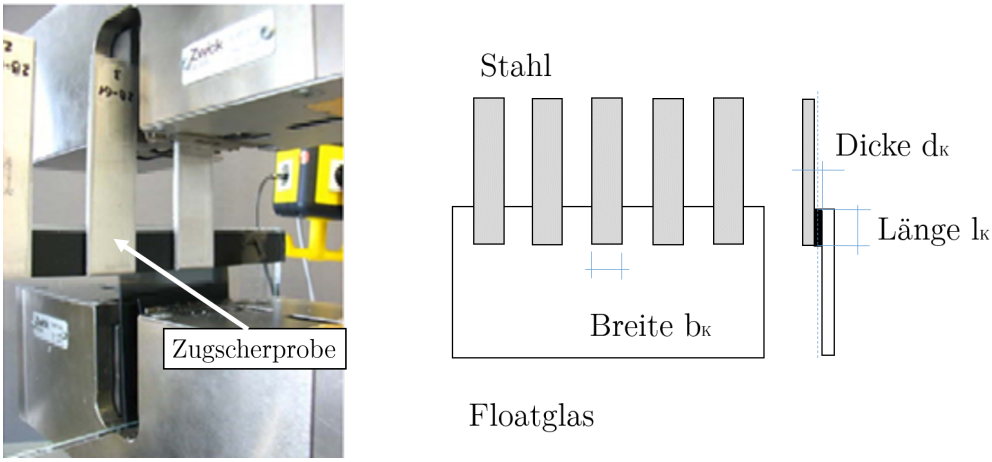


Abbildung 4.15: Aufbau Zugscherexperiment (Quelle: eigene Darstellung, Bildquelle: IFAM (187))

Tabelle 4.10: Geometrische Abmessungen der Zugscherproben

Parameter	SGA	SGB	HKB
	[mm]	[mm]	[mm]
Breite b_K	24	24	24
Klebschichtdicke d_K	4	4	1,9
Länge l_K	19	19	19

Auf Basis der unterschiedlichen Traversengeschwindigkeiten können unter dem Einbeziehen der Klebschichtdicken d_K nach Tabelle 4.10 die in Abbildung 4.15 dargestellten Nenngleitraten ermittelt werden. Zur Auswertung der experimentellen Ergebnisse werden aus den gemessenen Kraft-Verformungs-Kurven Nennscherspannungs-Gleitungs-Kurven berechnet. Hierzu werden die Kraftgrößen mit Hilfe der Nennscherflächen A_0 in nominelle Spannungen umgerechnet. Die nominelle Gleitung $\tan\gamma$ wird mit Hilfe der Nennschichtdicke d_K und der Traversenverschiebung Δu bestimmt:

$$\tan\gamma = \frac{\Delta u}{d_K} \tag{4.2}$$

Die Proben mit den Klebstoffsystemen SGA und HKB werden im Labor des IFAM hergestellt, die Proben mit dem Werkstoff SGB im Labor des Klebstoffherstellers. Zur Herstellung der Proben der 2K-Silikone (Werkstoff SGA und SGB) werden zur Einstellung der Klebschichtdicke Abstandshalter aus Polyethylen (PE) verwendet. Die Oberflächen für die Probekörper mit dem Klebstoff SGA werden mit Methylethylketon (MEK) gereinigt. Die Reinigung der SGB-Probekörper erfolgt mit Sika Cleaner P für das Floatglas und Sika Aktivator-205 für die Stahlproben (1.4301, 2B).
Die Proben mit dem Haftklebstoff (Werkstoff HKB) werden zweistufig hergestellt. Die Proben werden mit Methylethylketon (MEK) wischentfettet und anschließend mit TESA® 60150 Adhesion Promoter Universal (1.4301, 2B) und TESA® 60151 Adhesion Promoter Glass (Floatglas) vorbehandelt. Für die Applikation wird ein Streifen mit antiadhäsiver Folie auf der Rückseite entlang der Längskante der Glasscheibe aufgebracht. Nach der Fixierung wird die Folie entfernt und die Stahllaschen werden mit definiertem Anpressdruck (p_{HKB} = 30 N/cm^2) durch Gewichte appliziert (187). Die Parameter der Oberflächenvorbehandlung sind in Tabelle 4.11 zusammengefasst.

4.2.4.2 Zugscherexperimente bei Raumtemperatur

4.2.4.2.1 Versuchsprogramm Das Versuchsprogramm zur Analyse der Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von der Testgeschwindigkeit ist in Tabelle 4.12 dargestellt. In Analogie zu der Vorgehensweise bei den Zugexperimenten wird der Einfluss der Testgeschwindigkeit mit einem Versuchsprogramm unter Anwendung verschiedener Versuchsreihen mit jeweils unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt.

Tabelle 4.11: Reinigung und Vorbehandlung der verwendeten Substrate (187)

Klebstoff	Substrate	
	1.4301 (5), 2B	**Floatglas (Kalk-Natronsilikatglas) (7)**
SGA	Methylethylketon (MEK)	Methylethylketon (MEK)
SGB	Sika Aktivator-205	Sika Cleaner P
HKB	Methylethylketon (Wischentfettung) + TESA® 60150 Adhesion Promoter Universal	Methylethylketon (Wischentfettung) + TESA® 60151 Adhesion Promoter Glass

Tabelle 4.12: Testprogramm zur Analyse der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Verbundeigenschaften

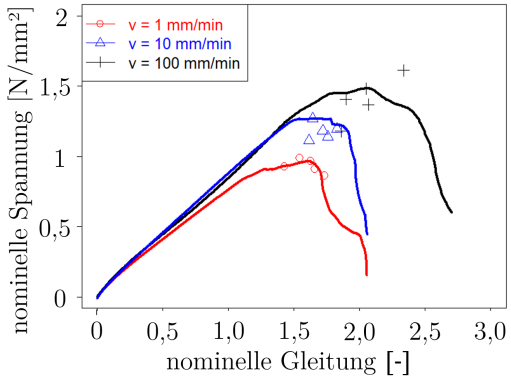
Traversen-geschwindigkeit v_T	**Anzahl der Experimente**		
$[mm/min]$	**SGA**	**SGB**	**HKB**
1	5	5	8
10	5	5	7
100	5	5	5

4.2.4.2.2 Ergebnisse Nachfolgend sind die Ergebnisse dokumentiert. Hierzu sind jeweils eine ausgewählte Kurve sowie die maximalen Bruchdehnungen und -spannungen dargestellt.

4.2.4.2.3 Werkstoff SGA Der Einfluss der drei untersuchten Testgeschwindigkeiten auf das mechanische Verhalten im Zugscherversuch wird für den Werkstoff SGA als gering angesehen. Sowohl die Steifigkeit im Anfangsbereich als auch die Verläufe der ermittelten Kennlinien zeigen sich weitestgehend unbeeinflusst über die drei getesteten Geschwindigkeitsbereiche. Dies ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Darüber hinaus sind die Bruchfestigkeiten (VarK = 0,05 - 0,11) als auch die zugehörigen Bruchgleitungen (VarK = 0,01 - 0,09) von geringer Streuung gekennzeichnet (siehe Tabelle 4.13) bei durchgehend kohäsivem Bruchbild.

4.2.4.2.4 Werkstoff SGB In den Experimenten mit dem Klebstoffsystem SGB kann im Zugscherexperiment unter Variation der Testgeschwindigkeit gegenüber dem Klebstoff SGA eine stärkere Beeinflussung der Kennlinienverläufe ermittelt werden. Dies zeigt sich durch deutliche Anstiege der Spannungs-Gleitungs-Kennlinie bei steigender Geschwindigkeit (siehe Abbildung 4.17). Hieraus resultiert auch ein Anstieg der Scherfestigkeiten. Ferner kann eine Tendenz zu einer Erhöhung der Bruchgleitung bei steigender Geschwindigkeit verzeichnet werden (siehe Tabelle 4.14). Dies ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

4.2.4.2.5 Werkstoff HKB Für den Werkstoff HKB wird auch im Zugscherexperiment der größte Einfluss der Geschwindigkeit auf die ertragbaren Bruchspannungen ermittelt. Die Mittelwerte der Bruchspannungen steigen hier von σ_n = 0,27 N/mm^2 (Abbildung 4.18) bei einer Testgeschwindigkeit von v_t = 1 mm/min (Nenngleitrate: $\dot{\tan}\gamma$ = 0,5 min^{-1}) bis zu σ_n = 0,8 N/mm^2 bei v_t = 100 mm/min (Nenngleitrate: $\dot{\tan}\gamma$ = 50 min^{-1}) an. Die Mittelwerte der Bruchgleitungen sind demgegenüber für die drei Testgeschwindigkeiten auf einem ähnlichen Niveau. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.15 dargestellt.

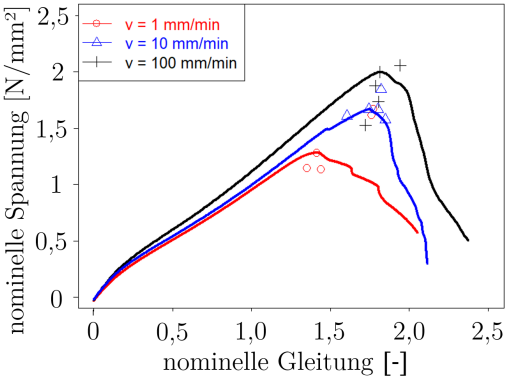


Probe	Zugscherprobe i.A.a. DIN EN 1465
Breite b_K	25 mm
Dicke d_K	4 mm
Länge l_K	25 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7 d RT
Modus	Scherung
Geschwindigkeit v_t	1 / 10 / 100 mm/min
Temperatur	RT

Abbildung 4.16: Kurvenverläufe und Parameter der Zugscherexperimente (SGA)

Tabelle 4.13: Ergebnisse Zugversuche SGA

Geschwindigkeit	Bruchspannung			Bruchgleitung		
v_t	$\overline{x}$	sd	VarK	$\overline{x}$	sd	VarK
[mm/min]	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0,93	0,05	0,05	1,59	0,12	0,02
10	1,17	0,06	0,05	1,71	0,09	0,01
100	1,41	0,16	0,11	2,04	0,19	0,09

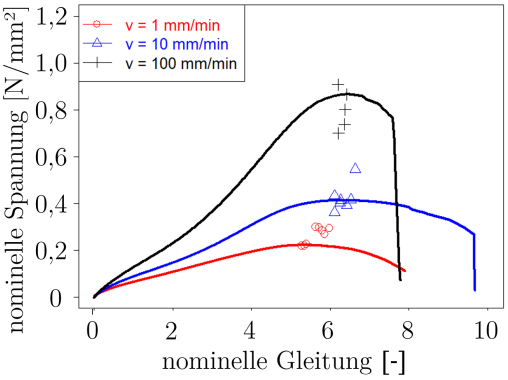


Probe	Zugscherprobe i.A.a. DIN EN 1465
Breite b_K	25 mm
Höhe t_K	4 mm
Länge l_K	25 mm
Klebstoff	SGB
Härtung	7 d RT
Modus	Scherung
Geschwindigkeit v_t	1 / 10 / 100 mm/min
Temperatur	RT

Abbildung 4.17: Kurvenverläufe und Parameter der Zugscherexperimente (SGB)

Tabelle 4.14: Ergebnisse Zugscherexperimente (SGB)

Geschwindigkeit	Bruchspannung			Bruchgleitung		
v_t	$\overline{x}$	sd	VarK	$\overline{x}$	sd	VarK
[mm/min]	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	[-]	[-]	[-]	[-]
1	1,47	0,28	0,19	1,54	0,20	0,03
10	1,79	0,11	0,06	1,76	0,10	0,01
100	1,97	0,23	0,12	1,81	0,08	0,04



Probe	Zugscherprobe i.A.a. DIN EN 1465
Breite b_K	25 mm
Dicke d_K	2 mm
Länge l_K	19 mm
Klebstoff	HKB
Aufziehzeit	7 d RT
Modus	Scherung
Geschwindigkeit v_t	1 / 10 / 100 mm/min
Temperatur	RT

Abbildung 4.18: Kurvenverläufe und Parameter der Zugscherexperimente (HKB)

Tabelle 4.15: Ergebnisse Zugscherexperimente (HKB)

Geschwindigkeit	**Bruchspannung**			**Bruchgleitung**		
v_t	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[mm/min]	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
1	0,27	0,04	0,14	5,62	0,26	0,02
10	0,42	0,11	0,37	6,33	0,20	0,02
100	0,80	0,09	0,11	6,31	0,10	0,02

4.2.4.3 Zugscherexperimente nach Alterungsauslagerung

4.2.4.3.1 Versuchsprogramm Die Analyse der Veränderung der Verbundeigenschaften infolge der Alterungsauslagerung erfolgt in separaten Versuchsreihen. Diese werden gegenüber den Testreihen an reinen Klebstoffproben erweitert, da in diesen keine wesentlichen Veränderungen der mechanischen Eigenschaften erkennbar sind. Aus diesem Grund erfolgt eine Erweiterung des Testprogramms um weitere Temperaturstufen. Darüber hinaus wird im Rahmen dieser Versuchsreihe aufgrund der geringen Datenbasis der Werkstoff HKB nicht betrachtet. Wie bei den in Analogie untersuchten Zugversuchen erfolgt die Auslagerung der Proben in einem Wasserbecken mit entmineralisiertem Wasser bei $+45\ °C$ (WF: Wärme-Feuchte-Lagerung in Anlehnung an (81)). In Ergänzung erfolgen Versuchsreihen bei erhöhten Temperaturen (+65 $°C$ und +95 $°C$). Die Proben werden wie bei Zugversuchen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (siehe Tabelle 4.16) entnommen, nach der Entnahme 24 Stunden bei Normklima rekonditioniert und im Anschluss mechanisch zerstörend geprüft.

Tabelle 4.16: Testprogramm der Zugscherexperimente zum Einfluss der Auslagerungsart (Wasserlagerung und Wärmelagerung)

Traversen-geschwindigkeit v_T	Konditionierung	Anzahl	
[mm/min]	[-]	SGA	SGB
10	42 Tage Wärmelagerung bei +45 $^\circ C$	5	5
10	42 Tage Wärmelagerung bei +65 $^\circ C$	5	5
10	42 Tage Wärmelagerung bei +95 $^\circ C$	3	-
10	42 Tage Wasserlagerung bei +45 $^\circ C$	4	5
10	42 Tage Wasserlagerung bei +65 $^\circ C$	5	5

Tabelle 4.17: Testprogramm der Zugscherexperimente zum Einfluss der Auslagerungsdauer und -temperatur (Wasserlagerung)

Traversen-geschwindigkeit v_T	Konditionierung	Anzahl	
[mm/min]	[-]	SGA	SGB
10	7 Tage Wasserlagerung bei +45 $^\circ C$	-	5
10	14 Tage Wasserlagerung bei +45 $^\circ C$	-	5
10	21 Tage Wasserlagerung bei +45 $^\circ C$	-	5
10	42 Tage Wasserlagerung bei +45 $^\circ C$	-	5
10	82 Tage Wasserlagerung bei +45 $^\circ C$	-	5
10	7 Tage Wasserlagerung bei +65 $^\circ C$	-	5
10	14 Tage Wasserlagerung bei +65 $^\circ C$	-	5
10	21 Tage Wasserlagerung bei +65 $^\circ C$	-	5
10	42 Tage Wasserlagerung bei +65 $^\circ C$	-	5
10	82 Tage Wasserlagerung bei +65 $^\circ C$	-	5

4.2.4.3.2 Ergebnisse Nachfolgend sind die Ergebnisse der Experimente zum Einfluss verschiedener Temperaturen bei der Wärmelagerung wie auch der Wasserlagerung (Wärme-Feuchte-Lagerung) dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass sich die untersuchte Klebverbindung nahezu unabhängig von der Höhe der Temperaturstufe der Auslagerung verhält. Dies zeigt sich durch ein konstantes Maß der ermittelten Bruchgleitungen $\tan\gamma$ für alle drei Temperaturstufen der Wärmeauslagerung. Demgegenüber steigen die mittleren Maximalwerte der Bruchspannungen von T = +45 $^\circ C$ bis T = +95 $^\circ C$ an. Dieser Effekt kann im Zusammenhang mit der Beschleunigung des Aushärtevorgangs infolge der erhöhten Temperaturen stehen, was im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht final geklärt werden kann. Gegenüber der reinen Wärmelagerung ist bei der Wärme-Feuchte-Lagerung für den Werkstoff SGA eine

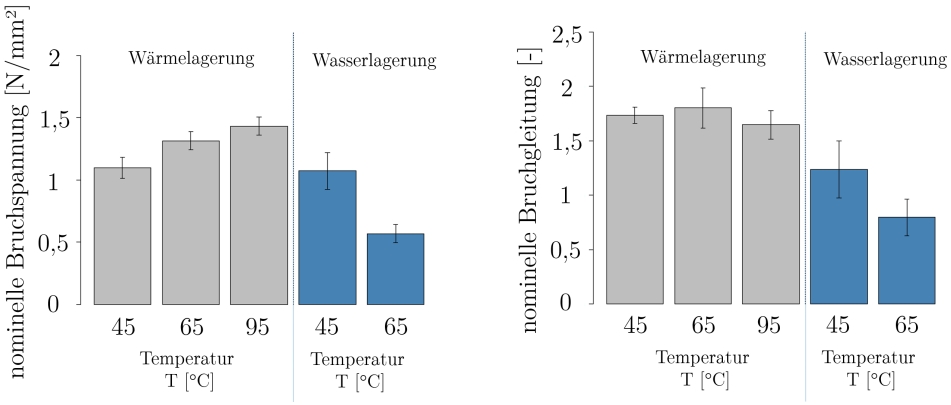


Abbildung 4.19: Bruchspannung und Bruchgleitung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Temperaturstufen in der Wärmelagerung und der Wasserlagerung (Werkstoff SGA)

deutliche Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften identifizierbar. Dies zeigt sich durch eine Reduzierung der ertragenen Bruchspannungen und Bruchgleitungen bei erhöhter Temperatur (siehe Abbildung 4.19). Dies kann in ähnlicher Art auch für den zweiten Silikonwerkstoff (SGB) festgestellt werden. Für diesen Werkstoff wird auf die zusätzliche Temperaturstufe T = +95 $°C$ verzichtet und es werden ausschließlich Temperaturstufen untersucht, die sowohl in der Wärme- als auch in der Wärme-Feuchte-Lagerung getestet vorliegen. Mit dieser Vorgehensweise kann zunächst festgestellt werden, dass sich die Bruchgleitung sowie die ertragbare Spannung nach Wärmelagerung analog zum ersten Silikonwerkstoff auf einem konstanten Niveau einstellen. Wiederum kann jedoch eine Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften infolge der Wärme-Feuchte-Lagerung festgestellt werden. Durch die Erhöhung der Auslagerungstemperatur um 20 K von $+45\ °C$ auf $+65\ °C$ kann sowohl eine Reduzierung der Festigkeit als auch der Bruchgleitung um über $50\ \%$ bezogen auf den Referenzwert bei Raumtemperatur festgestellt werden.

4.2.4.4 Modifizierte Zugscherprobe in Anlehnung an DIN EN 14869-2

In den vorherigen Untersuchungen konnte unter anderem festgestellt werden, dass im Versagensverhalten ein wesentlicher Unterschied zwischen Zug- und Zugscherexperiment zu erkennen ist. Das Versagen im Zugexperiment tritt quasi instantan auf. Demgegenüber ist im Scherexperiment ein stufenweises Versagen zu beobachten. Das gilt insbesondere für die 2K-Silikone. Dies ist anhand der Kennlinien durch die

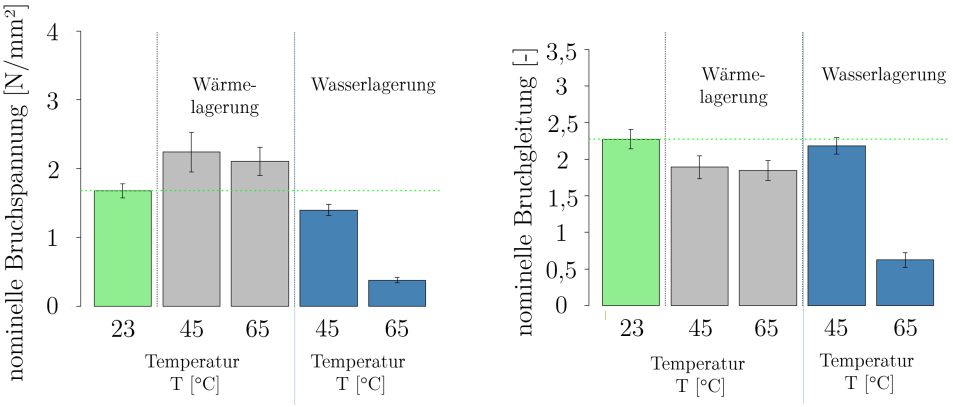


Abbildung 4.20: Bruchspannung und Bruchgleitung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Temperaturstufen in der Wärmelagerung und der Wasserlagerung (Werkstoff SGB)

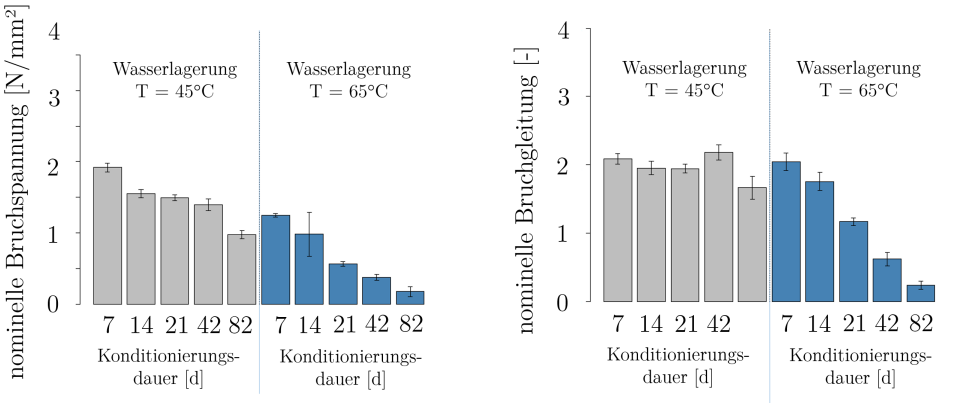


Abbildung 4.21: Bruchspannung und Bruchgleitung in Abhängigkeit unterschiedlicher Konditionierungsdauern in der Wärmelagerung und der Wasserlagerung (Werkstoff SGB)

stufenartigen Verläufe zu erkennen. Nachfolgend wird daher untersucht, ob dieses Versagensverhalten mit dem Auftreten von Anrissen korreliert werden kann.

4.2.4.4.1 Experimentelle Randbedingungen Für die Versuche wird eine dicke Zugscherprobe (Werkstoff 1.4301 (5), 2B) in Anlehnung an (51) verwendet. Die Oberflächenvorbehandlung sowie die Aushärtung des Klebstoffs erfolgen analog zu den Experimenten im vorherigen Abschnitt. Die zur Anwendung kommende Probe wird in Anlehnung an Probekörper für Strukturklebstoffe nach (51) Teil 2 konzipiert (Abmessungen der Klebfuge: Breite 20 mm x Länge 20 mm x Höhe 8 mm). Das Ziel ist eine

mittige Lasteinleitung über die biegesteifen Fügepartner bei gleichzeitigem Erhalt der Verschiebungsfreiheitsgrade in Querrichtung. Dies wird konstruktiv durch die Anbindung der Probekörper über Innengewinde (M10, A_S = 58 mm^2) und Gewindestangen ($l_{Lager,oben} = l_{Lager,unten}$ = 300 mm) realisiert. Durch eine geringe Biegesteifigkeit der Gewindestange $E * I_y = 56 * 10^6\ Nmm^2$ wird eine nahezu freie Verschieblichkeit der Probe in Querrichtung gestattet. Die Beanspruchung der Probekörper erfolgt über eine konstante Traversenverschiebung (v_t = 20 mm/min). Die Verschiebungen der Fügepartner werden gegenüber den vorherigen Versuchen mit Hilfe eines optischen Messsystems erfasst. Hierbei werden die Abweichungen von der Ausgangslänge der Messmarkierungen als Verschiebungen Δv und Δu gemessen. Auf Basis dieser Verschiebungen wird die nominelle Gleitung der Probekörper berechnet (siehe Gleichung 4.2). In Ergänzung dazu wird die nominelle Dehnung in Querrichtung ermittelt $\epsilon_{n,yy}$. Dies geschieht mit der gemessenen Verschiebungsgröße Δv, die durch die Klebschichtdicke d_K = 8 mm geteilt wird. Die Untersuchungen werden an 5 Probekörpern durchgeführt, die mit dem Klebstoff SGB gefügt sind. Die Experimente werden mit einer Traversengeschwindigkeit von $v_t = 20\ mm/min$ durchgeführt.

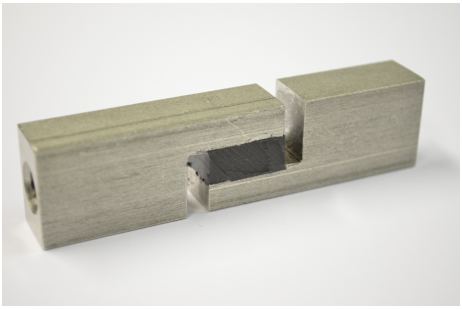


Abbildung 4.22: Foto der verwendeten Zugscherprobe (Quelle: eigene Aufnahme)

4.2.4.4.2 Ergebnisse Während des Ablaufes des Experimentes wird die Probe mit Hilfe des optischen 2D-Messsystems LIMESS kontinuierlich erfasst. Bei allen 5 Probekörpern kann beobachtet werden, dass das Versagen stets durch das Einreißen an den Probekörperstirnseiten eingeleitet wird. Der schematische Ablauf der Experimente ist in Abbildung 4.24 exemplarisch dargestellt. Das dargestellte Verhalten ist charakteristisch für alle 5 durchgeführten Experimente. Die ermittelte nominelle Dehnung in Querrichtung $\epsilon_{n,yy}$ ist in Abbildung 4.25 dargestellt. Eine Probe zeigt hier im Anfangsbereich eine positive Dehnung, dies wird auf Schiefstellungen und somit eine fehlerhafte Erfassung der Ausgangslänge zurückgeführt. Dieser Einfluss kann

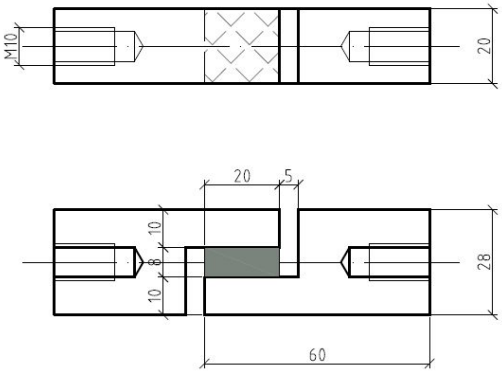


Abbildung 4.23: Zeichnung der Zugscherprobe (Quelle: eigene Zeichnung)

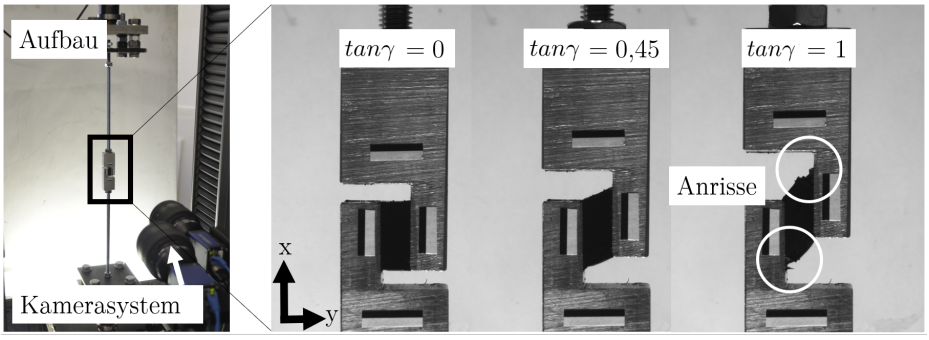
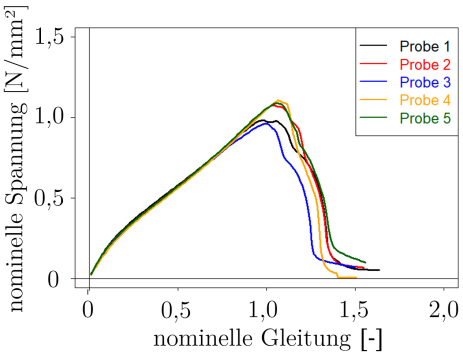
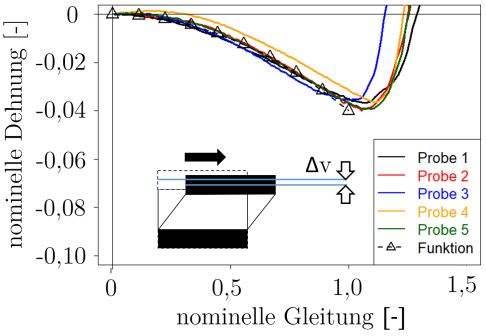


Abbildung 4.24: Ablauf des Zugscherexperimentes (Quelle: eigene Darstellung)

mit der zur Anwendung kommenden 2D-Bilderfassung nicht erfasst werden. Die Dehnung $\epsilon_{n,yy}$ kann in guter Näherung durch eine quadratische Funktion ($\epsilon_{n,yy}$ = -0,04 * $(tan\gamma)^2$, siehe Abbildung 4.25 unten) der Schergleitung $tan\gamma$ beschrieben werden. Hinsichtlich der Steifigkeit kann kein Unterschied gegenüber den in den vorherigen Kapiteln ermittelten Kurven im Zugscherexperiment festgestellt werden. Dies wird im Gesamtkontext unter Berücksichtigung der Scherexperimente an der modifizierten H-Probe in Abschnitt 4.3.8 weiter diskutiert.



(a) Scherspannung - Gleitung



(b) $\epsilon_{n,yy}$ - Gleitung

Abbildung 4.25: Spannungs-Gleitungs-Diagramm (links) und $\epsilon_{n,yy}$-Gleitungs-Diagramm (rechts) (Quelle: eigene Darstellung)

4.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Werkstoffcharakterisierung

Es wurden die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Testgeschwindigkeit sowie die zeitabhängige Veränderung der Klebstoffeigenschaften für die drei Werkstoffe im uniaxialen Zugexperiment sowie an Verbundproben untersucht. Nachfolgend werden die Ergebnisse zusammengefasst.

4.2.5.0.1 Abhängigkeit der Klebstoffeigenschaften von der Testgeschwindigkeit

Innerhalb der Testreihen unter Variation der Testgeschwindigkeiten (v_t = 1 mm/min,

10 mm/min, 100 mm/min) kann keine messbare Veränderung der Bruchdehnung für die beiden Silikonwerkstoffe (SGA und SGB) festgestellt werden. Dies gilt in ähnlicher Weise für die ermittelte Bruchspannung, wobei hier für den Werkstoff SGB bei der geringsten Geschwindigkeit eine geringere Steifigkeit (siehe Abbildung 4.10) wie auch eine reduzierte Bruchspannung (siehe Tabelle 4.7) ermittelt werden können. Für den Werkstoff HKB ist demgegenüber ein eindeutiger Trend zu erkennen. Hier steigt die Bruchspannung mit zunehmender Testgeschwindigkeit an. Die Bruchdehnung bleibt in den Testreihen hingegen nahezu unbeeinflusst.

4.2.5.0.2 Alterungsbeständigkeit der Verbund-Eigenschaften Hinsichtlich der Alterungsauslagerung kann im Rahmen der durchgeführten Testreihe keine Beeinflussung der Bruchdehnung für die untersuchten Werkstoffe ermittelt werden. Bei der Bruchspannung kann nur für den Werkstoff SGB ein leichter Trend zur Beeinflussung der Klebstoffeigenschaften ermittelt werden. Diese Ergebnisse an den reinen Werkstoffproben müssen im Zusammenhang mit den zur Anwendung gekommenen Auslagerungsverfahren und ihren Randbedingungen gesehen werden.
Aus diesem Grund wird der Parameterraum für die Alterungsauslagerung der Verbundproben erweitert. Die kombinierte Wärme-Feuchte-Lagerung führt zu messbaren Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Verbundproben. Diese zeigt sich durch eine Verringerung der aufnehmbaren Schergleitung sowie der Festigkeit.

4.3 Experimente an fugenähnlichen Proben

4.3.1 Ziel und Aufbau der Experimente

Das Ziel der folgenden Experimente ist die Analyse des realitätsnahen Tragverhaltens von Klebfugen. Dies wird durch die Verwendung von Probekörpern erreicht, die sich hinsichtlich ihrer Geometrien an die Randbedingungen realer SG-Klebfugen anlehnen. Diese Klebverbindungen kennzeichnen sich durch zwei gegenüberliegende parallele ebene Flächen (2-Flankenklebung). In diesen Testreihen werden durch die Variation von Testparametern verschiedene Einflussparameter auf das Tragverhalten untersucht.
Die nachfolgend beschriebenen Experimente basieren auf eigenen Versuchsreihen,

die auf den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt P 1052 (187) aufbauen. Die Untersuchungen lassen sich im Hinblick auf Betrachtungen zum Tragverhalten in Kapitel 5 wie folgt unterteilen:

- Experimente zur Analyse des Einflusses des **Breite-/Höhe-Verhältnisses**.
- Experimente zur Analyse des Einflusses der **zeit- und temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften**.

Der Aufbau und das Ziel der jeweiligen experimentellen Untersuchungen werden an dieser Stelle kurz erläutert.

4.3.1.0.1 Geometrieabhängigkeit - Werkstoffe SGA und SGB Im Forschungsprojekt P 1052 (187) konnte festgestellt werden, dass sich infolge der Breite-/Höhe-Verhältnisse in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung unterschiedliche Tragfähigkeiten einstellen. Dies ist im Einklang mit Beobachtungen zum Versagensverhalten von querdehnbehinderten Elastomerelementen unter Zugbelastung. Der hierfür relevante Schädigungsmechanismus der Kavitation ist in Kapitel 2.3.1.3.2 beschrieben. Im Rahmen des nachfolgenden Abschnitts werden hierzu systematische Untersuchungen an den beiden Silikonwerkstoffen (SGA und SGB) durchgeführt. Hier wird das Ziel verfolgt, die maßgebenden Einflussparameter aus Geometrie, Zeit (= Testgeschwindigkeit), Temperatur und Feuchte auf diesen Mechanismus zu identifizieren.

4.3.1.0.2 Temperatur- und Zeitabhängigkeit - Werkstoff HKB In Kapitel 3 wurde festgestellt, dass sich die auftretenden Einwirkungsvorgänge hinsichtlich des kombinierten Einflusses von Zeit und Temperatur stark unterscheiden und vor allem voneinander abhängig sind. In diesem Abschnitt liegt der Fokus daher auf der Analyse des kombinierten Wirkens von Zeit- und Temperatur auf die Klebverbindung. Hierfür wird im Vergleich zu den Untersuchungen im vorherigen Abschnitt ein viel engeres Parameterfeld aus Zeit- und Temperaturvariationen genutzt. Dies geschieht parallel für die Testmoden Scherung und Zug an der modifizierten H-Probe. Für diesen Teil der Untersuchungen kommen Proben zur Anwendung, die mit dem Klebstoff HKB gefügt sind, da hier in den Voruntersuchungen in Kapitel 4.2 die größten Zeit- und Temperaturabhängigkeiten zu beobachten waren.

4.3.2 Experimentelle Randbedingungen

4.3.2.1 Aufbau der Probekörper

Es werden linienförmige Klebverbindungen untersucht. Die hierfür gewählte Probenform ist gekennzeichnet durch zwei parallele Fügepartner, die durch den Klebwerkstoff verbunden sind. Diese Verbindung wird mit verschiedenen Breite-/Höhe-Verhältnissen ausgeführt. Die Wahl der Querschnittsabmessungen orientiert sich hierbei systematisch an der Form des Probekörpers nach (81). Auf Basis dieser Geometrie wird eine Variation in der Breite sowie in der Höhe vollzogen, aus der sich die folgenden Geometrien ergeben (siehe 4.26). Die Länge wird gegenüber dem Probekörper nach (81) einheitlich auf 100 mm erhöht. Für das Klebeband wird der Querschnitt der werksseitigen Vorkonfektionierung (Querschnitt: 25 mm x 2 mm) genutzt. Zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen wird die H-Probe nach (81) modifiziert. Als Glasfügepartner wird eine Floatglasscheibe (Kalk-Natron-Silikatglas) verwendet, die mit Hilfe eines Konstruktionsklebstoffs flächig auf ein Trägerprofil aus Aluminium (Werkstoffnummer 3.3206) appliziert wird. Durch das verwendete Trägerprofil kann der Probekörper direkt an der Prüfvorrichtung befestigt werden. Als Trägerprofil kommt ein T-Profil der Abmessung 50 mm x 50 mm x 5 mm zur Anwendung, welches mit entsprechenden Bohrungen zur Anbindung an die entwickelte Prüfapparatur versehen ist (siehe Abbildung 4.27). Der zweite Fügepartner ist ein entsprechendes T-Profil aus nichtrostendem Stahl (Werkstoff 1.4301 (5), Oberflächengüte 2B).

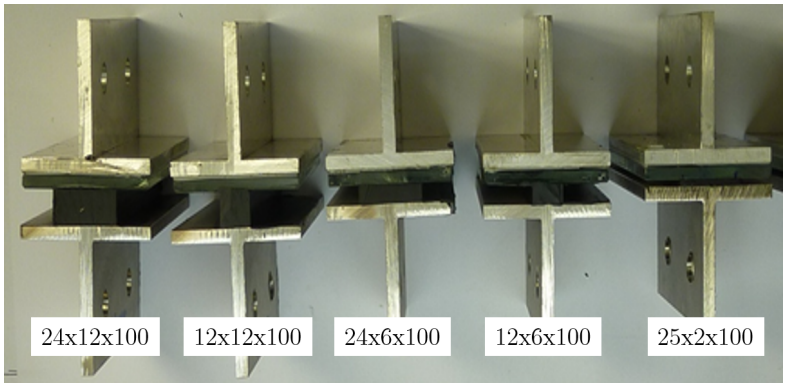


Abbildung 4.26: Darstellung der Probekörpertypen (Bildquelle: (187))

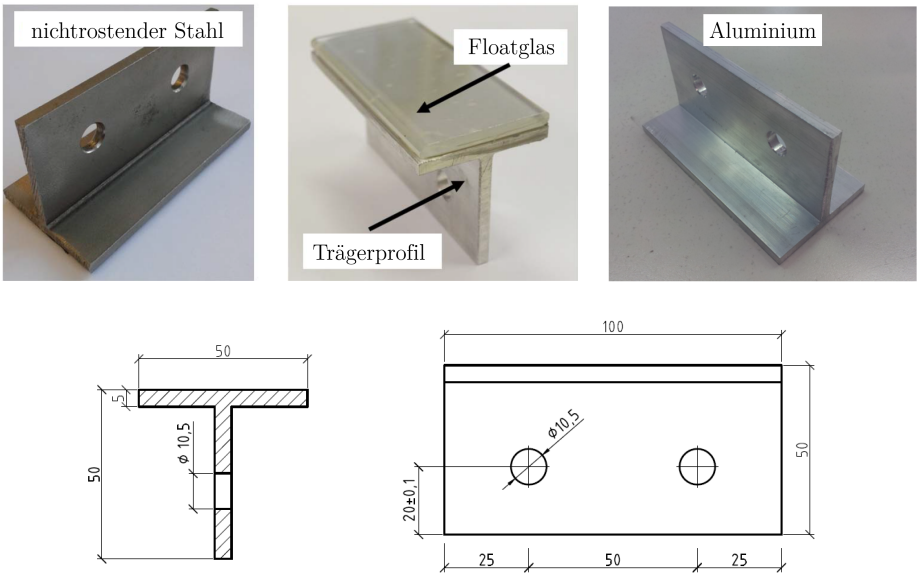


Abbildung 4.27: Darstellung der T-Profile
(Quelle: eigene Darstellung)

4.3.2.2 Herstellung der Probekörper

4.3.2.2.1 2K-Probekörper Die Probekörper wurden für beide Werkstoffe unter kontrollierten Laborbedingungen hergestellt. Dies erfolgte im Laboratorium der Firma SIKA in Bad Urach sowie bei der Firma Seele in Gersthofen. Für die beiden Silikonwerkstoffe ist die Vorgehensweise identisch und wird nachfolgend beschrieben.
Die Fügepartneroberflächen werden zunächst wischentfettet (Isopropanol) und mit Hilfe von Schrauben auf einem Trägerprofil fixiert. Dieses Profil ist so ausgerichtet, dass sich die Zielquerschnitte durch den Einsatz von hierfür angefertigten Profilen aus PE ergeben. Diese werden in Abhängigkeit von den zu erzielenden Fugenquerschnitten längsseitig eingebracht. Durch das Aufbringen einer Klemmkraft werden die Fügepartneroberflächen parallel zueinander an den PE-Profilen ausgerichtet. Die Negativformen sind an beiden Enden offen, was das Entweichen von Klebstoff und Luft im Fügeprozess gestattet. Dieser Vorgang geschieht unter Entnahme des oberen PE-Profils und Befüllung mit Hilfe einer Dosierpistole. Hierbei wird die Fuge von der Mitte der liegend angeordneten Profile aus befüllt. Mit der daraufhin folgenden Einbindung

des oberen PE-Profils wird der Applikationsvorgang abgeschlossen. Der an beiden Seiten der Vorrichtung austretende Klebstoff wird im ausgehärteten Zustand mit einer Rasierklinge bündig abgeschnitten.

Um eine einheitliche Grundlage der Vergleichbarkeit über alle im Rahmen des Versuchsprogramms vorherrschenden Temperaturstufen zu erzielen, muss ein einheitliches Referenzniveau der Aushärtung erreicht sein. Die Probekörper aus 2K-Silikonen werden aus diesem Grund nach 7 Tagen Aushärtung bei Raumtemperatur anschließend für drei Tage bei + 35 °C im Umluftofen ausgehärtet.

4.3.2.2.2 HKB-Probekörper Die Form und der Querschnitt des drucksensitiven Klebebands sind bereits werksseitig vorgegeben, da es als Rollenware vorliegt. Der Applikationsvorgang unterscheidet sich demnach von der Vorgehensweise bei den 2K-Klebstoffen. Beide Oberflächen werden zunächst wischentfettet (MEK). Die Stahloberflächen werden im Anschluss mit TESA 60150 Adhesion Promoter Universal und die Glasoberflächen mit TESA 60151 Adhesion Promoter Glass vorbehandelt. Für die Applikation wird ein T-Profil an den Stegen in Klemmbacken einer Universalprüfmaschine fixiert. Der Haftklebstoff wird in Streifen vorkonfektioniert und auf die gereinigten Oberflächen appliziert. Der definierte Anpressdruck (p_{HKB} = 30 N/cm^2) wird mit Hilfe einer Universalprüfmaschine aufgebracht. Im Anschluss an diesen Vorgang werden die Probekörper mindestens 72 Stunden bei Raumtemperatur lastfrei gelagert.

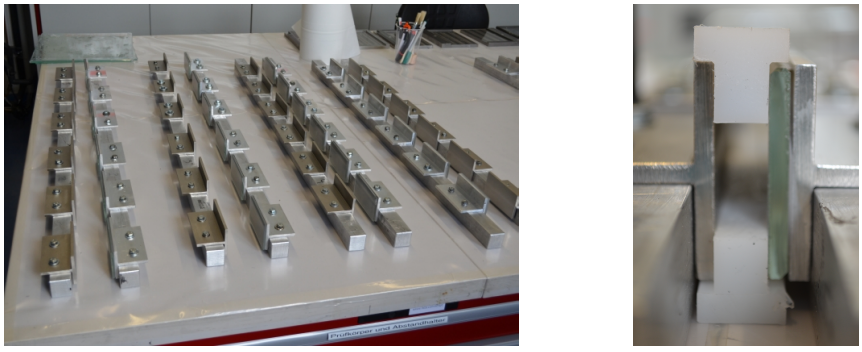


Abbildung 4.28: Fertigung der Probekörper mit Negativformen (Quelle: eigene Aufnahmen)

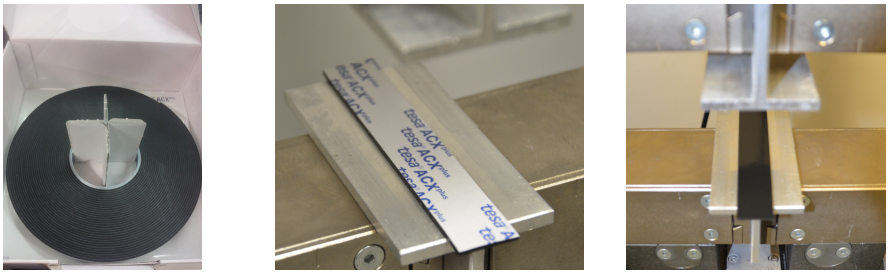


Abbildung 4.29: Anlieferungszustand (links) und Applikationsversuche mit Aluminiumprofilen (Mitte und rechts) (Quelle: eigene Aufnahmen)

Tabelle 4.18: Reinigung und Vorbehandlung der verwendeten Substrate (187)

Klebstoff	Substrate	
	1.4301 (nichtrostender Stahl (5)), 2B	**Floatglas (Kalk-Natronsilikatglas (7))**
SGA	Isopropanol	Isopropanol
SGB	Sika Aktivator-205	Sika Cleaner P
HKB	Isopropanol (Wischentfettung) + TESA® 60150 Adhesion Promoter Universal	Isopropanol (Wischentfettung) + TESA® 60151 Adhesion Promoter Glass

4.3.2.3 Testaufbau und Auswertung

Die experimentellen Untersuchungen an modifizierten H-Proben werden mit Hilfe einer elektromechanischen Universalprüfmaschine der Fa. Instron durchgeführt. Die Maschinensteuerung erfolgt über eine Instron-Software. Die Krafterfassung erfolgte über eine 10 kN-Kraftmessdose. Die Maschine ist für die Genauigkeitsklasse 1 (nach DIN EN ISO 7500-1) kalibriert. Die Krafteinleitung in die Probe erfolgt über eine in den Laststrang integrierte Testvorrichtung. Diese ist an das Arcan-Experiment angelehnt und besteht aus zwei Konturblechen. Mit Hilfe der eingebrachten Bohrlöcher können die Bleche über Passschrauben in unterschiedlichen Konfigurationen eingebaut werden. Dies ist nachfolgend in Abbildung 4.30 dargestellt. Zur Messung der Proben-

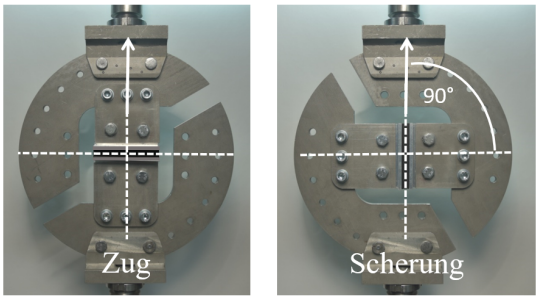


Abbildung 4.30: Schematische Darstellung der Einstellung der Testvorrichtung für den Modus Zug sowie Scherung
(Quelle: eigene Darstellung)

verformung wird ein korrigierter Traversenweg verwendet. In Anlehnung an (180) wird eine Wegkorrektur nach Gleichung 4.3 durchgeführt.

$$\Delta u_K = \Delta u_{Traverse} - \frac{F}{C_{Testaufbau}} \tag{4.3}$$

Zur Bestimmung des korrigierten Traversenswegs wird ein Referenzexperiment zur Ermittlung der Steifigkeit des Testaufbaus durchgeführt. Hierzu werden die beiden Konturbleche mit einem Stahlblech mit Schrauben verbunden. Mit dieser Vorgehensweise kann eine Steifigkeit von $C_{Testaufbau}$ = 28 kN/mm ermittelt werden.
Die Experimente werden als quasi-statisch angesehen, was bedeutet, dass in dem Versuchsprogramm dynamische Effekte keine maßgebenden Einflüsse auf die experimentellen Ergebnisse haben.

4.3.2.4 Regelung

4.3.2.4.1 Nenndehnrate Gegenüber den zuvor durchgeführten Grunduntersuchungen werden in diesem Abschnitt fugenähnliche Proben mit unterschiedlichen Probekörpergeometrien untersucht. Als Regelungsmaß wird daher nachfolgend eine auf die Probekörperabmessungen bezogene Nenndehnrate verwendet.
Im Projekt (187) wurde hierfür eine nominelle Gleit- bzw. Nenndehnrate genutzt, um ein vergleichbares Regelungsmaß für Probekörper unterschiedlicher Schichtdicken zu schaffen. Diese wird in Anlehnung an (81) mit Hilfe der Höhe der ETAG H-Probe ($d_{K,H-Probe}$ = 12 mm) sowie der Vorschubgeschwindigkeit v_{ETAG} = 5mm/min wie folgt ermittelt:

$$\dot{\epsilon}_n = \frac{\Delta \epsilon_n}{\Delta t} = \frac{\Delta l}{l_0 * d_{K,H-Probe}}[min^{-1}] = \frac{5}{12}[min^{-1}] \tag{4.4}$$

Für die vorliegenden Zeitbereiche wird eine Darstellung in min^{-1} als sinnvoll angesehen, da übliche Darstellungen in sec^{-1} aufgrund der großen Unterschiede der untersuchten Geschwindigkeiten (siehe Abschnitt 4.3.4) ungünstige Zahlenformate ergeben würden. Die unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten v_T werden auf Basis der Schichtdicken $d_{K,2K-Silikone}$ = 6 mm und $d_{K,HKB}$ = 2 mm in Nenndehnraten $\dot{\epsilon}_n$ umgerechnet. Auf Basis dieser Annahmen ergeben sich für die unterschiedlichen Probekörpergeometrien die in Tabelle 4.19 dargestellten Nenndehnraten und Prüfgeschwindigkeiten.

Tabelle 4.19: Darstellung der Nenndehnraten in Abhängigkeit von den Probekörpertypen

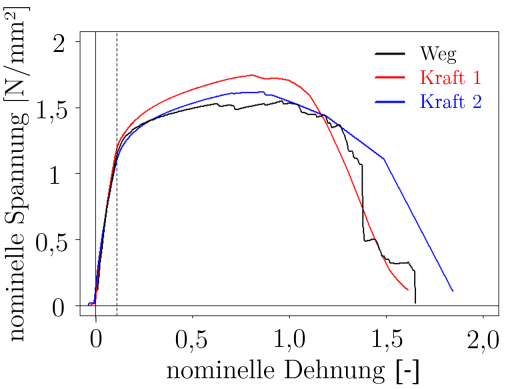
Geschwindigkeit v_T	**Nenndehnrate $\dot{\epsilon}_n$**	**Geometrie**
[mm/min]	**[min^{-1}]**	**[-]**
2,5	0,416	SGA & SGB, 12 x 6 x 100
2,5	0,416	SGA & SGB, 24 x 6 x 100
5	0,416	SGB, 12 x 12 x 100
5	0,416	SGB, 24 x 12 x 100

4.3.2.4.2 Versuchsdurchführung unter Kraftregelung Zunächst wird der Einfluss der Regelungsart (Kraft- und Wegregelung) auf das Tragverhalten der Proben untersucht. Hierzu wird eine Testreihe mit Regelung über eine konstante Kraftrate (Kraftregelung) durchgeführt und mit den Ergebnissen aus einem Experiment mit Wegregelung verglichen. Dies ist insofern von Interesse, als davon ausgegangen wird, dass insbesondere Staudrücke (Wind) und Luftdrücke sich aufbauende Kraftgrößen in Bezug auf die Klebfuge darstellen. Daher wird diese Regelungsart als realitätsnäher angesehen. Hinsichtlich der Durchführung der experimentellen Untersuchungen ist jedoch eine Wegregelung üblich und technisch reproduzierbarer umzusetzen. Um den Einfluss der unterschiedlichen Regelungsarten zu analysieren, werden die in Tabelle 4.20 dokumentierten Parameter untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Verlauf der Traversengeschwindigkeit bei der Kraftregelung stark abhängig von den Steifigkeitseigenschaften der Klebschicht ist. Bei annähernd linearem Verlauf der Kraft-Weg-Kennlinie (Spannung-Dehnung-Kennlinie) ist kein Unterschied zu den obligatorischen Verläufen bei Wegregelung festzustellen. Im nichtlinearen Verlauf ist jedoch zu erkennen, dass sich die Traversengeschwindigkeit wesentlich erhöht. Dies muss eintreten, um den gleichen Krafteintrag pro Zeitintervall zu gewährleisten.
Dies wird als plausibel angesehen, betrachtet man den Verlauf der Weg-Zeit-Kurve

Tabelle 4.20: Darstellung der getesteten Regelungsvarianten

Regelungs-art	**Nennspannungsrate** $\dot{\sigma_n}$	**Nenndehn-rate** $\dot{\epsilon_n}$	**Klebstoff / Geometrie**
[-]	$[\frac{N}{mm^2} * min^{-1}]$	$[min^{-1}]$	**[-]**
Weg	-	0,416	SGA, 24 x 6 x 100
Kraft 1	2,5	-	SGA, 24 x 6 x 100
Kraft 2	0,25	-	SGA, 24 x 6 x 100

(siehe Abbildung 4.32). Hier ist zu erkennen, dass eine wesentliche Erhöhung der Geschwindigkeit eintritt, um die experimentellen Randbedingungen der konstanten Kraftrate erfüllen zu können. Dies führt zu einer steiferen Werkstoffantwort, was auf das zeitabhängige Verhalten des Klebstoffs zurückgeführt wird.
Für die nachfolgenden Untersuchungen zum Auftreten von Kavitationseffekten unter Zugbelastung wird die Wegregelung als geeignet angesehen, da die Beeinflussung durch die Regelungsart für diesen Kurvenabschnitt als gering betrachtet wird.



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	24 mm
Höhe d_K	6 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGA
Aushärtung	7 d RT
Modus	Zug
Geschwin-digkeit	Tab. 4.20
Temperatur	RT

Abbildung 4.31: Spannung-Dehnung-Diagramm der mod. H-Probe (SGA, 24 mm x 6 mm x 100 mm) bei unterschiedlichen Regelungsvarianten nach Tabelle 4.20

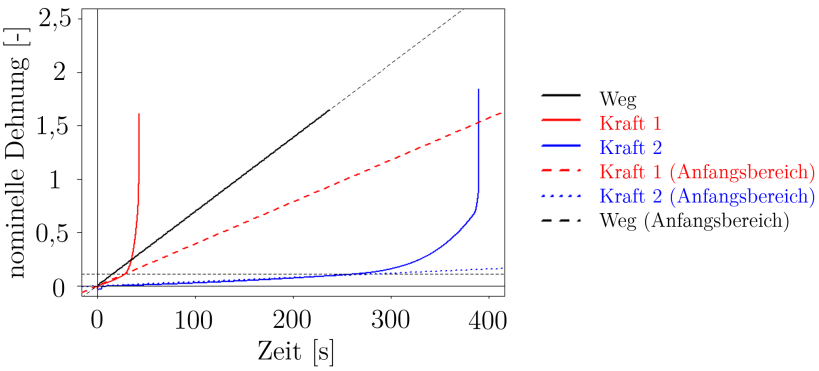


Abbildung 4.32: Zeitliche Veränderung der Nenndehnrate bei unterschiedlichen Regelungsvarianten nach Tabelle 4.20

4.3.3 Experimente zum Einfluss der Geometrie

4.3.3.1 Randbedingungen und Versuchsprogramm

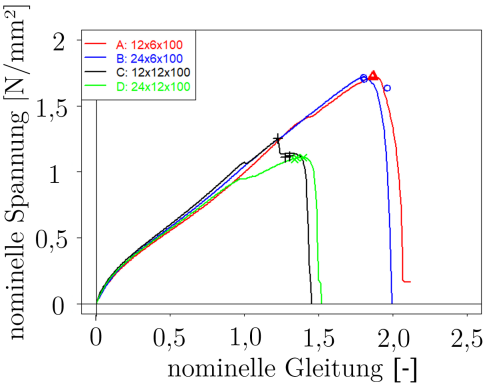
Die versuchstechnischen Untersuchungen zum Einfluss der Geometrie auf das Tragverhalten werden exemplarisch an geklebten Proben mit dem Werkstoff SGB durchgeführt. Die Grundlage bildet das in Tabelle 4.21 dargestellte Versuchsprogramm. Die Versuchsdurchführung erfolgt bei Raumtemperatur unter Anwendung der in Tabelle 4.19 dokumentierten Parameter. Die Ergebnisse dieses Testprogrammes werden nachfolgend getrennt nach Scherung und Zug beschrieben.

Tabelle 4.21: Testprogramm der quasistatischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens verschiedener Geometrien

Bezeichnung	**Klebstoff / Geometriebezeichnung**	**Nenndehn-/Gleitrate** $\dot{\epsilon_n}$ / $\dot{tan\gamma}$	**Scherung**	**Zug**
[-]	**[-]**	$[min^{-1}]$	**[-]**	**[-]**
A	SGB / 12x6x100	0,416	3	3
B	SGB / 24x6x100	0,416	3	3
C	SGB / 12x12x100	0,416	3	3
D	SGB / 24x12x100	0,416	3	3

4.3.3.2 Ergebnisse der Scherexperimente

Zunächst werden alle Querschnitte im Modus Scherung untersucht. Auf Basis der gemessenen Kraft-Verformung-Verläufe werden mit Hilfe der Nennabmessungen der Probekörper $\tau_n - tan\gamma$ -Verläufe berechnet. Diese Kurven sind für alle Probekörper in Abbildung 4.33 dargestellt. Zwischen den unterschiedlichen Geometrien kann mit dieser Vorgehensweise kein Unterschied infolge der getesteten Geometrie hinsichtlich des Steifigkeitsverlaufs ermittelt werden. Dieser Verlauf ist gekennzeichnet von einem nichtlinearen Anstieg bis zu einer Gleitung von $\tan\gamma$ = 0,21, ab dem die Kurve einen nahezu linearen Verlauf annimmt. Ab einem Bereich von $\tan\gamma$ = 0,85 können an den Probekörpern erste Anrisse verzeichnet werden. Diese beeinflussen vor allem die beiden Geometrien mit der großen Schichtdicke (12 mm x 12 mm x 100 mm und 24 mm x 12 mm x 100 mm) und leiten das Versagen in einem Bereich von $\tan\gamma$ = 1,4 - 1,5 ein. Die Proben mit den geringen Schichtdicken werden nicht so stark durch die auftretenden Anrisse in ihrem Tragverhalten beeinflusst. Die Kennlinie läuft hier bis zu einem Bereich von $\tan\gamma$ = 1,5 weiter, während der Anriss sich weiter in das Innere des Klebstoffs fortsetzt.



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	6/12 mm
Höhe d_K	6/12 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGB
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Scherung
Nenngleitrate	0,416 min^{-1}
Temperatur	RT

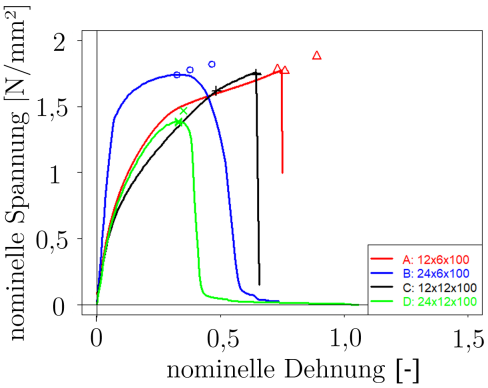
Abbildung 4.33: Ergebnis der Scherexperimente an modifizierten H-Proben (SGB)

Tabelle 4.22: Ergebnisse der Scherexperimente an modifizierten H-Proben (SGB)

Ergebnisse	**Bruchspannung**			**Bruchgleitung**		
Geometrie	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[-]	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
A 12x6x100	1,72	0,01	0,01	1,86	0,01	0,01
B 24x6x100	1,68	0,04	0,03	1,86	0,09	0,05
C 12x12x100	1,16	0,08	0,07	1,27	0,04	0,03
D 24x12x100	1,10	0,01	0,01	1,36	0,03	0,02

4.3.3.3 Ergebnisse der Zugexperimente

Gegenüber den Scherexperimenten können unter Zugbeanspruchung wesentliche Unterschiede im Verlauf der Kennlinien in Abhängigkeit von der Probekörpergeometrie festgestellt werden.
So zeigt sich, dass sich bei dem Probekörper mit dem größten Breite-/Höhe-Verhältnis (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm) auch die steifste Kennlinie im Zugexperiment einstellt. Ferner ist zu beobachten, dass die beiden Probekörpertypen mit identischem Breite-/Höhe-Verhältnis (Geometrie 12 mm x 6 mm x 100 mm und Geometrie 24 mm x 12 mm x 100 mm) im Anfangsbereich bis zu einer nominellen Dehnung von $\epsilon_n = 0,21$ auch einen ähnlichen Verlauf der Kennlinie aufzeigen. Die geringste Steifigkeit ist im Experiment mit dem Probekörpertyp festzustellen, der das geringste Verhältnis von Breite zu Höhe hat (Geometrie 12 mm x 12 mm x 100 mm).
Für die nachfolgenden Untersuchungen an den Silikonwerkstoffen wird aufgrund dieser Beobachtungen der Fokus auf die Geometrien B (Bezeichnung: 24x6x100) und A (Bezeichnung: 12x6x100) gelegt.



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	6/12 mm
Höhe d_K	6/12 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGB
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Zug
Nenndehnrate	0,416 min^{-1}
Temperatur	RT

Abbildung 4.34: Ergebnis der Zugexperimente an modifizierten H-Proben (SGB)

Tabelle 4.23: Ergebnisse Zugversuche modifizierte H-Proben (SGB)

Ergebnisse	**Bruchspannung**			**Bruchdehnung**		
Geometrie	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[-]	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
A 12x6x100	1,81	0,06	0,03	0,79	0,09	0,11
B 24x6x100	1,78	0,04	0,02	0,39	0,07	0,18
C 12x12x100	1,70	0,08	0,04	0,59	0,09	0,16
D 24x12x100	1,41	0,05	0,03	0,34	0,01	0,04

4.3.4 Experimente zum Einfluss der Nenndehnrate bei Raumtemperatur

4.3.4.1 Randbedingungen und Versuchsprogramm

Für die Analyse des Einflusses der Nenndehnrate werden drei verschiedene Testreihen durchgeführt. Dabei kommen die in Tabelle 4.24 dargestellten Traversengeschwindigkeiten und daraus resultierenden Nenndehnraten zur Anwendung.
Mit diesen Parametern wird das in Tabelle 4.25 dokumentierte Testprogramm durchgeführt. Für diese Testreihe werden auf Basis der Untersuchungen im Projekt P 1052

((187)) aus Gründen der Vergleichbarkeit für die Geometrie 12x6x100 (Tabelle 4.21) beide Silikonwerkstoffe (SGA und SGB) herangezogen.

Tabelle 4.24: Darstellung der drei getesteten Nenndehnraten

Bezeichnung	**Traversengeschwindigkeit** v_T	**Nenndehnrate** $\dot{\epsilon}_n$
[-]	**[mm/min]**	**[min^{-1}]**
1	0,025	0,00416
2	2,5	0,416
3	250	41,6

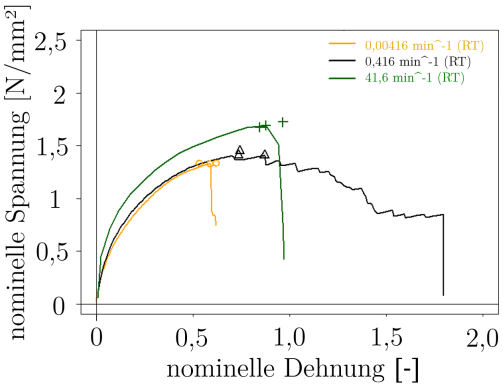
Tabelle 4.25: Testprogramm der quasistatischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens unter verschiedenen Nenndehnraten bei Raumtemperatur

Testreihe	**Werkstoff / Geometrie**	**Probekörper / Nenndehnrate** $\dot{\epsilon_n}$		
		0,00416	**0,416**	**41,6**
[-]	**[-]**	$[min^{-1}]$	$[min^{-1}]$	$[min^{-1}]$
1	SGA, 12 x 6 x 100	3	3	3
2	SGA, 24 x 6 x 100	3	3	3
3	SGB, 24 x 6 x 100	3	3	3

4.3.4.2 Ergebnisse Werkstoff SGA

Es ist zu beobachten, dass die Kennlinien der Experimente an der Geometrie 12 mm x 6 mm x 100 mm bei mittlerer ($0,416\ min^{-1}$) sowie langsamer Nenndehnrate ($0,00416\ min^{-1}$) einen nahezu identischen Verlauf im Anfangsbereich zeigen. Hinsichtlich der ertragbaren Nennfestigkeiten kann ein geringer Unterschied von im Mittel $\sigma_n = 1,33\ N/mm^2$ zu $\sigma_n = 1,42\ N/mm^2$ (siehe Tabelle 4.26) bestimmt werden. Für die höchste Nenndehnrate ($41,6\ min^{-1}$) ist der Kurvenverlauf oberhalb der beiden anderen Geschwindigkeiten zu finden und das Versagen tritt durch die Durchtrennung des Probekörpers im Bereich einer nominellen Dehnung von ϵ_n = 0,89 ein.

Der Versagensvorgang bei den langsameren Experimenten hingegen tritt bei Überschreitung eines Grenzbereiches der nominellen Dehnung ($\epsilon_n > 0{,}5$) durch das Wachsen entstandener Risse über die Zeit ein, ohne dass sich die Kennlinie dabei über weitere Dehnungsbereiche ausbilden kann. Für die Experimente mit der mittleren Nenndehnrate ist zu erkennen, dass sich die Kennlinie über weite Dehnungsbereiche ausbilden kann (siehe Abbildung 4.35). Das Einreißen der Risse in die Klebfuge verläuft in diesem Fall für diese Probekörpergeometrie und den getesteten Belastungsmodus so, dass es zeitlich mit der Geschwindigkeit der Belastung korreliert. Dies gestattet ein sukzessives Risswachstum, was eine Erklärung für den ausgeprägten Kurvenverlauf und die hohe nominelle Bruchdehnung darstellen kann.
Dies trifft in dieser Form nicht auf die Probekörperform 24 mm x 6 mm x 100 mm zu. Dies wird auf die geringe Auswirkung äußerer Risse auf die Beeinträchtigung der gesamten Klebfläche zurückgeführt (siehe Abbildung 4.36).

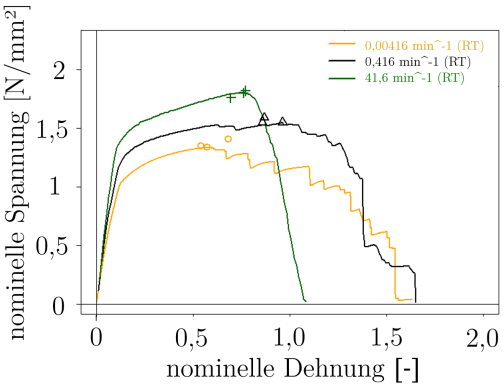


Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	12 mm
Höhe d_K	6 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Zug
Nenndehnrate	0,00416/0,416/41,6 min^{-1}
Temperatur	RT

Abbildung 4.35: Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 12x6x100)

Tabelle 4.26: Versuchsergebnisse (SGA, Geometrie 12x6x100)

Nenndehnrate	**Bruchspannung**			**Bruchdehnung**		
$\dot{\epsilon_n}$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^{-1}**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
0,00416	1,33	0,01	0,01	0,58	0,04	0,07
0,416	1,42	0,03	0,02	0,78	0,08	0,10
41,6	1,69	0,02	0,01	0,89	0,06	0,07



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	24 mm
Höhe d_K	6 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Zug
Nenndehnrate	0,00416/0,416/41,6 min^{-1}
Temperatur	RT

Abbildung 4.36: Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 24x6x100)

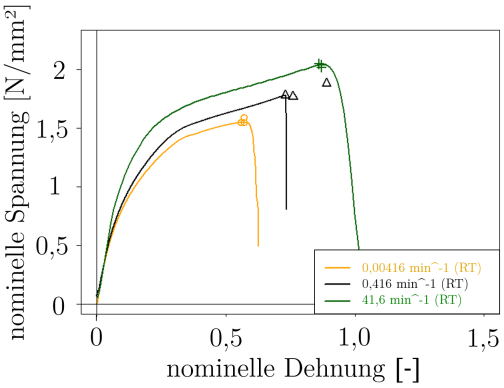
Tabelle 4.27: Versuchsergebnisse (SGA, Geometrie 24x6x100)

Nenndehnrate	**Bruchspannung**			**Bruchdehnung**		
$\dot{\epsilon_n}$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^{-1}**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
0,00416	1,36	0,04	0,03	0,59	0,07	0,12
0,416	1,56	0,03	0,02	0,89	0,06	0,06
41,6	1,79	0,03	0,02	0,74	0,04	0,05

4.3.4.3 Ergebnisse Werkstoff SGB

Für den Klebstoff SGB kann ein ähnliches Verhalten festgestellt werden. Es ist auch hier zu beobachten, dass sich die Kennlinien der geringen (0,00416 min^{-1}) wie auch der mittleren Nenndehnrate (0,416 min^{-1}) im Anfangsbereich auf einem vergleichbaren Steifigkeitsniveau befinden. Mit zunehmender Dehnung steigt die Kurve der mittleren Nenndehnrate auf ein leicht höheres Niveau (siehe Abbildung 4.37) an. Dieses Niveau bleibt bis zum Zeitpunkt des Versagens der Probe erhalten. Der charakteristische Plateaubereich wird bei allen drei Nenndehnraten erreicht und ist ähnlich dem der Experimente am Werkstoff SGA mit dem Querschnitt 24 mm x 6 mm x 100 mm. Die Proben versagen quasi instantan nach dem Entstehen von Rissen an den Außenbereichen. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zum Versagensvorgang der Proben

mit dem Werkstoff SGA. Die ertragbaren Nennfestigkeiten sowie die Bruchdehnungen steigen in dieser Testreihe mit zunehmender Nenndehnrate an.



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	12 mm
Höhe d_K	6 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGB
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Zug
Nenndehnrate	0,00416/0,416/41,6 min^{-1}
Temperatur	RT

Abbildung 4.37: Ergebnis der Zugexperimente (SGB, Geometrie 12x6x100)

Tabelle 4.28: Versuchsergebnisse (SGB, Geometrie 12x6x100)

Nenndehnrate	**Bruchspannung**			**Bruchdehnung**		
$\dot{\epsilon_n}$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^{-1}**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
0,00416	1,56	0,03	0,02	0,57	0,01	0,01
0,416	1,81	0,06	0,03	0,79	0,09	0,11
41,6	2,03	0,02	0,01	0,87	0,01	0,01

4.3.5 Experimente nach Feuchteimmersion

4.3.5.1 Grundlage und Versuchsprogramm

Der Feuchtegehalt des Klebstoffs beeinflusst die mechanischen Eigenschaften elastischer Dickschichtklebungen wesentlich (siehe z.B. (132)). Daher wird in einer eigenen Testreihe untersucht, wie sich dieser Einfluss auf das Tragverhalten unter Zugbelastung auswirkt. Dies geschieht nachfolgend an Proben mit dem Werkstoff SGA für die drei Nenndehnraten nach Abschnitt 4.3.4 (siehe Tabelle 4.29).

Tabelle 4.29: Testprogramm der quasi-statischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens nach Wasserlagerung für 42 Tage bei +45 $°C$ ohne Rückkonditionierung

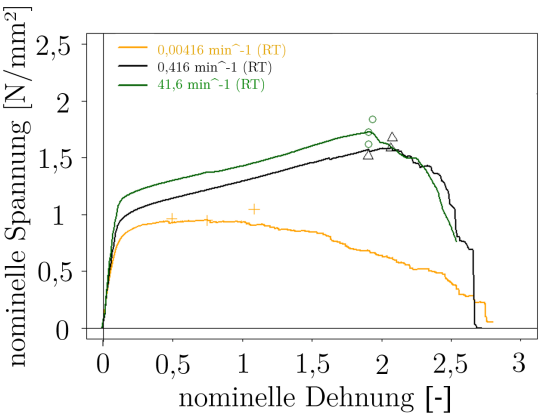
Lagerung	**Werkstoff / Geometrie**	**Probekörper / Nenndehnrate** $\dot{\epsilon_n}$		
		0,00416	**0,416**	**41,6**
[-]	**[-]**	$[min^{-1}]$	$[min^{-1}]$	$[min^{-1}]$
42 Tage Wasserlagerung bei +45 $°C$	SGA, 24 x 6 x 100	3	3	3

Auf Basis der Ergebnisse zur Andauer von Feuchteperioden sowie der Temperaturwirkung (Kapitel 3) wird das Ziel verfolgt, eine nahezu vollständige Wassersättigung der Probekörper zu erreichen. Hierzu werden alle Proben nach der Herstellung und Aushärtung für 42 Tage bei +45 $°C$ im Wasserbad gelagert und im Anschluss ohne Rücktrocknung zerstörend geprüft. Dafür wurden bereits Voruntersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes P 1052 (187) im Modus Scherung durchgeführt. Die Vorgehensweise hinsichtlich der Auslagerung ist an diese Untersuchungen angelehnt.

4.3.5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.38 dargestellt. Es kann im vorliegenden Fall gezeigt werden, dass die Auslagerung ohne Rücktrocknung die Dehnfähigkeit der Probekörper wesentlich vergrößert. Dies ist anhand der großen Bruchdehnungen (siehe Tabelle 4.30) ersichtlich, die unter den beiden höheren Nenndehnraten (0,416 min^{-1} und 41,6 min^{-1}) ermittelt werden können. Dieser Effekt wurde bereits im Projekt P 1052 im Scherexperiment nach Wasserlagerung ohne Rücktrocknung gezeigt (187). In Ergänzung hierzu ist auch im Experiment mit der geringsten Nenndehnrate (0,00416 min^{-1}) eine ausgeprägte Verformungsfähigkeit zu beobachten. Die maximalen Lasten werden hier jedoch bereits bei mittleren Bruchdehnungen von $\epsilon_n = 0,30$ erreicht. Das wird hier wiederum darauf zurückgeführt, dass sich die entstandenen Risse aufgrund der geringen Testgeschwindigkeit sukzessive in das Fugeninnere fortpflanzen können. Demgegenüber sind in Analogie zu den vorherigen Experimenten die Versagensmechanismen bei den beiden hohen Geschwindigkeiten durch den Traversenvorschub dominiert. Das bedeutet, dass demgegenüber das eigene Wachstum der entstandenen Risse hier aufgrund der anzunehmenden geringen Wachstumsgeschwindigkeit eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Abhängigkeit des Tragverhaltens bleibt jedoch über die drei untersuchten Nenndehnraten qualitativ erhalten. Dies kann anhand der Kurvenverläufe in Abbildung 4.38 gezeigt werden. Insbesondere das Eintreten von Kavitationseffekten, gekennzeichnet durch die Steifigkeitsreduzierung, scheint in Analogie zu den Versuchen bei Raumtemperatur von der Nenndehnrate beeinflusst. So kann festgestellt werden, dass mit zunehmender Geschwindigkeit auch die Spannung ansteigt, ab welcher das Abfallen der Steifigkeit zu beobachten ist.



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	24 mm
Höhe d_K	6 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Zug
Nenndehnrate	0,00416/0,416/41,6 min^{-1}
Temperatur	RT
Vorkonditionierung	42 d Wasserlagerung bei +45 $°C$

Abbildung 4.38: Ergebnis der Zugexperimente nach Wasserlagerung ohne Rücktrocknung (SGA, Geometrie 24x6x100)

Tabelle 4.30: Ergebnisse nach Wasserlagerung ohne Rücktrocknung

Nenndehnrate	**Bruchspannung**			**Bruchdehnung**		
$\dot{\epsilon_n}$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^{-1}**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
0,00416	0,91	0,05	0,05	0,30	0,04	0,12
0,416	1,59	0,08	0,05	2,02	0,10	0,05
41,6	1,73	0,11	0,06	1,92	0,02	0,01

4.3.6 Experimente unter Tief- und Hochtemperatur

4.3.6.1 Grundlage und Versuchsprogramm

Die Experimente bei verschiedenen Temperaturen werden mit dem Klebstoff SGA durchgeführt. Um den Einfluss der Temperatur auf das Tragverhalten der Proben zu analysieren, werden, aufbauend auf den Experimenten bei RT, weitere Testreihen unter hohen und tiefen Temperaturen durchgeführt. Darüber hinaus werden ferner zwei verschiedene Nenndehnraten sowie zwei unterschiedliche Geometrien im Rahmen dieses Versuchsprogramms untersucht. Das Parameterfeld ist nachfolgend in Tabelle 4.31 dokumentiert.

Tabelle 4.31: Testprogramm der quasi-statischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens unter verschiedenen Nenndehnraten bei hohen (T = +80 $^\circ C$) und tiefen Temperaturen (T = -20 $^\circ C$)

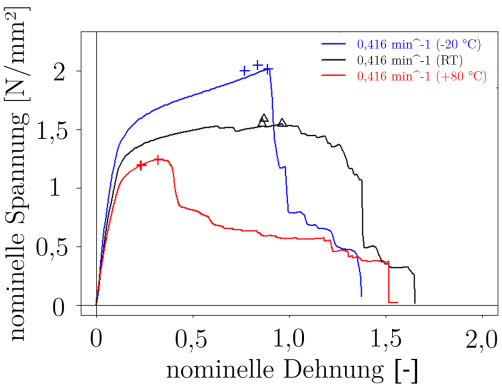
Bezeichnung	**Werkstoff / Geometrie**	**Anzahl Probekörper / Nenndehnrate** $\dot{\epsilon_n}$		
T		**0,00416**	**0,416**	**41,6**
$[^\circ C]$	**[-]**	$[min^{-1}]$	$[min^{-1}]$	$[min^{-1}]$
-20	SGA, 12 x 6 x 100	-	3	3
-20	SGA, 24 x 6 x 100	-	3	3
$+80$	SGA, 12 x 6 x 100	-	3	3
$+80$	SGA, 24 x 6 x 100	-	3	3

4.3.6.1.1 Durchführung der Experimente Der Laststrang der Prüfvorrichtung kann in eine Temperierkammer integriert werden, was die Durchführung von experimentellen Untersuchungen bei verschiedenen Temperaturstufen gestattet. Die tiefen Temperaturen werden mit Hilfe einer Flüssigstickstoffkühlung, die hohen Temperaturen mit Heizelementen erreicht. Die Temperaturen werden hierbei in der Kammer durch eigene Sensoren erfasst und sind während der Versuchsdurchführung konstant. Vor der Durchführung der Experimente wird zur Kompensation von temperaturbedingten Dehnungseffekten der Prüfvorrichtung mindestens 2 Stunden auf der entsprechenden Temperaturstufe vorkonditioniert. Begleitende Vergleichsmessungen der temperaturabhängigen Verformung haben ergeben, dass sich ab diesem Zeitraum für den

gewählten Versuchsaufbau mit Bezug auf die Raumtemperatur keine weiteren messbaren Verformungen einstellen. Weiterhin kann festgestellt werden, dass das für den Wechsel der Proben kurzzeitig notwendige Türöffnen keinen signifikanten Einfluss auf die temperaturbedingte Ausdehnung des Testaufbaus hat. Die zu testenden Probekörper werden während dieses Zeitraums lastfrei für einen Zeitraum von 30-45 Minuten vorkonditioniert.

4.3.6.2 Ergebnisse

Es kann für beide Geometrien und Nenndehnraten festgestellt werden, dass die erzielten Maximalfestigkeiten bei tiefen Temperaturen ($-20\ °C$) die der Raumtemperaturexperimente übersteigen. Der gegenteilige Effekt wird bei hohen Temperaturen ($+80\ °C$) erzielt. Hier sinken für beide Geometrien und Nenndehnraten die erzielte Nennfestigkeit sowie die Bruchdehnung ab. Diese Effekte können ausgeprägter bei der Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm beobachtet werden. So gleichen sich für die Geometrie 12 mm x 6 mm x 100 mm die Kurven für die hohen Temperaturen denen der Raumtemperaturkurven an. Daraus resultieren Nennfestigkeiten mit ähnlicher Größenordnung. Demgegenüber setzen sich die Kurvenverläufe für tiefe Temperaturen hier deutlich nach oben ab.
Für beide Geometrien kann ein Plateaubereich identifiziert werden. Dieser wird insbesondere durch die Testreihen bei tiefen Temperaturen und hohen Nenndehnraten für die Geometrie 12 mm x 6 mm x 100 mm klar erkennbar. Dieser Bereich tritt in erster Näherung unabhängig von Temperatur und Nenndehnrate bei Überschreitung einer nominellen Dehnungsgrenze ein. Für die gedrungene Geometrie (24 mm x 6 mm x 100 mm) liegt dieser im Bereich von ca. $\epsilon_n = 0,1$ und bei der Geometrie 12 mm x 6 mm x 100 mm von ca. $\epsilon_n = 0,3$. Das Auftreten dieser Bereiche wird mit dem Eintreten von Kavitationseffekten in Verbindung gebracht. Die Bruchbilder sind in Analogie zu den Experimenten bei Raumtemperatur durchgehend kohäsiv.

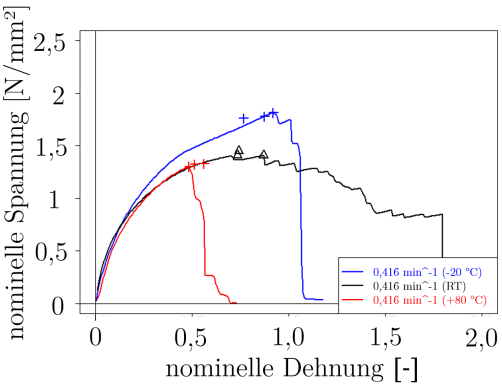


Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	24 mm
Höhe d_K	6 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Zug
Nenndehnrate	0,416 min^{-1}
Temperatur	-20 / RT / +80
Vorkonditionierung	RT

Abbildung 4.39: Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 24x6x100)

Tabelle 4.32: Ergebnisse bei hohen und tiefen Temperaturen (SGA, Geometrie 24x6x100, Nenndehnrate: 0,416 min^{-1})

Temperatur	Bruchspannung			Bruchdehnung		
T	$\overline{x}$	sd	VarK	$\overline{x}$	sd	VarK
[$°C$]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[-]	[-]	[-]	[-]
+80	1,21	0,03	0,02	0,26	0,05	0,19
-20	2,02	0,03	0,01	0,83	0,06	0,07

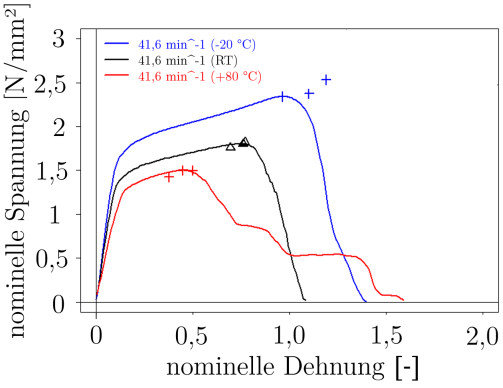


Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	12 mm
Höhe d_K	6 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Zug
Nenndehnrate	0,416 min^{-1}
Temperatur	-20 / RT / +80
Vorkonditionierung	RT

Abbildung 4.40: Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 12x6x100)

Tabelle 4.33: Ergebnisse bei hohen und tiefen Temperaturen (SGA, Geometrie 12x6x100, Nenndehnrate: 0,416 min^{-1})

Temperatur	Bruchspannung			Bruchdehnung		
T	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[$°C$]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[-]	[-]	[-]	[-]
+80	1,32	0,01	0,01	0,52	0,04	0,07
-20	1,78	0,03	0,02	0,85	0,08	0,09

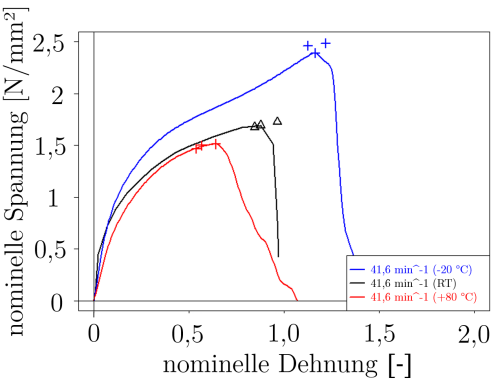


Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	24 mm
Höhe d_K	6 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Zug
Nenndehnrate	41,6 min^{-1}
Temperatur	-20 / RT / +80
Vorkonditionierung	RT

Abbildung 4.41: Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 24x6x100)

Tabelle 4.34: Ergebnisse bei hohen und tiefen Temperaturen (SGA, Geometrie 24x6x100, Nenndehnrate: 41,6 min^{-1})

Temperatur	Bruchspannung			Bruchdehnung		
T	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[$°C$]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[-]	[-]	[-]	[-]
+80	1,47	0,04	0,03	0,44	0,06	0,14
-20	2,42	0,10	0,04	1,08	0,11	0,10



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	12 mm
Höhe d_K	6 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	SGA
Härtung	7 d RT 3 d +35 $°C$
Modus	Zug
Nenndehnrate	41,6 min^{-1}
Temperatur	-20 / RT / +80
Vorkonditionierung	RT

Abbildung 4.42: Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 12x6x100)

Tabelle 4.35: Ergebnisse bei hohen und tiefen Temperaturen (SGA, Geometrie 12x6x100, Nenndehnrate: 41,6 min^{-1})

Temperatur	Bruchspannung			Bruchdehnung		
T	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[$°C$]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[-]	[-]	[-]	[-]
+80	1,49	0,02	0,02	0,58	0,05	0,09
-20	2,45	0,05	0,02	1,17	0,05	0,04

4.3.7 Kombinierte raten- und temperaturabhängige Scher- und Zugexperimente (Werkstoff HKB)

4.3.7.1 Grundlage und Versuchsprogramm

Wie die Ergebnisse der DMTA-Untersuchungen gezeigt haben, kann an dem Klebstoffsystem HKB die ausgeprägteste Temperatur- und Zeitabhängigkeit aller drei Klebstoffe im untersuchten Temperaturbereich festgestellt werden. Dies kann auch anhand der durchgeführten experimentellen Untersuchungen bei tiefen und hohen Temperaturen an fugenähnlichen Proben im Projekt P 1052 (187) so ermittelt werden.
Die Analyse der Zeit- und Temperaturabhängigkeit wird daher an Probekörpern durchgeführt, die mit dem Werkstoff HKB gefügt sind. Dies geschieht durch Erweiterung

der Anzahl der betrachteten Temperatur- und Nenndehnratenstufen gegenüber den Untersuchungen mit den Silikonprobekörpern im vorherigen Abschnitt.

4.3.7.2 Experimente bei Raumtemperatur

4.3.7.2.1 Grundlage und Versuchsprogramm Zunächst werden Experimente bei Raumtemperatur bei fünf unterschiedlichen Nenndehnraten durchgeführt. Mit Hilfe der Nenndicke ($d_K = 2$ mm) ergeben sich diese aus unterschiedlichen Testgeschwindigkeiten (siehe Tabelle 4.36). Das Versuchsprogramm wird für Scherung und Zug durchgeführt und ist in Tabelle 4.37 dargestellt. Anstelle der Bruchdehnung wird neben der Bruchspannung das 1. Spannungsmaximum ausgewertet. Dieses wird für die Betrachtung der Zeit- und Temperaturabhängigkeit des beobachteten Kavitationseffektes als ein wichtiges Kriterium angesehen.

Tabelle 4.36: Darstellung der fünf getesteten Nenndehnraten

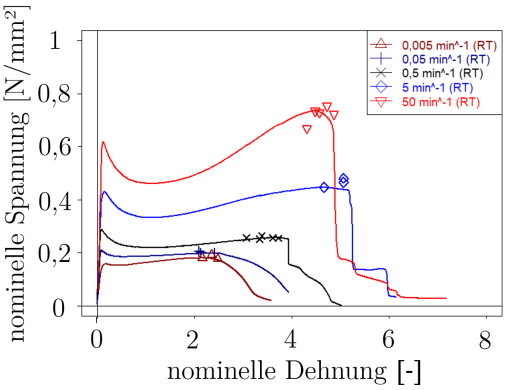
Bezeichnung	**Traversengeschwindigkeit**	**Nenndehnrate/-gleitrate**
	v_T	$\dot{\epsilon}_n/\dot{tan\gamma}$
[-]	**[mm/min]**	**[min^{-1}]**
1	0,01	0,005
2	0,1	0,05
3	1	0,5
4	10	5
5	100	50

4.3.7.2.2 Ergebnisse der Zugexperimente Im Rahmen der Zugexperimente zeigt sich ein ausgeprägtes ratenabhängiges Verhalten. Der Verlauf der Kennlinien ist über alle 5 Nenndehnraten qualitativ ähnlich, was in Abbildung 4.43 dargestellt ist. Die Verläufe sind gekennzeichnet von einem zunächst nahezu linearen Anstieg der Kennlinie. Am Ende dieses Bereiches wird ein erstes Kraftmaximum in der Kennlinie erreicht. Dieses wird bei allen Experimenten in einem Dehnungsbereich von bis ca. $\epsilon_n = 0,165$ erreicht und mit dem Eintreten von Kavitationseffekten im Klebstoff in Verbindung

Tabelle 4.37: Testprogramm der quasi-statischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens unter verschiedenen Nenndehnraten bei Raumtemperatur in Scherung und Zug

Nenndehnrate/-gleitrate	**Werkstoff / Geometrie**	**Modus**	
$\dot{\epsilon}_n/t\dot{a}n\gamma$		**Zug**	**Scherung**
$[min^{-1}]$	**[-]**	**[-]**	**[-]**
0,005	HKB, 25 x 2 x 100	3	3
0,05	HKB, 25 x 2 x 100	3	3
0,5	HKB, 25 x 2 x 100	3	3
5	HKB, 25 x 2 x 100	3	3
50	HKB, 25 x 2 x 100	3	3

gebracht. Es ist zu beobachten, dass die Testgeschwindigkeit hier die Höhe der Spannung beeinflusst, das beobachtete Dehnungsniveau beim Peak jedoch in einem qualitativ ähnlichem Bereich liegt. Eine Auswirkung der Nenndehnrate ist ferner in der Ausprägung der Krümmung der Kurve um das 1. Maximum zu verzeichnen. Diese nimmt bei sinkender Nenndehnrate ab. Bei den zwei niedrigsten Nenndehnraten ist, ausgehend vom ersten Maximum, ein geringer $(> 10\%)$ Spannungsabfall bei zunehmender Dehnung zu verzeichnen. Im dritten Bereich der Kennlinien wird das Versagen der Proben eingeleitet und ein zweites lokales Maximum im Kraftverlauf wird erreicht.



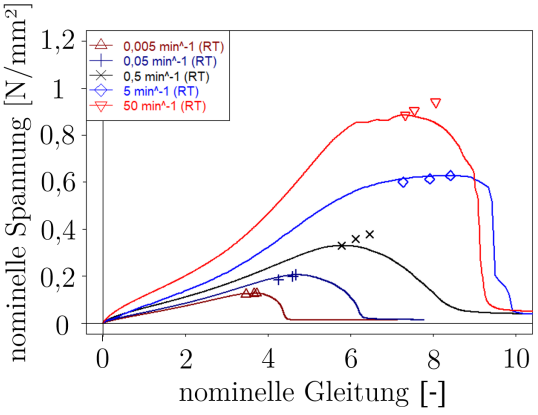
Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	25 mm
Höhe d_K	2 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	HKB
Aufziehzeit	7d RT
Modus	Zug
Nenndehnrate	Tab. 4.37
Temperatur	RT

Abbildung 4.43: Ergebnis der Zugexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100)

Tabelle 4.38: Ergebnisse Zugexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100)

Nenndehnrate	**1. Maximum**			**Bruchspannung**		
$\dot{\epsilon}_n$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
$[min^{-1}]$	$[N/mm^2]$	$[N/mm^2]$	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
0,005	0,161	0,006	0,04	0,183	0,008	0,043
0,05	0,209	0,002	0,010	0,201	0,004	0,018
0,5	0,286	0,004	0,013	0,256	0,004	0,016
5	0,448	0,018	0,040	0,464	0,017	0,036
50	0,591	0,021	0,036	0,722	0,031	0,043

4.3.7.2.3 Ergebnisse der Scherexperimente Die in den Zugexperimenten beobachteten Rateneffekte können auch an der modifizierten H-Probe unter Scherung beobachtet werden. Auch hier kann ein Ansteigen der Steifigkeit wie auch der ertragbaren Nennfestigkeiten bei zunehmender Nenndehnrate festgestellt werden (siehe Tabelle 4.39). Zudem ist eine Tendenz zur Steigerung der Verformungsfähigkeit anhand der steigenden Bruchgleitungen im Rahmen der durchgeführten Versuche festzustellen. Dies ist anhand der Kennlinien in Abbildung 4.44 ersichtlich.



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	25 mm
Höhe d_K	2 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	HKB
Aufziehzeit	7d RT
Modus	Scherung
Nenngleitrate	Tab. 4.37
Temperatur	RT

Abbildung 4.44: Ergebnis der Scherexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100)

Tabelle 4.39: Ergebnisse Scherexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100)

Nenngleitrate	**Bruchspannung**			**Bruchgleitung**		
$\dot{tan\gamma}$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
$[min^{-1}]$	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**	**[-]**
0,005	0,12	0,002	0,019	6,33	0,20	0,02
0,05	0,21	0,006	0,028	6,31	0,10	0,02
0,5	0,38	0,008	0,021	5,62	0,26	0,02
5	0,61	0,030	0,049	6,33	0,20	0,02
50	0,86	0,089	0,103	6,31	0,10	0,02

4.3.7.3 Experimente unter hohen und tiefen Temperaturen

4.3.7.3.1 Grundlage und Versuchsprogramm In Ergänzung zu den Experimenten bei Raumtemperatur wird zur Erweiterung der Datenbasis ein Testprogramm mit kombinierten raten- und temperaturabhängigen Versuchen durchgeführt. Hierzu werden die in Tabelle 4.40 (Zug) und Tabelle 4.41 (Scherung) dargestellten Temperatur- und Dehnratenvariationen untersucht.

Tabelle 4.40: Testprogramm der Experimente bei verschiedenen Temperaturen und Nenndehnraten (Modus: Zug)

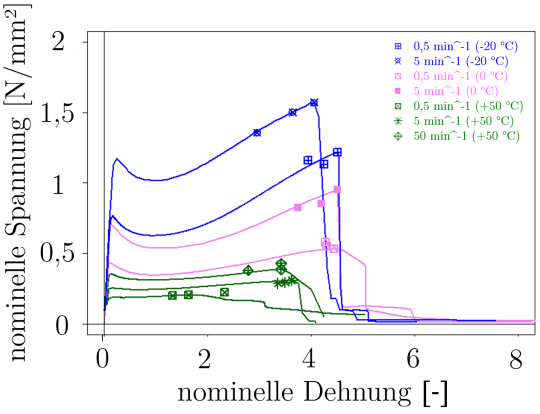
Testreihe		**Anzahl / Temperatur**				
Nr.	**Nenndehnrate**	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
[-]	**[**min^{-1}**]**	**-20** $^\circ C$	**0** $^\circ C$	**+23** $^\circ C$	**+50** $^\circ C$	**+80** $^\circ C$
1	0,5	3	3	-	3	-
2	5	3	3	-	3	-

Die Ergebnisse dieser Testreihen werden nachfolgend wiedergegeben.

Tabelle 4.41: Testprogramm der Experimente bei verschiedenen Temperaturen und Nenndehnraten (Modus: Scherung)

Testreihe		**Anzahl / Temperatur**				
Nr.	**Nenngleitrate**	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
[-]	$[\dot{\tan\gamma}]$	**-20** $°C$	**0** $°C$	**+23** $°C$	**+50** $°C$	**+80** $°C$
1	0,5	3	3	-	3	-
2	5	3	3	-	3	-
3	50	3	3	-	3	-

4.3.7.3.2 Zugexperimente Die Zugexperimente zeigen im Rahmen der erweiterten Testreihen ähnliche Abhängigkeiten in Bezug auf Zeit und Temperatur wie im Projekt P 1052 (187) beobachtet. Die charakteristische Kurvenform bleibt hier über die untersuchten Temperaturstufen und Nenndehnratenbereiche erhalten. Jedoch sind Veränderungen in der Ausprägung zu erkennen, die sich durch ein stärkeres Abfallen der Kurve nach dem ersten Maximum bemerkbar machen, wenn höhere Nenndehnraten und tiefere Temperaturen vorliegen. Die Ausprägung dieses Effektes reduziert sich bei höheren Temperaturen. Bei der Temperaturstufe $T = +50\ °C$ ist das nicht mehr direkt zu identifizieren. Die Kurve ist hier nur noch durch einen Steifigkeitsabfall gekennzeichnet, jedoch ohne dass eine ausgeprägte negative Steigung vorhanden ist. Ferner korrelieren höhere Nenndehnraten und tiefere Temperaturen mit einer Vergrößerung der gemessenen Kraft am ersten Steifigkeitsabfall der Kurve.



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	25 mm
Höhe d_K	2 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	HKB
Aufziehzeit	7 d RT
Modus	Scherung
Nenndehnrate	Tab. 4.40
Temperatur	Tab. 4.40

Abbildung 4.45: Ergebnis der Zugexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100)

Tabelle 4.42: Ergebnisse Zugexperimente bei T = -20 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100)

Nenndehnrate	**1. Maximum**			**Bruchspannung**		
$\dot{\epsilon}_n$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^-1**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**
$0,5$	0,77	0,037	0,048	1,17	0,043	0,037
5	1,18	0,022	0,019	1,47	0,109	0,074

Tabelle 4.43: Ergebnisse Zugexperimente bei T = 0 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100)

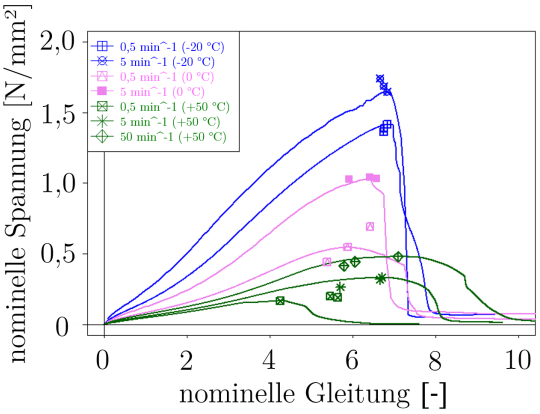
Nenndehnrate	**1. Maximum**			**Bruchspannung**		
$\dot{\epsilon}_n$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^-1**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**
$0,5$	0,46	0,026	0,059	0,55	0,024	0,043
5	0,69	0,025	0,036	0,88	0,067	0,077

Tabelle 4.44: Ergebnisse Zugexperimente bei T = +50 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100)

Nenndehnrate	**1. Maximum**			**Bruchspannung**		
$\dot{\epsilon}_n$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^-1**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**
$0,5$	0,18	0,001	0,004	0,21	0,013	0,064
5	0,25	0,006	0,023	0,29	0,011	0,035
50	0,37	0,019	0,051	0,39	0,026	0,066

4.3.7.3.3 Scherexperimente Die bei Raumtemperatur festgestellte Tendenz zur Ratenabhängigkeit der Bruchgleitung kann hier auf Basis der durchgeführten Experimente nicht in derselben Ausprägung bestätigt werden. Hierzu muss angemerkt werden, dass die Experimente bei T = +50 $°C$ und der kleineren Nenngleitrate ($\dot{\tan\gamma} =$

0,5 min^{-1}) teiladhäsive Bruchbilder aufwiesen. Diese Effekte wurden bereits im Projekt P 1052 bei den Experimenten unter T = +80 °C festgestellt (187), wo das Bruchbild gekennzeichnet war von flächigem Adhäsionsversagen. Ein Adhäsionsversagen dieser Ausprägung wird in den durchgeführten Experimenten im Rahmen dieser Arbeit nicht festgestellt. Dies wird in Abschnitt 4.3.8.4 unter Darstellung der entsprechenden Bruchbilder weiter diskutiert.



Probe	mod. H-Probe
Breite b_K	25 mm
Höhe d_K	2 mm
Länge l_K	100 mm
Klebstoff	HKB
Aufziehzeit	7 d RT
Modus	Scherung
Nenngleitrate	Tab. 4.41
Temperatur	Tab. 4.41

Abbildung 4.46: Ergebnis der Scherexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100)

Tabelle 4.45: Ergebnisse Scherexperimente bei T = -20 °C (HKB, Geometrie 25x2x100)

Nenngleitrate	**1. Maximum**			**Bruchspannung**		
$\dot{tan\gamma}$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^{-1}**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**
0,5	0,77	0,037	0,048	1,17	0,043	0,037
5	1,18	0,022	0,019	1,47	0,109	0,074

Tabelle 4.46: Ergebnisse Scherexperimente bei T = 0 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100)

Nenngleitrate	**1. Maximum**			**Bruchspannung**		
$\dot{tan\gamma}$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^{-1}**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**
$0,5$	0,46	0,026	0,059	0,55	0,024	0,043
5	0,73	0,071	0,096	0,876	0,067	0,077

Tabelle 4.47: Ergebnisse Scherexperimente bei T = +50 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100)

Nenngleitrate	**1. Maximum**			**Bruchspannung**		
$\dot{tan\gamma}$	$\overline{x}$	sd	**VarK**	$\overline{x}$	sd	**VarK**
[min^{-1}**]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**	**[**N/mm^2**]**	**[**N/mm^2**]**	**[-]**
$0,5$	0,18	0,001	0,004	0,21	0,013	0,064
5	0,25	0,006	0,023	0,29	0,011	0,035
50	0,39	0,026	0,051	0,39	0,026	0,066

4.3.8 Diskussion der Ergebnisse an fugenähnlichen Proben

4.3.8.1 Einfluss der Geometrie auf das Trag- und Versagensverhalten

4.3.8.1.1 Scherung Für beide Silikonwerkstoffe können im Scherexperiment vergleichbare Abläufe des Experiments sowie der ermittelten Kennlinienverläufe festgestellt werden. Diese sind in dieser Form ähnlich zu denen der Zugscherexperimente und auch vergleichbar mit der Beschreibung und den Ergebnisses aus der Literatur (z.B. (15), (194), (209)).
Dieser Ablauf ist exemplarisch in Abbildung 4.47 anhand eines Versuchsablaufs aus (187) für den Werkstoff SGA dargestellt. Die Risse beginnen an den äußeren Bereichen und setzen sich in das Innere der Klebfuge bei fortschreitender Verformung fort. Das Versagen des Probekörpers tritt infolge eines Durchreißens für diesen Probekörpertyp (Werkstoff SGA, 12 mm x 6 mm x 100 mm) im Bereich von $\tan\gamma$ = 2 ein.

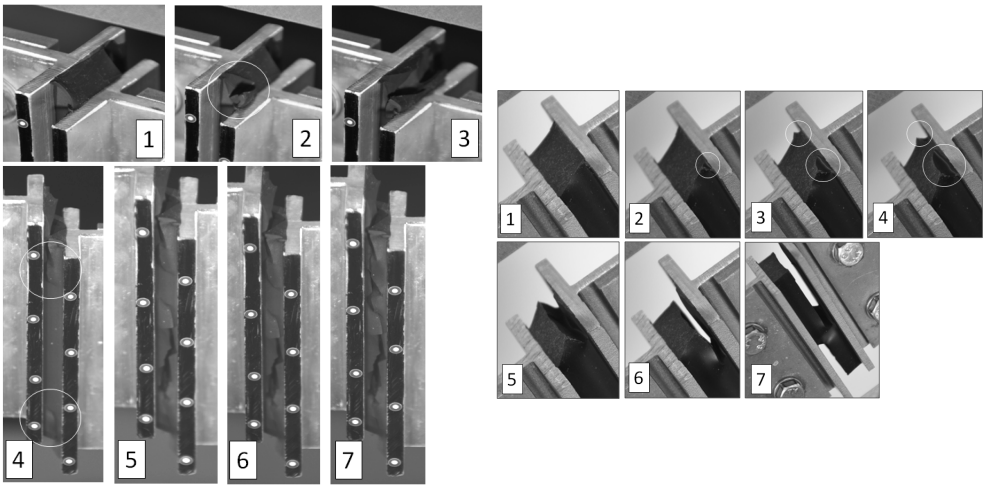


Abbildung 4.47: Darstellung der Versagensvorgänge im Beanspruchungsmodus Scherung und Querzug aus dem Projekt P 1052 (187)
(Quelle: eigene Darstellung)

Das Bruchverhalten der beiden Silikonwerkstoffe SGA und SGB ist jedoch unterschiedlich. Kann bei dem hier in Scherung untersuchten Werkstoff SGB ein quasi instantanes Versagen festgestellt werden, ist das Versagen für den Werkstoff SGA sukzessive. Dieses Verhalten zeigt sich auch anhand der Bruchbilder. Hier ist an den Probekörpern aus dem Werkstoff SGA (siehe Abbildung 4.48) ein treppenartiges Bruchbild feststellbar, was den Beobachtungen aus (65) zum Versagen von Elastomerfugen unter Scherung ähnlich ist. Demgegenüber zeigt der Werkstoff SGB ein ebenes Bruchbild, was zu den beobachteten instantanen Versagensvorgängen passt (siehe Abbildung 4.49).

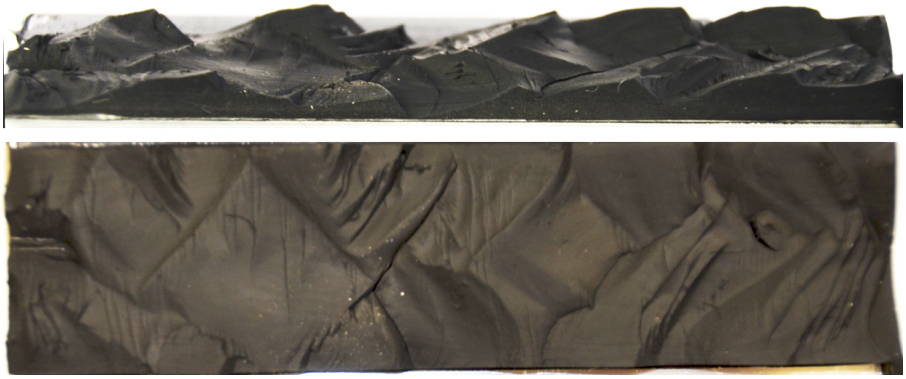


Abbildung 4.48: Exemplarische Bruchfläche bei T = RT und Nenngleitrate: 0,416 mm^{-1}
(Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Werkstoff SGA, oben: Seitenansicht, unten: Draufsicht)
(Quelle: eigene Aufnahme)

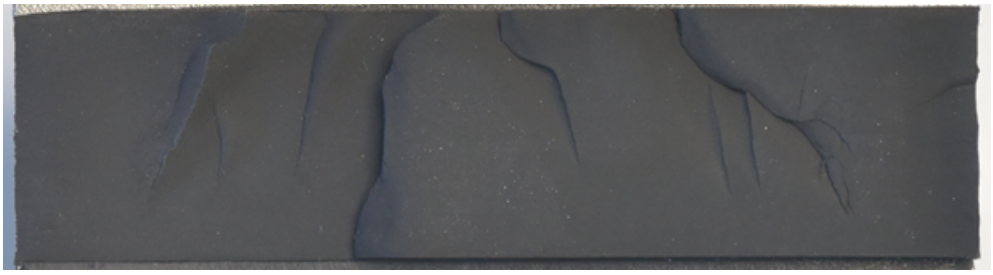


Abbildung 4.49: Exemplarische Bruchfläche bei T = RT und Nenngleitrate: 0,416 mm^{-1}
(Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Werkstoff SGB)
(Quelle: eigene Aufnahme)

Es ist jedoch festzustellen, dass hinsichtlich der erzielbaren maximalen Traglast in Abhängigkeit von der Probekörpergeometrie jedoch trotz vergleichbarer Steifigkeiten unterschiedliche Niveaus erzielt werden. Nachfolgend sind in Abbildung 4.50 die Ergebnisse der Scherexperimente aus Abschnitt 4.2 den Ergebnissen an der modifizierten H-Probe (Geometrie: 12 mm x 6 mm x 100 mm) gegenübergestellt. Hierdurch ist ersichtlich, dass im Vergleich mit der Zugscherprobe mit Schichtdicke $d_K = 4mm$ (in Anlehnung an DIN EN 1465) und der modifizierten H-Probe mit der dicken Zugscherprobe (in Anlehnung an DIN EN 14869) geringere Nennspannungswerte erreicht werden. Demgegenüber kann im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen jedoch keine wesentliche Beeinflussung der Steifigkeitskennlinien durch die unterschiedlichen Probenformen festgestellt werden.

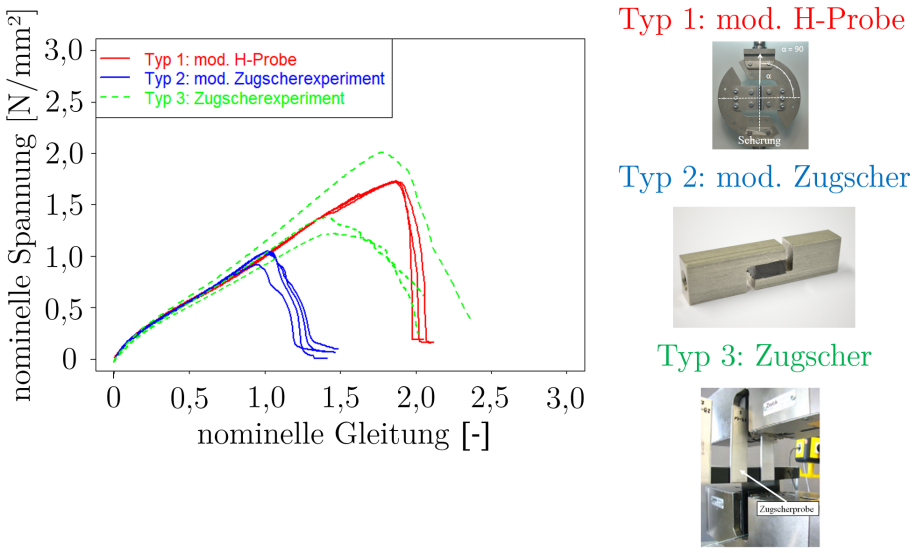


Abbildung 4.50: Spannungs-Gleitungs-Verläufe in Abhängigkeit von unterschiedlichen Probenformen (Werkstoff SGB)
(Quelle: eigene Darstellung)

4.3.8.1.2 Zug Für alle untersuchten Werkstoffe können im Zugexperiment mit der modifizierten H-Probe starke Unterschiede hinsichtlich der Steifigkeiten in Abhängigkeit von der Geometrie beobachtet werden. Ferner ist bei gedrungenen Geometrien ein Steifigkeitsverlust der Kennlinie markant erkennbar. Diese charakteristischen Erscheinungen werden auf das Eintreten von Kavitationseffekten im Inneren der Klebschicht zurückgeführt. Dies wird in einer Vielzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen, die querdehnbehinderte Elastomerwerkstoffe (z.B. (12)) unter Zugbelastung oder elastische Dickschichtklebungen im Kopfzugexperiment (z.B. (180),(134)) behandeln, so beobachtet. Dieser Verlauf des Versagensvorgangs wird nachfolgend gesondert dargestellt (Abbildung 4.51). Charakteristisch ist hierbei ein starkes Abfallen der gemessenen Steifigkeit, wobei gleichzeitig keine äußeren Anrisse oder Schädigungserscheinungen erkennbar sind. Interessanterweise sind diese Unterschiede für beide Werkstoffe für die gedrungene Geometrie (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm) eindeutig identifizierbar. Hier geht der quasi-lineare Bereich ab einer nominellen Dehnung $\epsilon_n = 0,1$ in einen stark nichtlinearen Verlauf über. Für die anderen Geometrien ist eine eindeutige Identifikation dieser Bereiche nicht ohne Weiteres möglich.

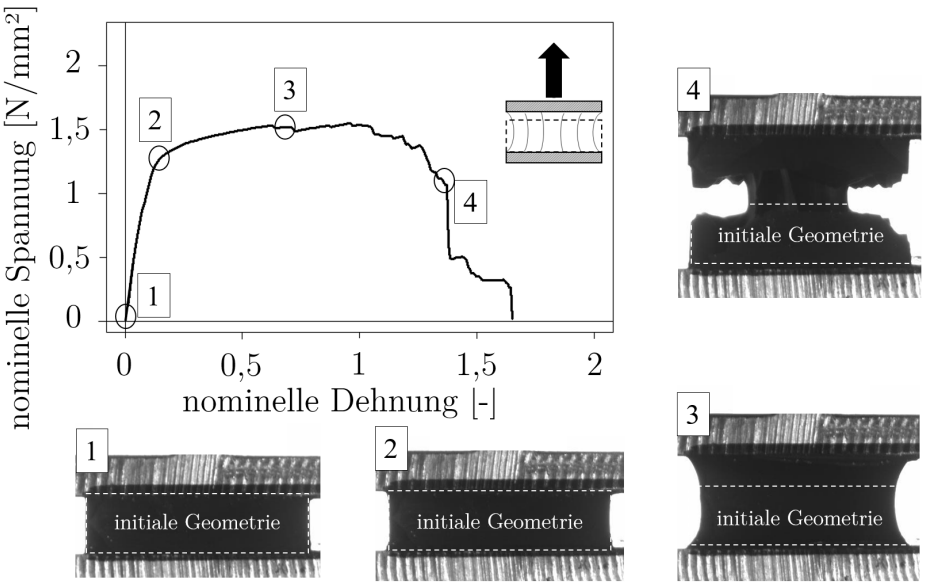
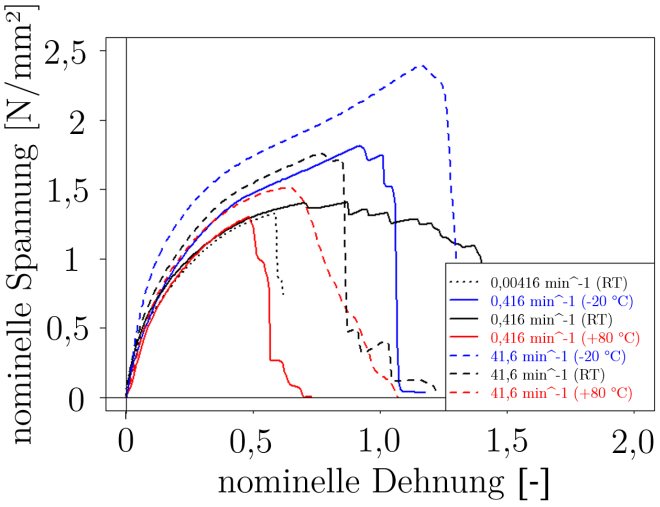


Abbildung 4.51: Spannungs-Dehnungs-Verlauf mit Zuordnung von Deformationszuständen (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Werkstoff SGA, T = RT und Nenndehnrate: 0,416 mm^{-1}) (Quelle: eigene Darstellung)

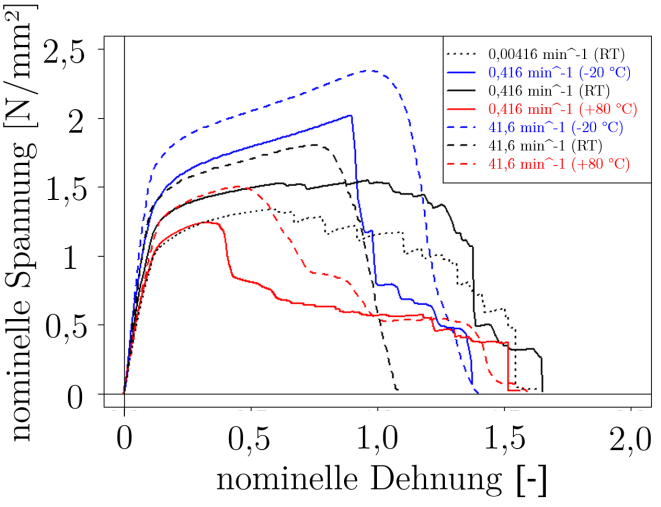
4.3.8.2 Einfluss von Temperatur und Nenndehnrate (Werkstoff SGA)

Die Nennspannung, die bei Erreichen von Bereich 2 (Abbildung 4.51) bei den Experimenten mit der Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm erreicht wird, steht im Zusammenhang mit der Temperatur sowie der Nenndehnrate. Bei geringen Nenndehnraten oder hohen Temperaturen ist die gemessene Spannung wesentlich geringer, der Plateaubereich ist wenig ausgeprägt. Demgegenüber zeigt sich bei Erhöhung der Geschwindigkeit oder Reduzierung der Temperatur eine wesentliche Erhöhung der Spannung und eine Ausprägung des folgenden Plateaubereichs. Dies wird im Wesentlichen darauf zurückgeführt, dass das Relaxationsverhalten durch die Temperatur und die Nenndehnrate beeinflusst wird. Das bedeutet auf Basis der in Kapitel 2 dargestellten Zusammenhänge zu den Relaxationsmechanismen, dass effektiv durch tiefere Temperaturen und kürzere Zeiten (= höhere Nenndehnraten) höhere Steifigkeiten vorliegen, da die Umlagerungsprozesse im Inneren des Polymers noch nicht abgeschlossen sind. Effektiv sind deswegen auch höhere Modulwerte zu beobachten. Das korreliert mit dem beobachteten Verhalten.
Für die Geometrie 12 mm x 6 mm x 100 mm ist die Ausprägung der beobachteten

Effekte im untersuchten Nenndehnraten- und Temperaturbereich geringer. Darüber hinaus ist das Versagen im Bereich des Eintretens des Kavitationsbeginns bei einigen Messreihen bereits mit dem Versagensbeginn aufgrund des äußeren Einreißens überlagert. Dennoch ist der Einfluss, insbesondere durch die hohen Nenndehnraten und tiefen Temperaturen, qualitativ erkennbar und in der folgenden Abbildung 4.52 zusammenfassend dargestellt.



(a) Geometrie 12 mm x 6 mm x 100 mm, Werkstoff SGA



(b) Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Werkstoff SGA

Abbildung 4.52: Vergleich der dehnratenabhängigen Referenzversuche mit den Experimenten an Probekörpern bei verschiedenen Temperaturen

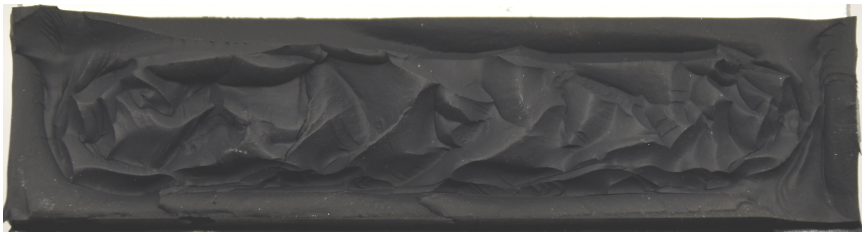


Abbildung 4.53: Exemplarische Bruchfläche bei T = RT und Nenndehnrate: 0,416 mm^{-1} (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Zug, Werkstoff SGA) (Quelle: eigene Aufnahme)

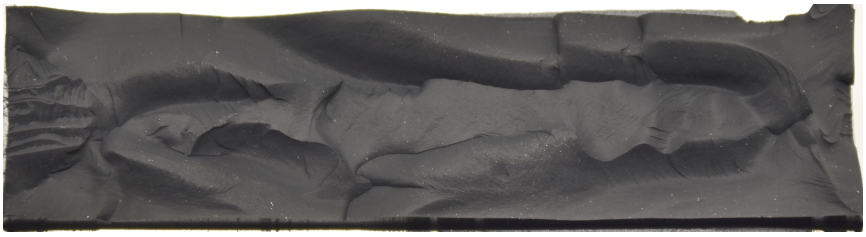


Abbildung 4.54: Exemplarische Bruchfläche bei T = -20 $°C$ und Nenndehnrate: 41,6 mm^{-1} (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Zug, Werkstoff SGA)
(Quelle: eigene Aufnahme)

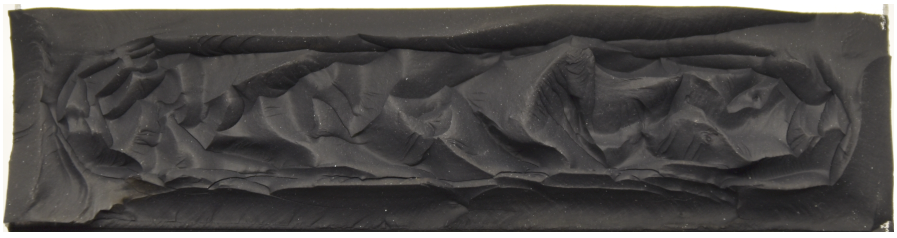


Abbildung 4.55: Exemplarische Bruchfläche bei T = +80 $°C$ und Nenndehnrate: 0,416 mm^{-1} (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Zug, Werkstoff SGA)
(Quelle: eigene Aufnahme)

4.3.8.3 Einfluss von Temperatur und Feuchte (Werkstoff SGA)

Die Untersuchungen zeigen, dass die Bruchdehnung der vorkonditionierten Proben ohne Rücktrocknung wesentlich gegenüber den Referenzproben ansteigt. Dies ist in Abbildung 4.56 dargestellt.
In den Bruchbildern dieser Testreihe konnten im Gegensatz zu allen anderen Testreihen Effekte beobachtet werden, die eindeutig auf Kavitation hindeuten. Diese äußern sich durch sphärenartige Artefakte in der Mitte der Klebschicht. Dies ist anhand eines

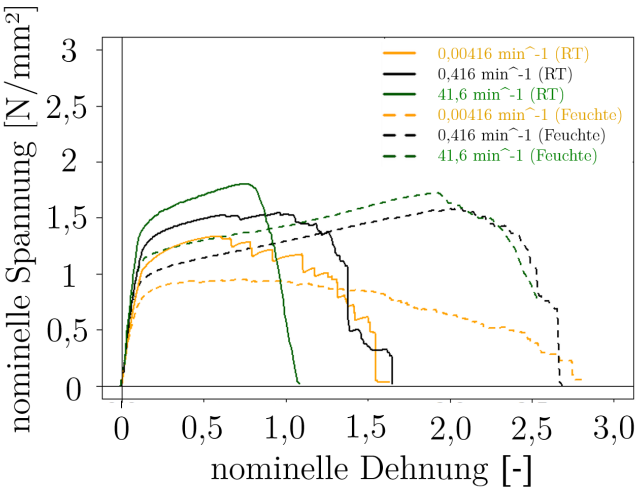


Abbildung 4.56: Vergleich der ratenabhängigen Referenzversuche mit den Experimenten an Probekörpern ohne Rücktrocknung aus der Alterungsauslagerung

exemplarischen Bruchbilds in Abbildung 4.57 dargestellt. Diese Effekte sind vergleichbar mit Beobachtungen anderer Autoren (24). Dass dies nur in dieser Testreihe auftritt, wird darauf zurückgeführt, dass sich durch die Wasserlagerung das Verformungsvermögen wesentlich erhöht hat. Hieraus wird geschlossen, dass sich die entsprechenden Kavitationseffekte im Klebstoff stärker ausprägen können, bevor ein Versagen des Probekörpers eintritt.

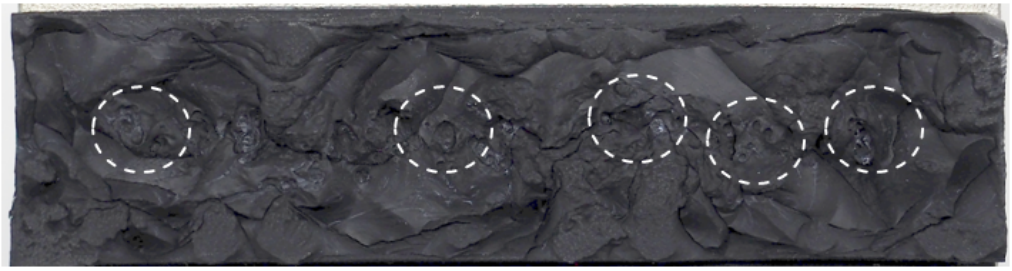


Abbildung 4.57: Exemplarische Bruchfläche bei T = RT und Nenndehnrate: 0,416 mm^{-1} nach 42 Tagen Wasserlagerung bei T = +45 $^{\circ}C$ ohne Rücktrocknung (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Zug, Werkstoff SGA) (Quelle: eigene Aufnahme)

4.3.8.4 Zusammenhang von Nenndehnrate und Temperatur (Werkstoff HKB)

Die Experimente bei tiefen Temperaturen zeigen sowohl höhere Festigkeiten als auch höhere Steifigkeiten gegenüber den Raumtemperaturexperimenten.
Es konnte im Rahmen der experimentellen Untersuchungen an fugenähnlichen Proben festgestellt werden, dass die Verläufe der $\sigma_n - \epsilon_n$ -Kennlinien in Abhängigkeit von der vorliegenden Testtemperatur wie auch der jeweiligen Nenndehnrate ähnlichen Verläufen folgen, die sich hinsichtlich der Höhe der ermittelten nominellen Spannung unterscheiden. Ähnlich wie in (187) kann bei hohen Temperaturen und geringen Nenndehnraten eine Veränderung des Bruchbildes im Vergleich zu den Experimenten bei Raumtemperatur und mittleren Nenndehnraten festgestellt werden. Dies zeigt sich durch den Übergang von einem reinen Kohäsivbruch zu einem adhäsiven Versagensbild. Dies ist in Abbildung 4.58 exemplarisch dargestellt. Die Versagenseffekte im Zu-

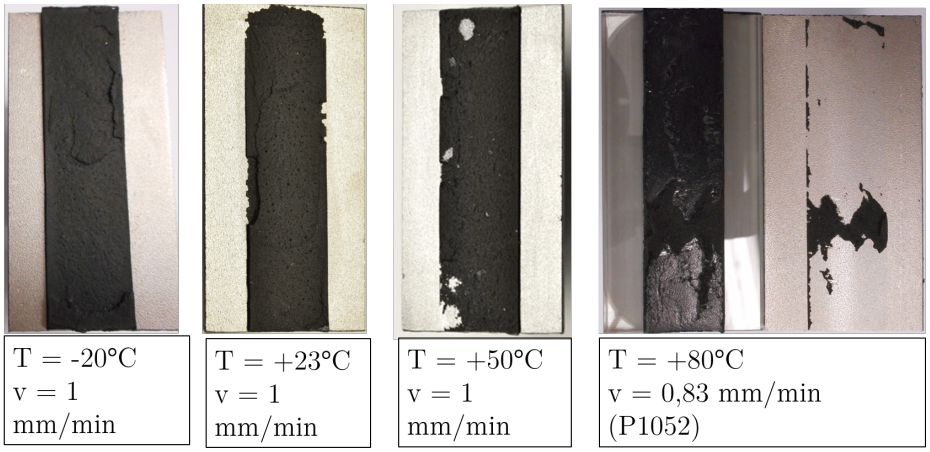


Abbildung 4.58: Bruchflächen von HKB-Probekörpern in Abhängigkeit von verschiedenen Testtemperaturen (Quelle: eigene Aufnahme)

sammenhang mit dem Eintreten von Kavitation in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur werden in Kapitel 5 weiter untersucht. Hinsichtlich dieser weiteren Betrachtung wird für die Scherexperimente ein Bereich in den Kennlinien betrachtet, der unterhalb der geringsten Bruchdehnungen liegt, um keiner Beeinflussung durch die beschriebenen teiladhäsiven Versagensbilder zu unterliegen. Ferner wird ebenso für die Bruchbildanalyse ein Probekörper der höchsten Nenndehnrate herangezogen. Die Abhängigkeit der Nennspannungen von der logarithmischen Nenndehnrate ist nachfolgend in Abbildung 4.59 dargestellt. Die Ähnlichkeit der Kurvenverläufe lässt auf das Vorhandensein ähnlicher Wirkmechanismen zur Zeit- und Temperaturabhängigkeit schließen. Dies ist

insbesondere bei den Kurvenverläufen ersichtlich, die an Klebverbindungen mit dem Werkstoff HKB ermittelt sind, und gilt sowohl für das Scher- als auch das Zugexperiment. Darüber hinaus können auch für die Silikonwerkstoffe ähnliche Effekte gezeigt werden. Dies gilt besonders für das als Eintreten von Kavitationseffekten beschriebene Phänomen des Absinkens der Steifigkeit. Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 5 unter Anwendung des ZTV weiter analysiert.

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

4.4.1 Experimente zur Werkstoffcharakterisierung

Diese sind in Abschnitt 4.2.5 zusammengefasst. Es wurde im uniaxialen Zugexperiment als auch im Zugscherexperiment das Verhalten der Klebstoffe untersucht. Hierbei wurde die Ratenabhängigkeit der Bruchspannung und Bruchdehnung(-gleitung) analysiert. Ferner wurde durch Testreihen an ausgelagerten Proben die Veränderung dieser Kennwerte infolge der Alterungsauslagerung untersucht.

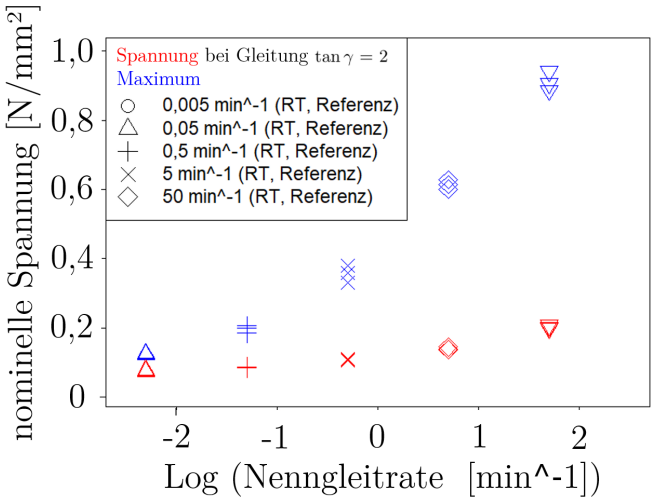
4.4.2 Experimente an der modifizierten H-Probe

Es wurden Experimente an fugenähnlichen Proben unter verschiedenen Einflussparametern durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4.3.8 dokumentiert. Zusammenfassend kann auf Basis der Zielsetzung das folgende Ergebnis dargelegt werden

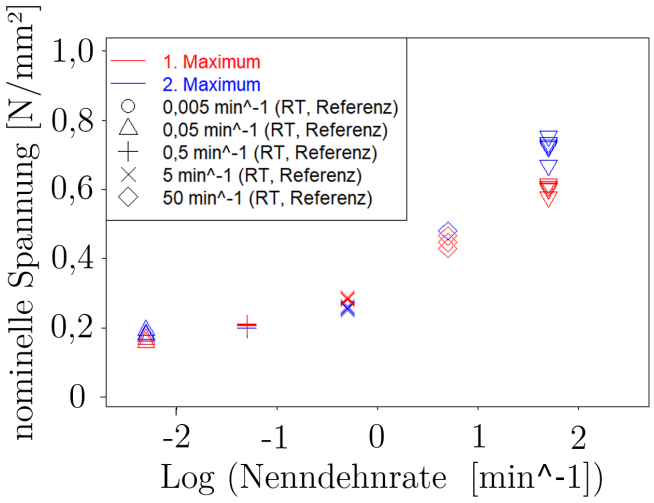
- Geometrieeinfluss Es wurde unter dem Einfluss verschiedener Nenndehnraten und Temperaturbereiche für den Werkstoff SGA das Tragverhalten analysiert. Hierbei konnte festgestellt werden, dass das Eintreten von Kavitation weitestgehend unabhängig von Nenndehnrate, Temperatur, Regelungsart sowie Feuchtegrad bei einer nominellen Dehnung erfolgt. Diese Grenze ist abhängig von der Geometrie.
- Zeit- und Temperaturabhängigkeit Im Rahmen der Messreihen zur Zeit- und Temperaturabhängigkeit wurden Experimente an der modifizierten H-Probe mit dem Werkstoff HKB durchgeführt. Hierbei konnten charakteristisch ähnliche Kurvenverläufe für tiefe Temperaturen und hohe Nenndehnraten ermittelt werden. In

Analogie kann das auch für hohe Temperaturen und geringe Nenndehnraten beobachtet werden. Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich auf das Vorhandensein verwandter Mechanismen für die Zeit- und Temperaturabhängigkeit schließen.

Die festgestellten Effekte zur Geometrieabhängigkeit sowie zum Einfluss von Zeit- und Temperatur werden im folgenden Kapitel systematisch untersucht.



(a) Scherversuche (modifizierte H-Probe)



(b) Zugversuche (modifizierte H-Probe)

Abbildung 4.59: Vergleich verschiedener Punkte der Arbeitslinie in Abhängigkeit von der Nenndehnrate (Werkstoff HKB, Scherung und Zug)

5 Tragverhalten von 2-Flankenklebungen

5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

In den vorherigen Kapiteln ist die Zeitabhängigkeit von Einwirkungsvorgängen analytisch sowie das zeit- und temperaturabhängige Verhalten von 2-Flankenklebungen unter Zug experimentell untersucht worden. Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass die Geometrie einen maßgebenden Einfluss auf das Last-Verformungsverhalten und somit auf das Tragverhalten dieser Verbindungen hat. Ferner können Einflüsse der Temperatur sowie der Nenndehnrate experimentell identifiziert und beschrieben werden.

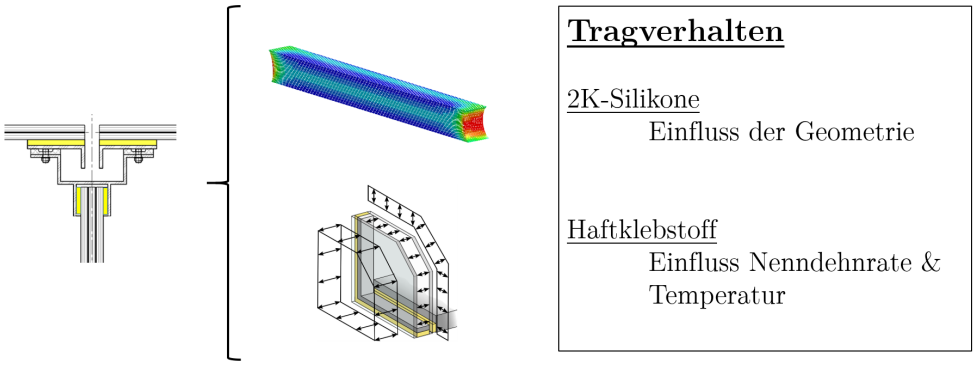


Abbildung 5.1: Inhalt des Kapitels
(Quelle: eigene Darstellung)

Auf dieser Basis sind nachfolgend Untersuchungen zur Analyse des Tragverhaltens von 2-Flankenklebungen dokumentiert. Dies geschieht durch die systematische Bearbeitung der folgenden Teilziele:

- Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wird im querdehnbehinderten Zugexperiment in Abhängigkeit von der Geometrie eine unterschiedliche Fugensteifigkeit beobachtet. Der **Einfluss der Geometrie** sowie der Werkstoffeigenschaften auf die effektive Fugensteifigkeit wird zunächst untersucht. Dies geschieht **unabhängig von Zeit und Temperatur** anhand der Silikonwerkstoffe SGA und SGB mit Hilfe analytischer Betrachtungen sowie numerischer Simulationen.
- Auf Basis von Grenzkriterien für Kautschukwerkstoffe wird ferner der Beanspruchungsszustand von 2-Flankenklebungen unter Zug und Scherung analysiert. Dies geschieht **zeitunabhängig** mit Hilfe analytischer wie auch numerischer Methoden. Auf Basis dieser Ergebnisse werden **Grenzkriterien für 2-Flankenklebungen** untersucht.
- In der Realität ist auf Basis der **Zeit- und Temperaturabhängigkeit** der Einwirkung wie auch der Werkstoffeigenschaften damit zu rechnen, dass diese Abhängigkeit auch die Grenzkriterien betrifft. Dies wird aufgrund der ausgeprägten Zeitabhängigkeit anhand des **Haftklebstoffes** HKB analysiert. Hierbei wird mit Hilfe des Prinzips der Zeit-Temperatur-Verschiebung ein numerisches Modell kalibriert und der Einfluss der Last-Zeit-Temperaturwirkung am Beispiel einer Fassadenklebung unter Windeinwirkung diskutiert.

5.2 Analyse des Einflusses der Probegeometrie auf das Tragverhalten

5.2.1 Ausgangssituation

Nachfolgend werden Parameter zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens der untersuchten Klebstoffe ermittelt. Diese stellen die Grundlage der Analyse der effektiven Steifigkeit für den GZT der modifizierten H-Probe dar. Die Parameteridentifikation mit idealisierten Randbedingungen stellt hierfür die Grundlage dar. Diese wird auf Basis analytischer Zusammenhänge auf Basis der in Kapitel 4 durchgeführten uniaxialen Zugexperimente durchgeführt.

5.2.1.0.1 Diskussion idealisierter Randbedingungen Die im Rahmen des vorherigen Kapitels untersuchte modifizierte H-Probe unter Zugbeanspruchung kann den querdehnbehinderten Zugversuchen zugeordnet werden. Neben diesem Experiment stehen Daten aus den nachfolgend dokumentierten Versuchen zur Verfügung. Unter Annahme idealisierter Randbedingungen gelten für diese Experimente die folgenden Beanspruchungszustände, die eine Zuordnung von analytischen Grundgleichungen mit dem Ziel der Parameteridentifikation gestatten:

- uniaxiale Zugexperimente - uniaxialer Zug im mittleren Probenbereich
- modifizierte H-Probe - querdehnbehinderter Zug an den Grenzflächen in Klebschichtmitte
- Zugscherexperiment - Schubbeanspruchung

Die sich aus diesen Randbedingungen einstellenden Spannungs- und Verzerrungsgrößen sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: idealisierte Randbedingungen

Randbedingung	Spannungskomponenten	Verzerrungskomponenten
uniaxialer Zug	$\sigma_{zz}, \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0$	$\epsilon_{zz}, \epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$
querdehnbehinderter Zug	$\sigma_{zz}, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}$	$\epsilon_{zz}, \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = 0$
Scherung	σ_{xy}	ϵ_{xy}

Nachfolgend werden diese idealisierten Zustände angenommen. Dies geschieht mit dem Ziel der Parameteridentifikation für zwei verschiedene Werkstoffmodelle. Es wird sowohl ein lineares (Hooke) als auch ein hyperelastisches Werkstoffmodell (Neo-Hooke) kalibriert.

- linear-elastisches Werkstoffmodell (Hooke)
- hyperelastisches Werkstoffmodell (Neo-Hooke)

In der Realität ist damit zu rechnen, dass die Beanspruchungszustände in Abhängigkeit von dem gewählten experimentellen Aufbau von diesen idealisierten Annahmen

abweichen. Ferner ist bei realitätsnahen Probenformen, wie der modifizierten H-Probe, stets mit Beanspruchungsmischzuständen zu rechnen (147).

5.2.2 Bestimmung von Werkstoffparametern aus uniaxialen Zugversuchen

5.2.2.1 Grundgleichungen und Parameter

Nachfolgend werden auf Basis der Zugexperimente Werkstoffparameter ermittelt. Für das hyperelastische Neo-Hooke-Modell (konstantes Volumen, Querdehnzahl $\nu = 0,5$) kann unter den Randbedingungen des uniaxialen Zugexperiments $(\lambda_1, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^2)$ die erste Invariante I_1 berechnet werden. Aus der Energiefunktion (Gleichung 2.19) kann damit die nominelle Spannung σ_n in Abhängigkeit vom Streckgrad $\lambda_1 (= \epsilon_n + 1)$ berechnet werden (Gleichung 5.1):

$$\sigma_n = 2 * C1 * (\epsilon_n + 1) - 2 * C1 * \frac{1}{(\epsilon_n + 1)^2} \tag{5.1}$$

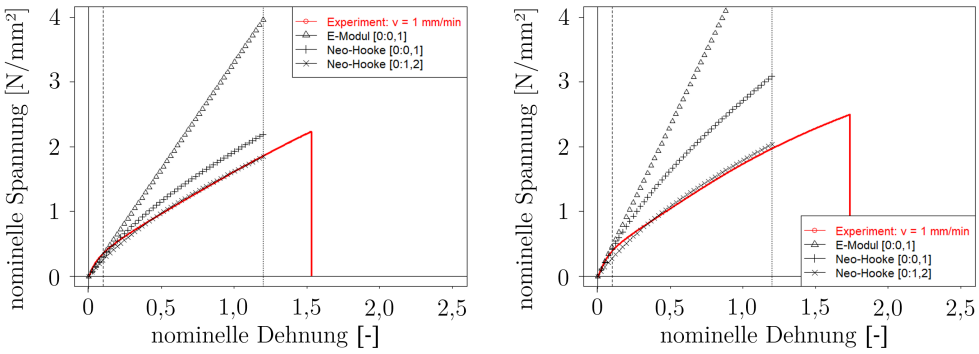
Für das lineare Modell kann die Spannungskomponente σ_n als Funktion der Dehnung $\epsilon_{zz} (= \lambda_1 - 1)$ nach Gleichung 5.2 bestimmt werden:

$$\sigma_n = E * \epsilon_n \tag{5.2}$$

Hierbei stellt E den Tangentenmodul dar. Mit Hilfe dieser Gleichungen können unter Anwendung einer Parameteroptimierung (gnuplot (190)) auf Basis der experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Verläufe aus den Zugexperimenten die Modellparameter C1 sowie E ermittelt werden.

5.2.2.2 Abgleich der Modelle mit den experimentellen Untersuchungen

Mit dieser Vorgehensweise können in Abhängigkeit von den betrachteten Dehnungsbereichen folgende Parameter (Tabellen 5.2 und 5.3) sowie die dazugehörigen Kurvenverläufe (Abbildung 5.2) ermittelt werden.



(a) Werkstoff SGA

(b) Werkstoff SGB

Abbildung 5.2: Ergebnis Zugexperiment und zugehörige Modelle in Abhängigkeit von verschiedenen kalibrierten Dehnungsbereichen

Tabelle 5.2: Werkstoffparameter SGA

Werkstoffmodell	kalibrierter Dehnungsbereich	Parameter
$[-]$	$[-]$	$[N/mm^2]$
Hooke	0 - 0,1	E = 3,52
Neo-Hooke	0 - 1,2	C1 = 0,396

Tabelle 5.3: Werkstoffparameter SGB

Werkstoffmodell	kalibrierter Dehnungsbereich	Parameter
$[-]$	$[-]$	$[N/mm^2]$
Hooke	0 - 0,1	E = 4,65
Neo-Hooke	0 - 1,2	C1 = 0,512

5.2.2.3 Diskussion und Festlegung von Parametersätzen für das weitere Vorgehen

Es ist anhand der in Abbildung 5.2 dargestellten Modellkurven ersichtlich, dass das hyperelastische Neo-Hooke-Modell die im Experiment ermittelte Kurve bis in einen hohen Dehnungsbereich abbilden kann. Dennoch muss festgestellt werden, dass für das verwendete Modell Abweichungen von der experimentellen Kurve auftreten, die insbesondere in einem Dehnungsbereich ϵ_n von 0 bis 0,25 zu beobachten sind. Der Einfluss der verwendeten Messdaten, die nicht allein im uniaxialen Bereich erfasst sind, auf diese Abweichungen kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Eine Übereinstimmung zwischen dem linearen und dem hyperelastischen Ansatz kann für einen Bereich der nominellen Dehnung ϵ_n bis ca. 0,1 festgestellt werden.
Über den Zusammenhang $G = 2 * C1$ können die Kenndaten des hyperelastischen Modells in Schubmodulwerte umgerechnet werden. Für die weiteren Betrachtungen werden für den Werkstoff SGB auf Basis dieser Zusammenhänge 3 unterschiedliche Parametersätze berechnet (siehe Tabelle 5.4). Hierbei wird ein konstantes Volumen angenommen.

Tabelle 5.4: Berechnung von vergleichbaren Werkstoffparametern (isochore Verformung, ν = 0,5)

		Werkstoff SGB		
Parameter-satz	**Werkstoffmodell**	E	$C1$	G
[-]	**[-]**	**[N/mm^2]**	**[N/mm^2]**	**[N/mm^2]**
1	Hooke	4,65	-	1,55
2	Neo-Hooke	-	0,512	1,024
3	Neo-Hooke	-	0,775	1,55

5.2.3 Anwendbarkeit der Parameter auf die modifizierte H-Probe

Es wird nachfolgend untersucht, ob die ermittelten Parameter zur analytischen Abbildung der Steifigkeiten der modifizierten H-Probe genutzt werden können. Dies geschieht getrennt für Scherung und den querdehnbehinderten Zug.

5.2.3.1 Scherung

Für das hyperelastische Modell kann die Schubspannung linear in folgender Form aus der Funktion der Verzerrungsenergiedichtefunktion (139) ermittelt werden. Für die Ermittlung der Scherbeanspruchung τ gilt folgender Zusammenhang:

$$\tau = \frac{E}{2(1+\nu)} * tan\gamma = G * tan\gamma = 2 * C1 * tan\gamma \tag{5.3}$$

Für das Scherexperiment ist ersichtlich, dass im Gegensatz zum uniaxialen Zugexperiment beide Ansätze einen linearen Zusammenhang zwischen der nominellen Scherspannung und der nominellen Gleitung beschreiben. Es gilt daher ein Zusammenhang zwischen beiden Modellen über die Beziehung $G = 2 * C1$.

5.2.3.2 Querdehnbehinderter Zug

Für die Betrachtung des querdehnbehinderten Zugexperimentes wird angenommen, dass im Inneren der Klebschicht der modifizierten H-Probe unter Zugbeanspruchung ein querdehnbehinderter Spannungszustand dominiert. Hierbei wird ferner angenommen, dass dieser infolge eines einachsigen Dehnungszustandes entsteht. Für das Hooke'sche Gesetz kann für diese Randbedingungen ($\epsilon_{zz}, \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = 0$) folgender Zusammenhang zwischen den Spannungs- und Dehnungsgrößen beschrieben werden:

$$\sigma_{zz} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} * \epsilon_{zz} \tag{5.4}$$

Auf Basis dieser Gleichung kann ein E-Modul für die vollständige Querdehnbehinderung ermittelt werden. Dieser kann durch den Quotienten der Spannungskomponente (σ_{zz}) sowie der Dehnungskomponente in Verschiebungsrichtung (ϵ_{zz}) als Funktion des uniaxialen Moduls E sowie der Querdehnzahl ν ermittelt werden (siehe Gleichung

5.5). Dieser Modul wird als querdehnbehinderter Elastizitätsmodul $E_{querdehnbehindert}$ bezeichnet.

$$E_{querdehnbehindert} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{5.5}$$

Unter Substitution des Kompressionsmoduls K kann Gleichung 5.5 wie folgt dargestellt werden:

$$E_{querdehnbehindert} = 3 * K * \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)} \tag{5.6}$$

Für isochores Werkstoffverhalten (ν = 0,5) kann gezeigt werden, dass der effektive Modul $E_{querdehnbehindert}$ dem Kompressionsmodul K entspricht:

$$E_{querdehnbehindert} = 3 * K * \frac{(1-0,5)}{(1+0,5)} = K \tag{5.7}$$

Für den idealisierten Fall der vollständigen Querdehnbehinderung unter einer einachsigen Dehnung ($\epsilon_{zz} \neq 0, \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = 0$) bildet der Kompressionsmodul folglich die Proportionalitätskonstante zwischen der Verzerrungsgröße ϵ_{zz} und der Spannungsgröße σ_{zz} nach Gleichung 5.4. Hierdurch kann ein oberer Grenzwert der Steifigkeit der querdehnbehinderten Klebfuge unter der Annahme der vollständigen Querdehnbehinderung über die komplette Klebschicht definiert werden.

5.2.3.3 Abgleich mit den experimentellen Ergebnissen

Die mit Hilfe der idealisierten Randbedingungen ermittelten Parameter werden den experimentellen Ergebnissen an den modifizierten H-Proben gegenübergestellt. Dies geschieht für die am Werkstoff SGB ermittelten Parameter (Tabelle 5.4) sowie die durchgeführten Experimente an der modifizierten H-Probe unter Zug- und Scherbelastung für vier verschiedene Geometrien. Der idealisierte Fall der vollständigen Querdehnbehinderung wird auf Basis von Gleichung 5.5 in Abbildung 5.4 dargestellt (ν = 0,495). Diese Annahme liegt im Bereich von Werten, die üblicherweise für diese Werkstoffe im uniaxialen Zugexperiment ermittelt werden können (siehe z.B. (134), (136), (22)).

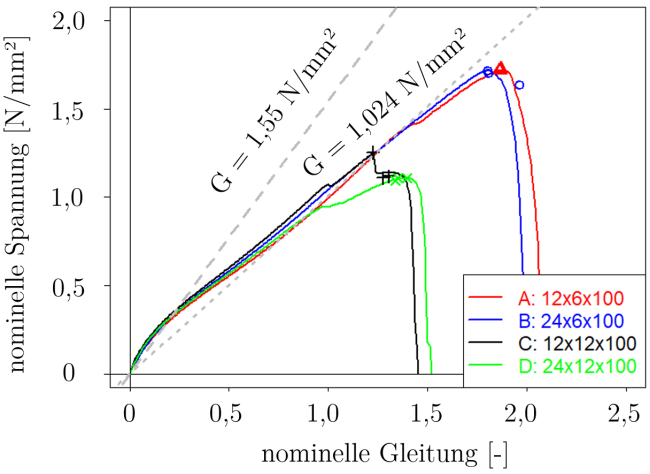


Abbildung 5.3: Abgleich der analytisch ermittelten Kenndaten mit den experimentellen Ergebnissen (modifizierte H-Probe, Scherung, Werkstoff SGB)

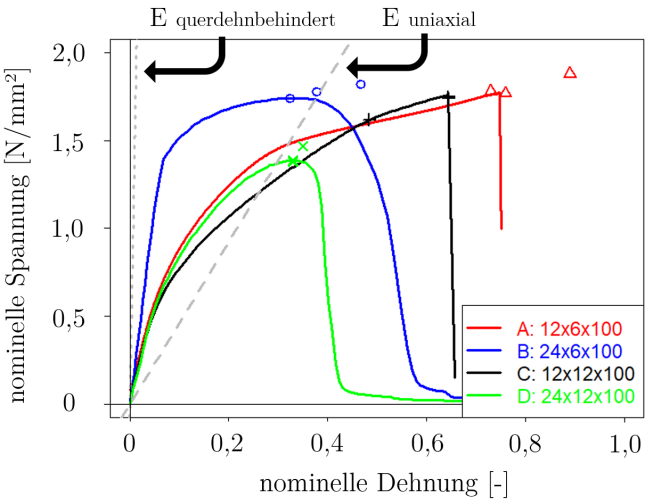


Abbildung 5.4: Abgleich der analytisch ermittelten Kenndaten mit den experimentellen Ergebnissen (modifizierte H-Probe, Zug, Werkstoff SGB)

Es kann mit dieser Vorgehensweise festgestellt werden, dass keine direkte Abbildung der gemessenen Kurven gelingt. Dies gilt sowohl für die Scher- (siehe Abbildung 5.3) als auch die Zugexperimente (siehe Abbildung 5.4) an der modifizierten H-Probe. Das Hooke-Modell, welches in einem Bereich des uniaxialen Zugexperimentes von bis zu ϵ_n = 0,1 kalibriert ist, kann im vorliegenden Fall auch den Anfangsbereich der nichtlinearen Scherkurve mit guter Übereinstimmung abbilden (siehe Abbildung 5.3). Der aus dem Neo-Hooke-Modell ermittelte Modul bildet demgegenüber einen nominellen Gleitungsbereich von tan γ = 0,5 - 1,2 besser ab.
Für die Zugexperimente bilden die Annahmen uniaxialer Zug und vollständige Querdehnbehinderung die Grenzbereiche der Steifigkeit ab. Diese werden hier durch die experimentell ermittelten Kennlinien nicht über- bzw. unterschritten (siehe Abbildung 5.4).

5.2.4 Numerische Analyse

5.2.4.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Anhand der Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt kann festgestellt werden, dass im vorliegenden Fall alle an der modifizierten H-Probe versuchstechnisch ermittelten Steifigkeiten zwischen den idealisierten Annahmen der Zugprobe mit unbehinderter Querdehnung sowie dem Zustand vollständige Querdehnbehinderung liegen. Ferner sind in Abhängigkeit von den Fugengeometrien bei den Zugexperimenten Steifigkeitsunterschiede ersichtlich. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Ursache auf interne Beanspruchungszustände zurückzuführen ist. Diese werden nachfolgend mit Hilfe einer numerischen Berechnung untersucht.
Hierfür werden zunächst die Randbedingungen der Simulation, des Modellaufbaus sowie die Vorgehensweise bei der Durchführung der Simulation beschrieben.

5.2.4.2 Grundlagen

Bei der Durchführung von numerischen Untersuchungen mit Hilfe der Methode der Finiten-Elemente (FE) müssen die Randbedingungen des angewandten Verfahrens sowie der zur Anwendung kommenden Modelle definiert werden.
Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird das nichtlineare FE-Programm

LS-DYNA R9.71 verwendet. Aufgrund der Annahme einer quasi-statischen Charakteristik der Problemstellung, mit einer untergeordneten Beeinflussung durch dynamische Effekte, wird der implizite Solver verwendet. Die Modelle werden mit dem Pre- und Postprozessor LS-PrePost erstellt und ausgewertet. Die Ergebnisse von FE-Berechnungen sind stark abhängig vom Grad der Netzfeinheit sowie von den getroffenen Annahmen zu den Randbedingungen (170). Aus diesem Grund wird zunächst eine Studie zum Einfluss der Netzfeinheit durchgeführt.

5.2.4.3 Modellaufbau und Randbedingungen der Simulation

Die Untersuchungen werden an einem Modell der modifizierten H-Probe mit den Abmessungen 12 mm x 6 mm x 100 mm durchgeführt. Das FE-Modell der modifizierten H-Probe wird als Halbmodell unter der Anwendung von Symmetrierandbedingungen erstellt. Die Freiheitsgrade sowie die Lagerungsschemata für die Modi Zug und Scherung sind in 5.5 dargestellt.

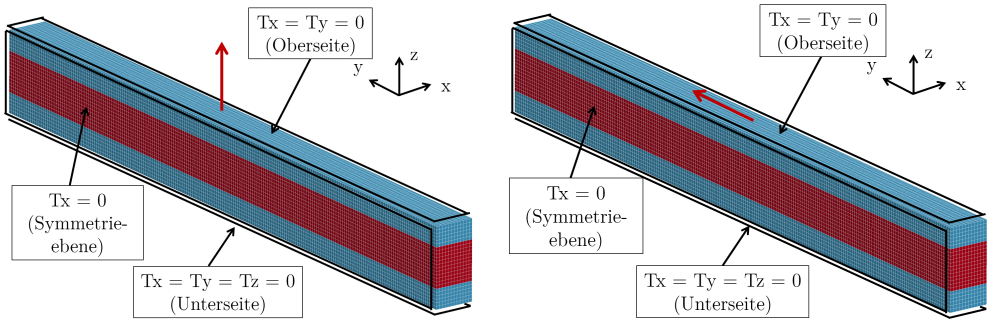


Abbildung 5.5: Darstellung des Berechnungsmodells (Halbmodell) der simulierten Fugengeometrie 12 mm x 6 mm x 100 mm (links: Zug, rechts: Scherung)
(Quelle: eigene Darstellung)

Das Modell wird mit einer Verformung von u_z = 0,3 mm über die Verschiebung der Deckschichtknoten des oberen Fügepartners (blauer Bereich, Abbildung 5.5, E = 70000 N/mm^2, ν = 0,23) beansprucht. Der Klebstoff (roter Bereich, Abbildung 5.5) wird mit einem hyperelastischen Werkstoffmodell modelliert. Dies geschieht in 10 Zeitschritten. Die Kraftantwort des Modells wird über die Summe der Knotenkräfte an der Oberfläche des Fügepartners ermittelt.

Tabelle 5.5: Darstellung der Modellparameter des Berechnungsmodells

Elementtyp	ELFORM 1 (1)
Werkstoffmodell Klebstoff	MAT_027 (2) (C1 = 0,775 N/mm^2; ν = 0,495)
Werkstoffmodell Fügepartner	MAT_001 (2) (E = 70000 N/mm^2; ν = 0,23)
Programm	LS-DYNA R971
Modelltyp	Halbmodell
Belastung	Verformung
Richtung	Scherung, Zug
Modellabmessung Klebstoff X-Y-Z (mm)	6-100-6

Modus	**Deformation (t = 1s)**
Zug	u_z = 0,3 mm

5.2.4.3.1 Untersuchte Parameter und Auswertemethode Im Rahmen dieser Arbeit werden mit der numerischen Simulation verschiedene Parameter untersucht. Aus diesem Grund wird der Einfluss der Netzfeinheit für verschiedene Größen analysiert. Neben der globalen Steifigkeit werden als Kriterium zur Bewertung der Beanspruchungszustände die Spannungsmehrachsigkeit η (siehe Kapitel 2), die wahre Hauptdehnung ϵ_1 sowie der hydrostatische Druck p verwendet.

- globale Steifigkeit
- Spannungsmehrachsigkeit η
- wahre Hauptdehnung ϵ_1
- hydrostatischer Druck p

Die Höhe dieser Parameter ist immer vom jeweiligen Zeitschritt der Simulation abhängig, für die Untersuchung zum Einfluss der Netzfeinheit wird jeweils der letzte Zeitschritt der Simulation betrachtet. Die untersuchten Netzauflösungen sind nachfolgend in Tabelle 5.6 dokumentiert.

Tabelle 5.6: Darstellung der Netzparameter für die Konvergenzstudie am Halbmodell der Geometrie 12 x 6 x 100

Bezeichnung	**Elemente Klebfuge**	**Kantenlänge Elemente**	**Gesamtzahl Elemente**
[–]	[–]	**[mm x mm x mm]**	[–]
Netz 1	4 x 4 x 66	1,5 x 1,5 x 1,515	1056
Netz 2	6 x 6 x 100	1 x 1 x 1	3600
Netz 3	8 x 8 x 133	0,75 x 0,75 x 0,7519	8512
Netz 4	12 x 12 x 200	0,5 x 0,5 x 0,5	28800

Im Vorfeld der Simulation kann nicht bestimmt werden, wo die maßgebenden Auswertepunkte für die unterschiedlichen Kriterien im Modell zu finden sind. Aus diesem Grund wird im vorliegenden Fall mit Hilfe der Anwendung einer statistischen Bewertung aller aus den Elementen berechneten Ergebnisse gearbeitet. Hiermit soll erreicht werden, dass sich die Einflüße aus Singularitäten in den Rand- und Übergangsbereichen von Fuge und Substrat hinsichtlich der Häufigkeit ihres Auftretens bewerten lassen.
Dies wird praktisch umgesetzt, indem die Ergebnisse jedes Elementes aus LS-DYNA ausgelesen werden und eine Häufigkeitsverteilung berechnet wird. Als Vergleichsgrößen kommen der Median $\tilde{x}$ sowie der 1,5-fache Interquartilsabstand der Verteilung zur Anwendung, die mit Hilfe einer Boxplot-Darstellung in Abhängigkeit von den Netzauflösungen dargestellt sind. Die Auswertung erfolgt durch ein hierfür erstelltes Skript in R (167).

5.2.4.4 Abgleich mit experimentellen Untersuchungen an der modifizierten H-Probe

Für die Simulation der Steifigkeit wird Netz 2 nach Tabelle 5.6 verwendet. Der Einfluss der Netzauflösung auf die numerisch ermittelte Probensteifigkeit ist im vorliegenden Fall sehr gering und wird daher nicht im Rahmen einer Konvergenzstudie weiter untersucht.
Die unter Anwendung der dargestellten Modelle ermittelten Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen abgeglichen. Hierzu werden die simulierten Kennlinien im Modus Zug und Scherung den im Experiment ermittelten Verläufen gegenübergestellt. Ferner werden die internen Beanspruchungszustände unter Berücksichtigung der Spannungsmehrachsigkeit untersucht.

5.2.4.4.1 Analyse der Steifigkeit Für die Simulation kommen die Parameter nach Tabelle 5.4 zur Anwendung, die mit Hilfe der Ergebnisse der Zugexperimente ermittelt sind. Betrachtet wird der Werkstoff SGB, da für diesen einheitliche Untersuchungen sowohl für Scherung als auch in Zug für die modifizierte H-Probe vorliegen. Für den Abgleich mit den experimentellen Ergebnissen werden nominelle Spannungen und Dehnungen verwendet. Die Spannungen werden mit Hilfe der Summe der numerisch berechneten Knotenkräfte (Fügepartneroberfläche) und der Klebschichtfläche berechnet. Die Dehnungen werden aus den berechneten Modellverformungen in Lastrichtung (Klebschicht) und der initialen Klebschichthöhe ermittelt.

Tabelle 5.7: Tabelle der verwendeten Parametersätze (Werkstoff SGB)

Parametersatz	Werkstoffmodell	Parameter
[-]	[-]	[N/mm^2]
Simulation 1	Neo-Hooke	C1 = 0,512
Simulation 2	Neo-Hooke	C1 = 0,775
Simulation 3	Hooke	G = 1,55

In Abbildung 5.6 sind nachfolgend die jeweiligen Berechnungsergebnisse den experimentellen Ergebnissen in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Parametersätzen

gegenübergestellt. Vergleichbar zu den analytischen Betrachtungen kann der Anfangsbereich des Scherexperimentes durch den Parametersatz 2 gut abgebildet werden. Das Zugexperiment an der modifizierten H-Probe wird bis zu einer Nennspannung von σ_n = 0,81 N/mm^2 gut abgebildet. Das Ergebnis des numerischen Modells mit dem Parametersatz 1 unterschätzt die Steifigkeit für beide Versuchsarten (Zug und Scherung) in diesem Dehnungsbereich. Im Scherexperiment ist jedoch ersichtlich, dass dieser Parametersatz die Kurven ab einer Gleitung von tan $\gamma > 0,6$ gut abbildet. Diese Unterschiede in der Güte der Abbildung verschiedener Dehnungsbereiche konnten auch in uniaxialen Zugversuchen für beide Parametersätze festgestellt werden. Für die Abbildung der fugenähnlichen Probe scheint auf Basis dieser Ergebnisse eine Kalibrierung an einem kleineren Dehnungsbereich eine realistischere Abbildung darzustellen, da die Steifigkeitsunterschiede in Abhängigkeit von der Geometrie bereits bei kleiner Dehnung zu erkennen sind.
Die effektive Steifigkeit der 2-Flankenklebung kann im vorliegenden Fall mit Hilfe der numerischen Berechnungen auf Basis der Kenndaten aus dem Zugversuch in kleinen Verzerrungsbereichen (ϵ_n = 0,1) mit dieser Vorgehensweise gut ermittelt werden (siehe Abbildung 5.6).

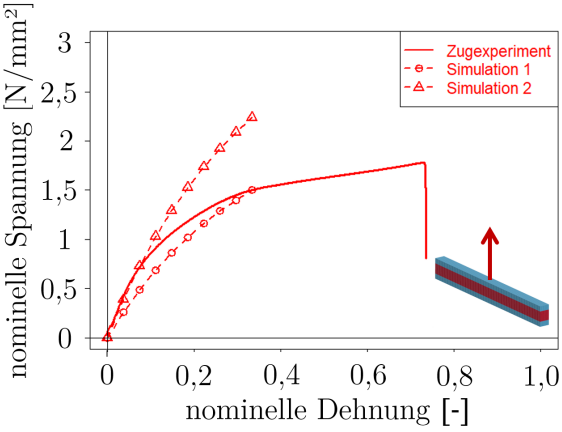


Abbildung 5.6: Abgleich von Simulation und Experiment (Zug, 12 mm x 6 mm x 100 mm)

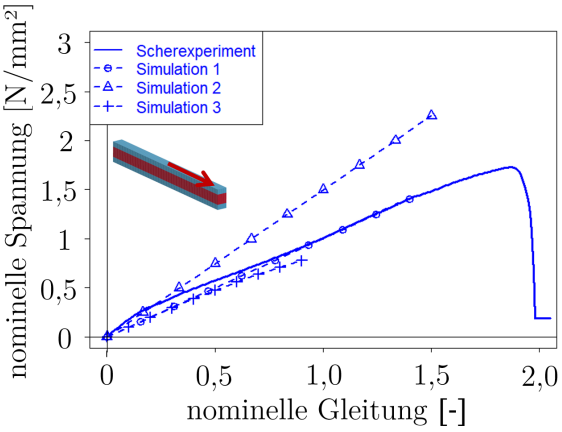


Abbildung 5.7: Abgleich von Simulation und Experiment (Scherung, 12 mm x 6 mm x 100 mm)

5.2.4.4.2 Analyse interner Beanspruchungszustände Nachfolgend wird für die beiden Belastungsarten Zug und Scherung der interne Beanspruchungszustand analysiert. Hierfür werden zunächst die Werte aller Elemente des FE-Modells auf Basis der in Abschnitt 5.2.4.3 beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet, um den Einfluss der Netzauflösung auf die Ergebnisse zu ermitteln. Zur Bewertung dieser Ergebnisse werden der Median der Spannungsmehrachsigkeit $\tilde{\eta}$ aller Elemente des Modells sowie die Häufigkeitsverteilung ausgewertet.
Ferner wird in diesem Abschnitt zur Analyse der Veränderung der internen Beanspruchungsgrößen bei fortschreitender Deformation eine Betrachtung der ermittelten Werte bei zwei unterschiedlichen nominellen Dehnungszuständen durchgeführt.

5.2.4.4.3 Studie zum Netzeinfluss Zunächst wird nach der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise der Einfluss der Netzauflösung auf die Ergebnisse unter Zugbeanspruchung untersucht. Nach den im Abschnitt 2 beschriebenen Zusammenhängen und der Auswertung von Gleichung 2.36 auf Elementebene können Bereiche mit dominanter hydrostatischer Beanspruchung identifiziert werden. Für die simulierte H-Probe sind diese charakteristisch in den Innenbereichen, nahe der Fügepartner zu finden. Dies ist anhand einer Falschfarbendarstellung in Abbildung 5.8 für das verwendete Halbmodell der Fuge dargestellt. Für das Kriterium Spannungsmehrachsigkeit kann im Rahmen der Studie keine Konvergenz für die Spitzenwerte der Spannungsmehrachsigkeit im Modell mit zunehmender Netzfeinheit festgestellt werden (siehe Abbildung 5.8). Demgegenüber ergibt jedoch die verwendete statistische Betrachtung ab Netz 3 bereits nur noch geringe Abweichungen des Medians sowie der Interquartilabstände.

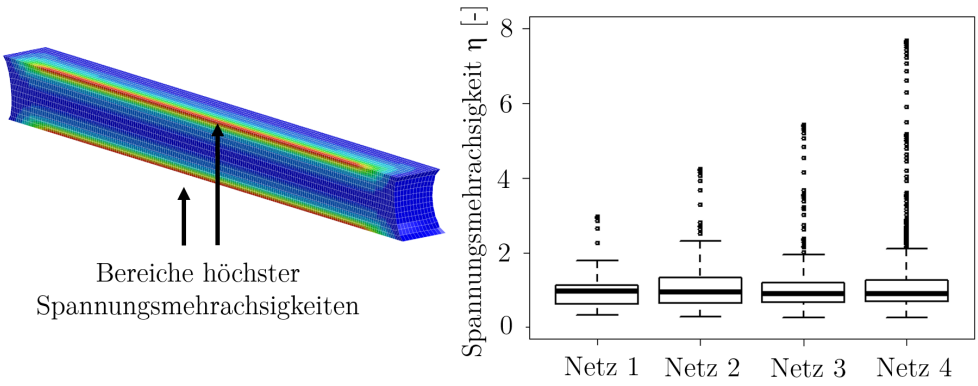


Abbildung 5.8: Studie zum Einfluss der Netzfeinheit nach Tabelle 5.6 auf die Verteilung der Spannungsmehrachsigkeit (Zug, 12 mm x 6 mm x 100 mm)
(Quelle: eigene Darstellung)

5.2.4.4.4 Auswertung der internen Beanspruchungszustände Zur Analyse der Entwicklung der internen Beanspruchungszustände infolge einer fortschreitenden Deformation werden für jeden Belastungsmodus (Zug und Scherung) zwei unterschiedlich hohe Deformationszustände analysiert. Die Simulationen sind am gleichen numerischen Modell durchgeführt (siehe Abschnitt 5.2.4.3). Ausgewertet sind die Werte der Spannungsmehrachsigkeit jedes Elementes des Klebstoffs aus dem numerischen Modell. Diese Menge unterschiedlicher Werte wird in Histogrammform dargestellt. Zur Betrachtung der unterschiedlichen Deformationszustände erfolgt die Analyse aller Elemente sowohl für den ersten als auch den finalen Zeitschritt. Die hieraus resultierenden nominalen Verzerrungszustände in Abhängigkeit von den zwei unterschiedlichen Belastungsmodi sind in Tabelle 5.8 dargestellt.

Tabelle 5.8: Darstellung der simulierten Verzerrungszustände zur Analyse der internen Beanspruchungszustände für Zug und Scherung (12 mm x 6 mm x 100 mm)

Deformationszustand	**nominelle Gleitung**	**nominelle Dehnung**
	$tan\gamma$	ϵ_n
[–]	[–]	[–]
1	0,1	0,03
2	1	0,3

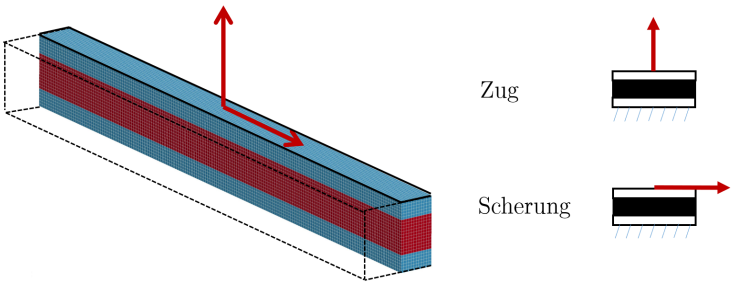


Abbildung 5.9: Darstellung des zur Anwendung kommenden Halbmodells und der untersuchten Belastungsrichtungen
(Quelle: eigene Darstellung)

Die Ergebnisse dieser Vorgehensweise sind in Abbildung 5.10 und 5.11 anhand der Verteilung der Element-Ergebnisse des numerischen Modells dargestellt. Dies geschieht getrennt in Abhängigkeit von den beiden Belastungsmodi sowie den simulierten Verformungszuständen (siehe Tabelle 5.8).
Anhand dieser Ergebnisse kann festgestellt werden, dass sich im Scherexperiment im Laufe der Simulation eine Umlagerung von vorwiegender Schubbeanspruchung $\eta = 0$ ($\eta = 0$ bei tan $\gamma = 0,1$) zu einer uniaxialen Zugbeanspruchung $\eta = 1/3$ einstellt.
Anhand der Ergebnisse aus dem simulierten Zugmodell kann die Beeinflussung durch den hydrostatischen Beanspruchungszustand in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung gezeigt werden. Das Zugexperiment ist für die Deformationszustände 1 und 2 nach Tabelle 5.8 gekennzeichnet von Spannungsmehrachsigkeiten $\eta > 1$. Das ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber den ermittelten Beanspruchungszuständen unter Scherung.

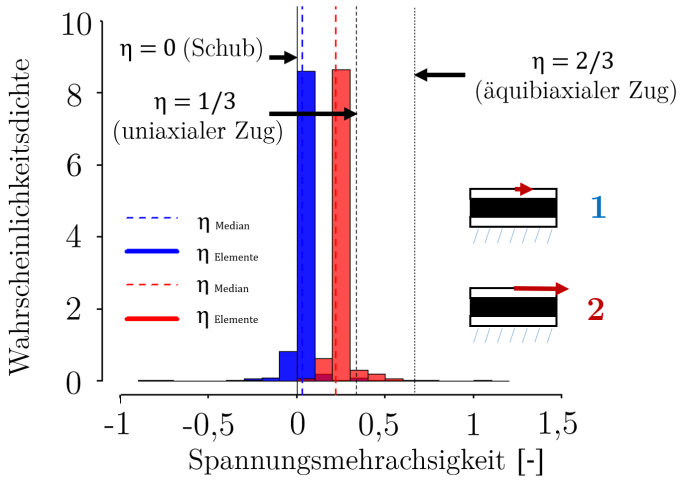


Abbildung 5.10: Vergleich der Verteilung der Spannungsmehrachsigkeit im Modus Scherung in Abhängigkeit der nominellen Gleitung
(Quelle: eigene Darstellung)

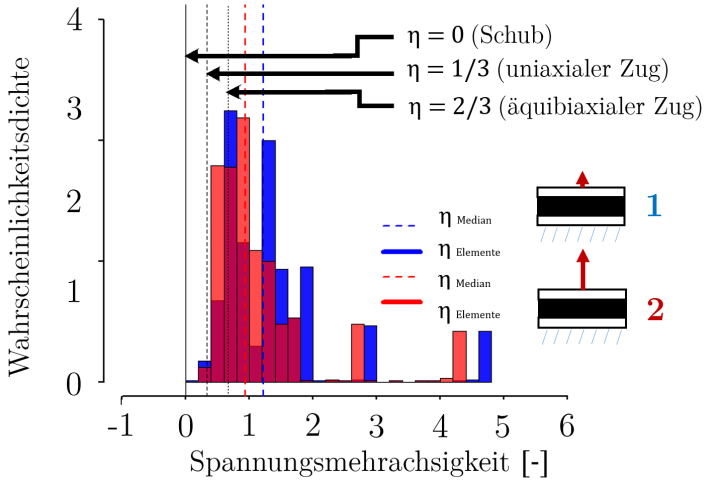


Abbildung 5.11: Vergleich der Verteilung der Spannungsmehrachsigkeit im Modus Zug in Abhängigkeit der nominellen Dehnung
(Quelle: eigene Darstellung)

5.2.5 Analytische Betrachtung der effektiven Steifigkeit

5.2.5.1 Ausgangssituation

Es wird auf Basis der experimentellen sowie der numerischen Untersuchungen davon ausgegangen, dass sich die Ausprägung der hydrostatischen Anteile mit der Probenform und somit mit dem Grad der Querdehnbehinderung ändert. Dies wird nachfolgend mit Hilfe eines analytischen Ansatzes weiter betrachtet.
Hierzu wird ein Verfahren aus dem Bereich der Kautschuktechnik an die vorliegende Fragestellung angepasst. Hierbei handelt es sich um eine Lösung zur Ermittlung der Drucksteifigkeit für rechteckförmige, kompressible Schichten. Die hierfür in (99) hergeleitete Differentialgleichung sowie die angenommenen Randbedingungen werden als grundsätzlich mechanisch ähnlich zu der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Fragestellung der effektiven Zugsteifigkeit von 2-Flanken-Klebungen angesehen.

5.2.5.2 Randbedingungen der Differentialgleichung nach Tsai

Nachfolgend werden die wesentlichen Grundzüge der angewendeten Differentialgleichung und ihrer Lösung als Reihenentwicklung beschrieben, für die Herleitung sei an dieser Stelle auf (99) verwiesen. Der Ansatz basiert auf der Randbedingung, dass sich der betrachtete elastische Körper zwischen zwei unendlich steifen rechteckigen Flächen befindet. Es wird durch (99) die Annahme getroffen, dass die sich infolge einer Druckbeanspruchung einstellende Querverschiebung die vertikalen Linien quadratisch verändert, virtuelle horizontale Linien im Klebstoff jedoch eben bleiben. Die Abmessungen dieses Körpers sind definiert durch die Länge 2*b (Koordinate y), die Breite 2*a (Koordinate x) sowie die Dicke t (Koordinate z). Dies ist in Abbildung 5.12 dargestellt.

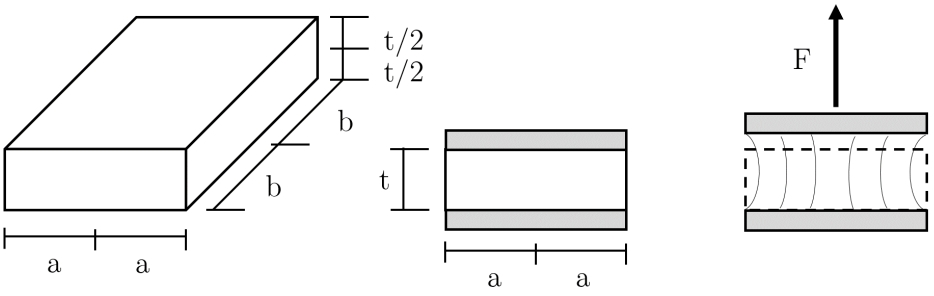


Abbildung 5.12: Geometrische Parameter der Fuge
(Quelle: eigene Darstellung nach (99))

Der Quotient aus der über den Körper veränderlichen Normalspannungskomponente σ_{zz} sowie die sich infolge einer Belastung in Z-Richtung einstellenden Dehnung ϵ_{zz} werden in (99) in Abhängigkeit von dem über die Höhe gemittelten hydrostatischen Druck wie folgt beschrieben:

$$\frac{\sigma_{zz}}{-\epsilon_{zz}} = \frac{E}{1+\nu}(1 + \frac{\nu}{1-2*\nu}\frac{p(x,y)}{K*\epsilon_{zz}}) \tag{5.8}$$

Der effektive E-Modul der querdehnbehinderten Fuge wird durch Integration der ortsabhängigen Normalspannung σ_{zz} über die Gesamtfläche sowie Bildung des Mittelwertes berechnet. Dies erfolgt in (99) wiederum in Form einer Reihenentwicklung und ist für in Z-Richtung negative Belastungen definiert. Für die vorliegende Anwendung einer Zugbelastung ändert sich hierbei jedoch nur das Vorzeichen (155). In (99) wird der effektive Modul als normierte Größe bestimmt. Der Referenzwert ist der uniaxiale Modul $E_{uniaxial}$. Der Funktionswert ergibt nach Auswertung einen Erhöhungsfaktor $\frac{E_{eff}}{E_{uniaxial}}$ der folgenden Form (99):

$$\begin{aligned}\frac{E_{eff}}{E_{uniaxial}} =& 1 + \frac{4*1*\nu^2}{(1+\nu)(1-2\nu)}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{[(n-\frac{1}{2})\pi]^2} \\ &\{\frac{tanh\gamma_n * a}{\gamma_n * a} - (1 - \frac{3*(1-2*\nu)}{\gamma_n^2 * t^2 + 6*(1-\nu)}) * \frac{tanh\beta_n x}{\beta_n a} \\ &+ \frac{tanh\overline{\gamma_n} * b}{\gamma_n * b} - (1 - \frac{3*(1-2*\nu)}{\overline{\gamma}_n^2 * t^2 + 6*(1-\nu)}) * \frac{tanh\overline{\beta_n} b}{\overline{\beta_n} b}\}\end{aligned} \tag{5.9}$$

Es ist ersichtlich, dass im vorliegenden Fall die effektive Steifigkeit eine Funktion der Geometrie (Fugenbreite, Fugenhöhe sowie Fugenlänge), der Querdehnzahl ν sowie

des uniaxialen E-Moduls $E_{uniaxial}$ ist. Der Einfluss der geometrischen Parameter kann mit einem Wert S, dem Gestaltfaktor (Shape-Faktor), zusammengefasst werden (99). Der uniaxiale E-Modul kann als Funktion des Schubmoduls und der Querdehnzahl beschrieben werden. Die effektive Steifigkeit für querdehnbehinderte Fugen ist auf Basis der hier verwendeten Gleichung eine Funktion $E_{eff}(S, \nu, G)$. Nachfolgend wird aufgrund seiner besonderen Bedeutung der Shape-Faktor weiter beschrieben.

5.2.5.3 Shape-Faktor

Die Möglichkeit, wichtige ingenieurtechnische Kenngrößen in Formfaktoren zusammenzufassen und zu beschreiben, ist für Elastomerbauteile Stand der Technik (26). Nach (26) kann die Erhöhung der effektiven Steifigkeit infolge der Querdehnbehinderung mit Hilfe effektiver Module beschrieben werden. Diese sind nach (26) in Abhängigkeit von der Geometrie, ausgedrückt durch die Parameter α_{Gent} und β_{Gent}, sowie von einem Bezugsmodul E_{Bezug} wie folgt definiert:

$$E_{eff} = E_{Bezug}(1 + \alpha_{Gent} * \beta_{Gent}^2) \tag{5.10}$$

Wobei sich der Parameter β_{Gent} aus dem Verhältnis der lastfreien zur belasteten Fläche ergibt. Der Einfluss der Kompressibilität wird hierbei pragmatisch durch einen Korrekturfaktor ($\alpha_{Gent} = Korrekturfaktor$) berücksichtigt und kann für verschiedene Werkstoffe angegeben werden (26).
In Analogie definiert (99) einen Shape-Faktor S:

$$\beta_{Gent} = \frac{A_{Last}}{A_{frei}} = S = \frac{a * b}{t * (a + b)} \tag{5.11}$$

Mit Hilfe von Gleichung 5.11 lassen sich für die 5 untersuchten Geometrien die in Tabelle 5.9 dokumentierten Shape-Faktoren bestimmen.

Tabelle 5.9: Darstellung der berechneten Shape-Faktoren auf Basis von Gleichung 5.11 für die untersuchten Geometrien (Werkstoffe SGA, SGB und HKB)

Geometrie	Shape-Faktor
[mm x mm x mm]	[-]
12 x 6 x 100	0,893
24 x 6 x 100	1,613
12 x 12 x 100	0,446
24 x 12 x 100	0,806
25 x 2 x 100	5

5.2.5.4 Auswertung und Abgleich mit experimentellen Ergebnissen

Nachfolgend wird die Gleichung 5.9 ausgewertet und ein Abgleich mit den experimentellen Untersuchungen aus Abschnitt 4.3.3 durchgeführt.
In Diagramm 5.13 ist die Auswertung der Gleichung 5.9 in Abhängigkeit von der Querdehnzahl für 4 verschiedene Shape-Faktoren dargestellt (Silikonwerkstoff SGB). Als Grundelastizität wird der initiale Schermodul G = 1,55 N/mm^2 verwendet. Durch die Darstellung ist der Einfluss der Querdehnzahl in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Geometrien ersichtlich. Bei der Geometrie mit dem größten Shape-Faktor (S = 1,613; 24 mm x 6 mm x 100 mm) ist die Auswirkung der Veränderung der Querdehnzahl auf den berechneten effektiven Zugmodul am größten. Dies ist durch den starken Anstieg der Funktionswerte ersichtlich. Bei kleineren Shape-Faktoren ist dies nicht mehr so ausgeprägt, der Grad der Querdehnbehinderung ist hier geringer. Für eine Querdehnzahl von ν = 0,495 sind in Abbildung 5.14 die ermittelten Steifigkeiten den experimentellen Ergebnissen aus Abschnitt 4.3.3 gegenübergestellt. Qualitativ kann mit dieser Vorgehensweise eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen erzielt werden. Beim geringsten Shape-Faktor (S = 0,446; Geometrie 12 mm x 12 mm x 100 mm) ist die Abweichung von den experimentellen Ergebnissen am größten. Die im Experiment ermittelte Steifigkeit wird durch das Modell unterschätzt. Es kann jedoch festgehalten werden, dass mit dieser Methodik eine Verbesserung der Prognose der effektiven Steifigkeit der modifizierten H-Probe unter Zugbeanspruchung, gegenüber der in Abschnitt 5.2.3.3 untersuchten Vorgehensweise unter Verwendung der idealisierten Randbedingungen, erzielt werden kann.

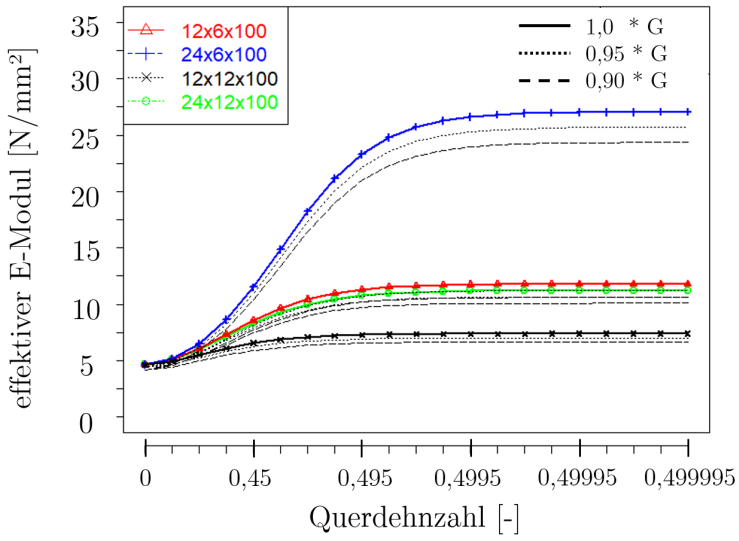


Abbildung 5.13: Auswertung von Gleichung 5.9 für verschiedene Geometrien in Abhängigkeit von der Querdehnzahl
(Quelle: eigene Darstellung)

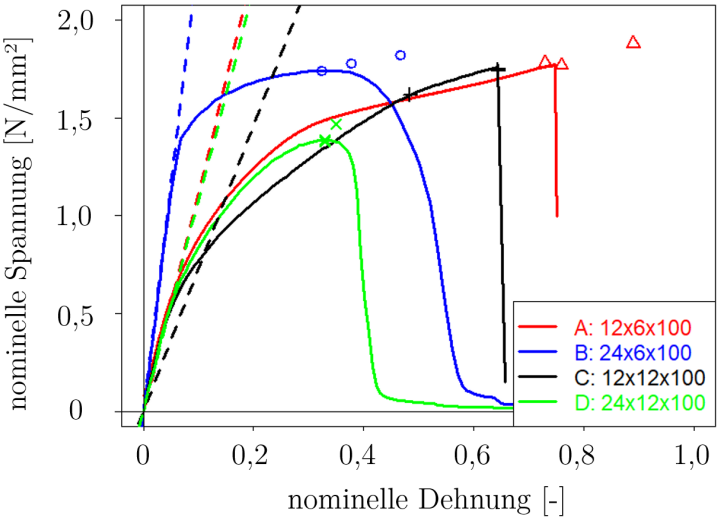


Abbildung 5.14: Darstellung der für eine Querdehnzahl ν = 0,495 berechneten effektiven Steifigkeiten (gestrichelte Linien) und der experimentellen Ergebnisse (durchgezogene Linien) (Quelle: eigene Darstellung)

5.2.6 Zusammenfassung und Diskussion

Es wurde die Steifigkeit der modifizierten H-Probe im Modus Zug und Scherung analysiert. Betrachtet wurden hierbei stets Erstbelastungen der Proben. Hierfür wurden unter Anwendung verschiedener Werkstoffmodelle verschiedene analytische wie auch numerische Ansätze untersucht. Die Ergebnisse werden nachfolgend wiedergegeben und diskutiert:

- Für die Analyse der effektiven Steifigkeit wurden zwei verschiedene Schermodule in Abhängigkeit von unterschiedlichen Dehnungsbereichen ermittelt (siehe Abschnitt 5.2.2). Mit diesen Parametersätzen wurden die Steifigkeitseigenschaften der modifizierten H-Probe analysiert.
  Die Übertragbarkeit von Werkstoffparametern auf Basis der hier durchgeführten uniaxialen Zugexperimente auf das Verhalten der modifizierte H-Probe (12 mm x 6 mm x 100 mm) unter Zug- und Scherbeanspruchung gelingt mit dieser Vorgehensweise nicht ohne Einschränkung. Die zunächst untersuchten idealisierten Randbedingungen erzielten zu steife oder zu weiche Ergebnisse für die

modifizierte H-Probe unter Zugbelastung (siehe Abbildung 5.4). Für den Modus Scherung gelingt demgegenüber eine Abbildung des Steifigkeitsverlaufs für unterschiedliche Gleitungsbereiche. Das bedeutet, dass der Parametersatz, der in einem Dehnungsbereich ϵ_n = 0 - 0,1 anhand der Zugexperimente ermittelt wurde, auch zur Abbildung des Anfangsbereiches der Scherprobe herangezogen werden kann. Demgegenüber ist mit Parametersatz 2 eine gute Übereinstimmung für den weiteren Verlauf der Zugprobe (siehe Abbildung 5.2) $\epsilon_n > 0{,}1$ wie auch für den Endbereich des Verlaufs der modifizierten H-Probe (siehe Abbildung 5.3) erzielbar.

- Durch die numerische Simulation konnte gezeigt werden, dass eine Zugbeanspruchung auf die untersuchte 2-Flankengeometrie einen hydrostatischen Beanspruchungszustand im Inneren der Fuge hervorruft. Die Ausprägung und das Auftreten dieser Größe sind abhängig vom Grad der Querdehnbehinderung. Unter Scherung spielt dieser Einfluss eine untergeordnete Rolle, was die experimentell beobachtete Unabhängigkeit der Steifigkeit von der Geometrie bei der modifizierten H-Probe unter Scherung erklären kann.

- Mit keinem der beiden Werkstoffmodelle sowie keinem der Parametersätze konnten im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen die experimentell ermittelten Kraft-Verformungs-Verläufe in der numerischen Simulation abgebildet werden. Dies wird durch aktuelle Beobachtungen in anderen Arbeiten bestätigt (siehe z.B. (180), (209)). Hier wird für die Abbildung des Scherexperimentes aus diesen Gründen auf Modelle zurückgegriffen, die ohne Parameteridentifikation auf Basis von Antwortfunktionen arbeiten. Darüber hinaus sind für diese Herausforderung Bestrebungen zur Anpassung der Energiefunktionen an den nichtlinearen Verlauf des Scherexperimentes in der Literatur zu finden ((194)). Inwiefern mit diesen Ansätzen entsprechend eine gemeinsame Abbildung des Scher- sowie des querdehnbehinderten Zugexperimentes möglich ist, wie es im hier vorliegenden Fall versucht wurde, muss weiter untersucht werden. Hier erscheint es auf Basis der durchgeführten Untersuchungen wichtig, dass die Nichtlinearität des Schubmoduls in Abhängigkeit vom Verzerrungszustand korrekt erfasst werden kann, um die unterschiedlichen Steifigkeitsbereiche unter Scherung und dem querdehnbehinderten Zug in kleinen ($\epsilon_n < 0{,}1$) wie auch großen Dehnungsbereichen $\epsilon_n \geq 0{,}1$ korrekt abzubilden.

- Betrachtungen mit Hilfe einer analytischen Lösung haben die Einflüsse der Parameter auf die effektive Steifigkeit aufgezeigt. Das aus der Geometrie berechnete Maß Shape-Faktor aus der Kautschuktechnik scheint einen geeigneten Wert zur

Quantifizierung des Grades der Querdehnbehinderung für Dickschichtklebungen darzustellen. Jedoch muss die Abhängigkeit vom Eingangswert des elastischen Schubmoduls sowie von der Querdehnzahl diskutiert werden. Das betrifft insbesondere die Frage, in welchem Genauigkeitsbereich diese Werte sinnhaft messtechnisch ermittelt werden können (Einfluss der Querdehnzahl), wie auch die Frage der Abhängigkeit vom Verzerrungszustand. Hier scheinen auf Basis der durchgeführten experimentellen wie auch analytischen Betrachtungen die Eingangswerte, die im geringen Dehnungsbereich ermittelt wurden, für die korrekte Abbildung der effektiven Steifigkeit der querdehnbehinderten Zugversuche geeignet.

5.3 Analyse von Grenzkriterien

5.3.1 Ausgangssituation

5.3.1.0.1 Vorgehensweise Es konnte im vorherigen Abschnitt gezeigt werden, dass der hydrostatische Beanspruchungszustand die Steifigkeitseigenschaften der untersuchten Klebfuge unter Zugbeanspruchung maßgebend beeinflusst. Nachfolgend wird die Beanspruchungshöhe in der modifizierten H-Probe untersucht. In Analogie zur Analyse der Steifigkeiten wird zunächst eine analytische Betrachtung unter idealisierten Randbedingungen durchgeführt.

5.3.1.0.2 Auswahl lokaler Beanspruchungskriterien Zunächst werden für idealisierte Randbedingungen die in Kapitel 2 dargestellten und nachfolgend dokumentierten Hypothesen zur Bewertung der Beanspruchungshöhe genutzt:

- Rankine-Hauptspannung: $\sigma_{Rankine} = max(\sigma_1)$
- St.Venant-Hauptdehnung: $\epsilon_{St.Venant} = max(\epsilon_1)$
- Kavitationskriterium nach Gent: $p_{Kavitation} = 5 * G/2$ (siehe Abschnitt 2.3.1.3)

Die Rankine- sowie die St.Venant-Hypothese werden nur für positive Werte ($max(\sigma_1)$ und $max(\epsilon_1)$) betrachtet, was den kautschuktypischen Versagensmechanismen entspricht. Tritt das Versagen im uniaxialen Zugexperiment, wie im vorliegenden Fall, im verjüngten Probenbereich ein, ergeben sich die maximal ertragbaren Werte nach Rankine sowie der St.Venant-Hypothese direkt aus den Maximalwerten der Spannung und

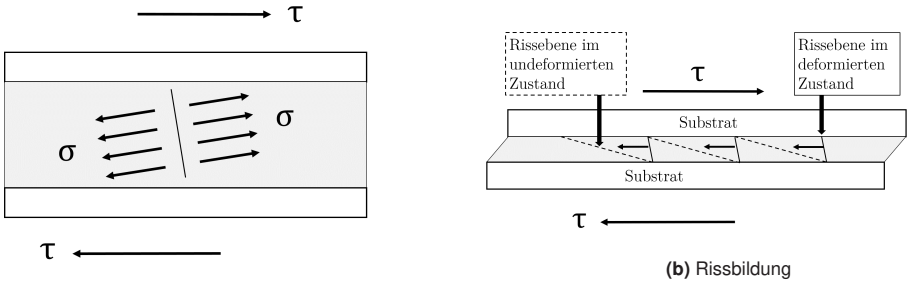
der Dehnung mit ihren charakteristischen Streuwerten. Die maximale Hauptdehnung kann anhand der Bruchdehnung als Streckung direkt aus dem Experiment bestimmt werden. Hierbei wird in erster Näherung, mangels alternativer Messwerte, vernachlässigt, dass die lokalen Dehnungsgrößen von den hier verwendeten Nenndehngrößen abweichen können. Hierfür gilt der Zusammenhang $\lambda_1 = \epsilon_{xx} + 1$ mit ϵ_{xx} als Bruchdehnung (siehe Kapitel 2).

5.3.2 Scherbeanspruchung

Nachfolgend wird für die Scherbeanspruchung die Anwendbarkeit der Hauptspannungshypothese sowie der Hauptdehnungshypothese als Grenzkriterium untersucht. Dies basiert auf den Ergebnissen zur Analyse der Spannungsmehrachsigkeit in Abschnitt 5.2.4.4.2. Ferner werden die Erkenntnisse zu den Versagensvorgängen von Elastomerklebverbindungen unter Scherung aus (65) für die Analyse herangezogen. Diese werden nachfolgend kurz beschrieben.

5.3.2.1 Analyse der Brucherscheinung nach Darque-Ceretti

Die in (65) beschriebenen Effekte zum Versagen von Elastomerfugen unter Scherbeanspruchung können mit Brucherscheinungen korreliert (siehe Abbildung 5.15) werden. In (65) wurde festgestellt, dass das Versagen der Probekörper durch Risse orthogonal zur theoretischen maximalen Hauptspannungsrichtung initiiert wird. Dieses Prinzip ist in Abbildung 5.15 dargestellt.



(a) Hauptspannungswirkung

(b) Rissbildung

Abbildung 5.15: Hauptspannungsrichtung und Rissbildung (Quelle: eigene Darstellung nach (65))

Für die durchgeführten Scherexperimente an der modifizierten H-Probe kann diese Art des Versagens in ähnlicher Form beobachtet werden (siehe Abschnitt 4). Nachfolgend werden die Brucherscheinungen im Scherexperiment hinsichtlich der in (65) festgestellten Bruchwinkel untersucht. Hierfür eignen sich aufgrund ihrer Länge in besonderer Weise die modifizierten H-Proben. Es erfolgen Vermessungen der geometrischen Abmessungen auf Basis von Fotodokumentationen der Bruchflächen.

5.3.2.1.1 Versuchsaufbau Hierzu werden zunächst mit Hilfe einer Digitalkamera Aufnahmen der Bruchfläche gemacht. Das Schema ist in Abbildung 5.16 dargestellt.

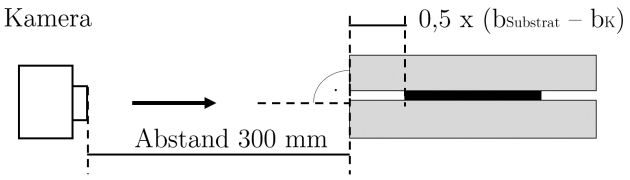


Abbildung 5.16: Schema der Kameraanordnung zur Bruchwinkelmessung (Quelle: eigene Darstellung)

Die Fotos werden orthogonal zur Probenseite im Abstand von 300 mm zur unteren Substratkante aufgezeichnet. Im Anschluss werden an die Rissflächen digital Dreiecke konstruiert, sodass sich jeweils die Hypotenuse als Parallele zu den Einzelrissebenen einstellt. Als Referenzebene wird hierzu die Außenkante des unteren Fügepartners definiert. Auf Basis der Innenwinkelbeziehungen wird der Winkel Φ_B bestimmt (siehe Abbildung 5.17). Als Referenzmaß wird die Substratlänge l = 100 mm gewählt.

5.3.2.1.2 Ergebnisse der Messung Die Vermessung wird nach der Durchführung der Experimente an unbelasteten Probekörpern durchgeführt. Dies geschieht exemplarisch an zwei Scherprobekörpern (siehe Abbildung 5.18 und Abbildung 5.19). Es kann festgestellt werden, dass die Brucherscheinungen beim Haftklebstoff (Abbildung 5.19) sehr homogen und durchgängig vom oberen zum unterem Substrat verlaufen. Dies kommt der beschriebenen Modellvorstellung in Abbildung 5.15 nahe. Es kann ein Mittelwert des Winkels an 5 Bruchebenen von $\overline{x}$ = 7,27 ° mit einer Standardabweichung von 0,41 ° ermittelt werden. Für den Silikonwerkstoff (Abbildung 5.18) zeigen sich die Rissebenen weniger ausgebildet und erstrecken sich nicht von Substrat zu Substrat über die gesamte Fugenhöhe. Dies erschwert die Anwendung der gewählten Methodik. Es können hier 8 Winkel mit einem Mittelwert von $\overline{x}$ = 47,68 ° und einer

Standardabweichung von 8,72 ° bestimmt werden. Es wird trotz dieser Abweichungen eine Auswertung für beide Werkstoffe durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 5.10 dokumentiert sind.

Tabelle 5.10: Ergebnis der Winkelbestimmung

Nummer	**Winkel SGA**	**Winkel HKB**
	[°]	[°]
1	47,04	6,78
2	46,99	7,19
3	47,73	7,09
4	65,88	7,43
5	47,85	7,87
6	44,38	-
7	33,92	-
8	47,68	-
Mittelwert $\overline{x}$	47,68	7,27
Standardabweichung sd	8,72	0,41

5.3.2.1.3 Auswertung und Berechnung der Bruchgleitung Mit Hilfe der ermittelten Winkel wird eine Analyse der Winkelbeziehungen im Bruchzustand durchgeführt. Tritt der Bruch orthogonal zur Wirkungsrichtung der größten Hauptdehnung auf, kann auf den Versagensgleitwinkel der Probe geschlossen werden. Hierfür werden die Winkelbeziehungen nach 5.17 herangezogen.

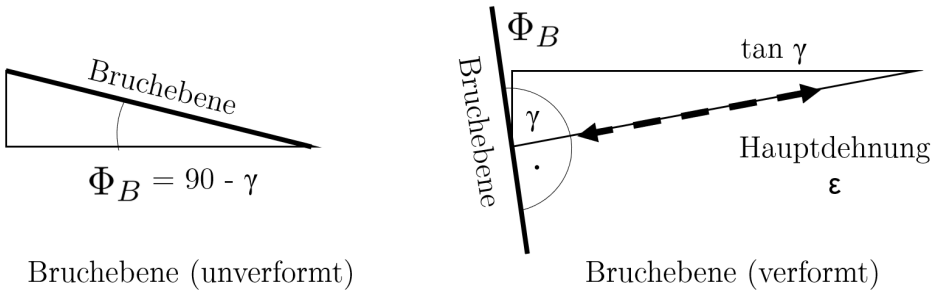


Abbildung 5.17: Schema der Winkelbeziehungen zur Berechnung der Bruchgleitung (Quelle: eigene Darstellung)

Die gemessenen Winkel Φ_B der Bruchebenen stehen mit dem Gleitwinkel γ im rechtwinkligen Dreieck im Zusammenhang $\Phi_B = 90 - \gamma$. Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich folgende Abschätzung der Versagensbruchgleitung für die beiden Proben:

Tabelle 5.11: Bestimmung der Bruchgleitung aus der Bruchebenenmessung

Werkstoff	**Mittelwert Winkel** Φ_B	**berechneter Gleitwinkel** γ	**berechnete Bruchgleitung** $tan\gamma$
	[°]	[°]	[–]
SGA	$47,68$	$42,32$	$0,91$
HKB	$7,27$	$82,73$	$7,84$

Im Vergleich zu den ermittelten Bruchgleitungen zeigen die berechneten Versagenswinkel qualitativ eine gute Übereinstimmung. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass sich entsprechende Bruchwinkel nur für den Werkstoff SGA haben ermitteln lassen. Demgegenüber erfolgt das Versagen der Proben mit dem Werkstoff SGB quasi instantan ohne eine wesentliche Ausprägung dieser Erscheinungen. Darüber hinaus ist in Abhängigkeit von der Testgeschwindigkeit eine Veränderung der Brucherscheinung zu verzeichnen. Für den Werkstoff HKB konnte das Bruchbild in dieser Ausprägung reproduzierbar beobachtet werden.

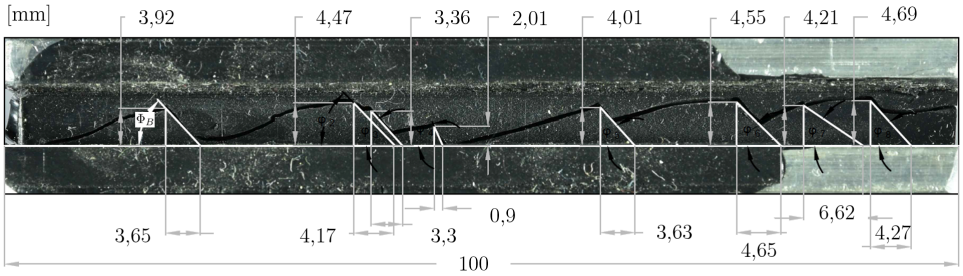


Abbildung 5.18: Bruchebenen SGA Scherexperiment (Quelle: eigene Darstellung)

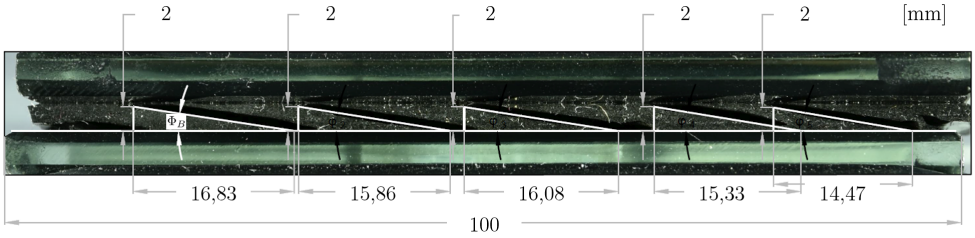


Abbildung 5.19: Bruchebenen HKB Scherexperiment (Quelle: eigene Darstellung)

5.3.2.2 Modell zur analytischen Beanspruchungsermittlung

5.3.2.2.1 Hauptspannung Für kleine Verformungen kann die Hauptspannung für die Rankine-Hypothese unter Verwendung der Scherspannungskomponente τ_{xy} wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{Rankine} = \sqrt{4 * \tau_{xy}^2} \tag{5.12}$$

Für große Verzerrungen treten weitere Beanspruchungskomponenten auf und dieser Ansatz muss erweitert werden. Dies begründet sich aus dem Auftreten weiterer Normalspannungskomponenten, die zur Erhaltung des Scherzustandes notwendig sind (12). Hierbei ist die maßgebende Komponente die Normalspannung σ_{xx} (24), die mit zunehmender Gleitung ansteigt. Infolgedessen dreht sich die Hauptspannungsrichtung in Richtung der Schergleitung.
In (65) wurde dieser Einfluss auf das Versagen von Elastomerwerkstoffen unter Scherung durch experimentelle, numerische sowie analytische Untersuchungen umfangreich untersucht. Als Ergebnis wird festgestellt, dass sich die Normalspannungskomponente mit dem Produkt aus quadratischer Schergleitung tan γ berechnen lässt.

Dies ist im Einklang mit analytischen Betrachtungen zum Verlauf der Normalspannungskomponenten unter idealisierten Randbedingungen (siehe (24)).

$$\sigma_{xx} = G * (tan\gamma_{xy})^2 \tag{5.13}$$

Die Autoren prognostizieren mit diesem Ansatz erfolgreich das Versagen verschiedener Elastomerwerkstoffe unter Scherbeanspruchung mit Bruchgleitungen bis zu $\tan\gamma = 10$. Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, dass sich bereits für Schergleitungen von $\tan\gamma = 1$ eine nicht zu vernachlässigende Beanspruchungskomponente σ_{xx} für die Berechnung der Hauptspannung einstellt. Es ergibt sich Gleichung 5.14.

$$\sigma_{Rankine,Scherung} = \frac{1}{2} * \sigma_{xx} \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_{xx})^2 + 4 * \tau_{xy}^2} \tag{5.14}$$

Es ist ersichtlich, dass in diesem Fall das skalare Versagenskriterium $\sigma_{Rankine,Scherung}$ eine Funktion der elastischen Konstante G darstellt.

5.3.2.2.2 Hauptdehnung Für die Beurteilung des Dehnungskriteriums bedarf es in Analogie zum Spannungskriterium einer Funktion der 1. Hauptdehnung in Abhängigkeit von der Schergleitung. Der vorherrschende Verzerrungszustand kann mit Hilfe des Streckgrades interpretiert werden. Die nominelle Schergleitung $\tan\gamma_{xy}$ steht mit der größten Hauptstreckung λ_1 in folgendem Zusammenhang (siehe u.a. (129)).

$$tan\gamma = (1 + \epsilon_1) - (1 + \epsilon_1)^{-1} = \lambda_1 - \lambda_1^{-1} \tag{5.15}$$

Die Funktion kann nach (45) als Streckgrad λ_1 als Funktion der nominellen Schergleitung $tan\gamma$ dargestellt werden:

$$\epsilon_1 + 1 = \lambda_1 = \sqrt{1 + \frac{(\tan\gamma_{xy})^2}{2} + \tan\gamma_{xy}\sqrt{1 + \frac{(\tan\gamma_{xy})^2}{4}}} \tag{5.16}$$

Dies erlaubt die Darstellung der Hauptstreckung in Abhängigkeit von der Schergleitung $tan\gamma$.

5.3.2.2.3 Darstellung als Funktion der Schergleitung Nachfolgend sind Gleichung 5.14 (Hauptspannung), Gleichung 5.16 (Hauptdehnung) sowie die berechnete Schernennspannung in Abhängigkeit von der nominellen Schergleitung ausgewertet und in Abbildung 5.20 dargestellt.

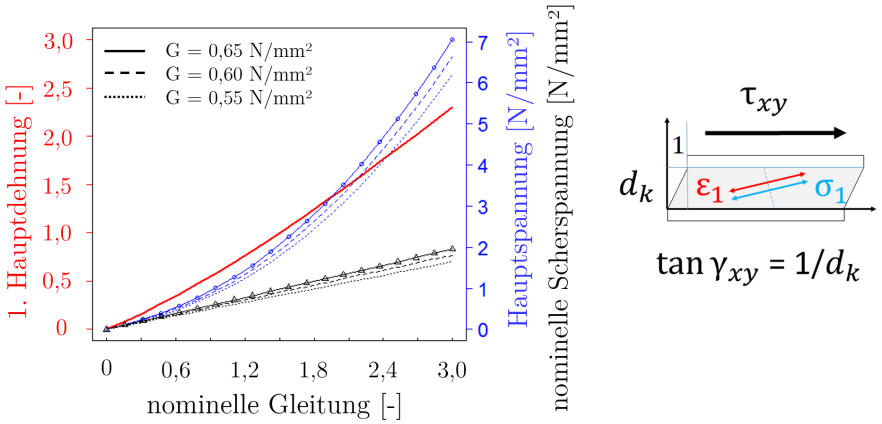


Abbildung 5.20: Darstellung der analytischen Berechnung des Hauptdehnungs- sowie des Hauptspannungsverlaufs im Vergleich zur Nenndehnung als Funktion der Schergleitung (Quelle: eigene Darstellung)

Es ist ersichtlich, dass die Beanspruchungsbeschreibung auf Basis von Gleichung 5.14 nach (65) abhängig vom Wert des Schubmoduls ist. Vor dem Hintergrund der in Kapitel 2 beschriebenen Zusammenhänge zum zeitabhängigen Werkstoffverhalten sowie der in Kapitel 3 ermittelten Lastwirkungsdauern wird dies als ein wesentlicher Nachteil gegenüber der Betrachtung der Verzerrungsgrößen als Beanspruchungskriterium angesehen. Es wird deshalb nachfolgend auf die spannungsbasierte Analyse der Beanspruchung des Scherexperimentes verzichtet.

5.3.2.3 Abgleich mit den experimentellen Untersuchungen

Die Verifizierbarkeit der dargestellten Zusammenhänge wird analysiert. Hierzu wird Gleichung 5.16 den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Für alle drei Werkstoffe werden folglich die im uniaxialen Experiment erzielten Bruchdehnungen (Mittelwert: $v_t = 10\ mm/min$) den Bruchgleitungen der Scherexperimente gegenübergestellt. Es kommen die Experimente bei Raumtemperatur zur Anwendung und es werden alle drei Testgeschwindigkeiten dargestellt. Dies geschieht für die Silikonwerkstoffe SGA (Abbildung 5.21) und SGB (Abbildung 5.22) sowie den Haftklebstoff (HKB in Abbildung 5.23).
Für die beiden Silikonwerkstoffe überschätzt das Modell auf Basis der Mittelwertbetrachtung die Tragfähigkeit der Scherexperimente (siehe Abbildungen 5.21 und 5.22). Die Tragfähigkeit der Scherexperimente wird unterschätzt. Hierzu muss berücksichtigt werden, dass die hier verwendete Bruchdehnung aus Nennmaßen auf Basis der Einspannlänge berechnet wurde. Der Einfluss der Probekörpereinschnürung und die wahre Bruchdehnung werden hierbei nicht berücksichtigt. Ferner zeigt die Bruchdehnung für diesen Werkstoff im Rahmen der Experimente im uniaxialen Zugversuch eine Beeinflussung durch die Testgeschwindigkeit. Darüber hinaus kann insbesondere der Einfluss von möglichen Adhäsionsverlusten während der experimentellen Durchführung nicht durch das Modell erfasst werden, da eine reine Klebstoffeigenschaft betrachtet wird.

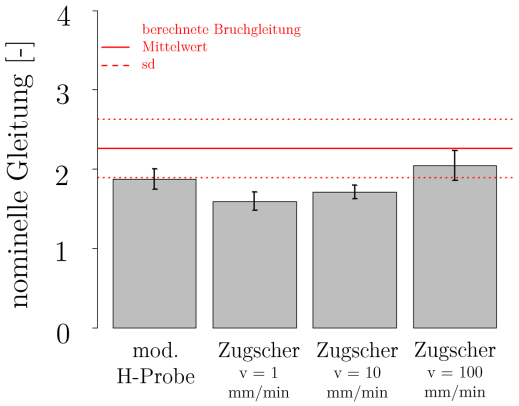


Abbildung 5.21: Vergleich der berechneten Bruchdehnung mit Ergebnissen der Zugscherexperimente (Werkstoff SGA)

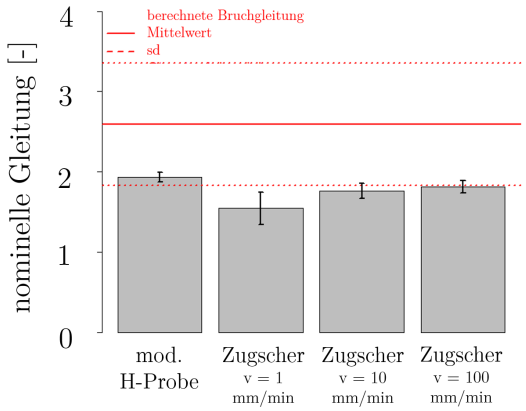


Abbildung 5.22: Vergleich der berechneten Bruchdehnung mit Ergebnissen der Zugscherexperimente (Werkstoff SGB)

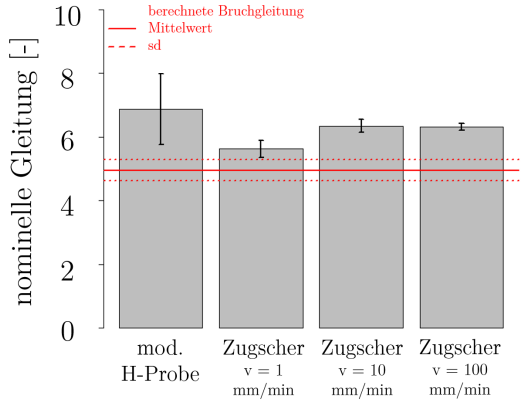


Abbildung 5.23: Vergleich der berechneten Bruchdehnung mit Ergebnissen der Zugscherexperimente (Werkstoff HKB)

5.3.2.4 Numerische Analyse der Scherexperimente

Unter Anwendung der dargestellten analytischen Zusammenhänge in Abschnitt 5.3.2.2 können für die Zugscherexperimente mit kleiner Schichtdicke sowie die modifizierte H-Probe zufriedenstellende Übereinstimmungen der nominellen Bruchschergleitung

erzielt werden. Für die Zugscherprobe mit großer Schichtdicke gilt das nicht. Im Hinblick auf diesen Unterschied wird nachfolgend mit Hilfe einer numerischen Analyse die Höhe der 1. Hauptdehnung im Zustand $\tan\gamma = 1$ für alle drei verschiedenen Probekörper untersucht. Die numerisch ermittelte Hauptdehnung ist hierbei die wahre Dehnung ϵ_w, zur Vergleichbarkeit werden die bisher verwendeten nominellen Dehnungsgrößen ϵ_n umgerechnet:

$$\epsilon_w = ln(1 + \epsilon_n) \tag{5.17}$$

Die Simulation wird mit Hilfe der Werkstoffparameter für den Werkstoff SGB durchgeführt. Es kommt für alle Probekörper die Diskretisierung 4 (Elementkantenlänge 0,5 mm) zur Anwendung. Die Verformung wird über eine Verschiebung der Knoten an der oberen Substratoberfläche des Modells so aufgebracht, dass sich für alle Probekörper die gleiche Nenngleitung $\tan\gamma = 1$ einstellt. Der Aufbau der Modelle sowie die Parameter der Simulation können Darstellung 5.24 entnommen werden.

Tabelle 5.12: Modellaufbau und Parameter der Simulation der Scherexperimente

Elementtyp	ELFORM 1 (1)
Werkstoffmodell Klebstoff	MAT_027 (2) (C1 = 0,775 N/mm^2; ν = 0,495)
Werkstoffmodell Fügepartner	MAT_001 (2) (E = 70000 N/mm^2; ν = 0,23)
Programm	LS-DYNA R971
Modelltyp	Halbmodelle
Belastung	Verformung
Richtung	Scherung, $\tan\gamma = 1$
Netz 2	Elementkantenlänge = 1 mm
Netz 4	Elementkantenlänge = 0,5 mm

5.3.2.4.1 Ergebnisse der Simulation Das Ergebnis der Simulation zeigt, dass sich die Verteilungen der Hauptdehnungsbeanspruchung in Abhängigkeit von der Probekörpergeometrie bei gleicher Nenngleitung $\tan\gamma = 1$ wesentlich unterscheiden.
Der Median der Hauptdehnung $\tilde{x}_{\epsilon_1}$ ist für alle drei Probentypen für die nominelle Gleitung $\tan\gamma = 1$ nahezu identisch. Dennoch kann festgestellt werden, dass sich für die hohe Zugscherprobe ein wesentlich inhomogenerer Verzerrungszustand einstellt. Dies ist insbesondere durch die wesentlich größeren Abstände der 1. (25 $\%$) und 3.

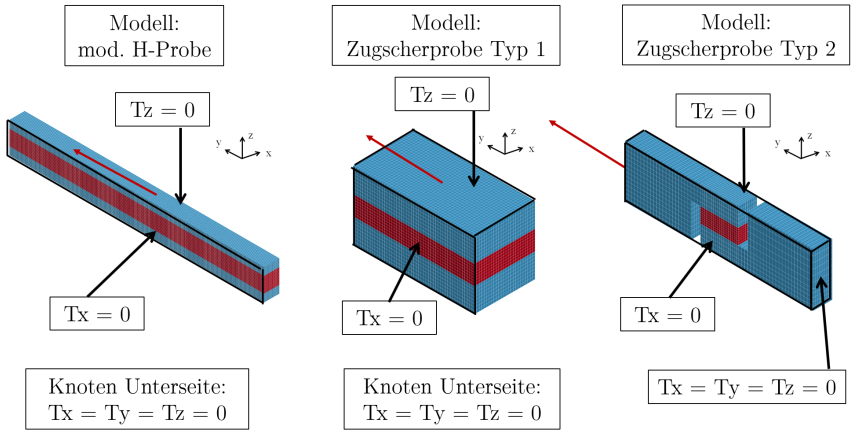


Abbildung 5.24: Randbedingungen der Modelle
(Quelle: eigene Darstellung)

(75%) Quartile zueinander ersichtlich (siehe Abbildung 5.25). Ferner muss festgestellt werden, dass mehr Elemente hier eine höhere Dehnung bei gleicher Nenngleitung ($\tan\gamma = 1$) im Vergleich zu den anderen Probentypen erfahren. Dies wird auf den Einfluss der Randzonen zurückgeführt. Es wird daher angenommen, dass die nominelle Tragkapazität der Probe von der Höhe der lokalen Beanspruchungsgrößen sowie von der Größe der beeinflussten Bereiche abhängt. Die Ausprägung dieser Bereiche der hohen Beanspruchung in Bezug zum restlichen Klebstoffvolumen kann mit der hier vorgestellten statistischen Methode identifiziert werden.

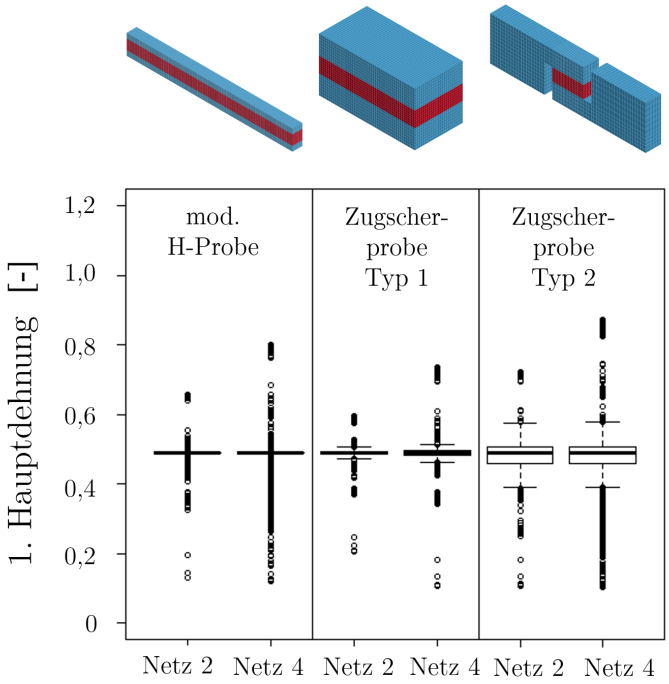


Abbildung 5.25: Verteilung der numerisch ermittelten 1. Hauptdehnung in verschiedenen Scherproben bei identischer Nenngleitung $\tan\gamma = 1$
(Quelle: eigene Darstellung)

5.3.3 Zugbeanspruchung

5.3.3.1 Beanspruchungskomponenten unter idealisierten Randbedingungen

In den experimentellen Untersuchungen wurde ein Absinken der Steifigkeit in Bezug auf den Anfangsbereich der Kurven festgestellt, was auf das Eintreten von Kavitationseffekten zurückgeführt wird. Der Beginn dieser Effekte wird auf das Überschreiten eines Schwellenwertes des negativen hydrostatischen Druckes im Inneren der Klebschicht zurückgeführt. Unter der idealisierten Randbedingung der vollständigen Querdehnbehinderung kann dieser Zustand unter einaxialer Dehnung ϵ_{zz} und gleichzeitiger Querdehnbehinderung ($\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = 0$) nach Gleichung 5.4 berechnet werden. Ferner

definiert K das Verhältnis zwischen der hydrostatisch wirkenden Zugspannung σ_m sowie der Volumendehnung ϵ_{vol} für kleine Dehnungen nach folgendem Zusammenhang:

$$K = \frac{\sigma_m}{\epsilon_{vol}} = \frac{\frac{1}{3} * (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}} \tag{5.18}$$

Die Volumendehnungen sind hier positiv definiert, wenn die Dehnungen Kompression erzeugen. Für den Fall der Klebfuge unter Zugbeanspruchung wird folglich $\epsilon_{xx} < 0$ bei gleichzeitigem Erhalten der Randbedingung $\epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = 0$. Hieraus ist ersichtlich, dass sich unter idealisierten Annahmen ein negativer hydrostatischer Druck in der Klebschicht unter externer Zugbeanspruchung einstellen muss, da der Kompressionsmodul von Werkstoffen stets positiv ist. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese idealisierten Annahmen auf mittige Bereiche im Inneren der Klebschicht begrenzt sind, Beanspruchungszustände, die diese Bereiche flankieren, müssen nach diesen Annahmen geringe Beanspruchungen infolge einer aufgezwungenen Dehnung erfahren. Unter diesen Randbedingungen ergeben sich für die Hauptspannungs- sowie die Hauptdehnungs-Hypothese folgende Formen:

$$\sigma_{Rankine,querdehnbehindert} = \sigma_1 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} * \epsilon_{xx} \tag{5.19}$$

Ist die Dehnung ϵ_{xx} homogen über die Klebschichthöhe in Richtung der aufgebrachten Zugbeanspruchung, treten die höchsten Spannungen in den Randzonen am Fügepartner auf. Die höchsten Dehnungswerte im Fall kleiner Verformungen und somit die Werte der St.Venant-Hypothese ergeben sich aus den Werten der aufgezwungenen Verformungen infolge der experimentellen Durchführung:

$$\epsilon_{St.Venant,querdehnbehindert} = \epsilon_1 = \frac{\Delta u_K}{d_K} \tag{5.20}$$

Es scheint offensichtlich, dass unter diesen Annahmen und mit dieser Vorgehensweise der reale Beanspruchungszustand in keinem Fall hinreichend genau erfasst werden kann. Wie in Abbildung 4.51 dargestellt, wird das Versagen infolge einer Rissentstehung von außen stark forciert. Bevor dieser Zustand eintritt, hat der Testkörper jedoch bereits wesentlich an Steifigkeit verloren, ohne dass äußere Schäden ersichtlich sind.

5.3.3.2 Numerische Beanspruchungsanalyse der Zug-Scherung-Interaktion

Abweichend von den idealisierten Annahmen der analytischen Betrachtung ist zu erwarten, dass in der Realität infolge einer externen Lastwirkung stets Beanspruchungsmischzustände eintreten. Diese können lokale Beanspruchungszustände erzeugen, die nicht durch die idealisierten Betrachtungen erfasst werden können. Dies wird nachfolgend getrennt nach Scher- und Zugbelastung mit Hilfe einer numerischen Simulation der modifizierten H-Probe untersucht.

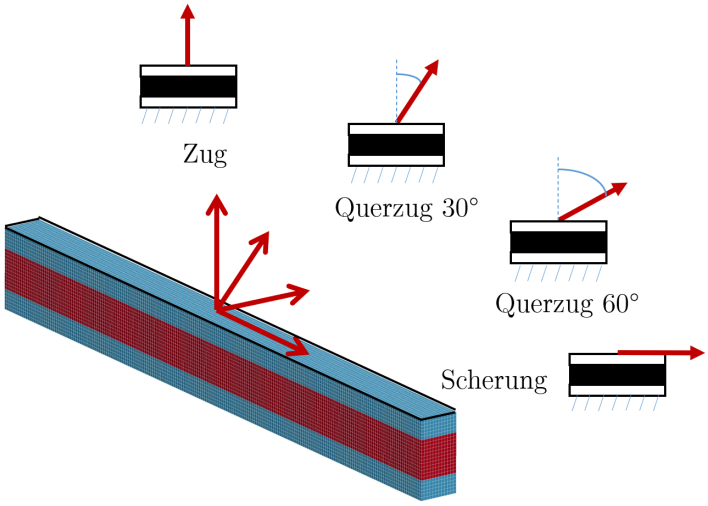


Abbildung 5.26: Darstellung der Fugenbeanspruchung in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung (Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 5.13: Darstellung des Modellparameter des Berechnungsmodells

Elementtyp	ELFORM 1 (1)
Werkstoffmodell Klebstoff	MAT_027 (2) (C1 = 0,775 N/mm^2; ν = 0,495)
Werkstoffmodell Fügepartner	MAT_001 (2) (E = 70000 N/mm^2; ν = 0,23)
Programm	LS-DYNA R971
Modelltyp	Halbmodell
Belastung	Verformung
Richtung	Scherung, Zug
Modellabmessung Klebstoff X-Y-Z (mm)	6-100-6

5.3.3.2.1 Modellaufbau Es werden an einem Modell 4 verschiedene Belastungsmoden simuliert. Diese sind in Abbildung 5.27 dargestellt. Neben den Zuständen Scherung und Zug werden die Zwischenzustände Querzug 30 und Querzug 60 simuliert. Diese werden durch die Verschiebungsvektoren nach Darstellung 5.27 aufgebracht. Es wird für jeden Belastungsmodus die gleiche Verschiebung der Knotengruppe an der Oberfläche des oberen Substrates aufgebracht. Die Modellparameter sind in Tabelle 5.13 dokumentiert.

Modus	Deformation (t = 1 s)
Zug	u_z = 2,0 mm; u_y = 0 mm
Querzug 30	u_z = 2,0 mm * cos 30 °; u_y = 2,0 mm * sin 30 °
Querzug 60	u_z = 2,0 mm * cos 60 °; u_y = 2,0 mm * sin 60 °
Scherung	u_z = 0,0 mm; u_y = 2,0 mm

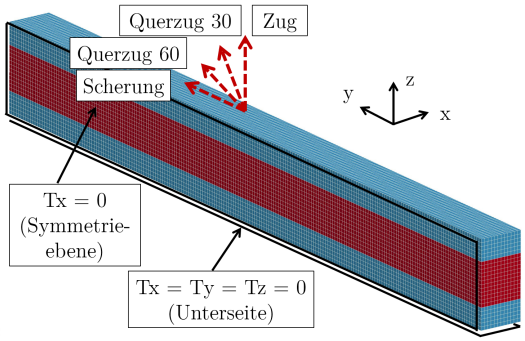


Abbildung 5.27: Darstellung des Modells sowie der aufgebrachten Deformationsgrößen (Quelle: eigene Darstellung)

5.3.3.2.2 Studie zur Netzfeinheit Zunächst wird der Einfluss der Netzfeinheit in Analogie zu der Vorgehensweise in Abschnitt 5.2.4.3 untersucht. Die Modellparameter sind hier mit denen nach Abschnitt 5.5 identisch, die untersuchten Modelle sind in Tabelle 5.6 dokumentiert. Der Einfluss des Netzaufbaus wird für den Modus Zug untersucht. Die Auswertungsmethode orientiert sich hierbei an der Vorgehensweise nach Abschnitt 5.2.4.3. Untersucht wird der Einfluss auf die Verteilung der beanspruchungsrelevanten Parameter, hydrostatischer Druck sowie erste Hauptdehnung. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Darstellungen 5.28 und 5.29 wiedergegeben. Hierzu ist nachfolgend die Verteilung der 1. Hauptdehnung dargestellt. Diese erstreckt sich entlang des Randbereichs zu den Substraten (siehe Abbildung 5.29). Es ist ersichtlich, dass mit feinerer Netzauflösung die Maximal- und Minimalwerte der 1. Hauptdehnung immer größer bzw. kleiner werden. Im Rahmen der untersuchten Netzauflösungen kann hier folglich keine Konvergenz in Bezug auf die Spitzenwerte dieses Kriteriums festgestellt werden.

Für die numerische Analyse der Zug-Scherung-Interaktion wird Netzauflösung 2 verwendet.

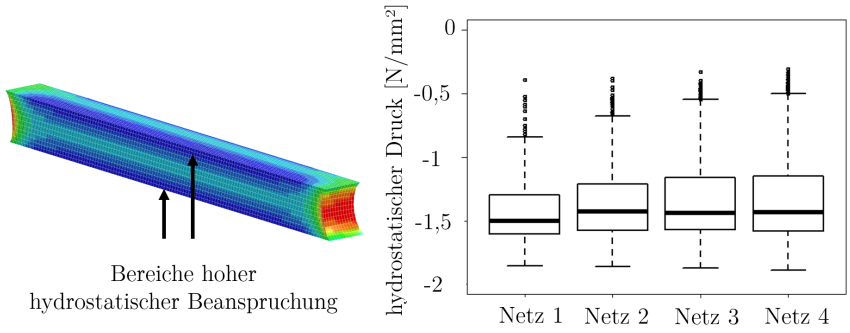


Abbildung 5.28: Studie zum Einfluss der Netzfeinheit auf die Verteilung des hydrostatischen Drucks (Simulation Zug, Halbmodell, u_z = 2,0 mm)
(Quelle: eigene Darstellung)

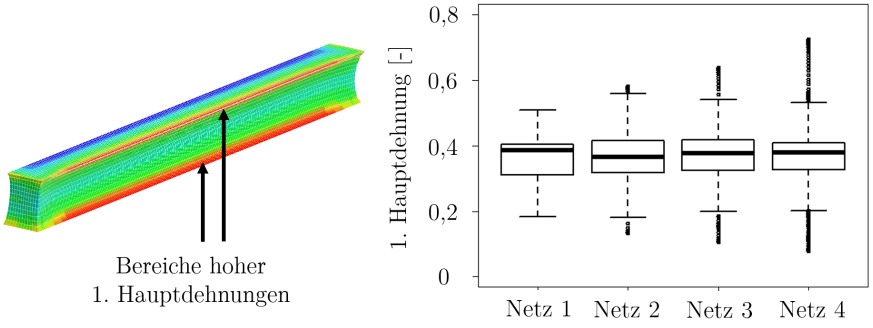


Abbildung 5.29: Studie zum Einfluss der Netzfeinheit auf die Verteilung der 1. Hauptdehnung (Simulation Zug, Halbmodell, u_z = 2,0 mm)
(Quelle: eigene Darstellung)

5.3.3.2.3 Ergebnisse der Simulation Die Beanspruchungszustände werden in Abhängigkeit von den vier Belastungsmoden ausgewertet. Diese sind aus Gründen der Darstellung in einem Interaktionsdiagramm aufgetragen. Die Beanspruchungsgrößen werden in Analogie zu der Vorgehensweise in Abschnitt 5.2.4.3 über den Median

und das 0,75-Quantil in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung dargestellt. Für eine bessere Darstellung ist der negative hydrostatische Druck als hydrostatischer Zug aufgetragen.

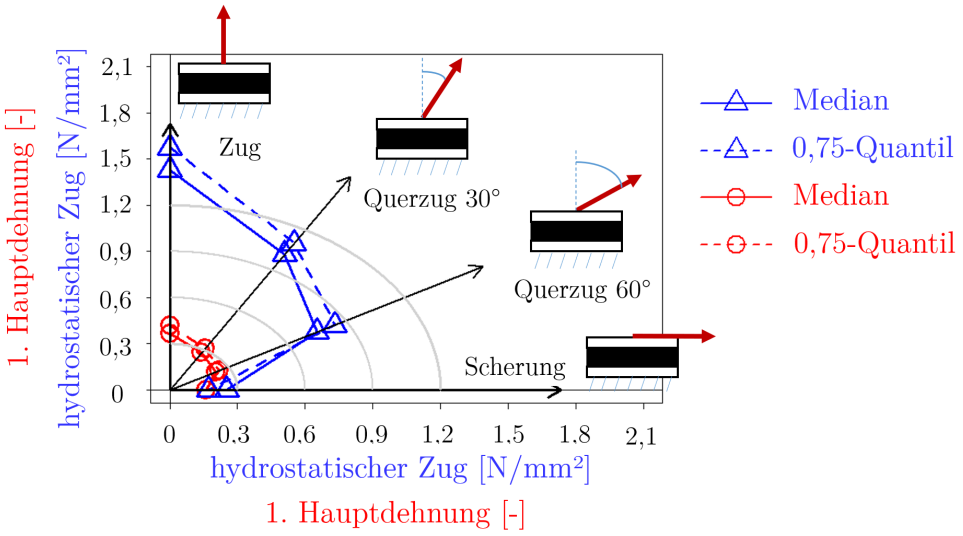


Abbildung 5.30: Darstellung der numerisch ermittelten Fugenbeanspruchung in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung bei konstanter Fügepartnerverschiebung
(Quelle: eigene Darstellung)

Die Ergebnisse zeigen die Veränderung des Beanspruchungszustandes in Abhängigkeit von der Wirkungsrichtung deutlich. Die Spitzenbeanspruchung (0,75-Quantil) der hydrostatischen Beanspruchung erreicht unter Zug den höchsten Wert und sinkt bis Querzug 60 auf ca. die Hälfte ab. Die geringste Beanspruchung ist für den Modus Scherung zu beobachten. Das ist im Einklang mit den experimentellen Beobachtungen in Kapitel 4, wo unter Scherung an der modifizierten H-Probe stets wesentlich größere Verformungszustände (Bruchgleitungen, Bruchdehnungen) erkennbar sind als unter Zug.

5.3.4 Analytische Betrachtung des geometrieabhängigen Kavitationseintritts

Es kann festgestellt werden, dass der Klebstoff im Zugexperiment beeinflusst ist von hydrostatischen Beanspruchungszuständen. Diese forcieren unter dem zur Anwendung kommenden Grenzkriterium nach Gent das Eintreten von Kavitationseffekten bei Überschreitung eines definierten negativen hydrostatischen Drucks $p_{Kavitation}$. Dieser Wert wird bei gedrungenen Fugengeometrien schon bei kleinen nominellen Dehnungen erreicht. Das Potential der Nutzung dieser Zusammenhänge als Methodik zur Prognose des Eintretens von Kavitation unter Zugbelastung wird nachfolgend untersucht.

5.3.4.1 Analytische hydrostatische Druckverteilung

Die in Abschnitt 5.2.5.2 genutzte Differentialgleichung nutzt eine Funktion der über die Höhe gemittelten hydrostatischen Druckverteilung $\overline{p}(x,y)$ zur Ermittlung der effektiven Steifigkeit. Diese Funktion ist in (99) als Reihenentwicklung mit n Reihengliedern definiert. Unter Verwendung der Zugdehnung ϵ_{zz} ist diese Funktion in folgender Form definiert:

$$\begin{aligned}\frac{\overline{p}_{(x,y)}}{K*\epsilon_{zz}} &= 1-2*\nu+4*\nu\sum_{n=0}^{N}\frac{(-1)^n}{(n-\frac{1}{2})*\pi}\\ &([((1-\frac{3*(1-2*\nu)}{\gamma_n^2*t^2+6*(1-\nu)}*\frac{cosh\beta_n x}{cosh\beta_n a}-\frac{cosh\gamma_n x}{cosh\gamma_n a}]*cosh\gamma_n*y \\ &+([((1-\frac{3*(1-2*\nu)}{\overline{\gamma}_n^2*t^2+6*(1-\nu)})*\frac{cosh\overline{\beta}_n x}{cosh\overline{\beta}_n a}-\frac{cosh\overline{\gamma}_n x}{cosh\overline{\gamma}_n a}]*cosh\overline{\gamma}_n*y\end{aligned} \tag{5.21}$$

Hierbei kommen die folgenden Parameter zur Anwendung, die sich in Abhängigkeit von der Zahl der Reihenglieder n, der Geometrie, definiert durch a,b und t (siehe oben), sowie der Querdehnzahl ν ergeben:

$$\begin{aligned}
\gamma_n &= (n - \frac{1}{2}\frac{\pi}{b}) \\
\overline{\gamma}_n &= (n - \frac{1}{2}\frac{\pi}{a}) \\
\beta_n &= \sqrt{\gamma_n^2 + \alpha^2} \\
\overline{\beta}_n &= \sqrt{\overline{\gamma}_n^2 + \beta^2} \\
\alpha &= \frac{1}{t}\sqrt{\frac{6(1-2\nu)}{1-\nu}}
\end{aligned} \tag{5.22}$$

Die Verteilung der Funktionswerte ist parametrisch mit Hilfe eines Computer-Algebra-Systems ((190)) in den Abbildungen 5.31 und 5.32 als 3D-Plot wiedergegeben. Hierbei ist die Höhe des Quotienten $\frac{\overline{p}(x,y)}{K*\epsilon_{zz}}$ als Falschfarbendarstellung räumlich über eine betrachteten Fläche (= Klebschicht) dargestellt. Wie aus Abbildung 5.12 ersichtlich, sind geometrische Eingangsparameter neben der Dicke t (= d_K) die jeweils halbe Länge b und halbe Breite a des Klebstoffs. Die Funktion ist zur besseren Darstellung über die vier Quadranten eines in Klebschichtmitte platzierten x-y-Koordinatensystems ausgewertet. Die Konturlinien zeigen gleiche Plateaus des Quotienten $\frac{\overline{p}(x,y)}{K*\epsilon_{zz}}$.

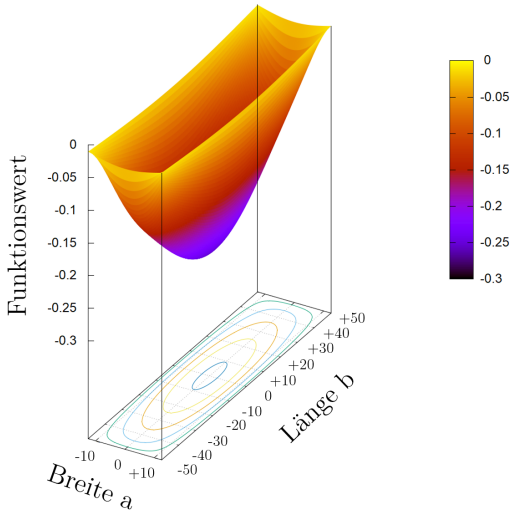


Abbildung 5.31: Auswertung Funktion 5.21, Randbedingung: modifizierte H-Probe (25 mm x 2 mm x 100 mm)
(Quelle: eigene Darstellung)

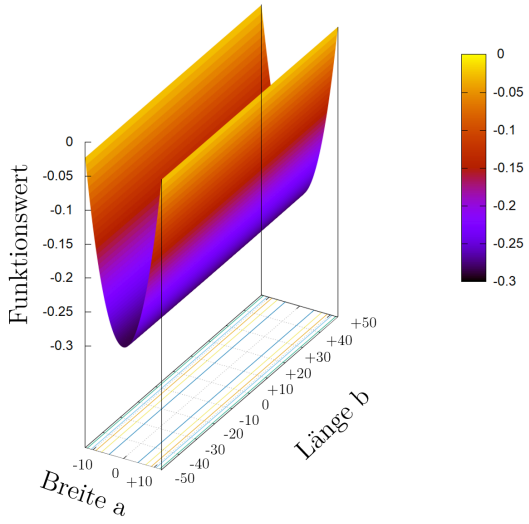


Abbildung 5.32: Auswertung Funktion 5.21, Randbedingung: kontinuierliche Fuge (25 mm x 2 mm x 10000 mm ($\approx \infty$)
(Quelle: eigene Darstellung)

Es ist ersichtlich, dass sich nach den in Abbildung 5.31 dargestellten Verläufen die geringsten Werte in Klebschichtmitte (x = y = 0) einstellen. In Analogie ergibt sich die Verteilung für einen kontinuierlichen Fugenabschnitt unter der Randbedingung b = 10000 mm ($\approx \infty$). Am Klebschichtrand ist für beide Fälle der Wert null.

5.3.4.2 Einbindung eines Kavitationskriteriums

Mit der Kenntnis der Verteilung von $\overline{p}(x, y)$ über die Klebschichtfläche wird nachfolgend ein Grenzkriterium abgeleitet. Nach 5.21 kann die normierte Größe $\frac{\overline{p}(x,y)}{K*\epsilon_{zz}}$ in Abhängigkeit von den geometrischen Verhältnissen sowie der Querdehnzahl ν bestimmt werden. Hierzu wird der rechte Teil von Gleichung 5.21 nachfolgend als Funktion $f(\nu, x, y)$ definiert:

$$\frac{\overline{p}(x,y)}{K*\epsilon_{zz}} = f_{(\nu,x,y)} \tag{5.23}$$

Unter der Annahme, dass Kavitation eintritt, wenn ein kritischer Wert der hydrostatischen Zugbeanspruchung erreicht wird $p_{Kavitation}$ (hydrostatischer Zug, siehe Abschnitt 2.3.1.3.2), kann mit Hilfe des Gent-Kriteriums nach 2.39 folgende Grenzzustandsbedingung für die querdehnbehinderte Klebschicht definiert werden.

$$\overline{p}_{(x,y)} = p_{Kavitation} \tag{5.24}$$

Unter Kombination des Gent-Kriteriums (= hydrostatischer Zug) nach Gleichung 2.39 sowie der mittleren hydrostatischen Druckverteilung nach (99) kann für die Randbedingung $x = y = 0$ unter Substitution von $K(\nu, G)$ eine Funktion der folgenden Form aufgestellt werden:

$$\frac{5*G}{2} = \frac{2*G*(1+\nu)}{3*(1+\nu)} * \epsilon_{zz} * f(\nu, S) \tag{5.25}$$

Durch Kürzen und Umstellen kann eine externe nominelle Dehnung ϵ_{zz} bestimmt werden, die erreicht wird, sobald Gleichung 5.24 erfüllt ist.

$$\epsilon_{zz,Kavitation} = \frac{1-2\nu}{1+\nu} * \frac{15}{4f(\nu, S)} \tag{5.26}$$

Diese Funktion ist unabhängig vom elastischen Modulwert G und steht lediglich in Abhängigkeit zu den geometrischen Parametern der Fuge sowie der Querdehnzahl. Dies begründet sich aus der Einbindung des spannungsbasierten Gent-Kriteriums und

es kann in allgemeiner Form für die volumetrische Dehnung unter Verwendung von Gleichung 5.18 gezeigt werden:

$$\epsilon_{vol} = \frac{p_{Kavitation}}{K} = \frac{5 * G}{2 * K} = \frac{1 - 2\nu}{1 + \nu} * \frac{15}{4} \tag{5.27}$$

Die Funktionen 5.26 und 5.27 unterscheiden sich nur durch den reziproken Wert der Druckfunktion 5.21, die somit effektiv die Höhe der Querdehnungsmaße ϵ_{xx} und ϵ_{yy} beschreibt. Für die experimentell untersuchten Geometrien ist Funktion 5.26 in Abhängigkeit vom Shape-Faktor sowie von der Querdehnzahl in Abbildung 5.33 dargestellt.

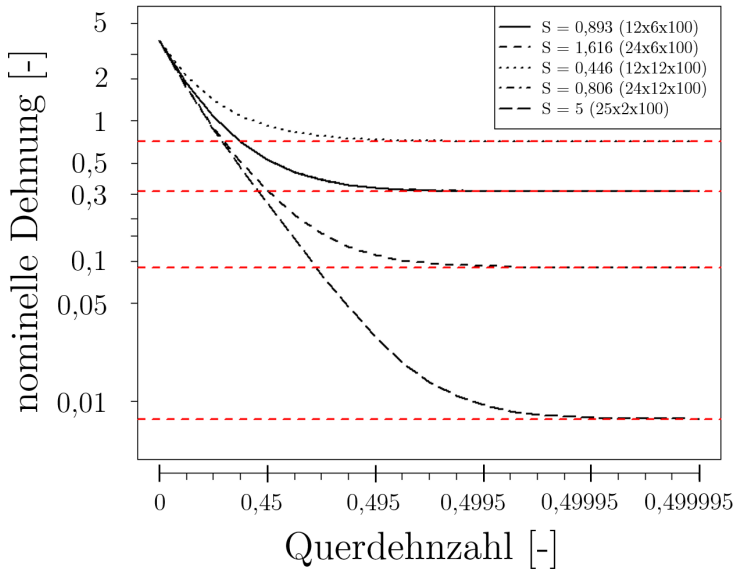


Abbildung 5.33: Gleichung 5.26 als Funktion der Querdehnzahl in Abhängigkeit von verschiedenen Geometrien mit Darstellung eines Grenzwertes (ν = 0,5)
(Quelle: eigene Darstellung)

Tabelle 5.14: Geometrien und berechnete Grenzwerte nach Gleichung 5.26

Geometrie	**Shape-Faktor**	$\epsilon_{Kavitation}(\nu = 0,499)$
[mm x mm x mm]	**[-]**	**[-]**
12 x 6 x 100	0,893	0,313
24 x 6 x 100	1,613	0,096
12 x 12 x 100	0,446	0,715
24 x 12 x 100	0,806	0,314
25 x 2 x 100	5	0,011

Es ist ersichtlich, dass für den inkompressiblen Fall (ν = 0,5) ein Grenzwert identifiziert werden kann (siehe Abbildung 5.33). Dieser sinkt mit zunehmendem Shape-Faktor ab. Dies steht zunächst im Einklang mit den zuvor numerisch ermittelten Beanspruchungen. Für den Fall ν = 0,499 sind die Funktionsminima der kritischen Dehnung ϵ_{zz} in Tabelle 5.14 dargestellt. Hierbei muss insbesondere für den HKB-Werkstoff berücksichtigt werden, dass hier üblicherweise Querdehnzahlen zu erwarten sind, die geringer als die der Silikonwerkstoffe sind. Ferner geben auch die Silikonhersteller Querdehnzahlen an, die unter diesem Bereich angesiedelt sind (205). Diese Einflüsse unterstreichen die Notwendigkeit zur Darstellung des Grenzkriteriums in Abhängigkeit von der Querdehnzahl (siehe Abbildung 5.34).

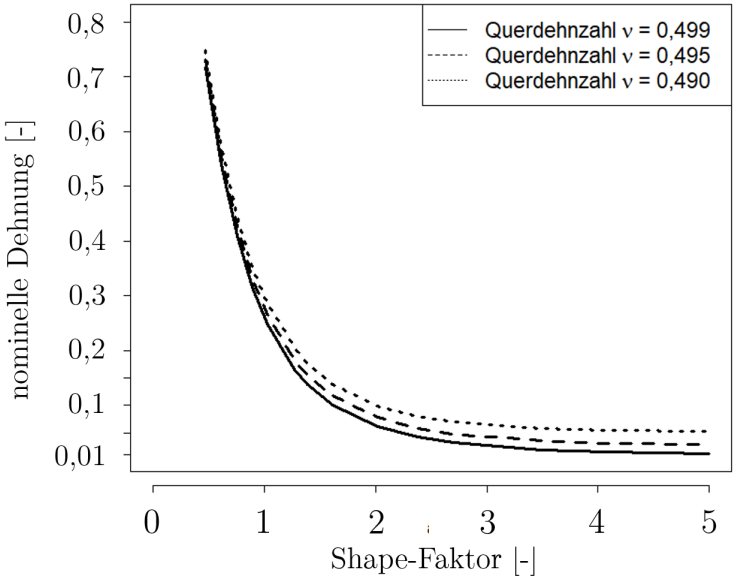


Abbildung 5.34: Gleichung 5.26 als Funktion des Shape-Faktors (Quelle: eigene Darstellung)

5.3.4.3 Abgleich des Modells mit experimentellen Ergebnissen

Nachfolgend werden die analytischen Modellprognosen in Abhängigkeit von den jeweiligen Shape-Faktoren den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Die Modellprognose $\epsilon_{Kavitation}$ kann hier direkt in die Darstellung der σ_n-ϵ_n-Kennlinien eingetragen werden. Dies geschieht in Abhängigkeit von der Querdehnzahl.
Es kann festgestellt werden, dass das Modell eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen zeigt. Dies gilt insbesondere für die untersuchten Geometrien 12 mm x 6 mm x 100 mm und 24 mm x 6 mm x 100 mm. Für beide Geometrien zeigt das Modell nominelle Dehnungsgrenzen auf, die zwei unterschiedliche Kurvenverläufe in den ermittelten Kennlinien trennen. Das gilt unabhängig von Nenndehnrate, Temperatur und Werkstoff. Für die am Werkstoff SGB weiter untersuchten Geometrien sind jedoch Einschränkungen zu beobachten (Abbildung 5.36). Für den Querschnitt 24 mm x 12 mm x 100 mm ergibt sich nach dem Modell eine nahezu ähnliche Modellprognose wie für den Querschnitt 12 mm x 6 mm x 100 mm, was auf die ähnlichen Shape-Faktoren zurückgeführt werden kann. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen tritt das Versagen für die 24 mm x 12 mm x 100 mm-Proben jedoch ein, ohne dass sich ausgeprägte Plateaubereiche ausbilden können. Das wird darauf zurückgeführt, dass ein anderer Versagensmechanismus, z.B. das Einreißen

von außen, den Versagensvorgang dominiert. Für die Probekörperform 12 mm x 12 mm x 100 mm liegt die Prognose außerhalb der Kennlinie.
In den Abbildungen 5.37 und 5.38 sind die raten- und temperaturabhängigen Versuche am Werkstoff SGA (Geometrien 12 mm x 6 mm x 100 mm und 24 mm x 6 mm x 100 mm) dargestellt. Das Modell ist hier über alle Temperatur- und Geschwindigkeitsbereiche für beide Geometrien prognosefähig. Der Einfluss der Querdehnzahl ist in diesen Bereichen als gering anzusehen. Das Gleiche gilt für die feuchtegelagerten Proben (siehe Abbildung 5.39, oben). Ebenso kann in guter Näherung das erste Kraftmaximum für den HKB-Werkstoff berechnet werden (Abbildung 5.40). Hier ist aufgrund des großen Shape-Faktors der Einfluss der Querdehnzahl besonders hoch. Ferner muss beachtet werden, dass das hier untersuchte Modell von einem erstmaligen Erreichen des Kriteriums in Klebschichtmitte ausgeht. Ist der Shape-Faktor sehr hoch, kann deshalb ein zu frühes Eintreten prognostiziert werden.

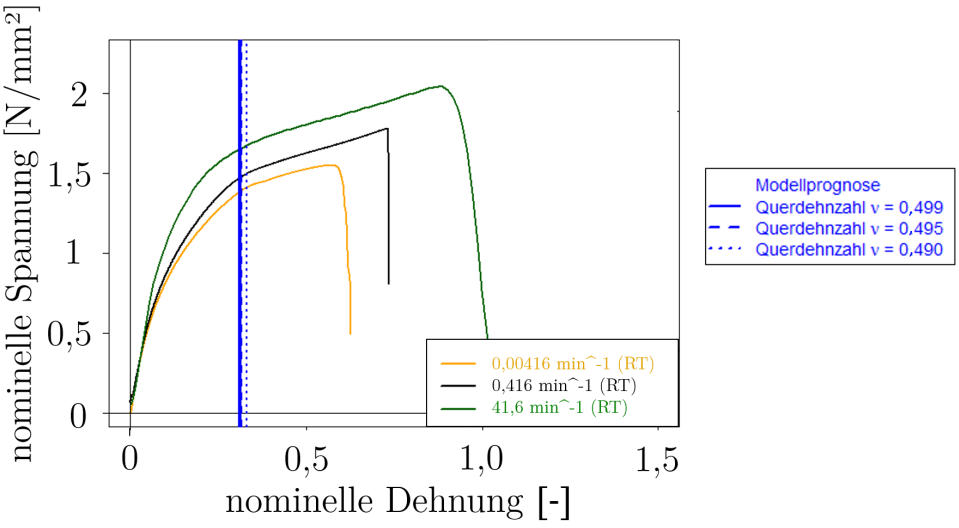


Abbildung 5.35: Abgleich Modellprognose - Experimente SGB (Zug, 12x6x100, Raumtemperatur, verschiedenen Nenndehnraten)

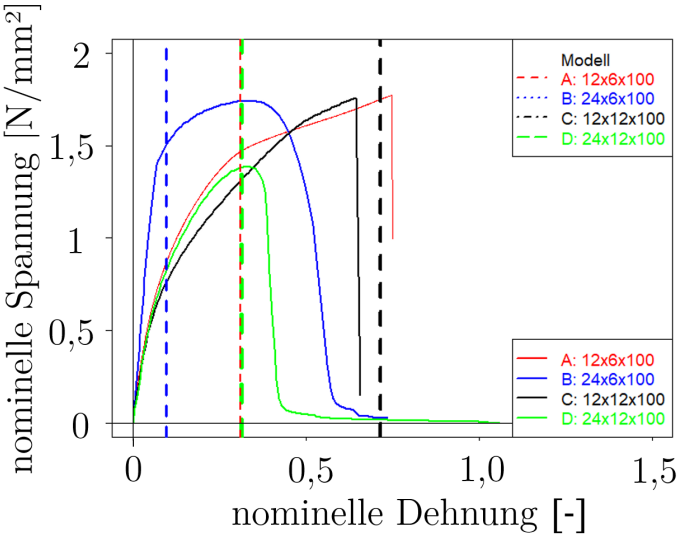


Abbildung 5.36: Abgleich Modellprognose - Experimente SGB (Zug, verschiedene Geometrien, Raumtemperatur, konstante Nenndehnrate $0,416 min^-1$)

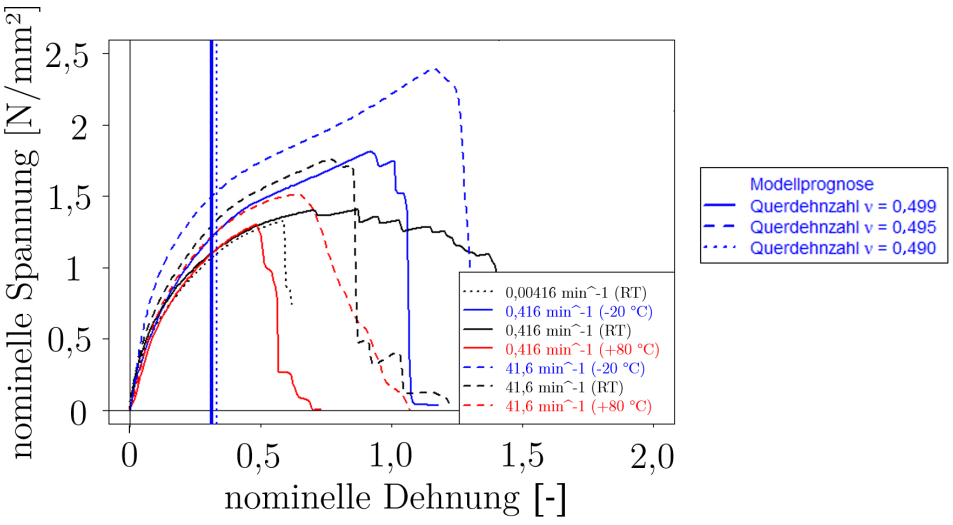


Abbildung 5.37: Abgleich Modellprognose - Experimente SGA (Zug, 12x6x100, verschiedene Temperaturen und Nenndehnraten)

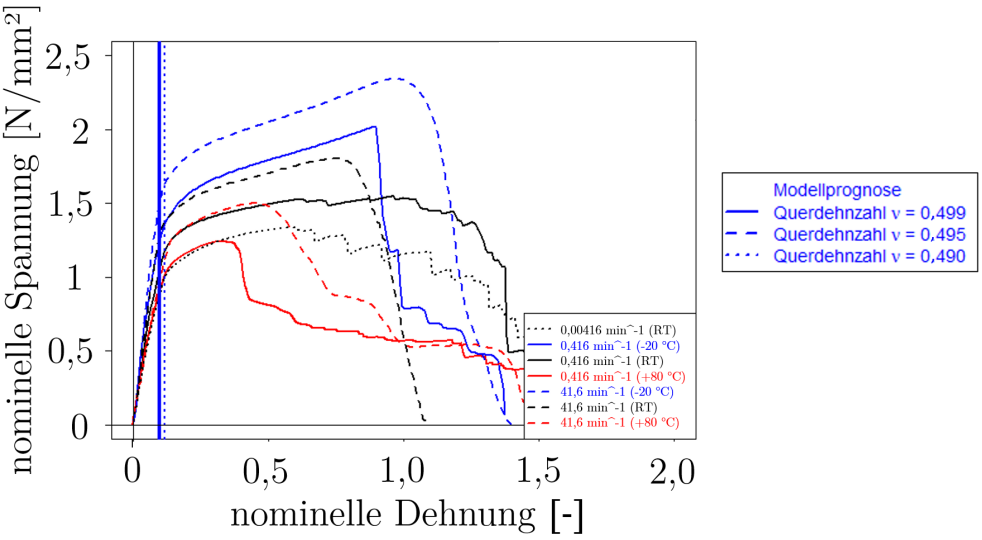


Abbildung 5.38: Abgleich Modellprognose - Experimente SGA (Zug, 24x6x100, verschiedene Temperaturen und Nenndehnraten)

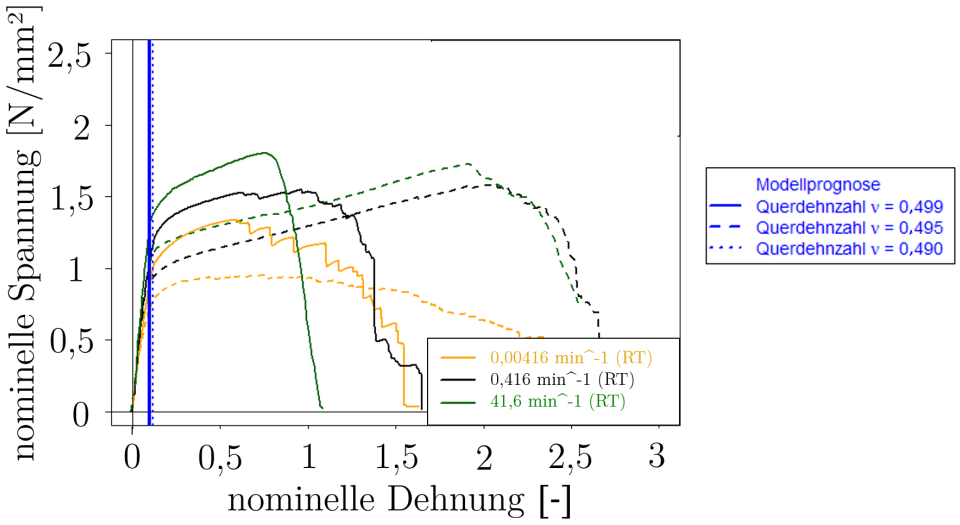


Abbildung 5.39: Abgleich Modellprognose - Experimente SGA (Zug, 24x6x100, nach Feuchtelagerung mit verschiedenen Nenndehnraten)

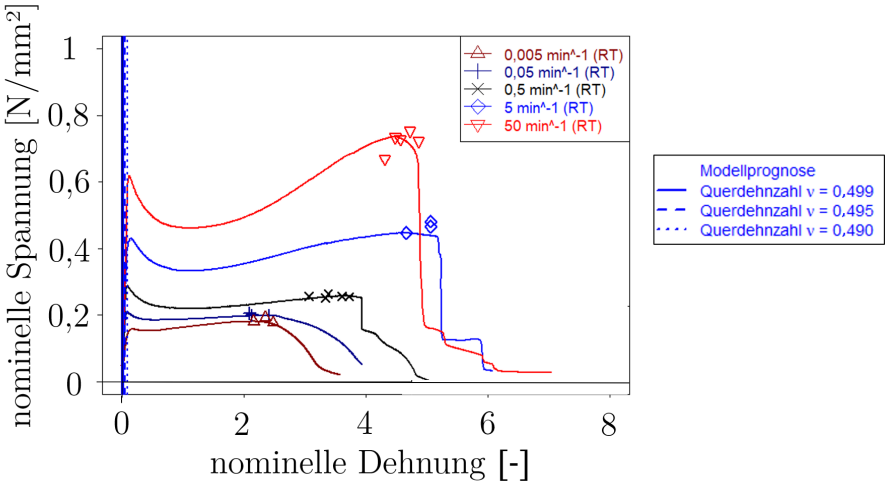


Abbildung 5.40: Abgleich Modellprognose - Experimente HKB (Zug, 24x2x100, verschiedene Nenndehnraten)

5.3.5 Zusammenfassung und Diskussion

Es wurden die Beanspruchungszustände der fugenähnlichen Probe auf Basis zeitunabhängiger Kenngrößen unter Anwendung verschiedener Beanspruchungshypothesen untersucht.

- **Scherbeanspruchung** Mit Hilfe einer Betrachtung der lokalen Verzerrungsgrößen kann erklärt werden, dass die unterschiedlichen Probekörpertypen in Kapitel 4.3.8 im quasistatischen Experiment unterschiedliche Nennspannungs- und Verzerrungsbereiche erreichen. So kann festgestellt werden, dass auch im Modus Scherung eine wesentliche Beeinträchtigung der Nenntragfähigkeit durch die Geometrie vorliegen kann. Dies zeigt sich dadurch, dass im Rahmen der durchgeführten numerischen Simulationen unterschiedliche Ausprägungen des Auftretens lokaler Beanspruchungsgrößen bei gleicher Nenngleitung ermittelt werden konnten. Eine Ermittlung der Höhe der Beanspruchungsgrößen wurde aufgrund der Einflüsse aus der Netzauflösung nicht durchgeführt. Hier wird der Einsatz statistischer Methoden in Kombination mit einer geeigneten Festigkeitshypothese als vielversprechende Vorgehensweise angesehen.
- **Analytisches Grenzkriterium für Scherbeanspruchung** Die analytische Beanspruchungsanalyse für die Scherexperimente zeigt unter großen Verformungen ein großes Potential aufgrund ihrer einfachen Anwendbarkeit. Zwar kann auf Basis der durchgeführten Mittelwertbetrachtung keine direkte Prognose der Versagensgleitungen erzielt werden, aufgrund der zur Anwendung kommenden Nennbruchdehnungen erscheint jedoch eine weitere Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten auf Basis lokal ermittelter Bruchdehnungen vielversprechend. Die Einflüsse von Dehnrateneffekten sollten in weiteren Versuchsreihen systematisch untersucht werden. Für diese Untersuchungen werden systematische Messungen der ertragbaren Bruchdehnungen unter Anwendung optischer Messmethoden empfohlen.
- **Zug-Scherung-Interaktion** Bei der gewählten verformungskontrollierten Belastung ist der sich einstellende hydrostatische Druck abhängig von den elastischen Kenndaten. Dies gilt insbesondere für die Querdehnzahl ν, da diese die Kompressibilität maßgeblich beeinflusst (siehe 5.4). Ferner ist auf Basis der durchgeführten Experimente damit zu rechnen, dass bei anderen Fugengeometrien auch andere Beanspruchungsverhältnisse vorliegen. Mit dem Ziel der Analyse dieser Zusammenhänge wurde dieser Punkt analytisch untersucht.

- **Analytisches Grenzkriterium für den Eintritt von Kavitation** Es kann festgestellt werden, dass die Modellprognosen für verschiedene Werkstoffe, Zeitbereiche und Temperaturen mit den Kurvenverläufen gut korrelieren. Das zeigt sich dadurch, dass für alle Geometrien und Werkstoffe mit dem prognostizierten Kavitationseintritt auch eine Veränderung des Kurvenverlaufs zu beobachten ist. Insbesondere für die beiden Werkstoffe SGA und SGB ist hier eine sehr gute Korrelation von Modell und Experiment zu beobachten, was erstaunlich ist, da hier unterschiedliche Steifigkeitseigenschaften der beiden Klebstoffe vorliegen. Für den HKB-Werkstoff ist die inkompressible Annahme für die beobachteten Effekte zu konservativ, was bedeutet, dass die Prognose hier die Verformungsfähigkeit unterschätzt. Dennoch kann das erste Kurvenmaxima in einem kleinen Dehnungsbereich identifiziert werden.

- **Diskussion von** $\sigma_{eff,kav}$ In den vorherigen Abschnitten sind Methoden zur Bestimmung des effektiven E-Moduls E_{eff} untersucht und auf dieser Basis eine Deformationsgrenze $\epsilon_{Kavitation}$ für querdehnbehinderte Fugen unter Zugbelastung abgeleitet worden. Da beide Größen auf den gleichen Formeln basieren und die Steifigkeit in Kombination mit dem angewendeten Kavitationskriterium eine Grenzdehnung beschreibt, liegt es nahe, diese Größen in ingenieurtypische Spannungsgrößen umzurechnen. Dies wird nachfolgend diskutiert. Hierzu wird eine effektive nominelle Spannung $\sigma_{eff,kav}$ nach folgendem Zusammenhang berechnet:

$$\sigma_{eff,kav} = E_{eff} * \epsilon_{Kavitation} \tag{5.28}$$

  Da beide Größen von der Querdehnzahl, der Geometrie sowie zusätzlich im Fall von E_{eff} auch von elastischen Modulen abhängen, folgt hieraus auch wiederum die Abhängigkeit von $\sigma_{eff,kav}$ von diesen Konstanten. Es kann gezeigt werden, dass diese Kombination nur bei hohen Shape-Faktoren sinnvoll erscheint, da die Kennlinien einen stark nichtlinearen Verlauf annehmen, der mit diesem Ansatz nicht berücksichtigt werden kann (siehe Abbildung 5.41).

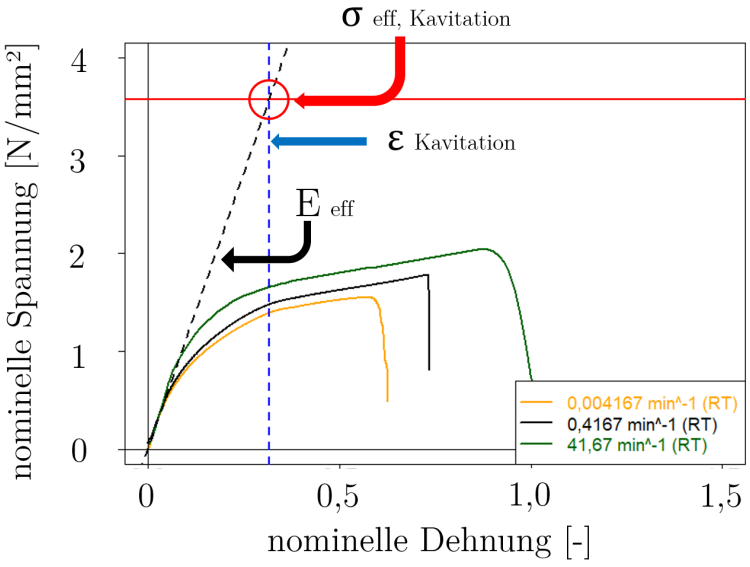


Abbildung 5.41: Abgleich der analytisch ermittelten Kenndaten mit experimentellen Ergebnissen (Zug, Werkstoff SGA, S = 1,613, verschiedene Nenndehnraten)

5.4 Analyse des Einflusses von Zeit und Temperatur auf das Tragverhalten

5.4.1 Ausgangssituation

Die bisherigen Betrachtungen zur Steifigkeit sowie zu den Grenzkriterien behandeln die elastischen Eigenschaften als unabhängig von Zeit und Temperatur. Das bedeutet, dass die Parameter bei der Steifigkeitsermittlung als konstant angenommen wurden.
In Kapitel 3 wird gezeigt, dass die untersuchten klimatischen Einwirkungsvorgänge über Zeiträume einwirken können, die wesentlich von der Dauer der Durchführung eines Experimentes zur Kennwertermittlung nach ETAG 002 abweichen können. Ferner kann in Kapitel 4 experimentell gezeigt werden, dass das Tragverhalten der untersuchten Werkstoffe von der Dehnrate sowie der Temperatur abhängig ist.
Die Auswirkung dieser beiden Einflüsse wird nachfolgend analysiert. Dies geschieht auf Basis der Ergebnisse am Werkstoff HKB. Zunächst wird die Anwendbarkeit des ZTV-Prinzips auf das Kaviations-Grenzkriterium untersucht. Auf dieser Basis wird das

Eintreten dieses Grenzkriteriums anhand einer temperaturabhängigen Windeinwirkung auf einen Fugenabschnitt diskutiert.

5.4.2 Untersuchungen zur Anwendbarkeit des ZTV-Prinzips

5.4.2.1 Vorgehensweise

Die Anwendung des ZTV zur Beschreibung der zeit- und temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften ist in der Literatur weit verbreitet (siehe Abschnitt 2.2.2.3). Eine einheitliche Vorgehensweise existiert jedoch nicht. Das Kernelement des Verfahrens basiert darauf, dass sich die auftretenden Relaxationsmechanismen in polymeren Netzwerken bei Veränderung der Temperatur nur hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit und nicht ihrer Art und Anzahl ändern. Für diese Betrachtung werden nachfolgend die nominellen Dehnraten (Nenndehnraten) aus Abschnitt 4.3.7.3 verwendet.
Gilt das ZTV, müssen sich die logarithmischen Nenndehnraten $\log \dot{\epsilon}$ über den temperaturabhängigen Faktor $\log \alpha_T$ zu Masterkurven der reduzierten Nenndehnrate $\log \dot{\epsilon}_x$ verschieben lassen:

$$\log \dot{\epsilon} - \log \dot{\epsilon}_x = \log \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} - \log \frac{\Delta \epsilon}{\Delta x} = \log \alpha_T \tag{5.29}$$

In Analogie zu diesem reduzierten Nenndatenbereich ergibt sich mit dieser Vorgehensweise für Messungen im Frequenzbereich (z.B. DMTA) der reduzierte Frequenzbereich:

$$\log f - \log f_x = \log \alpha_T \tag{5.30}$$

Die Bestimmung des temperaturabhängigen Faktors erfolgt nach Gleichung 2.3. Hierbei ist der zu bestimmende Parameter $E_{Arrhenius}$ der Quotient aus Aktivierungsenergie $E_{Aktivierung}$ und der allgemeinen Gaskonstante R ist (siehe Abschnitt 2.2.2.3).

5.4.2.2 Anwendung des ZTV

5.4.2.2.1 Masterkurve auf Basis der querdehnbehinderten Zugexperimente Für die geplanten Betrachtungen wird als Bezugspunkt in der Kennlinie der querdehnbehinderten Zugexperimente das erste Kraftmaximum herangezogen. Im vorliegenden

Fall wird hierzu angenommen, dass dieses bei gleichen Werten der nominellen Dehnung auftritt. Es sind im nachfolgenden Diagramm 5.42 aus den Messreihen bei Raumtemperatur die jeweiligen Werte σ_n in Abhängigkeit von der logarithmischen Nenndehnrate $\log \dot{\epsilon}_n$ dargestellt. In Ergänzung zu diesen Werten stehen für ausgewählte Nenndehnraten auf Basis der durchgeführten Experimente Ergebnisse bei verschiedenen Temperaturen zur Verfügung. Die Daten werden um eine Messreihe bei +80 °C aus dem Projekt P 1052 (187) ergänzt. Dies ist in Ergänzung zu den Werten bei Raumtemperatur in Abbildung 5.43 dargestellt. Alle diese Werte sind in Abhängigkeit von der logarithmischen Nenndehnrate in Abbildung 5.44 (oben) dargestellt. Es wird zunächst auf die Referenztemperatur T_0 = 296 K verschoben. Hierzu wird eine Funktion der nominellen Spannung $\sigma_n(\log(\Delta\epsilon/\Delta t))$ in Abhängigkeit von der logarithmischen Dehnrate bei Raumtemperatur (T = 296 K) über die fünf Stützpunkte ermittelt. Diese Funktion umfasst den nominellen Spannungsbereich von σ_n = 0,18 N/mm^2 bis σ_n = 0,62 N/mm^2. Mit Hilfe des temperaturabhängigen Faktors $\log \alpha_T$ kann für diese Ergebnisse eine reduzierte Nenndehnrate $\dot{\epsilon}_{n,x,i}$ für die Referenztemperatur T = 296 K ermittelt werden. Dies geschieht mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Hierzu wird der Parameter $E_{Arrhenius,Zug}$ (Gleichung 2.3) ermittelt, der eine deckungsgleiche Überlagerung der nominellen Spannungswerte und der Funktion ermöglicht.

$$f = \sum_{i=1}^{N} (\log \dot{\epsilon}_{n,i} - \log \dot{\epsilon}_{n,x,i})^2 \rightarrow min \tag{5.31}$$

Der gesuchte Parameter $E_{Arrhenius}$ des Verschiebungsfaktors nach Gleichung 2.3 kann mit dieser Vorgehensweise mit $E_{Arrhenius,Zug} = 10625$ K bestimmt werden. Für diesen Fall ergibt sich die in Abbildung 5.44 dargestellte Masterkurve des 1. Kraftmaximums der querdehnbehinderten Zugexperimente.

5.4.2.2.2 Masterkurve auf Basis der Scherexperimente In Analogie zu den Zugexperimenten werden die Scherexperimente hinsichtlich der Anwendbarkeit des ZTV untersucht. Hier werden ebenso nicht die Maximalwerte herangezogen. Dies begründet sich aus den unterschiedlichen Bruchdehnungen und der beobachteten Streuung der Experimente. Es wird daher der jeweilige Spannungswert bei einer nominellen Gleitung von $\tan \gamma$ = 2 [-] jeder Messreihe ermittelt und für die Betrachtungen verwendet. Dieser Verzerrungsbereich ist temperatur- und zeitübergreifend für alle Messreihen geprägt von geringen Streuungen und es wird erwartet, dass die im Rahmen der Simulation sich einstellenden Schergleitungen unterhalb dieses Wertes liegen. Die Vorgehensweise ist identisch zu der Vorgehensweise bei den Zugexperimenten. Auf diese Weise lässt sich ein Verschiebungsfaktor von $E_{Arrhenius,Scherung}$ = 10777

K ermitteln. Die Messwerte und die ermittelte Masterkurve sind in Abbildung 5.45 dargestellt.

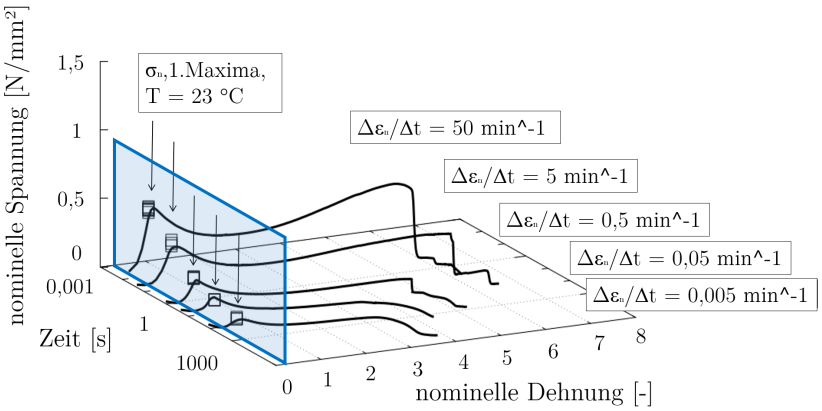


Abbildung 5.42: Darstellung des betrachteten Bereichs der Nennspannungsmaxima in Spannung-Dehnung-Zeit-Darstellung (Werkstoff HKB, Modus Zug)

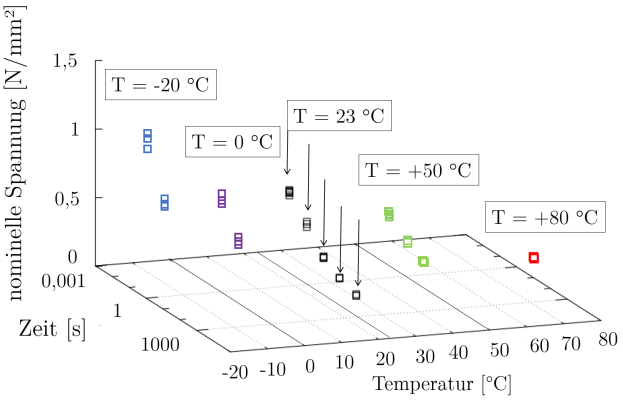


Abbildung 5.43: Darstellung des betrachteten Bereichs der Nennspannungsmaxima in Spannung-Dehnung-Temperatur-Darstellung (Werkstoff HKB, Modus Zug)

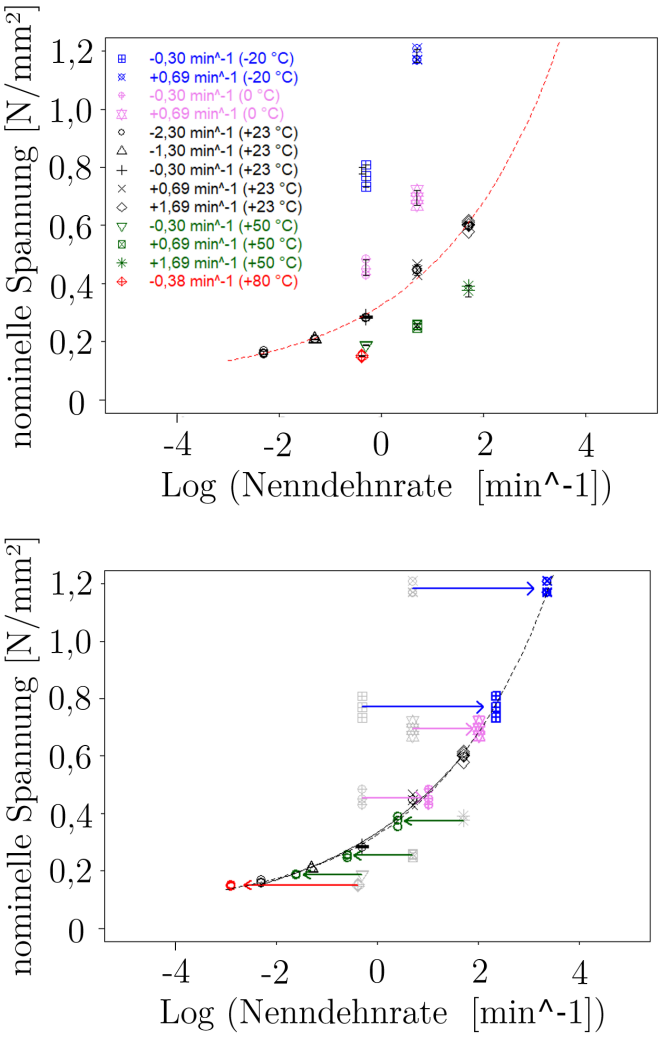


Abbildung 5.44: Masterkurve für die Zugexperimente (T = 296 K)

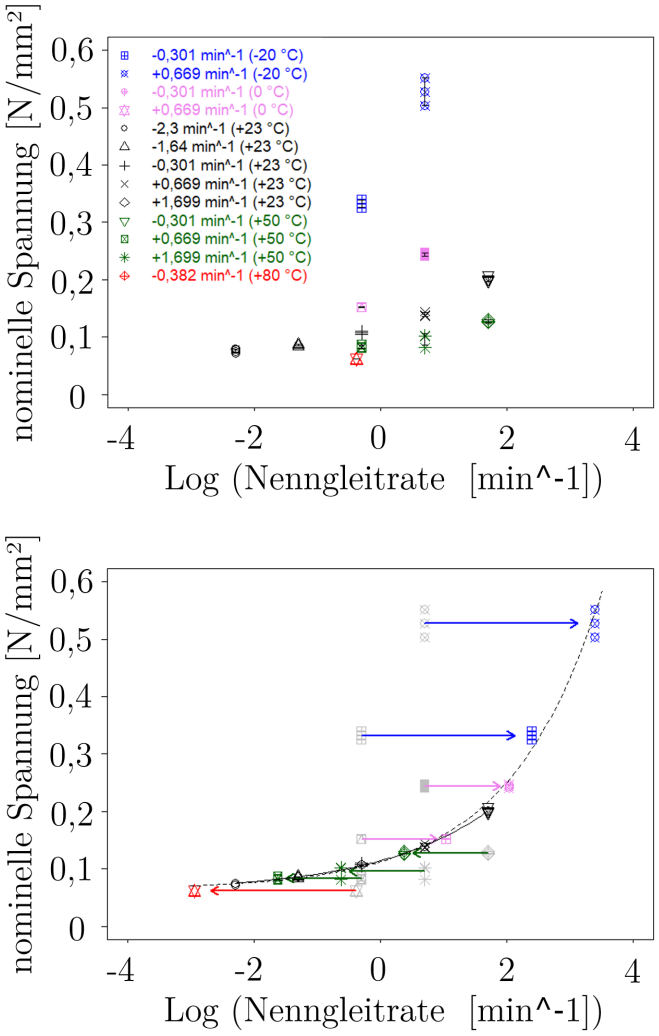


Abbildung 5.45: Masterkurve für die Scherspannung τ (tan γ = 2) (T = 296 K)

5.4.2.2.3 Masterkurve auf Basis der DMTA-Messungen Mit Hilfe der Messdaten aus den Temperatursweeps (Abschnitt 4.2.2) liegen Informationen zum temperaturabhängigen Verhalten bei drei Frequenzen vor. Zur Validierung der zuvor ermittelten Arrhenius-Parameter werden auf Basis dieser Daten Masterkurven erstellt. Hierzu werden die ermittelten Speicher- und Verlustmodulwerte in Abhängigkeit von der logarithmischen Frequenz $\log$ f aufgetragen. Für jede Temperaturstufe existieren drei

Messwerte (f_1 = 0,1 Hz; f_2 = 1 Hz; f_3 = 10 Hz) der Speicher- sowie der Verlustmodule. Bei Gültigkeit des ZTV müssen sich folglich drei gleiche Speicher- und Verlustmodulwerte nach Gleichung 5.30 über den Faktor $\log \alpha_T$ zu gleichen reduzierten Frequenzen $\log f_x$ verschieben lassen. Hierzu wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate verwendet.

$$f = \sum_{i=1}^{N} [(\log f_{1,x,i} - \log f_{2,x,i})^2 + (\log f_{2,x,i} - \log f_{3,x,i})^2 + (\log f_{3,x,i} - \log f_{1,x,i})^2] \rightarrow min \tag{5.32}$$

Es wird der Faktor $E_{Arrhenius}$ für die Funktion 2.3 ermittelt, der für eine Temperatur von T = 296 K den kleinsten Fehler der quadratischen Differenzen ergibt. Mit dieser Vorgehensweise kann ein Faktor von $E_{Arrhenius,DMTA}$ = 10865 K ermittelt werden. Die Masterkurven des Speicher- sowie des Verlustmoduls sind in Abbildung 5.47 dargestellt.

5.4.2.3 Diskussion der Ergebnisse

In allen drei Experimenten kann die Anwendbarkeit des ZTV gezeigt werden. Die hierbei ermittelten Faktoren $E_{Arrhenius}$ sind in Tabelle 5.15 dokumentiert. In Anbetracht der den Experimenten zugrunde liegenden Streuung liegen die ermittelten Parameter hier in einem identischen Bereich. Dies lässt den Schluss zu, dass die in verschiedenen Experimenten ermittelten Effekte den gleichen Mechanismen folgen. Dies ist insofern interessant, als die drei unterschiedlichen Experimente sowohl unterschiedliche mechanische Grundzustände als auch Randbedingungen abbilden.

Tabelle 5.15: Ergebnis der Ermittlung der Verschiebungsfaktoren nach Gleichung 2.3 in Abhängigkeit von verschiedenen Experimenten

Experiment	Modus	Faktor nach Gleichung 2.4
[-]	[-]	$E_{Arrhenius}$
mod. H-Probe	Zug	10625 K
mod. H-Probe	Scherung	10777 K
DMTA	Zug	10865 K

5.4.2.4 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Für den Werkstoff HKB wurden Experimente mit der modifizierten H-Probe unter dem Einfluss der Variation der Nenndehnrate bei verschiedenen Temperaturstufen durchgeführt. Durch die Ausprägung der Zeit- und Temperaturabhängigkeit des untersuchten Werkstoffs im untersuchten Raten- und Temperaturbereich lassen sich diese sowohl im Scher- als auch im querdehnbehinderten Zugexperiment mit hinreichender Genauigkeit identifizieren. Die auf diese Weise ermittelte Datenbasis wird mit Hilfe des ZTV in Kapitel 5 hinsichtlich eines mathematisch beschreibbaren Zusammenhangs weiter untersucht. Auf Basis der durchgeführten analytischen Betrachtungen kann eine Deformationsgrenze identifiziert werden, die mit hinreichender Näherung das Eintreten eines Kavitationskriteriums unter dem Belastungsszenario Zug prognostizieren kann. Für das weitere Vorgehen zur Analyse der Auswirkung auf die Praxisbemessung werden auf Basis dieser Ergebnisse folgende Annahmen getroffen:

- Das Werkstoffverhalten ist linear isotrop und es gilt die Anwendbarkeit des ZTV nach Abschnitt 5.4.2.
- Es existiert eine Deformationsgrenze $\epsilon_{Kavitation}$ (siehe Abschnitt 5.3.4.3).
- Es wird bis zu dieser Deformationsgrenze ideale Adhäsion unterstellt.
- Die Arbeitskennlinie kann aufgrund des hohen Shape-Faktors (S = 5) linear approximiert werden (siehe Abschnitt 5.3.5).

Unter diesen Voraussetzungen wird nachfolgend das Eintreten des zuvor abgeleiteten Kavitationskriteriums in einer geklebten Verbindung unter Berücksichtigung der Zeit sowie der Temperatur analysiert. Dies geschieht mit einer numerischen Simulation mit dem Programmpaket LS-DYNA (1). Für die Modellkalibrierung sollen insbesondere die Versuchsergebnisse der modifizierten H-Probe verwendet werden, da diese die Grundlage des Kavitationskriteriums darstellen. Der Aufbau, die Methoden der Parameteridentifikation sowie die Wahl der Belastungsfunktionen werden nachfolgend beschrieben.

5.4.3 Kalibrierung eines Werkstoffmodells

5.4.3.1 Vorgehensweise

Für die numerische Simulation wird der Werkstoff HKB verwendet, da dieser sich aufgrund des hohen Shape-Faktors (S = 5) besonders für die Identifikation von Parametern mit der hier vorgestellten Methodik eignet. Dies begründet sich daraus, dass der prognostizierte Eintritt des Kavitationskriteriums bereits bei kleinen Dehnungen vorliegt, was eine viskoelastische Materialmodellierung unter Annahme kleiner Verzerrungen gestattet.

5.4.3.2 Modellaufbau

Für die Simulation der fugenähnlichen Probe kommt ein Volumenmodell zur Anwendung. Es wird ein Modell des Probekörpers mit den Abmessungen 25 mm x 2,0 mm x 100 mm erstellt. Das Modell der Fuge wird unter Ausnutzung der Symmetrie als Viertelmodell modelliert. Der Klebstoff wird mit Volumenelementen (ELFORM 2 (1)) und einem viskoelastischen Werkstoffmodell (MAT_076 (2)) abgebildet.

Elementtyp	ELFORM 2 (1)
Werkstoffmodell Klebstoff	MAT_076 (2) (Parameter s.u.)
Werkstoffmodell Fügepartner	MAT_001 (2) (E = 70000 N/mm^2; ν = 0,23)
Programm	LS-DYNA R971
Modelltyp	Viertelmodell
Modellabmessung Klebstoff X-Y-Z (mm)	12,5-50-2
Elemente Klebstoff X-Y-Z	25-100-8
Elementzahl Klebstoff	20000
Modus	**Deformation**

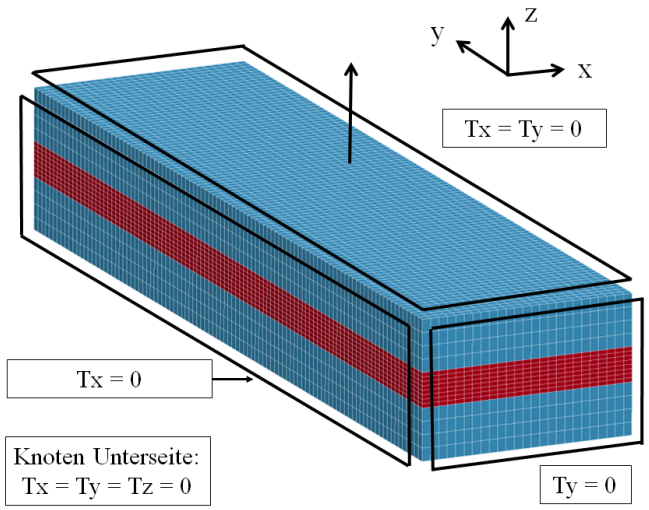


Abbildung 5.46: Darstellung des verwendeten Modells
(Quelle: eigene Darstellung)

Der Fügepartner wird mit identischen Elementtypen sowie einem linear-elastischen Werkstoffansatz (MAT_001 (2)) abgebildet (E-Modul E = 70000 N/mm^2; Querdehnzahl $\nu = 0,23$). Die Abmessungen der Fügepartnerwerkstoffe orientieren sich an der Flanschdicke des Trägerprofils (t = 5 mm) sowie der Klebschichtbreite und -höhe.

5.4.3.2.1 Werkstoffmodell für die Klebfuge Die Vorgehensweise zur Kalibrierung des Modells wird nachfolgend beschrieben. Bei dem zur Anwendung kommenden

Werkstoffmodell handelt es sich um ein generalisiertes Maxwell-Modell mit linearer Grundelastizität (siehe Kapitel 2). In diesem Werkstoffmodell sind die Relaxationsfunktionen für den deviatorischen (Schubmodul G) sowie den volumetrischen Teil (Kompressionsmodul K) der Materialgleichung getrennt formuliert (siehe Abschnitt 2 und Gleichung 2.32).

$$G(t) = \sum_{i=0}^{N} G_i * exp^{-\beta_i * t} \tag{5.33}$$

Ferner ist eine Relaxationsfunktion für den Kompressionmodul K implementiert. Dies wird zur Abbildung der Zeitabhängigkeit der querdehnbehinderten Zugprobe verwendet. Dies ist notwendig, da gezeigt werden konnte, dass diese Probenform unter Zugbeanspruchung stark von volumetrischen Beanspruchungszuständen beeinflusst ist.

$$K(t) = \sum_{i=0}^{N} K_i * exp^{-\beta_{k_i} * t} \tag{5.34}$$

Für das Modell müssen Parameter für die beiden Prony-Reihen ermittelt werden. Hierbei stellen G_i und β_i den jeweiligen Modul sowie die Abklingkonstante des i-ten Elementes dar. Dies steht in Analogie zum Aufbau von Gleichung 5.34. Gegenüber den Betrachtungen lokaler Beanspruchungsgrößen in Abschnitt 5.3 werden nachfolgend globale Verformungen ermittelt und mit der hergeleiteten Verformungsgrenze verglichen. Das in Abbildung 5.46 dargestellte Netz ist für die Abbildung dieser nominellen Steifigkeit geeignet.

5.4.3.2.2 Behandlung der Zeit- und Temperaturabhängigkeit Aufgrund der durchgeführten Betrachtungen zur Anwendbarkeit des ZTV wird unterstellt, dass das Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung im betrachteten Zeit-Temperatur-Bereich gilt. Da sich sowohl die Scherexperimente (Grundlage G(t)) als auch die querdehnbehinderten Zugexperimente (Grundlage K(t)) mit den gleichen Shift-Faktoren zu einer Masterkurve verschieben lassen, wird auch eine identische Zeitabhängigkeit unterstellt. Unter diesen Annahmen besteht die Möglichkeit, die Relaxationsfunktionen (Gleichung 5.33 und Gleichung 5.34) temperaturabhängig zu definieren. Es wird die Ersatzzeit t' nach folgender Form verwendet (1):

$$t' = \int_0^t \Phi(T) dt \tag{5.35}$$

Die Funktion $\Phi(T)$ ist hierbei die temperaturabhängige Verschiebungsfunktion nach Arrhenius und wie folgt definiert (2):

$$\Phi(T) = exp(-\frac{E_{Arrhenius}}{R}(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{Ref}})) \tag{5.36}$$

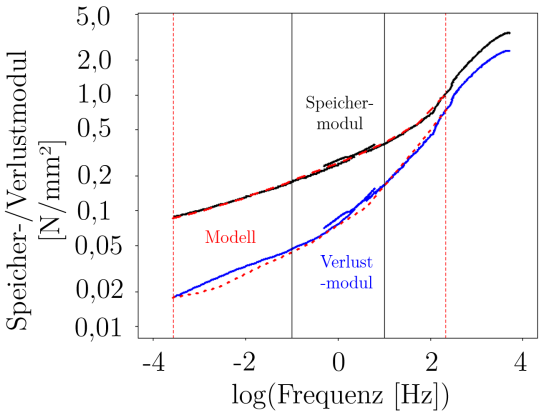
Dies bedeutet, dass eine temperaturabhängige Verschiebung der Relaxationsfunktionen entlang der logarithmischen Zeitachse in Abhängigkeit von der Differenz zur zuvor definierten Referenztemperatur erfolgt. Der hierfür notwendige Parameter ist der Verschiebungsfaktor, der unter Anwendung des ZTV-Prinzips in Abschnitt 5.4.2 für den Werkstoff HKB ermittelt wurde.

5.4.3.3 Parameteridentifikation für die Funktion G(t)

5.4.3.3.1 Parameteridentifikation aus DMTA-Messungen Zur Bestimmung von Werkstoffparametern für die Funktion 5.33 werden die Ergebnisse von DMTA-Messungen herangezogen. Im vorliegenden Fall stehen DMTA-Messungen aus dem Projekt (187) zur Verfügung (siehe Abschnitt 4.2.2). Zu diesem Zweck werden diese Daten zunächst von Zug in Scherung unter Verwendung einer Querdehnzahl von ν = 0,499 basierend auf den analytischen Betrachtungen zur Kavitationsprognose in Abschnitt 5.3.4 umgerechnet. Dies geschieht unter Annahme kleiner Verformungen und materieller Isotropie unter Verwendung des Zusammenhangs $G = \frac{E}{2*(1+\nu)}$.
Für die Berechnung der Relaxationsfunktion müssen Parameter für Gleichung 2.34 bzw. Gleichung 2.35 nach Abschnitt 2.2.3.4.2 ermittelt werden. Diese erlauben eine Abbildung der Masterkurven der frequenzabhängigen Module G'_{DMTA} sowie G''_{DMTA}. Durch das Einsetzen der im Frequenzbereich ermittelten Parameter in die Funktion 5.33 kann die notwendige Relaxationsfunktion 5.33 für den Zeitbereich ermittelt werden.
Diese Parameteridentifikation wird für den Frequenzbereich $\log f_x$ = -3,2 bis $\log f_x$ = 2,3 durchgeführt. Hierfür wird in Anlehnung an (110) die Zielfunktion 5.37 unter Verwendung der Kreisfrequenz ω verwendet. Gegenüber der Vorgehensweise in (110) wird der Verlustmodul im vorliegenden Fall nicht erhöht gewichtet.

$$\begin{aligned} f = \sum_{i=1}^{N} [&(G'(\omega,i) - G'_{DMTA}(\omega,i))^2 \\ &+ (G''(\omega,i) - G''_{DMTA}(\omega,i))^2] \rightarrow min \end{aligned} \tag{5.37}$$

Die mit dieser Vorgehensweise erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 5.47 dargestellt. Es sind die Parameter sowie die Funktionskurven des Speicher- (Gleichung 2.34) sowie des Verlustmoduls (Gleichung 2.35) dargestellt.



i	β_i	G_i
[-]	[s]	$[N/mm^2]$
1	10000	2,894
2	1000	0,720
3	100	0,181
4	10	0,101
5	1	0,066
6	0,1	0,044
7	0,01	0,027
8	0,001	0,018
9	0,0001	0,071

Abbildung 5.47: Masterkurven des Speicher- und Verlustmoduls (Messwerte und kalibriertes Modell)

5.4.3.4 Parameteridentifikation für die Funktion K(t)

5.4.3.4.1 Ausgangssituation Es wird angenommen, dass das auf diese Weise kalibrierte Werkstoffmodell über die Relaxationsfunktion des Schubmoduls entsprechende Beanspruchungszustände abbilden kann, die dominiert sind von Schubbeanspruchungen. In Abschnitt 5.2.4.4.2 wird mit Hilfe der Verteilung der Spannungsmehrachsigkeit η gezeigt, dass diese in den untersuchten 2-Flankenklebungen lediglich im Scherexperiment im Bereich kleiner Verzerrungen vorliegen. Im Fall größerer Verzerrungen werden die Abweichungen von diesen Annahmen groß. Insbesondere der Beanspruchungszustand im querdehnbehinderten Zugexperiment ist dominiert von hydrostatischen Beanspruchungszuständen. Die daher vorliegende Notwendigkeit der Beschreibung der Relaxationsfunktion K(t) nach Gleichung 5.34 zur Berücksichtigung der zeitabhängigen Veränderung der Kompressibilität wird nachfolgend anhand einer numerischen Simulation aufgezeigt.

5.4.3.4.2 Ergebnisse der Simulation mit konstanten Kompressionsmodulen Mit Hilfe des FE-Modells werden unterschiedliche Simulationen mit verschiedenen Nenndehnraten durchgeführt und die Kraftantwort (Summer der Knotenkräfte) zur Ermittlung einer nominellen Spannung genutzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.48

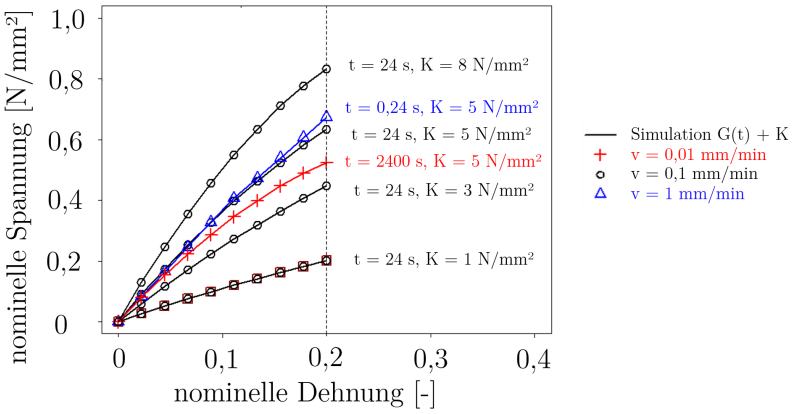


Abbildung 5.48: Darstellung der Simulationsergebnisse unter Anwendung der Funktion G(t) und verschiedener konstanter Werte für K

dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die konstanten Werte des Kompressionsmoduls die Ergebnisse wesentlich größer beeinflussen als der zeitlich veränderliche Schubmodul. Es muss daher eine Modellkalibrierung für die zeitliche Veränderung der Kompressibilität erfolgen. Hierfür gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Gegenüber dem Zugexperiment kann das Modell jedoch unter diesen Randbedingungen das linearisierte Scherexperiment exakt abbilden. Soll das querdehnbehinderte Zugexperiment folglich korrekt abgebildet werden, muss die Kompressibilität des Modells eine Funktion der Zeit sein.

5.4.3.4.3 Vorgehensweisen zur Bestimmung der Werkstoffkompressibilität in der Literatur Die Werkstoffkompressibilität wird in der Literatur auf ganz unterschiedliche Weise behandelt. Es bieten sich daher im vorliegenden Fall grundsätzlich unterschiedliche Vorgehensweisen an:

- Annahme konstanter Querdehnzahlen und Berechnung des Kompressionsmoduls über die Funktion $G(t, T)$
- Messung der zeit- und temperaturabhängigen Querdehnzahl $\rightarrow$ Berechnung des Kompressionsmoduls $\nu(t, T)$ und Verwendung von $G(t, T)$
- Messung des zeit- und temperaturabhängigen Kompressionsmoduls $K(t, T)$

Für Epoxidharze misst (109) die Zeitabhängigkeit der Querdehnzahl und kombiniert dies mit Messungen des E-Moduls. In (156) wird diese Problematik ausführlich diskutiert und mit verschiedenen Messungen des Kompressionsmoduls im querdehnbehinderten Druckexperiment sowie der Querdehnzahl im uniaxialen Zugexperiment untersucht. Das Ergebnis ist, dass keine Korrelation zwischen beiden Messverfahren hergestellt werden konnte. Dies kann darin begründet liegen, dass sich Fehler in der Querdehnzahl-Ermittlung sehr stark auf die berechneten Werte des Kompressionsmoduls auswirken. Demgegenüber ist der Fehler der E- und G-Modul-Bestimmung bei der Wahl verschiedener Querdehnzahlen gering. In (185) werden die Zeitabhängigkeiten dieser Größen für thermoplastische Kunststoffe diskutiert. Die Veränderung der Kompressibilität kann daher eine Veränderung der Querdehnzahl über die Zeit und über die Verzerrung sein, was naheliegend erscheint. Die zweite Möglichkeit wäre, dass die Querdehnzahl konstant ist und sich eine zeitliche Veränderung des Kompressionsmoduls einstellt. Die Klärung dieser Fragestellung ist auf Basis der durchgeführten Experimente nicht möglich und sollte weiterhin kritisch untersucht werden.
Im vorliegenden Fall ist jedoch in Form der unter verschiedenen nominellen Dehnraten ermittelten Kraft-Verformungs-Kennlinien die Auswirkung der zeitlichen Veränderung dieser Größen bekannt. Dies wird nachfolgend genutzt, um die Anwendbarkeit einer indirekten Identifikation für den Kompressionsmodul K(t) zu untersuchen.

5.4.3.4.4 Ermittlung K(t) bei Raumtemperatur Es werden zunächst die Werte der ersten Kennlinienmaxima (aus Abbildung 5.42) in eine Spannung-Zeit-Darstellung überführt (Abbildung 5.49).

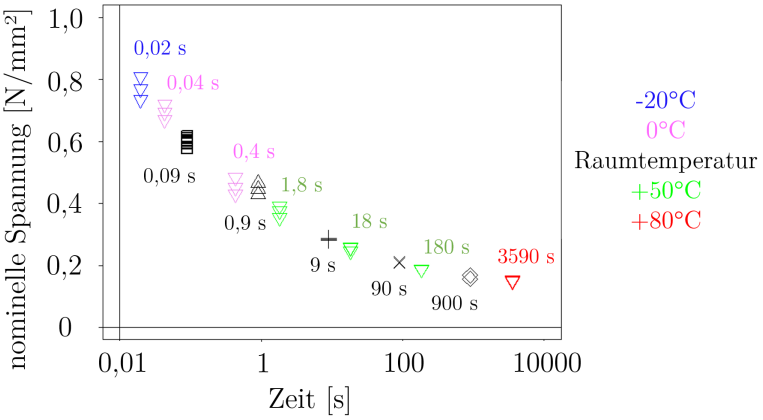
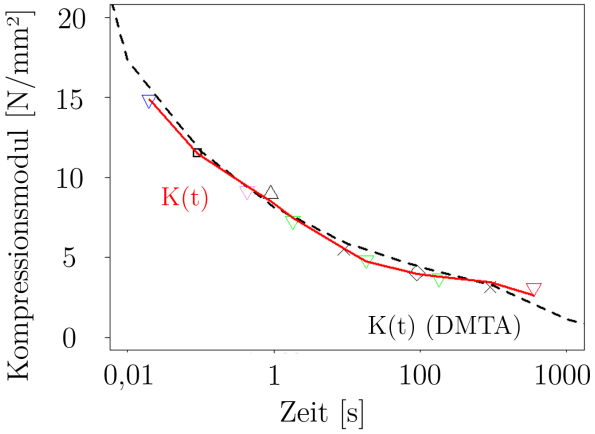


Abbildung 5.49: Methodische Vorgehensweise bei der Ermittlung eines Kompressionsmoduls zur Abbildung der zeitabhängigen Volumenrelaxation

Es stehen für diese Vorgehensweise Werte der nominellen Spannung zur Verfügung, die Werten der reduzierten Nenndehnrate aus der Masterkurve zugeordnet werden können.
Für jede Dehnrate wird eine eigene Simulation unter Verwendung der Schubrelaxationsfunktion und eines konstanten Wertes für den Kompressionsmodul durchgeführt. Dies geschieht iterativ mit dem Ziel der Identifikation des Zielwertes Kompressionsmodul, der zu einer Übereinstimmung von numerisch ermittelter Reaktion und der im Experiment ermittelten Kräfte führt. Die auf diese Weise ermittelten Kompressionsmodule werden im Anschluss in eine K-t-Darstellung überführt und dienen als Stützpunkte zur Durchführung einer Regressionsanalyse. Auf Basis dieser Stützpunkte wird in Analogie zur Vorgehensweise bei der G(t)-Funktion die Prony-Reihe für Gleichung 5.34 kalibriert.

5.4.3.4.5 Ergebnis und Abgleich mit den Experimenten Die ermittelten Parameter sowie der daraus resultierende Verlauf der Relaxationsfunktion auf Basis des indirekten Verfahrens sind in Abbildung 5.50 dargestellt (rote Linie). Darüber hinaus ist der Verlauf der aus dem DMTA-Experiment berechneten Relaxationsfunktion K(t) unter Verwendung einer konstanten Querdehnzahl dargestellt, die mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an die Zielspannungswerte angepasst wurde (schwarz gestrichelte Linie in Abbildung 5.50). Mit dieser Vorgehensweise kann eine Querdehnzahl von $\nu = 0,489$ ermittelt werden. Gegenüber dieser Vorgehensweise kann mit dem

indirekten Verfahren auf Basis der numerischen Simulation eine genauere Abbildung der Versuchsdaten erzielt werden. Vor dem Hintergrund der Streuung der Messdaten sowie der getroffenen Annahmen wird festgestellt, dass hier beide Verfahren ein nutzbares Ergebnis liefern. Für das weitere Vorgehen werden die aus dem indirekten Verfahren ermittelten Parameter genutzt.



i	β_i	K_i
[-]	[s]	$[N/mm^2]$
1	10000	28,192
2	1000	0
3	100	14,239
4	10	2,930
5	1	3,087
6	0,1	3,176
7	0,01	0,569
8	0,001	0
9	0,0001	3,788

Abbildung 5.50: Prony-Reihe für den Verlauf des operativen Kompressionsmoduls K(t) aus dem indirekten Verfahren (rote Linie) sowie der Umrechnung unter Annahme einer konstanten Querdehnzahl (schwarz gestrichelte Linie)

5.4.3.5 Diskussion der Vorgehensweise zur Kalibrierung

5.4.3.5.1 Abhängigkeit von G(t) und K(t) Ein interessanter Aspekt ist die Abhängigkeit der Größen K und G voneinander. Dies wird nachfolgend durch Betrachtungen der zeitlichen Entwicklung der elastischen Konstanten mit der Kenntnis diskutiert, dass mit Hilfe zweier elastischer Kenngrößen jede weitere elastische Größe berechnet werden kann. Hierfür wird zunächst eine zeitabhängige Funktion der Querdehnzahl $\nu(t)$ in Abhängigkeit von den Relaxationsfunktionen $G(t)$ und $K(t)$ nach folgender Darstellung berechnet:

$$\nu(t) = \frac{3K(t) - 2G(t)}{6K(t) + 2G(t)} \tag{5.38}$$

Mit Hilfe des Ergebnisses kann gezeigt werden, dass die Größe $\nu(t)$ für längere Zeiten ansteigt und sich im Mittel daraus ein Wert von 0,489 ergibt. Der Wert scheint insofern plausibel, als sich dieser Wert nahe dem theoretischen Grenzwert 0,5 befindet und ein plausibles Maß für gummielastisches Werkstoffverhalten darstellt. Jedoch ist nicht

eindeutig definiert, welche elastische Kenngröße die Zeitabhängigkeit der Kompressibilität in diesem Fall beeinflusst, da bekannt ist, dass insbesondere die Querdehnzahl eine zeit- und temperaturabhängige Größe darstellt (153).
Es wird empfohlen, dies mit uniaxialen Messungen der Querdehnzahl zu vergleichen, für den vorliegenden Fall wird die Vorgehenweise als hinreichend genau eingeschätzt. Der Vorteil besteht insbesondere darin, dass die für die Simulation notwendigen Nenndehnratenbereiche direkt durch das Modell abgebildet werden können.

5.4.3.5.2 Einfluss von Modellfehlern Die zur Identifikation genutzten Kennfunktion können durch verschiedene Einflussfaktoren von den realen Gegebenheiten abweichen. Aufgrund der getroffenenen Annahmen zur Linearisierung der Schermodulkurven, der Anwendung der Mittelwertschätzungen der querdehnbehinderten Experimente sowie zur Umrechnung von Modulwerten aus der DMTA-Messung wird nachfolgend der Einfluss von Abweichungen realer Größen zu diesen Größen exemplarisch diskutiert werden. Hierbei werden folgende Fälle auf Basis von Gleichung 5.38 diskutiert, wobei nur die kumulierte Auswirkung der Modellfehler betrachtet wird, nicht die Einzelursachen. Es werden folgende Fälle behandelt:

- Fall 1: Die Funktion G(t) ist durch die kumulative Auswirkung von Modellfehlern der Spannungswerte im Scherexperiment ($\pm$ 20 %) beeinflusst, die Funktion K(t) korrekt.
- Fall 2: Die Funktion K(t) ist durch die kumulative Auswirkung von Modellfehlern der Spannungswerte im querdehnbehinderten Zugexperiment ($\pm$ 20 %) beeinflusst, die Funktion G(t) korrekt.

Für beide Fälle können mittlere Querdehnzahlen ermittelt werden, die weniger als 1 % gegenüber dem zuvor ermittelten Wert von 0,489 abweichen. Signifikante Abweichungen über 5 % treten erst für Modulbereiche auf, die um den Faktor 10 von den verwendeten Funktionen abweichen. Die Vorgehensweise wird daher für den vorliegenden Fall als geeignet angesehen.

5.4.3.5.3 Zeit- und Temperaturbereich Die Zeitabhängigkeit dieser Größen, insbesondere der Querdehnzahl, kann mit dem angewendeten indirekten Identifikationsverfahren nicht geklärt werden. Jedoch wird das dargestellte Verfahren zur praktikablen Erfassung der Auswirkung mit dem Ziel der Lastprozessmodellierung in einem globalen Modell angesehen. Mit Hilfe erweiterter DMTA-Messungen der Zeit- und Temperaturabhängigkeit im Frequenzbereich scheint insofern die Möglichkeit vorhanden,

den Zeit- und Temperaturbereich in Ergänzung zu quasi-statischen Untersuchungen zu erweitern.

5.4.4 Simulation einer Windsogeinwirkung bei verschiedenen Temperaturen

5.4.4.1 Vorgehensweise und Randbedingungen

Mit Hilfe des kalibrierten Werkstoffmodells wird das Verhalten einer Klebverbindung unter dem Einfluss einer Windsogeinwirkung untersucht. Hierbei wird sowohl die zeitliche Wirkung durch die Wahl unterschiedlicher Mittelungsintervalle (Windbö und 10-Minuten-Wind) variiert als auch die hierbei vorherrschende Temperatur.

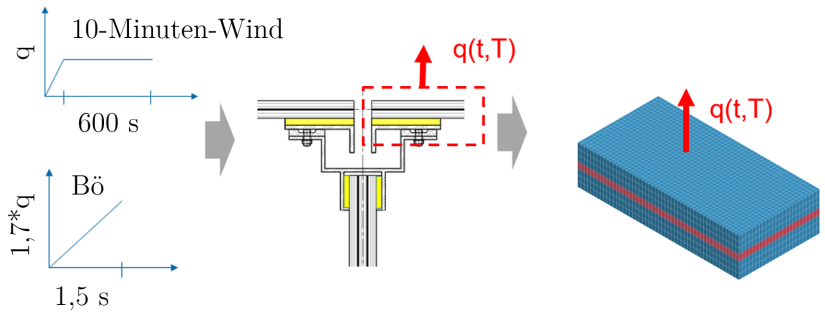


Abbildung 5.51: Schema der Simulation einer Windsogwirkung auf eine Klebfuge (Quelle: eigene Darstellung)

5.4.4.1.1 Getroffene Annahmen zu Last und Geometrie Es werden die folgenden Annahmen zur Last und Geometrie getroffen. Es wird angenommen, dass die Temperatur nur das Relaxationsverhalten des Klebwerkstoffes beeinflusst und keine sekundären Beanspruchungszustände durch die Ausdehnung der Werkstoffe entstehen. Ferner wird angenommen, dass die Relaxationsfunktion auf das Kriechverhalten mit hinreichender Genauigkeit im untersuchten Bereich übertragen werden kann. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen in Kapitel 3 zur Wirkungsdauer wird darüber hinaus angenommen, dass sich aufgrund der zeitlichen Wirkung der Temperatur ein stationärer Zustand eingestellt hat. Das bedeutet für die vorliegende Betrachtung, dass die Temperatur bereits in der Klebfuge vorhanden ist, wenn der Wind einwirkt. Dies kann grundsätzlich in Abhängigkeit von der Jahreszeit sowie der lokalen konstruktiven Gegebenheit zu verschiedenen Jahreszeiten und bei unterschiedlichen Temperaturen auftreten. Hierfür werden die in Tabelle 5.16 dargestellten Lastszenarien simuliert. Nach den in Abschnitt 3.2.3 dargestellten Zusammenhängen werden für die beiden unterschiedlichen Zeitintervalle der Windlastfunktion folgende Werte angenommen:

- Windböe: 1 kN/m^2 = 0,001 N/mm^2
- 10-Minuten-Wind: (1 / 1,7) kN/m^2 = 0,588 kN/m^2 = 0,000588 N/mm^2

Die Wirkung dieser Sogwirkung wird über die Knotenkräfte auf den oberen Fügepartner aufgebracht. Die Last-Zeit-Funktion wird hier in Analogie zu dem Böenverlauf in Kapitel 3 linear angenommen.

Tabelle 5.16: Darstellung der simulierten Szenarien

Szenario	Wirkungsdauer	Modell	Temperatur
[-]	[s]	[-]	[$°C$]
Frühjahr	1,5	Bö	$+23$
Sommer	1,5	Bö	$+40$
Winter	1,5	Bö	$+10$
Frühjahr	600	10-Minuten-Wind	$+23$
Sommer	600	10-Minuten-Wind	$+40$
Herbst	600	10-Minuten-Wind	$+10$

5.4.4.1.2 Bewertung der Beanspruchung der Fuge Als Kriterium für die Ausnutzung des Fugenabschnitts unter Zugbelastung wird die ermittelte Deformationsgrenze für den Kavitationseintritt verwendet. Zur Auswertung wird ein operativer Ausnutzungsgrad $\beta_{operativ}$ definiert:

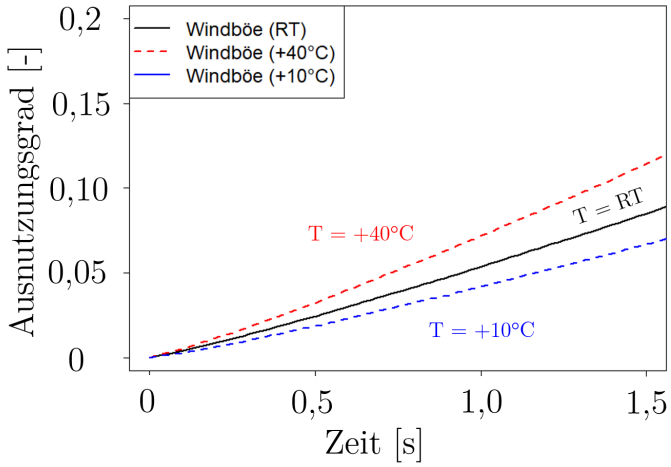
$$\beta_{operativ} = \frac{\epsilon_{zz,simuliert}}{\epsilon_{Kavitation}} \tag{5.39}$$

Dieser beschreibt die numerisch ermittelte nominelle Dehnung $\epsilon_{zz,simuliert}$ (berechnete Knotenverschiebung in Lastrichtung bezogen auf die Klebschichthöhe) normiert auf das hier verwendete Deformationskriterium $\epsilon_{Kavitation}$ für den vorliegenden Fugenquerschnitt (25 mm x 2 mm x 100 mm). Die reale Tragfähigkeit der Probe wird aufgrund der ausgeprägten Befähigung des HKB-Werkstoffs, Verformungsarbeit nach dem Eintreten des 1. Kurvenmaximums aufzunehmen, als wesentlich höher angesehen.

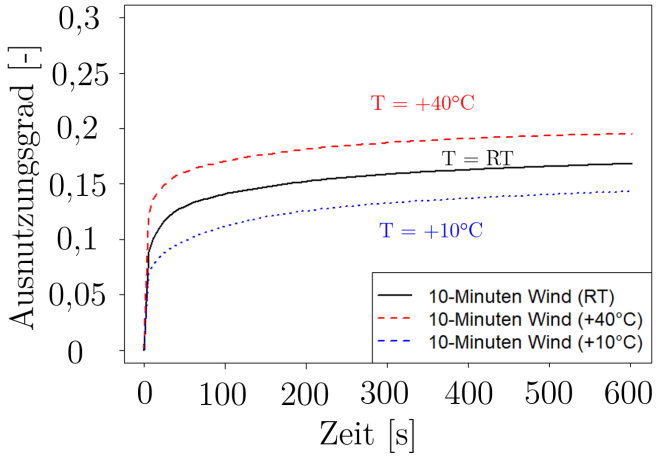
5.4.4.2 Ergebnisse

Nachfolgend ist der Verlauf des operativen Ausnutzungsgrades β in Abhängigkeit von den simulierten Lastfunktionen dargestellt. Diese Auswertung zeigt den Einfluss von

Zeit und Temperatur auf den Ausnutzungsgrad (siehe Abbildung 5.52). Die kurzzeitig wirkende Windböe nutzt gegenüber dem 10-Minuten-Wind die Fuge trotz einer höheren mechanischen Last geringer aus. Demgegenüber steigt die Ausnutzung infolge der Wirkungsdauer infolge der zunehmenden Deformation beim 10-Minuten-Wind konstant an. Für das Szenario Sommer verschiebt sich die Relaxationsfunktion weiter und die Nachgiebigkeit wird dementsprechend größer. Die auf Dehnungsebene definierte Ausnutzung β ist hier wesentlich höher.
Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 3.2.3 dargestellten Zusammenhänge zeigt sich, dass die hier maßgebende Einwirkungsgröße nicht die Windböe ist. Vielmehr scheint auf Basis der ermittelten Ergebnisse eine kombinierte Berücksichtigung von 10-Minuten-Wind (Einfluss der zeitlichen Wirkung) und Windböe (Einfluss der maximalen Last) ein Ansatz für die Kennwertermittlung. Eine versuchstechnische Abbildung kann beispielsweise mit einer Konstantlastphase (Kraftregelung, 10 Minuten) mit abschließender zerstörender Prüfung (Kraft- oder Wegregelung, Sekundenbereich) erfolgen.



(a) Modellantwort Böe



(b) Modellantwort 10-Minuten-Wind

Abbildung 5.52: numerisch ermittelte Ergebnisse

5.5 Zusammenfassung und Transfer zur Praxisbemessung

5.5.1 Diskussion der Randbedingungen ETAG 002

Die dargestellten Zusammenhänge lassen Rückschlüsse auf den Aufbau sowie die Vorgehensweise bei der Nachweisführung nach (81) zu. So ist davon auszugehen, dass insbesondere die Vorgabe von maximalen und minimalen Aspektverhältnissen in Kombination mit Durchbiegungsbegrenzungen der Fügepartner sowie die Beschränkung auf Silikonwerkstoffe alleine wesentlich das Einhalten des Grenzkriteriums Kavitation regulieren. In (12) sind für Elastomerfugen mit unendlicher Länge einzuhaltende Breite-/Höhe-Verhältnisse und inkompressiblem Werkstoffverhalten (ν = 0,5) auf Basis eines Kavitationskriteriums hergeleitet. Diese Grenzverhältnisse werden hier durch eine Modifikation (modifiziertes Gent & Meinecke-Kriterium) in das im Rahmen dieser Arbeit genutzte Shape-Faktor-Konzept überführt. Dies geschieht durch Umrechnung der Breiten und Höhen in operative Shape-Faktoren und Überführung in eine Funktion. Diese ist dem hier entwickelten kompressiblen Prognosemodell gegenübergestellt (siehe Abbildung 5.53). In Ergänzung sind die ETAG-Aspektverhältnisse sowie der Shape-Faktor der Standard-H-Probe eingetragen.

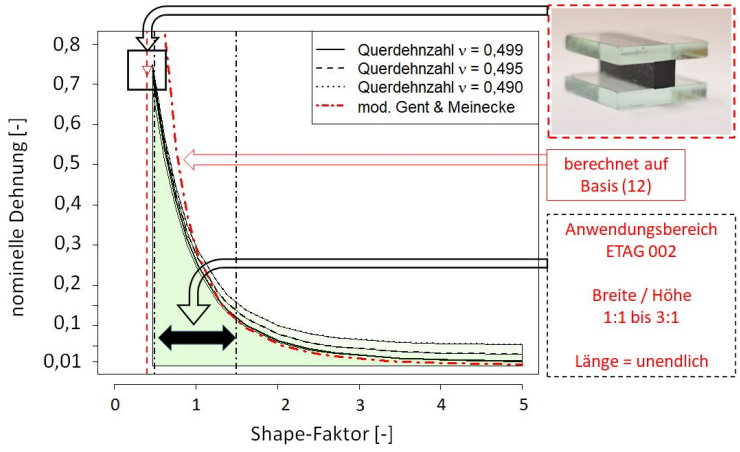


Abbildung 5.53: Abgleich der Modellprognose (Quelle: eigene Darstellung)

5.5.1.0.1 H-Probe sowie Testmethode Diese Darstellung erlaubt mehrere Rückschlüsse zum Aufbau der Randbedingungen der ETAG 002.

- Es ist davon auszugehen, dass Kavitationseffekte durch die Wahl des Probekörpers (Shape-Faktor = 0,4) im Rahmen der Charakterisierung im Modus Zug nach ETAG 002 ausgeschlossen werden sollen. Dies zeigt sich durch die Position der nach dem Shape-Faktor-Konzept bewerteten H-Probe in Abbildung 5.53. Gegenüber der H-Probe nach ETAG 002 liegen alle nach erlaubten Aspektverhältnissen gemäß ETAG 002 auf Basis beider Kavitationskriterien ungünstiger. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Geometrien liegen jedoch noch wesentlich darüber.
- Aufgrund der charakteristischen Geometrie ist bei dem ETAG-Probekörper davon auszugehen, dass das Versagen durch das Einreißen der Eckbereiche ausgehen soll, was andere Versagenskriterien relevant macht. Zu diesen zählt ein Hauptdehnungskriterium für übliche Silikonwerkstoffe (Hauptdehnungsversagen ϵ_{max} = 0,9 - 1,2), welches auch maßgeblich für den Modus Scherung angesehen wird.

5.5.1.0.2 Rotationsbegrenzung Neben der Beanspruchung infolge einer Kraftwirkung in Fugennormalenrichtung, welche durch das vorgestellte Kriterium abgedeckt ist, sind maßgebende Beanspruchungen infolge der Fugenrotation infolge der Plattenbiegung der Glasscheiben zu erwarten. Das hohe Maß an Übereinstimmung des vorgestellten Prognosemodells sowie des modifizierten Gent-Meinecke-Kriteriums lässt darauf schließen, dass auch die Rotationsbegrenzung für Kautschuke aus (12) für elastische Dickschichtklebungen fähig ist, das Eintreten von Kavitationseffekten mit hinreichender Näherung zu erfassen. Hieraus kann der Rückschluss gezogen werden, dass auch die Durchbiegungsbegrenzung für Fügepartner ein Teil des Dimensionierungsverfahrens der ETAG 002 darstellt. Durch die Begrenzung der Durchbiegung der Glasplatte wird auch die Fugenrotation begrenzt, was wiederum in Kombination mit vorgegebenen Aspektverhältnissen einen Grenzzustand der Fugenverformung beschreibt.

5.5.1.0.3 Fazit Zusammenfassend scheint die Vorgehensweise nach ETAG 002 auf Basis dieser Zusammenhänge für den designierten Einsatzbereich der umlaufenden Fuge sinnvoll, eine Übertragbarkeit auf andere Konstruktionen bei gleichzeitiger Behandlung der operativen Festigkeitswerte als Verbindungsnennfestigkeiten ist jedoch nach Ansicht des Autors nicht ohne Einschränkung möglich. Hier sind insbesondere

Scherbeanspruchungen in Fugenquerrichtung zu nennen, die durch die hohe Randzonenbeeinflussung bei gleicher Nennbeanspruchung lokal wesentlich höher beansprucht werden können. Hier wird auf Basis der durchgeführten Untersuchungen empfohlen, das Shape-Faktor-Konzept auf die Scherbeanspruchung zu erweitern. Die Erwartung ist hier, dass sich Fugen mit hohen Shape-Faktoren gegenüber der wirkenden Beanspruchung wesentlich unbeeinflusster verhalten. Eine systematische Ausarbeitung dieser Beeinflussung z.B. über die Formulierung von Schädigungsansätzen kann hier Zugang zu einem praktikabel nutzbaren Nennspannungskonzept liefern.

5.5.2 Diskussion von Grenzkriterien

Auf Basis der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen wie auch numerischen Untersuchungen zeigen die dehnungsbasierten Konzepte ein großes Potential als Beanspruchungskriterium für Klebverbindungen im Fassadenbau.
Dies begründet sich aus dem hohen Maß an Unabhängigkeit gegenüber der Veränderung der elastischen Kennwerte infolge von temperatur- und zeitbedingten Relaxationsmechanismen. Ferner ist die Anwendbarkeit aufgrund der Verwendung von Nenngrößen für analytische Berechnungen hoch.
Als Einschränkung muss gesehen werden, dass die zeit- und temperaturabhängigen Maximallasten der jeweiligen Probekörper unter Zug nicht ermittelt werden können. Dies wird auf verschiedene Gründe zurückgeführt. Zum einen muss davon ausgegangen werden, dass der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Kavitationsbeginn in einer frühen Phase auftritt, in welcher angenommen werden kann, dass der Werkstoff in einem hohen Maß ungeschädigt vorliegt. Ferner muss das eigentliche Versagen als eine Interaktion verschiedener Effekte angesehen werden. Hierzu zählen insbesondere das Entstehen von Rissen an den Außenbereichen und deren Fortschreiten in das Innere. Dies ist insbesondere für Querschnitte mit kleinen Shape-Faktoren ein relevantes Versagensszenario. Das Einreißen sowie der Rissfortschritt sind selbst zeitabhängige Vorgänge. So zeigen die beiden Silikonklebstoffe hier maßgebend unterschiedliche Eigenschaften. Die Klärung dieser Fragestellung und das Ermitteln eines geeigneten lokalen Prediktors, der eine Berücksichtigung der zahlreichen Einflussfaktoren gestattet, müssen nach Ansicht des Verfassers Bestandteil weiterer Forschung sein.
Demgegenüber scheinen klassische Ingenieurfestigkeitskennwerte σ_{des} nach ETAG 002 vielmehr als operatives Kriterium zur Bewertung verschiedener Einflussfaktoren, wie Temperaturen oder der Einfluss von Alterungsauslagerungen, untereinander zu dienen.

5.5.2.0.1 Ermittlung von Widerstandskennwerten Auf Basis der Erkenntnisse in Kapitel 3 kann angenommen werden, dass die Temperatur eine quasi ständig wirkende Größe darstellt. Vor diesem Hintergrund ist die Nutzung der hier betrachteten dehnungsbasierten Grenzkriterien zur Bewertung der Beanspruchungshöhe als ideal anzusehen. Dies kann damit begründet werden, dass sich die maximal ertragbaren Verzerrungsgrößen (Dehnungen und Schergleitungen) direkt mit maximal auftretenden Differenzverschiebungen infolge unterschiedlicher Fügepartnerausdehnungen vergleichen lassen. Ob diese Verzerrungsgrößen auch über die ermittelten Zeiträume unter der synergistischen Wirkung von Feuchte und Temperatur ertragbar sind, muss jedoch experimentell weiter untersucht werden. Dies kann in einem dehnungsgesteuerten Zeitstandexperiment unter Auslagerung erfolgen. Die hierbei ermittelten Versagenszeiten gestatten den Rückschluss auf die reale Tragfähigkeit und können wiederum über die Anwendung von Modifikationsfaktoren nach Kapitel 2 für den Widerstand in ein Bemessungsmodell integriert werden.

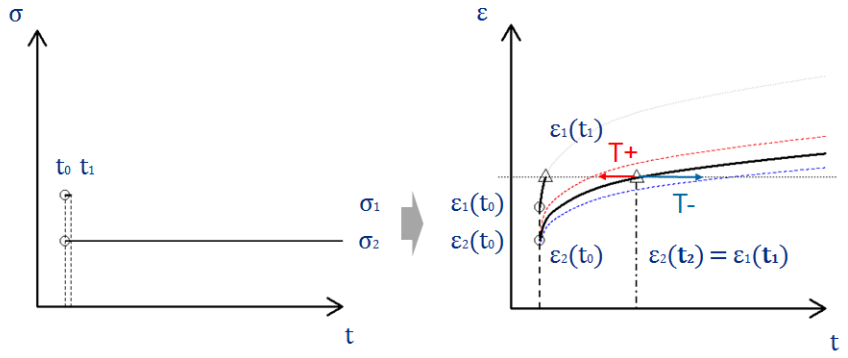


Abbildung 5.54: Schema der Auswirkung der Lastwirkungsdauer auf das Erreichen verzerrungsbasierter Grenzen
(Quelle: eigene Darstellung)

Anders stellt sich die Situation bei der Wirkung einer Kraftgröße dar, wie die Auswirkung einer Windlast oder von Luftdruckänderungen. Hier kann zunächst nicht beurteilt werden, wann ein verzerrungsbasiertes Kriterium erreicht wird, da hierbei die Verformung von der Steifigkeit der Fuge abhängt. Dies hängt wiederum vom Kriechverhalten der Klebfuge ab, dieses Prinzip ist in Abbildung 5.54 dargestellt. Die Geschwindigkeit dieser Kriechprozesse steht neben der Art des Polymers und der Temperatur im Zusammenhang mit der Geometrie und der Verteilung der internen Beanspruchungszustände sowie der jeweiligen Relaxationsfunktionen. Für die Praxisbemessung wird

hier empfohlen, mit operativen reduzierten Modulwerten zu arbeiten, welche die Verformung überschätzen und somit einen zeit- und temperaturabhängigen Einwirkungsvorgang hinsichtlich der Verformung der Fuge auf der günstigen Seite abbilden. Die Modifikation kann hier wiederum auf Basis maßgebender Einflussfaktoren erfolgen, wie Grenzzuständen aus Temperatur, erzielbare Fertigungstoleranzen (Geometrie) sowie Alterungsdegradation.

5.5.3 Diskussion der Bedeutung des Zeit-Temperatur-Einflusses für andere Klebstoffsysteme

Insbesondere für die umfangreich eingesetzten Silikonwerkstoffe ist von großem Interesse, inwieweit sich die Grenzkriterien in Analogie zu den Ergebnissen mit dem HKB-Werkstoff einstellen. Dies wird nachfolgend für einen Silikonwerkstoff diskutiert. Zur Definition von Bezugspunkten für den Silikonwerkstoff SGA werden die Arbeitskurven für den Shape-Faktor S = 1,613 (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm) herangezogen. Für diesen Fall wird angenommen, dass die in Abschnitt 5.3.4 ermittelten Zusammenhänge Gültigkeit zeigen und die folgende Annahme gilt:

$$\epsilon_{Kavitation} = konstant = 0,31 (Shape - Faktor = 1,613) \tag{5.40}$$

Unter diesen Randbedingungen kann in Analogie zu der Vorgehensweise eine Verschiebung der nominellen Spannungen σ_n an der Stelle $\epsilon_{Kavitation} = 0,31$ erfolgen. Hieraus ergibt sich die Darstellung in Abbildung 5.55. Es ist ersichtlich, dass gegenüber dem Werkstoff HKB die Ausprägung der zeit- und temperaturabhängigen Unterschiede wesentlich geringer ist. Mit dieser Vorgehensweise lässt sich der Kraftpunkt in der Arbeitslinie, der das Eintreten von Kavitation beschreibt, mit Hilfe der Zeit-Temperatur-Verschiebung beschreiben. Die Mechanismen sind daher identisch mit den für den HKB-Klebstoff festgestellten Effekten, ihre Ausprägung ist jedoch geringer und die ermittelten Verschiebungsfaktoren $E_{Arrhenius}$ liegen im Bereich von ca. 9000 K. Für eine abschließende Beurteilung fehlt hier jedoch eine größere Datenbasis.

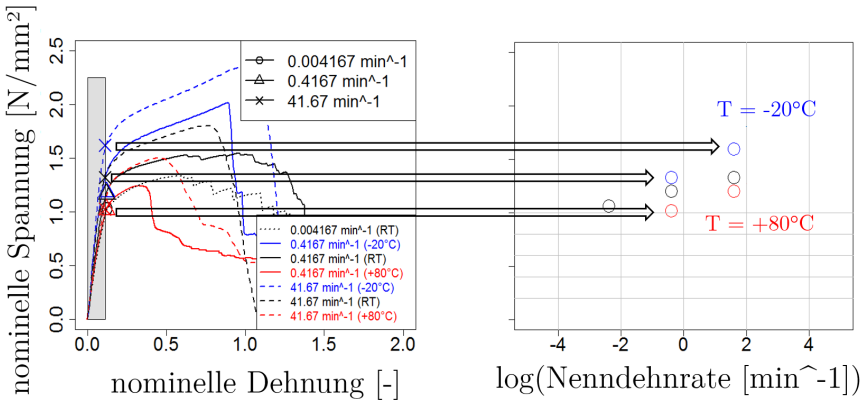


Abbildung 5.55: Masterkurve für Maximum querdehnbehinderter Zug (T = 296 K) (Quelle: eigene Darstellung)

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Tragverhalten von Klebverbindungen im Fassadenbau untersucht. Hierbei wurden in Erweiterung zu den Ergebnissen des Forschungsprojektes P 1052 (187) Untersuchungen zum zeit- und temperaturabhängigen Tragverhalten von Klebfugen im Fassadenbau durchgeführt.
Die Arbeit setzt bei der Behandlung der Einwirkungsvorgänge als zeit- und temperaturabhängige Größe an. Anhand fugenähnlicher Proben wurde das Trag- und Versagensverhalten in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren experimentell untersucht. Dies bildet die Grundlage für eine analytische wie auch numerische Analyse des Tragverhaltens und der Herleitung ingenieurpraktisch nutzbarer Kriterien zur Auslegung dieser Verbindungen.
Zunächst wurden die Grundlagen der Klebtechnik als Fügeverfahren beschrieben. Dies beinhaltet sowohl die technologische Anwendung im Glas- und Fassadenbau als auch die hiermit verbundenen Methoden der Fugendimensionierung.
Für das Verständnis der Herausforderungen der Dimensionierung von Klebverbindungen im Fassadenbau wurden anhand polymermechanischer Grundlagen die Hintergründe für das zeit- und temperaturabhängige Werkstoffverhalten von Klebstoffen beschrieben. Ferner ist die Grundlage verschiedener relevanter Versagensmechanismen aufgeführt. Dies bildet die Basis zur Beschreibung aktueller analytischer wie auch numerischer Methoden der Versagensprognose und der Beanspruchungsbewertung für Polymerwerkstoffe sowie für Klebverbindungen aus Anwendung und Forschung. Anhand einer Aufbereitung der Grundlagen bautechnischer Methoden zur Bauteildimensionierung sowie der normativen Grundlagen zur Behandlung klimatischer Einwirkungen konnte dargestellt werden, dass die Notwendigkeit zu weiterer Forschungsarbeit auf diesem Gebiet besteht. Nach einer Diskussion aktueller Forschungsergebnisse aus dem Glas- und Fassadenbau im Kontext der im Rahmen dieser Arbeit behandelten Themengebiete, wird der Forschungsbedarf abgeleitet.

Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Einwirkung Auf Basis der aufbereiteten Grundlagen wurden zunächst Freiluftmessungen durchgeführt mit dem Ziel der Quantifizierung des zeitlichen Auftretens der Temperaturzustände für die Tief- und Hochtemperaturlastfälle. Hierzu wurden detaillierte Messungen an geklebten Haltern mit integrierten Temperatursensoren unter Freibewitterung durchgeführt. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise konnte das zeitliche Erwärmungsverhalten von geklebten Silikonhaltern erstmals in situ systematisch erfasst werden. Die gemessenen Zeitbereiche umfassen hier sowohl sommerliche Hochtemperatur- als auch Winterperioden mit und ohne Strahlungseinwirkung. Es konnte festgestellt werden, dass, obwohl die Strahlung einen wesentlichen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten hat, die Lufttemperatur einen weiteren wesentlichen Einflussfaktor darstellt. Dies zeigt sich insbesondere dadurch, dass die gemessenen Temperaturzustände Stunden bzw. Tage anhalten können.
Zur Quantifizierung dieser Wirkungsdauern wurden historische Wetterdaten analysiert. Hierzu wurde ein Zählalgorithmus programmiert, mit dessen Hilfe Daten von verschiedenen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes hinsichtlich konsekutiver Überschreitungen zuvor definierter Klassengrenzen analysiert wurden. Hieraus kann abgeleitet werden, dass insbesondere die klimatischen Einwirkungen (Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit) von Wirkungsdauern gekennzeichnet sind, die von den zeitlichen quasi-statischen Randbedingungen üblicher Charakterisierungsexperimente (z.B. nach (81)) zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Klebverbindungen im Fassadenbau abweichen. Dies umfasst vor allem den Mittelzeitbereich, der sich durch den Stunden- bis Tagesbereich definiert. Dabei werden Lastniveaus in Abhängigkeit von den verschiedenen klimatischen Parametern erreicht, die 50 % bis 75 % der normativen charakteristischen Werte erreichen können. Zur praxisnahen Nutzbarkeit dieser Ergebnisse wurden diese Werte in Lastkollektive überführt. Die Auseinandersetzung mit der realen Klebschichttemperatur unter Strahlungseinwirkung erfolgte im Rahmen einer Grenzwertbetrachtung unter Anwendung zuvor ermittelter konservativer Modelljahresgänge der Einwirkung. Diese bauphysikalische Analogiebetrachtung erbrachte Ergebnisse, die aufzeigen, dass durch die Differenz zwischen der Fertigungstemperatur und der mittleren Bauteiltemperatur eine dauerhafte Temperaturdifferenz auf Klebverbindungen im Fassadenbau entsteht. Nach Ansicht des Autors muss die zeitliche Wirkung der Einwirkungsgrößen bei der Kennwertermittlung wie auch bei der Auslegung berücksichtigt werden. Hierfür stellt das aktuelle Sicherheitskonzept im Bauwesen die notwendigen Mittel zur Modifikation der Widerstandseigenschaften zur Verfügung.

Zeit- und Temperaturabhängigkeit des Widerstands der Klebverbindung Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden drei verschiedene Klebstoffe (2 Silikonelastomere, 1 Haftklebstoff) systematisch untersucht.
Hierzu wurden zunächst durch uniaxiale Zugexperimente, Zugscherexperimente sowie DMTA-Messungen Werkstoffkenndaten bestimmt sowie das grundlegende mechanische Verhalten analysiert. Das Alterungsverhalten wurde durch die Variation verschiedener Auslagerungsparameter sowohl an Werkstoff- als auch an Verbundproben untersucht.
Das Kernelement der versuchstechnischen Untersuchungen stellen die Untersuchungen zur Geometrieabhängigkeit dar. Zur Analyse des Einflusses der Geometrie kommen modifizierte H-Proben zur Anwendung. Diese kennzeichnen sich durch unterschiedliche Breite-/Höhe-Verhältnisse. Anhand einer ersten Testreihe unter Zug und Scherung an vier verschiedenen Geometrien kann die Beeinflussung des Tragverhaltens durch die Geometrie unter Zug festgestellt werden. Dies zeigt sich durch unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Verläufe, die darüber hinaus für die Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm wie auch 12 mm x 6 mm x 100 mm Anzeichen für das Eintreten von Kavitationseffekten zeigen. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird das Versuchsprogramm zunächst bei Raumtemperatur hinsichtlich der Nenndehnratenbereiche erweitert. Hiermit kann der Einfluss der Nenndehnrate auf das Tragverhalten gezeigt werden. So sind unter hohen Dehnraten stets Steigerungen der erzielbaren Maximallasten erreichbar. Das gilt nicht zwangsläufig für die Befähigung zur Arbeitsaufnahme, welche im Zusammenhang steht mit dem Einreißen von Rissen von außen in den Probekörper. Es kann beobachtet werden, dass sich dieses Versagenverhalten mit dem Auftreten von Kavitationseffekten überlagert. Diese Kavitationseffekte, die zwar in Abhängigkeit von der Nenndehnrate bei unterschiedlichen Nennspannungen auftreten, sind in einem qualitativ ähnlichen Dehnungsbereich zu beobachten. Diese Tendenz kann in weiteren raten- und temperaturabhängigen Testreihen wie auch unter dem Einfluss von Feuchte bestätigt werden. Die Quantifizierung des Einflusses von Zeit und Temperatur wird im Modus Scherung und Zug am Werkstoff HKB (Haftklebstoff) untersucht. Dieser zeigte bereits in den DMTA-Untersuchungen die ausgeprägtesten Reaktionen auf Frequenz- wie auch Temperaturänderungen, was durch die Versuchsergebnisse an der modifizierten H-Probe bestätigt werden konnte. Anhand dieser Ergebnisse kann gezeigt werden, dass ein pauschales Festlegen von Testgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Polymerwerkstoff zur Messung von Eigenschaften führen kann, die das reale Verhalten nicht widerspiegeln. Die Ausprägung dieser temperatur- und ratenabhängigen Effekte wird insbesondere mit der Lage der Glasübergangstemperatur in Bezug auf die Referenztemperatur (hier: Temperatur

der zu betrachtenden Einwirkung) in Zusammenhang gebracht. Dies bildet nach Ansicht des Autors eine Grundlage zur Klassifizierung von Werkstoffen mit dem Ziel der Ausarbeitung von Regelwerken zur Dimensionierung von Klebverbindungen.

Tragverhalten von 2-Flankenklebungen Die Untersuchung des Tragverhaltens von 2-Flankenklebungen erfolgte auf Basis der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen, insbesondere mit dem Ziel der Analyse des Geometrieeinflusses sowie der Erweiterung der Kenntnisse über die Versagensmechanismen.
Hierzu wird zunächst auf Basis der Nennkennwerte aus dem Zugversuch eine Parameteridentifikation auf Basis von uniaxialen Zugversuchen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Dehnungsbereichen durchgeführt und die Übertragbarkeit auf die analytische wie auch numerische Abbildung der Steifigkeit der modifizierten H-Probe untersucht. Hier wurden die besten Ergebnisse sowohl für den Modus Scherung als auch Zug mit Parametersätzen erzielt, die auch für einen kleinen Dehnungsbereich des Zugexperimentes gelten und aus denen eine steifere Werkstoffantwort und somit höhere Modulwerte resultieren. Mit Hilfe eines numerischen Modells konnte ferner der interne Beanspruchungszustand der modifizierten H-Probe unter Anwendung der Spannungsmehrachsigkeit untersucht werden. Hier wurde festgestellt, dass der Modus Zug in der modifizierten H-Probe dominiert ist von hydrostatischen Beanspruchungszuständen, was die Versteifung gegenüber der Scherbeanspruchung erklären kann. Der Grad der Querdehnbehinderung beeinflusst die Höhe der hydrostatisch beanspruchten Bereiche und somit die Steifigkeit. Dies konnte analytisch in Abhängigkeit von der Querdehnzahl bestätigt werden. Mit Hilfe der Anwendung von Methoden aus der Kautschuktechnologie wird mit Formfaktoren (Shape-Faktoren) auf diese Weise die Fugenversteifung für verschiedene Geometrien quantifiziert. Auf Basis dieser Zusammenhänge wird unter Anwendung eines Kavitationskriteriums eine nominelle Dehnungsbegrenzung für 2-Flankenklebungen hergeleitet. Diese zeigt sich im Abgleich mit experimentellen Ergebnissen weitestgehend temperatur- und ratenunabhängig und werkstoffübergreifend prognosefähig zur Identifikation des Eintretens von Kavitationseffekten. Die Unabhängigkeit gegenüber den zahlreichen untersuchten Einflussfaktoren wird vor dem Hintergrund der Erkenntnisse zur Zeitabhängigkeit der Einwirkung als ein wesentlicher Vorteil gegenüber den spannungsbasierten Grenzkriterien angesehen. Ferner kann das vorgestellte Modell als eine Verallgemeinerung der bisherigen Begrenzung der Breite/Höhe-Verhältnisse der ETAG 002 angesehen werden. Die hierdurch vorhandenen Kenntnisse über die zugrunde liegenden Mechanismen tragen zu einem verbesserten Verständnis der im Rahmen dieser Richtlinie definierten Randbedingungen bei.

Die Korrelation mit der zeit- und temperaturabhängigen Einwirkung wurde auf dieser Grundlage für den Werkstoff HKB diskutiert. Hierzu wurde das Eintreten des Grenzkriteriums unter temperaturabhängiger Windlast simuliert. Hierfür wurde auf Basis der raten- und temperaturabhängigen Scher- und Zugexperimente an der modifizierten H-Probe ein dreidimensionales viskoelastisches Werkstoffmodell für den HKB-Werkstoff kalibriert. Die Grundlage bildet eine Auseinandersetzung mit dem Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung und dem Nachweis seiner Anwendbarkeit auf die modifizierte H-Probe. Es konnte hier anhand unabhängiger Messreihen (DMTA, modifizierte H-Probe Scherung, modifizierte H-Probe Zug) gezeigt werden, dass das Prinzip der Zeit-Temperatur-Verschiebung für die untersuchten Werkstoffe auch in Bereichen großer Verzerrungen Gültigkeit besitzt. Mit Hilfe dieses Modells und der durchgeführten praxisnahen Simulationen eines Fugenabschnittes unter Windböenbelastung bei verschiedenen Temperaturen, kann gezeigt werden, dass die wesentlichen Parameter für die Beurteilung des Ausnutzungsgrades die spezifischen zeit- und temperaturabhängigen Relaxationsmechanismen darstellen. Das bedeutet, dass die Lasthöhe allein nicht entscheidend ist, sondern die aus dem Belastungsvorgang mit seiner zeitlichen und temperaturabhängigen Charakteristik resultierenden Relaxationsmechanismen und die hiermit im Zusammenhang stehenden Kriecheigenschaften.
Die Auswirkung dieser Mechanismen steht im wesentlichen Zusammenhang mit den den Einwirkungsprozess begleitenden zeitveränderlichen Parametern sowie den polymerspezifischen Eigenschaften. Aus diesem Grund kann nach Ansicht des Verfassers für Klebverbindungen keine strikte Trennung von Einwirkung und Widerstand erfolgen, da der Werkstoffwiderstand einer Klebfuge von dem zeitlichen Auftreten sowie der hierbei vorherrschenden Temperatur abhängt. Das bedeutet für die Praxisanwendung, dass eine Abminderung des Widerstandswertes bei längerer Lastwirkung sowie höheren Temperaturen stattfindet. Soll aus ingenieurpraktischen Gründen ein Wert für eine ertragbare Spannung definiert werden, so sollte dieser als zeitabhängig beispielsweise für bestimmte Lastfälle definiert werden. Dies gilt genauso für die elastischen Kenndaten, hier wird empfohlen, auftretende Relaxationsmechanismen durch Abminderung operativer Modulwerte zu berücksichtigen. Dies bietet dem Anwender die Möglichkeit, praxisnah und sicher den Verformungszustand mit dem Ziel einer Bemessung in Nachweisgleichungen zu bestimmen. Dies ist insbesondere für kraftkontrollierte Einwirkungsvorgänge wichtig. Hierzu zählt das Wirken von Staudrücken sowie Luftdruckänderungen, bei denen der Endzustand der Verformung von den Steifigkeiten der Verbindung abhängt. Dies steht im Unterschied zu verformungskontrollierten

Einwirkungsvorgängen, die beispielsweise infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten in Multi-Material-Bauweisen auftreten. Hier kann ein Verformungsendzustand ermittelt werden, der die Auslegung auf Basis von verformungsbasierten Grenzkriterien erleichtert.

Vorschlag für weitere Untersuchungen Insbesondere die Anwendbarkeit des ZTV-Prinzips zur Kavitationsprognose lässt darauf schließen, dass die den elastischen Eigenschaften zugrunde liegenden Mechanismen in gewisser Unabhängigkeit vom Verzerrungszustand stehen. Dies sollte im Rahmen weiterer Arbeiten gezielt untersucht und auf die Beschreibung grundlegender mechanischer Versagenskriterien erweitert werden. Hierbei sind nach Ansicht des Autors die praktikable Anwendbarkeit und die Berücksichtigung der Messbarkeit mechanischer Kenngrößen in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur von hoher Bedeutung für eine praktikable Nutzbarkeit. Für die Ermittlung der Tragfähigkeit kann ferner eine Energiebetrachtung eine sinnvolle Verbindung zwischen der Betrachtung der Dehnungs- oder Spannungsgrößen darstellen. In Kombination mit Zeitstandexperimenten unter dem Einfluss der ermittelten Wirkungszeiten kann dies die Grundlage für Nachweiskonzepte sein, die in Analogie zu bestehenden Konzepten für z.B. Holzwerkstoffe, Abminderungsgrößen für Widerstandskenndaten für Klebstoffklassen ermöglichen. In Analogie muss die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der ertragbaren Verzerrungszustände untersucht werden. Dies geschieht sinnvollerweise im Bereich der maßgebenden Temperatur- und Feuchteeinwirkungen unter der Berücksichtigung der spezifischen Wirkungszeit für ausgewählte kritische Grenzzustände.

A Anhang

Versuchskurven Kapitel 4

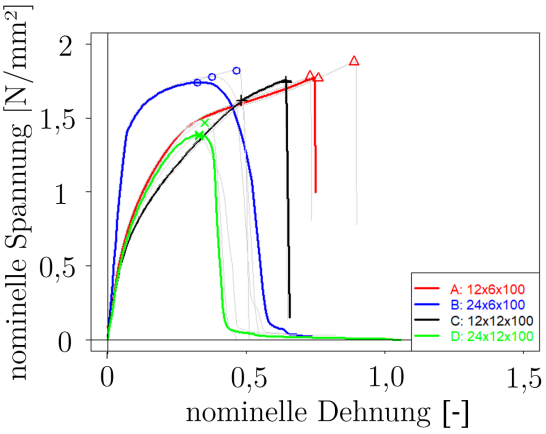


Abbildung A1: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben (Werkstoff SGB, verschiedene Geometrien, RT, 0,416 mm^{-1})

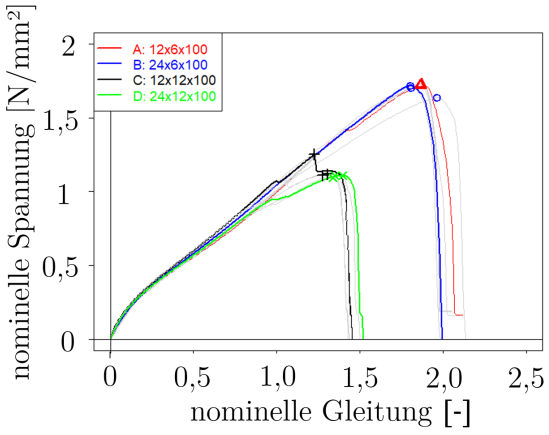


Abbildung A2: Ergebnisse der Scherexperimente an modifizierten H-Proben (Werkstoff SGB, verschiedene Geometrien, RT, 0,416 mm^{-1})

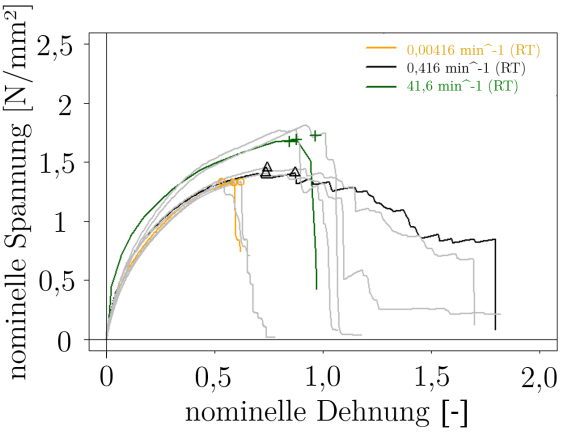


Abbildung A3: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben
(Werkstoff SGA, Geometrie: 12 mm x 6 mm x 100 mm, RT, verschiedene Nenndehnraten)

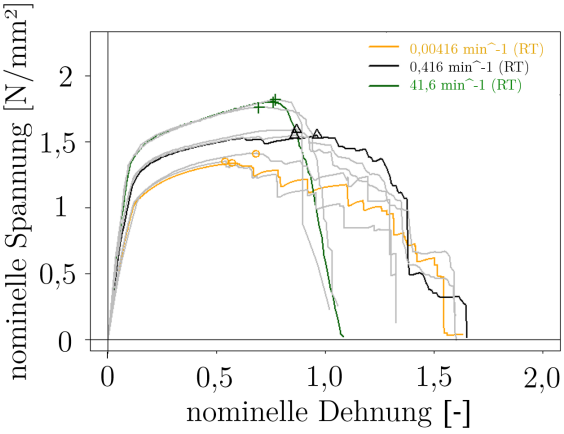


Abbildung A4: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben
(Werkstoff SGA, Geometrie: 24 mm x 6 mm x 100 mm, RT, verschiedene Nenndehnraten)

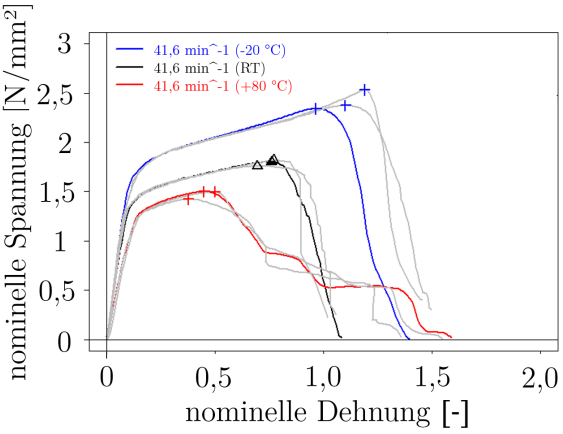


Abbildung A5: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben (Werkstoff SGA, Geometrie: 24 mm x 6 mm x 100 mm, verschiedene Temperaturen, 41,6 mm^{-1})

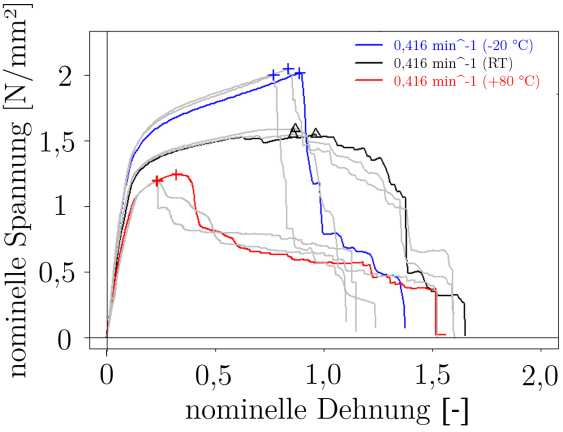


Abbildung A6: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben (Werkstoff SGA, Geometrie: 24 mm x 6 mm x 100 mm, verschiedene Temperaturen, 0,416 mm^{-1})

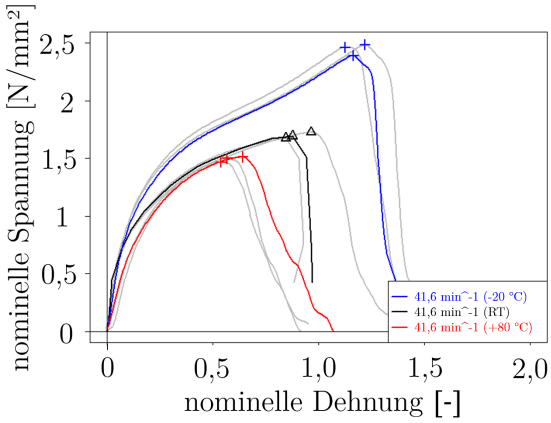


Abbildung A7: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben (Werkstoff SGA, Geometrie: 24 mm x 6 mm x 100 mm, verschiedene Temperaturen, 41,6 mm^{-1})

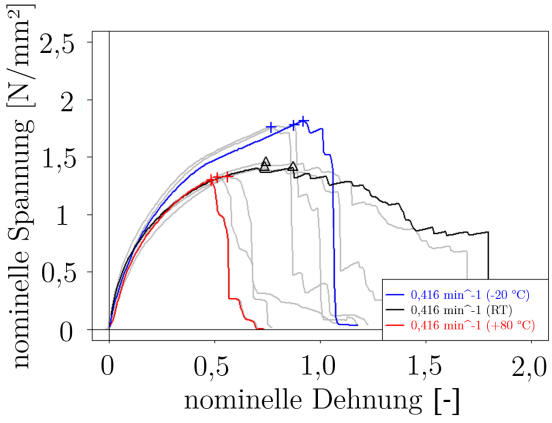


Abbildung A8: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben (Werkstoff SGA, Geometrie: 12 mm x 6 mm x 100 mm, verschiedene Temperaturen, 0,416 mm^{-1})

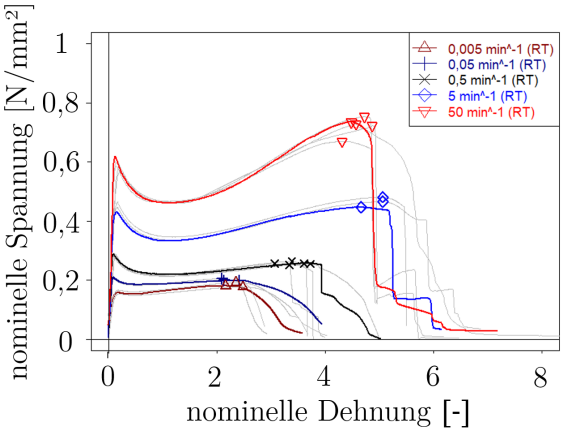


Abbildung A9: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben
(Werkstoff HKB, Geometrie: 25 mm x 2 mm x 100 mm, RT, verschiedene Nenndehnraten)

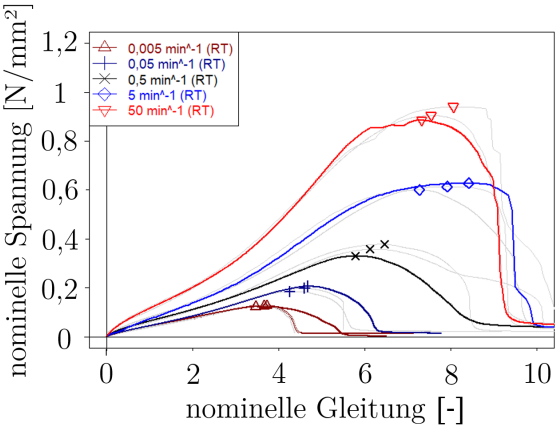


Abbildung A10: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben
(Werkstoff HKB, Geometrie: 25 mm x 2 mm x 100 mm, RT, verschiedene Nenngleitraten)

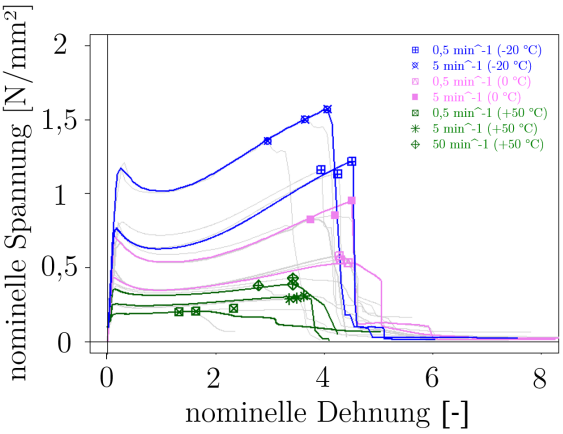


Abbildung A11: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben (Werkstoff HKB, Geometrie: 25 mm x 2 mm x 100 mm, verschiedene Temperaturen und Nenndehnraten)

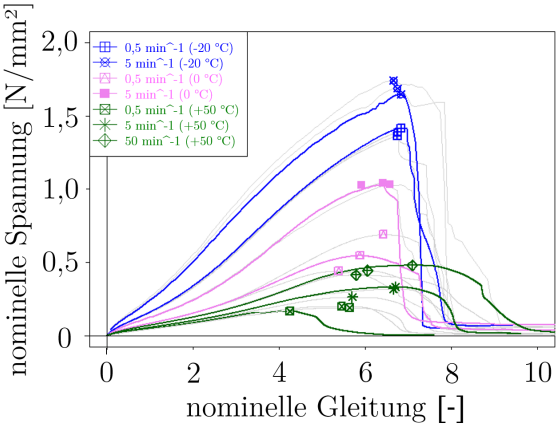


Abbildung A12: Ergebnisse der Zugexperimente an modifizierten H-Proben (Werkstoff HKB, Geometrie: 25 mm x 2 mm x 100 mm, verschiedene Temperaturen und Nenngleitraten)

Datenbasis Stundenwerte Kapitel 4

Bezeichnung Wetterstation	Messzeitraum	Stationshöhe
[-]	[-]	[m NHN]
München	17.05.1992 - 31.12.2014	446
Berlin	01.01.1951 - 31.12.2014	48
Essen-Bredeney	01.01.1951 - 31.12.2014	150
Bremerhaven	01.01.1949 - 31.12.2014	7
Stuttgart-Echterdingen	01.01.1988 - 31.12.2013	371
Frankfurt/Main	01.01.1981 - 31.12.2014	100
Jena	08.01.1991 - 31.12.2014	155
Karlsruhe	01.01.1948 - 02.11.2008	112
Freiburg	01.01.1951 - 31.12.2014	236
Nürnberg	01.01.1951 - 31.12.2014	314
Hamburg	01.01.1949 - 31.12.2014	11
Greifswald	01.01.1978 - 31.12.2014	2
Garmisch-Partenkirchen	01.01.1948 - 31.12.2014	719
Dresden	01.04.2006 - 31.12.2014	114
Hannover	01.01.1949 - 31.12.2014	55
Kassel	01.01.1948 - 31.10.2014	237
Helgoland	01.05.1952 - 31.12.2014	4

Tabelle A1: Stationsdaten der untersuchten Standorte (Stundenwerte Lufttemperatur) (204)

Abbildungsverzeichnis

1.1 Schema verschiedener Konstruktionsvarianten linienförmiger Klebverbindungen (Quelle: eigene Zeichnungen) 1
1.2 Anwendungsbeispiele für Klebverbindungen im konstruktiven Glasbau (Quelle: eigene Aufnahmen) 2
1.3 Schematischer Aufbau der Arbeit (Quelle: eigene Darstellung) 3
2.1 Anwendungsbeispiele für Klebverbindungen aus dem Ingenieurbau . . . 8
2.2 SG-Anwendung am Haus der barmherzigen Schwestern, München (Quelle: Alexander Lorenz) 9
2.3 Schematische Darstellung der chemischen Formel für Silikone (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (199)) 10
2.4 Modellvorstellung des Aufbaus einer Klebschicht (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (139)) 11
2.5 schematischer Aufbau verschiedener Kunststoffe (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (147)) 12
2.6 schematische Darstellung der Aggregatszustände eines amorphen unvernetzten Polymers (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (77)) 14
2.7 Veränderung des Bruchbildes eines Kopfzugprobe infolge der Erhöhung der Testgeschwindigkeit (links: v_t = 5 mm/min, rechts: v_t = 3 m/s, Klebstoff DC993) (Quelle: eigene Aufnahmen) 16
2.8 schematische Darstellung des ZTV-Prinzips (Quelle: eigene Darstellung) . 17
2.9 schematische Darstellung der Auswirkung des Mullins-Effektes in einem uniaxialen Zugexperiment (Quelle: eigene Darstellung) 21
2.10 Kriechen (Quelle: eigene Darstellung) 27
2.11 Relaxation (Quelle: eigene Darstellung) 28
2.12 Feder- und Dämpfer-Elemente (Quelle: eigene Darstellung) 29
2.13 Maxwell-Element (Quelle: eigene Darstellung) 29
2.14 Aufbau und Wirkprinzip des generalisierten Maxwell-Elements (Quelle: eigene Darstellungen) 31
2.15 Formen der Beanspruchung von Klebverbindungen (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (84)) 35

2.16 schematische Darstellung des Versagensmechanismus von Elastomerwerkstoffen (Quelle: eigene Darstellung) 38
2.17 schematische Darstellung des Eintretens von Kavitation (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (154)) 39
2.18 Schema der Behandlung klimatischer Größen (Quelle: eigene Darstellung) 45
2.19 Schema der Sicherheitskonzepte nach ETAG 002 sowie Eurocode (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (206)) 46
3.1 Inhalt des Kapitels (Quelle: eigene Darstellung) 61
3.2 Ersatzlastbild für den Böenverlauf (Quelle: eigene Darstellungen) 64
3.3 Schematische Darstellung der Sensoranordnung sowie der Abmessungen (Quelle: eigene Darstellungen) 66
3.4 Schema der Fertigung der Halter mit eingeklebten Sensoren (Quelle: eigene Darstellung) 67
3.5 Messaufbauten zur Messung der Temperatur (Quelle: eigene Aufnahmen und Darstellungen) 68
3.6 Boxplot-Darstellung der gemessenen Temperaturen am Messpunkt Glas, Messpunkt Klebschicht sowie am Messpunkt Halter in Abhängigkeit von der Ausrichtung (Standort München: geographischer Breitengrad 48,14°; geographischer Höhengrad 11,56°) (Quelle: eigene Darstellung) 69
3.7 Boxplot-Darstellung der gemessenen Temperaturen in der Klebschicht in Abhängigkeit der Beschichtung (Quelle: eigene Darstellung) 70
3.8 Gemessene Temperaturen an den Messstellen Glas, Klebschicht, Halter (UK) und Luft (Sommerperiode) 72
3.9 Differenz der Temperatur an den drei Messstellen Glas, Klebschicht und Halter (UK) gegenüber dem Referenzwert Lufttemperatur nach Gleichung 3.6 (Sommerperiode) 73
3.10 Verlauf der zu Abbildung 3.8 gehörigen Temperaturänderungsrate auf Basis von Gleichung 3.5 (Sommerperiode) 74
3.11 Abgleich der gemessenen Temperaturen in der Klebschicht und DWD-Daten des Niederschlags sowie der Windgeschwindigkeit während eines Sommergewitters am 25.06.2016 (Datenbasis: eigene Messung und DWD-Daten (204)) 75
3.12 Gemessene Temperaturen im Verschattungsszenario am 3.8.2016 76
3.13 Verlauf der zu Abbildung 3.12 gehörigen Temperaturänderungsrate im Verschattungsszenario am 3.8.2016 77
3.14 Gemessene Temperaturen an den Messstellen Glas, Klebschicht, Halter (UK) und Luft (Winterperiode mit Bewölkung) 78

3.15 Verlauf der zu Abbildung 3.14 gehörigen Temperaturänderungsrate auf Basis von Gleichung 3.5 (Winterperiode mit Bewölkung) . . . 79
3.16 Differenz der Temperatur an den drei Messstellen Glas, Klebschicht und Halter gegenüber dem Referenzwert Lufttemperatur nach Gleichung 3.6 (Winterperiode mit Bewölkung) . . . 80
3.17 Gemessene Temperaturen an den Messstellen Glas, Klebschicht, Halter (UK) und Luft (Winterperiode mit Sonnenschein) . . . 81
3.18 Verlauf der zu Abbildung 3.17 gehörigen Temperaturänderungsrate auf Basis von Gleichung 3.5 (Winterperiode mit Sonnenschein) . . . 82
3.19 Differenz der Temperatur an den drei Messstellen Glas, Klebschicht und Halter (UK) gegenüber dem Referenzwert Lufttemperatur (tiefe Temperaturen mit Sonnenschein) nach Gleichung 3.6 (Winterperiode mit Sonnenschein) . . . 83
3.20 Darstellung der untersuchten Standorte (Quelle: eigene Darstellung) . . . 84
3.21 Schematische Darstellung des Prinzips der Folgezählung anhand von Messwerten und der jeweiligen Zählerwerte dreier unterschiedlicher Klassengrenzen (Quelle: eigene Darstellung) . . . 86
3.22 Jahresgang der Minimal-, Maximal- und der Mittelwerte der Lufttemperatur Berlin-Tempelhof (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) . . . 87
3.23 Standortabhängige Verteilung der Lufttemperatur (Mittelungsintervall Stunde, Datenbasis DWD) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) . . . 88
3.24 Jahresgang der maximalen und minimalen Änderungen der Lufttemperatur (Mittelungsintervall Stunde, Standort Berlin-Tempelhof) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) . . . 91
3.25 Darstellung der ermittelten Klassenhäufigkeit ausgewählter Klassen am Beispiel Berlin-Tempelhof (Tagesmittelwerte) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) . . . 93
3.26 Wirkungsdauerkollektiv für Lufttemperaturen (Tagesmittelwerte, Berlin-Tempelhof) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) . . . 94
3.27 Wirkungsdauerkollektiv für die maximale konsekutive Überschreitung von Lufttemperaturen an den untersuchten Standorten in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) . . . 95
3.28 Luftdruckverteilung für verschiedene Standorte in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) . . . 97

3.29 Ermittelter Jahresgang der minimalen und maximalen Werte der Luftdruckabweichung (Standort: Berlin-Tempelhof, Tagesmittelwerte) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 99
3.30 Ermittelte Jahresextremwerte der Winter- und Sommerperioden nach Tabelle 3.12
(Standort: Berlin-Tempelhof, Tagesmittelwerte)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 100
3.31 Wirkungsdauerkollektiv für die maximale konsekutive Überschreitung von Luftdruckabweichungen (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 103
3.32 Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit für verschiedene Standorte in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 104
3.33 Jahresgang minimaler, mittlerer und maximaler relativer Luftfeuchtigkeiten (Tagesmittelwerte, Berlin-Tempelhof) (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 105
3.34 Wirkungsdauerkollektiv für die maximale konsekutive Überschreitungsandauer von Luftfeuchtigkeitsklassen für verschiedene Standorte in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 106
3.35 Darstellung der Winkelbeziehungen (Quelle: eigene Darstellung) 110
3.36 Schematische Darstellung der Sonnenbahn zur Sommer- und Wintersonnenwende (Quelle: eigene Darstellung) 111
3.37 Schema der Nachweisführung (Quelle: eigene Darstellung) 112
3.44 Ergebnisse der berechneten Bauteiltemperatur im Jahresgang mit den berechneten mittleren Bauteiltemperaturen aus Tabelle 3.19 für unterschiedliche Ausrichtungen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204)) 116
3.38 Jahresgang minimaler, mittlerer sowie maximaler Globalstrahlung (Standort: Weihenstephan)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 122
3.39 Jahresgang minimaler, mittlerer sowie maximaler Diffusstrahlung (Standort: Weihenstephan)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 122
3.40 Abgleich der bauphysikalischen Simulation mit den experimentell ermittelten Bauteiltemperaturen in der Freiluftmessung an einem bewölkten Tag (14.04.2016)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204)) 123

3.41 Abgleich der bauphysikalischen Simulation mit den experimentell ermittelten Bauteiltemperaturen in der Freiluftmessung an einem sonnigen Tag (24.06.2016)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204)) 123
3.42 Verlauf der simulierten Modelltemperatur am 179. Tag des Modelljahres für verschiedene Scheibenausrichtungen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 124
3.43 Verlauf der simulierten Modelltemperatur am 352. Tag des Modelljahres für verschiedene Scheibenausrichtungen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204)) 124
3.45 Wirkungsdauerkollektiv für die maximale konsekutive Überschreitung von Temperaturstufen nach Gleichung 3.13 für verschiedene Ausrichtungen (Simulation Analogiemodell)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis Simulation: DWD (204)) 125
3.46 Schema einer dauerhaften Beanspruchung auf eine Klebfuge infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten α der Fügepartner (Quelle: eigene Darstellung) 125
3.47 Korrelation Tagesspitzenböe mit mittlerer Tageslufttemperatur (oben) sowie der Tagessumme der Globalstrahlungseinwirkung (unten)
(Standort München Stadt, 1972-2013)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 126
3.48 Korrelation Luftdruckabweichung mit mittlerer Tageslufttemperatur sowie der Tagessumme der Globalstrahlungseinwirkung
(Standort München Stadt, 1972-2013)
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis: DWD (204)) 127
4.1 Schematische Darstellung des Inhalts des Kapitels (Quelle: eigene Darstellung) 129
4.2 Prinzip einer DMTA-Messung (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an (117)) 133
4.3 Schema der Probeneinspannung und Nennabmessungen der Proben (Quelle: eigene Darstellung, Bildquelle: IFAM (187)) 134
4.4 Ergebnis der DMTA (Werkstoff SGA) 135
4.5 Ergebnis der DMTA (Werkstoff SGB) 135
4.6 Ergebnis der DMTA (Werkstoff HKB) 136
4.7 Zugprobe (Quelle: eigene Darstellung, Bildquelle: IFAM (187)) 136
4.8 Schematische Darstellung der Zugprobe (Quelle: eigene Darstellung) . . 137
4.9 Kurvenverläufe und Parameter der Zugexperimente (Werkstoff SGA) 139

4.10 Kurvenverläufe und Parameter der Zugexperimente (Werkstoff SGB) . . . 140
4.11 Kurvenverläufe und Parameter der Zugexperimente (Werkstoff HKB) . . . 141
4.12 Bruchspannung und Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Testgeschwindigkeit sowie verschiedenen Entnahmezeitpunkten der Alterungsauslagerung (SGA) . . . 142
4.13 Bruchspannung und Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Testgeschwindigkeit sowie verschiedenen Entnahmezeitpunkten der Alterungsauslagerung (SGB) . . . 143
4.14 Bruchspannung und Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Testgeschwindigkeit sowie verschiedenen Entnahmezeitpunkten der Alterungsauslagerung (HKB) . . . 143
4.15 Aufbau Zugscherexperiment (Quelle: eigene Darstellung, Bildquelle: IFAM (187)) . . . 144
4.16 Kurvenverläufe und Parameter der Zugscherexperimente (SGA) . . . 147
4.17 Kurvenverläufe und Parameter der Zugscherexperimente (SGB) . . . 148
4.18 Kurvenverläufe und Parameter der Zugscherexperimente (HKB) . . . 149
4.19 Bruchspannung und Bruchgleitung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Temperaturstufen in der Wärmelagerung und der Wasserlagerung (Werkstoff SGA) . . . 151
4.20 Bruchspannung und Bruchgleitung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Temperaturstufen in der Wärmelagerung und der Wasserlagerung (Werkstoff SGB) . . . 152
4.21 Bruchspannung und Bruchgleitung in Abhängigkeit unterschiedlicher Konditionierungsdauern in der Wärmelagerung und der Wasserlagerung (Werkstoff SGB) . . . 152
4.22 Foto der verwendeten Zugscherprobe (Quelle: eigene Aufnahme) . . . 153
4.23 Zeichnung der Zugscherprobe (Quelle: eigene Zeichnung) . . . 154
4.24 Ablauf des Zugscherexperimentes (Quelle: eigene Darstellung) . . . 154
4.25 Spannungs-Gleitungs-Diagramm (links) und $\epsilon_{n,yy}$-Gleitungs-Diagramm (rechts) (Quelle: eigene Darstellung) . . . 155
4.26 Darstellung der Probekörpertypen (Bildquelle: (187)) . . . 158
4.27 Darstellung der T-Profile (Quelle: eigene Darstellung) . . . 159
4.28 Fertigung der Probekörper mit Negativformen (Quelle: eigene Aufnahmen) 160
4.29 Anlieferungszustand (links) und Applikationsversuche mit Aluminiumprofilen (Mitte und rechts) (Quelle: eigene Aufnahmen) . . . 161
4.30 Schematische Darstellung der Einstellung der Testvorrichtung für den Modus Zug sowie Scherung (Quelle: eigene Darstellung) . . . 162

4.31 Spannung-Dehnung-Diagramm der mod. H-Probe (SGA, 24 mm x 6 mm x 100 mm) bei unterschiedlichen Regelungsvarianten nach Tabelle 4.20 164
4.32 Zeitliche Veränderung der Nenndehnrate bei unterschiedlichen Regelungsvarianten nach Tabelle 4.20 165
4.33 Ergebnis der Scherexperimente an modifizierten H-Proben (SGB) 166
4.34 Ergebnis der Zugexperimente an modifizierten H-Proben (SGB) 168
4.35 Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 12x6x100) 170
4.36 Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 24x6x100) 171
4.37 Ergebnis der Zugexperimente (SGB, Geometrie 12x6x100) 172
4.38 Ergebnis der Zugexperimente nach Wasserlagerung ohne Rücktrocknung (SGA, Geometrie 24x6x100) 174
4.39 Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 24x6x100) 177
4.40 Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 12x6x100) 177
4.41 Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 24x6x100) 178
4.42 Ergebnis der Zugexperimente (SGA, Geometrie 12x6x100) 179
4.43 Ergebnis der Zugexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100) 181
4.44 Ergebnis der Scherexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100) 182
4.45 Ergebnis der Zugexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100) 184
4.46 Ergebnis der Scherexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100) 186
4.47 Darstellung der Versagensvorgänge im Beanspruchungsmodus Scherung und Querzug aus dem Projekt P 1052 (187) (Quelle: eigene Darstellung) 188
4.48 Exemplarische Bruchfläche bei T = RT und Nenngleitrate: 0,416 mm^{-1} (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Werkstoff SGA, oben: Seitenansicht, unten: Draufsicht) (Quelle: eigene Aufnahme) 189
4.49 Exemplarische Bruchfläche bei T = RT und Nenngleitrate: 0,416 mm^{-1} (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Werkstoff SGB) (Quelle: eigene Aufnahme) 189
4.50 Spannungs-Gleitungs-Verläufe in Abhängigkeit von unterschiedlichen Probenformen (Werkstoff SGB) (Quelle: eigene Darstellung) 190
4.51 Spannungs-Dehnungs-Verlauf mit Zuordnung von Deformationszuständen (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Werkstoff SGA, T = RT und Nenndehnrate: 0,416 mm^{-1}) (Quelle: eigene Darstellung) 191

4.52 Vergleich der dehnratenabhängigen Referenzversuche mit den Experimenten an Probekörpern bei verschiedenen Temperaturen . . . 193
4.53 Exemplarische Bruchfläche bei T = RT und Nenndehnrate: 0,416 mm^{-1} (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Zug, Werkstoff SGA) (Quelle: eigene Aufnahme) . . . 194
4.54 Exemplarische Bruchfläche bei T = -20 $°C$ und Nenndehnrate: 41,6 mm^{-1} (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Zug, Werkstoff SGA)
(Quelle: eigene Aufnahme) . . . 194
4.55 Exemplarische Bruchfläche bei T = +80 $°C$ und Nenndehnrate: 0,416 mm^{-1} (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Zug, Werkstoff SGA)
(Quelle: eigene Aufnahme) . . . 194
4.56 Vergleich der ratenabhängigen Referenzversuche mit den Experimenten an Probekörpern ohne Rücktrocknung aus der Alterungsauslagerung . . . 195
4.57 Exemplarische Bruchfläche bei T = RT und Nenndehnrate: 0,416 mm^{-1} nach 42 Tagen Wasserlagerung bei T = +45 $°C$ ohne Rücktrocknung (Geometrie 24 mm x 6 mm x 100 mm, Zug, Werkstoff SGA) (Quelle: eigene Aufnahme) . . . 195
4.58 Bruchflächen von HKB-Probekörpern in Abhängigkeit von verschiedenen Testtemperaturen (Quelle: eigene Aufnahme) . . . 196
4.59 Vergleich verschiedener Punkte der Arbeitslinie in Abhängigkeit von der Nenndehnrate (Werkstoff HKB, Scherung und Zug) . . . 199
5.1 Inhalt des Kapitels
(Quelle: eigene Darstellung) . . . 201
5.2 Ergebnis Zugexperiment und zugehörige Modelle in Abhängigkeit von verschiedenen kalibrierten Dehnungsbereichen . . . 205
5.3 Abgleich der analytisch ermittelten Kenndaten mit den experimentellen Ergebnissen (modifizierte H-Probe, Scherung, Werkstoff SGB) . . . 209
5.4 Abgleich der analytisch ermittelten Kenndaten mit den experimentellen Ergebnissen (modifizierte H-Probe, Zug, Werkstoff SGB) . . . 209
5.5 Darstellung des Berechnungsmodells (Halbmodell) der simulierten Fugengeometrie 12 mm x 6 mm x 100 mm (links: Zug, rechts: Scherung)
(Quelle: eigene Darstellung) . . . 211

5.6 Abgleich von Simulation und Experiment (Zug, 12 mm x 6 mm x 100 mm) 216
5.7 Abgleich von Simulation und Experiment (Scherung, 12 mm x 6 mm x 100 mm) 216
5.8 Studie zum Einfluss der Netzfeinheit nach Tabelle 5.6 auf die Verteilung der Spannungsmehrachsigkeit (Zug, 12 mm x 6 mm x 100 mm) (Quelle: eigene Darstellung) 218
5.9 Darstellung des zur Anwendung kommenden Halbmodells und der untersuchten Belastungsrichtungen (Quelle: eigene Darstellung) 219
5.10 Vergleich der Verteilung der Spannungsmehrachsigkeit im Modus Scherung in Abhängigkeit der nominellen Gleitung (Quelle: eigene Darstellung) 220
5.11 Vergleich der Verteilung der Spannungsmehrachsigkeit im Modus Zug in Abhängigkeit der nominellen Dehnung (Quelle: eigene Darstellung) 220
5.12 Geometrische Parameter der Fuge (Quelle: eigene Darstellung nach (99)) 222
5.13 Auswertung von Gleichung 5.9 für verschiedene Geometrien in Abhängigkeit von der Querdehnzahl (Quelle: eigene Darstellung) 225
5.14 Darstellung der für eine Querdehnzahl ν = 0,495 berechneten effektiven Steifigkeiten (gestrichelte Linien) und der experimentellen Ergebnisse (durchgezogene Linien) (Quelle: eigene Darstellung) 226
5.15 Hauptspannungsrichtung und Rissbildung (Quelle: eigene Darstellung nach (65)) 229
5.16 Schema der Kameraanordnung zur Bruchwinkelmessung (Quelle: eigene Darstellung) 230
5.17 Schema der Winkelbeziehungen zur Berechnung der Bruchgleitung (Quelle: eigene Darstellung) 232
5.18 Bruchebenen SGA Scherexperiment (Quelle: eigene Darstellung) 233
5.19 Bruchebenen HKB Scherexperiment (Quelle: eigene Darstellung) 233
5.20 Darstellung der analytischen Berechnung des Hauptdehnungs- sowie des Hauptspannungsverlaufs im Vergleich zur Nenndehnung als Funktion der Schergleitung (Quelle: eigene Darstellung) 235
5.21 Vergleich der berechneten Bruchdehnung mit Ergebnissen der Zugscherexperimente (Werkstoff SGA) 236

5.22 Vergleich der berechneten Bruchdehnung mit Ergebnissen der Zugscherexperimente (Werkstoff SGB) 237
5.23 Vergleich der berechneten Bruchdehnung mit Ergebnissen der Zugscherexperimente (Werkstoff HKB) 237
5.24 Randbedingungen der Modelle (Quelle: eigene Darstellung) 239
5.25 Verteilung der numerisch ermittelten 1. Hauptdehnung in verschiedenen Scherproben bei identischer Nenngleitung $\tan\gamma = 1$ (Quelle: eigene Darstellung) 240
5.26 Darstellung der Fugenbeanspruchung in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung (Quelle: eigene Darstellung) 242
5.27 Darstellung des Modells sowie der aufgebrachten Deformationsgrößen (Quelle: eigene Darstellung) 244
5.28 Studie zum Einfluss der Netzfeinheit auf die Verteilung des hydrostatischen Drucks (Simulation Zug, Halbmodell, u_z = 2,0 mm) (Quelle: eigene Darstellung) 245
5.29 Studie zum Einfluss der Netzfeinheit auf die Verteilung der 1. Hauptdehnung (Simulation Zug, Halbmodell, u_z = 2,0 mm) (Quelle: eigene Darstellung) 245
5.30 Darstellung der numerisch ermittelten Fugenbeanspruchung in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung bei konstanter Fügepartnerverschiebung (Quelle: eigene Darstellung) 246
5.31 Auswertung Funktion 5.21, Randbedingung: modifizierte H-Probe (25 mm x 2 mm x 100 mm) (Quelle: eigene Darstellung) 249
5.32 Auswertung Funktion 5.21, Randbedingung: kontinuierliche Fuge (25 mm x 2 mm x 10000 mm ($\approx \infty$) (Quelle: eigene Darstellung) 249
5.33 Gleichung 5.26 als Funktion der Querdehnzahl in Abhängigkeit von verschiedenen Geometrien mit Darstellung eines Grenzwertes (ν = 0,5) (Quelle: eigene Darstellung) 251
5.34 Gleichung 5.26 als Funktion des Shape-Faktors (Quelle: eigene Darstellung) 253
5.35 Abgleich Modellprognose - Experimente SGB (Zug, 12x6x100, Raumtemperatur, verschiedenen Nenndehnraten) 255

5.36 Abgleich Modellprognose - Experimente SGB (Zug, verschiedene Geometrien, Raumtemperatur, konstante Nenndehnrate $0,416min^{-}1$) 255
5.37 Abgleich Modellprognose - Experimente SGA (Zug, 12x6x100, verschiedene Temperaturen und Nenndehnraten) 256
5.38 Abgleich Modellprognose - Experimente SGA (Zug, 24x6x100, verschiedene Temperaturen und Nenndehnraten) 256
5.39 Abgleich Modellprognose - Experimente SGA (Zug, 24x6x100, nach Feuchtelagerung mit verschiedenen Nenndehnraten) 257
5.40 Abgleich Modellprognose - Experimente HKB (Zug, 24x2x100, verschiedene Nenndehnraten) 257
5.41 Abgleich der analytisch ermittelten Kenndaten mit experimentellen Ergebnissen (Zug, Werkstoff SGA, S = 1,613, verschiedene Nenndehnraten) 260
5.42 Darstellung des betrachteten Bereichs der Nennspannungsmaxima in Spannung-Dehnung-Zeit-Darstellung (Werkstoff HKB, Modus Zug) 263
5.43 Darstellung des betrachteten Bereichs der Nennspannungsmaxima in Spannung-Dehnung-Temperatur-Darstellung (Werkstoff HKB, Modus Zug) 263
5.44 Masterkurve für die Zugexperimente (T = 296 K) 264
5.45 Masterkurve für die Scherspannung τ (tan γ = 2) (T = 296 K) 265
5.46 Darstellung des verwendeten Modells (Quelle: eigene Darstellung) 269
5.47 Masterkurven des Speicher- und Verlustmoduls (Messwerte und kalibriertes Modell) 272
5.48 Darstellung der Simulationsergebnisse unter Anwendung der Funktion G(t) und verschiedener konstanter Werte für K 273
5.49 Methodische Vorgehensweise bei der Ermittlung eines Kompressionsmoduls zur Abbildung der zeitabhängigen Volumenrelaxation 275
5.50 Prony-Reihe für den Verlauf des operativen Kompressionsmoduls K(t) aus dem indirekten Verfahren (rote Linie) sowie der Umrechnung unter Annahme einer konstanten Querdehnzahl (schwarz gestrichelte Linie) 276
5.51 Schema der Simulation einer Windsogwirkung auf eine Klebfuge (Quelle: eigene Darstellung) 279
5.52 numerisch ermittelte Ergebnisse 282
5.53 Abgleich der Modellprognose (Quelle: eigene Darstellung) 283

5.54 Schema der Auswirkung der Lastwirkungsdauer auf das Erreichen verzerrungsbasierter Grenzen (Quelle: eigene Darstellung) 286
5.55 Masterkurve für Maximum querdehnbehinderter Zug (T = 296 K) (Quelle: eigene Darstellung) 288

Tabellenverzeichnis

2.1 klimatische Einwirkung und ihre Definition nach Eurocode 47
2.2 Windzonen nach DIN EN 1991-1-4 48
2.3 Regelfälle für extremale Temperaturen 49
2.4 operative Werte des Luftdruckes nach DIN 18008 (48) 50
2.5 Auswahl normativer Lastwirkungen 51
2.6 KLED nach (58) 52
2.7 Werkstoffparameter nach Herstellerangaben der Firma Dow Corning nach (205) 57
3.1 Messaufbauten und Neigungswinkel bezogen auf die Horizontale 66
3.2 Verwendete Scheibentypen 67
3.3 Verwendete Klimaelemente des DWD zur Analyse der Wirkungsdauer . . 79
3.4 Stationsdaten der untersuchten Standorte (Klimadaten Tageswerte) (Quelle: DWD (204)) 85
3.5 Schema der Datenorganisation sowie der Ermittlung der Dauer am Beispiel einer Klassengrenze von $x_i > 2$ 86
3.6 Schema der Datenorganisation für die Stundenmittelwerte 87
3.7 Standortabhängig ermittelte Parameter 88
3.8 Ermittelte Extremwerte der Lufttemperatur für verschiedene Standorte (Stundenmittelwerte) (Datenbasis: DWD (204)) 89
3.9 Schema der Datenorganisation für den Jahresgang 90
3.10 Klasseneinteilung zur Analyse der konsekutiven Andauer von Lufttemperaturen 92
3.11 Konsekutive Über- und Unterschreitungstage ausgewählter Klassen für verschiedene Standorte in Deutschland (Tagesmittelwerte, Datenbasis: DWD (204)) 96
3.12 Einteilung in Sommer- und Wintermonate 98
3.13 Periodenextremwerte der Luftdruckabweichung Δp_m (Tagesmittelwerte) für verschiedene Standorte in Deutschland (Datenbasis: DWD (204)) 101
3.14 Einteilung der Klassengrenzen zur Analyse der konsekutiven Überschreitung von Luftdruckabweichungen 102

3.15 Klasseneinteilung zur Analyse der konsekutiven Wirkungsdauer von Klassen der relativen Luftfeuchtigkeit . . . 105
3.16 Schema der Datenorganisation für die Bestimmung von Modelljahren der Bestrahlungsstärke . . . 113
3.17 simulierte Scheibenausrichtungen . . . 114
3.18 Modellparameter des Analogiemodells . . . 115
3.19 Ergebnisse der Bauteiltemperaturermittlung in Abhängigkeit von der Ausrichtung . . . 116
3.20 Mindestwerte der Lufttemperatur in Arbeitsräumen für stehende Körperhaltung nach (82) . . . 119
4.1 Mechanische Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe nach den europäisch-technischen Zulassungen ((69) und (72)) . . . 131
4.2 Versuchsmatrix der DMTA-Untersuchungen . . . 134
4.3 Geometrische Abmessungen der Zugproben . . . 137
4.4 Traversengeschwindigkeiten der Zugexperimente und daraus resultierende Nenndehnraten . . . 138
4.5 Testprogramm der Zugexperimente . . . 138
4.6 Ergebnisse Zugexperimente SGA . . . 140
4.7 Ergebnisse Zugexperimente SGB . . . 140
4.8 Ergebnisse Zugexperimente HKB . . . 141
4.9 Testprogramm der Zugexperimente zur Auslagerungsart . . . 142
4.10 Geometrische Abmessungen der Zugscherproben . . . 144
4.11 Reinigung und Vorbehandlung der verwendeten Substrate (187) . . . 146
4.12 Testprogramm zur Analyse der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Verbundeigenschaften . . . 146
4.13 Ergebnisse Zugversuche SGA . . . 148
4.14 Ergebnisse Zugscherexperimente (SGB) . . . 148
4.15 Ergebnisse Zugscherexperimente (HKB) . . . 149
4.16 Testprogramm der Zugscherexperimente zum Einfluss der Auslagerungsart (Wasserlagerung und Wärmelagerung) . . . 150
4.17 Testprogramm der Zugscherexperimente zum Einfluss der Auslagerungsdauer und -temperatur (Wasserlagerung) . . . 150
4.18 Reinigung und Vorbehandlung der verwendeten Substrate (187) . . . 161
4.19 Darstellung der Nenndehnraten in Abhängigkeit von den Probekörpertypen 163
4.20 Darstellung der getesteten Regelungsvarianten . . . 164
4.21 Testprogramm der quasistatischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens verschiedener Geometrien . . . 165
4.22 Ergebnisse der Scherexperimente an modifizierten H-Proben (SGB) . . . 167
4.23 Ergebnisse Zugversuche modifizierte H-Proben (SGB) . . . 168
4.24 Darstellung der drei getesteten Nenndehnraten . . . 169

4.25 Testprogramm der quasistatischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens unter verschiedenen Nenndehnraten bei Raumtemperatur . . . 169
4.26 Versuchsergebnisse (SGA, Geometrie 12x6x100) . . . 170
4.27 Versuchsergebnisse (SGA, Geometrie 24x6x100) . . . 171
4.28 Versuchsergebnisse (SGB, Geometrie 12x6x100) . . . 172
4.29 Testprogramm der quasi-statischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens nach Wasserlagerung für 42 Tage bei +45 $°C$ ohne Rückkonditionierung . . . 173
4.30 Ergebnisse nach Wasserlagerung ohne Rücktrocknung . . . 174
4.31 Testprogramm der quasi-statischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens unter verschiedenen Nenndehnraten bei hohen (T = +80 $°C$) und tiefen Temperaturen (T = -20 $°C$) . . . 175
4.32 Ergebnisse bei hohen und tiefen Temperaturen (SGA, Geometrie 24x6x100, Nenndehnrate: 0,416 min^{-1}) . . . 177
4.33 Ergebnisse bei hohen und tiefen Temperaturen (SGA, Geometrie 12x6x100, Nenndehnrate: 0,416 min^{-1}) . . . 178
4.34 Ergebnisse bei hohen und tiefen Temperaturen (SGA, Geometrie 24x6x100, Nenndehnrate: 41,6 min^{-1}) . . . 178
4.35 Ergebnisse bei hohen und tiefen Temperaturen (SGA, Geometrie 12x6x100, Nenndehnrate: 41,6 min^{-1}) . . . 179
4.36 Darstellung der fünf getesteten Nenndehnraten . . . 180
4.37 Testprogramm der quasi-statischen Experimente zur Analyse des Tragverhaltens unter verschiedenen Nenndehnraten bei Raumtemperatur in Scherung und Zug . . . 181
4.38 Ergebnisse Zugexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100) . . . 182
4.39 Ergebnisse Scherexperimente (HKB, Geometrie 25x2x100) . . . 183
4.40 Testprogramm der Experimente bei verschiedenen Temperaturen und Nenndehnraten (Modus: Zug) . . . 183
4.41 Testprogramm der Experimente bei verschiedenen Temperaturen und Nenndehnraten (Modus: Scherung) . . . 184
4.42 Ergebnisse Zugexperimente bei T = -20 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100) . 185
4.43 Ergebnisse Zugexperimente bei T = 0 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100) . . 185
4.44 Ergebnisse Zugexperimente bei T = +50 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100) 185
4.45 Ergebnisse Scherexperimente bei T = -20 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100) . . . 186
4.46 Ergebnisse Scherexperimente bei T = 0 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100) . 187
4.47 Ergebnisse Scherexperimente bei T = +50 $°C$ (HKB, Geometrie 25x2x100) . . . 187
5.1 idealisierte Randbedingungen . . . 203
5.2 Werkstoffparameter SGA . . . 205

5.3 Werkstoffparameter SGB 205
5.4 Berechnung von vergleichbaren Werkstoffparametern (isochore Verformung, ν = 0,5) 206
5.5 Darstellung der Modellparameter des Berechnungsmodells 212
5.6 Darstellung der Netzparameter für die Konvergenzstudie am Halbmodell der Geometrie 12 x 6 x 100 213
5.7 Tabelle der verwendeten Parametersätze (Werkstoff SGB) 214
5.8 Darstellung der simulierten Verzerrungszustände zur Analyse der internen Beanspruchungszustände für Zug und Scherung (12 mm x 6 mm x 100 mm) 218
5.9 Darstellung der berechneten Shape-Faktoren auf Basis von Gleichung 5.11 für die untersuchten Geometrien (Werkstoffe SGA, SGB und HKB) 224
5.10 Ergebnis der Winkelbestimmung 231
5.11 Bestimmung der Bruchgleitung aus der Bruchebenenmessung 232
5.12 Modellaufbau und Parameter der Simulation der Scherexperimente 238
5.13 Darstellung des Modellparameter des Berechnungsmodells 243
5.14 Geometrien und berechnete Grenzwerte nach Gleichung 5.26 252
5.15 Ergebnis der Ermittlung der Verschiebungsfaktoren nach Gleichung 2.3 in Abhängigkeit von verschiedenen Experimenten 266
5.16 Darstellung der simulierten Szenarien 280

Literaturverzeichnis

1 *Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume I Keyword User's Manual, LS-DYNA Version 971*, 2007.

2 *Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume II Material Models, LS-DYNA Version 971*, 2007.

3 Bucak Ö., Bues M., and Illguth M. Kleben im bauwesen. In *Tagungsband Münchener Stahlbautage, Hochschule München, München*, 2009.

4 Bucak Ö. and Geiß P. *Teiltransparente tragende Verbundbauteile aus Stahl und Glas*. Abschlussbericht aif projekt 15058 n, Forschungsvereinigung Stahlanwendung P740, 2009.

5 DIN EN 10088-1. Nichtrostende stähle - teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden stähle. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.

6 EN 13022-1. Glas im bauwesen – geklebte verglasungen – teil 1: Glasprodukte für structural-sealant-glazing (ssg-)glaskonstruktionen für einfachverglasungen und mehrfachverglasungen mit oder ohne abtragung des eigengewichtes. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.

7 DIN EN 572. Glas im bauwesen - basiserzeugnisse aus kalk-natronsilicatglas - teil 2: Floatglas. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

8 DIN 6701-3. Kleben von schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen - teil 3: Leitfaden zur konstruktion und nachweisführung von klebverbindungen im schienenfahrzeugbau. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015.

9 DIN EN ISO 6721-1. Kunststoffe - bestimmung dynamisch-mechanischer eigenschaften - teil 1: Allgemeine grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.

10 Christiano A. *Fracture by cavitation of model polyurethane elastomers*. Dissertation, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2009.

11 Dorfmann A. and Ogden R.W. A constitutive model for the mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber. *International Journal of Solids and Structures 41*, pages 1855–1878, 2004.

12 Gent A. and Meinecke E. Compression, bending, and shear of bonded rubber blocks. *Polymer Engineering and Science*, 10:48–53, 1970.

13 Grambow A. *Bestimmung der Materialparameter gefüllter Elastomere in Abhängigkeit von Zeit, Temperatur und Beanspruchungszustand*. Dissertation, RWTH Aachen - Fakultät für Maschinenwesen, 2002.

14 Hagl A. MSC/NASTRAN for Windows, innovativer Glasbau und eine Kirche. In *MSC Anwenderbericht News Dezember*, 2000.

15 Hagl A. Experimental and Numerical Analysis of Edge Seal Spacers of Insulated Glass Units for Structural Sealant Glazing Applications. *Proceedings Challenging Glass 3, TU Delft, Delft NL*, 2012.

16 Hagl A., Dieterich O., Wolf A., and Sitte A. Tensile Loading of Silicone Point Supports - Revisited. *Proceedings Challenging Glass 3, TU Delft, Delft NL*, 2012.

17 Hamdi A., Abdelaziz M., Hocine N.A., Heuillet P., and Benseddiq N. A fracture criterion of rubber-like materials under plane stress conditions. *Polymer Testing*, (25):994–1005, 2006.

18 Hamdi A., Guessasma S., and Abdelaziz M. Fracture of elastomers by cavitation. *Materials and Design*, 53:497–503, 2014.

19 Näßl A., Bues M., Bucak Ö., and Mensinger M. Aktuelle untersuchungen zum verhalten von verbundglas unter schneelasteinwirkung. *Stahlbau*, 81:197–202, 2012.

20 Panait A., Cossavella M., Delsahut G., Galéa J.-L., and Morcant K. Insulating glass units: the effects of seal stresses and deformations on durability and service life. *Proceedings Glass Performance Days, Tampere FI*, pages 827–831, 2007.

21 Scholz A. *Ein Beitrag zur Optimierung des Schwingungsverhaltens komplexer Rotorsysteme mit viskoelastischen Dämpfungselementen*. Dissertation, TU Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, 2011.

22 Wolf A. and Descamps P. Determination of poisson's ratio of silicone sealants from ultrasonic and tensile measurements. *ASTM Special Technical Publication*, pages 132–142, 2002.

23 Crocombe A.D. and Ashcroft I.A. Design of Adhesive Joints Under Humid Conditions. *Advanced Structured Materials*, 25:147–182, 2013.

24 Gent A.N. *Rubber Elasticity: Basic Concepts and Behavior*, chapter 1, pages 1–20. Science and Technology of Rubber. 1978.

25 Gent A.N. Cavitation in rubber: A cautionary tale. *Rubber Chemistry and Technology*, 63:49–53, 1990.

26 Gent A.N. *Engineering with Rubber*. Carl Hanser Verlag, 3. auflage edition, 2012.

27 Gent A.N. and Lindley P.B. Internal rupture of bonded rubber cylinders in tension. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 249, 1959.

28 Duncan B., Crocker L., Urquhart J., Arranz E., Mera R., and Broughton B. *Failure of flexible adhesive joints*. Project pajex 2: Flexible adhesives report no. 5, 2001.

29 Mohr B. *Zur Interaktion der Einflüsse aus Dauerstands- und Ermüdungsbeanspruchung im Ingenieurholzbau*. Dissertation, TU München Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2001.

30 Näser B., Kaliske M., and Mars W. Fatigue investigation of elastomeric structures. *Tire Science and Technology*, 38(3):194–212, 2010.

31 Townsend B., Ohanehi D., Dillard D., Austin S., Salmon F., and Gagnon D. Characterizing acrylic foam pressure sensitive adhesive tapes for structural glazing applications - part i: Dma and ramp-to-fail results. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31:639–649, 2011.

32 Westphal-Kai B. *Festigkeits – und Verformungsverhalten von Fugendichtstoffen im Kreuzfugenbereich*. Dissertation, TU Berlin, Fakultät VI, 2006.

33 Bieker C. *Methodenentwicklung zur Bestimmung des hygrothermomechanischen Langzeitverhaltens von strukturellen Klebverbindungen mit metallischen und mineralischen Untergründen*. Dissertation, Universität Kassel, Institut für Werkstofftechnik, 2006.

34 Schuler C. *Einfluss des Materialverhaltens von Polyvinylbutyral auf das Tragverhalten von Verbundsicherheitsglas in Abhängigkeit von Temperatur und Belastung*. Dissertation, TU München, 2004.

35 Schuler C. and Gräf H. Verbundtragverhalten von vsg. *Tagungsbandbeitrag Glas im konstruktiven Ingenieurbau, Hochschule München, München*, 2001.

36 Schuler C., Bues M., and Dix S. Realisierung eines gläsernen unterstandes unter anwendung der klebtechnik. *Glasbau*, 1:75–85, 2017.

37 Wrana C. *Polymerphysik - Eine physikalische Beschreibung von Elastomeren und ihren anwendungsrelevanten Eigenschaften*. Springer Spektrum, 2014.

38 ASTM C1401-14. Standard guide for structural sealant glazing, 2014.

39 White C.C., Hunston D.L., Tan K.T., Filliben J.J., Pintar A.L., and Schuenemann G. A Systematic Approach to the Study of Accelerated Weathering of Building Joint Sealants. *Journal of ASTM International*, 9(5), 2012.

40 Callewaert D., A. v. Hulle, Belis J.L.I.F., Bos F.P., Dispersyn J., and Bas O. The problem of a failure criterion for glass-metal adhesive bonds. *Proceedings of Glass Performance Days, Tampere FI*, pages 654–657, 2011.

41 Memhard D., Andrieux F., Sun D.-Z., Feucht M., Frank T., and Kolling S. Entwicklung und anwendung von ersatzmodellen für die modellierung von klebverbindungen unter crashbelastung. *4. LS-DYNA Anwenderforum*, 2005.

42 Richardson D., Anderson G., and Macon D. Evaluation of a Multi-Axial, Temperatur- and Time-Dependent Failure Model. *AIAA Journal*, 42(5):893–898, 2004.

43 Richardson D., Anderson G., and Macon D. Multi-axial loading failure criterion for isotropic, time-dependent materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24(3):211–217, 2004.

44 Symietz D. and Lutz A. *Strukturkleben im Fahrzeugbau*. Verlag Moderne Industrie, 2006.

45 Moreira D.C. and Nunes L.C.S. Comparison of simple and pure shear for an incompressible isotropic hyperelastic material under large deformation. *Polymer Testing*, 32:240–248, 2012.

46 Jones D.I.G. *Handbook of Viscoelastic Vibration Damping*. John Wiley & Sons Ltd., 2001.

47 DIN 18008-1. Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.

48 DIN 18008-2. Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.

49 DIN 50035. Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien - Polymere Werkstoffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

50 DIN EN 1465. Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.

51 DIN EN 14869-2. Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeteile. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.

52 DIN EN 1990. Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2002.

53 DIN EN 1991-1-1. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.

54 DIN EN 1991-1-3. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen - Schneelasten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.

55 DIN EN 1991-1-4. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005.

56 DIN EN 1991-1-4. Nationaler Anhang . Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.

57 DIN EN 1991-1-5. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Temperatureinwirkungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.

58 DIN EN 1995-1-1. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Holzbau. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.

59 DIN EN 1995-1-1. Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013.

60 DIN EN 60584-2. Thermopaare - Teil 2: Grenzabweichungen der Thermospannungen (zurückgezogen). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994.

61 DIN EN 923. Klebstoffe - Benennungen und Definitionen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.

62 DIN EN ISO 527-1. Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.

63 DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. Merkblatt DVS 1618: Elastisches Dickschichtkleben im Schienenfahrzeugbau, 2002.

64 Deutscher Wetterdienst (DWD). *Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse*. Handbuch, 2014.

65 Darque-Ceretti E. and Aucouturier M. Adhesion and Materials Interconnection: Physicochemical and Mechanical Behaviour of Rubber-Like Adhesive Interfaces. *Interface Science*, 4:243–261, 1997.

66 Fitzgerald E. and Ferry J. Temperature-magnitude superposition of the dynamical mechanical response of tire stocks. *Polymer Bulletin*, 8:339–346, 1982.

67 Hering E., Martin R., and Stohrer M. *Physik für Ingenieure*. Springer Vieweg, 12 edition, 2017.

68 Maurer E. *Strukturuntersuchungen an Haftklebstoffen beim mechanischen Tack-Test auf makroskopischer und mikroskopischer Längenskala*. Dissertation, TU München - Fakultät für Physik, 2006.

69 ETA-01/0005. *DC 993 and DC 895 Structural sealants for use in structural sealant glazing systems*. European technical approval.

70 ETA-08/0286. *KÖDIGLAZE S Structural sealant for use in structural sealant glazing systems*. European technical approval.

71 ETA-09/0024. *3M VHB Structural Glazing Tape G/B 23F*. European technical approval.

72 ETA-11/0392. *Sikasil SG-550 Klebstoff zur Verwendung in geklebten Glaskonstruktionen*. European technical approval.

73 Burbulla F. *Kontinuumsmechanische und bruchmechanische Modelle für Werkstoffverbunde*. Dissertation, Universität Kassel, Berichte des Instituts für Mechanik, 2015.

74 Kemper F., Ledecky L., Feldmann M., Pasternak H., and Fischer V. Zeitabhängige windbeanspruchungen von geklebten fassadenanschlüssen. *Bauingenieur*, 92:115–122, 2017.

75 Nicklisch F. *Ein Beitrag zum Einsatz von höherfesten Klebstoffen bei Holz-Glas-Verbundelementen*. Dissertation, TU Dresden Fakultät Bauingenieurwesen, 2016.

76 Pilny F. *Risse und Fugen in Bauwerken*. Springer-Verlag Wien GmbH, 1981.

77 Schwarzl F. *Polymermechanik: Struktur und mechanisches Verhalten von Polymeren*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 1990.

78 Wellershoff F. *Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Ge- bäudehüllen*. Dissertation, RWTH Aachen Schriftenreihe Stahlbau, 2006.

79 Wellershoff F. Bemessungsschubmodulwerte für Verbundglasscheiben. *Stahlbau*, 76:177–188, 2007.

80 Wellershoff F. Aussteifung von Gebäudehüllen durch randverklebte Glasscheiben. *Stahlbau*, 77(1):5–16, 2008.

81 ETAG 002 Guideline for Structural Sealant Glazing Systems. EOTA European Organisation for Technical Approval, 1999.

82 Ausschuss für Arbeitsstätten ASTA Geschäftsführung. Technische regeln für arbeitsstätten - raumtemperatur asr a3.5, 2010.

83 Deutsches Institut für Bautechnik. Technische regeln für die verwendung von linienförmig gelagerten verglasungen (trlv), 2006.

84 Habenicht G. *Kleben: Grundlagen,Technologie,Anwendungen*. Springer Verlag, 5. auflage edition, 2005.

85 Krüger G., Völkel G.E., and Wohlfahrt R. *Untersuchung der Beanspruchungen in der Klebefuge eines Structural-Glazing Elementes*. Bericht zum forschungsvorhaben, Forschungs- und Materialprüfanstalt Baden-Württemberg, 1992.

86 Meschut G., Matzenmiller A., Mayer B., and Brede M. Numerische modellierung und kennwertermittlung für das versagensverhalten von hyperelastischen klebverbindungen, laufendes forschungsprojekt p 1086. *Tagungsband: 17. Kolloquium: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, DECHEMA e.V., Köln*, 2017.

87 Palmieri G., Sasso M., Chiappini G., and Amodio D. Mullins effect characterization of elastomers by multi-axial cyclic tests and optical experimental methods. *Mechanics of Materials*, 41(9):1059–1067, 2009.

88 Previati G. and Kaliske M. Crack propagation in pneumatic tires: Continuum mechanics and fracture mechanics approaches. *Internationl Journal of Fatigue*, 37:69 – 78, 2012.

89 Vallabhan G., Wang B., Chou G., and Minor J. Thin glass plates on elastic supports. *Journal of Structural Engineering*, 111, 1985.

90 Ehrenstein G. W. and S. Pongratz. *Beständigkeit von Kunststoffen*. Carl Hanser Verlag, 2007.

91 Altenbach H. *Kontinuumsmechanik - Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 3. auflage edition, 2015.

92 Dominighaus H. *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2005.

93 Drück H. *Solarthermie 1*. Manuskript zur vorlesung, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, 2012.

94 Erhard H. and Teich M. Strukturelle klebungen im konstruktiven glas- und fassadenbau. *Tagungsband Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik 2017, DECHEMA e.V., Köln*, 2017.

95 Malberg H. *Meteorologie und Klimatologie: Eine Einführung*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 4. auflage edition, 2002.

96 Pasternak H., Feldmann M., Dilger K., Ummenhofer T., and Geiß P.L. *Neue Konstruktionen durch Einsatz von Klebverbindungen im Stahlbau*. Abschlussbericht igf-zutech nr. 169, Forschungsvereinigung Stahlanwendung P654, 2008.

97 Pasternak H., Feldmann M., and Ummenhofer T. *Systematische Untersuchungen zur Verstärkung von Stahlkonstruktionen mit kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK)*. Abschlussbericht forschungsvorhaben igf-nr. 17700 bg, 2015.

98 Peschke H. Simulation von elastomerdichtungen unter dynamischer belastung. *INA-Sonderdruck, Vortrag zum ABAQUS-Anwendertreffen, Universität-Gesamthochschule – Essen*, 1999.

99 Tsai H. Compression analysis of rectangular elastic layers bonded between rigid plates. *International Journal of Solids and Structures*, 42:3395–3410, 2005.

100 Niemann H.J. and Hölscher N. Erfassung des Windrichtungseinflusses auf die Windlasteffekte an Tragwerken. *Stahlbau*, 73:249–253, 2004.

101 Benedek I. *Pressure-Sensitive Adhesives and Applications*. Marcel Decker Inc., 2004.

102 Maniatis I., Siebert G., and Nehring G. Dimensionierung von klebefugen aus silikon mit beliebiger geometrie. *Stahlbau*, 84:293–302, 2015.

103 Pertermann I., Puthli R., Ummenhofer T., and Vrouwenvelder T. Risikoorientierte Bemessung von Tragstrukturen: Bedeutungsbeiwerte bei der Differenzierung der Zuverlässigkeit für unterschiedliche schadens- bzw. versagensfolgeklassen. *Stahlbau*, 81:212–218, 2012.

104 van Straalen I.J. *Development of Design Rules for Structural Adhesive Bonded Joints - A Systematic Approach*. Dissertation, TU Delft, 2001.

105 Bauman J. *Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components*. Carl Hanser Verlag, 2008.

106 Christoffer J. *Ermittlung von Schneelasten in Abhängigkeit von der Liegedauer*. Abschlussbericht, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klimatologie, 1990.

107 Christoffer J., Deutschländer T., and Webs M. *Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY*. PhD thesis, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 2004.

108 Felger J., Rosendahl P.L., Stein N., and Becker W. Finite bruchmechanik: Bewertung von singulären und nichtsingulären spannungskonzentrationen. In *DVM-Bericht 249, DeutscherVerband für Materialforschung und -prüfung e.V.*, pages 111–120, 2017.

109 Goehler J. *Das dreidimensionale viskoelastische Stoffverhalten im großen Temperatur- und Zeitbereich am Beispiel eines in der automobilen Aufbau- und Verbindungstechnik verwendeten Epoxidharzklebstoffs*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, 2010.

110 Kuntsche J. *Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter zeit- abhängiger Belastung und Explosionsbeanspruchung*. Dissertation, TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion, 2015.

111 Meinz J. *Kleben im Stahlbau: Betrachtungen zum Trag- und Verformungsverhalten und zum Nachweis geklebter Trapezprofilanschlüsse und verstärkter Hohlprofile in Pfosten-Riegel-Fassaden*. Dissertation, BTU Cottbus Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung, 2010.

112 Schneider J. and Schlatter H. *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen: Grundwissen für Ingenieure*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1994.

113 Weitzenböck J. and McGeorge D. *BONDSHIP project guidelines*. 2005.

114 Groß K. and Geiß P. L. Tragfähigkeit und sicherheit unter einwirkung betriebsbedingter einflüsse auf elementar geklebte strukturen – eco-operation. *Tagungsband 17. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, DECHEMA e.V., Köln*, 2017.

115 Karpati K. Mechanical properties of sealants: 1. behavior of silicone sealants as a function of temperature. *Journal of Painted Technology*, 44(565):55–62, 1972.

116 Karpati K. Mechanical properties of sealants: 2. behavior of a silicone sealant as a function of rate of movement. *Journal of Paint Technology*, 44(569):58–66, 1972.

117 Menard K. *Dynamic Mechanical Analysis - A Practical Introduction*. CRC Press, 1999.

118 Sakulkaew K., Thomas A., and Busfield J. The effect of temperature on the tearing of rubber. *Polymer Testing*, 32:86–93, 2013.

119 Sedlan K. *Viskoelastisches Materialverhalten von Elastomerwerkstoffen: Experimentelle Untersuchung und Modellbildung*. Dissertation, Universität Kassel - Fachbereich Maschinenbau, 2000.

120 Slamova K., Schnabel E., Rösel I., Schill C., and Köhl M. Qualitätssicherung meteorologischer daten und deren analyse zur erzeugung von degradationsreferenzjahren. *43. Jahrestagung der GUS*, 2014.

121 Weiß K. *Forschungsprojekt Speedcoll*. Abschlussbericht, Fraunhofer ISE, 2015.

122 Rückeshäuser K.H. Silikon - der klebstoff moderner glasfassaden. *Kleben, Leimen, Befestigen und Dichten im Hoch- und Tiefbau*, pages 37–44, 1993.

123 Volokh K.Y. Cavitation instability in rubber. *International Journal of Applied Mechanics*, 3:299–311, 2011.

124 Volokh K.Y. Review of the energy limiters approach to modeling failure of rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 86:470–487, 2013.

125 Blandini L. Structural use of adhesives for the construction of frameless glass shells. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(6):499 – 504, 2007.

126 da Silva L., das Neves P.J.C., Adams R.D., and Spelt J.K. Analytical models of adhesively bonded joints - Part I: Literature survey. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(3):319–330, 2009.

127 Mullins L. Effect of stretching on the properties of rubber. *Journal of Rubber Research*, 16:275–289, 1947.

128 Sandberg L. Combined Stress Behaviour of Structural Glazing Joints. *Journal of Structural Engineering*, 115(5):1212–1224, 1989.

129 Treloar L. *The Physics of Rubber Elasticity*. Oxford University Press, 1975.

130 Albiez M. *Zur statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, 2016.

131 Bosseler M., Kleuter B., and Risy G. Determination of material properties for crash calculation of elastomers, taking into account large tensile and compressive strains. In *NAFEMS World Congress*, 2013.

132 Brede M. and Possart W. *Beständigkeit von Klebungen verstehen und berechnen (BestKleb)*. Abschlussbericht, AiF-DFG-Gemeinschaftsvorhaben, 2015.

133 Bürgi M. and Jousset P. Materialdaten äquibiaxial bestimmen. *adhäsion*, 05:25–29, 2016.

134 Feldmann M., Bucak Ö., and Geiß P. *Lastabtragende Klebverbindungen im konstruktiven Ingenieurglasbau*. Abschlussbericht aif projekt 16530 n, Forschungsvereinigung DECHEMA, 2011.

135 Feldmann M., Pilsl M., and Langosch K. Der neue Glashof des Jüdischen Museums Berlin - Eine innovative Structural Glazing-Fassade unter Erfüllung besonderer technischer Anforderungen. *Stahlbau*, 77:34–41, 2008.

136 Feldmann M. and Geiß P. *Vereinfachtes Bemessungsverfahren für elastische Klebfugen mit mehrachsigen Spannungszuständen unter Berücksichtigung nichtlinearen Materialverhaltens*. Abschlussbericht aif-projekt 16842 n, Forschungsvereinigung DECHEMA, 2013.

137 Flamm M., Steinweger T., and Weltin U. Festigkeitshypothesen in der rechnerischen lebensdauervorhersage von elastomeren. *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 56:582–586, 2003.

138 Itskov M. and Knyazeva A. A rubber elasticity and softening model based on chain length statistic. *International Journal of Solids and Structures*, 80:512–519, 2016.

139 Johlitz M. *Experimentelle Untersuchung und Modellierung von Maßstabseffekten in Klebungen*. Dissertation, Universität des Saarlandes - Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften, 2008.

140 Kasperski M. *Festlegung und Normung von Entwurfswindlasten*. Habilitationsschrift, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2000.

141 Köhler M., Jenne S., Pötter K., and Zenner H. *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2012.

142 Krahwinkel M. Bemessung von tragenden bauteilen aus kunststoffen im bauwesen - die neue bÜv-empfehlung tkb (2010-08). *Bautechnik*, 88:362–377, 2011.

143 Pröbster M. *Elastisch Kleben*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2013.

144 Schlimmer M. and Bornemann J. Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen (Teil 2). *adhäsion Kleben & Dichten*, 48:40–42, 2004.

145 Schlimmer M. and Klapp O. *Einfluß fertigungsbedingter Imperfektionen auf die mechanischen Verbindungseigenschaften von 1K-PUR-Klebungen im Nutzfahrzeugbau*. Forschungsbericht 1-2002, 2002.

146 Stommel M. *Beschreibung der viskoelastischen mechanischen Eigenschaften, der Betriebsfestigkeit und des Bruchverhaltens von Elastomerbauteilen mit der Finite-Elemente-Methode*. Dissertation, RWTH Aachen - Fakultät für Maschinenwesen, 1999.

147 Stommel M., Stojek M., and Korte W. *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. Carl Hanser Verlag, 2011.

148 Timmel M., Kaliske M., and Kolling S. Modellierung gummiartiger Materialien bei dynamischer Beanspruchung. *3. LS-DYNA Anwenderforum*, 2004.

149 Vöhringer M. *Prüfung und Beschreibung des mehrachsigen Verhaltens von Elastomeren für die Finite-Elemente-Methode*. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, 2009.

150 Williams M., Landel R., and Ferry J. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 26:359–362, 1955.

151 Tschoegl N. *The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 1989.

152 Tschoegl N. Time dependence in material properties: An overview. *Mechanics of Time-Dependent Materials 1*, pages 3–31, 1997.

153 Tschoegl N., Knauss W., and Emri I. Poisson's ratio in linear viscoelasticity - a critical review. *Mechanics of Time-Dependent Materials 6*, pages 3–51, 2002.

154 Hocine N.A., Hamdi N., Abdelaziz M.N., Heuillet M., and Zairi F. Experimental and finite element investigation of void nucleation in rubber-like materials. *International Journal of Solids and Structures*, 48:1248–1254, 2011.

155 Hesebeck O. Consideration of the restriction of lateral contraction in the elastic behaviour of cohesive zone models. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 62:165–171, 2015.

156 Klapp O. *Mechanisches Verhalten elastomerer Klebverbindungen*. Dissertation, Universität Kassel - Institut für Werkstofftechnik, 2002.

157 Volkersen O. Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15:41–47, 1938.

158 Volkersen O. Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen. *Energie und Technik*, pages S. 68–71, S. 103–108 u. S. 150–154, 1953.

159 Descamps P., Hayez V., and Chabih M. Next generation calculation method for structural silicone joint dimensioning. *Glass Structures & Engineering*, 2:169–182, 2017.

160 van der Bogert P. *Computational Modelling of Rubberlike Materials*. Dissertation, TU Delft, 1991.

161 prEN 16612. Bestimmung des belastungswiderstandes von glasscheiben durch berechnung und prüfung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.

162 prEN 16759. Geklebte glaskonstruktionen für türen, fenster und vorhangfassaden – Überprüfung der mechanischen leistungseigenschaften der verklebung auf aluminium- und stahloberflächen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.

163 Hyndman R. and Yanan F. Sample quantiles in statistical packages. *The American Statistican*, 50(4):361–365, 1996.

164 Kaatz R. and Recknagel C. Advanced Evaluation of Structural Sealant Glazing Systems by a new System Test Approach. *Tagungsband ICBEST Aachen*, 2014.

165 Raghava R., Caddell R., and Yeh G. The macroscopic yield behaviour of polymers. *Journal of Materials Science*, 8:225–232, 1973.

166 Stieglitz R. and Heinzel V. *Thermische Solarenergie*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2012.

167 R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.

168 Odgen R.W. and Roxburgh D.G. A pseudo-elastic model for the mullins effect in filled rubber. *Proceeding of the Royal Society London A 455*, pages 2861–2877, 1999.

169 Bondi S. and Mcclelland N. Capturing structural silicone non-linear behavior via the finite element method. In *Proceedings Glass Performance Days*, pages 934–937, 2009.

170 Brendler S. and Haufe A. Zur Versagensvorhersage von Silikon-Glas-Klebeverbindungen mit LS-DYNA: Identifizierung von geeigneten Materialmodellen und –parametern. In *6. LS DYNA Anwenderforum*, 2007.

171 Hartmann S. Finite-elemente-berechnung inelastischer kontinua. Habilitationsschrift Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel Fachgebiet Mechanik, 2 2003.

172 Koch S. *Elastisches Kleben im Fahrzeugbau*. Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Fügetechnik, 1996.

173 Koch S., Dilger K., and Habenicht G. Paneelverklebung in ge- bäuden. *Kleben, Leimen, Befestigen und Dichten im Hoch- und Tiefbau*, page 180–187, 1993.

174 Kolling S., Haufe A., Feucht M., and Du Bois P. Samp-1: A semi-analytical model for the simulation of polymers. *4. LS-DYNA Anwenderforum*, 2005.

175 Krishnaswamy S. and Beatty M.F. The Mullins effect in compressible solids. *International Journal of Engineering Science*, 38:1397–1414, 2000.

176 Marzi S. *Ein ratenabhängiges, elasto-plastisches Kohäsivzonen-Modell zur Berechnung struktureller Klebverbindungen unter Crashbeanspruchung*. Dissertation, RWTH Aachen, Fakultät für Bauingenieurwesen, 2010.

177 Nhamoinesu S. and Overend M. The mechanical performance of adhesives for a steel-glass composite façade system. *Challenging Glass 3, TU Delft, Delft NL*, 2012.

178 Peters S. *Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2006.

179 Sangwook S., Miyano Y., and Tsai S.W. *Time and Temperature-Dependent Failure of a Bonded Joint*. research report, Stanford University Palo Alto, 1997.

180 Sikora S. *Materialcharakterisierung und -modellierung zur Simulation von Klebverbindungen mit Polyurethanklebstoffen*. Universität Paderborn - Fakultät für Maschinenbau. Dissertation edition, 2014.

181 Sponagel S., Unger J., and Spies K. Härtebegriff im zusammenhang mit vernetzung, bruchdehnung und dauerfestigkeit eines elastomers. *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 11:608–613, 2003.

182 Sun S., Li M., and Liu A. A review on mechanical properties of pressure sensitive adhesives. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 41:98–106, 2013.

183 Fildhuth T., Lippert S., and Knippers J. Strategien zur fugenverlaufsoptimierung von glasschalen. *Glasbau 2012*, pages 236–245, 2012.

184 Mano T. and Mangerig I. Tensile load-carrying behaviour of elastomeric bearings. *Steel Construction*, 8:33–41, 2015.

185 Naumann T. *Beitrag zur Beschreibung des mechanischen Langzeitdeformationsverhaltens von thermoplastischen Kunststoffen*. Dissertation, Universität des Saarlandes, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III Chemie, Pharmazie, Biologie und Werkstoffwissenschaften, 2012.

186 Scherer T. *Werkstoffspezifisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten und Grenzen der Beanspruchbarkeit elastischer Klebungen*. Dissertation, TU Kaiserslautern, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 2013.

187 Ummenhofer T., Schuler C., and Meyer B. *Structural Glazing - Systematische Untersuchung des Trag- und Versagensverhaltens geklebter Stahl-Glas-Verbindungen*. Abschlussbericht aif-projekt 18211 n, Forschungsvereinigung Stahlanwendung P1052, 2017.

188 Ummenhofer T., Albiez M., Bucak Ö., Ehard H., Mayer B., and Fricke H. *Geklebte Stahl-Stahlgussverbindungen am Beispiel von Fachwerkknoten von Rundhohlprofil-Konstruktionen*. PhD thesis, Verlag- und Vertriebsgesellschaft. Düsseldorf (Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. im Stahl-Zentrum. FOSTA P884, 2015.

189 Vallée T., Correia J., and Keller T. Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles – Part II: Strength prediction. *Composites Science and Technology*, 66(13):1915–1930, 2006.

190 Williams T. and Kelley C. Gnuplot 4.6: an interactive plotting program. `http://gnuplot.sourceforge.net/`, 4 2013.

191 Peil U. and Niemann H.J. Windlasten auf Bauwerke. *Stahlbau-Kalender*, pages 673–748, 2003.

192 Stigh U., Biel A., and Svensson D. Cohesive zone modelling and the fracture process of structural tape. *Procedia Structural Integrity 2*, pages 235–244, 2016.

193 Bau Überwachungsverein e.V. Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen [TKB] - Entwurf, Bemessung und Konstruktion. Technical report, 2010.

194 Dias V., Odenbreit C., Hechler O., Scholzen F., and BenZineb T. Development of a constitutive hyperelastic material law for numerical simulations of adhesive steel–glass connections using structural silicone. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 48:194–209, 2014.

195 Effinger V. and Du Bois P. Modelling of viscoelastic materials with ls-dyna. *11. German LS-Dyna Forum*, 2012.

196 Brockmann W. and Hüther R. Adhesion mechanisms of pressure sensitive adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 16:81–86, 1996.

197 Feng W. and Hallquist J. A failure criterion for polymers and soft biological materials. In *5th European LS-DYNA Users Conference*, 2005.

198 Haase W., Stoehrel H.-P., Köhnlein J., Blochwitz R., Braig J., and Bernd M. *Temperaturversuche an Verbundsicherheitsglasscheiben unter Sonneneinstrahlung*. Versuchsbericht fachverband konstruktiver glasbau e.v., Universität Stuttgart, Zentrallabor des konstruktiven Ingenieurbaus, 2001.

199 Kaiser W. *Kunststoffchemie für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag, 3.auflage edition, 2011.

200 Mars W. Cracking energy density as a predictor of fatigue life under multiaxial conditions. *Rubber Chemistry and Technology*, 75:1–17, 2002.

201 Mars W. and Fatemi A. Multiaxial stress effects on fatigue behavior of filled natural rubber. *International Journal of Fatigue*, 28:521–529, 2005.

202 Roedel W. and Wagner T. *Physik unserer Umwelt - Die Atmosphäre*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 4. auflage edition, 2000.

203 Wittwer W. Verträglichkeit: Erklärungen - einflüsse - strategien. *Tagungsband Glas im konstruktiven Ingenieurbau 2010, Hochschule München, München*, 2010.

204 Deutscher Wetterdienst. Climate data center, abrufdatum: 3.7.2015. `ftp://opendata.dwd.de/`.

205 Dow Corning GmbH Wiesbaden. *Design Stress for DOW CORNING Structural Silicones*, 2 2015.

206 Ciupack Y. *Untersuchungen zur Bedeutung und Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen am Beispiel von Stahlklebverbindungen*. Dissertation, TU Cottbus, 2016.

207 Ciupack Y. and Pasternak H. Kalibrierung von Bemessungskonzepten gemäß Eurocode am Beispiel von Klebverbindungen. *Bauingenieur*, (87):116–123, 2012.

208 Nakagami Y. *Probabilistic Dynamics of Wind Excitation on Glass Facade*. Dissertation, TU Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, 2003.

209 Staudt Y., Odenbreit C., and Schneider J. Investigation of bonded connections with silicone under shear loading. *Proceedings of Challenging Glass 5, TU Delft, Delft NL*, pages 353–362, 2016.

210 Staudt Y., Odenbreit C., and Schneider J. Failure behaviour of silicone adhesive used in linear bonded connections. *preprint submitted to international journal of adhesion*, 2017.

BERICHTE ZUM STAHL- UND LEICHTBAU (ISSN 2198-7912)

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Stahl- und Leichtbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Eine Übersicht der Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine ab dem Jahr 1963 finden Sie unter folgender URL: http://stahl.vaka.kit.edu/berichte.php

Band 1 OLIVER FLEISCHER
Axial beanspruchte K-Knoten aus dünnwandigen Rechteckhohlprofilen.
ISBN 978-3-7315-0190-9

Band 2 THOMAS REINKE
Tragverhalten von biegebeanspruchten Stahlmasten mit polygonalen Querschnitten.
ISBN 978-3-7315-0398-9

Band 3 ROBIN MARC PLUM
Fatigue crack detection on structural steel members by using ultrasound excited thermography. Erkennung von Ermüdungsrissen in Stahlbauteilen durch ultraschallangeregte Thermografie.
ISBN 978-3-7315-0417-7

Band 4 TIM ZINKE
Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken – Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte.
ISBN 978-3-7315-0509-9

Band 5 MAX JONAS SPANNAUS
Bemessung von Erzeugnissen aus Stahlguss unter vorwiegend ruhender Beanspruchung.
ISBN 978-3-7315-0560-0

Band 6 MATTHIAS FRIEDRICH ALBIEZ
Zur statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau.
ISBN 978-3-7315-0561-7

Band 7 ANDREAS LIPP
Kreishohlprofil-X-Knoten aus nichtrostenden Stählen unter Axialbeanspruchung.
ISBN 978-3-7315-0569-3

Band 8 PAUL DARIO TOASA CAIZA
Consideration of runouts by the evaluation of fatigue experiments.
ISBN 978-3-7315-0900-4

Band 9 JENNIFER C. HRABOWSKI
Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen aus höchstfestem Stahl im Kurzzeitfestigkeitsbereich.
ISBN 978-3-7315-0931-8

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar oder als Druckausgabe bestellbar.

Band 10 STEFAN RACK
Formadaptive Tensegrity-Strukturen – Ein Beitrag zur numerischen Simulation.
ISBN 978-3-7315-0574-7

Band 11 ACHIM STRUVE
Analysis of a Rotatable Wind Turbine Tower by means of Aero-Servo-Elastic Load Simulations.
ISBN 978-3-7315-1045-1

Band 12 PHILIPP WEIDNER
Zum Ermüdungsverhalten einseitig geschweißter Stumpfstöße von Kreishohlprofilen.
ISBN 978-3-7315-1017-8

Band 13 STEFANOS GKATZOGIANNIS
Finite Element Simulation of Residual Stresses from Welding and High Frequency Hammer Peening.
ISBN 978-3-7315-1066-6

Band 14 MARTIN DIRK BUES
Ein Beitrag zur Auslegung tragender Klebverbindungen im Fassadenbau.
ISBN 978-3-7315-1122-9

VERSUCHSANSTALT FÜR STAHL, HOLZ UND STEINE
BERICHTE ZUM STAHL- UND LEICHTBAU

14

In der vorliegenden Arbeit werden Untersuchungen zur Auslegung tragender Klebverbindungen im Glas- und Fassadenbau beschrieben. Das wesentliche Kernelement ist hierbei die Analyse des zeit- und temperaturabhängigen Tragverhaltens der Klebverbindungen unter Berücksichtigung der Einwirkungsvorgänge.
Dies geschieht durch systematische Analyse des Temperaturverlaufs in geklebten Verbindungen durch Freiluftmessungen. Ferner wird anhand historischer Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes die Wirkungsdauer klimatischer Einwirkungsgrößen analysiert und in Form von Lastkollektiven beschrieben. An drei verschiedenen Klebstoffen werden experimentelle Untersuchungen unter Einfluss verschiedener Parameter (Temperaturen, Dehnrate, Feuchte, Geometrie) durchgeführt.
Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird das Tragverhalten der linienförmigen Klebverbindung analytisch wie auch numerisch untersucht und ein Prognosemodell erarbeitet.

ISBN 978-3-7315-1122-9
9 783731 511229 >

ISSN 2198-7912 | ISBN 978-3-7315-1122-9

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier