



DOCTORAL THESIS

Load-bearing timber-glass composites with a special focus on the long-term behavior of silicone bond lines

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Science in Civil Engineering
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DISSERTATION

Tragende Verklebungen von Glas mit Holz unter besonderer Berücksichtigung der Bemessungsansätze für das Langzeitverhalten von Silikonfugen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der technischen Wissenschaft,
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen
von

Dipl.-Ing. Matthias Rinnhofer BSc.

Matr.-Nr.: 0726267

Linke Wienzeile 58/21, A-1060 Wien

1. Gutachter: O.Univ.Prof. Dipl.Dipl.-Ing. Wolfgang Winter
Institut für Architekturwissenschaften
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13, A-1040 Wien
2. Gutachter: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch
Institut für Hochbau und Technologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13, A-1040 Wien
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Institut für Baukonstruktion
Technische Universität Dresden
August-Bebel-Straße 30, D-01219 Dresden

Wien, Mai 2017

.....

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Universitätsassistent an der Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau des Instituts für Architekturwissenschaften der Technischen Universität Wien. Ein Großteil der experimentellen Untersuchungen wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Entwicklung und Langzeituntersuchungen von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen mit gleichzeitiger Verklebung und Verklotzung“ durchgeführt.

Herzlicher Dank gebührt Herrn Prof. Wolfgang Winter, der mir die Bearbeitung des vorliegenden Themas ermöglicht, mir dabei großes Vertrauen und viele Freiräume geschenkt und die Begutachtung dieser Arbeit übernommen hat.

Weiterhin bedanken möchte ich mich bei Prof. Andreas Kolbitsch für die Übernahme des Zweit- und bei Prof. Bernhard Weller für die Aufgabe des Drittgutachters und die zielorientierte, unkomplizierte Zusammenarbeit.

Sehr großen Dank möchte ich Prof. Alireza Fadaei aussprechen, der während meiner gesamten Tätigkeit ein offenes Ohr für jegliches Anliegen gehabt hat. Seine umfangreiche Unterstützung und Motivation hat die Fertigstellung dieser Arbeit in sämtlichen Belangen gefördert.

Bedanken möchte ich mich selbstverständlich auch bei den Projektpartnern, Hanspeter Petschenig von Petschenig glastec GmbH, Robert Jöbstl von Haas Fertigbau Holzbauwerke, Günther Weinbacher und Thomas Krätschmer von Hermann Otto GmbH und Peter Schober von der Holzforschung Austria. Weiterer Dank gilt all ihren MitarbeiterInnen, die mich während der Durchführung der experimentellen Untersuchungen tatkräftig unterstützt haben.

Für unzählige fachkundige Gespräche danke ich besonders Dr. Christoph Hackspiel, Dr. Werner Hochhauser, Karin Lieb, Dr. Felix Nicklisch, Dr. Peter Niedermaier, Dr. Khaled Saleh-Pascha und Sigurd Sitte.

Mein Dank gilt auch Dr. Heinrich Bruckner für die Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen.

Allen MitarbeiterInnen des Instituts ein herzliches Dankeschön für die gute Laune, die stetige Aufmunterung und das wohltuende Arbeitsklima. Besonders Thomas Sicay vielen Dank für die Unterstützung in graphischen Angelegenheiten.

Für den enormen Aufwand, die Arbeit Korrektur zu lesen, danke ich meinen Eltern, die viel Zeit und Mühe in diese Aufgabe gesteckt haben. Selbstverständlich auch Danke für den durchgehenden Rückhalt während meines gesamten Studiums.

Schließlich ein herzliches Dankeschön an meine Geschwister und Freunde, die für die notwendige Ablenkung, aber auch für die richtige Motivation zur rechten Zeit gesorgt haben und somit zum Gelingen der Arbeit beitrugen. Insbesondere möchte ich dabei meine Freundin Barbara hervorheben, die unendliche Geduld aufbrachte und mich in vielen Kleinigkeiten unterstützt hat. All diese Dinge haben mir die Bearbeitung dieser Arbeit ungemein erleichtert und für die notwendige Zuversicht gesorgt.

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich vorrangig mit der Ermittlung von Bemessungsbeiwerten zur Berücksichtigung des Langzeitverhaltens von Holz-Glas-Verbundelementen. Um dieses Thema diskutieren zu können, müssen zu Beginn der Terminus des Kriechens und die diversen dazugehörigen Verhaltensmodelle eines Werkstoffs definiert und erklärt werden. Es wird gezeigt, in welcher Form eine Zunahme der Verformung unter andauernder Belastung sowie eine etwaige Abnahme der Festigkeit als direkte Folge der Verformungszunahme die Bemessung von Klebefugen aus Silikon beeinflusst.

Für lastabtragende Silikonverklebungen existiert bis dato lediglich eine Richtlinie, aber keine Norm. Es sind für eine Verklebung dieser Art auch noch keinerlei Bemessungsbeiwerte auf Basis des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes entwickelt und normativ verankert. Dieser Aspekt soll in der vorliegenden Arbeit grundlegend behandelt und ein Vorschlag für mögliche Sicherheitsbeiwerte getroffen werden.

Dafür werden zu Beginn bereits durchgeführte Forschungsarbeiten diskutiert und die im Bauwesen üblichen rheologischen Modelle zur Simulierung von Kriechverformungen vorgestellt. Des Weiteren wird auf existierende Bemessungskonzepte eingegangen und auf die jeweiligen Besonderheiten hingewiesen.

Zur Überprüfung bestehender Bemessungsbeiwerte werden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse detailliert vorgestellt und interpretiert werden. Dazu werden zuvor bestimmte Kriterien definiert, anhand derer die Beurteilung der Ergebnisse erfolgt. Dieses Versuchsprogramm beinhaltet diverse Probekörpergeometrien, unterschiedliche Belastungsniveaus und Zeitspannen der Dauerbelastung sowie Varianten in den klimatischen Randbedingungen. Auch dynamische Versuche werden ausgeführt.

Die erzielten Ergebnisse werden vergleichbaren experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt, um die Aussagekraft der Resultate zu überprüfen. Ebenso erfolgt eine Beurteilung der zu erwartenden Verformung unter Dauerlast mittels rheologischer Modellierung und eine Analyse des Bruchverhaltens auf Basis der Finite-Elementen-Methode.

Aufbauend auf die gewonnenen Erkenntnisse wird eine Zuverlässigkeitsanalyse durchge-

führt, um eine entsprechende Materialsicherheit zu definieren. Dabei werden unterschiedliche Varianten untersucht. Anhand bereits existierender Bemessungskonzepte werden in weiterer Folge Bemessungsbeiwerte für die Langzeitbeanspruchung von Klebefugen aus Silikon hergeleitet.

Die erlangten Ergebnisse werden abschließend zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen und erweiterte Testverfahren gegeben, welche ein breiteres Einsatzspektrum von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen ermöglichen.

Abstract

This thesis primarily deals with the determination of design factors with a special focus on the long-term behavior of timber-glass composite elements. The dimensioning of silicone bond lines is affected by the increase of the deformation under continuous shear load. It is shown how creeping influences the residual strength of the material. Different behavioral models for the simulation of the expected behavior under long-term loads are presented.

Up to now there is only a guideline but no european standard for structural-sealant-glazing systems. No design factors based on a semiprobabilistic safety concept have been developed and integrated in standards so far. This aspect should be examined and a proposal for potential safety factors should be submitted.

At the beginning previous research reports are discussed and rheological models for the simulation of the creeping behavior are presented. Additionally existing safety concept are explained.

Extensive experimental investigations are carried out to verify existing design factors. The results are presented and interpreted in detail. Based on certain predefined criteria the results are assessed. The test program contains various geometries of the specimen, different stress levels and time span of the continuous load as well as variations in the climatic conditions. Dynamic tests are carried out too.

The obtained results are compared with other experimental investigations from different researchers in order to check the validity of the results. An analysis of the deformation under continuous load by means of rheological models and an analysis of the fracture behavior based on the finite element method are executed as well.

Based on the obtained insights a reliability analysis is carried out in order to define a corresponding material safety factor. Different variants are examined. Consequently design factors for long-term stresses of silicone adhesives are derived with the help of already existing safety concepts.

Finally an overview over potential future developments and efficient test-methods is given to enlarge the field of application of timber-glass composite elements.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	1
Symbolverzeichnis	3
1. Einleitung	7
1.1. Motivation	7
1.2. Zielsetzung	8
2. Stand der Technik im Holz-Glas-Verbundbau	11
2.1. Frühere Forschungsarbeiten	11
2.2. Grundlagen der Sicherheitstheorie	15
2.2.1. Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen	16
2.2.2. Konzept der Holzforschung Austria	20
2.2.3. Überlegungen der TU Wien im Forschungsprojekt „Holz-Glas-Ver- bundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept“	22
2.2.4. Vergleich der Konzepte	23
2.2.5. Weitere sicherheitstheoretische Überlegungen	26
3. Mechanische Beschreibung von zeitabhängigem Materialverhalten	29
3.1. Viskoelastisches Materialverhalten von Baustoffen	29
3.2. Rheologische Modelle zur Beschreibung des Kriechverhaltens	30
4. Experimentelle Untersuchungen	37
4.1. Methodik	38
4.2. Erläuterungen zur Darstellung der Ergebnisse	45
4.3. Kleinprobekörper	47
4.3.1. Serie 1	48
4.3.1.1. Kriechversuch	48

4.3.1.2.	Scherversuch	55
4.3.1.2.1.	Unbelastete Kleinprobekörper	57
4.3.1.2.2.	Kleinprobekörper mit einer Vorbelastung von 0,04 N/mm ²	60
4.3.1.2.3.	Kleinprobekörper mit einer Vorbelastung von 0,05 N/mm ²	66
4.3.1.2.4.	Kleinprobekörper mit zyklischer Belastung . .	73
4.3.1.3.	Resümee	77
4.3.2.	Serie 2	78
4.3.2.1.	Kriechversuch	79
4.3.2.2.	Scherversuch	84
4.3.2.3.	Resümee	85
4.3.3.	Serie 3	87
4.3.3.1.	Kriechversuch	88
4.3.3.2.	Scherversuch	92
4.3.3.2.1.	Unbelastete Kleinprobekörper	93
4.3.3.2.2.	Kleinprobekörper mit einer Vorbelastung von 0,05 N/mm ²	97
4.3.3.2.3.	Kleinprobekörper mit einer Vorbelastung von 0,06 N/mm ²	98
4.3.3.3.	Resümee	101
4.3.4.	Serie L-Leiste	102
4.3.4.1.	Kriechversuch	104
4.3.4.2.	Scherversuch	108
4.3.4.2.1.	Unbelastete Kleinprobekörper mit L-Leiste . .	109
4.3.4.2.2.	Kleinprobekörper mit L-Leiste mit einer Vor- belastung von 0,04 N/mm ²	111
4.3.4.3.	Resümee	113
4.3.5.	Zusammenfassung der Serien	115
4.4.	Mittelgroße Versuchskörper	116
4.4.1.	Kriechversuch	119
4.4.2.	Scherversuch	126
4.4.2.1.	Unbelastete mittelgroße Probekörper	126
4.4.2.2.	Mittelgroße Probekörper mit einer Vorbelastung von 0,04 N/mm ²	129

4.4.2.3. Mittelgroße Probekörper mit einer Vorbelastung von 0,05 N/mm ²	132
4.4.3. Resümee	134
4.5. Zusammenfassung der Serien	136
5. Analyse des Kriech- und Bruchverhaltens	139
5.1. Rheologische Untersuchungen des Kriechverhaltens	139
5.2. Finite-Elemente-Simulationen der Kleinprobekörper	144
6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute	147
6.1. Holzforschung Austria	147
6.2. TU Dresden	152
6.2.1. Kleinprobekörper	153
6.2.2. Mittelgroße Probekörper	157
6.3. IFT Rosenheim	160
6.4. Fassade Otto-Chemie	162
7. Zuverlässigkeitsanalyse	167
7.1. Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung	168
7.1.1. Analyse der experimentellen Untersuchungen mittels FORM	173
7.1.1.1. Berechnung der Teilsicherheitsbeiwerte, Fall 1	174
7.1.1.1.1. Variante A	175
7.1.1.1.2. Variante B	177
7.1.1.2. Berechnung der Teilsicherheitsbeiwerte, Fall 2	179
7.1.2. Resümee	182
7.2. Vergleich mit bekannten Bemessungskonzepten	183
7.2.1. TU Wien	183
7.2.2. Holzforschung Austria	187
7.3. Definition von Sicherheitsbeiwerten	191
8. Resümee und Ausblick	195
A. Anhang	199
A.1. Datenblatt OttoColl® S660	199
A.2. Rheologische Modellierung der Messergebnisse	203
Abbildungsverzeichnis	209

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	215
Quellenverzeichnis	221

Abkürzungsverzeichnis

AbZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ¹
BFU	Birkenfurniersperrholz
ESG	Einscheibensicherheitsglas
FE	Finite-Elemente
FORM	Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung - First Order Reliability Method
HFA	Holzforschung Austria ²
HGV	Holz-Glas-Verbund
ift	Institut für Fenstertechnik ³
ITI	Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau ⁴
MEZ	Mitteleuropäische Zeit (koordinierte Weltzeit +1 Stunde)
SORM	Zuverlässigkeitstheorie II. Ordnung - Second Order Reliability Method
SSG	Structural Sealant Glazing
TU	Technische Universität
TVG	teilvergesspanntes Glas

¹Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin

²Österreichische Gesellschaft für Holzforschung, Franz-Grill-Straße 7, A-1030 Wien

³ift Rosenheim GmbH, Theodor-Gietl-Straße 7-9, D-83026 Rosenheim

⁴Technische Universität Wien, Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, Karlsplatz 13/259.2, A-1040 Wien

Abkürzungsverzeichnis

UV Ultraviolett

VSG Verbundsicherheitsglas

ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik⁵

ZiE Zulassung im Einzelfall

⁵Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A-1190 Wien

Symbolverzeichnis

a	Abmessung der kurzen Seite der Glasscheibe
c	Integrationskonstante
e	Dicke der Klebefuge
f_{ges}	Abminderungsfaktor als Produkt mehrerer Einflussfaktoren
f_k	charakteristische Festigkeit
$f_{T,t}$	Reduktionsfaktor der Schubfestigkeit des Klebstoffs infolge der Belastungszeit und der Klebstofftemperatur
g	Grenzzustandsfunktion
k_1	Abminderungsfaktor für Temperaturbeanspruchung
k_2	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Alterung
k_3	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Kriechen unter dauerhafter Belastung
k_4	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Schwankungen der Materialeigenschaften, Unsicherheiten in den Berechnungsmethoden, Abweichungen von den zu Grunde liegenden Fugengeometrien und der Produktionsqualität
k_b	Abminderungsfaktor für die Art der Beanspruchung
k_{def}	Verformungsbeiwert
k_{mod}	Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer
$k_{mod,lang}$	Modifikationsbeiwert für lange Lasteinwirkungsdauer
k_n	Fraktilenfaktor für charakteristische Werte
m	Anzahl der Kelvin-Voigt'schen Körper
m_x	Mittelwert von Eigenschaften
n	Anzahl experimenteller Testresultate
s_x	Standardabweichung der Schubfestigkeit
t	Zeit
w	Durchbiegung
w_0	Verformung unmittelbar nach Lastaufbringung

Symbolverzeichnis

w_{41}	Verformung in belastetem Zustand nach 41 Tagen
w_{91}	Verformung in belastetem Zustand nach 91 Tagen
w_{131}	Verformung in belastetem Zustand nach 131 Tagen
w_{210}	Verformung in belastetem Zustand nach 211 Tagen
w_{271}	Verformung in belastetem Zustand nach 271 Tagen
w_{365}	Verformung in belastetem Zustand nach 365 Tagen
w_x	Verformung 24 Stunden nach x Tagen unter Last
w_{x+e}	Verformung unmittelbar nach Entlastung nach x Tagen unter Last
w_{x+1}	Verformung 24 Stunden nach Entlastung nach x Tagen unter Last
A	Fläche
A_{erf}	erforderliche Querschnittsfläche
C_d	Bemessungswert des maßgebenden Gebrauchstauglichkeitskriteriums
C_k	charakteristischer Wert des maßgebenden Gebrauchstauglichkeitskriteriums
CoV	Variationskoeffizient
E	Elastizitätsmodul
E_d	Bemessungswert der Beanspruchung
E_k	charakteristischer Wert der Beanspruchung
F	Kraft
G	Verformungsmodul
G_0	Verformungsmodul ohne vorangegangene Dauerbelastung
G_{91}	Verformungsmodul nach Dauerbelastung von 91 Tagen
G_{ges}	kombinierter Verformungsmodul
$G_{ges,fin}$	Verformungsmodul zur Ermittlung der Langzeitverformung aufgrund der quasiständigen Einwirkungskombination
G_k	charakteristische ständige Einzellast
G_{kriech}	Verformungsmodul unter Kriechen
G	ständige Einzellast
I	zeitabhängige Kriechnachgiebigkeit
$J(t)$	Nachgiebigkeitsfunktion
L	Länge der Klebefuge
P	Bemessungspunkt
P_f	Versagenswahrscheinlichkeit
R^2	Bestimmtheitsmaß

\bar{R}^2	korrigiertes Bestimmtheitsmaß
R_d	Bemessungswert der Tragfähigkeit
$R_{d,lang}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit bei Langzeitbeanspruchung
R_k	charakteristischer Wert der Tragfähigkeit
$RMSE$	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
RSS	Residuenquadratsumme
$R_{u,5}^{(1)}$	charakteristische Bruchspannung ⁶
$R_{u,5}^{(2)}$	charakteristische Bruchspannung ⁷
V_x	Variationskoeffizient einer Eigenschaft
α	Abklingbeiwert
α_E	Wichtungsfaktor der Einwirkungsseite
α_R	Wichtungsfaktor der Widerstandsseite
α_T	Temperaturausdehnungskoeffizient
β	Sicherheitsindex
ε	Dehnung
ε^e	elastische Dehnung
ε^v	viskose Dehnung
η	Zähigkeitskoeffizient
γ	Gleitwinkel
γ_C	Abminderungsfaktor für eine Langzeit-Schubbelastung
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten und Größenabweichungen
γ_f	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen, der die Möglichkeit einer ungünstigen Abweichung der Einwirkungen gegenüber den repräsentativen Werten berücksichtigt
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten und Größenabweichungen
γ_L	Teilsicherheitsbeiwert, der die Schwankungen der Einwirkung berücksichtigt
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten und Größenabweichungen
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft

⁶5 %-Quantile des Festigkeitswertes, gemäß [1]

⁷mit einer 75 %igen Wahrscheinlichkeit, dass 95 % der Versuchsergebnisse über diesem Wert liegen, gemäß [2]

Symbolverzeichnis

γ_R	Teilsicherheitsbeiwert der Widerstandsseite
γ_{Rd}	Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Modellunsicherheiten des Widerstandsmodells
γ_S	Teilsicherheitsbeiwert, der sich auf das Klebstoffmaterial bezieht
γ_{Sd}	Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Modellunsicherheiten der Idealisierung der Einwirkungen und/oder Auswirkungen
γ_{tot}	Gesamtsicherheitsfaktor
λ	Relaxationszeit
μ_E	Mittelwert der Einwirkungsseite
μ_R	Mittelwert der Widerstandsseite
ϕ	kumulative Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung
σ	Spannung
σ_{des}	Bemessungswert der Zugspannung
σ_E	Standardabweichung der Einwirkungsseite
σ^e	Spannung bei elastischer Dehnung ε^e
σ_R	Standardabweichung der Widerstandsseite
σ^v	Spannung bei viskoser Dehnung ε^v
τ	Schubspannung
$\tau_{\alpha\beta}$	Exzentrizität von 5 % mit 75 %iger Wahrscheinlichkeit
τ_d	Bemessungswert der Schubfestigkeit
τ_{def}	Dauerschubbeanspruchung, bei der nach 91 Tagen kein tertiäres Kriechen auftritt
τ_{des}	Bemessungsschubspannung unter dynamischer Last
τ_{∞}	Bemessungsschubspannung unter ständiger Last
τ_k	charakteristische Schubfestigkeit
$\tau_{k,91+1}$	charakteristischer Wert der Schubfestigkeit nach 91 Tagen Langzeitbeanspruchung und einem Tag in unbelastetem Zustand
$\tau_{k,\infty}$	charakteristische Schubfestigkeit nach Langzeitbeanspruchung
τ_m	mittlere Schubfestigkeit
Γ_{des}	Bemessungswert der Schubspannung unter dynamischer Belastung
Γ_{∞}	Bemessungswert der Schubspannung unter Dauerlast

1. Einleitung

1.1. Motivation

Holz ist auf Grund seiner guten Bearbeitbarkeit, seiner Dauerhaftigkeit und Widerstandsfähigkeit ein wichtiger Baustoff mit den verschiedensten Einsatzgebieten. Seit jeher wird Holz wegen seiner guten Bearbeitbarkeit, dem Verhältnis zwischen Masse und Festigkeit sowie seiner Widerstandsfähigkeit gegen diverse Einflüsse als Baumaterial eingesetzt. Höhepunkt der handwerklichen Holzbauweisen waren die Fachwerkhäuser im 16. und 17. Jahrhundert. Nach und nach hielten der Stahl- und Stahlbetonbau Einzug in die Bauindustrie und verdrängte den Holzbau immer mehr. Holz wurde vornehmlich als Energieträger zur Herstellung anderer Rohmaterialien verwendet, was zur Rodung vieler Wälder in weiten Teilen Europas führte.

Einen wichtigen Zeitpunkt für den Holzbau markiert das Jahr 1713, wo in Sachsen eine Vorschrift zur Nutzung der Wälder erlassen wurde. Zum ersten Mal wurde vom Prinzip der Nachhaltigkeit gesprochen, welches sich vorläufig nur auf die Holzerzeugung selbst bezog. Heute versteht man unter Nachhaltigkeit auch im Bauwesen einen viel weitläufigeren Begriff, der den Ansprüchen der Wirtschaft, des Umweltschutzes und der Gesellschaft genügen muss [3]. Holz gewinnt unter den Aspekten der Nachhaltigkeit, der Ökologie aber auch der Wirtschaftlichkeit in den letzten Jahren zunehmend Anteile im Bausektor. Das Bauwesen hat die Vorteile von Holzwerkstoffen erkannt und treibt die Entwicklung neuer Produkte voran. Anstelle von einfachen Vollholzprodukten werden im Ingenieurholzbau heute zunehmend Produkte wie Brettschichtholz und Brettsperrholz verwendet. Auch in den Bereichen der horizontalen Aussteifung und der Wärmedämmung gewinnt Holz in Form von Faserplatten, Holzwole und ähnlichen Produkten an Bedeutung. Die jüngsten Entwicklungen finden im Sektor des Verbundbaus statt, mit dem Ziel, jeden Baustoff optimal auszunutzen und ihn nur in den jeweilig idealen Bereichen einzusetzen. Somit kann der Materialverbrauch auf ein Minimum reduziert werden, die Ressourceneffizienz wird optimiert und dem Prinzip der Nachhaltigkeit wird in allen Aspekten Rechnung getragen. Am weitesten etabliert hat sich in diesem Zusammenhang bis dato der Holz-Beton-

1. Einleitung

Verbundbau, welcher vor allem im mehrgeschossigen Holzbau seine Vorzüge ausspielen kann. Jedoch rücken auch der Holz-Stahl- und Holz-Glas-Verbundbau immer weiter in den Fokus der Wirtschaft. Auf letzteren soll sich diese Arbeit konzentrieren.

Das Zusammenwirken dieser beiden auf den ersten Blick vollkommen unterschiedlichen Materialien hat sich in den letzten Jahren in diversen Anwendungsgebieten als effektive und nachhaltige Alternative zu bereits existierenden Systemen herauskristallisiert. Die Grundlage dafür ist der große Vorteil eines annähernd identen Temperaturexpansionskoeffizienten α_T von Holz und Glas. Bei Kalk-Natronsilicatglas gilt $\alpha_T = 9 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ [4], bei Birkenfurniersperrholz (BFU) $\alpha_T = 8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ [5]. Dieser sehr ähnliche Koeffizient reduziert die Ausbildung von Zwängungsspannungen durch unterschiedliche Reaktionen auf Temperatureinflüsse, was vor allem bei Anwendung der Verbundbaustoffe im Fassadenbereich auf Grund der auftretenden Temperaturunterschiede als essenziell betrachtet werden kann. Weitere Vorteile von Glas sind dessen natürliche Transparenz, der Schutz vor Klimaeinflüssen und eine verhältnismäßig hohe Druck- und Drillsteifigkeit. Die großen Nachteile, wie eine im Vergleich zur Druckfestigkeit äußerst geringe Zugfestigkeit und die Sprödigkeit, können durch den Verbund mit Holz kompensiert werden [6]. Wesentlich beim Verbund aus Holz und Glas ist die Verbindung, über welche die Kräfte vom einen auf das andere Material übertragen werden. Dazu kommen zwei unterschiedliche Prinzipien zum Einsatz, welche in Abschnitt 2 näher erläutert werden. Prinzipiell werden die Schubkräfte über eine Verklebung und die Druckkräfte über Klötze übertragen, die dafür verwendeten Materialien können je nach Anwendungsgebiet jedoch variieren. Da auch der Eigengewichtsabtrag der Glasscheibe über die Verklebung selbst erfolgen soll, muss der verwendete Klebstoff gewisse Kriterien bezüglich seines Langzeitverhaltens und seiner Dauerhaftigkeit erfüllen. Da dieser Punkt einen der bisher am wenigsten erforschten Teile des Holz-Glas-Verbundbaus darstellt und nahezu keine normativen Vorschriften für eine derartige Belastung existieren, soll sich die vorliegende Arbeit speziell mit dem Verhalten eines Klebstoffs unter Dauerlast, etwaigen Veränderungen in dessen Eigenschaften und der Ableitung von Sicherheitsfaktoren aus den durch experimentelle Untersuchungen gewonnenen Ergebnissen konzentrieren.

1.2. Zielsetzung

Vorrangiges Augenmerk wird in dieser Arbeit auf das Langzeitverhalten von mit Silikon verklebten Holz-Glas-Verbindungen und in weiterer Folge auf die Herleitung von Sicherheitsbeiwerten, sowohl für kurzzeitige als auch für langfristige Einwirkungen, ge-

legt, wodurch anschließend ein Vorschlag für realistische und wirtschaftliche Faktoren zur Berechnung von Bemessungsfaktoren auf der Widerstandsseite gegeben werden soll. Dies beinhaltet einerseits den Beiwert für Materialsicherheit γ_M und andererseits den Modifikationsbeiwert (k_{mod} [4, 7] beziehungsweise γ_C [2]) und Deformationsbeiwert k_{def} [7] zur Berücksichtigung des Langzeitverhaltens. Für den Modifikationsbeiwert existieren, wie eben angeführt, zwei unterschiedliche Bezeichnungen. Im Eurocode 5 [7] wird für die Festigkeitsabnahme abhängig von der Lasteinwirkungsdauer und dem Feuchtegehalt der Beiwert k_{mod} eingeführt, dieser entspricht dem auf Klebstoffe bezogenen Beiwert γ_C aus der ETAG 002-1 [2]. In der Literatur über Holz-Glas-Verbund (HGV)-Konstruktionen wird häufig die Bezeichnung k_{mod} für die Abminderung der Klebstofffestigkeit unter Dauerbeanspruchung verwendet, diese Vorgehensweise wird auch in dieser Arbeit, unabhängig von der Bezeichnung γ_C aus [2], gewählt. Dazu wird im ersten Schritt die normative Grundlage begutachtet, danach werden alternative Vorschläge aus der Literatur kritisch behandelt.

Auf Basis von experimentellen Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung und Langzeituntersuchungen von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen mit gleichzeitiger Verklebung und Verklotzung“ [8] am Institut für Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau⁸ (ITI) durchgeführt wurden, sowie mit Hilfe von Ergänzungsversuchen im Zuge der vorliegenden Arbeit, wird eine statistische Auswertung der Versuchsergebnisse durchgeführt. Die in den Untersuchungen erhaltenen Resultate werden anschließend detailliert betrachtet und analysiert. Es erfolgt ebenso ein Vergleich zu experimentellen Untersuchungen anderer Forschungsinstitutionen um die Ergebnisse zu überprüfen und zu verifizieren. Um den Teilsicherheitsbeiwert γ_M herzuleiten, wird eine Untersuchung mittels Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung - First Order Reliability Method (FORM) vorgenommen. Die Ergebnisse aus den wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen sowie aus den experimentellen Untersuchungen werden anschließend mit bekannten Bemessungsergebnissen verglichen und deren Plausibilität kontrolliert. Vorhandene Ansätze werden dabei weiterentwickelt und an neue Erkenntnisse angepasst. Durch diese Studien können die unterschiedlichen - sowohl wahrscheinlichkeitstheoretischen als auch empirischen - Zugänge bewertet und eine abschließende Aussage über bemessungsrelevante Sicherheitsfaktoren wie γ_M , k_{mod} und k_{def} getroffen werden.

Abschließend wird ein Ausblick auf die weitere Forschungsarbeit gegeben, um eine Einführung der zuvor vorgestellten Sicherheitsbeiwerte zu ermöglichen und diese zu

⁸Technische Universität Wien, Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau, Karlsplatz 13/259.2, A-1040 Wien

1. Einleitung

bestätigen. Dadurch kann eine wirtschaftlichere Bemessung von HGV-Konstruktionen ermöglicht und ein breiteres Einsatzgebiet erschlossen werden.

2. Stand der Technik im Holz-Glas-Verbundbau

Die Idee Holz und Glas zu verbinden und somit beide Teile tragwerkstechnisch zu nutzen, ist, verglichen mit anderen Bauweisen, noch relativ jung. Daher mussten in den letzten Jahren Berechnungsmodelle entwickelt und sicherheitstheoretische Überlegungen durchgeführt werden, um erste Prototypen zu ermöglichen. Auch in der Normung sind HGV-Konstruktionen noch nicht eindeutig geregelt, weshalb eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) oder eine Zulassung im Einzelfall (ZiE) für die produzierenden Firmen nötig sind. Dieser aufwendige Prozess soll in Zukunft vereinfacht werden, weshalb eine klare Normenregelung anzustreben ist. Auf diese Problematik wird in Abschnitt 2.2 näher eingegangen und Lösungsvorschläge werden abschließend in Abschnitt 7 diskutiert.

2.1. Frühere Forschungsarbeiten

Structural Sealant Glazing (SSG)-Systeme haben schon seit geraumer Zeit eine wichtige Stellung in der Architektur und im Bauwesen. Ende des 20. Jahrhunderts begannen erste Forschungsarbeiten, in welchen Glas direkt mit Holz anstelle von Aluminium verklebt wurde. Am Beginn standen Untersuchungen von Hamm [9, 10] über Wandscheiben, Biegeträger und Plattenbalken aus Holz verbunden mit Glas. Dabei übernahmen auch die Konstruktionsteile aus Glas einen wichtigen Teil der Lastabtragung und waren kein reines architektonisches Element. Er schlug auch ein semiprobabilistisches Sicherheitskonzept für solche Konstruktionen vor. In weiterer Folge entwickelte Kreher [11, 12] HGV-Träger, wobei Holz als „Bewehrung“ für den spröden Baustoff Glas eingesetzt wurde. Es wurde auch Finite-Elemente (FE)-Modellierung angewandt, um das Verhalten der Glasscheiben im Biegeträger zu simulieren. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde hauptsächlich das Gesamttragverhalten von HGV-Konstruktionen untersucht. Niedermaier [13] untersuchte als erster die unterschiedlichen Eigenschaften der diversen Klebstoffe, ehe er auf Grund der Vermeidung von Spannungsspitzen Silikon als am geeignetsten für

2. Stand der Technik im Holz-Glas-Verbundbau

seine weiteren Untersuchungen festlegte. Niedermaier beschäftigte sich vorrangig mit dem Aussteifungspotential von Wandscheiben und stellte gemeinsam mit Kreuzinger erste Berechnungskonzepte [14] für aussteifende Scheiben als HGV-Elemente vor. Auf diesen Ergebnissen aufbauend leitete die Holzforschung Austria⁹ (HFA) ein Forschungsprojekt ein, aus dem das erste marktreife HGV-System hervorging. Das System der gezahnten Koppelleiste wurde in [15, 16] erstmals vorgestellt und zum Patent [17] angemeldet. Diese Entwicklung ermöglicht einen hohen Vorfertigungsgrad und somit eine rasche Montage auf der Baustelle sowie die Möglichkeit des Austauschs einzelner Elemente infolge eines Schadens der Glasscheibe. In Abbildung 2.1 ist das grundsätzliche Prinzip der Aussteifung einer Pfosten-Riegel-Konstruktion aus Holz mit einem HGV-Element dargestellt.

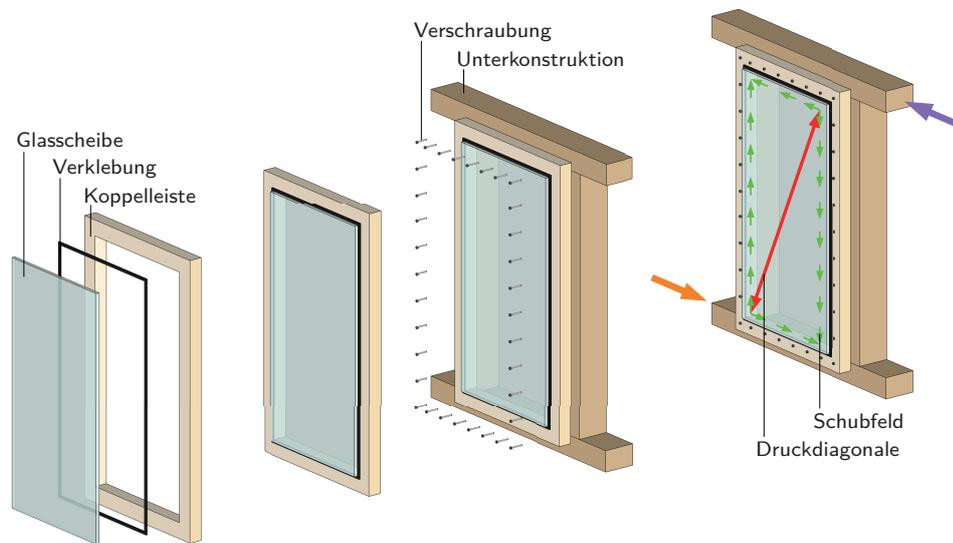


Abb. 2.1.: Prinzip der Aussteifung einer Pfosten-Riegel-Konstruktion mit einem HGV-Element [15]

Bei dem System nach [15] erfolgt die Übertragung der Kräfte aus der Unterkonstruktion in die Glasscheibe lediglich über Schubkräfte entlang der kontinuierlichen Verklebung. Durch die Weichheit des Klebstoffes kann Sprödbruch oder eine Oberflächenbeschädigung des Glases ausgeschlossen werden. Der Lasteintrag erfolgt gleichmäßig über die gesamte Verbindung zwischen Koppelleiste und Glasscheibe. [18]

Am ITI wurde in einem Forschungsprojekt [19] der Tragmechanismus des Schubfelds um die Komponente einer Druckdiagonale ergänzt, wodurch eine Laststeigerung ermöglicht wird, siehe hierfür Abbildung 2.2.

Um die Wirkung beider Tragmechanismen realisieren zu können, musste die Verbindung

⁹Österreichische Gesellschaft für Holzforschung, Franz-Grill-Straße 7, A-1030 Wien

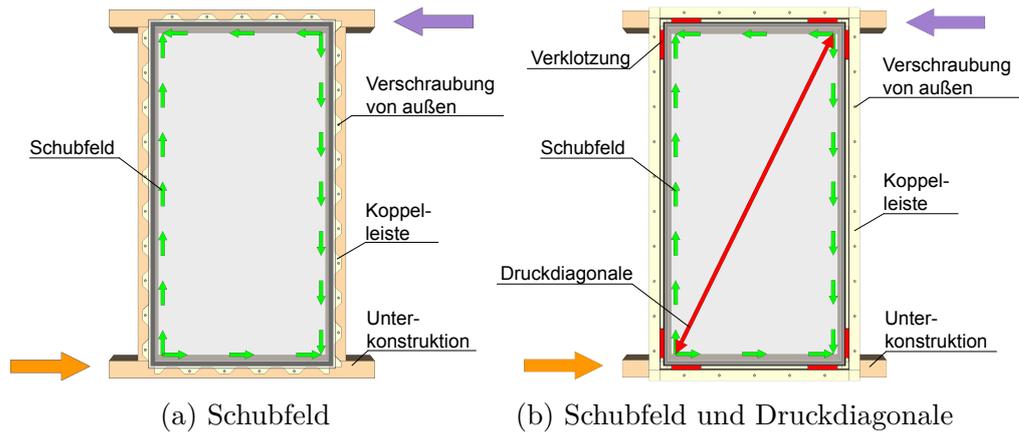


Abb. 2.2.: Kombination zweier Tragmechanismen

zwischen Glas und Holz verändert werden. Um die Ausbildung der Druckdiagonale zu gewährleisten, wurden zusätzlich Klötze angebracht. Diese werden an der Stirnseite der Glasscheibe eingebracht, dürfen aber keinerlei Zugkräfte in das Glas übertragen. Auch diese Entwicklung wurde von der Technische Universität (TU) Wien zum Patent angemeldet [20]. Nachteilig an dieser Ausführung ist die breitere Ausführung der Koppelleiste, welche zur Weiterleitung der Druckkräfte nötig wird. Die unterschiedlichen Ausführungsvarianten nach [15] und [19] werden in Abbildung 2.3 gegenübergestellt.

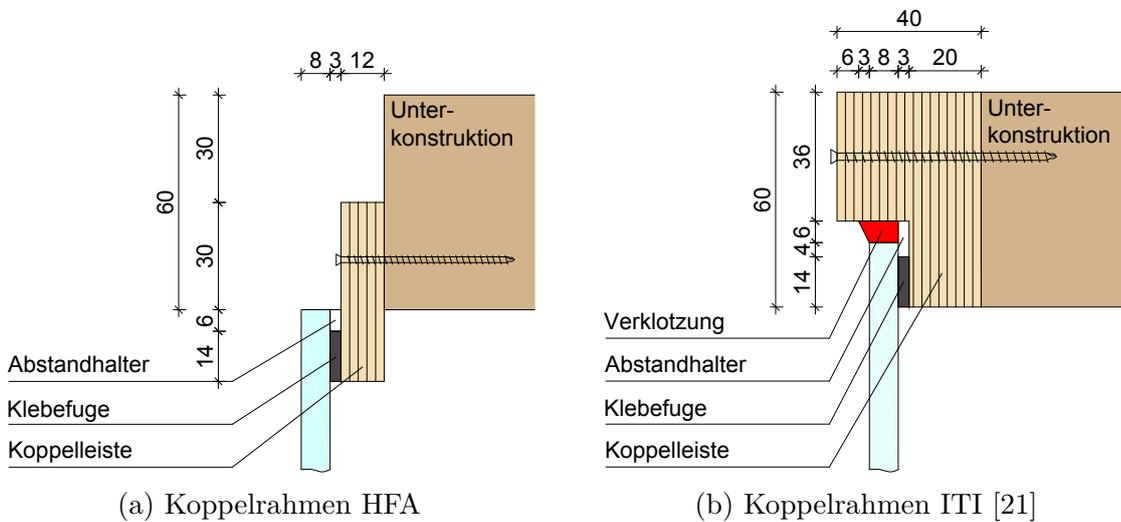


Abb. 2.3.: Unterschiedliche HGV-Anschlussdetails in [mm]

Detailliert behandelt werden diese Berechnungsmodelle vor allem in [14] und [22]. Eine Zusammenfassung beider Tragmechanismen und deren Überlagerung zu einem Ersatzfedermodell ist in [19] dargestellt. Das Verformungsverhalten solcher HGV-Konstruktionen

2. Stand der Technik im Holz-Glas-Verbundbau

mit zusätzlicher Verklotzung wurde von Hochhauser in [6] ausführlich untersucht. Ebenfalls wurde eine genaue Analyse des Beulverhaltens solcher Scheiben unter großen Schub- und Druckbelastungen begutachtet [23].

Parallel zur Entwicklung von Berechnungsmodellen wurden einzelne Klebstoffe untersucht, wobei sich relativ rasch Silikon als am geeignetsten herauskristallisierte [5, 13]. Dies beruht vorrangig auf der Beständigkeit der Silikone gegenüber äußeren Einflüssen, wie Temperatur, chemische Belastung oder Ultraviolett (UV)-Strahlung [24–26]. Es laufen Untersuchungen zur Verklebung mit silanterminierten Epoxidharzen [27], da diese eine höhere Steifigkeit aufweisen und somit auch größere Lasten übertragen können, jedoch sind auch diese äußerst sensibel gegenüber UV-Belastung [28]. Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen beschäftigen sich ausschließlich mit dem Klebstoff OttoColl® S660 der Firma Otto-Chemie¹⁰, mit welchem die gesamten experimentellen Untersuchungen aus Abschnitt 4 durchgeführt wurden. Das Datenblatt des verwendeten Klebstoffs ist in Anhang A.1 beigelegt.

Wesentlich für die Berechnung der Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise ist die Kenntnis der vorhandenen Spannungen in der Verbindung, in diesem Fall im Klebstoff. Durch die beiden Substrate Holz und Glas, welche unterschiedliche Elastizitätsmoduln aufweisen, wird der Spannungszustand in der Klebefuge bei Schubbeanspruchung beeinflusst. Niedermaier zeigte allerdings in [13], dass dieser Einfluss für im Bauwesen übliche Belastungszustände vernachlässigbar ist und die vereinfachte Annahme nach ETAG 002-1 [2] zur Bestimmung der mittleren Schubspannungsverteilung Gültigkeit besitzt. Dennoch wird unter anderem in [29] ein detaillierter Bemessungsansatz gewählt, was eine Reduktion der Material Sicherheitsbeiwerte mit sich bringt. Darauf soll in Abschnitt 2.2 genauer Bezug genommen werden.

Zum Aussteifungspotential und zum Einsatz von HGV-Scheiben im Lastfall Erdbeben fanden in den letzten Jahren diverse Untersuchungen statt [30–32]. Auch in der Verwendung von Holz und Glas als Biegeträger [33–36] sowie in der Erforschung des Verhaltens unterschiedlicher Klebstoffe [27, 37] gab es weitere Forschungsarbeiten.

Im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch das Langzeitverhalten der Silikonverklebung von HGV-Elementen in den Fokus rücken, weshalb die wichtigsten Grundlagen und vorangegangenen Forschungsarbeiten zur Entwicklung eines Sicherheitskonzepts für mit Silikon verklebte HGV-Elemente im folgenden Abschnitt 2.2 genauer erläutert werden.

¹⁰Hermann Otto GmbH, Krankenhausstraße 14, D-83413 Fridolfing

2.2. Grundlagen der Sicherheitstheorie

Das moderne Normenwesen basiert auf dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept, welches nach [1] beim Tragfähigkeitsnachweis charakteristische Einwirkungen E_k um den Teilsicherheitsfaktor γ_F erhöht und charakteristische Materialwiderstände R_k nach [7] um den Modifikationsbeiwert k_{mod} und den Teilsicherheitsbeiwert für Materialwiderstand γ_M abmindert. Mit den dadurch erhaltenen Werten ist der in Gleichung 2.1 gegebene Nachweis zu erbringen.

$$\{E_k \cdot \gamma_F =\} \mathbf{E}_d \leq \mathbf{R}_d \left\{ = \frac{R_k \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \right\} \quad (2.1)$$

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_F basiert auf den Angaben in [1], während für die Beiwerte k_{mod} und γ_M für lastabtragende Verklebungen unterschiedliche Annahmen existieren und eine Diskussion dieser Sicherheitsbeiwerte einen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellen soll.

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wird mit der selben Vorgehensweise wie jener der Tragfähigkeit geführt, wobei die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkung und des Materialwiderstands mit 1,0 angenommen werden können. Dafür wird der Verformungsbeiwert k_{def} eingeführt, der die Zunahme der Verformungen unter einer Dauerlast berücksichtigt. Somit ergibt sich Gleichung 2.2:

$$\{E_k \cdot (1 + k_{def}) =\} \mathbf{E}_d \leq \mathbf{C}_d \{ = C_k \} \quad (2.2)$$

Der Verformungsbeiwert k_{def} wird hier in Anlehnung an den Eurocode 5 [7] eingeführt, da er in der Bemessung von Verklebungen in Normen bisher nicht aufscheint, eine Einführung des Beiwerts aber durchaus als sinnvoll erachtet werden kann. Auch für k_{def} existieren unterschiedliche Annahmen, welche in den folgenden Kapiteln näher erläutert werden.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass für die Bemessung von HGV-Konstruktionen derzeit keinerlei normative Grundlage existiert. Daher wird auf die Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen [2] zurückgegriffen, welche allerdings für das Substrat Holz keinerlei Gültigkeit besitzt. Da in den meisten Fällen der Klebstoff als Verbindung zwischen Glas und dem zweiten Substrat die maßgebende Komponente darstellt, kann diese Leitlinie als Basis für weitere Überlegungen herangezogen

werden. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Notation in [2] von der üblichen Vorgehensweise in heute gültigen Normen und repräsentativen Literaturquellen abweicht, daher wird in den folgenden Kapiteln für eine bessere Vergleichbarkeit im Sinne einer einheitlichen Notation ebenfalls der vorherrschende Zugang gewählt. In Ausnahmefällen wird allerdings auf die genaue Formulierung nach [2] verwiesen. Die ETAG 002-1 [2] wurde in Österreich großteils in die ÖNORM EN 13022-1 [38] und ÖNORM EN 13022-2 [39] für Glas im Bauwesen sowie die Produktnorm für lastübertragende Dichtstoffe ÖNORM EN 15434 [40] übernommen. Ähnliche Inhalte finden sich auch in den Teilen 1 [41] und 2 [42] der ISO 2878. Aus Gründen der Einfachheit wird im Folgenden nur die ETAG 002-1 [2] zitiert, bei Abweichungen der genannten Normen wird explizit darauf hingewiesen.

2.2.1. Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen

Derzeit beziehen sich alle gängigen Bemessungskonzepte auf die ETAG 002-1 [2], einer Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen. Diese stellt eine verbindliche Grundlage für die Erteilung europäischer technischer Zulassungen dar. Sie wurde 1998 herausgegeben, die letzte Fassung erschien in Österreich 2013 mit wenigen Änderungen. Diese Leitlinie gilt, wie in [2] beschrieben, für geklebte Glaskonstruktionen (SSG Systems), mit einem beliebigen Winkel zwischen der Vertikalen und mehr als 7° Neigung gegenüber der Horizontalen. Die Haftflächen der Verklebung sollen dabei aus unbeschichtetem oder anorganisch beschichtetem Glas, sowie aus anodisiertem Aluminium oder nichtrostendem Stahl bestehen. Grundsätzlich erlaubt die ETAG 002-1 [2] derzeit vier verschiedene Ausführungsvarianten von vertikalen geklebten Glaskonstruktionen, siehe Abbildung 2.4. In Österreich sind laut [43] vor- und abgehängte Bauteile und Fassadensysteme gegen Herabfallen zu sichern. Dafür ist das Fassadensystem gemäß einer bautechnischen Zulassung einer Europäischen Technischen Bewertung oder einer harmonisierten Europäischen Norm auszuführen. In der Baustoffliste ÖE [44] wird diese Vorgabe mit einer Beschränkung auf Typ I und Typ III aus Abbildung 2.4 spezifiziert. In der Regel wurden bisher auch nur Systeme dieser Typen genehmigt, Ausnahmen finden sich bei Einbauhöhen unter acht Metern, wo zum Teil auf eine zusätzliche mechanische Scheibensicherung verzichtet werden kann, siehe unter anderem [45].

Bei den Typen I und II erfolgt der Eigengewichtsabtrag über eine mechanische Vorrichtung, alle weiteren auf die Glasscheibe einwirkenden Lasten werden von der Verklebung

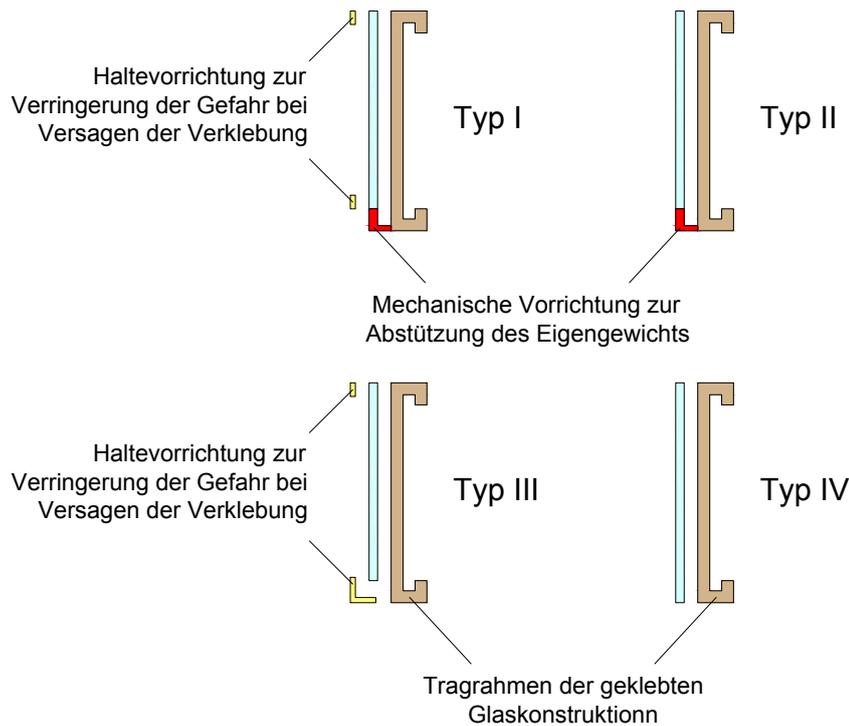


Abb. 2.4.: Schematische Darstellung von Beispielen der verschiedenen Arten von geklebten Glaskonstruktionen [2]

auf die Unterkonstruktion übertragen. Bei den Typen III und IV erfolgt zusätzlich auch der Eigengewichtsabtrag über die Verklebung. Die Typen I und III sehen eine Haltevorrichtung vor, welche die Gefahr eines Absturzes der Glasscheibe im Falle eines Versagens der Verklebung verringern soll. [2]

In Zukunft soll, wenn möglich, auf solche Vorrichtungen verzichtet werden können, weswegen eine genaue Studie des Langzeitverhaltens von Verklebungen unabdingbar ist. Derzeit wird vermehrt Augenmerk auf die Durchsetzung der Typen III und IV gelegt, bei welchen die Klebefuge dauerhaft Schubkräfte infolge des Eigengewichts aufnehmen muss. Diese Fassadentypen können aber nur unter einer Senkung der derzeit gültigen Sicherheitsfaktoren für die Materialicherheit und eine dauerhafte Lasteinwirkung zu einer wirtschaftlich sinnvollen Ausführung kommen, da die Klebefugen ansonsten zu große Dimensionen aufweisen würden. Dies bringt einerseits Probleme in der Herstellung mit sich und wird andererseits in der Architektur nicht gewünscht, da diese Bereiche in der Fassade somit nicht transparent sind.

Die ETAG 002-1 [2] verweist, wie im ersten Absatz dieses Abschnitts erläutert, in keiner Weise auf eine Verklebung mit den Substraten Glas und Holz. Dies führt zu neuerlicher Skepsis auf Seiten der Gesetzgebung, da eine HGV-Verklebung somit ein unreguliertes

2. Stand der Technik im Holz-Glas-Verbundbau

Feld in der Baubranche darstellt. Dennoch stellt auch eine Verklebung von Holz und Glas eine SSG-Fassade dar, weswegen bei Zulassungen meist auf [2] verwiesen wird. Es werden Kriterien angeführt, welche für die Zulassung eines Klebstoffs für eine SSG-Konstruktion erfüllt sein müssen. Für den in dieser Arbeit behandelten Klebstoff wurden die Nachweise bezüglich der einwirkenden Umwelteinflüsse bereits von der HFA in [24] und [25] erbracht. Zum Langzeitverhalten und zum Materialsicherheitsfaktor des verwendeten Klebstoffs wurden in [5] erste erweiterte Überlegungen angestellt, diese werden in Abschnitt 2.2.2 näher beleuchtet.

Bezüglich anzusetzender Sicherheitsfaktoren zur Berechnung der Bemessungsschubspannungen τ_{des} gibt [2] für kurzzeitige, beziehungsweise dynamische Belastungen folgendes Kriterium vor¹¹:

$$\tau_{des} = \frac{R_{u,5}^{(2)}}{\gamma_{tot}} \quad (2.3)$$

Dasselbe Prinzip gilt auch für kurzzeitige Zugbelastungen, siehe Gleichung 2.4:

$$\sigma_{des} = \frac{R_{u,5}^{(2)}}{\gamma_{tot}} \quad (2.4)$$

Das bedeutet, dass die charakteristische Festigkeit, ermittelt aus statistischen Eingangsgrößen nach experimentellen Untersuchungen, durch γ_{tot} dividiert werden muss, um die Bemessungsspannung zu erlangen. γ_{tot} wird in [2] beschrieben als Gesamtsicherheitsfaktor, welcher national festgelegt werden muss. Der Wert 6 für γ_{tot} wird jedoch empfohlen.

In der EN 13022-2 [39] wird zur Ermittlung der Bemessungsspannung σ_{des} ein anderer Ansatz, abhängig von der Elastizitätsgrenze des verwendeten Klebstoffs, gewählt. Auf diesen soll auf Grund des inkonsistenten Zugangs zur Bemessung der Klebefugen im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen werden.

Für dauerhafte Schubbeanspruchung erhält Gleichung 2.5¹² Gültigkeit:

$$\tau_{\infty} = \frac{\tau_{des}}{\gamma_C} \quad (2.5)$$

Dabei ist γ_C nach [2] größer oder mindestens gleich 10 anzusetzen und stellt den Keh-

¹¹In [2] angeschrieben als: $\Gamma_{des} = R_{u,5}^{(2)}/\gamma_{tot}$

¹²In [2] angeschrieben als: $\Gamma_{\infty} = \Gamma_{des}/\gamma_C$

wert des in [7] eingeführten Modifikationsbeiwerts für Langzeitbeanspruchung $k_{mod,lang}$ dar. Gleichung 2.5 kann mit $k_{mod,lang} = 0,1$ umgeformt werden zu:

$$\tau_{\infty} = \tau_{des} \cdot k_{mod,lang} \quad (2.6)$$

Betrachtet man nun die beiden soeben beschriebenen Sicherheitsfaktoren $\gamma_{tot} = 6$ und $k_{mod,lang} = 0,1$ resultiert für eine ständige Belastung der Klebefuge nach [2] eine Sicherheit des Faktors 60. Die Dauerlast darf also nur $1/60$ der ermittelten charakteristischen Schubspannung betragen. Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sind in [2] keine Kriterien angeführt.

Da die ETAG 002-1 [2] ursprünglich aus dem Jahr 1998 stammt und seit damals kaum überarbeitet wurde, bezieht sich diese noch auf das deterministische Sicherheitskonzept, in welchem die Sicherheitsbeiwerte auf Einwirkungs- wie auf Widerstandsseite zu einem gemeinsamen Beiwert zusammengefasst werden. Dazu findet sich in ISO 28278-2 [42], welche ansonsten in weiten Teilen das Bemessungskonzept der ETAG 002-1 [2] übernimmt, folgende Ergänzung¹³:

$$\gamma_{tot} = \gamma_F \cdot \gamma_M \quad (2.7)$$

Um den Materialsicherheitsfaktor γ_M bei ständig einwirkender Last zu erhalten, muss γ_{tot} gemäß [1] durch $\gamma_F = 1,35$ dividiert werden, was ein γ_M von 4,44 ergibt. Die Gesamtsicherheit für eine Dauerbelastung auf Widerstandsseite ergibt sich somit nach [2] und Gleichung 2.7 mit $1/44,44$.

In den Sicherheitsbeiwerten der ETAG 002-1 [2] wird nicht zwischen veränderlichen und ständigen Einwirkungen unterschieden. Das bedeutet, dass sich bei der Umrechnung auf die Teilsicherheitsbeiwerte nach semiprobabilistischem Sicherheitskonzept aufgrund der Differenz der Teilsicherheitsbeiwerte γ_F auf Einwirkungsseite unterschiedliche Materialsicherheitsbeiwerte γ_M ergeben. Bei der Rückrechnung aus γ_{tot} unter veränderlicher Einwirkung mit $\gamma_F = 1,5$ würde der Materialsicherheitsfaktor $\gamma_M = 4,0$ betragen.

Der Teilsicherheitsbeiwert auf Widerstandsseite sollte jedoch für veränderliche und ständige Einwirkungen nach den heute üblichen Sicherheitsbetrachtungen der Eurocodes identisch sein, da die gegebenen Unsicherheiten der Belastungen mit den Teilsicherheitsbeiwerten γ_F berücksichtigt werden. Diese Inkonsistenz in der Bemessung mit globalem

¹³In [42] angeschrieben als: $\gamma_{tot} = \gamma_L \cdot \gamma_S$

Sicherheitsbeiwert kann somit mit der semiprobabilistischen Methode ausgeglichen und behoben werden.

Laut ETAG 002-1 [2] ist auch der Nachweis der mechanischen Ermüdung zu erbringen. Dafür muss in diversen Lastzyklen bis zur theoretischen Spannungsobergrenze σ_{des} belastet werden. Anschließend wird an den Probekörpern die Kurzzeitfestigkeit überprüft, wobei σ_{des} so gewählt werden muss, dass gegenüber einer Prüfung der Kurzzeitfestigkeit ohne Vorbelastung kein signifikanter Verlust entsteht. In [2] ist der Nachweis der mechanischen Ermüdung nur für Zugversuche angeführt, kann auf Grund des identen Zusammenhangs zwischen der charakteristischen Festigkeit und der Bemessungsspannung (siehe Gleichungen 2.3 und 2.4) aber auf dieselbe Art und Weise auch für Schubversuche durchgeführt werden. Da, wie zuvor erwähnt, der Eigengewichtsabtrag der Glasscheibe über die Schubverklebung im Vordergrund steht, wird in den folgenden Kapiteln hauptsächlich auf die Schubspannungen verwiesen.

2.2.2. Konzept der Holzforschung Austria

In [5] wurden erstmals Versuche durchgeführt, die das Ziel hatten, das Langzeitverhalten von Verklebungen von Holz und Glas abzubilden. Es wurden unterschiedliche Klebstoffe und Geometrien untersucht, um jene Bemessungsschubbeanspruchung τ_{∞} zu ermitteln, die nach 91 Tagen unter bestimmten klimatischen Bedingungen zu keinem Zuwachs der Verformungen mehr führt. Für Silikon ist laut [5] dieser Wert mit $0,04 N/mm^2$ zu begrenzen und wird fortan als τ_{def} bezeichnet. Die HFA bediente sich also eines Verformungskriteriums um den Festigkeitsnachweis für Langzeitbeanspruchung führen zu können. Aus den Ergebnissen nach [5] resultiert für das Verhältnis von τ_{def} zu τ_k folgende Sicherheit auf Materialseite:

$$\frac{\tau_{def}}{\tau_k} = \frac{0,04}{0,6} = \frac{1}{15} \quad (2.8)$$

Die charakteristische Kurzzeitschubfestigkeit τ_k wurde dabei mit $0,6 N/mm^2$ angenommen. Dieser Wert wurde aus Versuchen mit unterschiedlichen Silikonklebstoffen ermittelt, wobei anschließend ein Mittelwert aus den Ergebnissen gewählt wurde. Die Annahme einer Festigkeit von $0,6 N/mm^2$ stellt also kein konkretes Ergebnis der experimentellen Untersuchungen, sondern einen Mittelweg aus den gewonnenen Erkenntnissen dar.

Um einen Vergleich zu den in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Sicherheitsfaktoren ziehen zu können, ist die Multiplikation des in Gleichung 2.8 ermittelten Nenners mit dem

Beiwert $\gamma_F = 1,35$ notwendig. Daraus resultiert eine Gesamtsicherheit von $1/20,25$. Hier ist erkennbar, dass die HFA von einem geringeren Sicherheitsniveau ausgeht, als durch [2] festgelegt und somit einen deutlich progressiveren Zugang wählt. Zu bemerken ist jedoch, dass die hier vorgenommene Auswahl der Sicherheitsfaktoren nur für einen konkreten Silikonklebstoff Gültigkeit besitzt.

Da sich diese pauschale Sicherheit auf Materialseite aus Gleichung 2.8 aus den Werten für eine Dauerbeanspruchung $k_{mod,lang}$ und dem Materialsicherheitsfaktor γ_M zusammensetzen muss, wurde in [5] bereits vor der Bestimmung von $k_{mod,lang}$ ein Materialsicherheitsbeiwert γ_M gewählt, der anschließend in die Berechnung einfließt.

Dafür wurde das in Gleichung 2.3 beschriebene Kriterium herangezogen, wobei in dynamischen Versuchen unterschiedliche Lastniveaus geprüft wurden. Daraufhin konnte der Gesamtsicherheitsfaktor aus dieser Gleichung in einen Teilsicherheitsbeiwert für den Materialwiderstand mit $\gamma_M = 3$ übertragen werden. Somit ergibt sich für den zuvor beschriebenen Zusammenhang folgende Gleichung:

$$\frac{\tau_{def}}{\tau_k} = \frac{k_{mod,lang}}{\gamma_M} = \frac{k_{mod,lang}}{3} = \frac{0,04}{0,6} \quad (2.9)$$

Nach Umformen resultiert $k_{mod,lang}$ somit in:

$$k_{mod,lang} = \frac{0,04 \cdot 3}{0,6} = 0,2 \quad (2.10)$$

Zusammengefasst wurde also im Vergleich zwischen [2] und [5] der Sicherheitsfaktor für den Materialwiderstand von $\gamma_M = \gamma_{tot}/\gamma_F = 6/1,35 = 4,44$ auf $\gamma_M = 3$ und der Sicherheitsfaktor für die Dauerschubbeanspruchung von $\gamma_C = 10$ auf $1/k_{mod,lang} = 1/0,2 = 5$ reduziert. Die einzelnen Teilsicherheitsfaktoren wurden verringert, was im Vergleich der Sicherheiten von $1/44,44$ aus [2] und $1/15$ aus [5] in einer Steigerung der aufnehmbaren Last um etwa den Faktor 3 resultiert.

In [5] finden sich auch erstmals Annahmen zum Verformungsbeiwert k_{def} . Dabei wird zwischen langfristigen Lasten unter normaler Temperaturbeanspruchung und langfristigen Lasten unter $55^\circ C$ unterschieden. Die jeweiligen Werte wurden aus einem Vergleich des Verformungsmoduls ohne vorangegangene Dauerbelastung G_0 und dem Verformungsmodul nach einer Dauerbeanspruchung τ_{def} für 91 Tage G_{91} errechnet. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 2.11 dargestellt.

$$k_{def} = \frac{G_0}{G_{91}} \quad (2.11)$$

Daraus ergibt sich nach [5] unter normaler Temperaturbeanspruchung ein Verformungsbeiwert k_{def} von 1,00, für erhöhte Temperaturbeanspruchung unter 55 °C wird dieser mit 1,60 angegeben.

2.2.3. Überlegungen der TU Wien im Forschungsprojekt „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept“

Im Forschungsprojekt „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept“ der TU Wien [19] wurde ein Mittelweg zwischen den beiden Zugängen aus [2] und [5] gewählt. Die Grundidee war, aufgrund Unsicherheiten aus fehlender Qualitätssicherung den Sicherheitsfaktor $\gamma_{tot} = 6$ zu übernehmen, dieser wurde aber direkt als Materialsicherheitsbeiwert γ_M angesetzt. Es sollte ein allgemeingültiges Bemessungskonzept entwickelt werden, weshalb die Annahme für $k_{mod,lang}$ aus [5] nicht übernommen werden konnte.

Der Designwert des Widerstandes nach Dauerbeanspruchung ermittelt sich für Schubbeanspruchung wie folgt:

$$R_{d,lang} = \frac{R_k \cdot k_{mod,lang}}{\gamma_M} = \frac{\tau_k \cdot k_{mod,lang}}{\gamma_M} = \tau_d \quad (2.12)$$

Zur Bestimmung des Modifikationsbeiwerts $k_{mod,lang}$ wird in [19] ein Abklingbeiwert α gemäß Gleichung 2.13 eingeführt. Dieser setzt sich zusammen aus dem Verhältnis der charakteristischen Schubfestigkeit nach Langzeitbeanspruchung $\tau_{k,\infty}$ und der Dauerschubbeanspruchung τ_{def} , bei der kein Anwachsen der Verformungen feststellbar ist.

$$\alpha = \frac{\tau_{k,\infty}}{\tau_{def}} \quad (2.13)$$

Da $\tau_{k,\infty}$ nicht bekannt ist, erlangt die Kenngröße $\tau_{k,91+1}$ größere Bedeutung. Dies ist die Schubfestigkeit nach 91 Tagen Dauerbeanspruchung mit der zugehörigen Belastung τ_{def} und einem Tag in unbelastetem Zustand, welche nach [2] die charakteristische

Schubfestigkeit am Ende der vorgeschriebenen Langzeituntersuchungen darstellt. Auf Basis dieser Kenngrößen darf der Abklingbeiwert α in Anlehnung an γ_M mit 6 gewählt werden, wenn Gleichung 2.14 erfüllt ist.

$$\frac{\tau_{k,91+1}}{\tau_k} \geq 0,8 \Rightarrow \alpha = 6 \quad (2.14)$$

Ist diese Bedingung auch bei einer Verringerung von τ_{def} und einer damit einhergehenden Steigerung von $\tau_{k,91+1}$ nicht erfüllt, scheidet laut [19] der Klebstoff direkt für die Verwendung als tragende Schubverklebung aus. Bei Erfüllung von Gleichung 2.14 kann in weiterer Folge der Modifikationsbeiwert für langfristige Beanspruchung nach folgender Gleichung errechnet werden:

$$k_{mod,lang} = \frac{\tau_{def} \cdot \alpha}{\tau_k} \leq 0,2 \quad (2.15)$$

Somit wird in [19] eine Gesamtsicherheit mit $\gamma_M = 6$, $k_{mod,lang} = 0,2$ und $\gamma_F = 1,35$ für ständige Einwirkungen von $1/40,5$ eingeführt. Auf Widerstandsseite entspricht dies einer Sicherheit von $1/30$.

Auch für den Verformungsbeiwert k_{def} wird in [19] ein anderer Zugang als in [5] gewählt. Gemeinsam ist, dass die in [2] vorgeschriebenen Langzeituntersuchungen zur Ermittlung herangezogen werden, jedoch beruht die Berechnung nicht auf der Änderung der Verformungsmoduln unter Langzeitbeanspruchung, sondern rein auf dem Kriechverhalten der Versuchskörper. Es wird die Verformung w_0 unmittelbar nach Lastaufbringung und die Verformung nach 91 Tagen unter Last w_{91} benötigt, um k_{def} nach Gleichung 2.16 bestimmen zu können.

$$k_{def} = \frac{w_{91}}{w_0} - 1 \quad (2.16)$$

2.2.4. Vergleich der Konzepte

Das Bemessungskonzept nach [2] wurde 1998 erstmals veröffentlicht und stammt somit aus einer Zeit, in der die Forschung mit elastischen Klebstoffen noch keine fundierten Ergebnisse bezüglich des Langzeitverhaltens lieferte. Seit damals wurden jedoch einige Forschungs- (unter anderem [5, 8, 15, 19, 46]) und Bauprojekte [11, 47, 48] realisiert,

2. Stand der Technik im Holz-Glas-Verbundbau

die die andauernde Tragfähigkeit von Silikonklebstoffen belegen. Aus diesen Gründen kann der aus [2] rückgerechnete Sicherheitsfaktor für den Materialwiderstand unter Dauerlast von $1/44,44$ als äußerst konservativ beschrieben werden. Im Vergleich dazu stellt das Vorgehen der HFA in [5] jedoch einen progressiven Zugang dar. Daher wurde in [19] von Seiten der TU Wien ein Mittelweg eingeschlagen, woraufhin in [8] nähere Untersuchungen zum Langzeitverhalten von verklebten HGV-Konstruktionen folgten und dessen Ergebnisse in dieser Arbeit vertieft betrachtet werden. In Abbildung 2.5 sind die Bemessungswerte den einzelnen Sicherheitskonzepten zufolge gesammelt veranschaulicht.

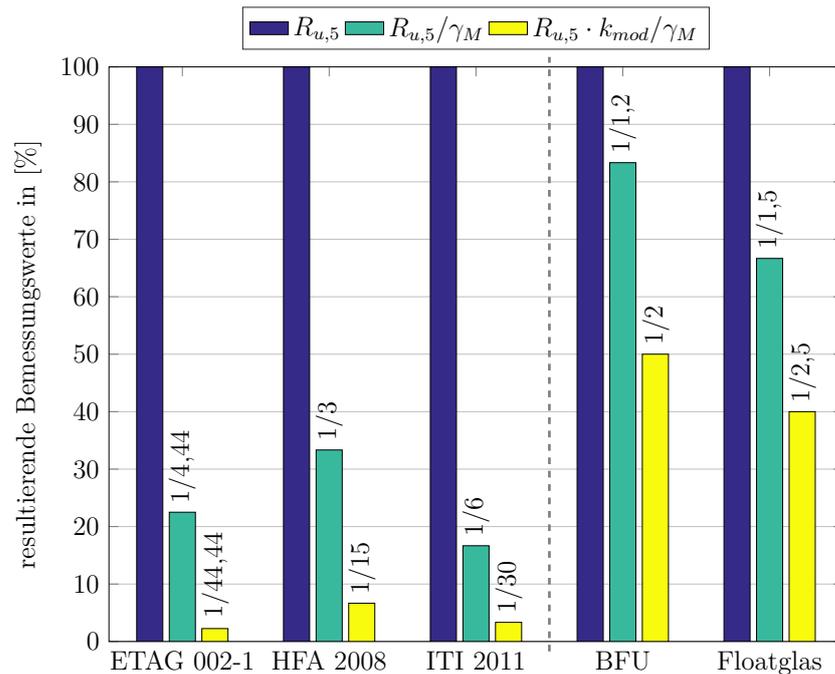


Abb. 2.5.: Bemessungswerte nach unterschiedlichen Sicherheitskonzepten und Werkstoffen

Zum Vergleich werden in Abbildung 2.5 die Sicherheiten der Substrate des Klebstoffs in einer HGV-Konstruktion gezeigt. Die Koppelleiste wird grundsätzlich aus BFU gemäß den Bestimmungen in [49] gefertigt, wofür in [7] ein Teilsicherheitsbeiwert γ_M von 1,2 und für Nutzungsklasse 1 und 2 bei ständiger Lasteinwirkungsdauer ein Modifikationsbeiwert k_{mod} von 0,60 angegeben wird. Auf Nutzungsklasse 3 wird nicht näher eingegangen, da HGV-Elemente nach [45] derzeit lediglich für Nutzungsklassen 1 und 2 zugelassen sind. Die Nutzungsklassen geben an, in welchem Umgebungsklima die jeweilige Konstruktion eingesetzt werden darf. Dabei entspricht Nutzungsklasse 2 einer Temperatur von 20°C bei einer relativen Luftfeuchte kleiner als 85%. Dies entspricht bei den meisten Nadelhölzern einer Gleichgewichtsfeuchte unter 20% und bezieht sich auf die klimatischen Bedingungen

in Innenräumen von Nutzbauten wie Lagerhallen oder überdachten Konstruktionen im Freien, deren Bauteile keiner freien Bewitterung ausgesetzt sind [7]. Nutzungsklasse 1 stellt strengere Anforderungen an die Konstruktion mit einer maximalen Gleichgewichtsfeuchte kleiner als 12 %, was der Anwendung in Innenräumen, beispielsweise von Wohn- oder Bürogebäuden, entspricht.

Als Glasscheibe sind einfaches Floatglas, Einscheibensicherheitsglas (ESG), Verbundsicherheitsglas (VSG) und teilvorgespanntes Glas (TVG) zugelassen. Für das Beispiel in Abbildung 2.5 wurde Floatglas gewählt, da dafür laut [4] die höchsten Sicherheitsbeiwerte anzusetzen sind. Somit sind der Teilsicherheitsbeiwert γ_M gleich 1,5 und der Modifikationsbeiwert k_{mod} für ständige Lasten gleich 0,6. Im konstruktiven Glasbau erfolgt die Berechnung des Bemessungswiderstandes gemäß Gleichung 2.17:

$$R_d = \frac{f_k \cdot k_{mod} \cdot k_b}{\gamma_M} \quad (2.17)$$

Dabei fließt ein zusätzlicher Abminderungsfaktor für die Art der Beanspruchung k_b in die Berechnung ein. Um in Abbildung 2.5 eine einheitliche Darstellung zu gewährleisten, wird die Art der Beanspruchung nicht in den Vergleich miteinbezogen. Dafür wird von einer Plattenbeanspruchung ($k_b = 1,0$ [4]) ausgegangen, die allerdings lediglich für Windsog oder Anpralllasten beziehungsweise für die Sicherung gegen Absturz von Personen maßgebend wird. Die Hauptbelastung eines HGV-Elements im Anwendungsfall einer aussteifenden Scheibe wird im Allgemeinen durch Eigengewichtsabtrag und zufolge aussteifender Wirkung gegen Windbelastung oder Erdbebenkräfte entstehen. Dies würde einer Scheibenbeanspruchung entsprechen. Dafür wird in [4] der Abminderungsfaktor für die Art der Beanspruchung k_b von 0,8 verlangt, was in Abbildung 2.5 einen zusätzlichen Einflussfaktor darstellen würde.

Klar hervor geht aus diesem Vergleich das übermäßig hohe Sicherheitsniveau auf Seiten des Klebstoffs, verglichen mit den anderen beiden Baustoffen. Obwohl Glas spröde bricht und sich das Versagen nicht ankündigt, sind die entsprechenden Beiwerte geringer angesetzt als bei einer weichen Verklebung, bei der sich das Erreichen der Tragsicherheit durch große Verformungen ankündigt. Ein Versagen könnte somit vorzeitig erkannt und etwaige Sicherheitsmaßnahmen eingeleitet werden. Dennoch ist das Vertrauen in den Klebstoff derzeit noch zu gering, um eine verhältnismäßige Steigerung der Bemessungswerte erwarten zu können. Es kann jedoch versucht werden, die Teilsicherheitsbeiwerte so anzupassen, dass die aufnehmbaren Lasten der Klebefuge in einem Ausmaß gesteigert werden, welches eine wirtschaftliche und sinnvolle Nutzung der Verklebung für den Abtrag des Eigen-

gewichts und das Ableiten von Windsog ermöglicht, da auch im Bemessungskonzept der HFA [5] im Gegensatz zur ETAG 002-1 [2] bereits die dreifache Last aufgenommen werden darf.

2.2.5. Weitere sicherheitstheoretische Überlegungen

Von Wellershoff [50] und Peters [51] werden ähnliche Zugänge zur Berücksichtigung des Langzeitverhaltens von geklebten Konstruktionen gewählt. In [50] wird der Faktor $f_{T,t}$ zur Reduktion der Schubfestigkeit des Klebstoffs infolge der Belastungszeit und der Klebstofftemperatur eingeführt, wodurch sich die Bemessungsspannung nach Gleichung 2.18 ergibt. Der Faktor $f_{T,t}$ wird aus der zeitabhängigen Kriechnachgiebigkeit I ermittelt, welche auf Basis experimenteller Untersuchungen bestimmt werden kann. Es wird darauf hingewiesen, dass auch weitere Umwelteinflüsse wie Luftfeuchte und UV-Strahlung von Bedeutung sein können. Eine Bestimmung von tatsächlichen Werten fehlt in dieser Arbeit allerdings.

$$\tau_d = \frac{\tau_k \cdot f_{T,t}}{\gamma_M} \quad (2.18)$$

Peters [51] greift auf das deterministische Sicherheitskonzept zurück und fasst alle Einflussfaktoren im Gesamtabminderungsfaktor f_{ges} zusammen. Die Abminderungsfaktoren k_1 bis k_4 berücksichtigen Temperatur, Alterung, Kriechen sowie schwankende Materialeigenschaften und Unsicherheiten in der Berechnung. Nach Gleichung 2.19 wird eine zulässige Spannung berechnet, wodurch die Bestimmung von γ_M und die Miteinbeziehung von γ_F entfällt.

$$\begin{aligned} \text{zul } \tau &= f_{ges} \cdot R_{u,5} \\ \text{mit } f_{ges} &= k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Peters beurteilt in [51] unter anderem den Zweikomponenten-Silikonklebstoff DC[®] 993 der Firma Dow Corning¹⁴ [29] bezüglich seiner Materialeigenschaften und erhält ein f_{ges} von 0,131 wobei der Faktor k_3 , welcher dem k_{mod} entspricht, mit 0,5 angegeben wird. Ein f_{ges} von 0,131 bedeutet umgelegt auf ein semiprobabilistisches Sicherheitskonzept eine Gesamtsicherheit $k_{mod}/\gamma_M = 1/7,63$, was deutlich unter den zuvor vorgestellten Sicherheitsbeiwerten liegt, siehe Abbildung 2.5. Dabei gilt es allerdings zu berücksichtigen,

¹⁴Dow Corning GmbH Wiesbaden, Rheingaustraße 34, D-65201 Wiesbaden

dass in den zuvor beschriebenen Bemessungskonzepten nach [2, 5, 19] auch Einflüsse aus Wasserlagerung, Reinigungsmittel und Schwefeldioxid mit einbezogen werden, was von Peters in [51] vernachlässigt wird. Der Klebstoff DC[®] 993 ist dahingehend von besonderem Interesse, da dieser ähnliche Materialeigenschaften wie der im Rahmen dieser Arbeit geprüfte Klebstoff OttoColl[®] S660 besitzt. Des Weiteren existieren ausgiebige Untersuchungen zum Langzeitverhalten [46] des Vorproduktes DC[®] 983, wo gezeigt wird, dass der Klebstoff nach 25 Jahren realer Alterung, davon 23 Jahre frei bewittert und zwei Jahre eingelagert, das Kriterium nach ETAG 002-1 [2] einer geforderten Restscherfestigkeit größer 75 % der Anfangsfestigkeit erfüllt. Auf die detaillierten Ergebnisse wird in Abschnitt 6.3 genauer eingegangen.

In der Europäischen Technischen Zulassung des Klebstoffs DC[®] 993 [29] wird zur Bemessung der Klebefuge neben der in der ETAG 002-1 [2] genannten simplen Methode der Berechnung der erforderlichen Klebefugenbreite auch eine umfangreichere Methode für große Durchbiegungen der Glasscheibe ($w \geq a/100$) unter Berücksichtigung der Rotation der Klebefuge angegeben. Dies ist von Bedeutung, da unter den Voraussetzungen der Berücksichtigung der Spannungsspitzen der Sicherheitsfaktor γ_{tot} aus [2] gemäß [29] für diesen Klebstoff von 6 auf 4 gesenkt werden darf. Die Senkung des Sicherheitsbeiwerts wird hier mit einer erhöhten Genauigkeit in der Berechnung der auftretenden Spannungen begründet.

Abschließend kann festgehalten werden, dass unterschiedliche Bemessungskonzepte existieren, die zum Teil nicht mehr dem heutigen Stand der Technik genügen. Mehrere Untersuchungen weisen auf eine unterschätzte Tragfähigkeit der verwendeten Klebstoffe seitens ETAG 002-1 [2] hin, jedoch konnte noch keine Reduzierung der Sicherheitsfaktoren erreicht werden, weshalb weitere detaillierte Untersuchungen notwendig sind.

3. Mechanische Beschreibung von zeitabhängigem Materialverhalten

Anelastisches Materialverhalten zeigt sich bei beinahe allen gängigen Baustoffen unter bestimmten Belastungen. Im vorliegenden Fall einer HGV-Konstruktion sind dabei vor allem die Bestandteile Holz und Verklebung zu betrachten. Für das Substrat Holz wurde die Frage nach dem Verhalten des Materials unter dauernder oder wechselnder Belastung in der Literatur schon ausreichend behandelt und auch in [7] normativ verankert. Bei der Verklebung sind diesbezüglich noch einige Fragen offen, weshalb sich diese Arbeit vorrangig mit der Klärung des Verhaltens des Silikonklebstoffs unter Dauerlast beschäftigt.

3.1. Viskoelastisches Materialverhalten von Baustoffen

Wird im konkreten Fall die Schubbelastung auf die Silikonfuge über eine gewisse Zeitdauer konstant gehalten, nimmt die Schubverzerrung mit der Zeit zu. Diese zeitabhängige Zunahme der Verzerrungen bei gleichbleibender Spannung wird als Kriechen bezeichnet. Wird hingegen die Dehnung konstant gehalten, nimmt die vorherrschende Spannung ab. Dieses Phänomen ist als Relaxation bekannt. Genauso können diese Symptome unter Zug- oder Druckbeanspruchung auftreten. Die Einflüsse müssen beim Nachweis der Tragfähigkeit beachtet werden, da es dadurch zu Lastumlagerungen oder Verformungen mit Schadensfolge kommen kann. Da die Relaxation des Klebstoffs in HGV-Konstruktionen allerdings keine Auswirkung auf die Tragfähigkeit hat, wird in dieser Arbeit das Augenmerk auf das Kriechverhalten gelegt. In Abbildung 3.1 ist eine typische Kriechkurve dargestellt. [52]

Deutlich zu erkennen ist die elastische Anfangsverformung zum Zeitpunkt $t = 0$. Anschließend unterscheidet man in Abhängigkeit von der Kriechgeschwindigkeit $d\varepsilon/dt$ zwischen Primär-, Sekundär- und Tertiärphase der Kriechkurve. In der Primärphase nimmt die Kriechgeschwindigkeit ab, während sie in der Sekundärphase konstant bleibt und in der Tertiärphase wiederum zunimmt. Eine werkstoffspezifische Kriechkurve muss

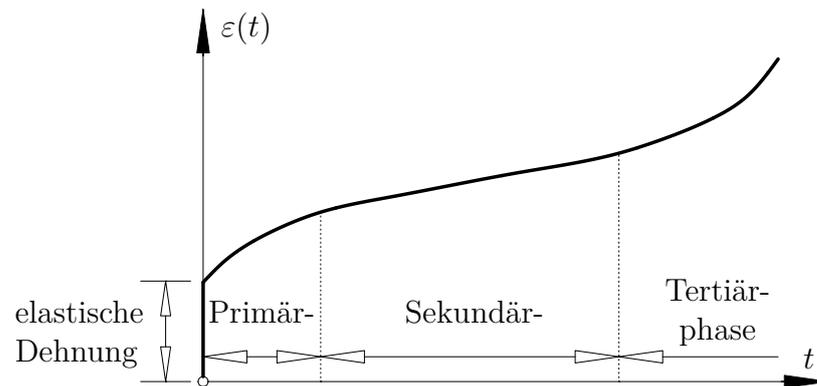


Abb. 3.1.: Typischer zeitlicher Verlauf des Kriechens

nicht alle Phasen durchlaufen, ein Übergang in die Tertiärphase ist im Allgemeinen zu vermeiden, da dies in der Regel zum Bruch führt. Entfernt man die Last zu einem bestimmten Zeitpunkt, nimmt die Verformung sprunghaft ab. Danach folgt eine stetige Abnahme der Dehnung mit der Zeit.

Es sollen nun einige linear viskoelastische Werkstoffmodelle dargestellt werden, die zur Beschreibung eines solchen Materialverhaltens herangezogen werden können. [52]

3.2. Rheologische Modelle zur Beschreibung des Kriechverhaltens

Eines der bekanntesten theoretischen Modelle zur Beschreibung eines viskoelastischen Materialverhaltens stellt das Maxwell'sche Werkstoffmodell¹⁵ dar. Dabei setzt sich die Verzerrung ε zum Zeitpunkt t aus einem elastischen Anteil ε^e und einem viskosen Anteil ε^v zusammen, siehe Gleichung 3.1 [52]:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^v \quad (3.1)$$

Bei dem Modell müssen eine Feder und ein Dämpfer in Serie angeordnet werden, siehe Abbildung 3.2.

Aus dem Hooke'schen Gesetz¹⁶ [53] folgt für den elastischen Anteil der Verformung:

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} \quad (3.2)$$

¹⁵James Clerk Maxwell (1831-1879)

¹⁶Robert Hooke (1635-1703)

3.2. Rheologische Modelle zur Beschreibung des Kriechverhaltens

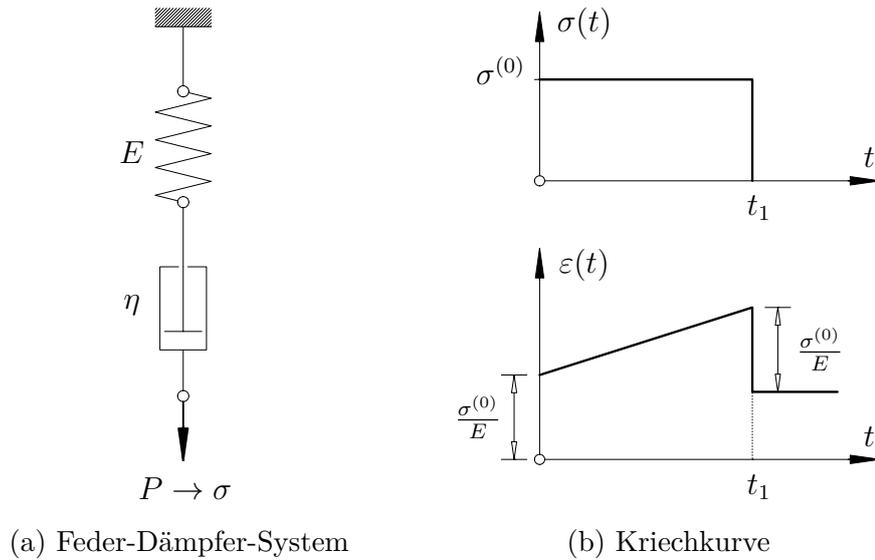


Abb. 3.2.: Maxwell'sches Modell

Der viskose Anteil stellt sich laut dem Newton'schen Gesetz¹⁷ [54] folgendermaßen dar:

$$\dot{\varepsilon}^v = \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.3)$$

Dabei ist η ein Parameter für die Zähigkeit des Dämpfers. Da $\dot{\varepsilon}^v = d\varepsilon^v/dt$ die Dehnungsgeschwindigkeit darstellt, muss auch Gleichung 3.2 nach der Zeit abgeleitet werden. Somit ergibt sich bei der Annahme von einem zeitunabhängigen Elastizitätsmodul E und einem ebenso konstanten η aus Gleichung 3.1 Gleichung 3.4:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.4)$$

Gleichung 3.4 stellt die Differentialgleichung zur mathematischen Beschreibung zeitabhängigen Materialverhaltens nach Maxwell dar [52].

Die Kriechkurve nach Maxwell ergibt sich durch die Integration des Ausdrucks aus Gleichung 3.4 unter einer konstanten Spannung $\sigma = \sigma^{(0)} = konst.$ und der Folgerung von $\dot{\sigma} = 0$ unter der Voraussetzung der konstanten Zähigkeit des Dämpfers $\eta = konst.$ für das Zeitintervall $0 \leq t < t_1$ zu Gleichung 3.5:

¹⁷Isaac Newton (1642-1727)

3. Mechanische Beschreibung von zeitabhängigem Materialverhalten

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma^{(0)}}{\eta} \cdot t + c \quad (3.5)$$

Die Bestimmung der Integrationskonstante c folgt aus der Anfangsbedingung

$$\varepsilon(t = 0) = \frac{\sigma^{(0)}}{E} = \varepsilon^e \quad (3.6)$$

und ergibt sich gleich der elastischen Dehnung zu $c = \sigma^{(0)}/E$. Folglich gilt für $0 \leq t < t_1$ gemäß Abbildung 3.2

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma^{(0)}}{E} + \frac{\sigma^{(0)}}{\eta} \cdot t. \quad (3.7)$$

Mit dem Parameter $\lambda = \eta/E$ [55] und der Nachgiebigkeitsfunktion

$$J(t) = \frac{1}{E} \cdot \left(1 + \frac{t}{\lambda}\right) \quad (3.8)$$

stellt sich Gleichung 3.7 vereinfacht als Gleichung 3.9 dar [52]:

$$\varepsilon(t) = J(t) \cdot \sigma^{(0)} \quad (3.9)$$

Für das Intervall $t_1 < t \leq \infty$ ergibt sich aus Gleichung 3.4 unter Beachtung von $\sigma = 0$ und $\dot{\sigma} = 0$ die Dehnung $\varepsilon(t)$ gleich der Integrationskonstante c . Da zum Zeitpunkt der Entlastung $t = t_1$ die elastische Dehnung ε^e sofort null wird, entspricht die Dehnung zu diesem Zeitpunkt ausschließlich dem viskosen Anteil. Die Integrationskonstante c muss somit gleich $c = \sigma^{(0)}/\eta \cdot t_1$ sein, woraus folglich für das Intervall $t_1 < t \leq \infty$ Gleichung 3.10 gilt:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma^{(0)}}{\eta} \cdot t_1 \quad (3.10)$$

Aus den Gleichungen 3.7 und 3.10 ergibt sich die in Abbildung 3.2 dargestellte Kriechkurve. Hier offenbaren sich auch grundlegende Schwächen des Modells, wie die konstante

Kriechgeschwindigkeit während der Dauerlast und die konstante Dehnung nach Ende der Belastung. [52]

Das Kelvin-Voigt'sche Werkstoffmodell^{18,19} besteht im Gegensatz zum Modell nach Maxwell aus einer Feder und einem Dämpfer, welche parallel angeordnet werden, siehe Abbildung 3.3. Dieser Anordnung entspricht folgender Ansatz:

$$\sigma = \sigma^e + \sigma^v \quad (3.11)$$

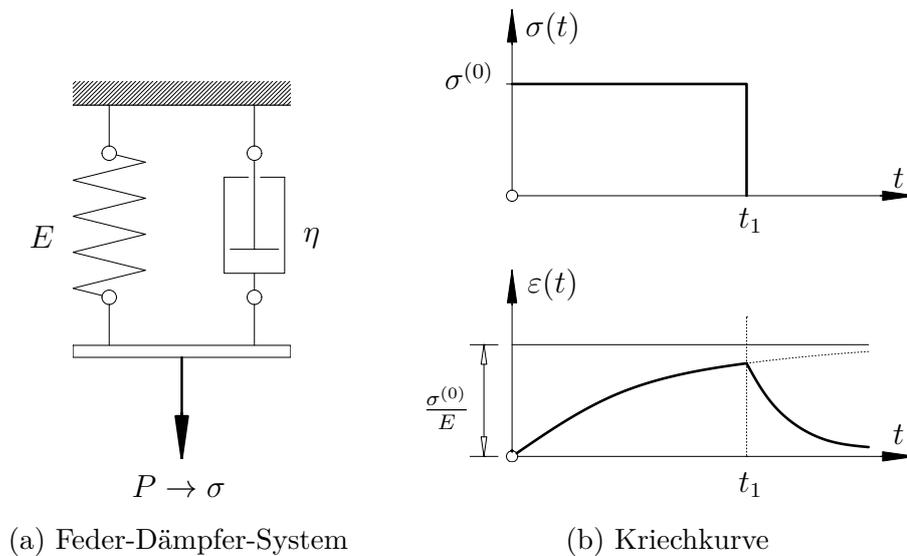


Abb. 3.3.: Kelvin-Voigt'sches Modell

Durch Umformen von Gleichung 3.2 und Gleichung 3.3 und Einsetzen in Gleichung 3.11 ergibt sich folgende Differentialgleichung zur mathematischen Beschreibung des zeitabhängigen Materialverhaltens auf Basis des Modells nach Kelvin-Voigt [52]:

$$\dot{\varepsilon} + \frac{E}{\eta} \cdot \varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.12)$$

Mit denselben Voraussetzungen wie beim Maxwell'schen Modell ($\sigma^{(0)} = konst.$, $E = konst.$ und $\eta = konst.$) ergibt sich die zeitabhängige Verzerrung nach Integration von Gleichung 3.12 für das Intervall $0 \leq t \leq t_1$ zu:

¹⁸Lord Kelvin (1824-1907)

¹⁹Woldemar Voigt (1850-1919)

3. Mechanische Beschreibung von zeitabhängigem Materialverhalten

$$\varepsilon(t) = c \cdot e^{-\frac{E}{\eta} \cdot t} + \frac{\sigma^{(0)}}{E} \quad (3.13)$$

Die Bestimmung der Integrationskonstanten c erfolgt aus der Anfangsbedingung $\varepsilon(t = 0) = 0$. Wird in Gleichung 3.13 $t = 0$ und $\varepsilon = 0$ gesetzt, erhält man für die Integrationskonstante $c = -\sigma^{(0)}/E$. Somit gilt beim Kelvin-Voigt'schen Modell für das Intervall $0 \leq t \leq t_1$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma^{(0)}}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} \cdot t}\right). \quad (3.14)$$

Wiederum kann Gleichung 3.14 mit $\lambda = \eta/E$ und der Nachgiebigkeitsfunktion

$$J(t) = \frac{1}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}\right) \quad (3.15)$$

vereinfacht als Gleichung 3.9 angeschrieben werden.

Für das Intervall $t_1 < t \leq \infty$ gilt $\sigma^{(0)} = 0$, jedoch erfolgt zum Zeitpunkt der Entlastung bei $t = t_1$ keine direkte Abnahme der Verformung. Mit diesen beiden Voraussetzungen ergibt sich die Integrationskonstante c mit $c = \varepsilon(t_1) \cdot e^{\frac{t_1}{\lambda}}$. Setzt man dies nun in Gleichung 3.13 ein, erhält man Gleichung 3.16 [52]

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(t_1) \cdot e^{-\frac{t-t_1}{\lambda}} \quad (3.16)$$

mit

$$\varepsilon(t_1) = \frac{\sigma^{(0)}}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\lambda}}\right). \quad (3.17)$$

Wie in Abbildung 3.3 zu sehen, strebt die Dehnung gegen null. Weitere Schwächen dieses Modells sind das Fehlen einer sofortigen Dehnung zu Beginn der Belastung sowie einer sprunghaften Abnahme der Dehnung bei Entlastung. Auch das asymptotische und somit extrem langsame Streben der Dehnung entgegen dem Maximum während der anhaltenden Belastung ist als negativer Aspekt dieses Modells zu erwähnen. [52]

Die bisher gezeigten Modelle spiegeln das tatsächlich gezeigte Materialverhalten nur

3.2. Rheologische Modelle zur Beschreibung des Kriechverhaltens

bedingt wider. Es bedarf also wirklichkeitsnäherer Materialmodelle, welche aus mehreren Feder- und Dämpferelementen bestehen. Hierfür dient zum Beispiel ein Vierparametermodell, bei welchem ein Kelvin-Voigt-Modell mit einem Maxwell-Element in Reihe geschaltet wird. Es entsteht dadurch das sogenannte Burgers-Modell²⁰, siehe Abbildung 3.4, welches 1935 für die Beschreibung des Fließverhaltens von Bitumen und Asphalt vorgeschlagen wurde [56]. Es eignet sich laut [57] zur ersten Abschätzung des Zeit-Dehnungsverhaltens der meisten Polymere. Die Nachgiebigkeitsfunktion $J(t)$ summiert sich in diesem Fall aus Gleichung 3.8 und Gleichung 3.15 zu Gleichung 3.18.

$$J(t) = \frac{1}{E_0} \cdot \left(1 + \frac{t}{\lambda_0}\right) + \frac{1}{E_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_1}}\right) \quad (3.18)$$

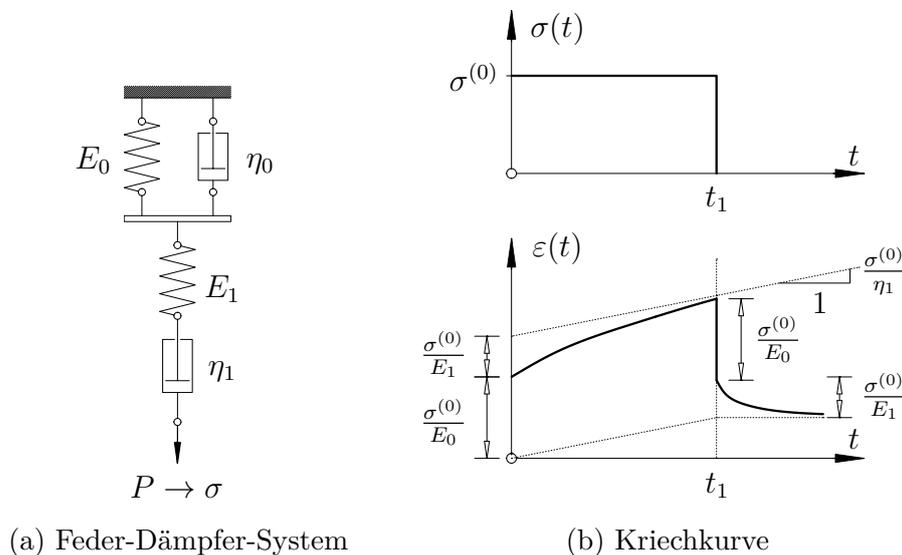


Abb. 3.4.: Modell nach Burgers

Bei diesem Modell kommt es allerdings zu keinem Ende der Zunahme der Kriechverformungen, siehe Abbildung 3.4, weshalb in weiterer Folge auf das verallgemeinerte Modell nach Kelvin-Voigt verwiesen wird²¹. Bei dem in Abbildung 3.5 dargestellten System handelt es sich um mehrere in Serie geschaltete Kelvin-Voigt-Körper und einer zusätzlichen Feder. Es eignet sich besonders gut zur Ermittlung einer Kriechfunktion. Die Nachgiebigkeitsfunktion $J(t)$ erhält man aus der Superposition des Hooke'schen

²⁰Johannes Martinus Burgers (1895-1981)

²¹Ein vollständiges Abklingen des Kriechens wird nach einer Dauer von $t = 91$ Tagen von [2] vorausgesetzt, siehe hierzu Abschnitt 2.2.1.

3. Mechanische Beschreibung von zeitabhängigem Materialverhalten

Gesetzes (Gleichung 3.2) und der Nachgiebigkeitsfunktion des Kelvin-Voigt'schen Modells (Gleichung 3.15) [58]:

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{E_j} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_j}}\right) \quad (3.19)$$

Dieses Modell beinhaltet alle geforderten Bedingungen. Es stellt sich eine Anfangsverformung ein, das weitere Kriechen ist zu Beginn stärker ausgeprägt, während es mit Fortdauer des Verlaufs abnimmt, bis es vollständig abklingt. Bei Entlastung erfolgt eine sprunghafte Reduzierung der Verformung. In weiterer Folge strebt die Gesamtdehnung des Systems gegen Null, siehe Abbildung 3.6.

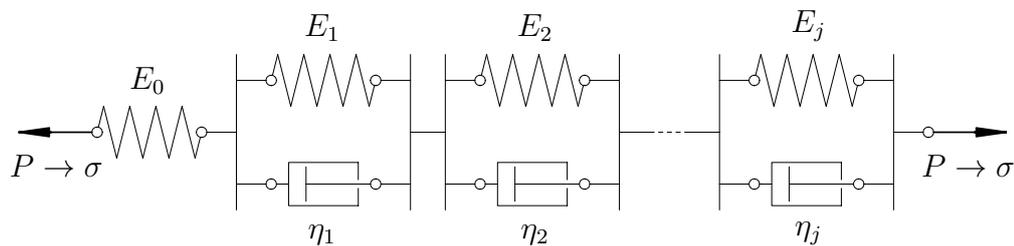


Abb. 3.5.: Federmodell des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt

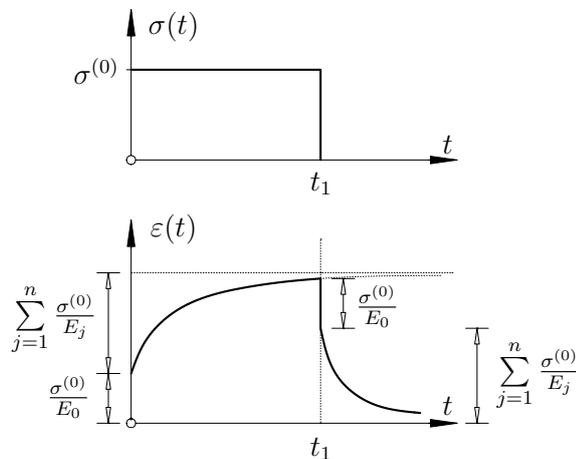


Abb. 3.6.: Kriechkurve des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt

Auf das verallgemeinerte Modell nach Maxwell wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da es vorrangig der Simulation des Relaxationsverhaltens von Baustoffen dient und daher hier nicht von Relevanz ist.

4. Experimentelle Untersuchungen

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden mehrere Versuchsserien durchgeführt, um das Langzeitverhalten von mit Silikon verklebten HGV-Elementen zu untersuchen. Bei allen Serien wurden Kriech- und Kurzzeitversuche unter Scherbelastung durchgeführt. Zum Teil wurde auch das Verhalten der Klebefuge unter zyklischer Belastung beobachtet. Die Serien unterschieden sich in den klimatischen Randbedingungen, der Dauer des Versuches, den Lastniveaus während der Dauerbelastung sowie in den geometrischen Abmessungen der Klebefuge. Prinzipiell wurden drei unterschiedliche Typen von Versuchskörpern untersucht:

- Kleinprobekörper
- Kleine Probekörper mit Verklebung in L-Form
- Mittelgroße Versuchskörper

Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Untersuchungen der Kleinprobekörper (Klebefugenlänge 50 mm) gelegt, aber auch aus den mittelgroßen Versuchskörpern (Klebefugenlänge 1000 mm) konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Die Versuche mit kleinen Probekörpern mit L-förmiger Verklebung stellten lediglich eine Ergänzung der Untersuchungen an Kleinprobekörpern dar und sind daher in den folgenden Abschnitten auch dieser Kategorie untergeordnet. Durch die unterschiedlichen Geometrien der Klebefugen können auch Rückschlüsse auf etwaige Größeneffekte oder andere Einflüsse aus der Form der Klebefuge gezogen werden. Detaillierte Ansichten der diversen Probekörper folgen in den entsprechenden Unterabschnitten.

Ziel der Versuche war es, einen Zusammenhang zwischen Last und Dauer einer Langzeitbeanspruchung und der daraus resultierenden, nachträglich ermittelten Kurzzeitbeanspruchung herzustellen. Bei den Dauerlastniveaus wurde zwischen $0,04\text{ N/mm}^2$, $0,05\text{ N/mm}^2$ und $0,06\text{ N/mm}^2$ unterschieden. Diese Lastniveaus resultieren aus den Überlegungen, welche schon im Zuge von [5] getroffen wurden. Bei einem erwarteten Mittelwert der Schubfestigkeit von zirka $1,0\text{ N/mm}^2$ des Klebstoffs, entsprechen $0,04\text{ N/mm}^2$ beziehungsweise $0,05\text{ N/mm}^2$ einem Dauerlastniveau von $1/25\text{ tel}$ und $1/20\text{ tel}$ der mittleren

4. Experimentelle Untersuchungen

Festigkeit. Dies wäre gegenüber den Vorgaben der ETAG 002-1 [2] von $1/44,44 \text{ tel}$ bereits eine erhebliche Steigerung, siehe Abschnitt 2.2.1. Die Beanspruchung von $0,06 \text{ N/mm}^2$ wurde nachträglich ergänzt, da dies durch Untersuchungen der beiden niedrigeren Lastniveaus durchaus als eine mögliche Dauerlast angesehen werden konnte. Dies wird in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

Die in den experimentellen Untersuchungen erzielten Erkenntnisse können anschließend zur Bestimmung der für die Bemessung relevanten Beiwerte k_{mod} und k_{def} herangezogen werden. Die Durchführung der zyklischen Versuche ist nach Gleichung 2.3 vor allem für die Bestimmung von γ_{tot} beziehungsweise γ_M von Relevanz. Weiters soll auch der Einfluss der klimatischen Bedingungen beobachtet werden, weshalb bei allen Versuchsserien im Abstand von 30 Minuten die Temperatur sowie die relative Luftfeuchte im Versuchsraum aufgezeichnet wurden. Alle Probekörper waren zu keiner Zeit während der Herstellung oder der Versuchsdurchführung in einem klimatisierten Raum gelagert, sondern ständig dem natürlich Innenraumklima ausgesetzt, wobei bei der Produktion der Probekörper natürlich auf die im Datenblatt des Klebstoffs (siehe Anhang A.1) zur ordnungsgemäßen Ausführung der Klebefuge vorgeschriebenen Umgebungsbedingungen geachtet wurde. Lediglich eine Serie war während der Versuchsdurchführung unter kontrollierten klimatischen Bedingungen gelagert, auf diese Ausnahme wird im folgenden Abschnitt aber explizit hingewiesen.

4.1. Methodik

Prinzipiell folgten alle Versuchsserien der selben zeitlichen Herangehensweise. Die Probekörper wurden, wie vom Silikon-Hersteller vorgeschrieben, mindestens 28 Tage vor Versuchsbeginn produziert, um eine ausreichende Aushärtung des Klebstoffs zu gewährleisten. Anschließend wurde ein Teil der Probekörper ohne jegliche vorangegangene Belastung einer Prüfung der Scherfestigkeit unterzogen. Diese Festigkeitswerte stellen somit die Basis der Versuchsserie dar, mit der weitere Ergebnisse verglichen werden können. Alle weiteren Probekörper wurden an einer Versuchswand oder einem speziellen Versuchsstand befestigt und mit unterschiedlichen Gewichten, entsprechend der geplanten Lastniveaus, belastet. Davon wurden wiederum in diversen Abständen Probekörper entlastet und einer Scherprüfung unterzogen, um die Restscherfestigkeit feststellen zu können. An einem Teil der Versuchskörper wurden Messuhren angebracht, um den Verformungszuwachs unter Langzeitbeanspruchung messen zu können. Diese Messungen erfolgten mit einer Genauigkeit von $1/100 \text{ tel mm}$. In der ETAG 002-1 [2] wird eine Versuchsdauer von 91

Tagen vorgesehen, nach der das Kriechen unter Dauerlast abgeschlossen sein muss. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden Probekörper über unterschiedliche Belastungszeitspannen beobachtet, auf das Verhalten in den ersten 91 Tagen wird in den folgenden Abschnitten jedoch näher eingegangen. Der tatsächliche zeitliche Ablauf der jeweiligen Versuchsserien wird in den zugehörigen Unterabschnitten erläutert. Die gemessenen Verformungen werden im folgenden mit w_x bezeichnet, wobei x für die Anzahl der Tage unter Dauerlast steht.

Durch die regelmäßige Messung der klimatischen Verhältnisse konnte ein etwaiger Einfluss dieser Randbedingungen auf die Verformung der Klebefuge festgestellt werden. Die Deformation wurde zu Beginn täglich gemessen, nach einiger Zeit erfolgten nur mehr wöchentliche Ablesungen, da die Zunahme der Verformung deutlich abnahm. So erhielt man einen genauen Verlauf der elastischen Anfangsverformung direkt nach Belastung sowie der zusätzlichen Kriechverformung. Am Ende der vorgesehenen Belastungsdauer wurden die Probekörper entlastet, wobei die sofortige Rückstellung der Klebefuge festgestellt wurde. Die zu diesem Zeitpunkt gemessene Verformung wird mit dem Zusatz w_{x+e} bezeichnet. Nach 24 Stunden erfolgte eine weitere Messung der verbliebenen Verformung w_{x+1} . Dieser zeitliche Ablauf mit einer Dauerbelastung von 91 Tagen und anschließender Entlastung mit 24-stündiger Entspannungsphase ist für tragende Verklebungen nicht nur in der ETAG 002-1 [2], sondern auch in der ÖNORM EN 15434 [40], der Richtlinie VE-08/13 des Institut für Fenstertechnik²² (ift) [59] und der Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme der HFA [60] vorgesehen.

Nach ETAG 002-1 [2] und ÖNORM EN 13022-2 [39] soll die Dicke der Klebefuge e einer SSG-Fassade mindestens 6 mm betragen. Die in dieser Arbeit untersuchten Probekörper weisen allerdings basierend auf den Forschungsergebnissen der HFA [5, 15, 24–26] jeweils nur eine Fugendicke von 3 mm auf. Dies wird über den gegenüber Stahl- oder Aluminiumkonstruktionen geringeren Einfluss von Temperaturänderungen begründet, da 3 mm ausreichen, um die durch Längenänderung von Holz und Glas entstehenden Spannungen abzubauen. Die Dicke der Klebefuge fließt in die Berechnung der Schubgleitung $\tan \gamma$ aus Gleichung 4.1 und Abbildung 4.1 ein, die einen wichtigen Parameter zur Feststellung des Verformungsvermögens eines Klebstoffs darstellt.

$$\tan \gamma = \frac{\Delta L}{e} \quad (4.1)$$

²²ift Rosenheim GmbH, Theodor-Gietl-Straße 7-9, D-83026 Rosenheim

4. Experimentelle Untersuchungen

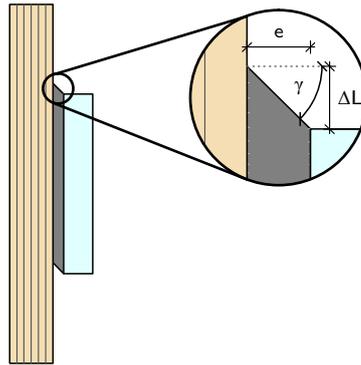


Abb. 4.1.: Messung des Gleitwinkels γ am Beispiel eines Kleinprobekörpers

Der Gleitwinkel γ wird in weiterer Folge zur Berechnung des Schubmoduls G herangezogen, welcher sich nach Formel 4.2 ergibt:

$$G = \frac{\tau_m}{\tan \gamma} \quad (4.2)$$

Nach der zuvor erläuterten 24-stündigen Erholungsphase erfolgt eine Überprüfung der Restscherfestigkeit der Klebefuge. Dabei werden die Holzleisten festgehalten und die Glasscheibe geschwindigkeitsgesteuert bis zum Versagen belastet und die aufgebrachte Kraft sowie die zugehörige Verformung gemessen. Aus den gewonnenen statistischen Daten kann anschließend gemäß Eurocode 0 [1] die sogenannte 5 %-Quantile $R_{u,5}^{(1)}$ des Festigkeitswerts nach Gleichung 4.3 berechnet werden.

$$R_{u,5}^{(1)} = m_x - s_x \cdot k_n \quad (4.3)$$

Dabei ist der Fraktilefaktor k_n abhängig von der Probenanzahl n aus Tabelle 4.1 anzunehmen.

Tab. 4.1.: Faktor k_n für charakteristische Werte gem. EN 1990, Tabelle D.1 [1]

n	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
k_n	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Sowohl die Gleichung 4.3 als auch die in Tabelle 4.1 angegebenen Werte folgen dem Bayesschem Verfahren²³ mit unsicherer Vorverteilung und beruhen auf der Normalver-

²³Thomas Bayes (1701-1761)

teilung. Sie führen zu einem ähnlichen Ergebnis wie klassische statistische Methoden mit einem Konfidenzniveau von 75 %, wie es zum Beispiel in der ETAG 002-1 [2] vorgeschlagen wird, siehe Tabelle 4.2. Obwohl aus dem Forschungsprojekt der HFA [5] bereits Vorinformationen zum Variationskoeffizienten V_x vorliegen, wird für die Werte von $k_n V_x$ als unbekannt angenommen, um charakteristische Festigkeitswerte $R_{u,5}^{(1)}$ auf der sicheren Seite liegend zu erhalten. Diese Herangehensweise ist darin begründet, dass gegenüber tragenden, weichen Klebeverbindungen im Bausektor noch große Skepsis vorherrscht und somit bei der Definition neuer Teilsicherheitsbeiwerte alle Unsicherheiten so weit wie möglich berücksichtigt werden sollen.

In vielen Bereichen des Bauwesens wird für die statistische Verteilung der Materialeigenschaften auf die logarithmische Normalverteilung zurückgegriffen [61], da diese mathematische Vorteile gegenüber der Normalverteilung aufweist. Einer dieser Vorteile ist, dass keine negativen Werte auftreten können, wie dies bei Festigkeitseigenschaften der Fall ist. Nachteilig ist jedoch, dass die logarithmische Normalverteilung die 5 %-Quantile tendenziell überschätzt. Bis zu einem Variationskoeffizienten V_x von 0,2 ist daher laut [62] die Anwendung der Normalverteilung zu empfehlen. Wie in den Abschnitten 4.3 und 4.4 gezeigt wird, wird dieser Grenzwert nie überschritten. Daher werden in den genannten Abschnitten die 5 %-Quantile in allen Fällen über die Normalverteilung bestimmt.

Der Variationskoeffizient V_x wird gemäß Formel 4.4 berechnet, nachfolgend in Anlehnung an die gängige Notation jedoch als *CoV* bezeichnet:

$$CoV = V_x = \frac{s_x}{m_x} \quad (4.4)$$

In ETAG 002-1 [2] wird eine ähnliche Vorgehensweise zur Bestimmung von charakteristischen Werten vorgeschlagen, jedoch wird die 5 %-Quantile hier mit einer Garantie, dass 75 % der Testresultate über dem berechneten Ergebnis liegen, angegeben. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 4.5:

$$R_{u,5}^{(2)} = m_x - s_x \cdot \tau_{\alpha\beta} \quad (4.5)$$

Die Werte für $\tau_{\alpha\beta}$ sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.2.: Die Variable $\tau_{\alpha\beta}$ in Abhängigkeit der Prüfkörperanzahl [2]

Zahl der Prüfkörper	5	6	7	8	9	10	15	30	∞
Variable $\tau_{\alpha\beta}$	2,46	2,33	2,25	2,19	2,14	2,10	1,99	1,87	1,64

Die zyklischen Versuche werden auf Basis des in der ETAG 002-1 [2] vorgestellten Verfahrens durchgeführt und sollen die Belastungsgeschichte der Klebefuge während der gesamten Lebensdauer widerspiegeln. Es werden auf jeden Versuchskörper 5350 Lastzyklen aufgebracht. Diese sind wie folgt gegliedert:

- 100 Zyklen von $0,1 \cdot \tau_{des}$ bis zum Bemessungswert der Spannung τ_{des}
- 250 Zyklen von $0,1 \cdot \tau_{des}$ bis zum 0,8-fachen Bemessungswert der Spannung τ_{des}
- 5000 Zyklen von $0,1 \cdot \tau_{des}$ bis zum 0,6-fachen Bemessungswert der Spannung τ_{des}

Die Definition von τ_{des} wurde bereits in Gleichung 2.3 vorgestellt. Für γ_{tot} wird im Rahmen dieser Versuche allerdings nicht der von ETAG 002-1 [2] vorgeschlagene Wert von 6 verwendet, sondern auf das Handbuch für Klebstoffe der HFA [63] zurückgegriffen, welches τ_{des} mit $R_{u,5}/3$ angibt. Dieses Spannungsniveau, beziehungsweise die obere Grenze der Spannung je nach Lastzyklus, wird innerhalb von zwei Sekunden aufgebracht, anschließend zwei Sekunden gehalten und danach in der Dauer von zwei Sekunden wieder auf das ursprüngliche Lastniveau von $0,1 \cdot \tau_{des}$ entlastet. Auch diese Spannung wird für zwei Sekunden gehalten, bevor der nächste Zyklus beginnt. Eine genaue Übersicht der Belastungsgeschichte ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Abschließend wird auch bei den Proben, die diesen Versuch durchlaufen, die Restscherfestigkeit überprüft.

In ETAG 002-1 [2] wird für diverse Untersuchungen bezüglich künstlicher Alterung und nach zyklischer Beanspruchung gegenüber der Schubfestigkeit ohne vorangegangene Belastung eine Restscherfestigkeit von mindestens 75 % gefordert. Für die Überprüfung nach Langzeit-Schubbeanspruchung wird in [2] kein Grenzwert angegeben, weshalb das Kriterium von 75 % für die folgende Auswertung übernommen wird.

Zum Kriechverhalten und zur Restscherfestigkeit nach unterschiedlicher Lastgeschichte existieren in diversen Normen und Richtlinien verschiedene Kriterien, die es einzuhalten gilt. Diese sind nachstehend angeführt und werden im Rahmen der Auswertung der experimentellen Untersuchungen besonders betrachtet.

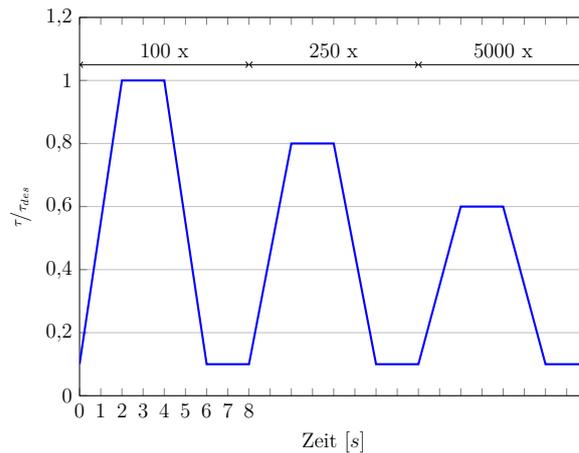


Abb. 4.2.: Spannungszyklus des Ermüdungsversuchs nach [2]

Während des Dauerlast- beziehungsweise Kriechversuchs soll vorrangig auf folgende Punkte geachtet werden:

Verformungszunahme innerhalb von 21 Tagen

Im Zuge der Kriechversuche wird am Ende der 91 Tage eine Stabilisierung der Verformungen verlangt. Während die ETAG 002-1 [2] diesen Zustand nicht näher definiert, ist in der ift-Richtlinie [59] und der Richtlinie der HFA [60] dazu der Grenzwert von maximal $0,1\text{ mm}$ zusätzlicher Kriechverformungen innerhalb von drei Wochen angegeben. Nach Unterschreiten dieser Grenze darf der Dauerlastversuch abgebrochen werden. Dieses Kriterium ist spätestens am 91. Tag unter Dauerlast zu erfüllen.

Maximalverschiebung nach 91 Tagen

In der Produktnorm für lastübertragende und/oder UV-beständige Dichtstoffe ÖNORM EN 15434 [40] ist die Verformung der Klebefuge am Ende der 91 Tage andauernden Belastung mit 1 mm begrenzt. Ein derartiges Kriterium fehlt in der ETAG 002-1 [2] sowie in den Richtlinien des ift-Rosenheim [59] und der HFA [60].

Restverformung nach 24-stündiger Erholungsphase

Diesbezüglich gibt es zwei Kriterien, die in die folgende Auswertung einfließen:

- Restverformung nach der Erholungsphase von maximal $1,0\text{ mm}$

Dieser Grenzwert findet sich in der ift-Richtlinie VE-08/3 [59] sowie in der Richtlinie der HFA [60] und wird aus diesen zur Beurteilung der Rückverformung nach Dauerbelastung herangezogen. Dieser Wert ist unabhängig von der Dicke der Klebefuge

4. Experimentelle Untersuchungen

zu betrachten und ist somit kein Kriterium für die Verformungseigenschaften des verwendeten Klebstoffs. Vielmehr soll dieser Wert die Gebrauchstauglichkeit von geklebten Glaskonstruktionen gewährleisten.

- Restverformung nach der Erholungsphase von maximal $0,1\text{ mm}$

Der Grenzwert von $0,1\text{ mm}$ wird in der ETAG 002-1 [2] und der ÖNORM EN 15434 [40] als maximale Restverschiebung nach 24-stündiger Erholungsphase nach einem Langzeitschubversuch angegeben. Diese Richtlinie beziehungsweise Norm bezieht sich allerdings auf einen anderen Versuchsaufbau sowie auf eine Verklebung von Aluminium und Glas und lassen somit jegliche Verformung des Holzsubstrats außer Acht. Da dieses Kriterium für Verklebungen mit Holz keine Relevanz besitzt, wurde dieses auch vom ift-Rosenheim und der HFA wie zuvor beschrieben geändert und der Grenzwert an realistische Werte angepasst. Dennoch wird das Kriterium in weiterer Folge betrachtet, eine Einhaltung der Grenze von $0,1\text{ mm}$ erscheint aber auf Basis früherer Untersuchungen [5, 27] als unwahrscheinlich.

Im Hinblick auf das Bruchverhalten sowie die Festigkeit der Probekörper nach unterschiedlicher vorangegangener Beanspruchung sind vor allem folgende Kriterien von Relevanz:

Restschubfestigkeit größer als 75 % der Anfangsfestigkeit

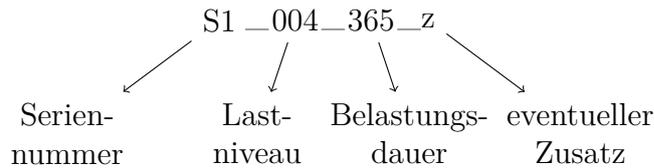
Die Restschubfestigkeit soll laut [2] und [40] nach Untersuchungen bezüglich künstlicher Alterung und zyklischer Beanspruchung mindestens 75 % der Festigkeit von Probekörpern erreichen, welche keinerlei vorangegangene Beanspruchung erfahren haben. Da eine Spezifikation bezüglich der Festigkeit nach Dauerschubbeanspruchung fehlt, wird dieses Kriterium übernommen.

Kohäsiver Bruch der Klebefuge von mindestens 90 %

Bei Kurzzeitbeanspruchung soll das endgültige Versagen des Probekörpers durch Bruch der Klebefuge selbst erfolgen. Eine Ablösung des Klebstoffs vom Substrat und somit ein adhäsiver Bruch an der Berührungsfläche zwischen Klebstoff und Substrat ist bis zu 10 % erlaubt, soll aber möglichst vermieden werden. Ein Unterschreiten der Grenze von einem Flächenanteil von 90 % kohäsivem Bruch ist nach [2, 40] nicht gestattet.

4.2. Erläuterungen zur Darstellung der Ergebnisse

Um das Verständnis der folgenden Auswertung zu vereinfachen, werden die Darstellungsmethode sowie die Bezeichnungen der Serien beschrieben. Im folgenden Beispiel wird die Bezeichnung der Kleinprobenserie Nummer 1 mit einer Dauerlast von $0,04 \text{ N/mm}^2$ für 365 Tage und nachträglicher zyklischer Beanspruchung beschrieben, wobei die Bezeichnungen aller Serien nach demselben Prinzip erfolgen:



Es kommen dabei die in Tabelle 4.3 vorgestellten Kategorien zum Einsatz, wobei jede Serie in den Diagrammen durch ein bestimmtes Symbol angeführt wird.

Tab. 4.3.: Seriennummer

Bezeichnung	Symbol	Beschreibung
S1	○	Kleine Probekörper Serie 1
S2	□	Kleine Probekörper Serie 2
S3	△	Kleine Probekörper Serie 3
L	◇	Probekörper mit L-förmiger Klebefuge
M	▽	Mittelgroße Probekörper

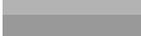
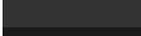
Die jeweiligen Lastniveaus werden mittels unterschiedlicher Farbgruppierungen unterschieden. Diese sind in Tabelle 4.4 dargestellt. Jede Farbe wird in diversen Schattierungen, je nach Belastungsdauer, verwendet, siehe hierzu Tabelle 4.5, wo dieses Prinzip schematisch in Graustufen vorgestellt wird.

Tab. 4.4.: Lastniveau

Bezeichnung	Farbe	Beschreibung
000		Belastung mit Eigengewicht der Glasscheibe
004		Belastung mit nomineller Spannung von $0,04 \text{ N/mm}^2$
005		Belastung mit nomineller Spannung von $0,05 \text{ N/mm}^2$
006		Belastung mit nomineller Spannung von $0,06 \text{ N/mm}^2$

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.5.: Belastungsdauer

Bezeichnung	Farbton	Beschreibung
000		0 Tage unter Dauerlast
001		1 Tag unter Dauerlast
035		35 Tage unter Dauerlast
068		68 Tage unter Dauerlast
091		91 Tage unter Dauerlast
131		131 Tage unter Dauerlast
182		182 Tage unter Dauerlast
210		210 Tage unter Dauerlast
365		365 Tage unter Dauerlast

Die in den folgenden Kapiteln verwendeten Zusatzbezeichnungen zur expliziten Identifikation der jeweiligen Prüferserie, sind in Tabelle 4.6 angeführt.

Tab. 4.6.: Eventuelle Zusatzbezeichnung

Bezeichnung	Linientyp	Beschreibung
–	-----	ohne Zusatzbezeichnung
z	-·-·-·-	Zyklische Beanspruchung
k	·······	Lagerung in Klimakammer
mod	-----	modifizierte Schraubenanordnung

Eine Übersicht aller durchgeführten Serien, mit und ohne Vorbelastung und anschließender Überprüfung der Restscherfestigkeit, ist in Tabelle 4.7 gegeben, dabei wird auf Grund der Übersichtlichkeit auf die Anführung von Zusatzbezeichnungen verzichtet.

Tab. 4.7.: Durchgeführte Serien in Abhängigkeit von Lastniveau und Belastungsdauer

durchgeführte Serien	Dauer der Beanspruchung [Tage]									
	0	1	35	68	92	131	182	210	365	
Lastniveau	Eigengewicht									
	0,04 N/mm ²									
	0,05 N/mm ²									
	0,06 N/mm ²									

4.3. Kleinprobekörper

Die Serien der Kleinprobekörper stellen den Hauptteil der experimentellen Untersuchungen dar. Insgesamt wurden 149 Versuchskörper, wie in Abbildung 4.3 zu sehen, und weitere 14 Probekörper mit L-förmiger Verklebung den verschiedensten Prüfungen unterzogen. Die Geometrie der Versuchskörper ist angelehnt an ETAG 002-1 [2], lediglich die Klebefugendicke wurde von 6 auf 3 mm reduziert. Der genaue Aufbau eines Probekörpers sowie ein Ausschnitt des Versuchsaufbaus sind in Abbildung 4.3 dargestellt.

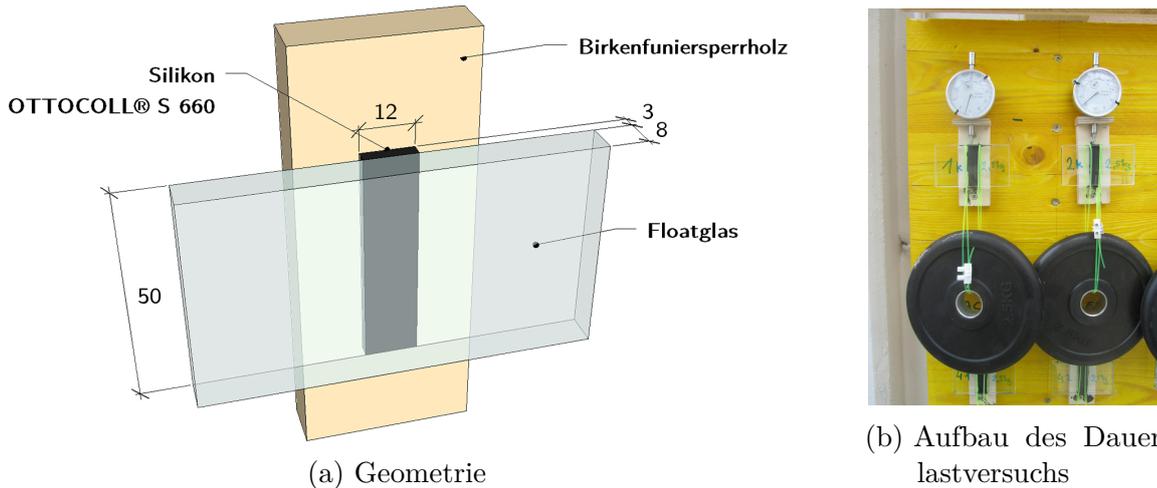


Abb. 4.3.: Abmessungen und Versuchsaufbau von Kleinprobekörpern

Ziel der Untersuchungen war es, das unterschiedliche Kriechverhalten unter verschiedenen Beanspruchungen über eine gewisse Dauer zu beobachten und die Schubfestigkeiten zu diversen Zeitpunkten festzustellen. Die Überprüfung der Kurzzeitfestigkeit fand frühestens 24 Stunden nach Entlastung der Probekörper statt. Die Versuchsproben wurden nach den in Abschnitt 4.1 vorgestellten Methoden analysiert und ausgewertet. Insgesamt wurden drei Serien sowie eine Zusatzserie mit Probekörpern mit L-förmiger Verklebung durchgeführt. Da Länge und Breite der Klebefuge Schwankungen unterliegen, wurde die exakte Klebefugegeometrie zur Berechnung der erzielten Spannungen nach Versuchsdurchführung nachgemessen. In [2] ist festgelegt, dass der Bruch zu mehr als 90 % kohäsiv erfolgen muss, was bei allen Probekörpern erreicht wurde. Dies bedeutet, dass der Bruch in der Klebefuge selbst von statten gehen muss und nicht durch ein Abreißen des Klebstoffs vom Substrat erfolgen darf.

Zur Beobachtung des Langzeitverhaltens wurden die Probekörper an eine Wand geschraubt und mit einer Messuhr versehen, um in regelmäßigen Abständen den Verformungszuwachs zu messen. Es wurden zur Feststellung der elastischen Anfangsverformung

4. Experimentelle Untersuchungen

direkt vor sowie unmittelbar nach der Lastaufbringung erste Messungen durchgeführt, danach betrug das Messintervall 24 Stunden, welches jedoch mit Fortschritt der Versuche auf sieben Tage angehoben wurde.

4.3.1. Serie 1

In Serie 1 wurden Kleinproben mit den Lastniveaus $0,04 \text{ N/mm}^2$ und $0,05 \text{ N/mm}^2$ beobachtet. Zusätzlich wurden alle Versuche auch an Probekörpern lediglich unter Belastung ihres Eigengewichts durchgeführt. Diese dienten der Feststellung der Anfangsscherfestigkeit ohne jegliche Vorbelastung sowie der Kontrolle der Ergebnisse während des Dauerlastversuchs. Ein Überblick über alle durchgeführten Versuche im Rahmen dieser Serie wird in den Tabellen 4.8 und 4.9 gegeben, wobei in Tabelle 4.9 die Belastungsgeschichte der einzelnen Probekörper vor Überprüfung der Restscherfestigkeit angeführt ist. Diese Liste ist unter Abschnitt 4.3.1.2 in Abbildung 4.9 auch graphisch dargestellt.

Tab. 4.8.: In Serie 1 durchgeführte Kriechversuche

Seriennummer	Lastniveau [N/mm^2]	Dauer [t]	Stückzahl
S1_000_365	–	365	2
S1_004_365	0,04	365	10
S1_005_365	0,05	365	5

4.3.1.1. Kriechversuch

An den in Tabelle 4.8 angeführten Probekörpern wurde mittels Messuhren der Verformungszuwachs unter Dauerlast festgehalten. Der Gesamtaufbau des Versuchs ist in Abbildung 4.4 dargestellt, wobei in der Mitte jene Probekörper zu sehen sind, an denen eine Messuhr angebracht wurde. Auch die beiden Klimadatenlogger an den Außenseiten sind zu sehen. Zur Überprüfung der Genauigkeit der Messuhren wurden zwei Uhren an einem Glaswinkel befestigt. Diese durften über die gesamte Versuchsdauer keinerlei Veränderung des Messwertes zeigen, was sich auch bestätigte. Daher wird im Folgenden auf diese beiden Messungen nicht näher eingegangen.

In Abbildung 4.5 sind die mittleren Verformungen der in Tabelle 4.8 angegebenen Kleinproben über die gesamte Versuchsdauer dargestellt. Die strichlierten Linien stellen die Standardabweichung der einzelnen Versuchsserien dar. In Tabelle 4.10 sind die wichtigsten Messungen zusammengefasst. Für die Probekörper S1_000_365 werden keine

Tab. 4.9.: In Serie 1 durchgeführte Überprüfungen der Scherfestigkeit

Seriennummer	Lastniveau [N/mm^2]	Dauer [t]	Zusatzbeanspruchung	Stückzahl
S1_000_000	–	–	–	8
S1_000_000_z	–	–	zyklisch	4
S1_000_365	–	365	–	2
S1_004_001	0,04	1	–	10
S1_004_035	0,04	35	–	10
S1_004_091	0,04	91	–	10
S1_004_182	0,04	182	–	9
S1_004_365	0,04	365	–	10
S1_004_365_z	0,04	365	zyklisch	5
S1_005_001	0,05	1	–	5
S1_005_035	0,05	35	–	5
S1_005_091	0,05	91	–	5
S1_005_182	0,05	182	–	5
S1_005_365	0,05	365	–	5

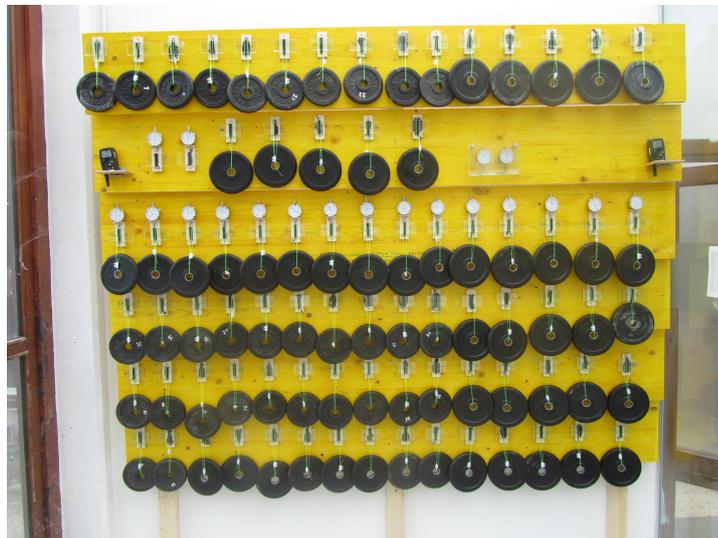


Abb. 4.4.: Aufbau des Dauerlastversuchs

4. Experimentelle Untersuchungen

Anfangsverformung und keine Verformung 24 h nach Entlastung angegeben, da keine Zusatzlast aufgebracht wurde und somit auch keine Be- und Entlastung stattfand.

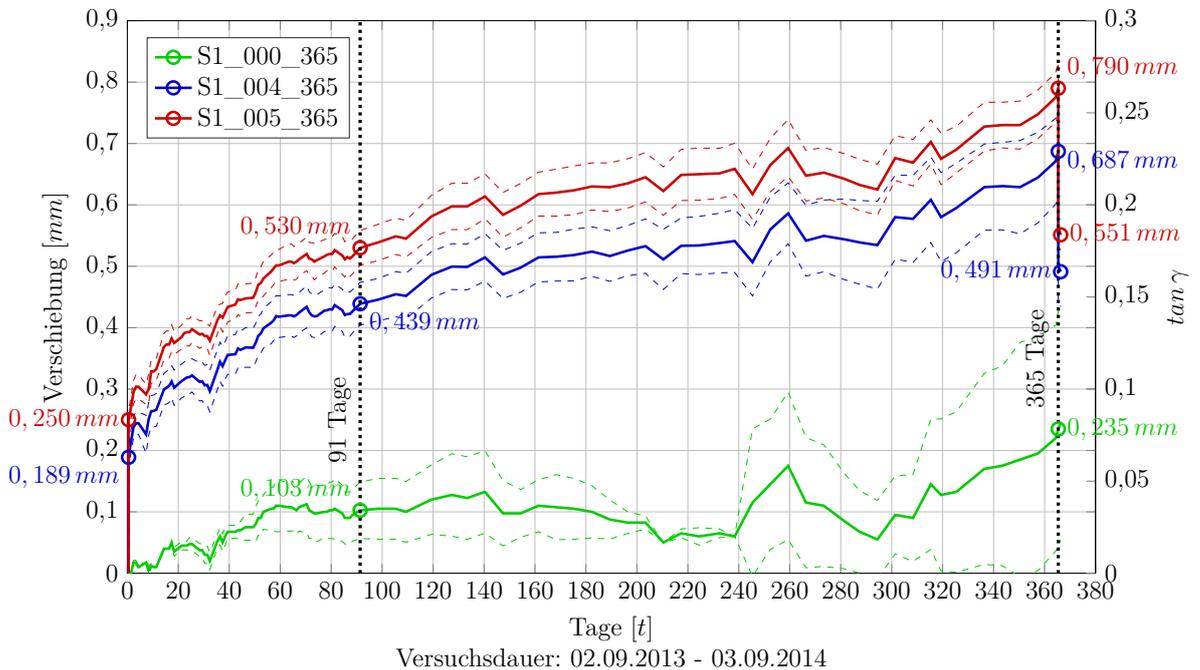


Abb. 4.5.: Gesamtverformung der Kleinproben S1 über 365 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase

Tab. 4.10.: Verformungswerte der Serie S1 in [mm]

Seriennummer	nach Belastung w_0	nach 91 Tagen w_{91}	nach 365 Tagen w_{365}	nach Entlastung w_{365+e}	24 h nach Entlastung w_{365+1}
S1_000_365	—	0,103	0,235	—	—
S1_004_365	0,189	0,439	0,687	0,501	0,491
S1_005_365	0,250	0,530	0,790	0,565	0,551

Die Probekörper mit einer Belastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ erleiden gegenüber den beiden anderen Serien erwartungsgemäß höhere Verformungen, wobei sich die Differenz zu den Versuchsobjekten unter einer Dauerlast von $0,04 \text{ N/mm}^2$ in Grenzen hält und im prinzipiellen Verhalten der Serien keine großen Unterschiede ausgemacht werden können. Auf den ersten Blick ist kein Grund ersichtlich, die erlaubte Dauerlast auf $0,04 \text{ N/mm}^2$ zu beschränken, wie von der HFA in [5] verlangt. Die Gesamtverformung nach 91 Tagen liegt weit unter dem in [40] genannten Grenzwert von $1,0 \text{ mm}$, sogar nach 365 Tagen

Belastung ist dieses Kriterium noch erfüllt. Die Restverschiebungen nach der 24-stündigen Entlastungsphase betragen nach Tabelle 4.10 $0,491\text{ mm}$ beziehungsweise $0,551\text{ mm}$. Das in Abschnitt 4.1 genannte Kriterium nach [59, 60] wird somit für beide Lastniveaus eingehalten.

Betrachtet man die Kriechverformungen im Vergleich zur elastischen Anfangsverschiebung bei Belastung, zeigt sich, dass diese in den ersten 91 Tagen mehr als die elastische Verformung ausmachen, siehe Tabelle 4.11. Die Kriechverformungen innerhalb dieses Zeitraums sind nahezu ident zu den weiteren Verformungen in den restlichen 274 Tagen bis zum Ende des Versuchs. Somit finden 50 % der gesamten Kriechverformungen innerhalb des ersten Drittels des Versuchszeitraums statt. Im weiteren Verlauf steigt die Verformung nochmals um denselben Betrag an. Im Allgemeinen kriechen die höher belasteten Probekörper im Vergleich zur Anfangsverformung weniger als jene unter geringerem Lastniveau. In Tabelle 4.11 ist außerdem zu erkennen, dass die Rückverformung bei Entlastung mit der elastischen Anfangsverformung mit 98 % beziehungsweise 90 % mehr oder weniger übereinstimmt. Daraus kann geschlossen werden, dass das elastische Materialverhalten durch die Dauerbelastung nicht beeinflusst wird.

Tab. 4.11.: Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung

Seriennummer	w_0	$w_{91}-w_0/w_0$	$w_{365}-w_0/w_0$	$w_{365}-w_{365+e}/w_0$	$w_{365}-w_{365+1}/w_0$
S1_004_365	100 %	132 %	263 %	98 %	104 %
S1_005_365	100 %	112 %	216 %	90 %	96 %

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, ist nach ift-Richtlinie VE-08/3 [59] und der Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme [60] der Verformungszuwachs innerhalb von drei Wochen interessant und auf $0,10\text{ mm}$ beschränkt. Die entsprechenden Verformungszuwächse der beiden relevanten Lastniveaus der Serie S1 sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Bereits nach 23 Tagen wird sowohl mit $0,04\text{ N/mm}^2$ als auch mit $0,05\text{ N/mm}^2$ das Kriterium erfüllt. Die Verformungszunahme der Serie S1_005_365 beträgt im Zeitraum von Tag 2 bis Tag 23 lediglich $0,098\text{ mm}$. Der Versuch könnte nach [59, 60] also bereits abgebrochen werden und der Klebstoff für diese Belastungen als zulässig befunden werden. Im weiteren Versuchsverlauf wird das Kriterium noch zwei mal für einen kurzen Zeitraum überschritten, das in den Richtlinien genannte Kriterium ist aber ab Belastungstag 56 für beide untersuchten Lastniveaus durchgehend erfüllt. Blickt man auf den Verformungszuwachs zum in [2] genannten Zeitpunkt von 91 Tagen,

4. Experimentelle Untersuchungen

wird deutlich, dass auch zu diesem Zeitpunkt das Kriterium eindeutig eingehalten wird, womit die Kriechverformungen als abgeschlossen gelten.

Bezüglich der zeitabhängigen Verformung können alle Kriterien als bedenkenlos erfüllt betrachtet werden.

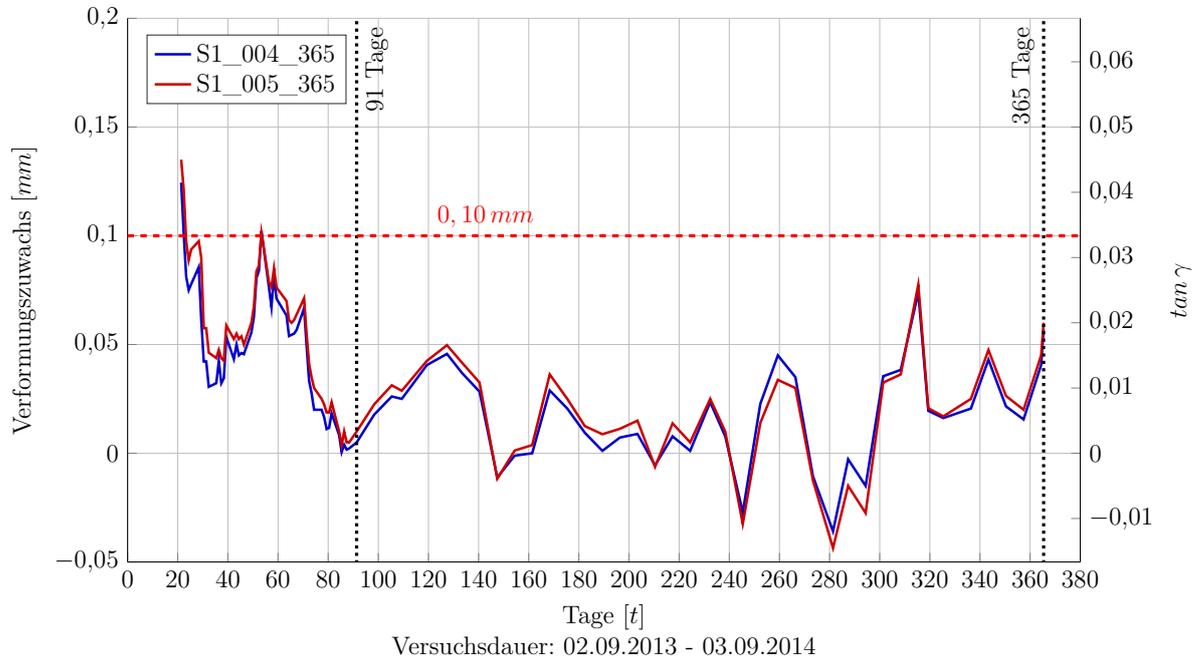


Abb. 4.6.: Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der Kleinproben S1 über 365 Tage mit den Belastungen 0,04 und 0,05 N/mm^2

Auffällig ist, dass die Verformungen (siehe Abbildung 4.5) während des Versuchs zu manchen Zeitpunkten rückläufig sind, die Verschiebung zwischen Koppelleiste und Glasscheibe geringer wird, obwohl die Belastung konstant bleibt. Auch der Verformungszuwachs aus Abbildung 4.6 zeigt keinerlei gleichmäßige Abnahme mit Fortschreiten der Versuchsdauer. Diese Umstände können lediglich auf die klimatischen Bedingungen im Versuchsraum zurückzuführen sein. In Abbildung 4.7 sind die Mittelwerte aus den beiden Messwerten der zwei Klimadatenlogger bezüglich Temperatur und relativer Luftfeuchte angegeben.

Man erkennt deutlich die großen Schwankungen über die Versuchsdauer. Die Minimal- und Maximalwerte betragen 16,10 % beziehungsweise 84,20 % bezüglich der relativen Luftfeuchte, während die Temperatur zwischen 9,60 °C und 46,80 °C schwankte. Die mittlere relative Luftfeuchte über den gesamten Versuchszeitraum beträgt 54,87 %, die mittlere Temperatur 21,57 °C. Die stabile Temperaturphase ab etwa dem 50. Tag ist darauf zurückzuführen, dass an diesem Tag in der an den Versuchsraum anschließenden Werkshalle die Heizung über die Wintermonate hinweg eingeschaltet wurde, woraus eine

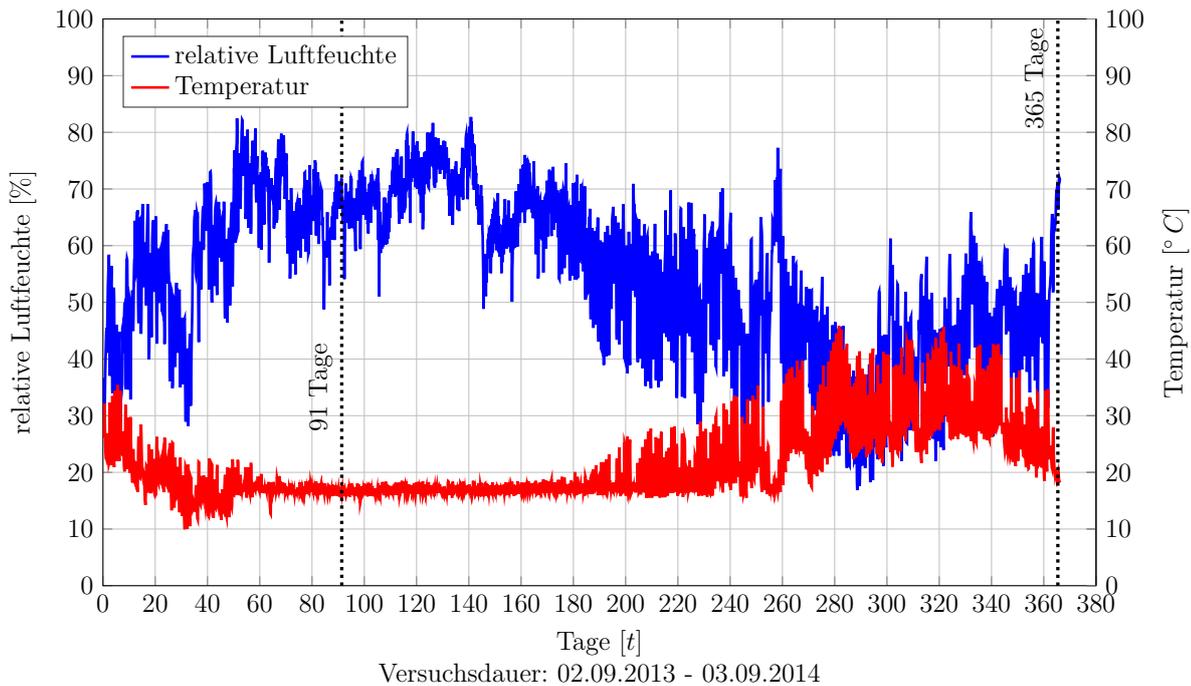


Abb. 4.7.: Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie S1

Mindesttemperatur von 16°C resultierte.

Zu beachten sind auch die Schwankungen des Klimas innerhalb eines Tages. Innerhalb von 24 h ist es zu Schwankungen der relativen Luftfeuchte von bis zu $37,65\%$ gekommen. Der gemessene Temperaturunterschied innerhalb von 24 h betrug maximal $19,55^{\circ}\text{C}$. Somit spielt für die Messung der Kriechverformungen aus Abbildung 4.5 auch der Zeitpunkt der täglichen Messung eine Rolle und erfolgte daher immer zur selben Zeit in der Früh des jeweiligen Messtages. Betrachtet man nur die Klimabedingungen zum Zeitpunkt der Messungen ergeben sich die größten Unterschiede von Tag 250 auf Tag 251. Hier variierte die relative Luftfeuchte um $36,00\%$ und die Temperatur im Versuchsraum um $15,40^{\circ}\text{C}$. Diese Tage liegen auch genau in jenem Zeitraum, in dem ein abermaliger starker Anstieg der Verformungen festgestellt werden kann, siehe Abbildungen 4.5 und 4.6. Zurückzuführen ist dies laut Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik²⁴ (ZAMG) [64] auf das Eintreffen einer Kaltfront nach einer längeren Wärmeperiode, was sich auch im Kriechverhalten der Kleinprobekörper zeigte.

Durch die Unterschiede im Klima schwindet und quillt auch die Koppelleiste aus BFU, was sich auf die Messung auswirkt. Eine hohe Luftfeuchte bedingt eine Verlängerung der Leiste und wird bei der gewählten Anordnung der Messmittel als zusätzliche Verformung

²⁴Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A-1190 Wien

4. Experimentelle Untersuchungen

gemessen. Dies war vor allem in der zweiten Hälfte des Versuchs bemerkbar. Vergleicht man den Verformungszuwachs aus Abbildung 4.6 mit dem Verlauf der relativen Luftfeuchte aus Abbildung 4.7, erkennt man, dass mit einem Anstieg der Luftfeuchte mit geringer zeitlicher Verzögerung auch ein Anstieg der Verformungen einher geht.

Der Gesamteinfluss der klimatischen Bedingungen auf die Messung wird durch die Kleinproben unter Eigengewicht aufgezeichnet, da das Gewicht der Glasscheibe selbst nur sehr geringe Auswirkungen auf das Kriechverhalten haben kann. Zieht man die Verformung der Kleinproben unter Eigengewicht von den beiden anderen Serien ab, ergibt sich die reine Kriechverformung als Folge der gewählten Zusatzlast. Diese Verformungskurven sind in Abbildung 4.8 dargestellt.

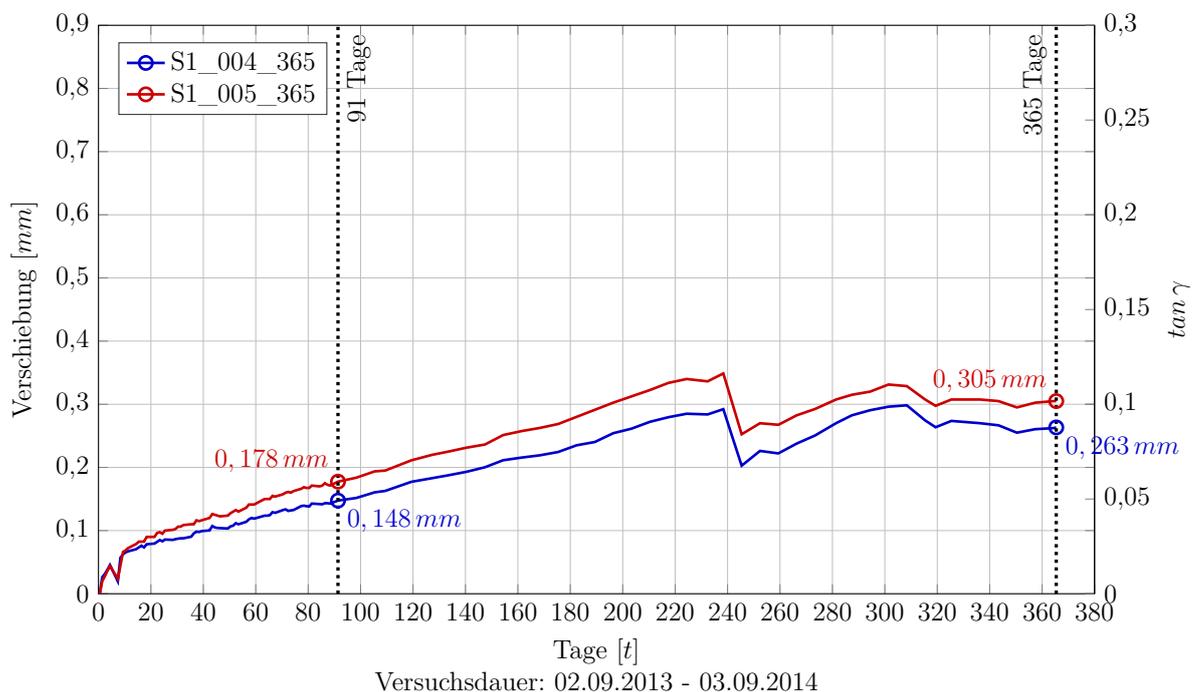


Abb. 4.8.: Kriechverformung von Kleinproben über 365 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und Abzug der Verformungen zufolge Klimaeinflusses

Um Tag 240 wird dabei ein deutlicher Sprung sichtbar, der aus einem enorm stark ausgeprägten Kriechverhalten einer einzelnen Kleinprobe ohne Zusatzbelastung resultiert. Wie in Abbildung 4.5 zu sehen, steigt zu diesem Zeitpunkt die Streuung der Ergebnisse der Serie S1_000_365 sprunghaft an, wodurch auch der Mittelwert etwas verfälscht wird. Dies wirkt sich in weiterer Folge auf die berechneten Verformungskurven aus Abbildung 4.8 aus. Missachtet man diese offensichtliche Störung und betrachtet man den qualitativen Verlauf, wird deutlich, dass die Kriechverformungen zufolge Dauerlast fortschreitend nach

und nach abnehmen. Gegen Ende der ein Jahr andauernden Belastung verlaufen beide Kurven nahezu horizontal, es besteht also zu diesem Zeitpunkt keinerlei Unterschied im Kriechverhalten des Silikonklebstoffs zwischen den mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ und den mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ belasteten Kleinproben. Es wurde nachträglich festgestellt, dass bei den Kleinproben der Serie S1_000_365 Fehlstellen in der Klebefuge vorhanden waren. Dies ist bei der Betrachtung der erzielten Ergebnisse zu berücksichtigen. Daher sollen die in Abbildung 4.8 dargestellten Kriechkurven auch rein qualitativ betrachtet werden. Die quantitative Beurteilung der Kriechverformungen ohne zusätzlichen Klimaeinfluss muss gegebenenfalls in zusätzlichen Untersuchungen betrachtet werden, wurde aber für 91 Tage und unterschiedlichen Lastniveaus bereits in [5] begutachtet.

Grundsätzlich kann auf Basis der durchgeführten Kriechversuche die von der HFA in [5] verlangte Grenze von einer maximalen Dauerschubspannung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ nicht bestätigt werden.

4.3.1.2. Scherversuch

Die zuvor dauerbelasteten Kleinprobekörper wurden nach der aus Tabelle 4.9 und Abbildung 4.9 ersichtlichen Belastungsgeschichte auf ihre Restscherfestigkeit überprüft und nach den in Abschnitt 4.1 angeführten Methoden ausgewertet. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt in Anlehnung an die in [5] durchgeführten Untersuchungen bei den Kurzzeitversuchen $0,5 \text{ mm/min}$. In [2] wird eine Geschwindigkeit von 5 mm/min vorgeschlagen, mit der Änderung wird auf die Verringerung der Klebefugendicke von 6 auf 3 mm reagiert und eine sanftere Belastung gewährleistet. Um einen Schlupf zu Versuchsbeginn zu vermeiden, wurde die Messung der Verformung bei einer Vorlast von 15 N gestartet. In Abbildung 4.10 wird beispielhaft eine repräsentative Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie S1 dargestellt. Man erkennt einen linearen Verlauf sowie einen abrupten Abfall der aufnehmbaren Last zum Zeitpunkt der Brucheinleitung.

4. Experimentelle Untersuchungen

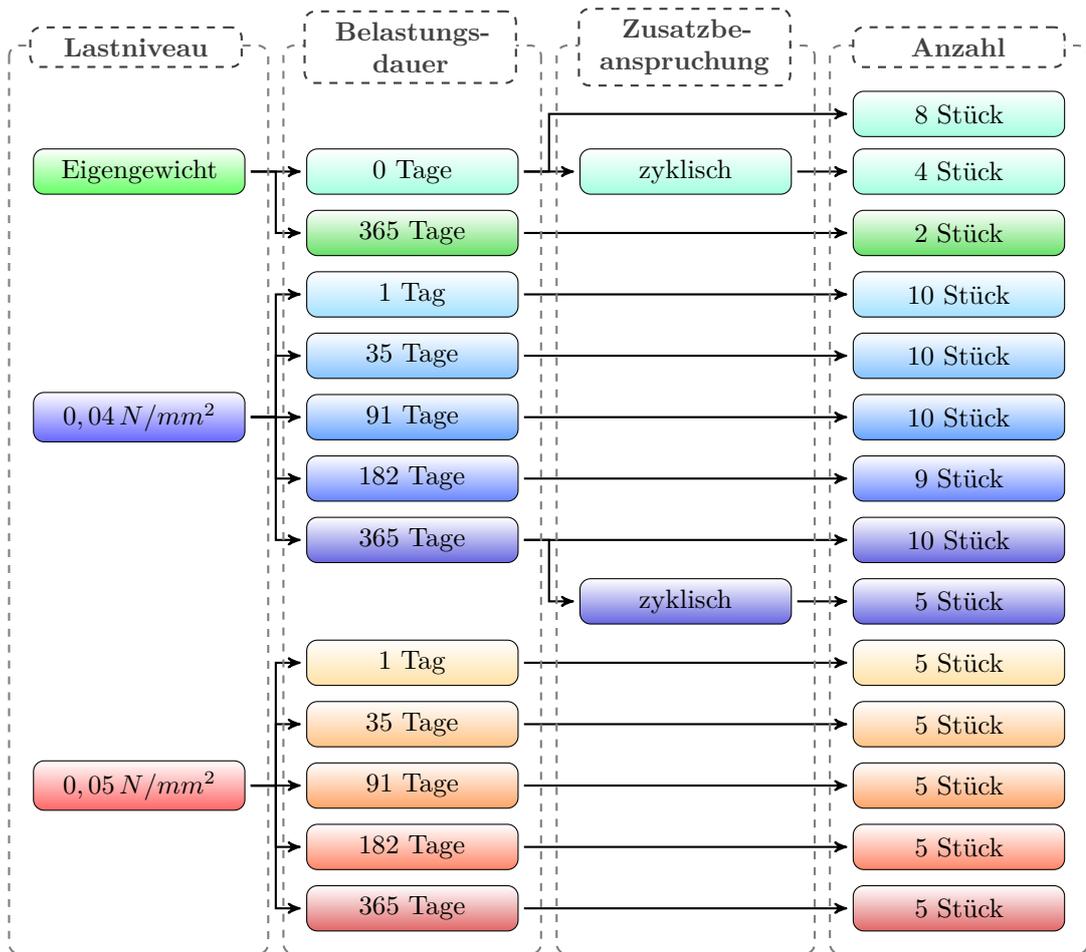


Abb. 4.9.: Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie S1

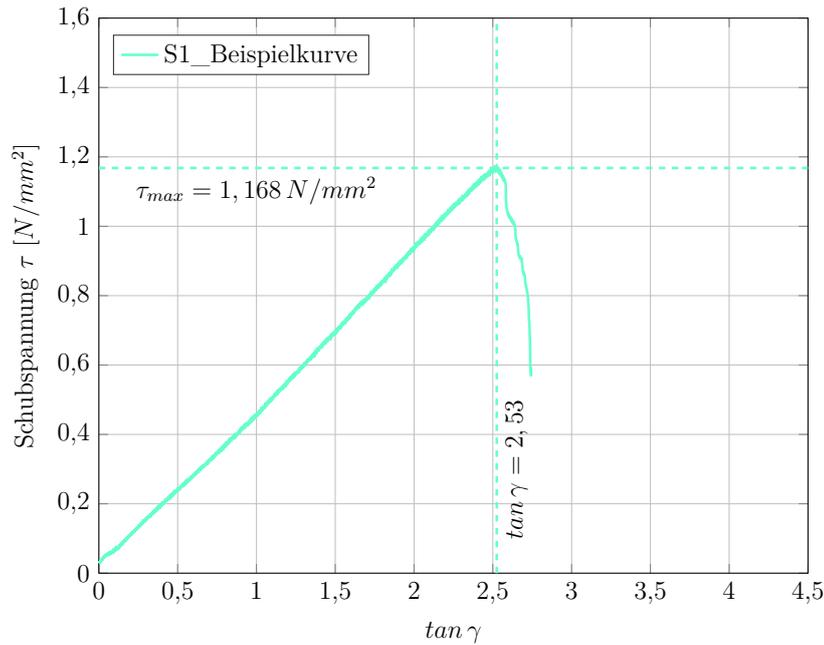


Abb. 4.10.: Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie S1_000_000

4.3.1.2.1. Unbelastete Kleinprobekörper

Zu Beginn der gesamten Versuchsserie werden Probekörper ohne jegliche vorangegangene Belastung geprüft, um die tatsächliche Scherfestigkeit des Klebstoffs bei dieser Probekörpergeometrie und der gewählten Versuchsanordnung festzustellen. Diese Ergebnisse dienen im Folgenden regelmäßig als Bezugswerte, um eine Veränderung zur Ausgangsfestigkeit feststellen und nachvollziehen zu können. Die Ergebnisse dieser Versuchsserie sind in Abbildung 4.11 und Tabelle 4.12 angeführt. Bei acht Prüfkörpern ergibt sich eine mittlere Schubspannung von $\tau_m = 1,168 N/mm^2$ und eine vergleichsweise geringe Streuung der Ergebnisse, was in entsprechend hohen $R_{u,5}$ -Werten resultiert. Als Schubmodul ergibt sich für diese Serie ein Wert von $0,407 N/mm^2$.

4. Experimentelle Untersuchungen

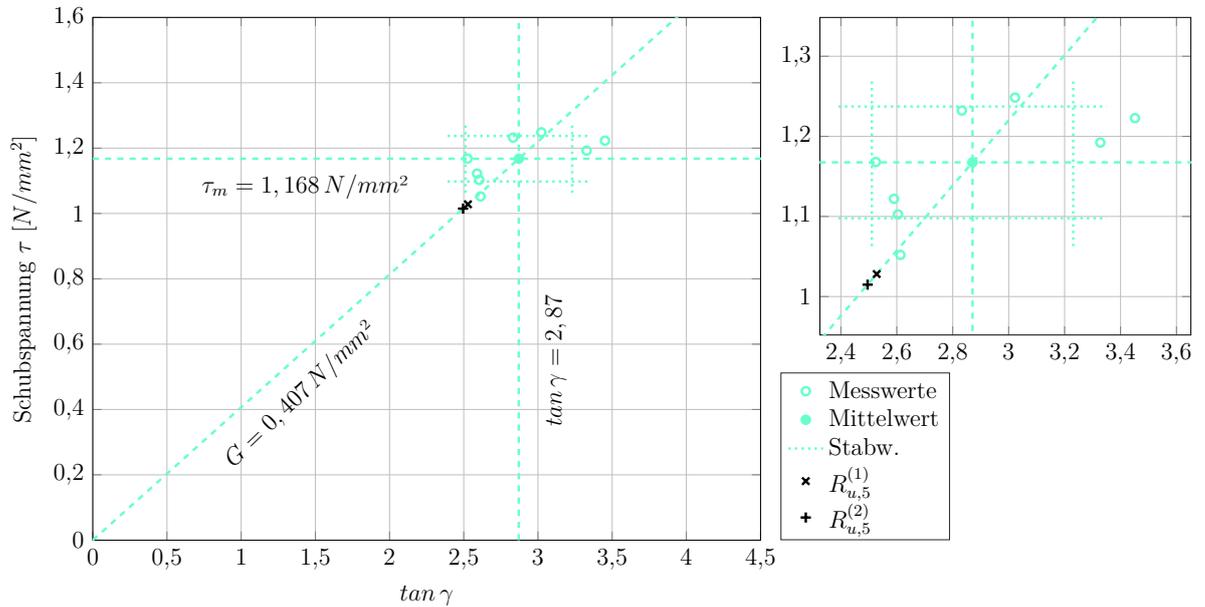


Abb. 4.11.: Schubfestigkeiten an Kleinproben ohne Vorbelastung (S1_000_000)

Tab. 4.12.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben ohne Vorbelastung (S1_000_000)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_000_000	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 8$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,168 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,070 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,060$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 1,028 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 1,015 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,87$
Schubmodul	$G = 0,407 \text{ N/mm}^2$

Die Kleinprobekörper nach einer Belastung durch das Eigengewicht der Glasscheibe über 365 Tage (Abbildung 4.12 und Tabelle 4.13) erreichen deutlich geringere Werte. Es gilt jedoch zu erwähnen, dass hier nur zwei Probekörper getestet werden konnten, womit die Serie S1_000_365 nicht als repräsentativ angesehen werden kann. Es wurden des Weiteren kleine Fehlstellen an der Klebefuge festgestellt. Durch die geringe Anzahl an Probekörpern konnte keine 5 %-Quantile der Schubfestigkeit berechnet werden.

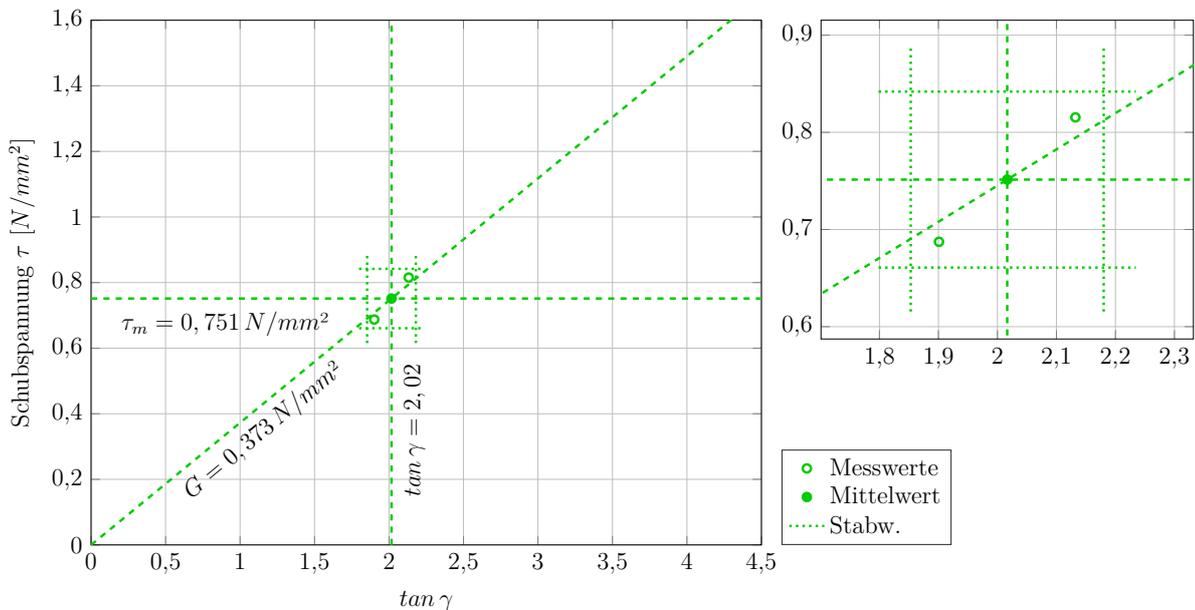


Abb. 4.12.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (S1_000_365)

Tab. 4.13.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (S1_000_365)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_000_365	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 2$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,751 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,091 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,121$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = -$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,02$
Schubmodul	$G = 0,373 \text{ N/mm}^2$

4.3.1.2.2. Kleinprobekörper mit einer Vorbelastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$

Bereits nach einem Tag Belastung werden die ersten Probekörper wieder entlastet und deren Restscherfestigkeit getestet. Bei jenen Probekörpern, die mit einer vorangegangenen Dauerlast von $0,04 \text{ N/mm}^2$ beansprucht waren, ist eine sehr breite Streuung erkennbar, siehe Abbildung 4.13 und Tabelle 4.14. Dies ergibt entsprechend geringe $R_{u,5}$ -Werte, obwohl der Mittelwert durchaus ein ähnliches Niveau wie Serie S1_000_000 (Abbildung 4.11, Tabelle 4.12) erreicht. Das Schubmodul G entspricht mit $0,385 \text{ N/mm}^2$ den bisherigen Ergebnissen.

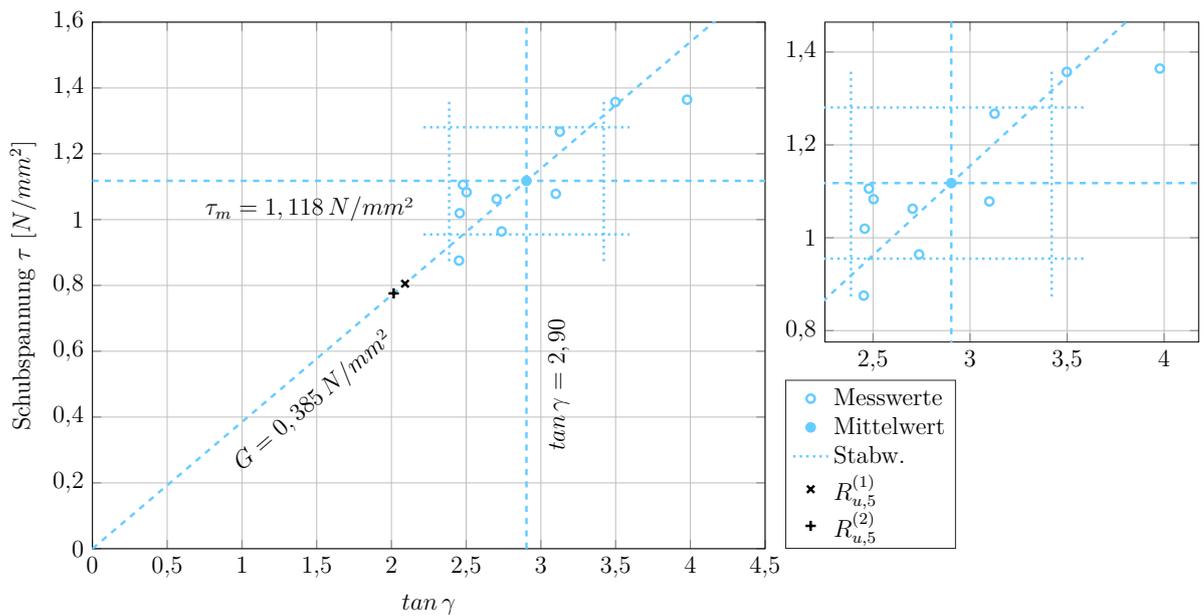
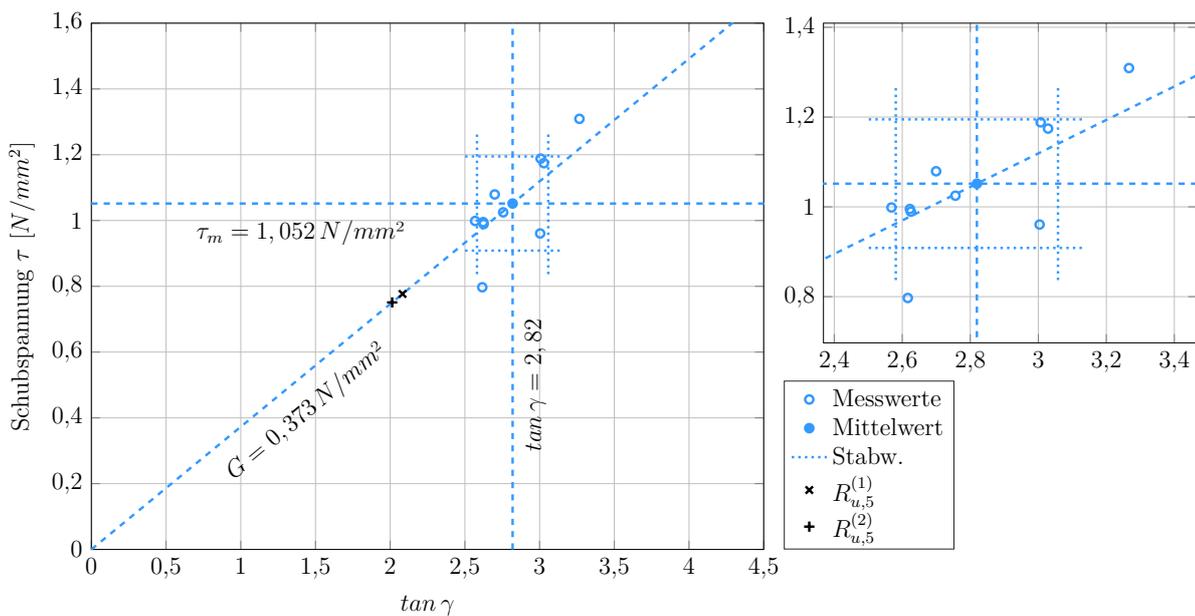


Abb. 4.13.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 1 Tag Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (S1_004_001)

Tab. 4.14.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 1 Tag Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (S1_004_001)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_004_001	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,118 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,163 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,146$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,805 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,776 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,90$
Schubmodul	$G = 0,385 \text{ N/mm}^2$

Die Ergebnisse der Tests an den Kleinproben nach 35 Tagen Belastung (siehe Abbildung 4.14 und Tabelle 4.15) ähneln jenen mit nur einem Tag Belastung (Abbildung 4.13, Tabelle 4.14) stark. Es ist kein weiterer Festigkeitsverlust erkennbar. Die verhältnismäßig breite Streuung der Festigkeiten hat auch hier Auswirkungen auf die $R_{u,5}$ -Werte. Die Steifigkeit des Klebstoffs ist im Bereich der kürzer belasteten Proben angesiedelt.

Abb. 4.14.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (S1_004_035)

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.15.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (S1_004_035)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_004_035	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,052 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,143 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,136$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,777 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,751 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,82$
Schubmodul	$G = 0,373 \text{ N/mm}^2$

Dasselbe Bild zeigt sich nach insgesamt 91 Tagen Dauerbeanspruchung. Wiederum ergibt sich ein Mittelwert der Schubfestigkeit von etwa $1,0 \text{ N/mm}^2$, siehe Abbildung 4.15 und Tabelle 4.16. Durch die geringe Streuung der Festigkeitswerte der hier geprüften Probekörper ergeben sich höhere $R_{u,5}$ -Werte als bei den vorzeitig entlasteten Kleinproben (Abbildung 4.13 und 4.14 sowie Tabelle 4.14 und 4.15). Die Schubsteifigkeit erfährt keine Veränderung.

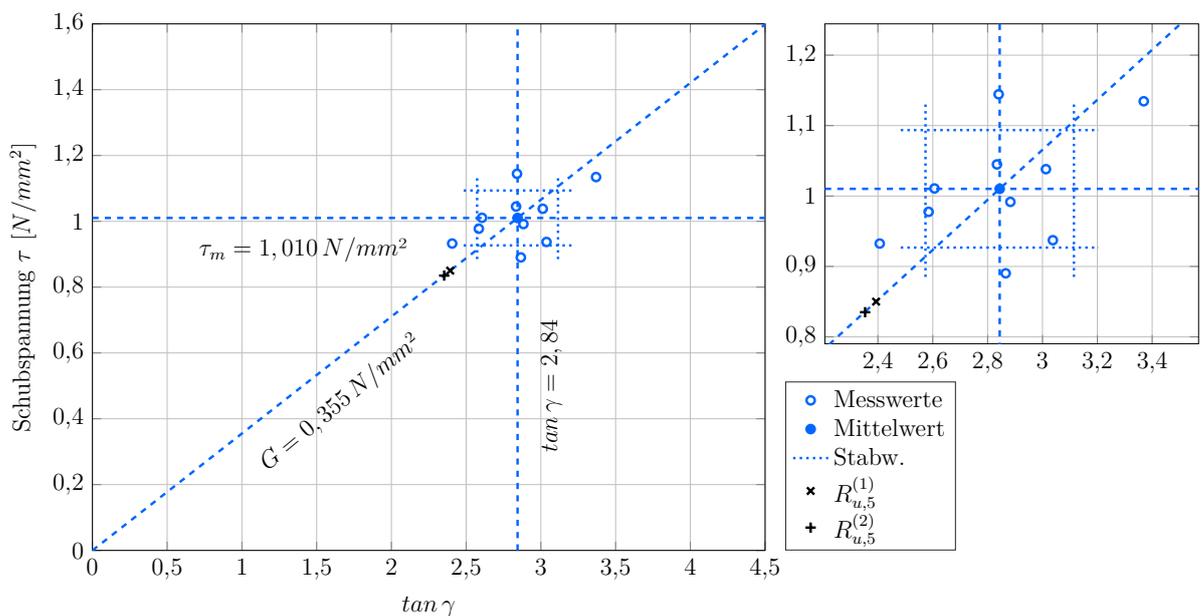
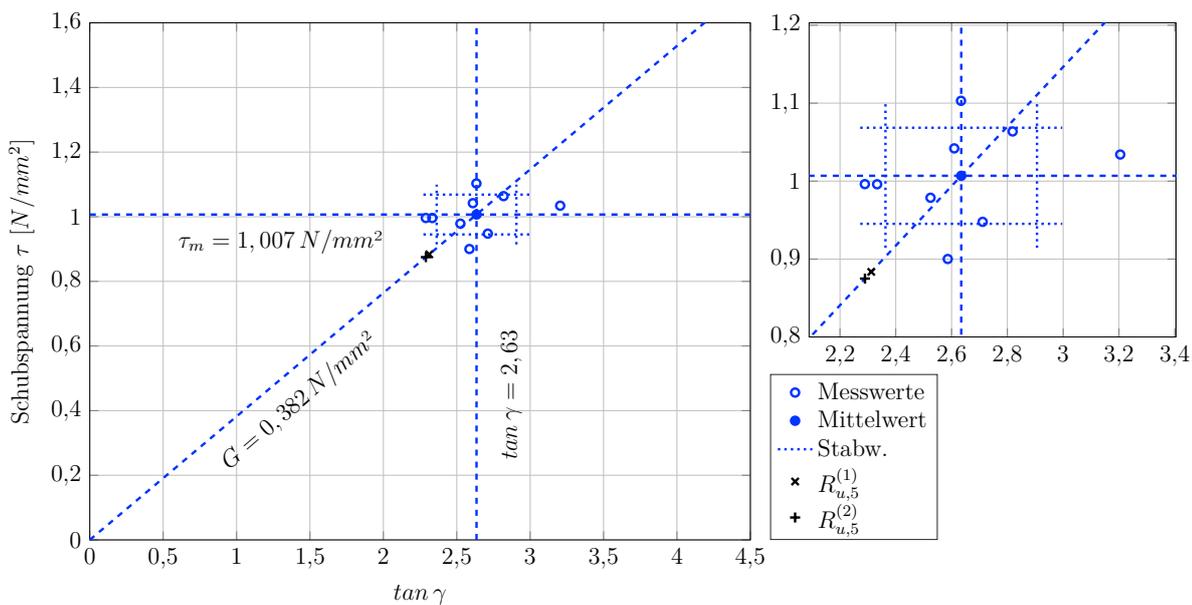


Abb. 4.15.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (S1_004_091)

Tab. 4.16.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (S1_004_091)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_004_091	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,010 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,083 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,083$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,850 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,835 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,84$
Schubmodul	$G = 0,355 \text{ N/mm}^2$

Nach 182 Tagen wurden abermals Probekörper entlastet und einer Kurzzeitscherprüfung unterzogen. Die mit diesen Kleinproben erzielten Werte (Abbildung 4.16 und Tabelle 4.17) sind beinahe ident zu jenen nach 91 Tagen Dauerlast (Abbildung 4.15, Tabelle 4.16). Es kann also auch nach 182 Tagen Dauerbeanspruchung noch kein Festigkeits- und Steifigkeitsverlust des Klebstoffs festgestellt werden.

Abb. 4.16.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 182 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (S1_004_182)

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.17.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 182 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (S1_004_182)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_004_182	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 9$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,007 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,062 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,061$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,884 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,875 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,63$
Schubmodul	$G = 0,382 \text{ N/mm}^2$

Die letzten Kleinproben der Serie S1 wurden nach einer Dauer von 365 Tagen unter Beanspruchung entlastet und nach einem Tag Ruhezeit auf deren Scherfestigkeit überprüft. Die Ergebnisse aus Abbildung 4.17 und Tabelle 4.18 stellen die Versuchsergebnisse jener Probekörper dar, an welchen auch die Kriechverformungen unter Last (Abbildung 4.5, Tabelle 4.10) gemessen wurden. Im Vergleich zu allen früher entlasteten Serien mit einer vorangegangenen Dauerbeanspruchung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ (Abbildung 4.13 bis 4.16 und Tabelle 4.14 bis 4.17) erreicht diese Serie die höchsten Festigkeitswerte. Das Schubmodul liegt in derselben Größenordnung wie bei den früheren Prüfungen.

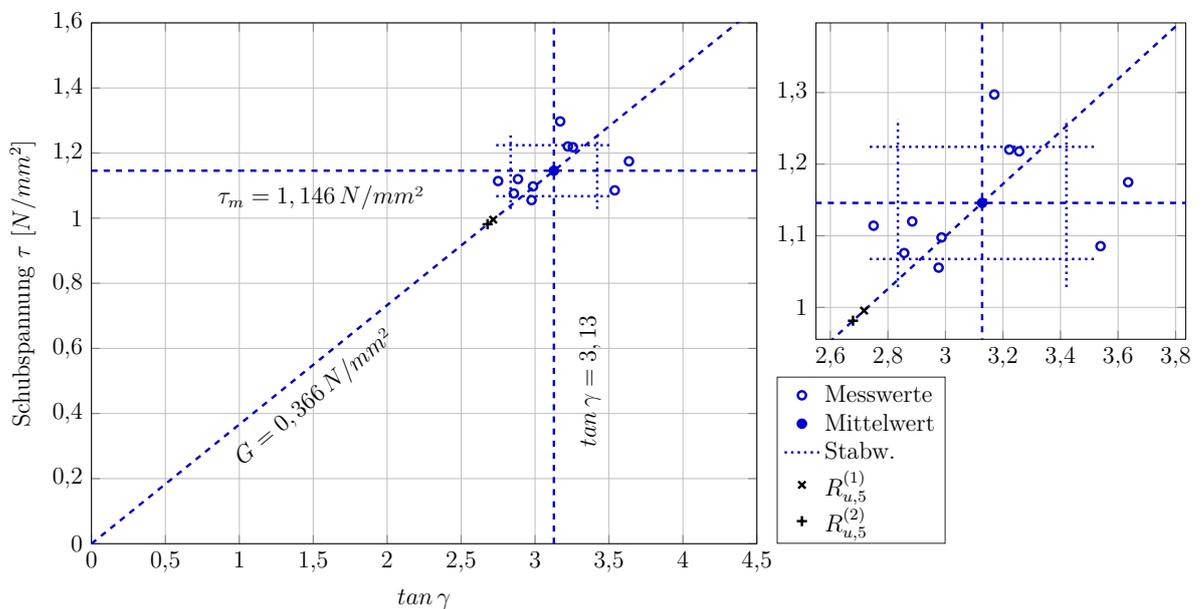
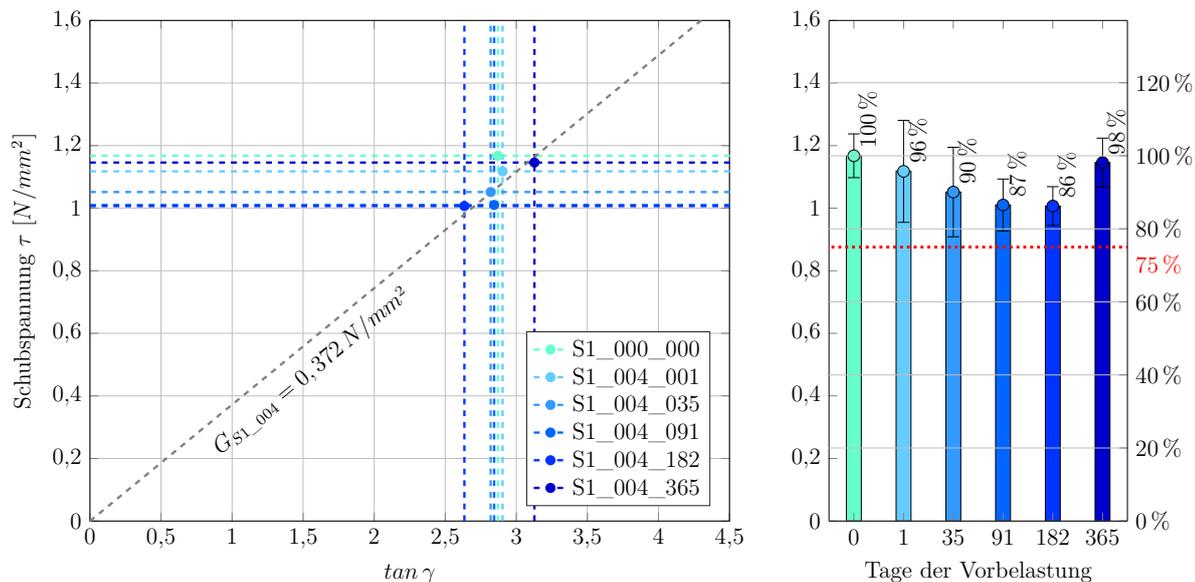


Abb. 4.17.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (S1_004_365)

Tab. 4.18.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_365)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_004_365	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,146 N/mm^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,078 N/mm^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,068$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,995 N/mm^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,981 N/mm^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 3,13$
Schubmodul	$G = 0,366 N/mm^2$

In Abbildung 4.18 sind die erreichten Mittelwerte der gesamten Serie gesammelt dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Ergebnisse der Probekörper ohne vorangegangene Dauerbelastung angeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die in der ETAG 002-1 [2] geforderte Grenze von 75 % der Anfangsfestigkeit in keinem Fall unterschritten wird. Eine Beanspruchung von $0,04 N/mm^2$ kann als durchaus akzeptabel erachtet werden, da auch unter längerer Beanspruchung kein drastischer Festigkeitsverlust erwartet wird.

Abb. 4.18.: Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie S1 nach einer Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$

Betrachtet man die Tabellen 4.14 bis 4.18, fällt auf, dass die 5%-Quantile sowie in weiterer Folge der Bemessungswert der Schubfestigkeit deutlich schwanken. In die

4. Experimentelle Untersuchungen

Berechnung dieser Kennwerte fließt die Probenanzahl ein, deren Einfluss mit steigender Menge der Probekörper aber abnimmt. Da, wie zuvor beschrieben, kein expliziter Verlust der Festigkeit mit fortschreitender Belastungsdauer festgestellt werden kann, wird in Tabelle 4.19 eine Gesamtauswertung aller Proben der Serie S1 mit einer Belastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ vorgenommen. Diese Ergebnisse stellen eine gute Übersicht über die tatsächlichen Eigenschaften des Klebstoffs unter dieser Belastung dar. Etwaige lokale Unregelmäßigkeiten fallen bei einer Stückzahl von insgesamt 49 Probekörpern kaum ins Gewicht.

Tab. 4.19.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie S1 mit einer Vorbelastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_004	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 49$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,068 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,123 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,115$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,866 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,866 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,87$
Schubmodul	$G = 0,372 \text{ N/mm}^2$

4.3.1.2.3. Kleinprobekörper mit einer Vorbelastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$

Auch bei der Serie der Kleinproben mit einer Langzeitbeanspruchung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ wurden die ersten Probekörper bereits nach einem Tag Belastung wieder entlastet und die Restscherfestigkeit dieser Probekörper überprüft. Es ergibt sich ein Mittelwert von etwa $1,0 \text{ N/mm}^2$, bei sehr geringer Streuung, was in dementsprechend hohen $R_{u,5}$ -Werten resultiert, siehe Abbildung 4.19 und Tabelle 4.20. Nach einem Tag Beanspruchung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ ist noch kein signifikanter Verlust der Festigkeit des verwendeten Klebstoffs erkennbar. Das Schubmodul ist mit den Ergebnissen der Serie mit einer Dauerlast von $0,04 \text{ N/mm}^2$ vergleichbar.

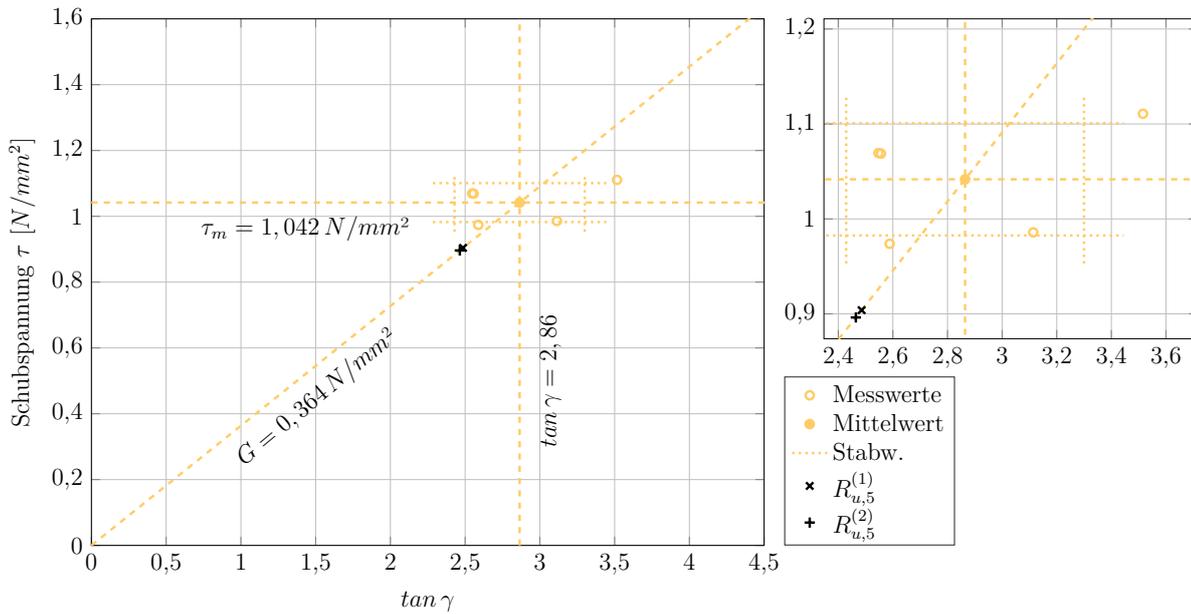


Abb. 4.19.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 1 Tag Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S1_005_001)

Tab. 4.20.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 1 Tag Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S1_005_001)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_005_001	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,042 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,059 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,076$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,904 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,896 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,86$
Schubmodul	$G = 0,364 \text{ N/mm}^2$

4. Experimentelle Untersuchungen

Nach 35 Tagen wurden die nächsten fünf Stück Kleinprobekörper entlastet und deren Schubfestigkeit getestet, siehe Abbildung 4.20 und Tabelle 4.21. Wiederum ist kein Festigkeitsverlust gegenüber den vorangegangenen Serien erkennbar. Die Streuung ist geringfügig höher als jene der Serie S1_005_001 (Abbildung 4.19, Tabelle 4.20), weshalb sich geringere $R_{u,5}$ -Werte ergeben. Im Gegensatz dazu steigt das Schubmodul jedoch an.

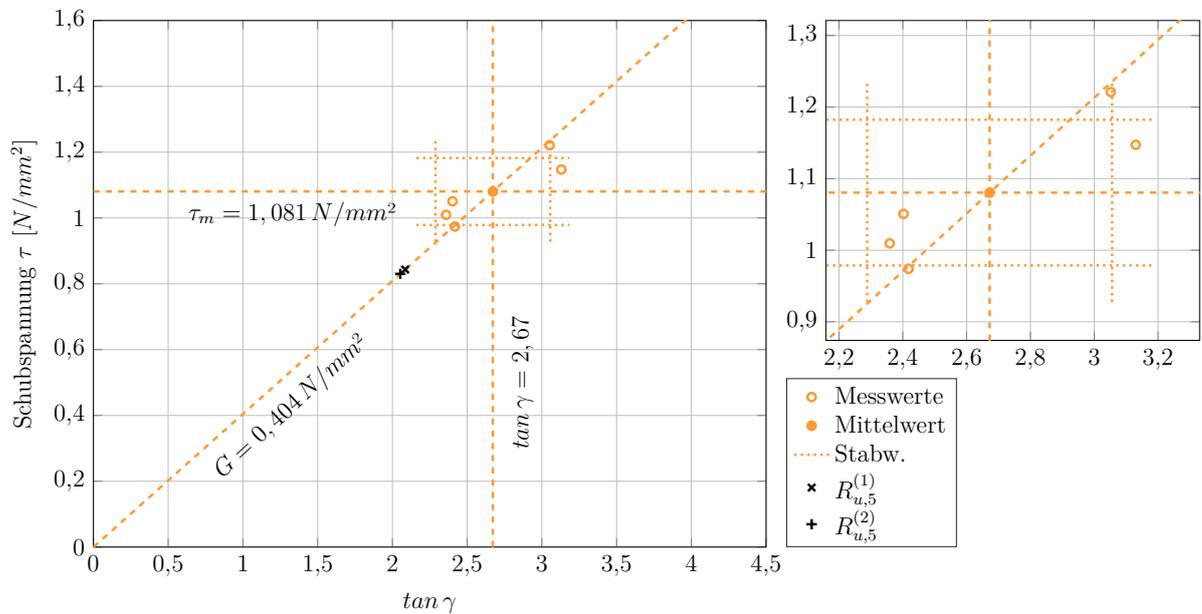


Abb. 4.20.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S1_005_035)

Tab. 4.21.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S1_005_035)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_005_035	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,081 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,102 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,094$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,843 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,830 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,67$
Schubmodul	$G = 0,404 \text{ N/mm}^2$

Nach 91 Tagen Dauerlast wird erstmals ein kleiner Abfall der Festigkeit bemerkbar, siehe Abbildung 4.21 und Tabelle 4.22. Auch die Streuung steigt an, weshalb die errechneten

$R_{u,5}$ -Werte dementsprechend absinken. Bezüglich der Schubsteifigkeit G entsprechen auch die Probekörper dieser Serie der bisher erkennbaren Tendenz.

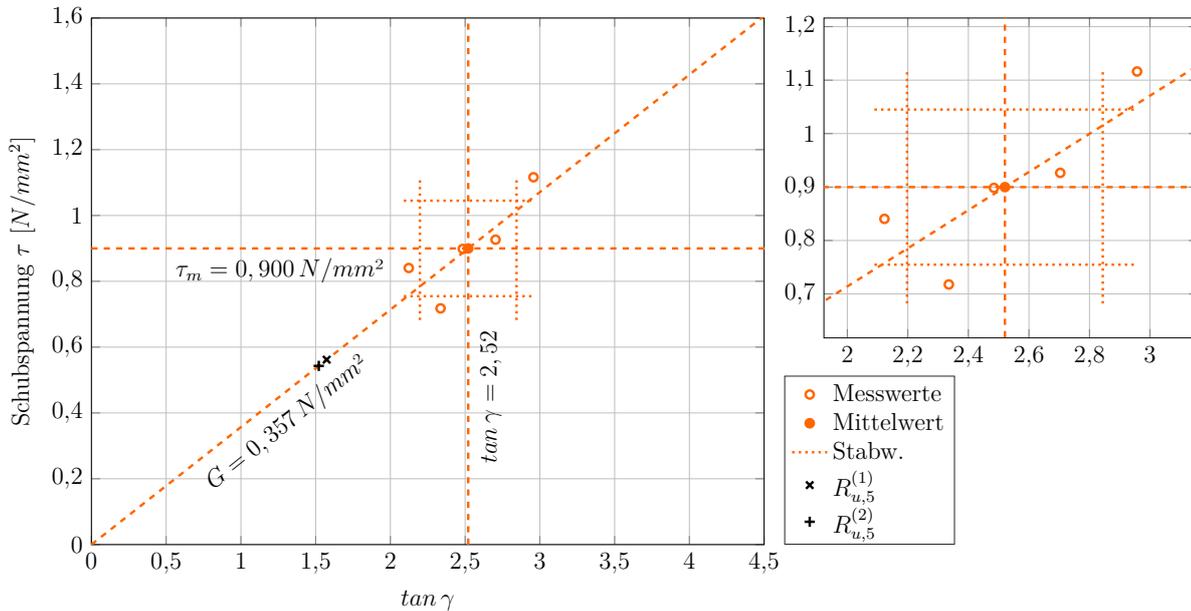


Abb. 4.21.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S1_005_091)

Tab. 4.22.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S1_005_091)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_005_091	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,900 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,145 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,161$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,562 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,543 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,52$
Schubmodul	$G = 0,357 \text{ N/mm}^2$

Die nächste Serie wurde nach 182 Tagen Dauerbeanspruchung getestet. Im Gegensatz zu den Kleinproben nach 91 Tagen unter einem Lastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$ (Abbildung 4.21, Tabelle 4.22) werden hier sehr hohe Festigkeitswerte bei einer äußerst geringen Streuung der Ergebnisse erreicht, siehe Abbildung 4.22 und Tabelle 4.23. Daher steigen die $R_{u,5}$ -Werte an. Die Schubsteifigkeit ist beinahe ident zu den vorangegangenen Überprüfungen.

4. Experimentelle Untersuchungen

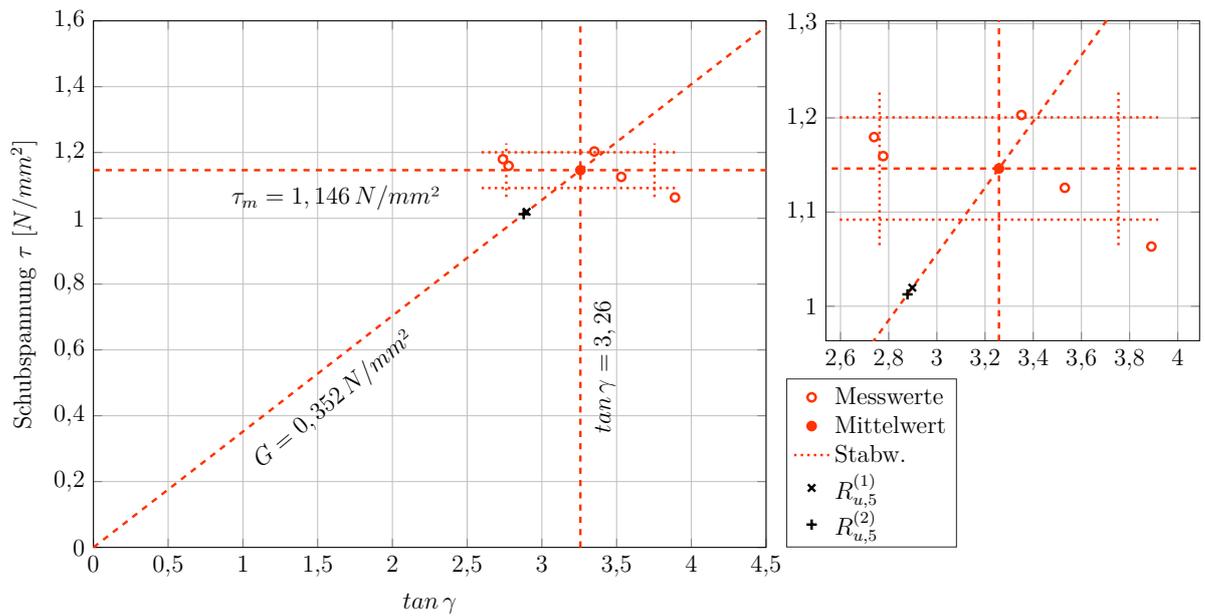


Abb. 4.22.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 182 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S1_005_182)

Tab. 4.23.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 182 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S1_005_182)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_005_182	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,146 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,054 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,047$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 1,020 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 1,013 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 3,26$
Schubmodul	$G = 0,352 \text{ N/mm}^2$

4. Experimentelle Untersuchungen

0,05 N/mm^2 zu sehen. Es zeigt sich im Vergleich zu Abbildung 4.18, wo die Ergebnisse der Kleinprobekörper mit einer Langzeitbeanspruchung von 0,04 N/mm^2 dargestellt sind, eine größere Variation der Resultate. Diese resultiert aber auch aus der geringeren Anzahl der verwendeten Probekörper. Abschließend kann festgehalten werden, dass auch hier jede Serie das Kriterium von mindestens 75 % der Anfangsscherfestigkeit erfüllt und kein eindeutiger Trend der Abminderung der Restfestigkeit mit fortschreitender Belastungsdauer ausgemacht werden kann.

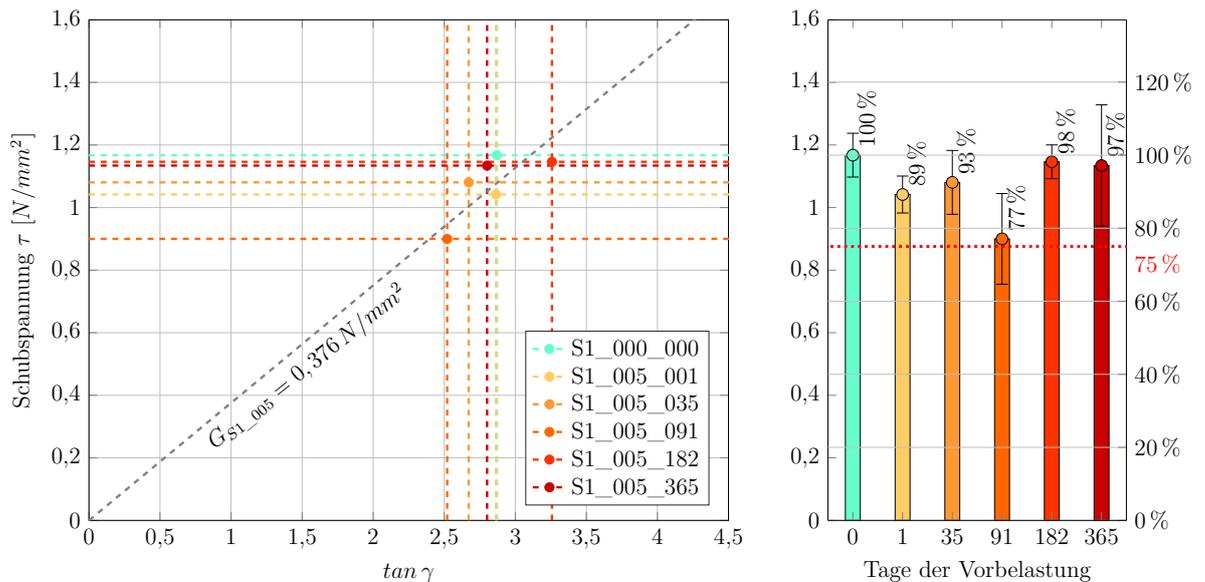


Abb. 4.24.: Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie S1 nach Vorbelastung mit 0,05 N/mm^2

Analog zu Abschnitt 4.3.1.2.2 werden alle Kleinprobekörper mit einer Vorbelastung von 0,05 N/mm^2 in Tabelle 4.25 zusammengefasst. Da im Falle der hier betrachteten Tests die Stückzahl pro Serie lediglich fünf Probekörper betrug, können vereinzelte Unregelmäßigkeiten besser ausgeglichen werden. Allgemein hat sich während der experimentellen Untersuchungen gezeigt, dass fünf Stück die untere Grenze der untersuchten Proben darstellen sollte. Zehn Probekörper pro Serie sind durchaus zu empfehlen. Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse sind in Tabelle 4.25 ebenfalls die Werte der Serie S1_004 aus Tabelle 4.19 eingetragen. Bei diesem Vergleich wird offensichtlich, dass kein Unterschied zwischen den gemittelten Werten der beiden Serien besteht. Insofern gibt es aufgrund der Ergebnisse der Scherfestigkeitsüberprüfungen keinen Grund die maximal erlaubte dauerhafte Schubspannung für den untersuchten Klebstoff auf 0,04 N/mm^2 zu beschränken, wie dies seitens der HFA in [5] gefordert wird.

Tab. 4.25.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie S1 mit einer Vorbelastung von $0,05 N/mm^2$ und $0,04 N/mm^2$

Ergebnisse der Versuchsreihe		S1_005	S1_004
Anzahl der Prüfkörper	n	= 25	49
Mittlere Schubfestigkeit	τ_m	= $1,061 N/mm^2$	$1,068 N/mm^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	s_x	= $0,144 N/mm^2$	$0,123 N/mm^2$
Variationskoeffizient	CoV	= 0,136	0,115
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)}$	= $0,810 N/mm^2$	$0,866 N/mm^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)}$	= $0,785 N/mm^2$	$0,866 N/mm^2$
Gleitung	$\tan \gamma$	= 2,82	2,87
Schubmodul	G	= $0,376 N/mm^2$	$0,372 N/mm^2$

4.3.1.2.4. Kleinprobekörper mit zyklischer Belastung

Zu Beginn der Testserie S1 wurden vier Probekörper nach der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Vorgehensweise mit dem in Abbildung 4.2 dargestellten Spannungszyklus belastet. Während dieser dynamischen Beanspruchung erfolgte keine Messung der auftretenden Verformungen. Als Grundlage für den $R_{u,5}$ -Wert zur Berechnung von τ_{des} wird hier die 5%-Quantile $R_{u,5}^{(1)}$, berechnet nach Eurocode 0 [1], der Kleinproben der Serie S1 ohne jegliche Vorbelastung herangezogen. Dieser Wert ist in Tabelle 4.12 ersichtlich. Die maximale Belastung während des Spannungszyklus τ_{des} müsste somit $0,343 N/mm^2$ betragen. Auf Grund eines Berechnungsfehlers der durchführenden Versuchsanstalt wurde der $R_{u,5}^{(1)}$ -Wert fälschlicherweise mit $0,984 N/mm^2$ angenommen, wodurch sich ein τ_{des} von $0,328 N/mm^2$ ergibt. Auf Basis dieses Werts erfolgte die Steuerung der Belastung gemäß Abbildung 4.2. Die durch den Fehler resultierende Differenz von $0,015 N/mm^2$ in der Maximalbelastung ist vernachlässigbar klein, weshalb die Ergebnisse der folgenden Versuche in ihrer Relevanz nicht beeinträchtigt werden.

Da eine Steuerung der Beanspruchung lediglich über die aufgebrachte Kraft erfolgen kann, wird bei allen Kleinprobekörpern von einer Klebefläche von $600 mm^2$ (siehe Abbildung 4.3) ausgegangen. Die tatsächlich auftretende Spannung kann aufgrund geringfügig unterschiedlicher Klebefugegeometrien variieren.

Anschließend wurde auch an jenen Kleinproben eine Überprüfung der Kurzzeitscherfestigkeit durchgeführt. In Abbildung 4.25 ist beispielhaft eine Spannungs-Schubgleitungslinie der Serie S1_000_000_z mit zyklischer Vorbelastung zu sehen.

Deutlich zu erkennen ist hier der sogenannte Mullins²⁵-Effekt [65] bis zu einem Span-

²⁵Leonard Mullins (1918-1991)

4. Experimentelle Untersuchungen

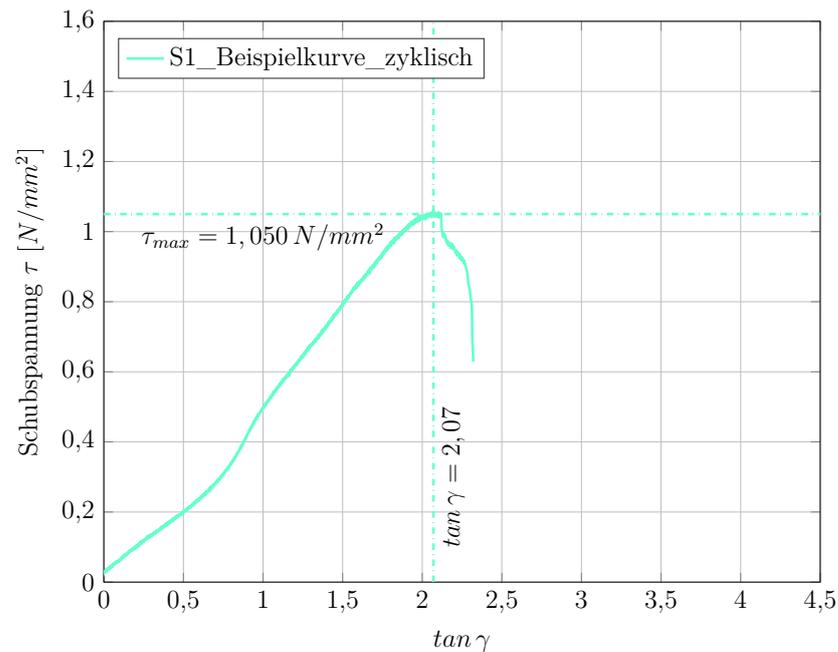


Abb. 4.25.: Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungslinie einer Probe der Serie S1_000_000_z

nungsniveau von etwa 0,3 bis 0,5 N/mm^2 . Dabei tritt nach einem ersten Belastungszyklus eine Entfestigung des Materials auf, bei wiederholter Belastung ergibt sich somit ein weicherer Materialverhalten. Bei Steigerung der Last kehrt die Spannungs-Dehnungslinie, oder in diesem Fall die Spannungs-Schubgleitungslinie, wieder auf ihren üblichen Pfad, wie bei einer Untersuchung ohne vorangegangene Belastung, zurück. Grund dafür dürften Zerstörungen von chemischen Bindungen im Lauf des Deformationsprozesses sein. Über den detaillierten Vorgang gibt es allerdings unterschiedliche Auffassungen [66].

Im Allgemeinen ist bei der Serie der Kleinprobekörper ohne vorangegangene Dauerlast, jedoch mit zyklischer Vorbelastung, kein großer Unterschied im Materialverhalten gegenüber jenen ohne zyklischer Belastung (Abbildung 4.11, Tabelle 4.12) zu erkennen. Die detaillierten Ergebnisse sind in Abbildung 4.26 und Tabelle 4.26 dargestellt. Durch die geringe Probenanzahl war eine Berechnung des $R_{u,5}^{(2)}$ -Werts nach ETAG 002-1 [2] nicht möglich. Es zeigt sich ein etwas steiferes Verhalten, zu erkennen am Schubmodul von 0,475 N/mm^2 .

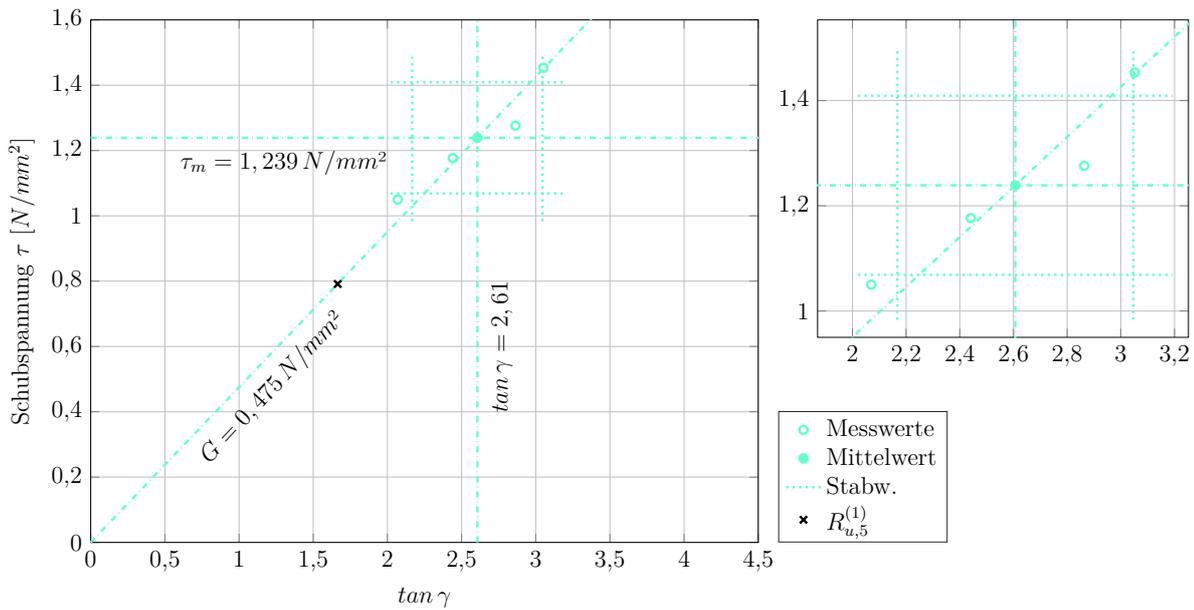


Abb. 4.26.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach zyklischer Beanspruchung (S1_000_000_z)

Tab. 4.26.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach zyklischer Beanspruchung (S1_000_000_z)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_000_000_z	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,239 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,170 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,137$
5%-Quantile der Schubfestigkeit nach [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,791 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit nach [2]	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,61$
Schubmodul	$G = 0,475 \text{ N/mm}^2$

4. Experimentelle Untersuchungen

Weitere fünf Stück Kleinprobekörper wurden für 365 Tage mit einer nominellen Spannung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ belastet, danach dem Spannungszyklus der dynamischen Beanspruchung unterzogen und erst dann auf deren Scherfestigkeit überprüft. Bei diesen Versuchen zeigt sich zwar ein Spannungsverlust gegenüber Probekörpern ohne jegliche Vorbelastung, dieser liegt aber durchaus im Bereich anderer Serien, siehe Abbildung 4.27 und Tabelle 4.27.

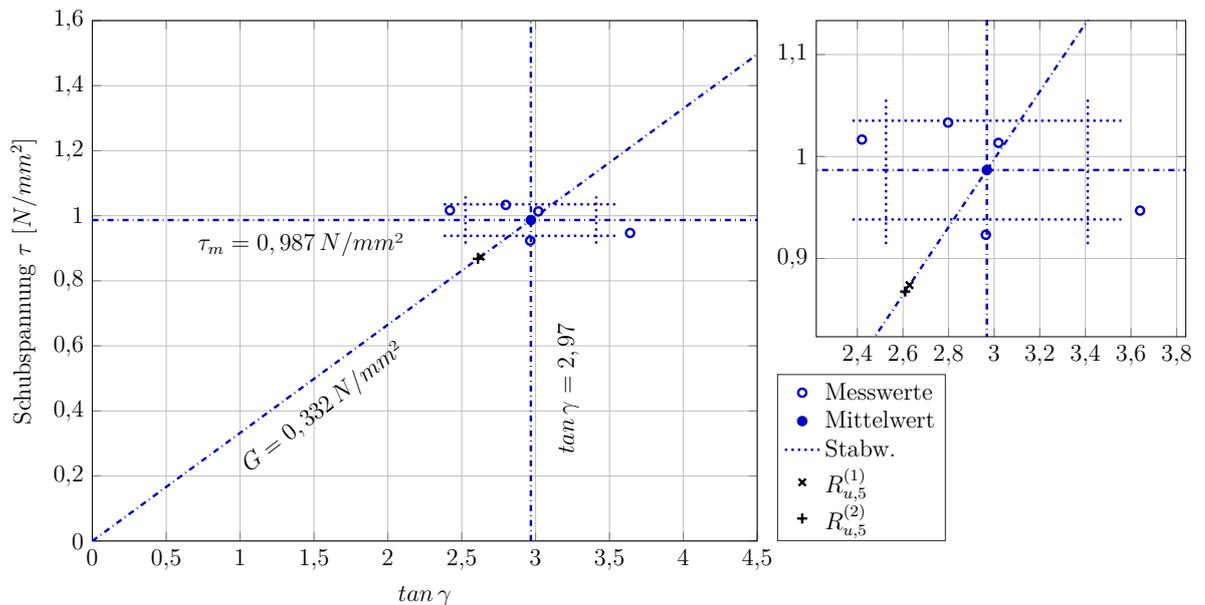


Abb. 4.27.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ und zyklischer Beanspruchung (S1_004_365_z)

Tab. 4.27.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ und zyklischer Beanspruchung (S1_004_365_z)

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_004_365_z	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,987 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,048 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,049$
5%-Quantile der Schubfestigkeit nach [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,874 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit nach [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,868 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,97$
Schubmodul	$G = 0,332 \text{ N/mm}^2$

In Abbildung 4.28 sind die Ergebnisse der Versuche ohne jegliche Vorbelastung, ohne Dauerbeanspruchung aber mit zyklischer Belastung und mit 365 Tagen Dauerlast

unter einem Lastniveau von $0,04 N/mm^2$ mit und ohne dynamischer Beanspruchung zum Vergleich dargestellt. Jede Serie erfüllt das Kriterium von mindestens 75 % der Anfangsfestigkeit.

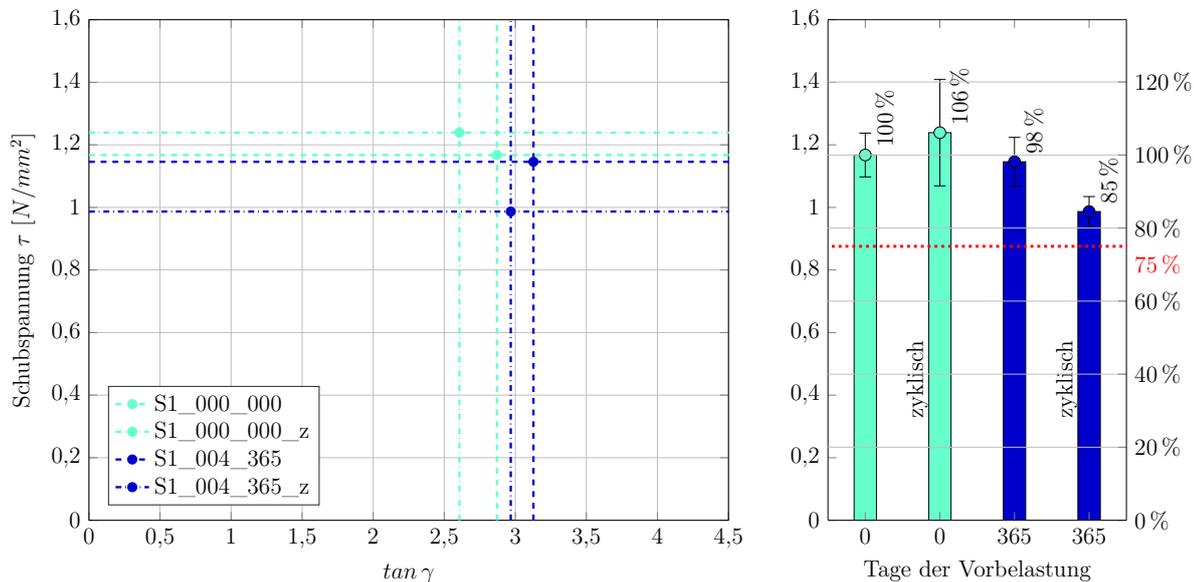


Abb. 4.28.: Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie S1 mit zyklischer Vorbelastung im Vergleich zu Kleinproben ohne vorangegangener dynamischer Beanspruchung

Die erstmals von der HFA in [5] aufgestellte These, dass der zu überprüfende Klebstoff auch einer zyklischen Belastung mit einem Niveau von $\tau_{des} = R_{u,5}^{(1)}/3$, im Gegensatz zu dem in der ETAG 002-1 [2] vorgeschlagenen Niveau von $\tau_{des} = R_{u,5}^{(2)}/6$, ohne Einfluss auf dessen Festigkeit standhält, kann auf Basis der vorgestellten Ergebnisse bestätigt werden. Es besteht also kein Grund die Bemessungsspannung τ_{des} nach dynamischer Beanspruchung auf ein Sechstel der 5%-Quantile zu beschränken.

4.3.1.3. Resümee

Im Zuge der Untersuchungen des Kriechverhaltens (siehe Abschnitt 4.3.1.1) war kein Unterschied im grundsätzlichen Verhalten der Klebefuge bei den untersuchten Lastniveaus festzustellen. Daher ist auch eine Dauerschubbeanspruchung von $0,05 N/mm^2$ durchaus als möglich zu erachten. Der Grenzwert aus der ift-Richtlinie [59] und der HFA-Richtlinie [60] bezüglich erlaubtem Verformungszuwach innerhalb von 21 Tagen wird bei beiden Lastniveaus vorzeitig eingehalten, siehe Tabelle 4.28. Bis auf die Restverformungsgrenze von $0,1 mm$ nach [2, 40], welche erwartungsgemäß nicht erreicht wird, werden alle Kriterien mit beiden Lastniveaus erfüllt.

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.28.: Übersicht der Nachweise der Serie S1

Nachweis	Grenzwert	S1_004	S1_005
Verformungszunahme innerhalb von 21 Tagen [59, 60]	$< 0,10 \text{ mm}$	✓	✓
Maximalverschiebung nach 91 Tagen [40]	$< 1,00 \text{ mm}$	✓	✓
Restverformung nach Erholungsphase [59, 60]	$< 1,00 \text{ mm}$	✓	✓
Restverformung nach Erholungsphase [2, 40]	$< 0,10 \text{ mm}$	✗	✗
Restschubfestigkeit [2, 40]	$> 75 \%$	✓	✓
Kohäsiver Bruch der Klebefuge [2, 40]	$> 90 \%$	✓	✓

Bei den Überprüfungen der Kurzzeitfestigkeit (siehe Abschnitt 4.3.1.2) wurde kein signifikanter Unterschied in den Ergebnissen abhängig von der jeweiligen Vorbelastung sichtbar. Weder eine Dauerschubbeanspruchung, noch die zyklische Vorbelastung haben im überprüften Lastbereich einen Einfluss auf die Festigkeit unter Kurzzeitbeanspruchung. Daher können alle Ergebnisse der Serie S1 zu den in Tabelle 4.29 aufgelisteten Kennwerten zusammengefasst werden. Lediglich die beiden Kleinproben der Serie S1_000_365 werden wegen der vorhandenen Fehlstellen in der Klebefuge von dieser Zusammenfassung ausgenommen.

Tab. 4.29.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie S1

Ergebnisse der Versuchsreihe S1	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 91$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,078 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,132 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,123$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,860 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,860 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,85$
Schubmodul	$G = 0,378 \text{ N/mm}^2$

4.3.2. Serie 2

Serie S2 stellt eine ergänzende Untersuchung zu Serie S1 dar. Da die Anzahl der mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ belasteten Probekörper gering war und somit einzelne Ausreißer merklichen Einfluss auf das Ergebnis zeigen, wurden zehn weitere Kleinproben mit einem Lastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$ den in Abschnitt 4.1 erläuterten Versuchen unterzogen. Auf den Test bezüglich zyklischer Beanspruchung wurde verzichtet. In Tabelle 4.30 sind die in

dieser Serie durchgeführten Versuche aufgelistet. Es wurden keinerlei Versuche an nicht vorbelasteten Proben durchgeführt.

Tab. 4.30.: In Serie 2 durchgeführte Kriechversuche und Überprüfungen der Scherfestigkeit

Seriennummer	Lastniveau [N/mm^2]	Dauer [t]	Stückzahl
S2_005_210	0,05	210	10

4.3.2.1. Kriechversuch

Die Kriechversuche wurden analog zu Serie 1 durchgeführt, siehe Abschnitt 4.3.1.1. Es wurden an allen Kleinproben Messuhren installiert und zu Beginn täglich, später wöchentlich die Verformungen aufgezeichnet. Auch die Anfangsverformung unmittelbar nach Lastauftragung wurde gemessen. Ebenso wurde alle 30 Minuten das Raumklima mittels zwei Klimadatenloggern kontrolliert. Nach 210 Tagen Dauerlast wurden die Kleinproben entlastet und deren Verformung nach weiteren 24 Stunden gemessen. Bis zu 210 Tagen haben diese Probekörper dieselbe Lastgeschichte wie Serie S1_005_365, die Ergebnisse sind somit gut vergleichbar. Die mittlere Kurve der Gesamtverformung sowie die Standardabweichung der Serie S2 sind in Abbildung 4.29 dargestellt und die erhaltenen Werte in Tabelle 4.31 vermerkt.

Tab. 4.31.: Verformungswerte der Serie S2 in [mm]

Seriennummer	nach Belastung w_0	nach 91 Tagen w_{91}	nach 210 Tagen w_{210}	nach Entlastung w_{210+e}	24 h nach Entlastung w_{210+1}
S2_005_210	0,198	0,329	0,519	0,318	0,306

Die Gesamtverformung von 1,0 mm nach [40] wird sowohl nach 91 als auch nach 210 Tagen unterschritten. Das in der ift-Richtlinie VE-08/3 [59] geforderte Kriterium einer maximalen Verformung 24 h nach Entlastung der Probekörper von 1,0 mm ist nach 211 Tagen mit einer Restverformung von 0,306 mm deutlich erfüllt.

Blickt man zurück auf Tabelle 4.10 und Abbildung 4.5, erkennt man, dass bei Serie S1_005_365 direkt nach Belastung eine Verformung von 0,250 mm und nach 91 Tagen von 0,439 mm gemessen wurde. Die Gesamtverformung nach 210 Tagen betrug 0,623 mm . In Tabelle 4.32 wird deutlich, dass die Kriechverformungen in den ersten 91

4. Experimentelle Untersuchungen

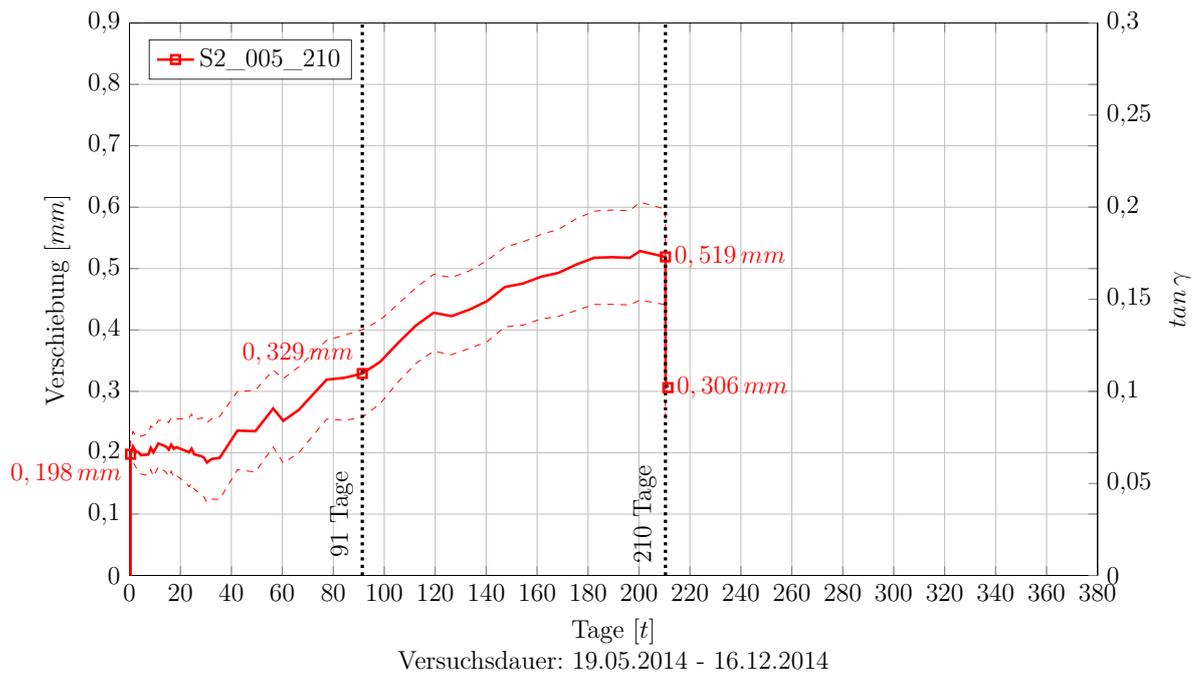


Abb. 4.29.: Gesamtverformung der Kleinproben S2 über 210 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase

Tagen deutlich geringer ausfallen, als in der Versuchsserie S1 (siehe Abschnitt 4.3.1.1). Während die Kriechverformungen in den ersten 91 Tagen im Vergleich zur elastischen Anfangsverformung 66 % ausmachen, steigen diese über die gesamte Versuchsdauer immerhin noch auf 162 % an. Die Messung der Rückverformung bestätigt das elastische Materialverhalten des Klebstoffs im Bereich der hier aufgebrachten Lasten.

Tab. 4.32.: Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung

Seriennummer	w_0	$w_{91}-w_0/w_0$	$w_{210}-w_0/w_0$	$w_{210}-w_{210+\epsilon}/w_0$	$w_{210}-w_{210+1}/w_0$
S2_005_210	100 %	66 %	162 %	102 %	108 %

Es ist offensichtlich, dass die Probekörper aus Serie 1 größere Verformungen erlitten, als die hier beobachteten Kleinproben der Serie S2. Ein Vergleich der Verformungen wird in Abbildung 4.30 gezeigt.

Auffällig ist dabei, dass die Verformungen vor allem zu Beginn divergieren, während sie sich mit fortschreitender Versuchsdauer annähern. Serie S2 erleidet nach Abschluss der elastischen Dehnung nach Aufbringen der Last in den ersten Tagen kaum zusätzliche

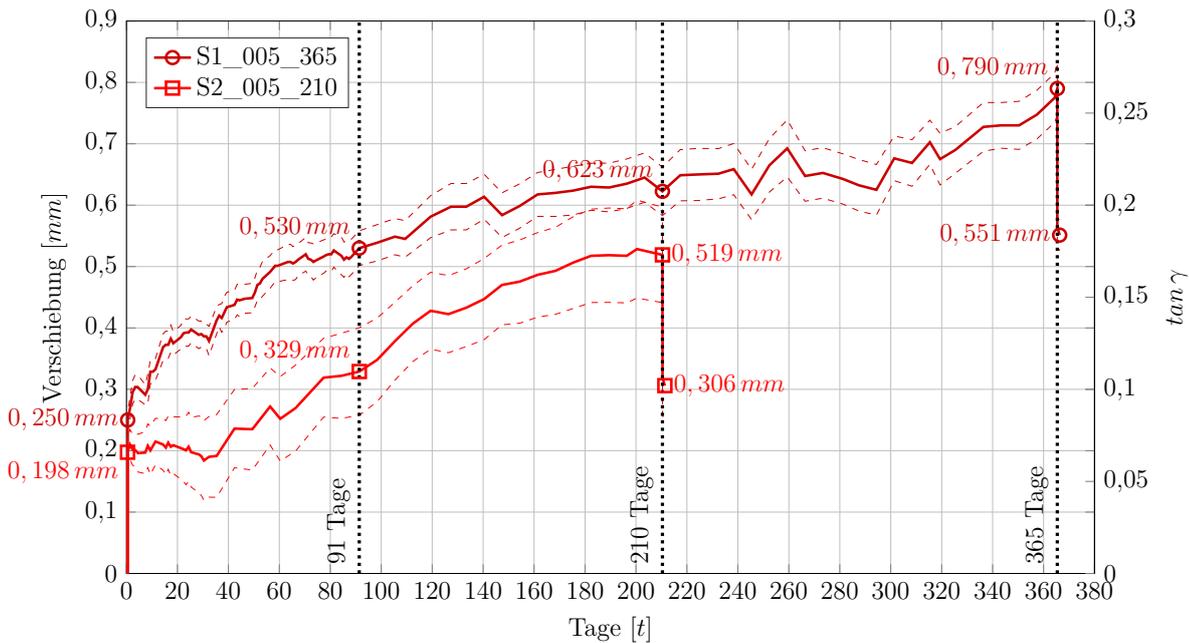


Abb. 4.30.: Gesamtverformung der Kleinproben S1 und S2 mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ Dauerlast und jeweils 24-stündiger Entlastungsphase

Kriechverformungen. Erst nach etwa 30 Tagen beginnen diese Proben zu Kriechen.

Da während der Tests zu Serie 1 festgestellt wurde, dass das Klima großen Einfluss auf die Verformungsmessungen hat, soll auch hier ein Blick auf die klimatischen Bedingungen im Versuchsraum während der Zeit der Dauerbelastung geworfen werden. Die Mittelwerte von relativer Luftfeuchte und Temperatur aus den beiden Datenloggern sind in Abbildung 4.31 zu sehen.

Abermals schwanken sowohl relative Luftfeuchte als auch Temperatur während der Versuche stark. Die größte Temperaturdifferenz innerhalb von 24 Stunden betrug wie bei Serie 1 $19,55^\circ\text{C}$, der maximale Unterschied in der Luftfeuchte innerhalb eines Tages ergab sich zu $35,60\%$. Die beiden Versuchsserien überschneideten sich zeitlich, wobei Serie 2 später gestartet wurde. Daher ist auch der Klimaverlauf über gewisse Abschnitte ident. Das legt nahe, die Kriechverformungen unabhängig von der vorangegangenen Lastgeschichte zum selben Zeitpunkt und somit unter den selben klimatischen Bedingungen zu vergleichen. Serie S2 wurde an jenem Tag gestartet, als Serie S1 bereits seit 259 Tagen belastet wurde. In Abbildung 4.32 sind die Kriechverformungen von Serie S1_005_365 ab Tag 259 im Vergleich zu jenen von Serie S2_005_210 direkt nach der Messung der Anfangsverformung dargestellt.

Es fällt auf, dass sich die Kurven qualitativ stark ähneln. Serie S2, die noch am Beginn

4. Experimentelle Untersuchungen

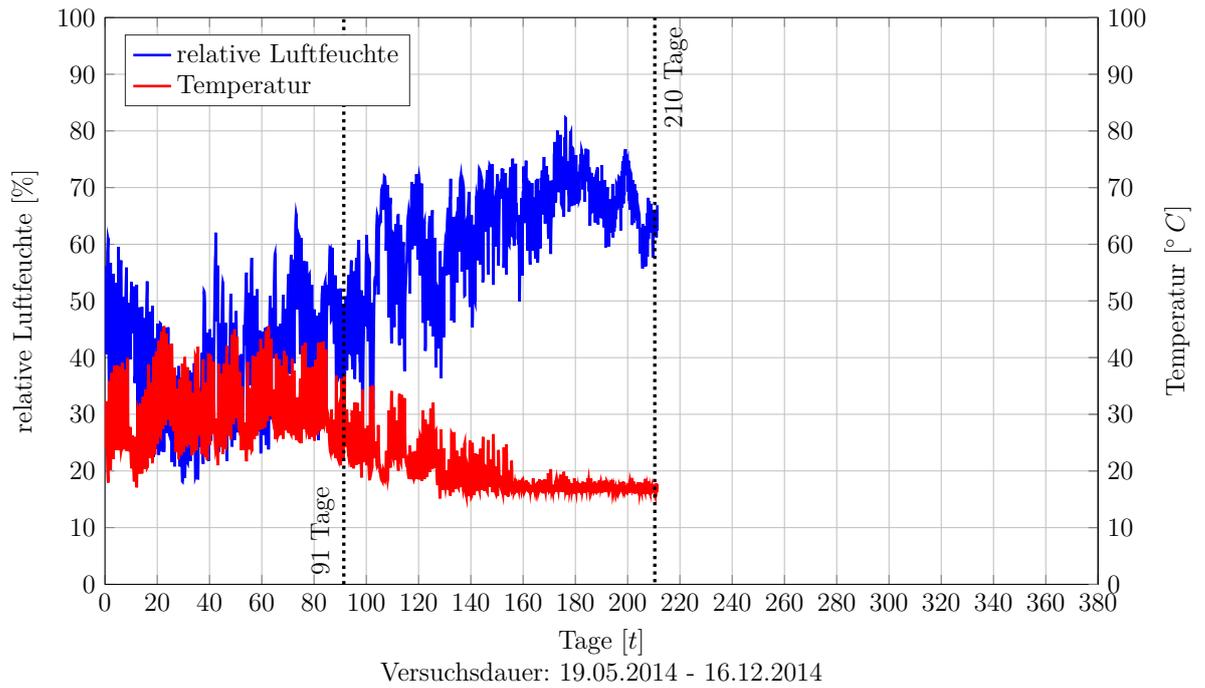


Abb. 4.31.: Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie S2

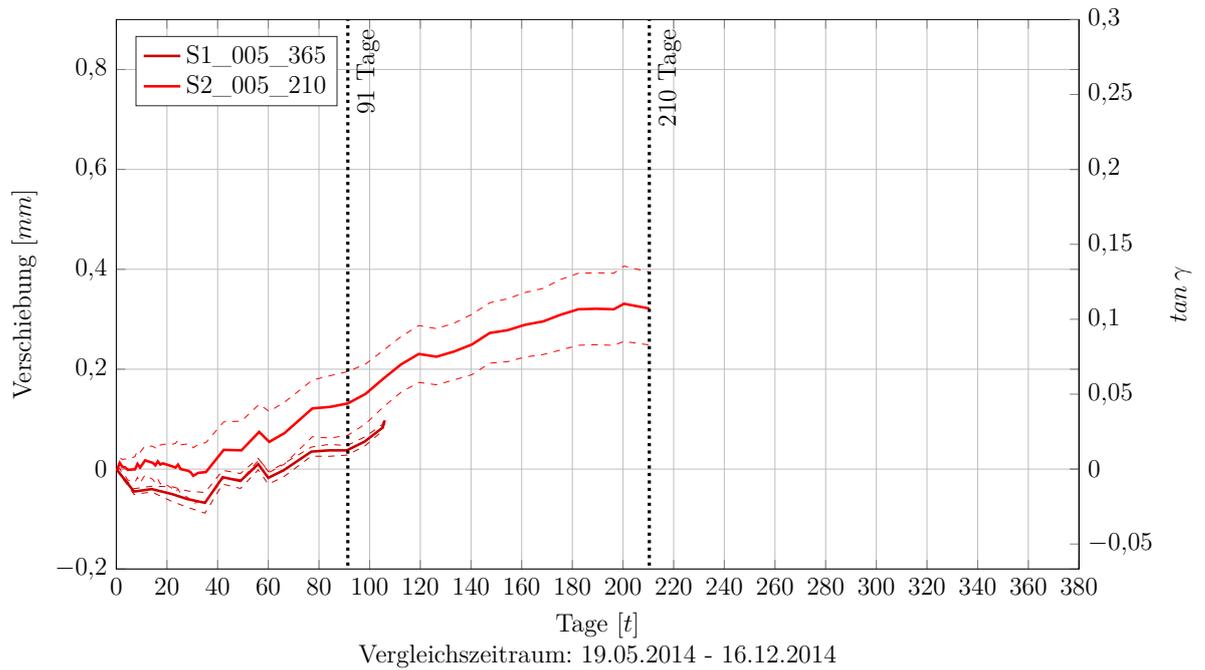


Abb. 4.32.: Kriechverformung der Kleinproben S1 und S2 mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ Dauerlast unter denselben Klimabedingungen mit unterschiedlicher Belastungsgeschichte

der Dauerbelastung steht, zeigt tendenziell etwas stärkere Kriechverformungen gegenüber Serie S1, bei der das Kriechen nach 259 Belastungstagen immer mehr abklingt. Während Serie S1 am Anfang der in Abbildung 4.32 gezeigten Kurven leicht rückkriecht, bleiben die Verformungen der Serie S2 konstant. Zirka ab Tag 30 beginnen die Verformungen bei beiden Serien anzuwachsen, wobei auch danach in beiden Kurven klimatische Einflüsse auf gleiche Weise sichtbar werden. Somit zeigt sich abermals, dass Temperatur und relative Luftfeuchte die Verformungsmessungen stark beeinflussen und beinahe mehr Einfluss auf das Verformungsverhalten haben, als die Dauer einer vorangegangenen Langzeitbelastung.

Auch Serie S2 wird auf das in Abschnitt 4.1 vorgestellte Kriterium der ift-Richtlinie VE-08/3 [59] von maximal $0,10\text{ mm}$ Verformungszunahme innerhalb von 21 Tagen überprüft, wobei der Versuch bei Erfüllen des Kriteriums theoretisch abgebrochen und der untersuchte Klebstoff als geeignet erachtet werden kann. In Abbildung 4.33 wird die Verformungszunahme innerhalb der vorangegangenen 21 Tage unter einer Beanspruchung von $0,05\text{ N/mm}^2$ gezeigt.

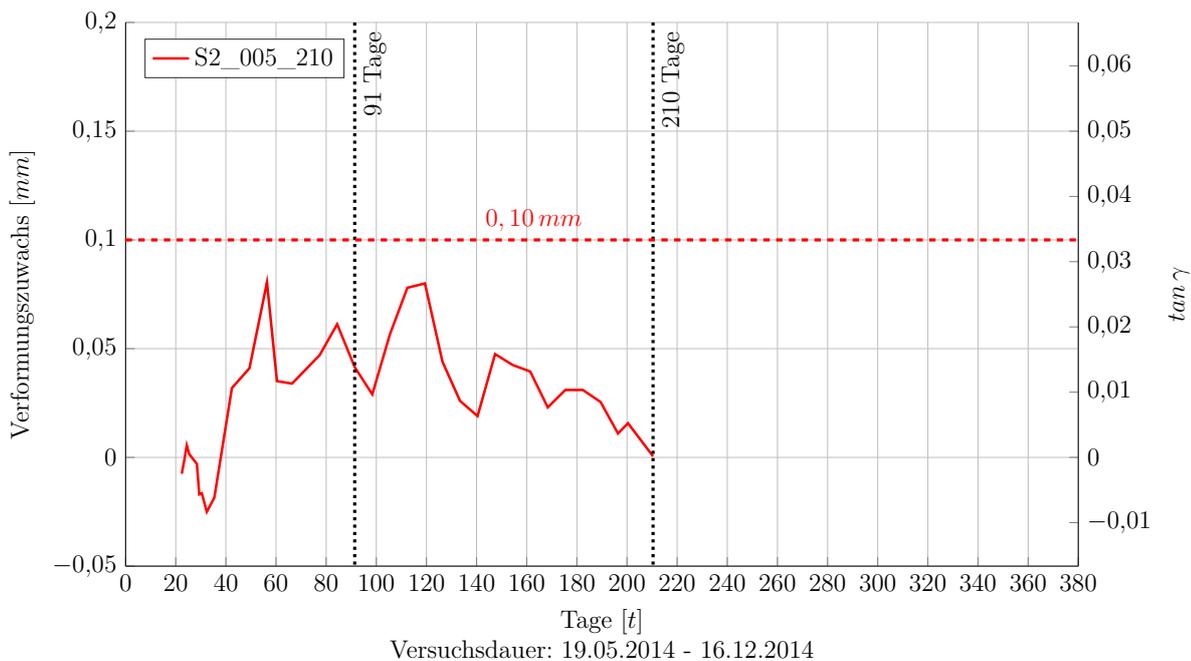


Abb. 4.33.: Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der Kleinproben S2 über 210 Tage mit einer Belastungen von $0,05\text{ N/mm}^2$

Bereits in den ersten 21 Tagen sind die Kriechverformungen derart gering, dass das Kriterium sofort erfüllt und auch im weiteren Versuchsverlauf nicht mehr überschritten wird.

4.3.2.2. Scherversuch

In dieser Serie wurden die Kleinprobekörper lediglich nach Abschluss des Dauerlastversuchs auf ihre Festigkeit überprüft, siehe Abbildung 4.34. Es wurde abermals eine Vorbelastung von 15 N gewählt, um einen Schlupf zu verhindern. Die Prüfungen wurden an derselben Versuchseinrichtung wie in Serie S1 durchgeführt. In Abbildung 4.35 ist beispielhaft eine Versagenskurve einer Kleinprobe der Serie S2 dargestellt. Das Versagen tritt bei dieser Probe nicht direkt bei Erreichen der Maximallast ein, es bleibt eine gewisse Resttragfähigkeit bestehen. Dieses Versagen wurde ebenso bei Versuchen der Serie S1 (siehe Abschnitt 4.3.1.2) beobachtet, wie auch das in Abbildung 4.10 gezeigte Versagensmuster bei Probekörpern der Serie S2 auftrat.

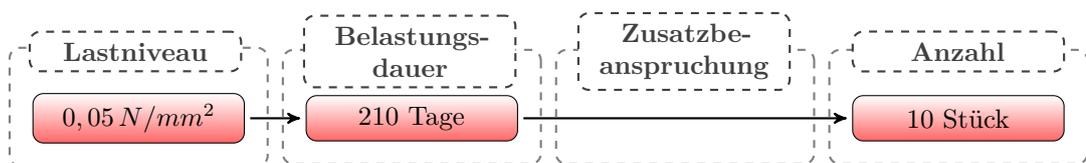


Abb. 4.34.: Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie S2

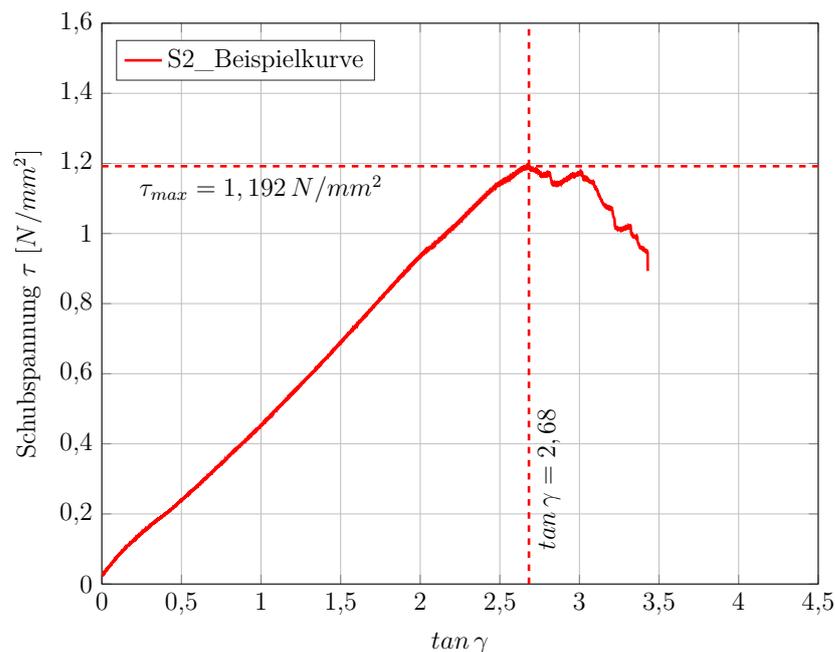


Abb. 4.35.: Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie S2_005_210

In Abbildung 4.36 und Tabelle 4.33 sind die Ergebnisse der Kurzzeitbelastungen der Serie S2 angeführt. Es ergibt sich ein Mittelwert der Scherfestigkeit von $1,355\text{ N/mm}^2$

bei einer Streuung von $0,109 N/mm^2$. Diese Werte stellen im Vergleich zu Serie S1 sehr gute Werte dar, was in entsprechend hohen $R_{u,5}$ -Werten resultiert. Es zeigt sich bei diesen Proben ein steifes Verhalten der Klebefuge mit einem Schubmodul von $0,429 N/mm^2$.

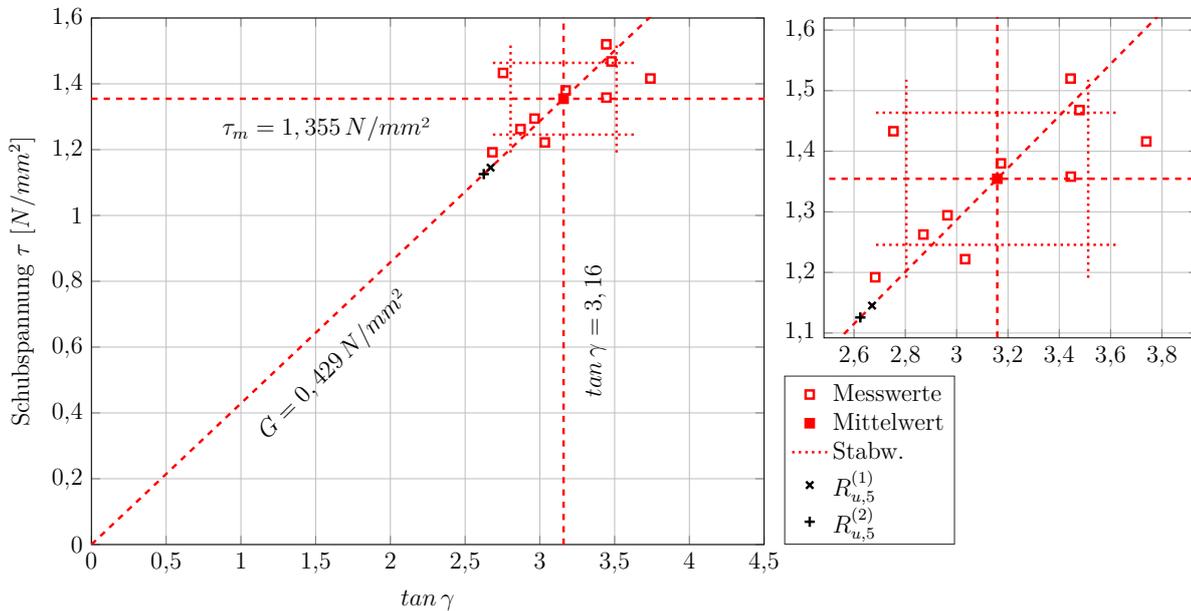


Abb. 4.36.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 210 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S2_005_210)

Tab. 4.33.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 210 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S2_005_210)

Ergebnisse der Versuchsreihe S2_005_210	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,355 N/mm^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,109 N/mm^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,080$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 1,145 N/mm^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 1,126 N/mm^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 3,16$
Schubmodul	$G = 0,429 N/mm^2$

4.3.2.3. Resümee

Diese Serie wurde durchgeführt, um die geringe Probenanzahl der Serie S1 auszugleichen und die erreichten Ergebnisse zu überprüfen. Es ergeben sich während des Versuchs

4. Experimentelle Untersuchungen

geringere Kriechverformungen, die aber, wie Abbildung 4.32 gezeigt, durch die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen während des Versuchs erklärt werden können. Wie in Tabelle 4.34 ersichtlich, werden alle Kriterien, ausgenommen der Restverformung $< 0,1 \text{ mm}$, erfüllt. Es ergeben sich sehr hohe Schubfestigkeiten, wie dies der Vergleich zu Serie S1 in Abbildung 4.37 zeigt. Wiederum bestätigt sich die Aussage, dass aufgrund einer anhaltenden Dauerbelastung im Ausmaß des untersuchten Spannungsniveaus nicht auf eine verminderte Restscherfestigkeit rückgeschlossen werden kann.

Tab. 4.34.: Übersicht der Nachweise der Serie S2

Nachweis	Grenzwert	S2_005
Verformungszunahme innerhalb von 21 Tagen [59, 60]	$< 0,10 \text{ mm}$	✓
Maximalverschiebung nach 91 Tagen [40]	$< 1,00 \text{ mm}$	✓
Restverformung nach Erholungsphase [59, 60]	$< 1,00 \text{ mm}$	✓
Restverformung nach Erholungsphase [2, 40]	$< 0,10 \text{ mm}$	✗
Restschubfestigkeit [2, 40]	$> 75 \%$	✓
Kohäsiver Bruch der Klebefuge [2, 40]	$> 90 \%$	✓

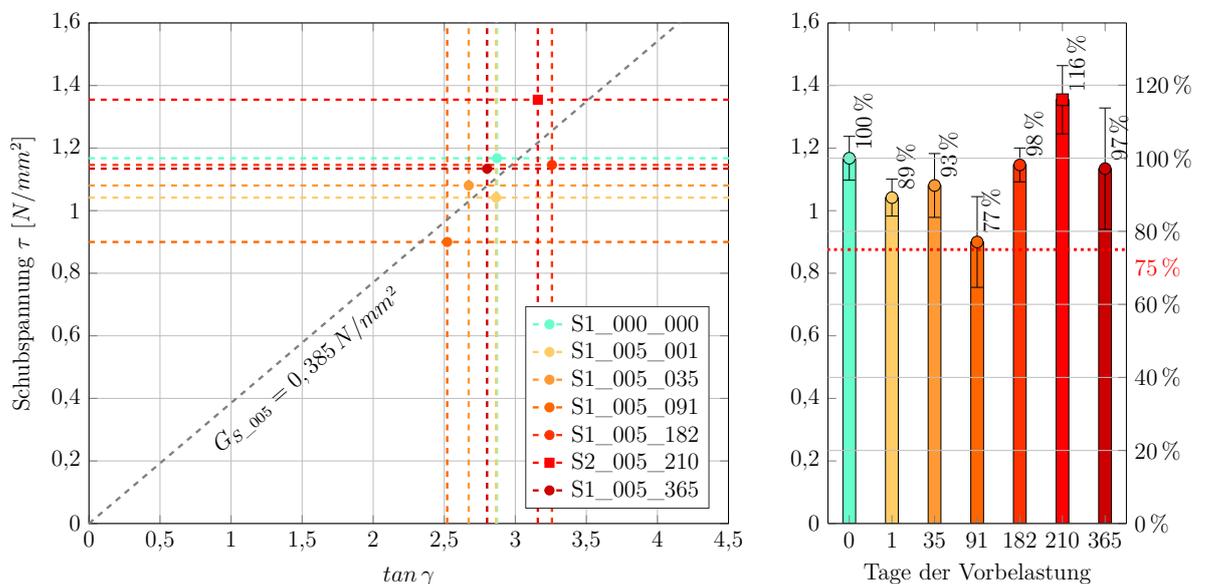


Abb. 4.37.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ der Serie S2 im Vergleich zu den Ergebnissen aus Serie S1

4.3.3. Serie 3

Diese Serie wurde nach Abschluss und Analyse der Serien S1 und S2 durchgeführt. Die Vorgehensweise ähnelt jener der beiden vorangegangenen Serien stark. Es wurden dieselben Kleinprobekörper hergestellt und nach der vorgesehenen Aushärtungszeit von 28 Tagen einer Dauerlastprüfung unterzogen. Aufgrund der bisher gewonnenen Daten wurden andere Lastniveaus als in Serie S1 und S2 gewählt. Die Probekörper wurden mit 0,05 und 0,06 N/mm^2 für die Dauer von 91 Tagen belastet, wobei das Hauptaugenmerk auf das höhere der beiden Lastniveaus gelegt wurde. Die Probekörper mit 0,05 N/mm^2 Dauerlast stellten eine Kontrollgruppe zu den zuvor durchgeführten Versuchen dar, um die Ergebnisse der Kleinproben, welche an einem anderen Ort und somit unter anderen Bedingungen hergestellt und geprüft wurden, richtig einordnen zu können. Nach Abschluss der Langzeitbelastung wurden alle Probekörper bis zum Bruch belastet, um deren Restscherfestigkeit festzustellen. Ebenso wurden einige Probekörper für 91 Tage unbelastet in einer Klimakammer gelagert und abschließend ebenso deren Scherfestigkeit überprüft. In Tabelle 4.35 und Tabelle 4.36 sind alle durchgeführten Versuche dieser Serie aufgelistet.

Tab. 4.35.: In Serie 3 durchgeführte Kriechversuche

Seriennummer	Lastniveau [N/mm^2]	Dauer [t]	Stückzahl
S3_000_091	–	91	3
S3_005_091	0,05	91	5
S3_006_091	0,06	91	7

Tab. 4.36.: In Serie 3 durchgeführte Überprüfungen der Scherfestigkeit

Seriennummer	Lastniveau [N/mm^2]	Dauer [t]	Zusatzbeanspruchung	Stückzahl
S3_000_000	–	–	–	10
S3_000_091	–	91	–	5
S3_000_091_k	–	91	Klimakammer	5
S3_005_091	0,05	91	–	8
S3_006_035	0,06	35	–	10
S3_006_091	0,06	91	–	10

4.3.3.1. Kriechversuch

Die Untersuchungen des Kriechens wurden in derselben Art und Weise wie bei den Serien S1 und S2 durchgeführt. Zu Beginn wurde die elastische Anfangsverformung gemessen, die Kriechverformungen wurden zu Beginn täglich, nach einem Monat unregelmäßig, aber mehrmals wöchentlich, abgelesen. Die Belastungsdauer der Kleinprobekörper betrug diesmal genau 91 Tage, wie von der ETAG 002-1 [2] gefordert. Anschließend wurden die Probekörper nach einer 24-stündigen Entspannungsphase ohne Zusatzlast einem Kurzzeittest zur Ermittlung der Scherfestigkeiten unterzogen. Die Ergebnisse des Kriechversuchs sind in Abbildung 4.38 und Tabelle 4.37 dargestellt.

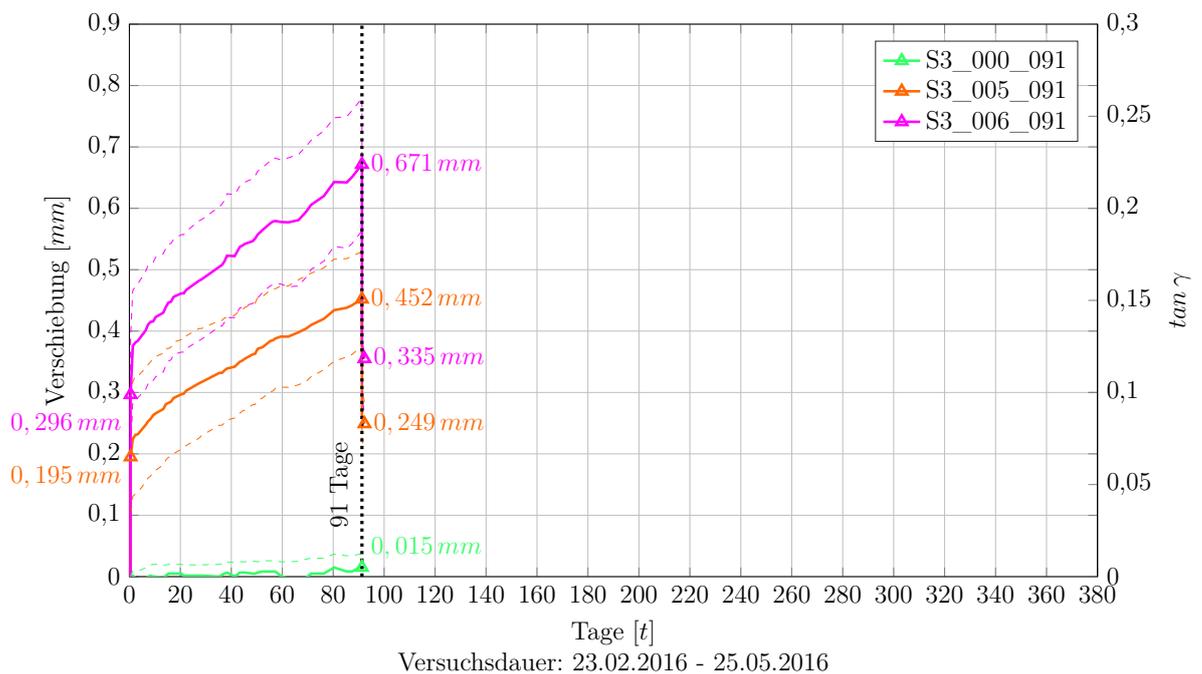


Abb. 4.38.: Gesamtverformung der Kleinproben S3 über 91 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase

Tab. 4.37.: Verformungswerte der Serie S3 in [mm]

Seriennummer	nach Belastung w_0	nach 91 Tagen w_{91}	nach Entlastung w_{91+e}	24 h nach Entlastung w_{91+1}
S3_000_091	—	0,015	—	—
S3_005_091	0,195	0,452	0,263	0,249
S3_006_091	0,296	0,671	0,379	0,335

Betrachtet man die Verformungskurven aus Abbildung 4.38, wird deutlich, dass sich die lediglich durch das Eigengewicht belastete Kleinproben (S3_000_091) kaum verformen, während bei den beiden anderen Serien (S3_005_091 und S3_006_091) die Verschiebungen während des Versuchs deutlich ansteigen. Weder mit einem Lastniveau von $0,05 N/mm^2$ noch mit $0,06 N/mm^2$ steigen die Verformungen über die von [40] geforderte Grenze von $1,0 mm$ an. Die Restverformung nach der 24-stündigen Entlastungsphase beträgt bei beiden Serien unter Last weniger als die von der ift-Richtlinie VE-08/13 [59] und der Beurteilungsgrundlage der HFA [60] vorgegebene Grenze von $1,0 mm$.

In dieser Serie fallen laut Tabelle 4.38 die Kriechverformungen während 91 Tagen unter Dauerlast höher aus, als die elastische Verformung zu Beginn des Versuchs. Die elastischen Verformungen zu Beginn bei Belastung und am Ende bei Entlastung stimmen wie bei den anderen Serien wieder sehr gut überein.

Tab. 4.38.: Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung

Seriennummer	w_0	w_{91-w_0}/w_0	$w_{91-w_{91+e}}/w_0$	$w_{91-w_{91+1}}/w_0$
S3_005_091	100 %	132 %	97 %	104 %
S3_006_091	100 %	127 %	99 %	114 %

Der Verlauf der Kriechkurven gibt bereits Aufschluss über das vorhandene Klima im Versuchsraum. Es sind kaum Schwankungen im Verformungsverhalten erkennbar, es findet auch zu keinem Zeitpunkt ein Rückkriechen statt. Dies deutet auf stabile klimatische Verhältnisse während der Versuchsdurchführung hin. Der genaue Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte sind in Abbildung 4.39 abgebildet. Die maximale Temperatur betrug $24,5^\circ C$, die minimale $20,0^\circ C$. Die relative Luftfeuchte schwankte zwischen $31,5\%$ und $47,5\%$. Innerhalb von 24 Stunden ergab sich die größte Differenz zu $2,5^\circ C$ und 7% , womit das stabilere Klima im Vergleich zu den Bedingungen während Serie S1 (Abschnitt 4.3.1) und S2 (Abschnitt 4.3.2) deutlich wird.

Der Unterschied in den klimatischen Verhältnissen zeigt auch Auswirkungen auf das Kriechverhalten der Probekörper. In Abbildung 4.40 sind die Verformungskurven der Probekörper mit einer Dauerlast von $0,05 N/mm^2$ der Serien S1 bis S3 dargestellt. Die Serie S3 liegt dabei genau zwischen den beiden zuvor getesteten Serien, wobei bereits festgestellt wurde, dass die Bedingungen im Versuchsraum zu Beginn der Dauerlast bei Serie S1 negative Auswirkungen hatte, während die Kriechverformungen anfangs bei Serie S2 durch die Umgebungsverhältnisse größtenteils verhindert wurden. Serie S3 stellt

4. Experimentelle Untersuchungen

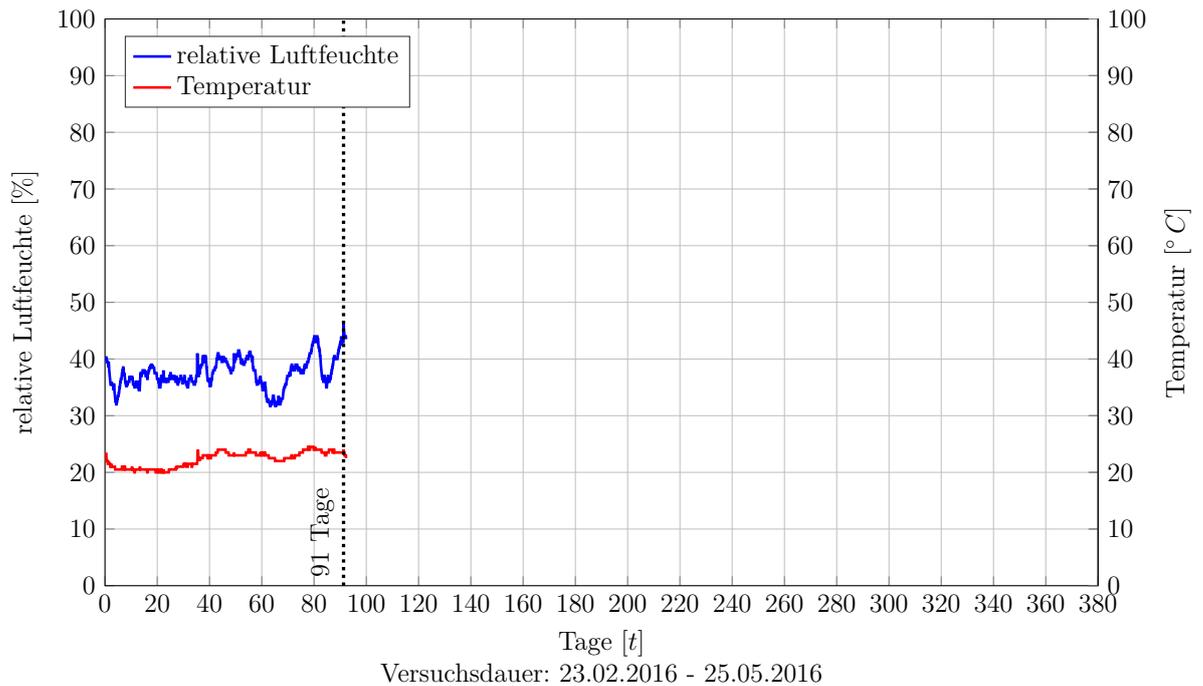


Abb. 4.39.: Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie S3

somit am besten das tatsächliche Kriechverhalten der Kleinprobekörper zufolge einer Dauerlast ohne weitere Störeinflüsse dar.

Zu beurteilen sind die Probekörper nach [59, 60] auch bezüglich des Verformungszuwachses innerhalb von 3 Wochen. Die erreichten Werte sind in Abbildung 4.41 dargestellt. Ein Verformungszuwachs von mehr als $0,1\text{ mm}$ tritt unter beiden Lastniveaus bereits ab Tag 22 nicht mehr auf. Beide Serien bewegen sich im weiteren Versuchsverlauf in etwa um einen Wert von $0,05\text{ mm}$.

Sowohl in Abbildung 4.38 als auch in Abbildung 4.41 ist zu erkennen, dass die Kleinprobekörper unter einer Dauerlast von $0,06\text{ N/mm}^2$ nach einer höheren Anfangsverformung auch tendenziell größere Kriechverformungen erleiden. Im prinzipiellen Verhalten der Probekörper ist allerdings kein Unterschied zu erkennen, alle genannten Kriterien werden erfüllt. Nach Beurteilung der im Zuge des Kriechversuchs erhaltenen Ergebnisse könnte die maximal erlaubte Dauerlast des Klebstoffs durchaus auf $0,06\text{ N/mm}^2$ erhöht werden.

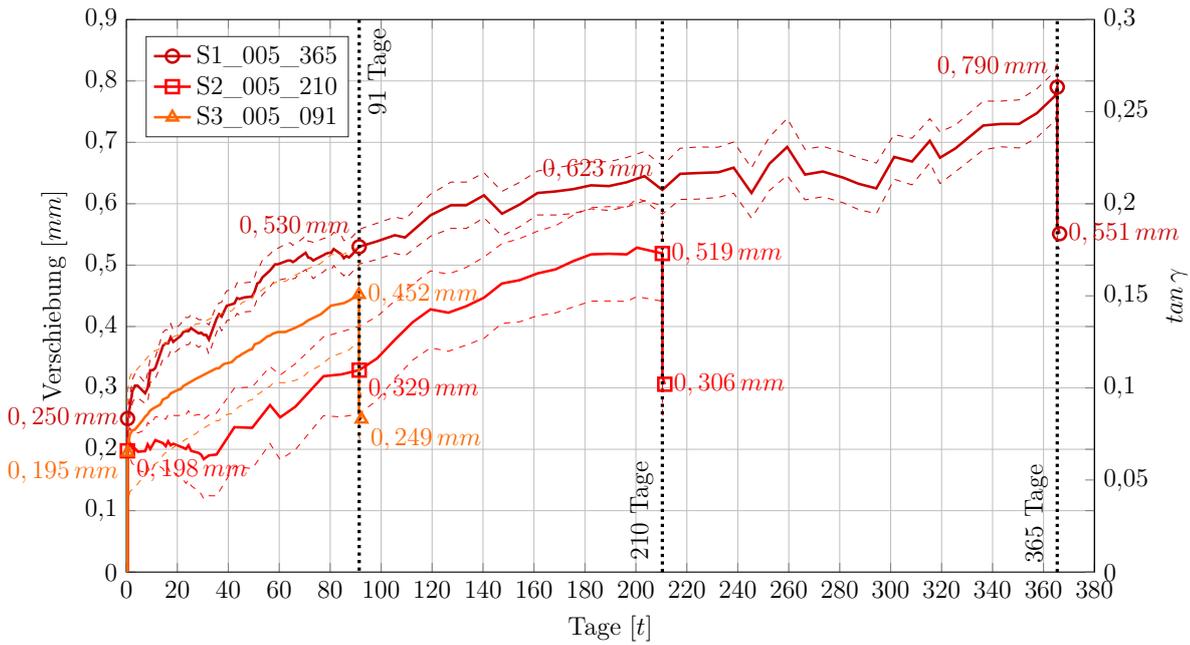


Abb. 4.40.: Gesamtverformung der Kleinproben S1, S2 und S3 mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ Dauerlast und jeweils 24-stündiger Entlastungsphase

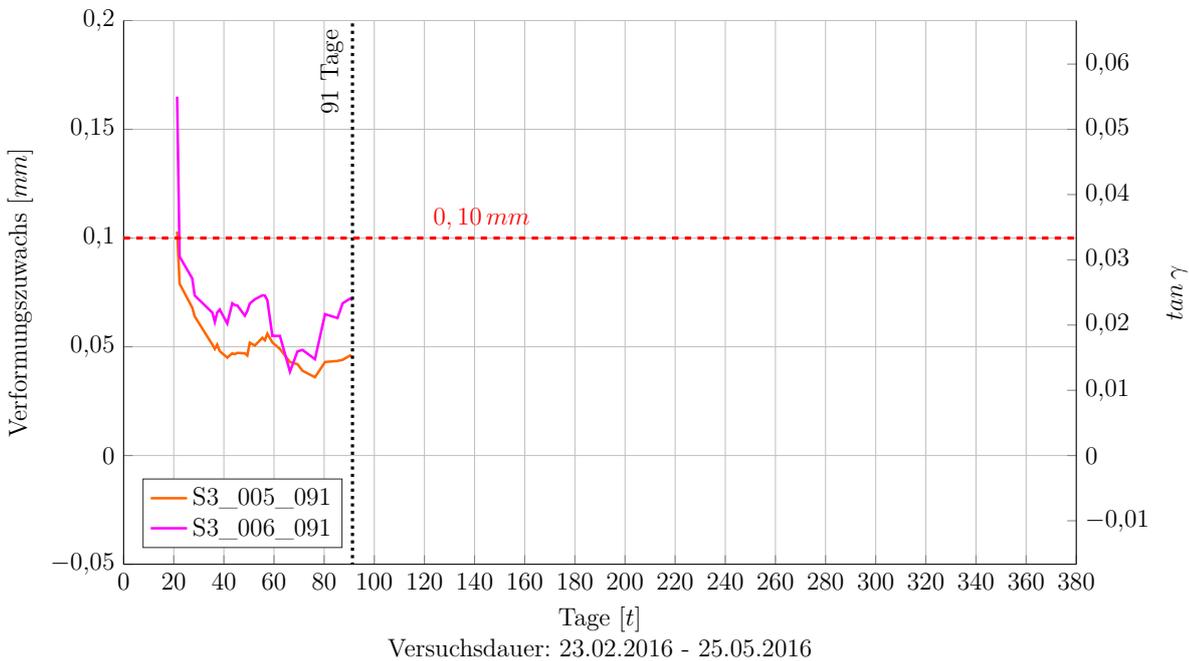


Abb. 4.41.: Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der Kleinproben S3 über 91 Tage mit den Belastungen $0,05$ und $0,06 \text{ N/mm}^2$

4.3.3.2. Scherversuch

Die Scherversuche dieser Serie wurden, ebenso wie die Kriechversuche, an einem anderen Ort und somit unter einer anderen Prüfmaschine durchgeführt als die Serien S1 und S2. Dies verzerrt die Ergebnisse ein wenig und macht diese nicht zu 100% vergleichbar, weshalb Kleinprobekörper ohne vorangegangene Dauerbelastung geprüft wurden. Auch die Gruppe der Proben mit einer Dauerlast von $0,05 \text{ N/mm}^2$ stellen eine Kontrollgruppe dar. Die durchgeführten Versuche sind in Abbildung 4.42 aufgelistet. In Abbildung 4.43 ist die Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie S3_000_000 beispielhaft dargestellt. Das Versagen erfolgte bei dieser Serie durchwegs abrupt. In Abbildung 4.43 sind über die gesamte Belastungsdauer geringe Schwankungen in der Kurve erkennbar, welche durch eine Ungenauigkeit der Prüfmaschine begründet werden können. Es wurde eine Vorlast von 20 N gewählt.

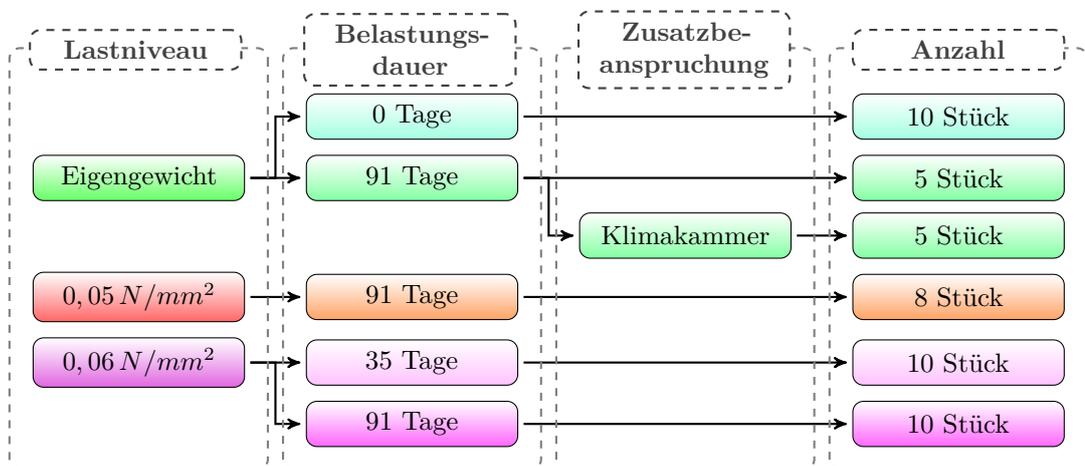


Abb. 4.42.: Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie S3

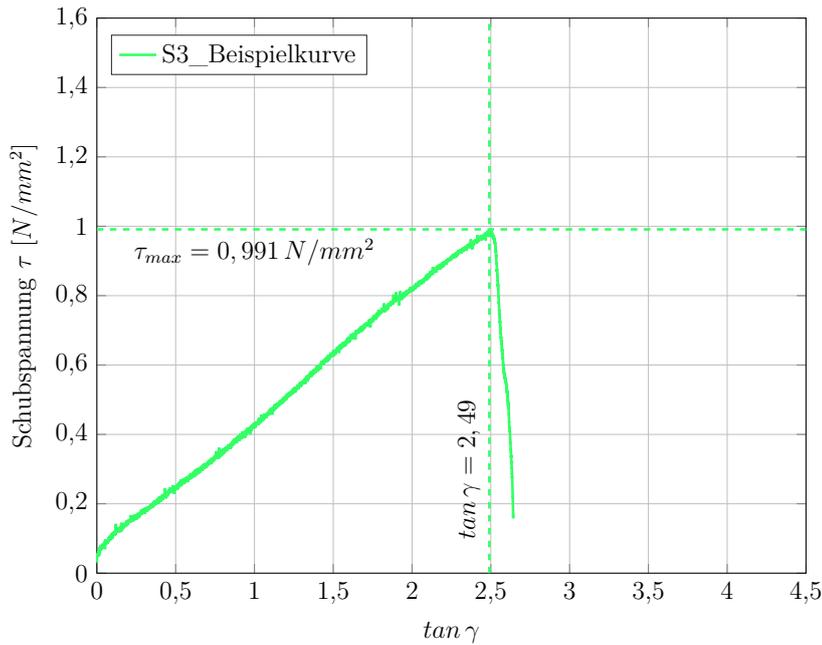


Abb. 4.43.: Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie S3_000_000

4.3.3.2.1. Unbelastete Kleinprobekörper

Zu Beginn wurden zehn Kleinprobekörper ohne jegliche Vorbeanspruchung der Scherprüfung unterzogen. Die Proben erreichten eine mittlere Schubfestigkeit von $0,878 N/mm^2$ bei einer Streuung von lediglich $0,069 N/mm^2$. Dadurch ergeben sich, trotz des vergleichsweise geringen Mittelwerts, $R_{u,5}$ -Werte, die im Bereich der beiden anderen Serien S1 und S2 liegen. Die Steifigkeit stimmt mit einem ermittelten Schubmodul von $0,364 N/mm^2$ ebenso mit den bereits bekannten Ergebnissen überein. Die genauen Werte sind Abbildung 4.44 und Tabelle 4.39 zu entnehmen.

Fünf Stück der Kleinprobekörper wurden über die Dauer von 91 Tagen durch das Eigengewicht der Glasscheibe belastet. An drei dieser Probekörper wurde während dieser Zeit die auftretende Verformung gemessen. Diese ist in Abbildung 4.38 dargestellt. Nach dieser Zeit wurde an jenen Probekörper die Restscherfestigkeit überprüft. Die erzielten Werte sind in Abbildung 4.45 und Tabelle 4.40 dargestellt. Als mittlere Scherfestigkeit wurden $1,045 N/mm^2$ erreicht. Als 5%-Quantile wurden $0,762$ beziehungsweise $0,746 N/mm^2$ erreicht. Auch zeigten die Probekörper dieser Serie eine höhere Streuung als die Probekörper aus Serie S3_000_000.

Ebenfalls für 91 Tage wurden fünf weitere Probekörper in einer Klimakammer gelagert.

4. Experimentelle Untersuchungen

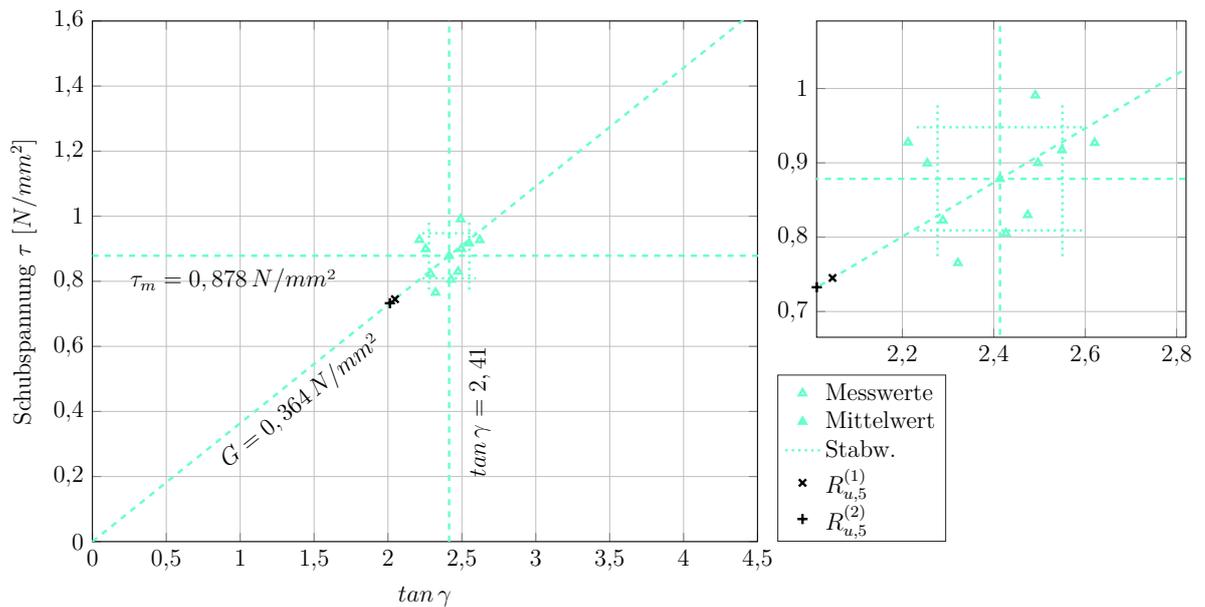


Abb. 4.44.: Schubfestigkeiten an Kleinproben ohne Vorbelastung (S3_000_000)

Tab. 4.39.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben ohne Vorbelastung (S3_000_000)

Ergebnisse der Versuchsreihe S3_000_000	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,878 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,069 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,079$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,745 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,733 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,41$
Schubmodul	$G = 0,364 \text{ N/mm}^2$

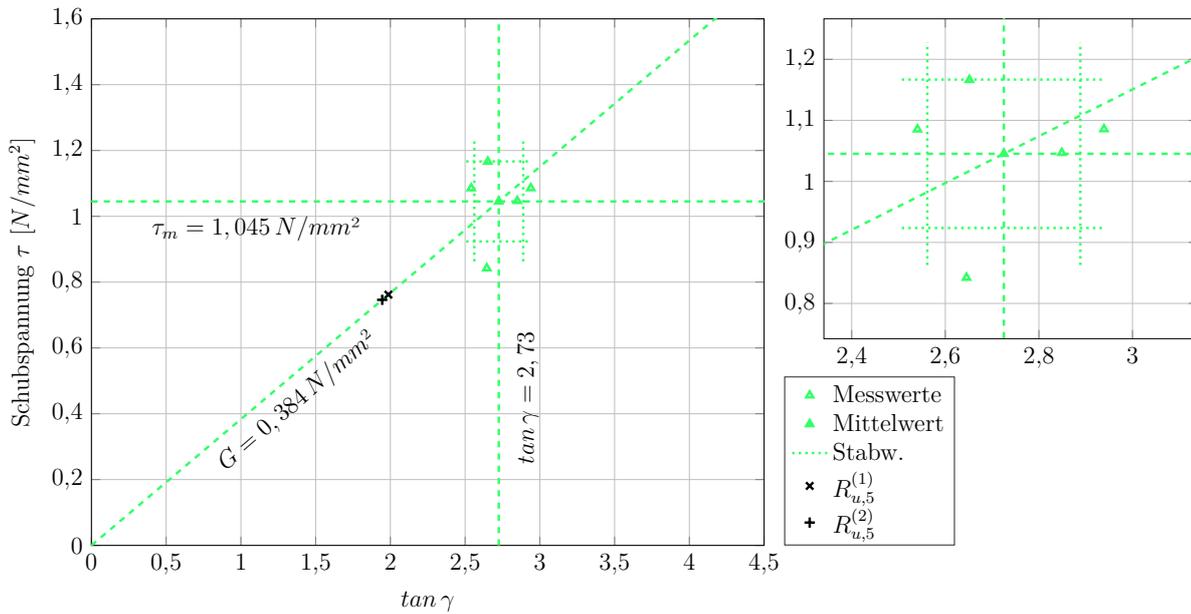


Abb. 4.45.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (S3_000_091)

Tab. 4.40.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (S3_000_091)

Ergebnisse der Versuchsreihe S3_000_091	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,045 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,122 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,116$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,762 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,746 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,73$
Schubmodul	$G = 0,384 \text{ N/mm}^2$

4. Experimentelle Untersuchungen

Diese erfuhren keinerlei Beanspruchung durch das Eigengewicht der Glasscheibe oder etwaige Zusatzlasten. Das Klima in der Kammer betrug durchgehend 20°C und 65% relative Luftfeuchte. Nach dieser Zeit wurden die Probekörper der üblichen Überprüfung der Kurzzeitfestigkeit unterzogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.46 und Tabelle 4.41 dargestellt. Mit einer mittleren Schubfestigkeit von $0,851\text{ N/mm}^2$ und einer Streuung von $0,060\text{ N/mm}^2$ sind die Resultate beinahe identisch zu jenen der Serie S3_000_000 (Tabelle 4.39). Somit ergeben sich ähnliche $R_{u,5}$ -Werte. Diese Kleinproben zeigen ein etwas weiches Verformungsverhalten.

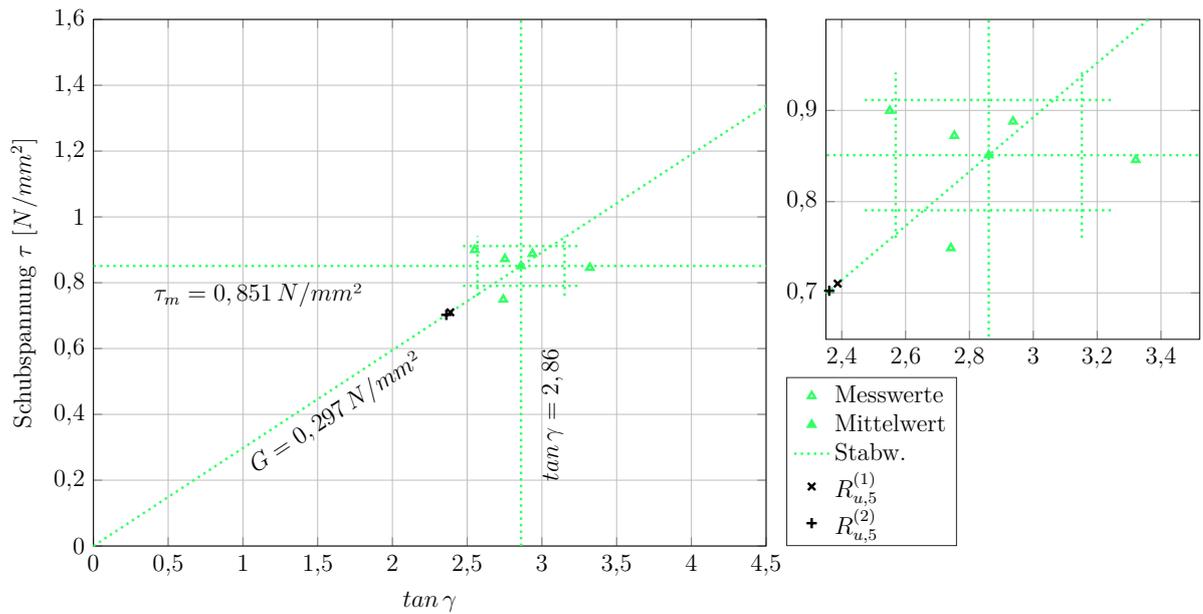


Abb. 4.46.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Lagerung in der Klimakammer (S3_000_091_k)

Tab. 4.41.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Lagerung in der Klimakammer (S3_000_091_k)

Ergebnisse der Versuchsreihe S3_000_091_k	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,851 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,060 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,071$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,710 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,702 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,86$
Schubmodul	$G = 0,297 \text{ N/mm}^2$

4.3.3.2.2. Kleinprobekörper mit einer Vorbelastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$

Bei den Probekörpern mit einer Dauerlast von $0,05 \text{ N/mm}^2$ wurde eine Überprüfung der Kurzzeitfestigkeit lediglich nach 91 Tagen Langzeitbeanspruchung und einem Tag Entlastungsphase durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.47 und Tabelle 4.42 ersichtlich. Diese Prüfung wurde mit insgesamt acht Kleinproben durchgeführt, wobei der Mittelwert der Kriechverformungen von fünf Stück über 91 Tage in Abbildung 4.38 gezeigt wird. Die Probekörper erreichen eine mittlere Schubfestigkeit von $0,889 \text{ N/mm}^2$ bei der geringen Streuung von $0,042 \text{ N/mm}^2$. Dies resultiert in durchaus ansprechenden $R_{u,5}$ -Werten nach [1] und [2]. Ebenso zeigen die hier geprüften Probekörper vergleichsweise steifes Materialverhalten.

Tab. 4.42.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S3_005_091)

Ergebnisse der Versuchsreihe S3_005_091	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 8$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,889 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,042 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,047$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,805 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,797 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,35$
Schubmodul	$G = 0,378 \text{ N/mm}^2$

4. Experimentelle Untersuchungen

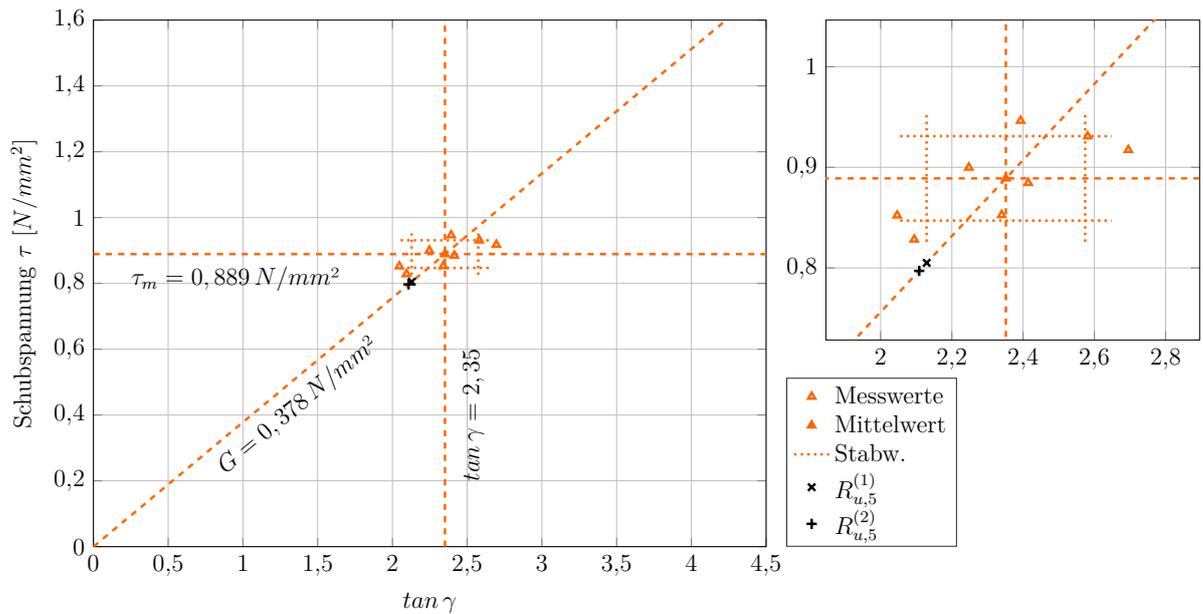


Abb. 4.47.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (S3_005_091)

4.3.3.2.3. Kleinprobekörper mit einer Vorbelastung von $0,06 \text{ N/mm}^2$

Da ein Lastniveau von $0,06 \text{ N/mm}^2$ im Zuge der getätigten Forschungsarbeit hier zum ersten Mal angewandt wurde, fand die Überprüfung der Festigkeit nicht nur nach 91 Tagen Dauerlast, sondern auch nach 35 Tagen Langzeitbeanspruchung statt. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 4.48 und Tabelle 4.43 angeführt. Mit zehn Probekörpern wurde ein Mittelwert der Schubfestigkeit von $0,982 \text{ N/mm}^2$ erzielt. Die Streuung fiel auch hier mit $0,099 \text{ N/mm}^2$ gering aus. Daraus ergeben sich $R_{u,5}$ -Werte von $0,791$ und $0,774 \text{ N/mm}^2$. Der Schubmodul fällt mit $0,412 \text{ N/mm}^2$ vergleichsweise hoch aus.

Wie beim Lastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$ (siehe Abschnitt 4.3.3.2.2) wurde auch nach einer Dauerbelastung von $0,06 \text{ N/mm}^2$ nach Abschluss des Kriechversuchs eine Überprüfung der Restscherfestigkeit durchgeführt. An acht der zehn geprüften Kleinprobekörper wurde zuvor die auftretende Verformung gemessen, siehe hierzu Abbildung 4.38. Anschließend wurden alle Probekörper denselben Untersuchungen zur Ermittlung der Kurzzeitfestigkeit unterzogen. Es ergab sich ein Mittelwert von $0,842 \text{ N/mm}^2$, siehe Abbildung 4.49 und Tabelle 4.44. Zuzufolge der geringen Streuung war bei den 5%-Quantil-Werten kein Abfall gegenüber der Prüfung nach 35 Tagen erkennbar. Auch die Steifigkeit bleibt mit $0,370 \text{ N/mm}^2$ konstant.

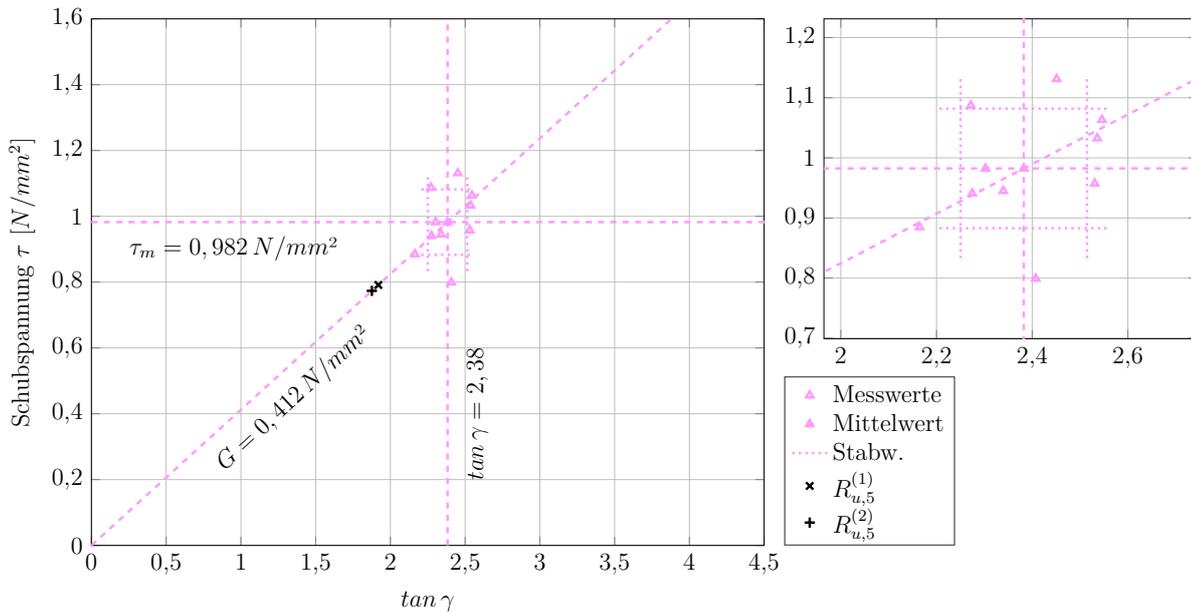


Abb. 4.48.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,06 \text{ N/mm}^2$ (S3_006_035)

Tab. 4.43.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,06 \text{ N/mm}^2$ (S3_006_035)

Ergebnisse der Versuchsreihe S3_006_035	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,982 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,099 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,101$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,791 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,774 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,38$
Schubmodul	$G = 0,412 \text{ N/mm}^2$

4. Experimentelle Untersuchungen

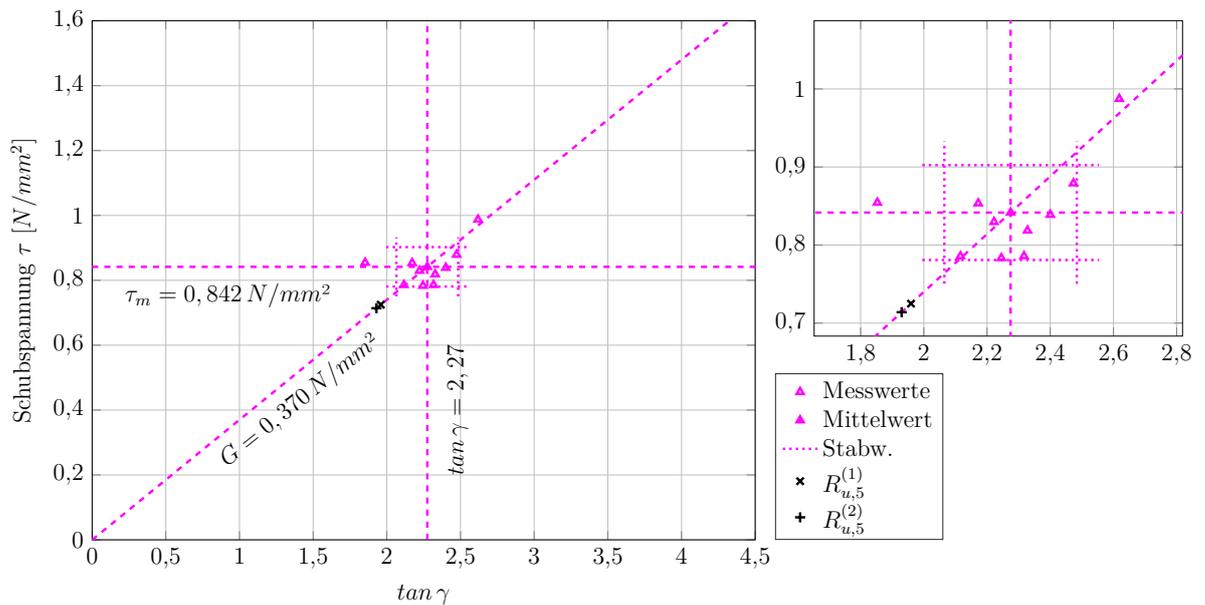


Abb. 4.49.: Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,06 \text{ N/mm}^2$ (S3_006_091)

Tab. 4.44.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,06 \text{ N/mm}^2$ (S3_006_091)

Ergebnisse der Versuchsreihe S3_006_091	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,842 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,061 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,072$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,725 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,714 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,27$
Schubmodul	$G = 0,370 \text{ N/mm}^2$

4.3.3.3. Resümee

Die Kleinproben dieser Serie bestätigen die vorangegangenen Untersuchungen und verdeutlichen den Einfluss des Klimas auf die Messungen der Kriechverformungen. Die Kleinproben mit einem Lastniveau von $0,06 N/mm^2$ kriechen erwartungsgemäß stärker als die geringer belasteten Probekörper. Dennoch ist qualitativ kein Unterschied im Kriechverhalten erkennbar und alle notwendigen Kriterien bezüglich Verformungszuwachs über eine gewisse Dauer und Rückverformung werden erfüllt, siehe Tabelle 4.45. Somit besteht aufgrund der Langzeituntersuchungen kein Grund eine Dauerbelastung von $0,06 N/mm^2$ für den verwendeten Klebstoff auszuschließen. Über die Nichterfüllung der Rückverformung unter $0,1 mm$ wird wie bei den anderen Serien hinweggesehen.

Bezüglich der Restscherfestigkeit sind die gesammelten Ergebnisse in Abbildung 4.50 zusammengefasst. Wiederum werden die Resultate ohne vorangegangene Vorbelastung als Vergleichsbasis herangezogen. Alle weiteren Serien erfüllen das Kriterium von mindestens 75 % der Ausgangsfestigkeit deutlich. Es kann kein Einfluss der Dauerlast auf die Kurzzeitfestigkeit festgestellt werden. Auch zeigt sich kein Unterschied im Vergleich zu den in der Klimakammer gelagerten Kleinprobekörpern. Das in dieser Serie beinahe konstante Klima während des Dauerlastversuchs hat ebenso keine Auswirkung auf die Festigkeitswerte.

Tab. 4.45.: Übersicht der Nachweise der Serie S3

Nachweis	Grenzwert	S3_005	S3_006
Verformungszunahme innerhalb von 21 Tagen [59, 60]	$< 0,10 mm$	✓	✓
Maximalverschiebung nach 91 Tagen [40]	$< 1,00 mm$	✓	✓
Restverformung nach Erholungsphase [59, 60]	$< 1,00 mm$	✓	✓
Restverformung nach Erholungsphase [2, 40]	$< 0,10 mm$	✗	✗
Restschubfestigkeit [2, 40]	$> 75 \%$	✓	✓
Kohäsiver Bruch der Klebefuge [2, 40]	$> 90 \%$	✓	✓

Da wie in den Serien S1 und S2 (Abschnitt 4.3.1 und Abschnitt 4.3.2) kein Verlust durch etwaige Vorbelastungen in der Kurzzeitfestigkeit bemerkbar ist, werden auch hier alle erzielten Ergebnisse in einer Auswertung zusammengefasst, siehe Tabelle 4.46. Zum Vergleich sind die gesammelten Ergebnisse aus Serie S1 (Tabelle 4.29) angeführt. Der Mittelwert der Schubfestigkeit ist bei Serie S3 geringer als in Serie S1. Dies kann bei diesen geringen Spannungen und einer natürlichen Messungenauigkeit durchaus auf die unterschiedliche Prüfmaschine und den somit geringfügig anderen Versuchsaufbau bei der Überprüfung der Scherfestigkeit zurückgeführt werden. Im Gegenzug dazu ergibt

4. Experimentelle Untersuchungen

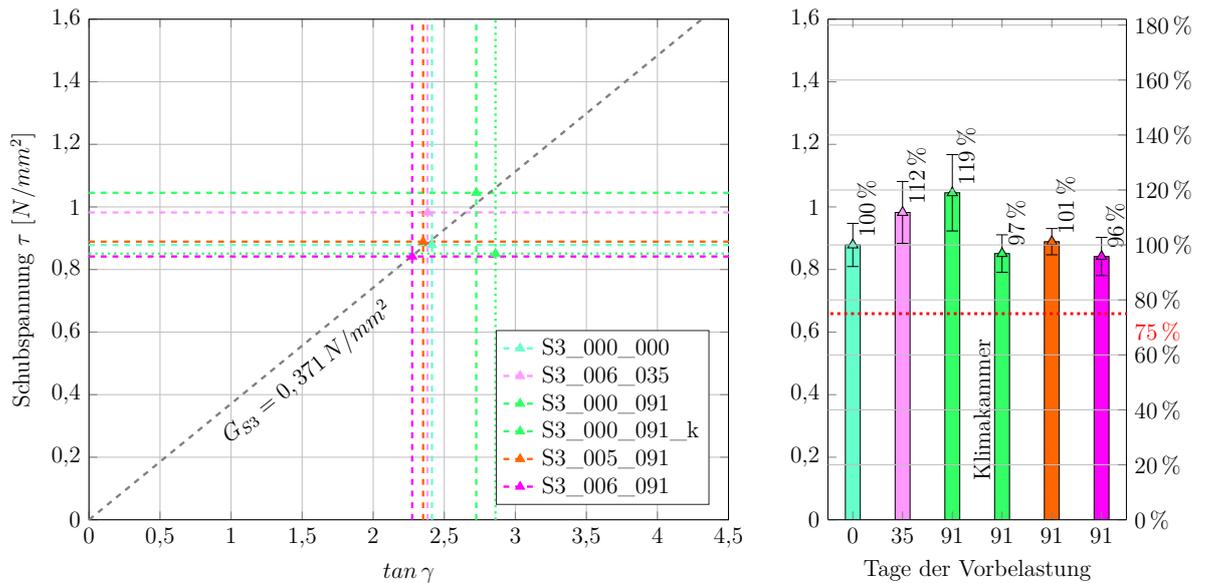


Abb. 4.50.: Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie S3 mit unterschiedlichen Lastgeschichten

sich eine geringere Streuung, wodurch sich sehr ähnliche $R_{u,5}$ -Werte nach [1] und [2] ergeben. Auch in der Steifigkeit der Klebefuge ist kein Unterschied zwischen den Serien festzustellen.

Tab. 4.46.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie S3 mit unterschiedlichen Lastgeschichten im Vergleich zu Serie S1

Ergebnisse der Versuchsreihe	S3	S1
Anzahl der Prüfkörper	$n = 48$	91
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,909 \text{ N/mm}^2$	$1,078 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,100 \text{ N/mm}^2$	$0,132 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,110$	0,123
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,744 \text{ N/mm}^2$	$0,860 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,744 \text{ N/mm}^2$	$0,860 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,45$	2,85
Schubmodul	$G = 0,371 \text{ N/mm}^2$	$0,378 \text{ N/mm}^2$

4.3.4. Serie L-Leiste

Die Versuche an Kleinprobekörpern mit Verklebung in L-Form stellen eine Untergruppe der Kleinprobekörper dar. Das vorrangige Ziel war, den Einfluss einer komplexeren

Klebefugegeometrie zu quantifizieren. Dafür wurden die in Abbildung 4.51 dargestellten Probekörper mit einer Klebefugenlänge von 50 mm und einer Fugenbreite von 12 mm an der Glasoberfläche und einer Breite von 8 mm entlang der Glaskante hergestellt. Die Klebefugendicke betrug 3 mm . Dies entspricht einer nominellen Klebefläche an der Seite des Glases von 2000 mm^2 , da die Verklebung an beiden Glaskanten ausgeführt wurde. Nach Durchführung der Scherversuche wurde die tatsächliche Klebefläche bei jedem Prüfkörper nachgemessen und zur Spannungsberechnung herangezogen. Die Klebefuge haftet bei diesem Versuch an drei Flanken und erfährt somit einen räumlich Spannungszustand, was zu gewissen Irregularitäten führen kann. Diese sollen im Zuge dieser Versuche überprüft werden.

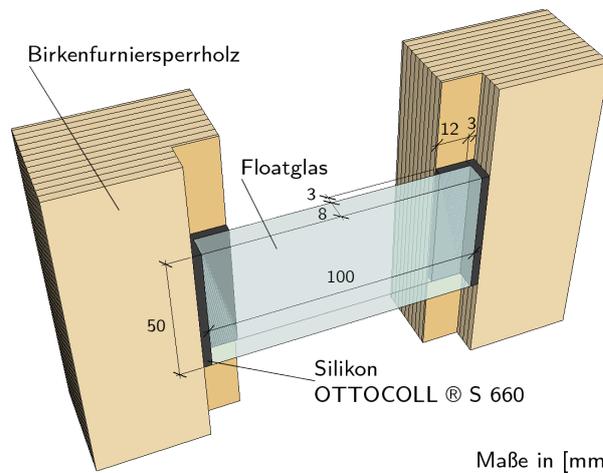


Abb. 4.51.: Abmessungen eines L-förmigen Kleinprobekörpers

Die grundsätzliche Versuchsdurchführung gleicht der Vorgehensweise in den Serien S1 bis S3. Insgesamt wurden an sechs Probekörpern die Kriechverformungen gemessen. Die genaue Auflistung ist Tabelle 4.47 zu entnehmen. Es wurde auch die Kurzzeitfestigkeit überprüft, die Auflistung dieser Tests findet sich in Tabelle 4.48.

Tab. 4.47.: In Serie L durchgeführte Kriechversuche

Seriennummer	Lastniveau [N/mm^2]	Dauer [t]	Stückzahl
L_000_131	—	131	2
L_004_131	0,04	131	4

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.48.: In Serie L durchgeführte Überprüfungen der Scherfestigkeit

Seriennummer	Lastniveau [N/mm^2]	Dauer [t]	Zusatzbeanspruchung	Stückzahl
L_000_000	–	–	–	4
L_000_131	–	131	–	2
L_004_068	0,04	68	–	4
L_004_131	0,04	131	–	4

4.3.4.1. Kriechversuch

Nach Messen der Anfangsverformung wurde bei dieser Serie täglich, nach einem Monat Laufzeit einmal wöchentlich die Verformung zwischen Koppelleiste und Glasscheibe gemessen. Nach 68 Tagen wurden vier Stück entlastet und nach einer 24-stündigen Ruhepause auf deren Restscherfestigkeit überprüft. Ebenso wurde mit den Probekörpern nach einer Belastungsdauer von 131 Tagen vorgegangen. Zwei weitere Kleinproben mit L-förmiger Verklebung wurden rein durch das Gewicht der Glasscheibe beansprucht. Die Wahl der Belastungsdauer von 131 Tagen ergab sich durch Einschränkungen in der Verfügbarkeit des Versuchsraums, die Dauer von 68 Tagen wurde daher in der Mitte der Gesamtbeanspruchung gewählt, um einen etwaigen Trend in der Entwicklung der Restscherfestigkeit feststellen zu können. In Abbildung 4.52 und Tabelle 4.49 sind die gemessenen Verformungswerte ersichtlich.

Tab. 4.49.: Verformungswerte der Serie L in [mm]

Seriennummer	nach Belastung w_0	nach 91 Tagen w_{91}	nach 131 Tagen w_{131}	nach Entlastung w_{131+e}	24 h nach Entlastung w_{131+1}
L_000_131	–	0,005	0,000	–	–
L_004_131	0,189	0,270	0,301	0,168	0,154

Auf den ersten Blick fallen sowohl bei den unbelasteten als auch bei den belasteten Probekörpern die geringen Verformungen auf. Die Kleinproben mit L-förmiger Verformung erleiden kaum Kriechverformungen oder Verformungen zufolge Klimaänderungen. Bei den Proben unter einem Lastniveau von $0,04 N/mm^2$ sind nur sehr geringe Auf- und Abbewegungen erkennbar. Die Gesamtverformung liegt nach 131 Tagen bei $0,301 mm$ und erfüllt damit deutlich das Kriterium nach [40] von maximal $1,0 mm$, welches prinzipiell bereits nach 91 Tagen gemessen werden darf. Mit einer Verformung nach der

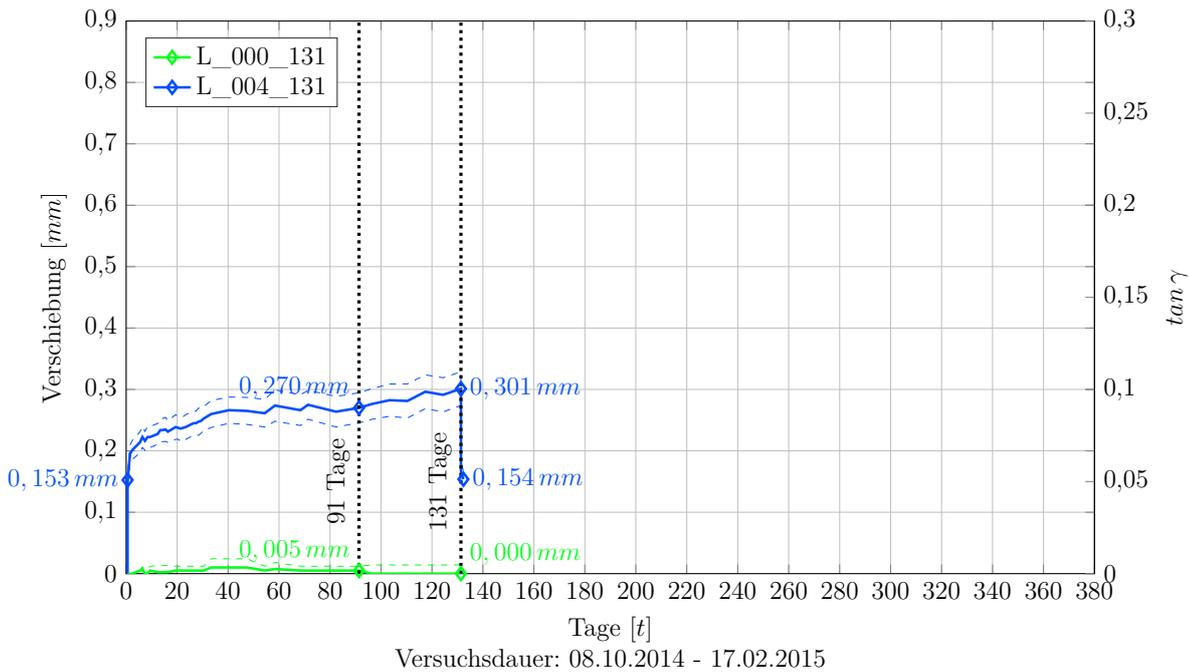


Abb. 4.52.: Gesamtverformung der Kleinproben L über 131 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase

abschließendem 24-stündigen Entlastungsphase von 0,154 mm ist die in Abschnitt 4.1 erläuterte Grenze von $< 1,0 \text{ mm}$ aus [59, 60] ebenso klar erreicht.

Die geringen Kriechverformungen zeigen sich auch in Tabelle 4.50. Die gesamten zusätzlichen Verformungen über 131 Tage betragen nur 59 % der elastischen Anfangsverformung. Auch das Rückstellvermögen fällt hier geringer aus. Die elastische Anfangsverformung bildet sich bei Entlastung der Probekörper zu lediglich 70 % zurück.

Tab. 4.50.: Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung

Seriennummer	w_0	$w_{91} - w_0 / w_0$	$w_{131} - w_0 / w_0$	$w_{131} - w_{131+e} / w_0$	$w_{131} - w_{131+1} / w_0$
L_004_131	100 %	43 %	59 %	70 %	78 %

Das Kriterium nach [59] bezüglich Verformungszuwachs innerhalb von drei Wochen ist für die Versuchskörper ab Tag 21 jedenfalls erfüllt, siehe Abbildung 4.53. Die Grenze von 0,1 mm wird bereits bis Tag 21, also innerhalb der ersten drei Wochen des Versuchs, eingehalten.

Bei einem Blick auf die klimatischen Bedingungen während der Versuchsdurchführung

4. Experimentelle Untersuchungen

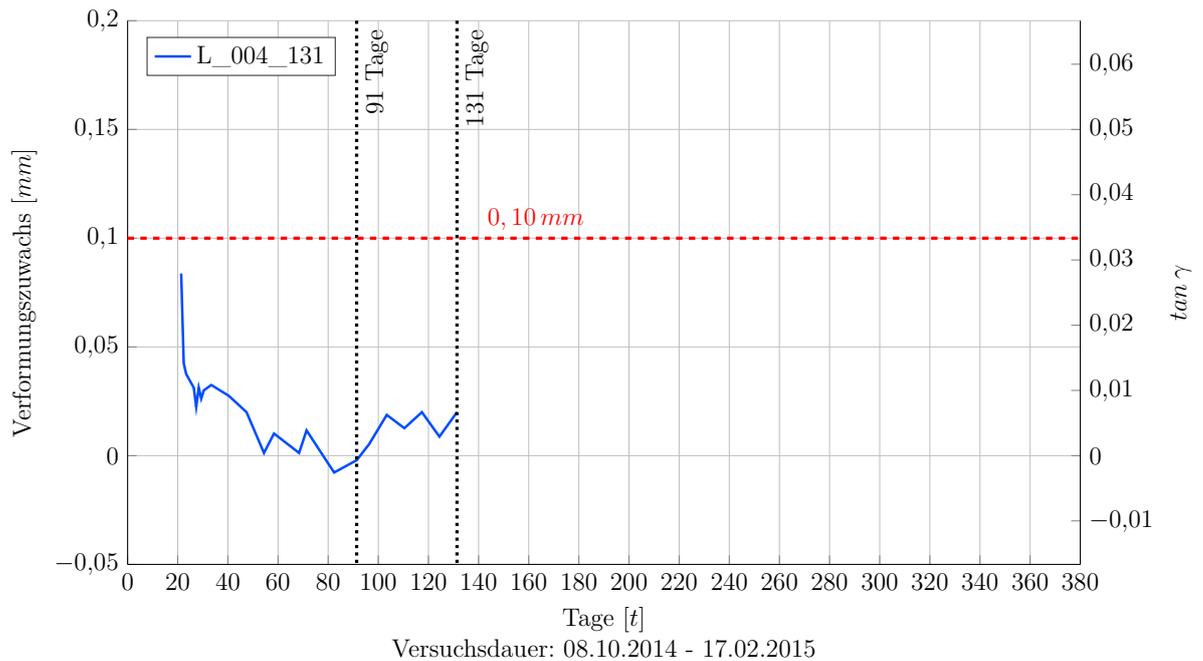


Abb. 4.53.: Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der Kleinproben L über 131 Tage mit der Belastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$

in Abbildung 4.54 wird deutlich, dass im Vergleich zu Serie S1 und S2 sehr stabile Bedingungen vorherrschten. Die maximale Temperatur lag bei $26,5^\circ\text{C}$, die minimale bei $15,3^\circ\text{C}$. Die relative Luftfeuchte im Versuchsraum bewegte sich zwischen $43,75\%$ und $82,35\%$. Die maximale Schwankungsbreite innerhalb von 24 Stunden lag bei $10,35^\circ\text{C}$ und $23,65\%$.

Im Vergleich zu Serie S1 aus Abschnitt 4.3.1.1 fällt auf, dass die Verformungen über die gesamte Versuchsdauer deutlich geringer ausfallen, siehe Abbildung 4.55. Bei Serie S1 erfolgte nach 131 Tagen keine Messung, weshalb in Abbildung 4.55 die Verformung nach 133 Tagen zum Vergleich eingetragen ist. Zu diesem Zeitpunkt betragen die Verformungen der Serie mit L-förmiger Verklebung lediglich rund 60% der Serie S1. Dieser Umstand kann nicht allein auf die klimatischen Einflüsse zurückgeführt werden. Es wird deutlich, dass eine Verklebung mit einer mehrseitigen Haftung des Klebstoffs weniger anfällig gegen Kriechverformungen unter einer Dauerlast ist, als eine einfache zweiseitige Verklebung.

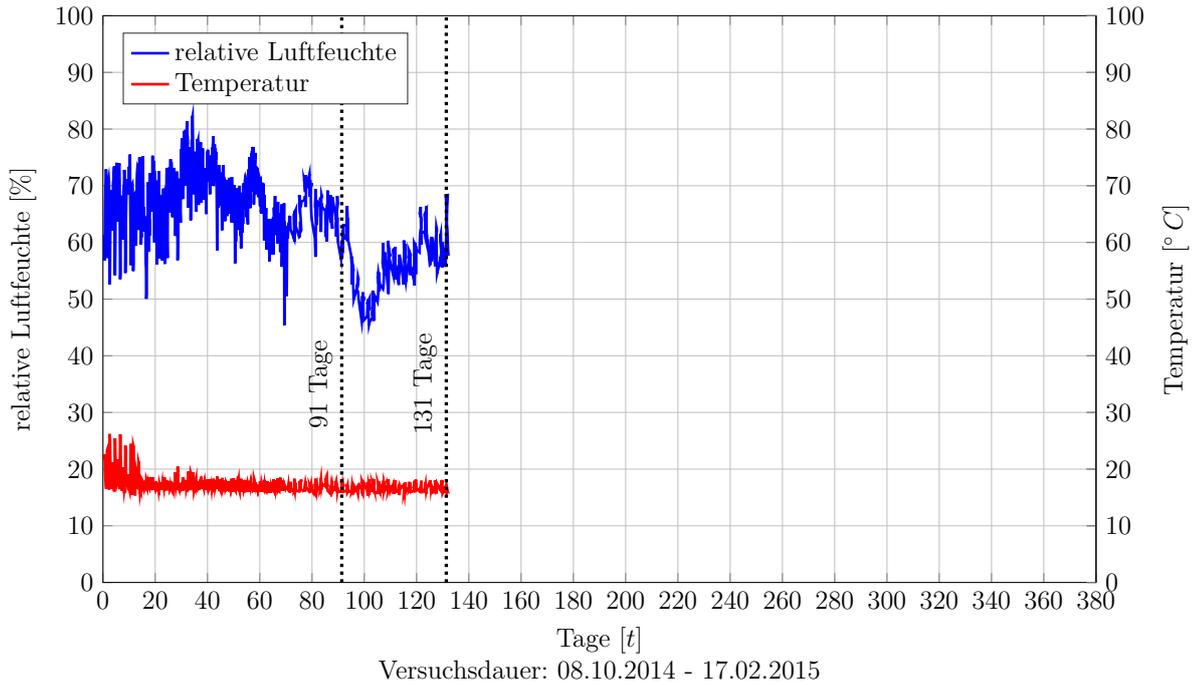


Abb. 4.54.: Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie L

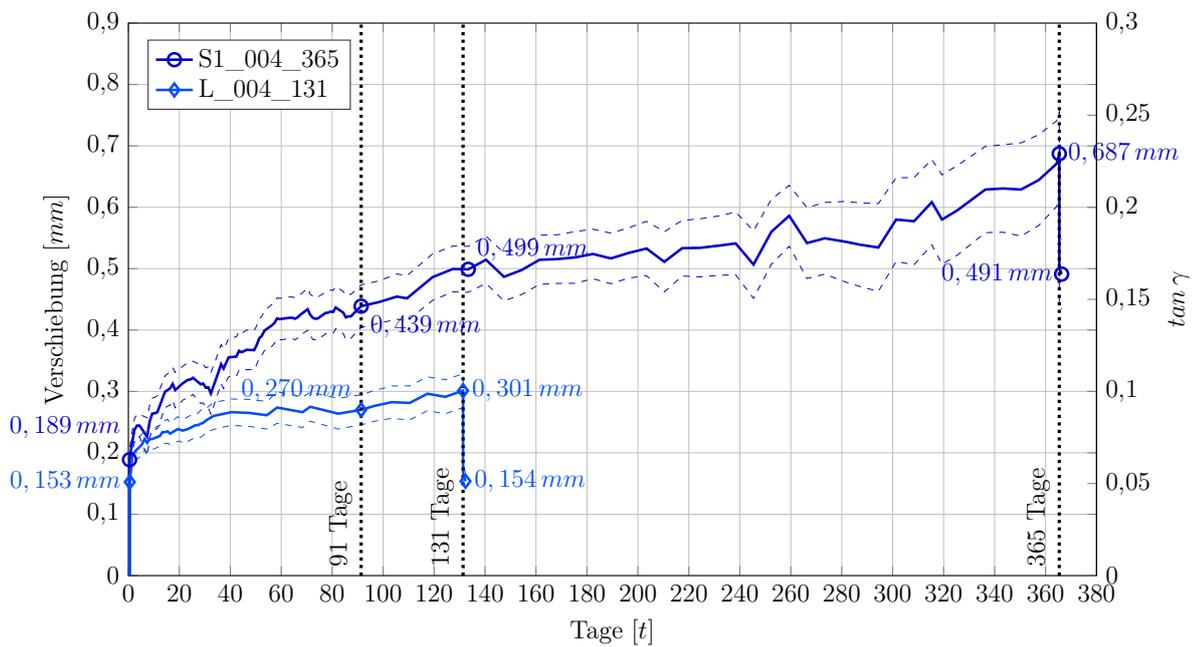


Abb. 4.55.: Gesamtverformung der Kleinproben S1 und L mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ Dauerlast und jeweils 24-stündiger Entlastungsphase

4.3.4.2. Scherversuch

Die Scherversuche wurden in derselben Prüfmaschine wie jene der Serien S1 und S2 unter der identen Versuchsanordnung durchgeführt. Es wurden die in Tabelle 4.48 und Abbildung 4.56 angeführten Probekörper geprüft. Eine beispielhafte Arbeitslinie eines Probekörpers der Serie L_000_000 ist in Abbildung 4.57 dargestellt. Das Versagen erfolgt plötzlich, es ist kaum Resttragfähigkeit gegeben.

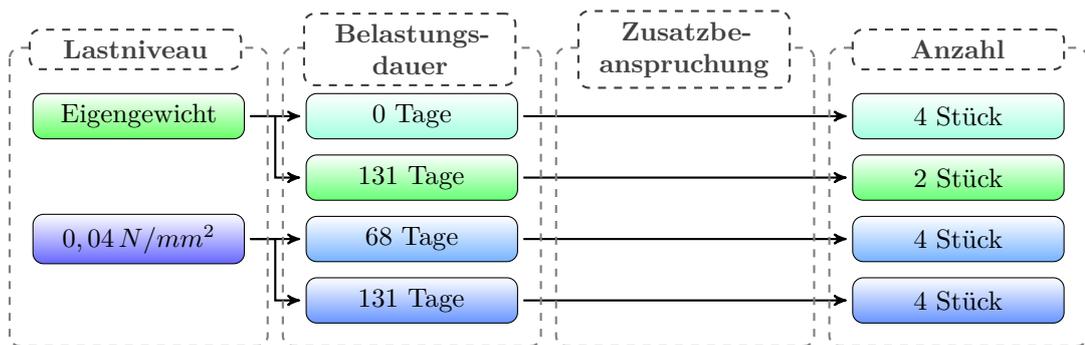


Abb. 4.56.: Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie L

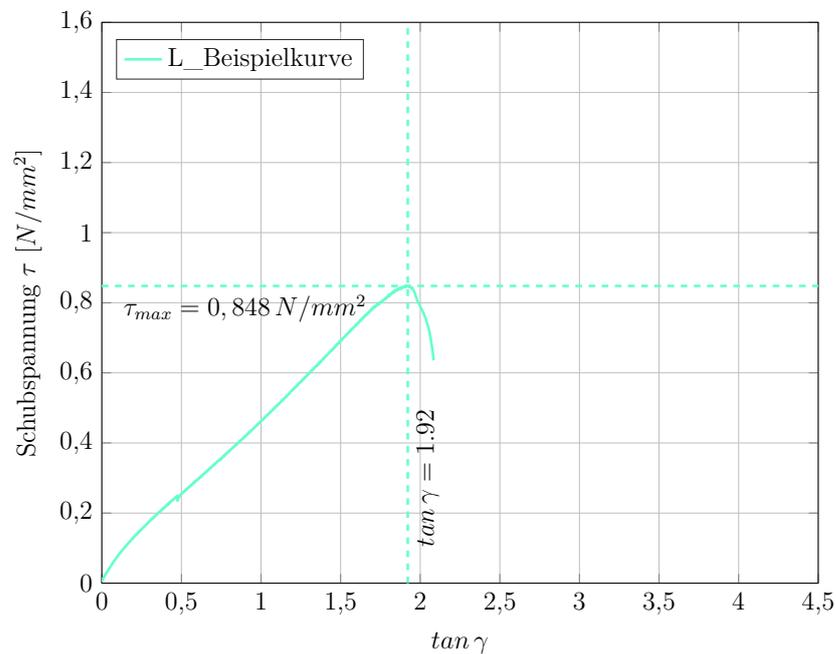


Abb. 4.57.: Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie L_000_000

4.3.4.2.1. Unbelastete Kleinprobekörper mit L-Leiste

Zu Beginn der Serie wurden Probekörper ohne vorangegangene Belastung geprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.58 und Tabelle 4.51 zu sehen. Bei vier Prüfkörpern wird lediglich eine mittlere Scherfestigkeit von $0,787 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Da die Streuung mit $0,041 \text{ N/mm}^2$ gering ausfällt, ergibt sich $R_{u,5}^{(1)}$ zu $0,678 \text{ N/mm}^2$, $R_{u,5}^{(2)}$ nach [2] kann aufgrund der geringen Probenanzahl nicht berechnet werden. Es zeigt sich steiferes Materialverhalten mit einem Schubmodul größer $0,4 \text{ N/mm}^2$, wodurch die erreichte Gleitung auf $\tan \gamma = 1,82$ sinkt.

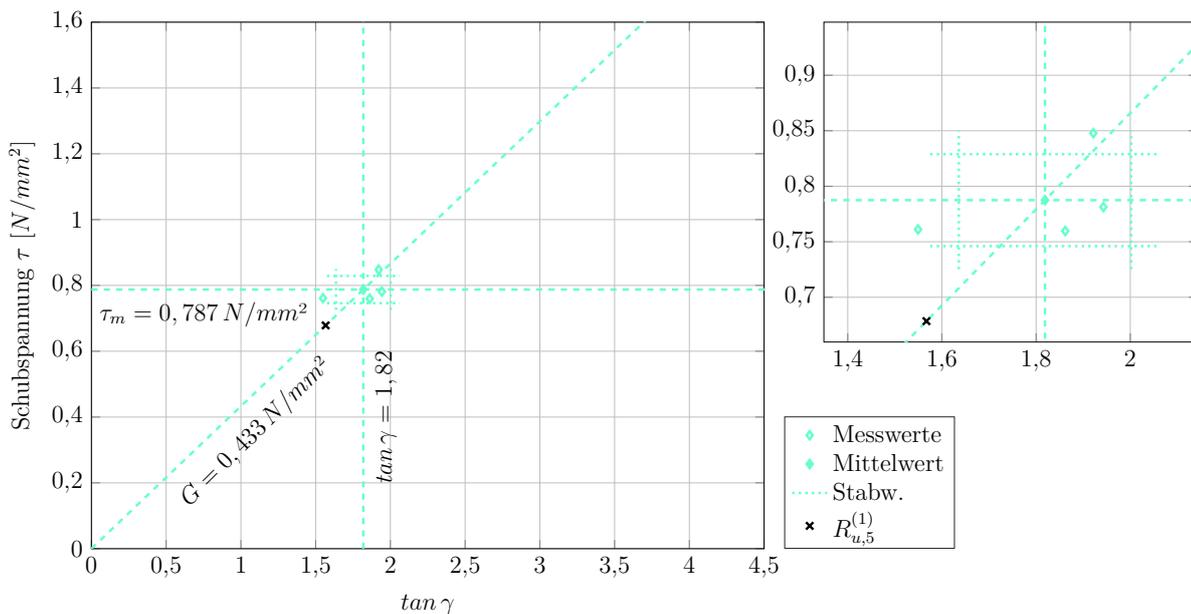


Abb. 4.58.: Schubfestigkeiten an Kleinproben mit L-Leiste ohne Vorbelastung (L_000_000)

Nach 132 Tagen wurden die Probekörper ohne zusätzliche Belastung, deren Kriechkurven in Abbildung 4.52 zu sehen sind, geprüft. Auch hier wird nur eine geringe mittlere Scherfestigkeit von $0,798 \text{ N/mm}^2$ erreicht, siehe Abbildung 4.59 und Tabelle 4.52. Für lediglich zwei Probekörper kann weder die 5 %-Quantilen nach [1] noch nach [2] berechnet werden.

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.51.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben mit L-Leiste ohne Vorbelastung (L_000_000)

Ergebnisse der Versuchsreihe L_000_000	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,787 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,041 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,053$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,678 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 1,82$
Schubmodul	$G = 0,433 \text{ N/mm}^2$

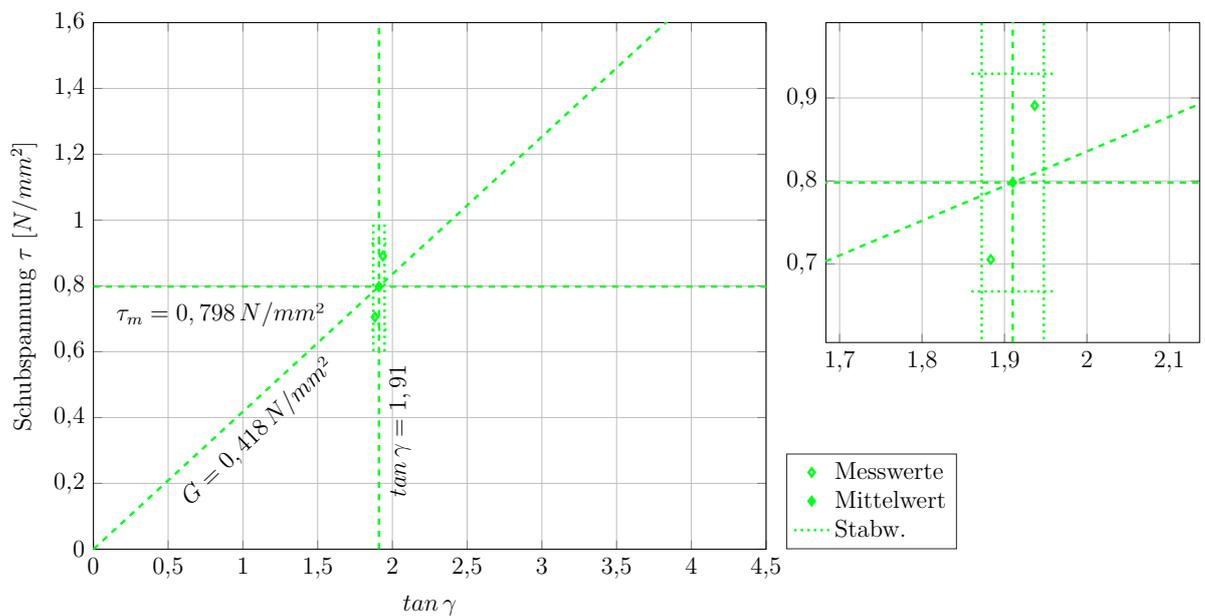


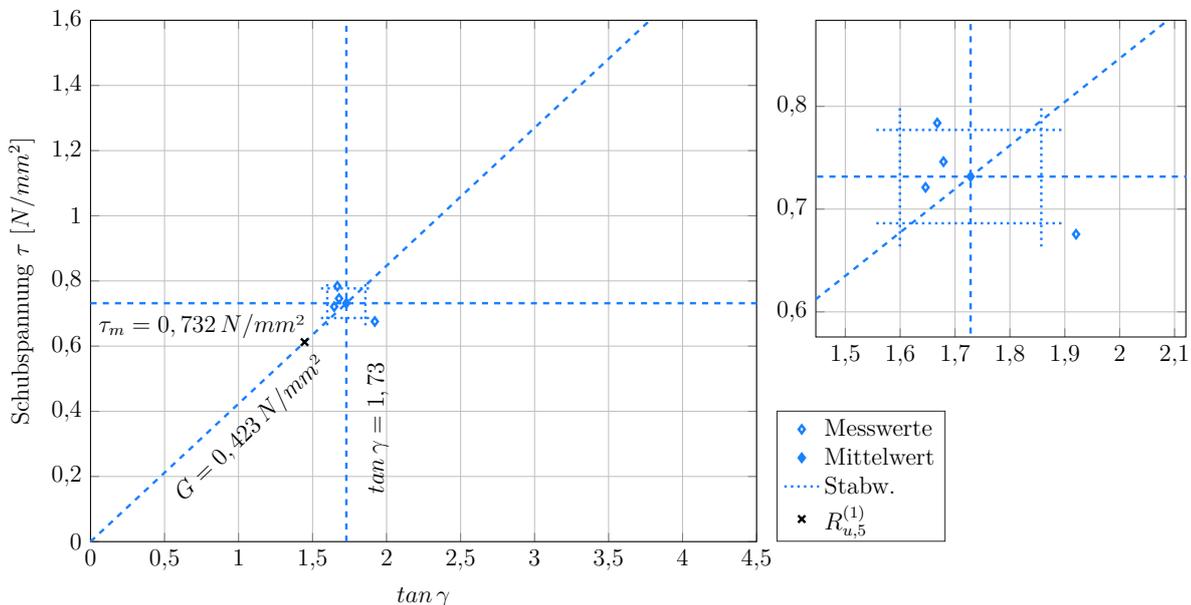
Abb. 4.59.: Schubfestigkeiten an Kleinproben mit L-Leiste nach 131 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (L_000_131)

Tab. 4.52.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben mit L-Leiste nach 131 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (L_000_131)

Ergebnisse der Versuchsreihe L_000_131	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 2$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,798 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,131 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,164$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = -$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 1,91$
Schubmodul	$G = 0,418 \text{ N/mm}^2$

4.3.4.2.2. Kleinprobekörper mit L-Leiste mit einer Vorbelastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$

Nach 68 Tagen Belastung mit einer nominellen Spannung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ wurden die ersten vier Stück der Probekörper entlastet und nach 24 Stunden der Scherprüfung unterzogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.60 und Tabelle 4.53 dargestellt. Es ergeben sich auch hier ein niedriger Mittelwert ($0,732 \text{ N/mm}^2$) und eine geringe Streuung ($0,045 \text{ N/mm}^2$). Die 5 %-Quantile nach [1] berechnet sich mit $0,612 \text{ N/mm}^2$. Der Schubmodul ist mit $0,423 \text{ N/mm}^2$ ebenfalls vergleichsweise hoch.

Abb. 4.60.: Schubfestigkeiten an Kleinproben mit L-Leiste nach 68 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (L_004_068)

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.53.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben mit L-Leiste nach nach 68 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (L_004_068)

Ergebnisse der Versuchsreihe L_004_068	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,732 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,045 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,062$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,612 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 1,73$
Schubmodul	$G = 0,423 \text{ N/mm}^2$

Nach 131 Tagen Belastung unter einem Lastniveau von $0,04 \text{ N/mm}^2$ zeigt sich ein ähnliches Bild wie nach 68 Tagen. Es ergeben sich in allen Belangen beinahe identische Werte. Die genauen Ergebnisse können Abbildung 4.61 und Tabelle 4.54 entnommen werden.

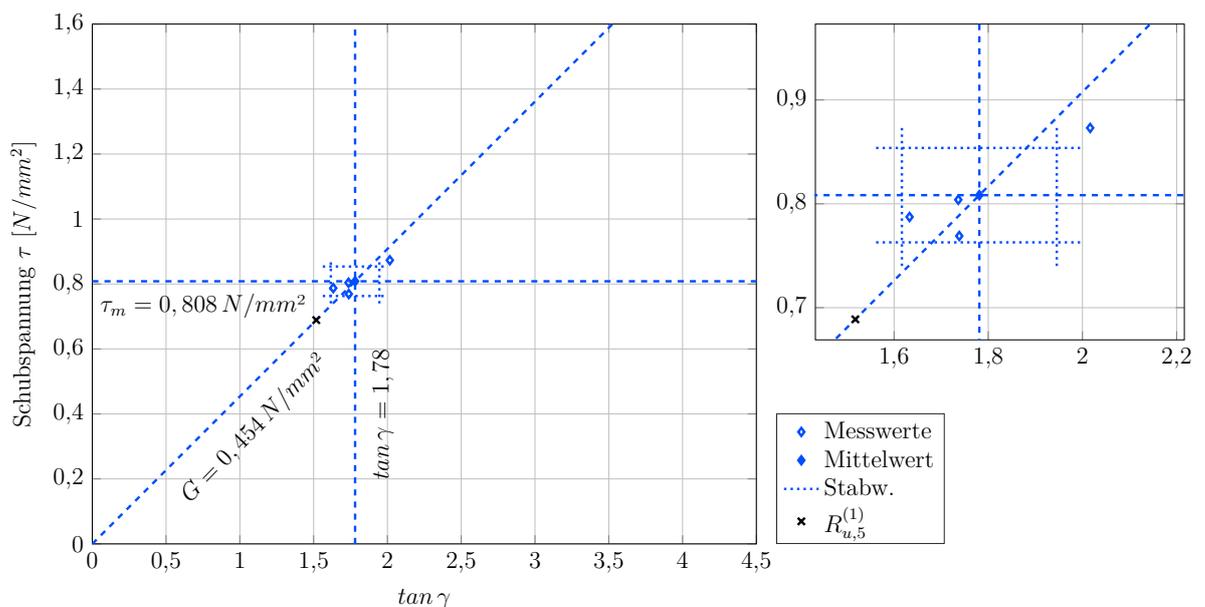


Abb. 4.61.: Schubfestigkeiten an Kleinproben mit L-Leiste nach 131 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (L_004_131)

Tab. 4.54.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben mit L-Leiste nach nach 131 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (L_004_131)

Ergebnisse der Versuchsreihe L_004_131	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,808 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,045 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,056$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,689 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 1,78$
Schubmodul	$G = 0,454 \text{ N/mm}^2$

4.3.4.3. Resüme

Grundsätzlich zeigt sich bei den durchgeführten Versuchen mit L-förmiger Verklebung äußerst geringes Verformungsvermögen der Klebefuge im Vergleich zu einer zweiseitigen Verklebung, siehe Serie S1 bis S3, Abschnitt 4.3.1 bis Abschnitt 4.3.3. Dies zeigt sich bereits im Dauerlastversuch, wo die Verformungen unter derselben Belastung um einiges geringer ausfallen. Jedoch ist im Vergleich zu den anderen Serien auch auffällig, dass sich die Anfangsverformungen bei Entlastung am Ende des Versuchs nicht mehr vollständig rückbilden. Die relevanten Nachweise bezüglich zulässiger Verformungszunahme und Rückverformung werden erfüllt, siehe Tabelle 4.55.

Tab. 4.55.: Übersicht der Nachweise der Serie L

Nachweis	Grenzwert	L_004
Verformungszunahme innerhalb von 21 Tagen [59, 60]	$< 0,10 \text{ mm}$	✓
Maximalverschiebung nach 91 Tagen [40]	$< 1,00 \text{ mm}$	✓
Restverformung nach Erholungsphase [59, 60]	$< 1,00 \text{ mm}$	✓
Restverformung nach Erholungsphase [2, 40]	$< 0,10 \text{ mm}$	✗
Restschubfestigkeit [2, 40]	$> 75 \%$	✓
Kohäsiver Bruch der Klebefuge [2, 40]	$> 90 \%$	✓

Bei den Scherversuchen macht sich das verringerte Verformungsvermögen durch eine geringe Gleitung $\tan \gamma$ durchwegs unter 2,0 bemerkbar. Trotz einem steifen Materialverhalten von mehr als $0,4 \text{ N/mm}^2$ werden in allen Prüfungen dieser Serie geringere Mittelwerte bei den Scherprüfungen erreicht, als bei den Überprüfungen der herkömmlichen Kleinprobekörper. In Abbildung 4.62 und Tabelle 4.56 sind alle Ergebnisse dieser

4. Experimentelle Untersuchungen

Serie gesammelt dargestellt. In Tabelle 4.56 finden sich zum Vergleich die Ergebnisse der Serie S1 aus Tabelle 4.29. Auch in dieser Serie wird durch keine der gewählten Vorbelastungen eine derartige Schädigung der Klebefuge hervorgerufen, dass bei der anschließenden Scherprüfung weniger als die von [2] geforderten 75 % der Anfangsfestigkeit erreicht werden.

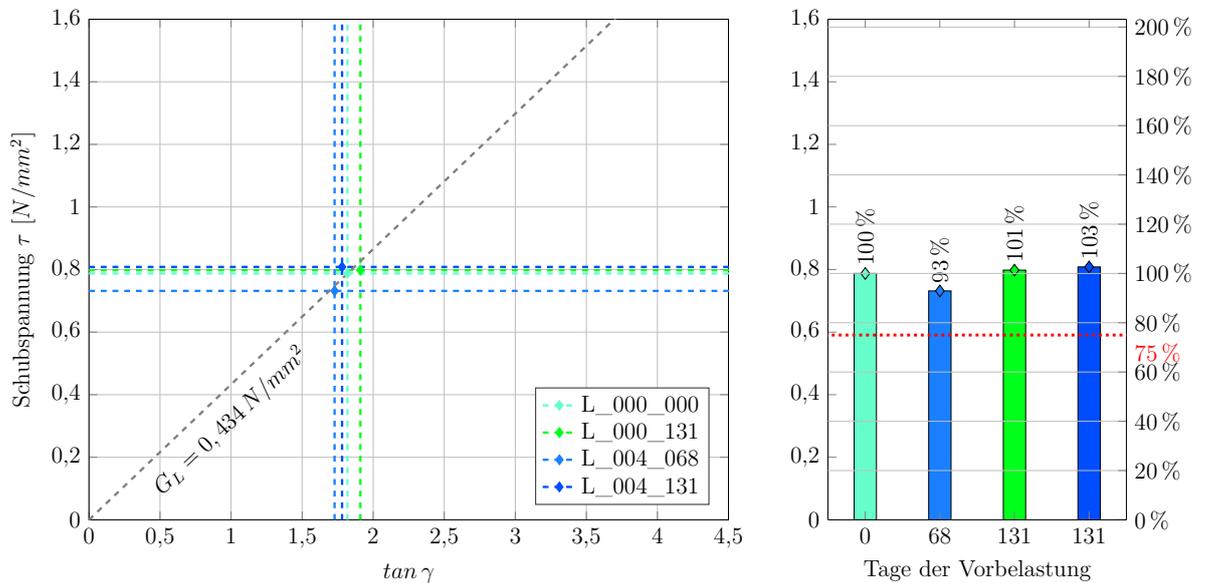


Abb. 4.62.: Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie L mit unterschiedlichen Lastgeschichten

Es können mit einer L-förmigen Verklebung bedingt durch die größere Klebefläche größere Lasten aufgenommen werden. Die maximal übertragbare Last steigt aber nicht proportional zur anwachsenden Fläche. Diese Art der Klebefugegeometrie zieht also gewisse negative Einflüsse mit sich. Es wird der Eindruck erweckt, dass das Verformungsvermögen der Silikonfuge durch die kompliziertere Klebefugegeometrie behindert wird, wodurch sich ein steiferes Materialverhalten, aber auch geringere mögliche Verformungen und aufnehmbare Spannungen ergeben. Durch die geringe Streuung in dieser Serie werden im Vergleich zu den Mittelwerten aber dennoch gute 5%-Quantilwerte erreicht.

Tab. 4.56.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie L mit unterschiedlichen Lastgeschichten im Vergleich zu Serie S1

Ergebnisse der Versuchsreihe		L	S1
Anzahl der Prüfkörper	n	= 14	91
Mittlere Schubfestigkeit	τ_m	= 0,779 N/mm ²	1,078 N/mm ²
Standardabweichung der Schubfestigkeit	s_x	= 0,061 N/mm ²	0,132 N/mm ²
Variationskoeffizient	CoV	= 0,078	0,123
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)}$	= 0,666 N/mm ²	0,860 N/mm ²
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)}$	= 0,657 N/mm ²	0,860 N/mm ²
Gleitung	$\tan \gamma$	= 1,80	2,85
Schubmodul	G	= 0,434 N/mm ²	0,378 N/mm ²

4.3.5. Zusammenfassung der Serien

Die Versuche an den Kleinprobekörpern zeigen durch alle Serien konsistentes Verhalten. Die einzelnen Abweichungen sind durchwegs erklärbar. Es zeigt sich, dass die klimatischen Bedingungen großen Einfluss auf die gemessenen Verformungen haben. Es kann allerdings darauf geschlossen werden, dass der Großteil der Verformungsänderungen zufolge Temperaturunterschiede und Differenzen der relativen Luftfeuchte aus dem Verhalten der Koppelleiste aus BFU resultiert. Geringe Anteile können natürlich auch aus dem Materialverhalten des verwendeten Silikonklebstoffs resultieren. Diese sind allerdings vernachlässigbar. Das zeigen auch die Untersuchungen aus [67], wo der verwendete Klebstoff OttoColl® S660 bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht wurde. Bis zu 80 °C ist kein Verlust der Festigkeit erkennbar, während sich bei höheren Temperaturen deutlich weiches Materialverhalten zeigt und die Schubfestigkeit deutlich abnimmt. Für die aufgetretenen klimatischen Verhältnisse während der Serien S1 bis S3 und L hat dies aber keinen Einfluss. Im Verformungsverhalten stechen die Kleinprobekörper mit L-förmiger Verklebung hervor, da diese deutlich geringere Kriechverformungen aufweisen als die übrigen Serien. Diese Probekörper erreichen ebenso geringere Festigkeitswerte bei höherer Schubfestigkeit. Beide Umstände deuten darauf hin, dass das Verformungsvermögen einer Klebefuge mit dieser Geometrie eingeschränkt wird.

Bei Betrachtung der Kriechverformungen werden bei allen behandelten Serien die erforderlichen Nachweise durchwegs mit allen Lastniveaus erfüllt. Lediglich der Nachweis nach [2, 40] von einer bleibenden Maximalverformung 24 Stunden nach Entlastung von $< 0,1 \text{ mm}$ wird in keinem Fall erreicht. Die baupraktische Relevanz dieses Kriteriums kann allerdings in Frage gestellt werden, da im Falle einer Eigengewichtsabtragung über

die Klebefuge im Laufe der Lebensdauer nicht von einer Entlastung ausgegangen werden kann. Maßgebend sollte somit die maximal erreichte Verformung unter Belastung sein, wo alle Kriterien eingehalten werden.

Bezüglich der Kurzzeitfestigkeit nach Dauerbelastung wird bei keiner der Serien der Grenzwert von 75 % der Anfangsscherfestigkeit, unabhängig von Lastniveau und Belastungsdauer, unterschritten. Auch nach zyklischer Belastung wird dieses Kriterium erfüllt, obwohl das Belastungsniveau der zyklischen Last von $R_{u,5}/6$ nach ETAG 002-1 [2] auf $R_{u,5}/3$ laut [63] erhöht wurde.

Somit kann abschließend festgehalten werden, dass auf Basis der beobachteten Größen, sowohl unter Dauerlast als auch unter kurzzeitiger Belastung bis zum Bruch, alle untersuchten Lastniveaus die notwendigen Grenzwerte erfüllen und somit als mögliche Dauerschubbelastungen unter dem Eigengewicht der Glasscheibe in Betracht gezogen werden können.

4.4. Mittelgroße Versuchskörper

Die mittelgroßen Probekörper stellen das Gegenstück sowie eine wichtige Ergänzung zu den Versuchen an den Kleinprobekörpern (Abschnitt 4.3) dar. Die Geometrie der Versuchskörper wurde dahingegen geändert, dass sie einer tatsächlich markttauglichen Scheibe ähnelt. Auf eine Klotzung wurde verzichtet, da die Untersuchung des Langzeitverhaltens des Klebstoffs im Vordergrund steht. Die Probekörper bestehen aus einer 8 mm dicken Glasscheibe mit einer Breite von 500 mm und einer Länge von 1000 mm sowie zwei gezahnten Koppelleisten, welche mit den Längsseiten der Glasscheibe über die gesamte Länge von 1000 mm verklebt wurden. Die Klebefugen selbst weisen wie bei den Kleinprobekörpern eine nominelle Breite von 12 mm und eine Dicke von 3 mm auf. Die tatsächliche Geometrie der Klebefugen wurde nach den Tests gemessen, um die exakte verklebte Fläche zu kennen.

Die Serie M_000_000_mod wurde zu einem späteren Zeitpunkt als Ergänzung zu den eigentlichen Versuchen durchgeführt. Da aufgrund der asymmetrischen Verschraubung der Koppelleisten mit der Unterkonstruktion im Kurzzeitversuch eine leichte Verdrehung der Probekörper bemerkt wurde, wurden weitere vier Probekörper mit einer nicht gezahnten Koppelleiste symmetrisch mit der Unterkonstruktion verschraubt. Abstand und Anzahl der Schrauben wurde dabei nicht verändert. Eine Darstellung der Versuchskörper findet sich in Abbildung 4.63.

Die Versuchskörper mit gezahnter Koppelleiste wurden hinsichtlich ihres Kriechver-

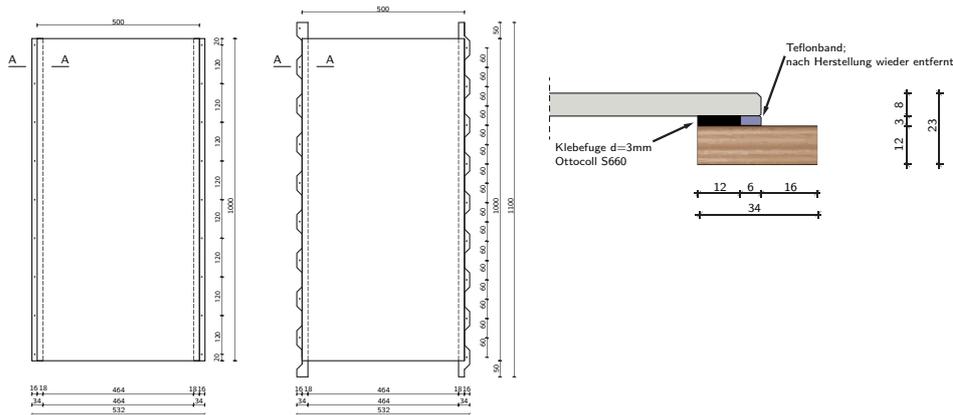


Abb. 4.63.: Abmessungen und Anordnung der zwei Verschraubungsvarianten der mittelgroßen Versuchskörper

haltens und ihrer Scherfestigkeit überprüft. Es kamen dabei die Dauerlastniveaus von $0,04 \text{ N/mm}^2$ und $0,05 \text{ N/mm}^2$ zum Einsatz. Für den Langzeitversuch wurde ein eigens dafür konstruierter Versuchsstand entwickelt, wobei jeweils zwei Scheiben von einem mit Kies befüllten Container belastet wurden. Die Lasteinleitung erfolgt dabei über kleine Blöcke nahe der Klebefugen. Eine detaillierte Ansicht des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 4.64 zu sehen. Zur Messung der Verformungen zwischen Koppelleiste und Glascheibe wurden Messuhren mit einer Genauigkeit von $0,01 \text{ mm}$ in der Mitte der Scheibe angebracht. Diese wurden nach Messung der Anfangsverformung innerhalb der ersten Woche täglich, anschließend wöchentlich abgelesen. Die aufgebrachte Last wurde für 365 Tage erhalten, anschließend wurde die Rückverformung der Probekörper innerhalb von 24 Stunden gemessen. Daraufhin wurden die Probekörper auf deren Restscherfestigkeit überprüft. Bereits nach 91 Tagen wurde ein Teil der Probekörper entlastet und ebenfalls nach 24 Stunden der Scherprüfung unterzogen. In den Tabellen 4.57 und 4.58 sind die durchgeführten Versuche aufgelistet.

Tab. 4.57.: In Serie M durchgeführte Kriechversuche

Seriennummer	Lastniveau [N/mm^2]	Dauer [t]	Stückzahl
M_004_365	0,04	365	4
M_005_365	0,05	365	4

Das in der ETAG 002-1 [2] genannte Kriterium von mindestens 90 % kohäsivem Versagen der Verklebung wurde bei dieser Versuchsserie bei allen Probekörpern eingehalten, weshalb in den folgenden Abschnitten nicht näher darauf eingegangen wird.

4. Experimentelle Untersuchungen

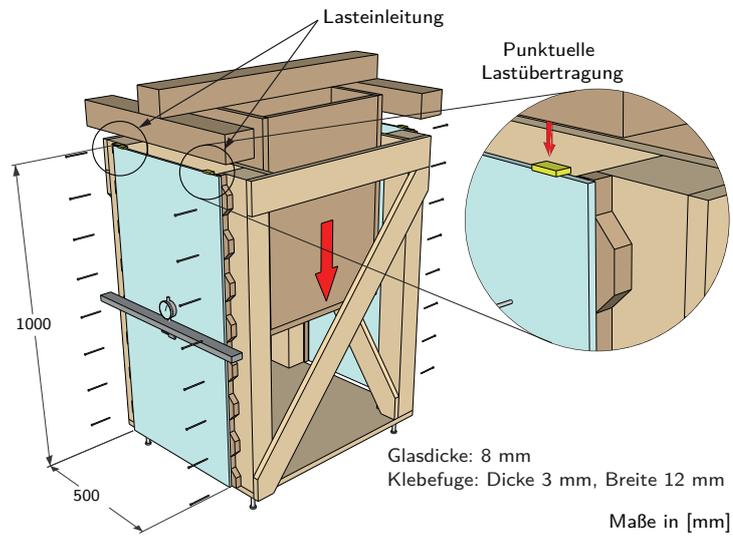


Abb. 4.64.: Aufbau des Versuchsstands der Langzeituntersuchungen

Tab. 4.58.: In Serie M durchgeführte Überprüfungen der Scherfestigkeit

Seriennummer	Lastniveau [N/mm^2]	Dauer [t]	Zusatzbeanspruchung	Stückzahl
M_000_000	—	—	—	3
M_000_000_mod	—	—	—	4
M_004_091	0,04	91	—	4
M_004_365	0,04	365	—	4
M_005_091	0,05	91	—	4
M_005_365	0,05	365	—	4

Die Temperatur und die relative Luftfeuchte im Versuchsraum werden über die gesamte Dauer im 30-Minutentakt aufgenommen.

4.4.1. Kriechversuch

Die Probekörper wurden im Zuge des Kriechversuchs neben der Dauerbelastung auch dem natürlichen Innenklima ausgesetzt. Die daraus resultierenden Verformungen über ein Jahr sind in Abbildung 4.65 und Tabelle 4.59 dargestellt. Erwartungsgemäß zeigen die Probekörper unter einer höheren Dauerlast sowohl eine größere Anfangsverformung sowie auch stärkere Kriechdeformationen. Die Gesamtverformung von $1,0\text{ mm}$ nach [40] bleibt zu jeder Zeit unterschritten. In der ift-Richtlinie VE-08/3 [59] und der Beurteilungsrundlage für geklebte Verglasungssysteme der HFA [60] werden maßgebliche Kriterien für die Zulässigkeit eines Klebstoffs in Bezug auf dessen Kriechverhalten genannt. Die Restverformung nach der 24-stündigen Entlastungsphase darf nicht mehr als 1 mm betragen. Die in der Versuchsserie gemessenen Werte können aus Tabelle 4.59 direkt entnommen werden, wobei sich zeigt, dass mit $0,158\text{ mm}$ und $0,450\text{ mm}$ der Grenzwert eingehalten wird.

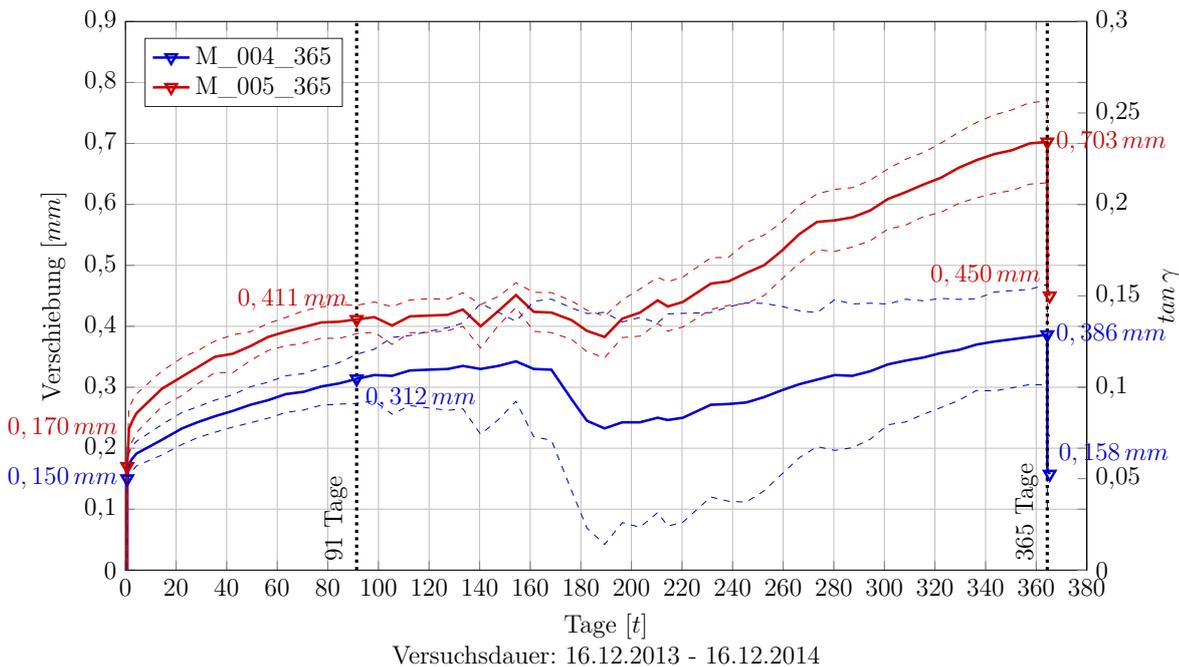


Abb. 4.65.: Gesamtverformung der mittelgroßen Versuchskörper M über 365 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase

Blickt man in Tabelle 4.60, fällt auf, dass die stärker belasteten Probekörper im Ver-

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.59.: Verformungswerte der Serie M in [mm]

Seriennum- mer	nach Belastung w_0	nach 91 Tagen w_{91}	nach 365 Tagen w_{365}	nach Entlastung w_{365+e}	24 h nach Entlastung w_{365+1}
M_004_365	0,150	0,312	0,386	0,166	0,158
M_005_365	0,170	0,411	0,703	0,461	0,450

gleich zur elastischen Anfangsverformung deutlich höheres Kriechen zeigen. Nach 365 Tagen betragen die Kriechverformungen der Probekörper mit $0,05 N/mm^2$ anteilmäßig genau das Doppelte jener mit einer Dauerlast von $0,04 N/mm^2$. Blickt man in Abbildung 4.65, erkennt man zu Beginn der Belastungsgeschichte einen Fortschritt der elastischen Verformungen unter einer Last von $0,05 N/mm^2$ über den Messzeitpunkt hinaus. Die elastischen Verschiebungen waren zum Zeitpunkt der Messung offenbar noch nicht vollständig abgeschlossen. Somit wird dieser Anteil an der Gesamtverformung in Tabelle 4.60 unter-, während jener der Kriechverformungen überschätzt wird. Dies wird auch deutlich, wenn man das Verhältnis der Rückverformung nach Entlastung zur Anfangsverformung betrachtet. Dies fällt mit 147 % beziehungsweise 142 % deutlich höher aus, als bei allen bisherigen Serien. Auch dies deutet darauf hin, dass die Messung der elastischen Anfangsverformung zu früh durchgeführt wurde. Eine Einschränkung der elastischen Eigenschaften des verwendeten Klebstoffs kann über die Versuchsdauer nicht festgestellt werden.

Tab. 4.60.: Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung

Seriennum- mer	w_0	$w_{91}-w_0/w_0$	$w_{365}-w_0/w_0$	$w_{365}-w_{365+e}/w_0$	$w_{365}-w_{365+1}/w_0$
M_004_365	100 %	108 %	157 %	147 %	152 %
M_005_365	100 %	142 %	314 %	142 %	149 %

Die Zunahme der Kriechverformung innerhalb von drei Wochen wird nach [59, 60] auf $0,1 mm$ begrenzt. Die Einhaltung dieses Kriteriums ist in Abbildung 4.66 gezeigt. Bei den Probekörpern mit einer Dauerlast von $0,04 N/mm^2$ beträgt die Zunahme ab Tag 21 weniger als $0,1 mm$. Bei jenen Versuchskörpern unter einer Last von $0,05 N/mm^2$ betragen die Kriechverformungen ab Tag 22 weniger als die geforderten $0,1 mm$. Die Verformungsgrenze wird von beiden Lastniveaus im weiteren Versuchsverlauf durchwegs eingehalten.

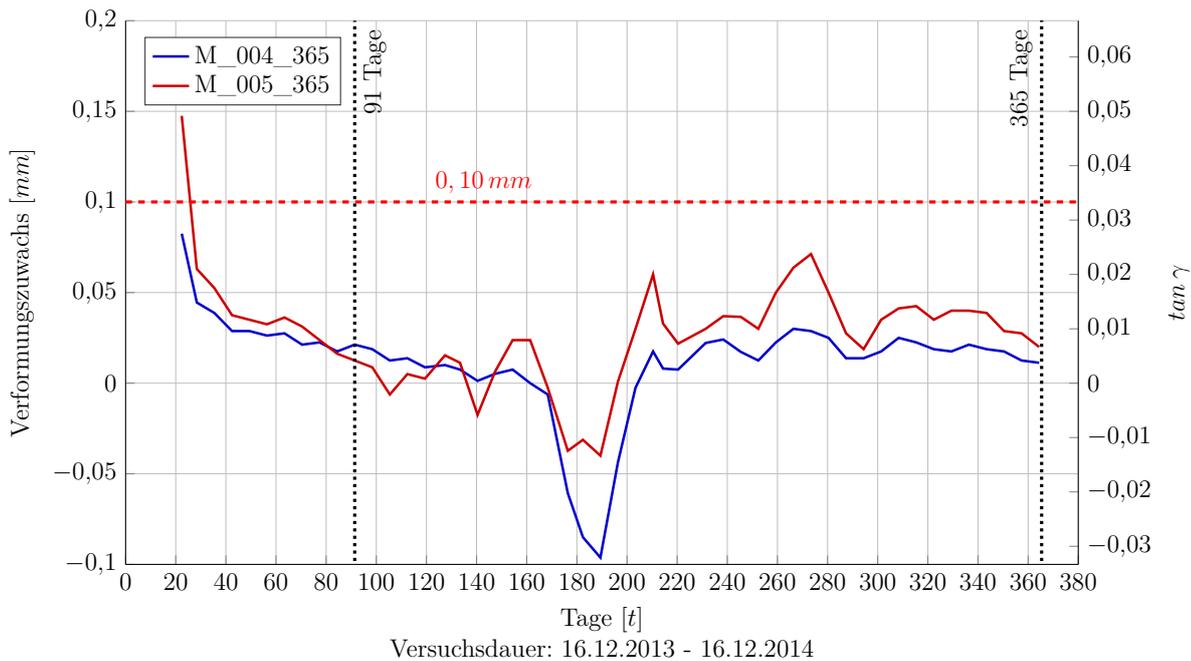


Abb. 4.66.: Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der mittelgroßen Versuchskörper M über 365 Tage mit den Belastungen $0,04$ und $0,05 \text{ N/mm}^2$

Blickt man in Abbildung 4.65 und Abbildung 4.66 auf die Zeit zwischen Tag 170 und 190, wird ein deutlicher Rückgang der Verformungen sichtbar, der sich nicht direkt erklären lässt. Dafür ist ein Blick auf die klimatischen Bedingungen notwendig. Die vorherrschenden Verhältnisse werden in Abbildung 4.67 dargestellt. Die maximale Temperatur während des Dauerlastversuchs betrug $45,85^\circ\text{C}$, die minimale Temperatur $11,10^\circ\text{C}$. Die relative Luftfeuchte schwankte zwischen $16,10\%$ und $84,20\%$. Betrachtet man nun den angesprochenen Zeitraum, erkennt man, dass zirka um Tag 150 die Luftfeuchte deutlich ansteigt, die Koppelleiste nimmt zu diesem Zeitpunkt Feuchtigkeit aus der Luft auf. Die Temperatur ist hingegen entsprechend gering. Dies wird auch durch die ZAMG bestätigt [68], zusätzlich folgt dieser Kälteeinbruch einer wärmeren Phase, wie bereits in Abschnitt 4.3.1.1 erläutert [64]. Nach einer kurzen Abkühlung folgt eine Hitzewelle, vor allem zwischen den Tagen 173 und 179 [69], an welche eine Phase geringer relativer Luftfeuchte anschließt. Das Zusammenspiel all dieser Faktoren wirkt sich auf das Verformungsverhalten der Koppelleiste aus und beeinflusst die Messungen durchaus im Bereich von $0,1 \text{ mm}$ (siehe hierzu Abbildung 4.65). Dies bedingt den starken Verformungsrückgang während der genannten Zeitspanne.

Um den Einfluss der Hitzewelle zu überprüfen, ist es notwendig die Position des Versuchsraums, welcher an drei Seiten an eine Fabrikshalle anschließt und an der vierten

4. Experimentelle Untersuchungen

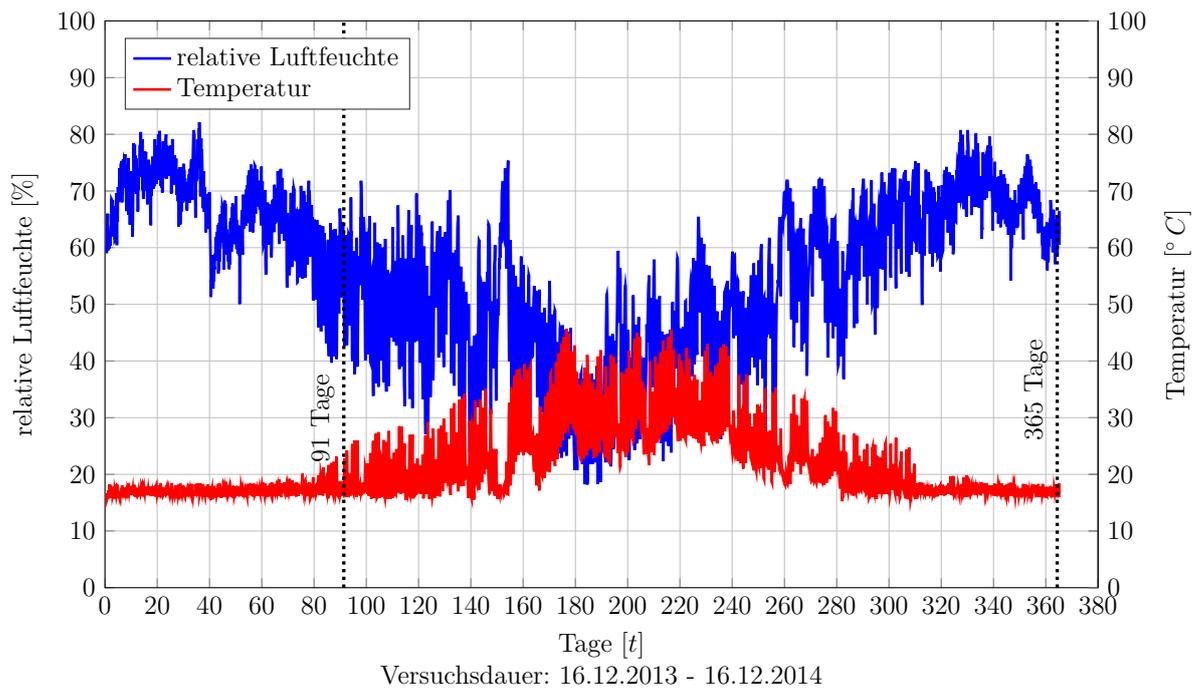


Abb. 4.67.: Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie M

Wand nur durch eine Glasfassade vom Außenraum getrennt ist, zu kennen. Die geographische Orientierung des Raums, welcher zusätzlich ein Glasdach aufweist, ist in Abbildung 4.68 dargestellt. Die Mitteleuropäische Zeit (koordinierte Weltzeit +1 Stunde) (MEZ) wird einheitlich zur Angabe der Sonnenauf- und -untergangszeiten am Versuchsort herangezogen.

Die Boxen, an welchen die mittelgroßen Versuchskörper befestigt waren, wurden gleichmäßig im Raum verteilt, wobei eine Scheibe jeweils in Richtung der Glasfassade ausgerichtet war, während der andere Versuchskörper der Fabrikshalle zugewandt wurde. Die Positionierung der Versuchskörper ist Abbildung 4.69 zu entnehmen. Die Glasfassade bildet die in Abbildung 4.68 ersichtliche nordöstlich gerichtete Begrenzung des Versuchsraums.

Die Versuchsanordnung wurde im Programm Ecotect²⁶ modelliert und die Sonneneinstrahlung simuliert. Zu beachten ist, dass zum Zeitpunkt der Hitzewelle (zwischen den Tagen 173 und 179) die vordere Reihe der Versuchskörper bereits entfernt wurde. Eine Beeinflussung der Boxen durch etwaige Verschattung war aber auch in der Zeit davor nur unwesentlich gegeben, da in der Zeit zwischen Versuchsbeginn am 16.12.2013 und der Demontage der ersten Probekörper nach 91 Tagen am 17.03.2014, wie auch in

²⁶Autodesk® Ecotect® Analysis 2011; © 2010 Autodesk, Inc.

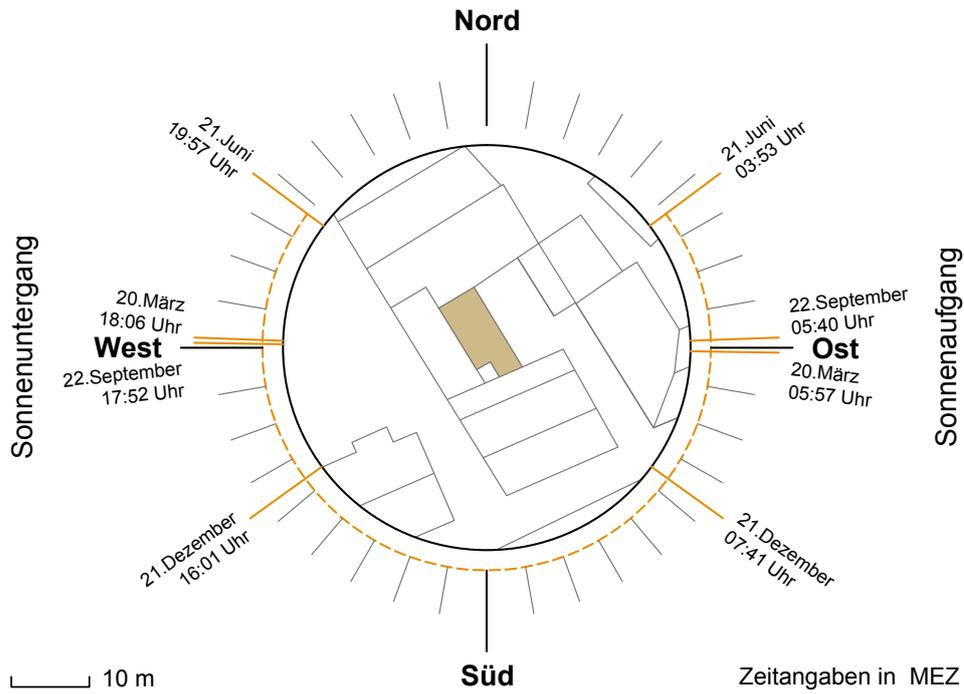


Abb. 4.68.: Lage des Versuchsraums

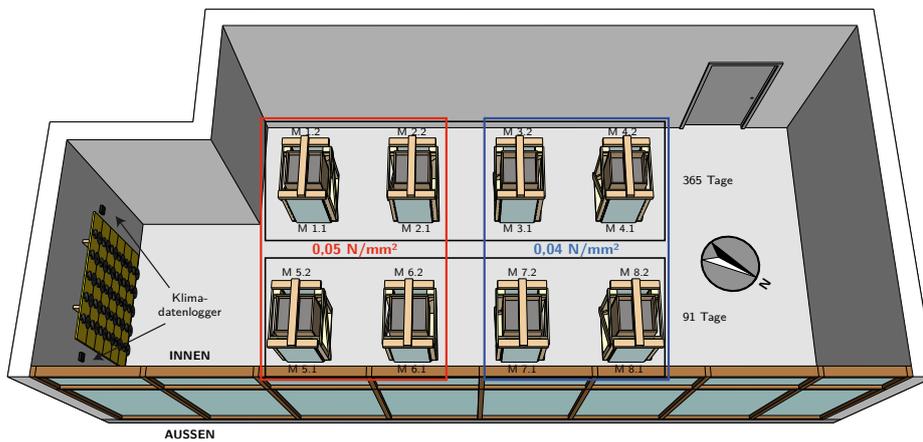


Abb. 4.69.: Positionierung der Probekörper im Versuchsraum

4. Experimentelle Untersuchungen

Abbildung 4.68 ersichtlich, kaum Sonneneinstrahlung aus der relevanten Richtung auftrat. Die Simulation zeigt, dass von jenen Scheiben, welche für 365 Tage unter Dauerlast beobachtet wurden, vor allem zwei starker Einstrahlung ausgesetzt waren, während sich die anderen Scheiben vorwiegend im Schatten befanden. Die in Abbildung 4.70(a) dargestellten Werte stellen die Simulationsergebnisse in 60 cm Höhe des Raumes dar.

Die Ergebnisse aus Abbildung 4.70(a) können auch durch den Jahresschattenverlauf aus Abbildung 4.70(b) bestätigt werden, wo ebenfalls ersichtlich wird, dass die Probekörper, welche im südwestlichen Eck des Versuchsraumes positioniert waren, deutlich weniger direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt waren als jene im nordöstlichen Bereich. Dass die UV-Strahlung für das Verformungsverhalten ausschlaggebend war, kann jedoch ausgeschlossen werden, da in [25] gezeigt wird, dass eine UV-Belastung keinen Einfluss auf das Materialverhalten einer Klebefuge aus Silikon mit sich bringt.

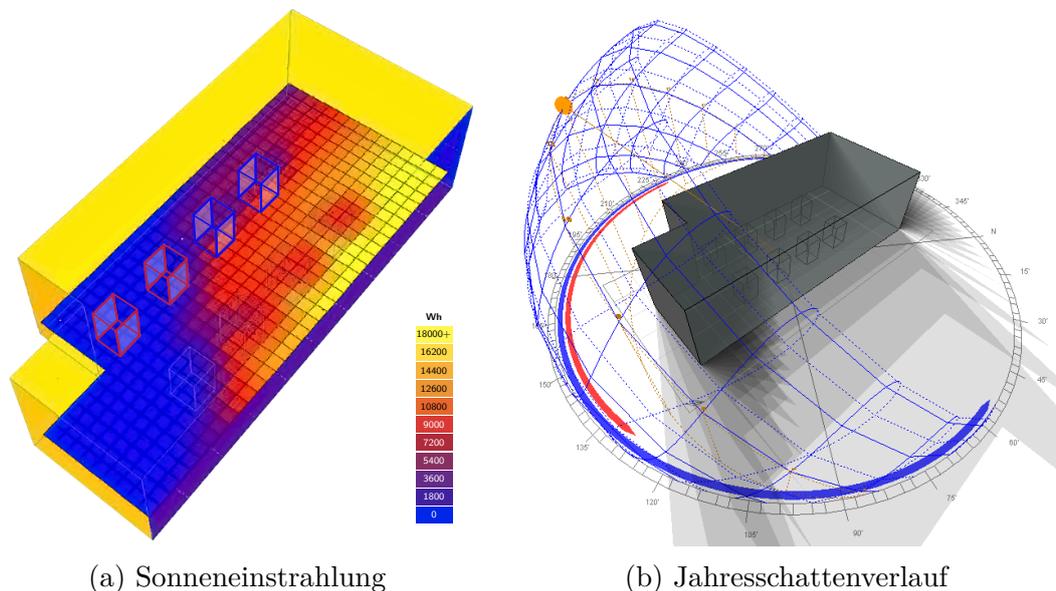


Abb. 4.70.: Solare Einwirkungen im Versuchsraum [8]

In Abbildung 4.71 sind die einzelnen Verformungskurven der acht Versuchskörper, an denen die Verschiebungen unter Dauerlast gemessen wurden, dargestellt. Hervorgehoben sind beim Lastniveau von $0,04 \text{ N/mm}^2$ die Kurven der beiden Probekörper, welche starker Sonneneinstrahlung ausgesetzt waren. Man erkennt deutlich, dass die Rückverformung, welche auch in den Mittelwerten aus Abbildung 4.65 sichtbar ist, vorwiegend aus diesen beiden Probekörpern resultiert. Bereits ab etwa Tag 70 begannen die beiden Probekörper von den anderen abzuweichen. Dies entspricht genau dem Zeitpunkt, an dem sich der Raum nach der Winterperiode wieder zu erwärmen begann. Zum Vergleich sind auch die beiden

Kurven der Scheiben unter einer Dauerlast von $0,05 \text{ N/mm}^2$ hervorgehoben, welche sich im Versuchsraum auf derselben Seite befanden wie jene unter dem Lastniveau von $0,04 \text{ N/mm}^2$, welche die starke Rückverformung aufwiesen. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich diese beiden Scheiben der Serie M_005_365 anders verhielten. Wie in Abbildung 4.70 allerdings zu sehen, waren diese Scheiben kaum Sonneneinstrahlung ausgesetzt und unterscheiden sich somit nur gering von den Scheiben auf den Rückseiten der Boxen. Dennoch erkennt man auch hier, dass die hervorgehobenen Scheiben vor allem in der Endphase des Versuchs ein vergleichbares Verformungsverhalten zeigten, wie sich auch die bloss dargestellten Kurven, welche sich auf der Rückseite der Boxen befinden, in qualitativer Art und Weise stark ähneln.

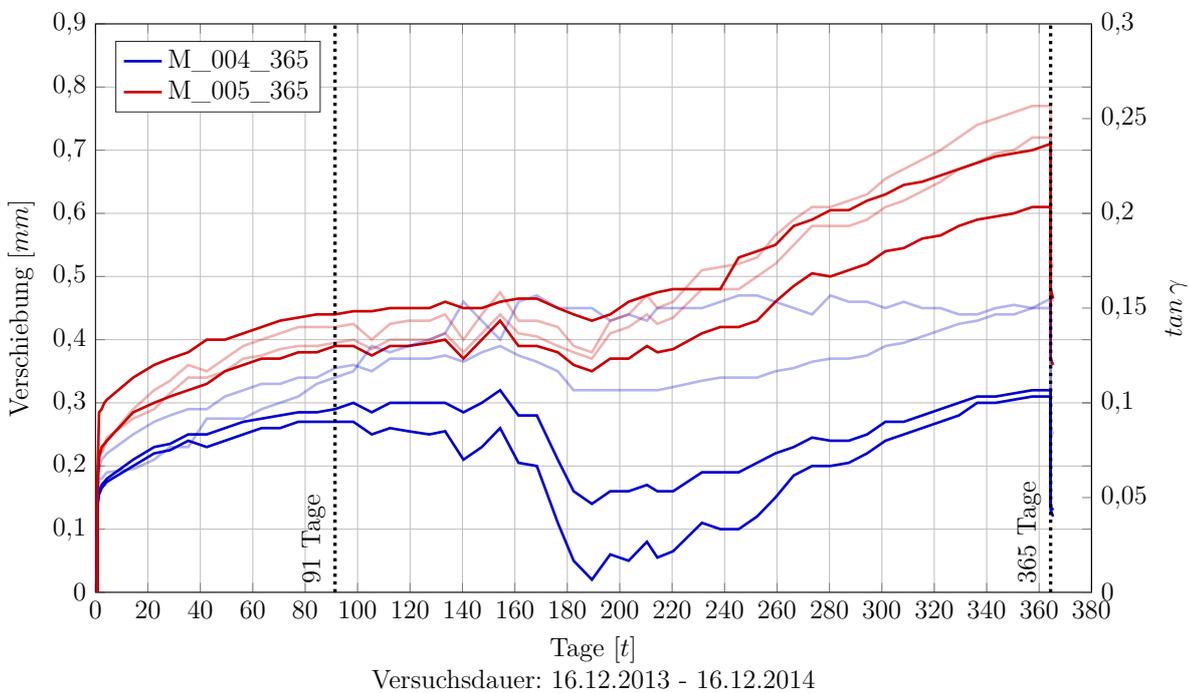


Abb. 4.71.: Gesamtverformung der einzelnen Scheiben der Serie M

Dies erklärt auch, warum die Kleinprobekörper zu diesem Zeitpunkt, bei denselben klimatischen Bedingungen im Versuchsraum, ein gänzlich anderes Verhalten zeigen, siehe Abbildung 4.5. Diese Probekörper befinden sich an der südöstlichen Wand des Versuchsraums, siehe Abbildung 4.69, welche, wie in Abbildung 4.70 ersichtlich, zu keiner Zeit der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist.

4.4.2. Scherversuch

Mit den mittelgroßen Probekörpern wurde nach Abschluss der Dauerbelastung auf dieselbe Art und Weise verfahren, wie mit den Kleinprobekörpern. Sie wurden nach der 24-stündigen Entlastungsphase auf ihre Restschubfestigkeit überprüft. Die zur Überprüfung herangezogenen Probekörper und deren zugehörige Tests sind in Tabelle 4.58 und Abbildung 4.72 aufgelistet. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines beispielhaften Probekörpers der Serie M_004_091 ist in Abbildung 4.73 dargestellt. Das Versagen erfolgt nach kurzfristiger Ankündigung ohne Erhalt jeglicher Resttragfähigkeit. Die Unregelmäßigkeiten zu Beginn der Belastung resultieren bei diesem Versuch aus der Lastaufbringung über zwei Einleitungspunkte und dem Verzicht auf das Aufbringen einer Vorbelastung. Das anfängliche Verhalten spielt keine Rolle in der Auswertung der Versuchsdaten.

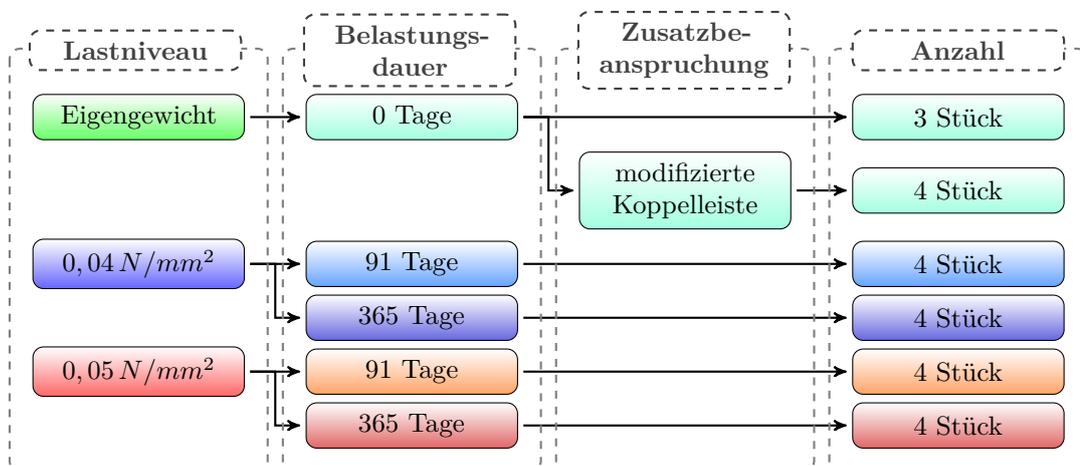


Abb. 4.72.: Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie M

4.4.2.1. Unbelastete mittelgroße Probekörper

Am Beginn der Versuchsserie stand die Überprüfung der Kurzzeitfestigkeit an Probekörpern ohne vorangegangene Beanspruchung. Die Ergebnisse dieser Serie sind in Abbildung 4.74 und Tabelle 4.61 zu sehen. Bei den drei überprüften mittelgroßen Scheiben zeigt sich gegenüber den Kleinprobekörpern (vergleiche zum Beispiel Tabelle 4.12) eine deutlich geringere mittlere Schubfestigkeit. Zu erkennen war, dass bei allen Scheiben ein asymmetrischer Bruch erfolgte, was auf die bei der gezahnten Koppelleiste angewandte asymmetrischen Verschraubung zurückgeführt werden kann, siehe Abbildung 4.64. Der Bruch ging in allen Fällen von einer Seite aus, an der die Klebefuge zuerst versagte, was

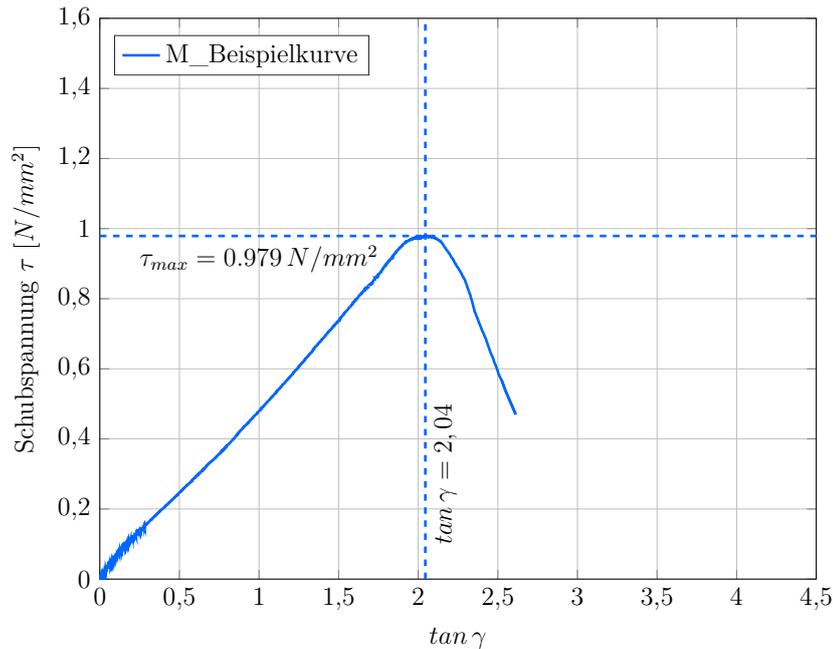


Abb. 4.73.: Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie M_004_091

einen sofortigen Bruch der anderen Seite nach sich zog. Die Streuung der Versuchskörper entspricht den erwarteten Werten, die Steifigkeit liegt deutlich über den meisten Serien der Kleinprobekörper.

Tab. 4.61.: Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung (M_000_000)

Ergebnisse der Versuchsreihe M_000_000	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 3$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,870 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,092 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,105$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(1)} = 0,562 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 1,85$
Schubmodul	$G = 0,470 \text{ N/mm}^2$

Aufgrund der Beobachtungen bei der Serie M_000_000 wurden weitere Scheiben angefertigt, bei denen auf die gezahnte Koppelleiste verzichtet wurde und somit eine symmetrische Verschraubung möglich war, siehe Abbildung 4.63. Die restliche Versuchsanordnung war identisch zu jener der ursprünglichen Serie. Es werden jedoch deutlich

4. Experimentelle Untersuchungen

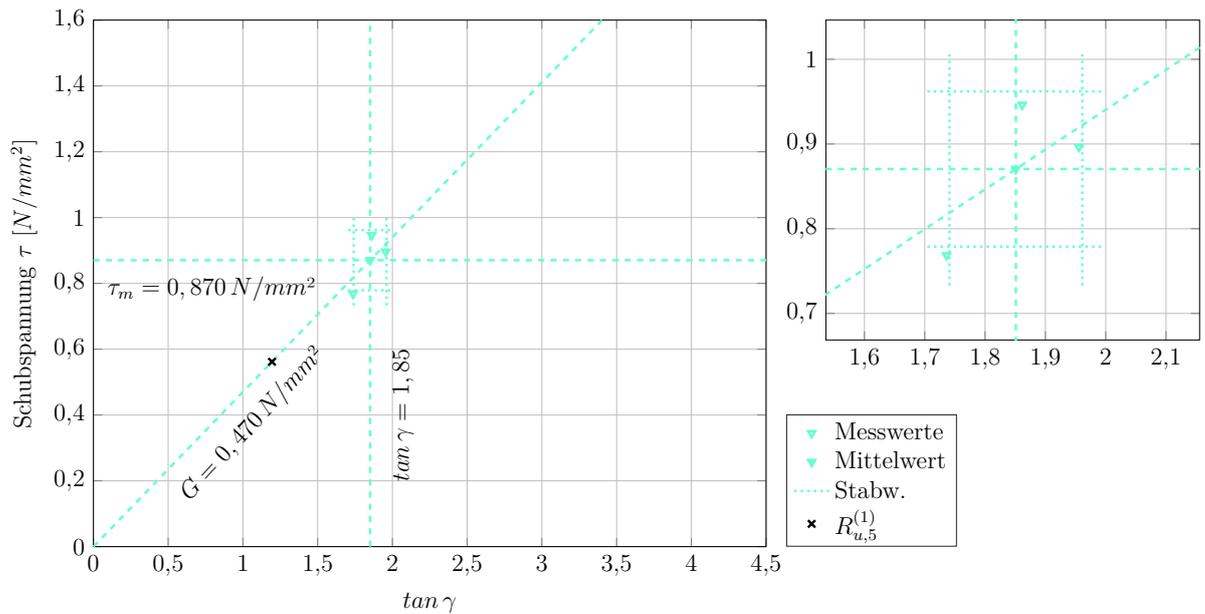


Abb. 4.74.: Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung (M_000_000)

höhere Festigkeitswerte erzielt, siehe Abbildung 4.75 und Tabelle 4.62. Die Ergebnisse liegen auch weit über den Werten, welche bei den Kleinprobekörpern erreicht wurden. Ebenso stieg die Steifigkeit weiter an.

Tab. 4.62.: Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung mit nicht gezahnter Koppelleiste (M_000_000_mod)

Ergebnisse der Versuchsreihe M_000_000_mod	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,392 N/mm^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,122 N/mm^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,088$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(1)} = 1,071 N/mm^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,61$
Schubmodul	$G = 0,533 N/mm^2$

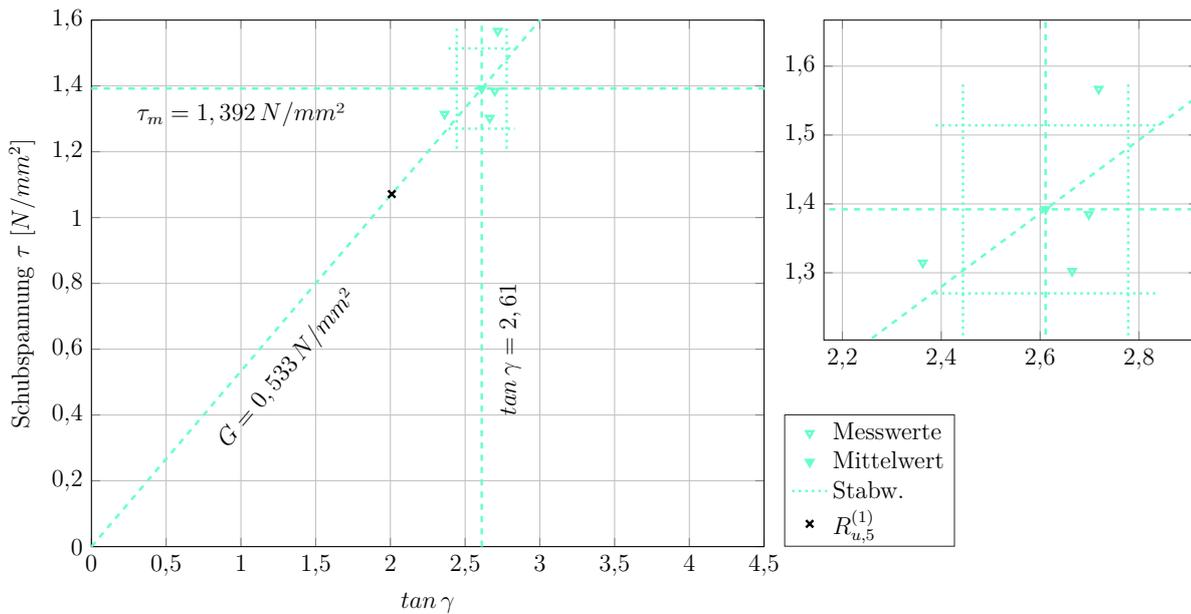


Abb. 4.75.: Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung mit nicht gezahnter Koppelleiste (M_000_000_mod)

4.4.2.2. Mittelgroße Probekörper mit einer Vorbelastung von 0,04 N/mm²

Nach 91 Tagen wurden die ersten mittelgroßen Probekörper entlastet und nach einer 24-stündigen Erholungsphase auf deren Restscherfestigkeit überprüft. Alle Probekörper, an denen Langzeituntersuchungen durchgeführt wurden, waren mit der gezahnten Koppelleiste verklebt. Auch hier war zu erkennen, dass das Versagen von jeweils einer Seite der Verklebung initiiert wurde. Im Gegensatz zu Serie M_000_000 wurden dennoch Festigkeiten im üblichen Bereich von etwa $1,0 \text{ N/mm}^2$ erzielt. Die Steifigkeit liegt auch bei diesen Versuchen über jenen der Kleinprobekörper, aber im Bereich der anderen mittelgroßen Versuchskörper, siehe Abbildung 4.76 und Tabelle 4.63.

Nach 365 Tagen wurden weitere vier Probekörper entlastet. Die Kriechverformungen unter Dauerlast dieser Probekörper sind in Abbildung 4.65 zu sehen. Die Versuchsergebnisse der anschließenden Kurzzeitbelastung bis zum Bruch, siehe Abbildung 4.77 und Tabelle 4.64, zeigen keinerlei signifikanten Unterschied zu den Ergebnissen der mittelgroßen Versuchskörper, welche für eine kürzere Dauer belastet wurden.

4. Experimentelle Untersuchungen

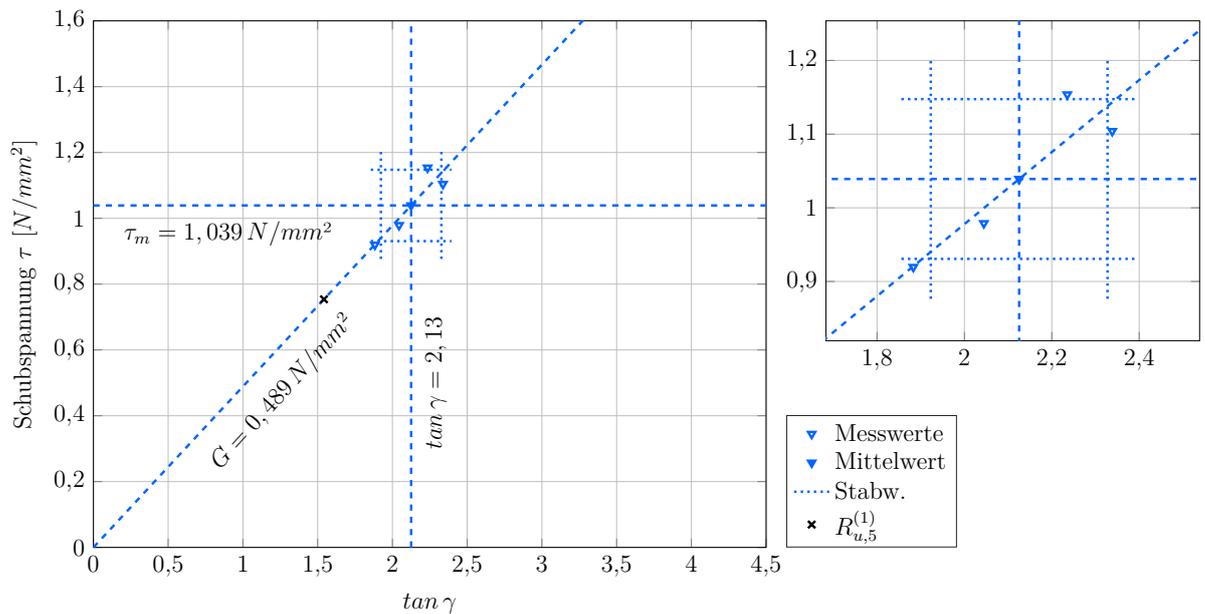


Abb. 4.76.: Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (M_004_091)

Tab. 4.63.: Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,04 \text{ N/mm}^2$ (M_004_091)

Ergebnisse der Versuchsreihe M_004_091	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,039 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,108 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,104$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(1)} = 0,754 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitmaß	$\tan \gamma = 2,13$
Schubmodul	$G = 0,489 \text{ N/mm}^2$

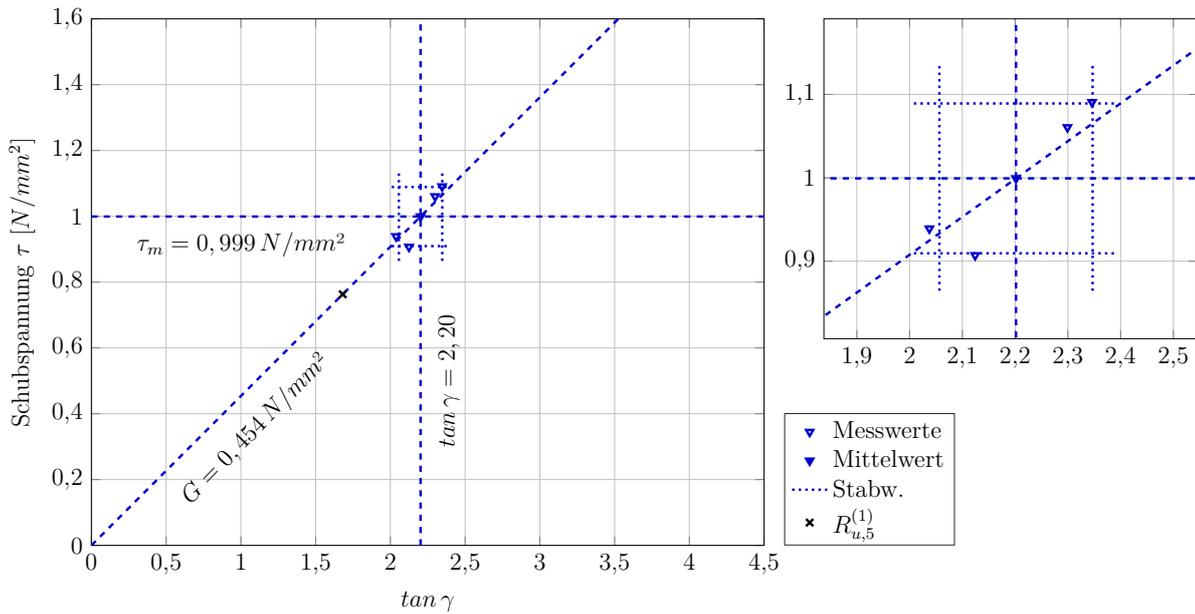


Abb. 4.77.: Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (M_004_365)

Tab. 4.64.: Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (M_004_365)

Ergebnisse der Versuchsreihe M_004_365	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,999 N/mm^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,090 N/mm^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,090$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(1)} = 0,763 N/mm^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,20$
Schubmodul	$G = 0,454 N/mm^2$

4.4.2.3. Mittelgroße Probekörper mit einer Vorbelastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$

Auch bei mittelgroßen Probekörpern mit einer Dauerbeanspruchung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ wurden vier Scheiben nach 91 Tagen entlastet und anschließend auf deren Schubfestigkeit unter Kurzzeitbeanspruchung überprüft, siehe Abbildung 4.78 und Tabelle 4.65. Die Streuung fällt bei dieser Serie etwas größer aus, als bei den meisten anderen Versuchen, die restlichen Ergebnisse bestätigen aber die bereits erkannten Tendenzen einer ähnlichen Schubfestigkeit wie bei den Kleinprobekörpern bei geringerer Verformung und somit größerer Steifigkeit.

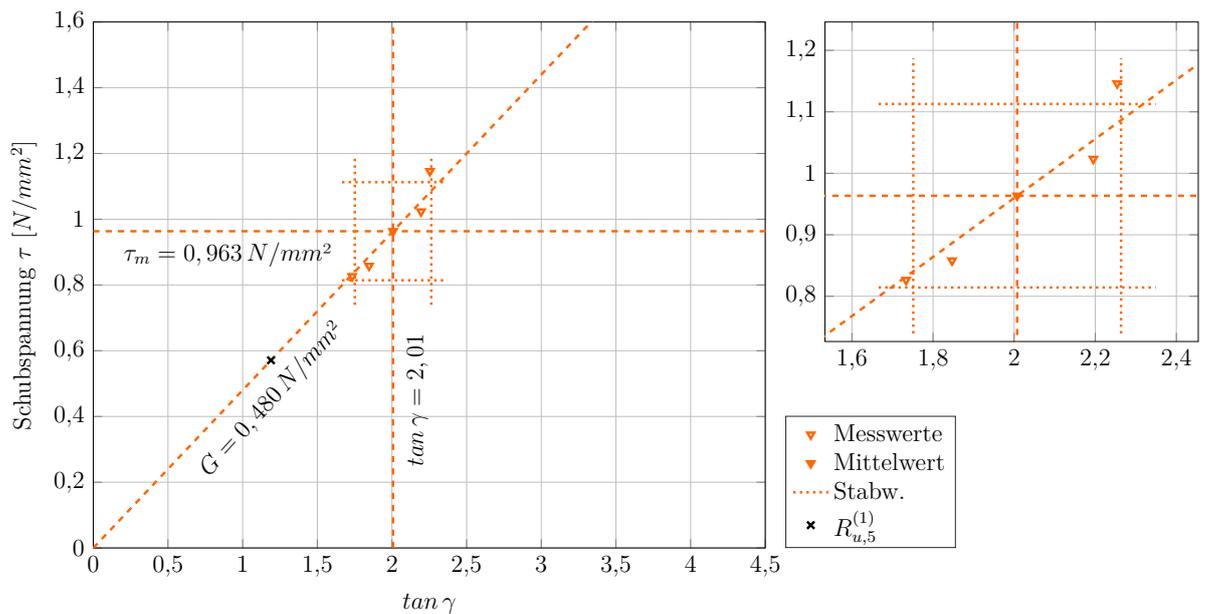


Abb. 4.78.: Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (M_005_091)

Nach 365 Tagen wurden weitere vier Scheiben entlastet. Die Verformungen dieser Probekörper unter Dauerlast sind in Abbildung 4.65 dargestellt. Die Kurzzeittests wurden wiederum nach einer Erholungsphase von 24 Stunden durchgeführt. Die dabei erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 4.79 und Tabelle 4.66 dargestellt. Auch hier zeigt sich durch die längere Beanspruchung mit einer Belastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ keine Beeinflussung der Festigkeitswerte.

Tab. 4.65.: Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (M_005_091)

Ergebnisse der Versuchsreihe M_005_091	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,963 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,149 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,155$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(1)} = 0,571 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,01$
Schubmodul	$G = 0,480 \text{ N/mm}^2$

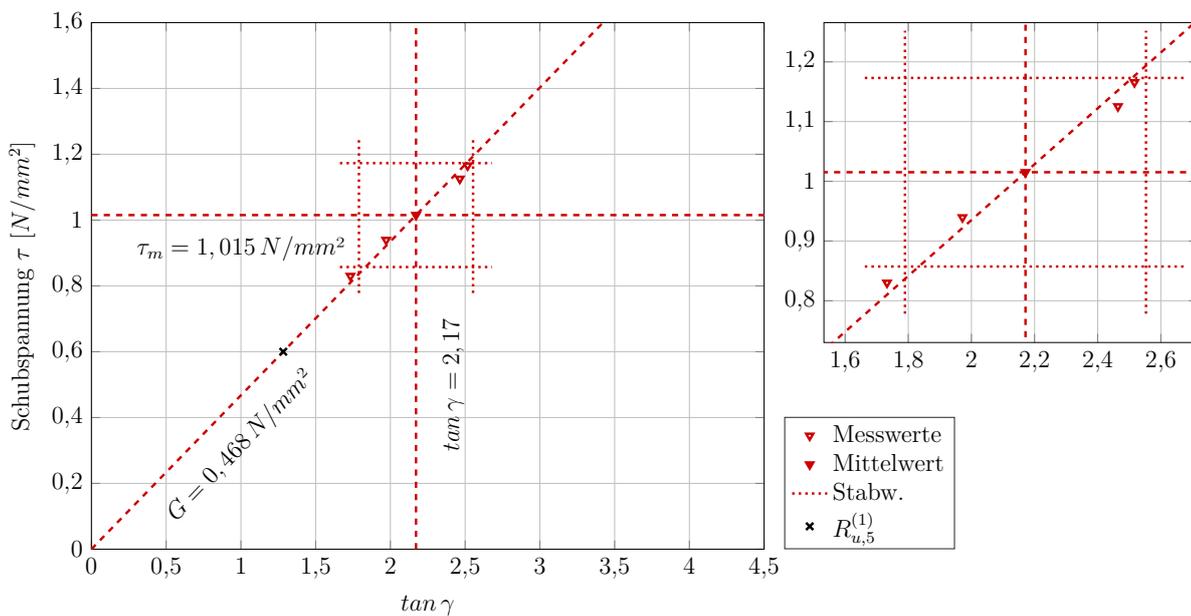


Abb. 4.79.: Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (M_005_365)

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.66.: Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,05 \text{ N/mm}^2$ (M_005_365)

Ergebnisse der Versuchsreihe M_005_365	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,015 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,158 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,156$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(1)} = 0,600 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit	$R_{u,5}^{(2)} = -$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,17$
Schubmodul	$G = 0,468 \text{ N/mm}^2$

4.4.3. Resümee

Die äußeren Einwirkungen zeigen große Auswirkungen auf das Kriechverhalten der Probekörper, beziehungsweise auf die Messungen der Verformungen. Wie in Tabelle 4.67 ersichtlich, werden wie bei den anderen Serien alle Kriterien, ausgenommen der Restverformung nach [2, 40], erfüllt. Wie in Abschnitt 4.4.1 erläutert, hat die Sonneneinstrahlung großen Einfluss auf das Verformungsverhalten der Probekörper. Dabei ist nicht die UV-Belastung der Klebefuge ausschlaggebend [25], sondern das Sorptionsverhalten der BFU-Koppelleiste. Die Sonneneinstrahlung wirkt sich durch die Trocknung der Koppelleisten durchwegs positiv auf die Gesamtverformung des Systems aus. Da in realen Bauwerken die Koppelleiste selbst nur selten direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sein wird, haben diese Einflüsse kaum Relevanz im Bauwesen. Das Schwind- und Quellverhalten der Koppelleiste an sich bedarf aber durchaus besonderer Aufmerksamkeit.

Tab. 4.67.: Übersicht der Nachweise der Serie M

Nachweis	Grenzwert	M_004	M_005
Verformungszunahme innerhalb von 21 Tagen [59, 60]	$< 0,10 \text{ mm}$	✓	✓
Maximalverschiebung nach 91 Tagen [40]	$< 1,00 \text{ mm}$	✓	✓
Restverformung nach Erholungsphase [59, 60]	$< 1,00 \text{ mm}$	✓	✓
Restverformung nach Erholungsphase [2, 40]	$< 0,10 \text{ mm}$	✗	✗
Restschubfestigkeit [2, 40]	$> 75 \%$	✓	✓
Kohäsiver Bruch der Klebefuge [2, 40]	$> 90 \%$	✓	✓

Bezüglich der Festigkeit haben sich bei den mittelgroßen Probekörpern einige Unregelmäßigkeiten ergeben, die aber dem komplizierteren Versuchsaufbau des Kurzzeitversuchs gegenüber jenem der Kleinprobekörper zugeschrieben werden können. Die geringe mittlere

Schubfestigkeit der Serie M_000_000, bei der ursprünglich die asymmetrische Verschraubung als Ursache vermutet wurde, konnte durch die weiteren Versuche mit gezahnter Koppelleiste nicht bestätigt werden, siehe Abbildung 4.80.

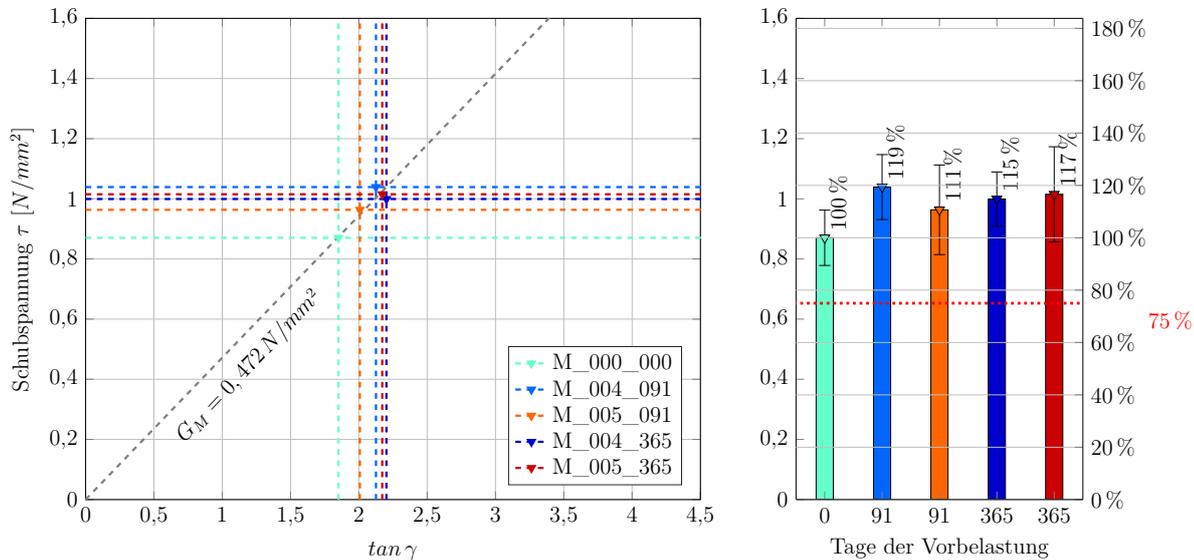


Abb. 4.80.: Schubfestigkeiten der mittelgroßen Versuchskörper aus Serie M mit unterschiedlichen Lastgeschichten

Überraschend sind die überaus hohen Festigkeitswerte der Versuche mit symmetrischer Verschraubung, vergleiche Abbildung 4.75 und Tabelle 4.62. Da diese abweichend von den übrigen mittelgroßen Versuchskörpern zu einer anderen Zeit hergestellt und geprüft wurden, aber auch die weiteren Versuche mit gezahnter Koppelleiste keine Auffälligkeiten zeigten, wird die modifizierte Versuchsserie M_000_000_mod zu keinem weiteren Vergleich herangezogen. Gemein haben alle Untersuchungen an mittelgroßen Probekörpern die hohe Steifigkeit.

Die gesammelten Ergebnisse sind im Vergleich zur Serie S1 in Tabelle 4.68 aufgelistet, wobei die Serie M_000_000_mod nicht in die Zusammenfassung aufgenommen wurde, um eine einheitliche Auswertung zu gewährleisten.

4. Experimentelle Untersuchungen

Tab. 4.68.: Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern der Serie M mit unterschiedlichen Lastgeschichten im Vergleich zu Serie S1

Ergebnisse der Versuchsreihe	M	S1
Anzahl der Prüfkörper	$n = 19$	91
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,983 \text{ N/mm}^2$	$1,078 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,124 \text{ N/mm}^2$	$0,132 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,126$	0,123
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,766 \text{ N/mm}^2$	$0,860 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,742 \text{ N/mm}^2$	$0,860 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,08$	2,85
Schubmodul	$G = 0,472 \text{ N/mm}^2$	$0,378 \text{ N/mm}^2$

4.5. Zusammenfassung der Serien

Die durchgeführten Versuche zeigen bei den gewählten Versuchsaufbauten eine starke Abhängigkeit von den äußeren Einwirkungen. Während die gemessenen Verschiebungen der Kleinprobekörper neben dem Belastungsniveau hauptsächlich von der relativen Luftfeuchte und der Temperatur abhängig waren, kam bei den mittelgroßen Versuchskörpern die Sonneneinstrahlung als zusätzlicher Parameter hinzu. Die Auswirkungen konnten durch kontinuierliche Messung beziehungsweise Simulation nachvollzogen werden. Zwischen den mittelgroßen und kleinen Probekörpern wurden geringe Unterschiede im Verhalten unter Dauerlast festgestellt, es zeigt sich aber bei keiner Serie ein signifikanter Festigkeitsverlust über die Versuchsdauer, unabhängig von Lastniveau und Probekörpergröße. Bei allen Versuchsserien werden die erforderlichen Nachweise erfüllt, ausgenommen der Restverformung nach 24-stündiger Ruhephase gemäß [2, 40]. Die Gründe dafür wurden in den vorangegangenen Abschnitten bereits ausreichend erläutert. Der Unterschied in den gemessenen Festigkeitswerten zwischen kleinen und mittelgroßen Probekörpern ist gering, somit kann auf keinen Größeneffekt geschlossen werden. Bei den Kurzzeitprüfungen der Kleinprobekörper konnten dennoch Spannungsspitzen beobachtet werden, welche im Abschnitt 5.2 detaillierter behandelt werden.

Es kann somit nach Durchführung umfangreicher experimenteller Untersuchungen festgehalten werden, dass der verwendete Klebstoff durchaus in der Lage ist, Dauerlasten abzutragen und eine ausreichende Festigkeit über die gesamte Lebensdauer zu gewährleisten. Da keine Art der Vorbelastung einen offensichtlichen Einfluss auf die Kurzzeitfestigkeit hat, können die Ergebnisse der Serien S1, S2, S3 und M, ausgenommen der Versuche mit modifizierter Koppelleiste, zu den Kennwerten aus Tabelle 4.69

zusammengefasst werden.

Tab. 4.69.: Auswertung der Schubversuche an Kleinproben und mittelgroßen Versuchskörpern mit unterschiedlichster Vorbelastung

Ergebnisse der Versuchsreihe S1, S2, S3 und M	
Anzahl der Prüfkörper	$n = 168$
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,035 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,163 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,157$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,768 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,768 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,67$
Schubmodul	$G = 0,388 \text{ N/mm}^2$

Diese Zusammenfassung, trotz der unterschiedlichen Lastgeschichten, ist notwendig, da auch an realen Bauwerken eine entsprechende Kurzzeitfestigkeit am Ende der Lebensdauer gewährleistet werden muss. Durch die unterschiedlichen Vorbelastungen und der großen Anzahl von 168 Probekörpern wird eine statistisch repräsentative Aussage getroffen. Vergleicht man die Ergebnisse mit den Werten aus der AbZ [45], ergibt sich in Tabelle 4.69 eine leicht geringerer 5%-Quantile der Schubfestigkeit längs zur Klebefuge, die in [45] mit $0,814 \text{ N/mm}^2$ angegeben wird. Andererseits zeigt sich leicht steiferes Materialverhalten, da [45] einen Schubmodul G von $0,37 \text{ N/mm}^2$ vorschlägt. Im Großen und Ganzen sind die Differenzen allerdings marginal, die Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungen stimmen sehr gut überein.

Dadurch, dass die Versuche nicht in stabilem Laborklima durchgeführt wurden, kann das Verhalten an realen Bauten gut nachvollzogen werden. Um die Ergebnisse zu verifizieren, ist ein Monitoring einer verbauten HGV-Fassade notwendig. Dies wurde an einem firmeneigenen Gebäude der Firma Otto-Chemie realisiert [70]. Die Messungen sollen über Jahre hinweg durchgeführt werden, um das tatsächliche Materialverhalten verklebter Fassadenelemente genau nachvollziehen zu können. Eine Auswertung des ersten Jahres unter Belastung findet sich in einer Projektarbeit der TU Wien [71] und einem Forschungsbericht des ift-Rosenheim [72], worauf in Abschnitt 6.4 genauer eingegangen werden soll.

5. Analyse des Kriech- und Bruchverhaltens

In Abschnitt 3 wurden das viskoelastische Materialverhalten und seine Besonderheiten grundlegend beschrieben. Nun soll versucht werden, die in Abschnitt 4 erhaltenen Kriechkurven durch rheologische Modelle zu simulieren, um eine Vorhersage über weitere Verformungen unter Dauerlast treffen zu können. In weiterer Folge soll das Bruchverhalten der Kleinprobekörper genauer untersucht werden. Durch die gewählte Versuchsanordnung erfährt die Klebefuge eine Momentenbeanspruchung, die eine zusätzliche Belastung zur Schubbeanspruchung hervorruft. Dadurch kann bei der Scherprüfung nicht von reinem Schubversagen ausgegangen werden. Dieser Aspekt soll in Abschnitt 5.2 genauer betrachtet werden. Erste Ansätze zu diesen Untersuchungen wurden bereits in [73] vorgestellt.

5.1. Rheologische Untersuchungen des Kriechverhaltens

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erläutert, eignet sich das verallgemeinerte Modell nach Kelvin-Voigt am besten zur Simulation des Kriechverhaltens. Dieses Modell bietet den Vorteil, dass sowohl eine Anfangsverformung, welche durch eine Feder erreicht wird, als auch die zeitabhängige Verformungen, durch eine Aneinanderreihung Kelvin-Voigt'scher Körper, simuliert werden kann. Die Feder und die Kelvin-Voigt'schen Körper sind in Serie geschaltet, wobei ein Kelvin-Voigt-Körper aus einer Feder und einem parallel angeordnetem Dämpfer besteht. Die Anzahl der Kelvin-Voigt'schen Körper m wurde zwischen eins und vier variiert, da eine zu große Anzahl zwar im Allgemeinen zu einer besseren Nachbildung der Messergebnisse führt, aber auch auf einzelne Abweichungen reagiert und somit nicht zwingend eine bessere Vorhersage für das durchschnittliche weitere Verhalten darstellen muss. Die Simulation wurde mit Hilfe des Programms MATLAB® ²⁷ durchgeführt und anhand der Residuenquadratsumme RSS , des Bestimmtheitsmaßes R^2 , des korrigierten Bestimmtheitsmaßes \bar{R}^2 und der Wurzel des mittleren quadratischen

²⁷The MathWorks GmbH, Adalperstraße 45, 85737 Ismaning, Deutschland

5. Analyse des Kriech- und Bruchverhaltens

Fehlers $RMSE$ beurteilt. Die vollständige Auswertung der einzelnen Serien mit allen Parametern E_0 bis E_4 und λ_1 bis λ_4 in Abhängigkeit von der Anzahl m der Kelvin-Voigt'schen Körper ist in Anhang A.2 beigelegt. Obwohl in diesem konkreten Fall mit dem vorliegenden Modell Schubverformungen abgebildet werden, wird in den relevanten Tabellen im Sinne einer konsistenten Darstellung an der Bezeichnung E anstelle von G für elastische Verformungen festgehalten.

In Tabelle 5.1 sind die Modelle mit dem höchsten korrigierten Bestimmtheitsmaß \bar{R}^2 angeführt. Es ist zu erkennen, dass in den meisten Fällen bereits die Simulation mit zwei Kelvin-Voigt'schen Körpern maßgebend wird. Mit Hilfe des Modells wird versucht, eine Aussage über die Verschiebung zwischen Koppelleiste und Glasscheibe nach 25 Jahren Dauerbelastung zu treffen.

Tab. 5.1.: Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt aller Serien mit unterschiedlichen Dauerbelastungen und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in [mm]

Last-niveau	S1		S2		S3		L	M
	0,04 N/mm^2	0,05 N/mm^2	0,05 N/mm^2	0,05 N/mm^2	0,06 N/mm^2	0,04 N/mm^2	0,04 N/mm^2	0,05 N/mm^2
E_0	84,680	610,00	33,555	515,00	1764,6	1177,2	990,00	121,30
E_1	0,20412	0,78100	0,03318	0,11195	0,15708	0,19396	0,27892	0,17085
λ_1	0,67980	3,9370	715,00	139,60	72,220	0,95410	32,020	1,7100
E_2	0,10512	0,17955	0,30415	0,21420	0,16260	0,50120	0,23544	0,00167
λ_2	448,20	335,80	0,41450	0,75220	0,72450	36,690	0,89840	30570
E_3	1,4680	0,21095						
λ_3	3,2800	0,65730						
E_4	0,22704	0,22450						
λ_4	46,130	63,990						
RSS	0,05647	0,07371	0,04368	0,02021	0,05226	0,01400	0,08793	0,10420
R^2	0,96240	0,96140	0,94780	0,93530	0,91330	0,84890	0,66100	0,90620
\bar{R}^2	0,95930	0,95830	0,94301	0,92900	0,90490	0,83120	0,63490	0,89900
$RMSE$	0,02413	0,02757	0,03151	0,02220	0,03570	0,02030	0,04112	0,04477
365 Tage	0,612	0,708	0,768	0,647	0,749	0,286	0,313	0,650
25 Jahre	0,780	0,802	1,673	0,680	0,751	0,286	0,313	8,047

Betrachtet man die Ergebnisse aus Tabelle 5.1 genauer, erkennt man schnell, dass das angewandte Modell nicht für alle Versuchsreihen ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß \bar{R}^2 größer als 0,9 liefert. Für diese Serien ist das verallgemeinerte Modell nach Kelvin-Voigt gemäß Gleichung 3.19 nicht gut geeignet. Dies ist vor allem bei den Serien L und M

mit einem Dauerlastniveau von $0,04 \text{ N/mm}^2$ der Fall. Die Gründe dafür liegen auf der Hand. Während sich bei den L-förmigen Kleinprobekörpern, wie bereits in Abschnitt 4.3.4.1 beschrieben, kaum Kriechverformungen ausbilden, die im angewandten Modell allerdings eine wesentliche Rolle spielen, findet bei der Serie M_004 die in Abschnitt 4.4.1 beschriebene Rückverformung zufolge solarer Einstrahlung statt. Beide Serien weisen Besonderheiten auf, die im verallgemeinerten Modell nach Kelvin-Voigt nicht mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden können, und werden in weiterer Folge nicht weiter berücksichtigt.

Sehr gut geeignet ist das Modell wiederum für die gesamte Serie S1. Die tatsächlichen Verformungen sowie die nach Gleichung 3.19 berechneten, sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Es zeigt sich über die gesamte Versuchsdauer eine gute Übereinstimmung.

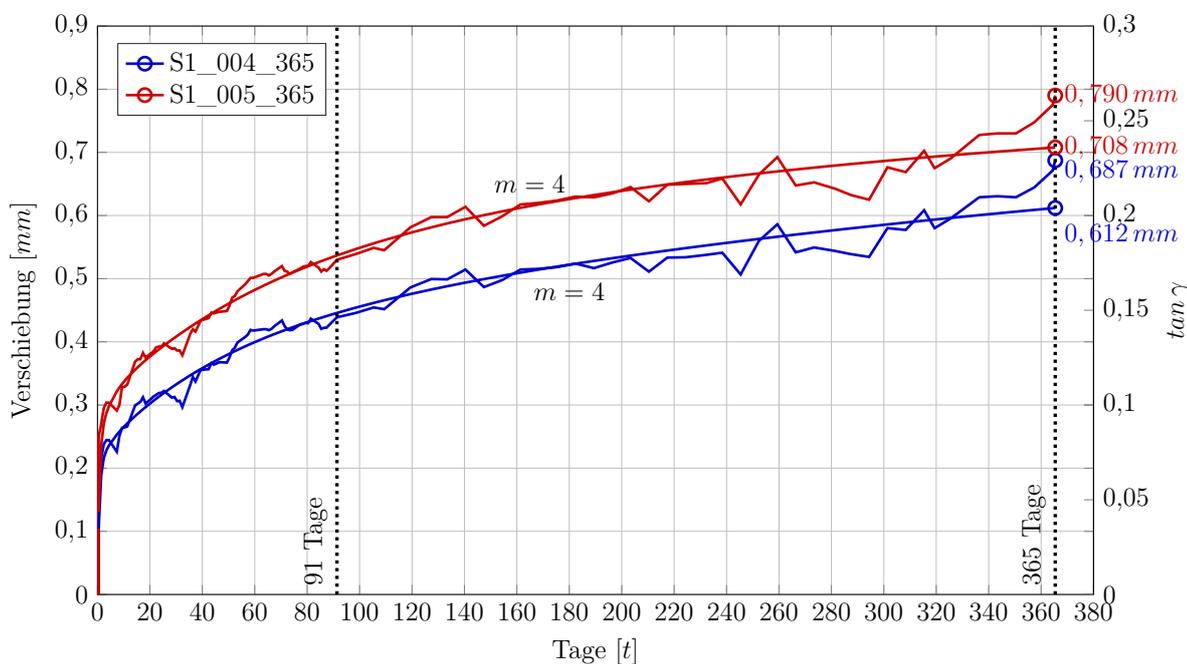


Abb. 5.1.: Gesamtverformung der Kleinproben S1 über 365 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und die Simulation mit Hilfe des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt

In Abbildung 5.2 sind die simulierten Verformungskurven der Serien S1_004 und S1_005 über die von der ETAG 002-1 [2] vorgesehene Lebensdauer von 25 Jahren ($\equiv 9125$ Tage) dargestellt. Vergleicht man das Verhältnis des beobachteten Zeitraums zum Ausmaß des simulierten Bereichs, wird deutlich, dass die Modellierung nur eine vage Voraussage des tatsächlichen Verhaltens darstellt. Dies verdeutlicht abermals die Wichtigkeit eines langfristigen Monitorings einer realen Fassade, wie dies in [70] vorgeschlagen wird.

5. Analyse des Kriech- und Bruchverhaltens

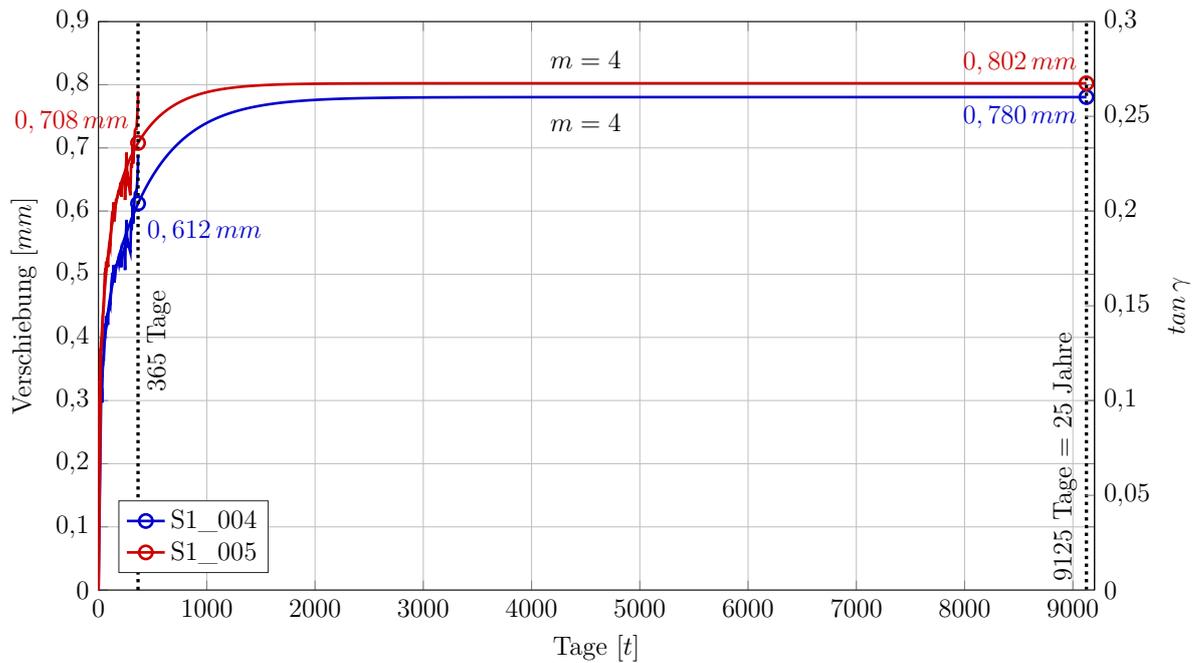


Abb. 5.2.: Simulation der Kleinproben S1 über 25 Jahre mit unterschiedlichen Belastungen mit Hilfe des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt

Bei manchen Serien divergieren die Vorhersagen abhängig von der Anzahl der Kelvin-Voigt'schen Körper sehr stark. Ein Beispiel dafür sind die Serien S2_005 (Tabelle A.3) und M_005 (Tabelle A.8), wobei die Divergenz bei den mittelgroßen Versuchskörpern deutlich stärker ausgeprägt ist. Bei dieser Serie wird mit zwei Modellkörpern ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von $\bar{R}^2 = 0,8990$ und mit drei ein Wert von $\bar{R}^2 = 0,8469$ erreicht. Dieser auf den ersten Blick geringe Unterschied, ergibt in der Vorhersage der Verschiebung zwischen Koppelleiste und Glasscheibe nach 25 Jahren eine Differenz von etwa $7,2\text{ mm}$. Die beiden Varianten sind in Abbildung 5.3 zum Vergleich dargestellt.

Dieser Fall zeigt, dass nicht zwingend die Simulation mit dem größten Bestimmtheitsmaß \bar{R}^2 auch die logische Vorhersage des weiteren Verformungsverlaufs darstellen muss. Dafür ist der Unterschied in der Bestimmtheit der einzelnen Modelle zu gering. Im Vergleich zu den anderen Serien kann aber davon ausgegangen werden, dass sich die Kriechverformungen der Serie M_005 nicht linear fortsetzen, sondern mit Fortschritt der Zeit ebenfalls abklingen werden. Man sieht jedoch gut, wie riskant eine Vorhersage des weiteren Verhaltens der Klebefuge auf Basis der relativ geringen Messdaten von nur einem Jahr ist.

Über die Berechnungsergebnisse der Serie M_005 nach Tabelle 5.1 kann nach Vergleichen mit den anderen Modellen dieser Serie aus Tabelle A.8 und den Simulationen der

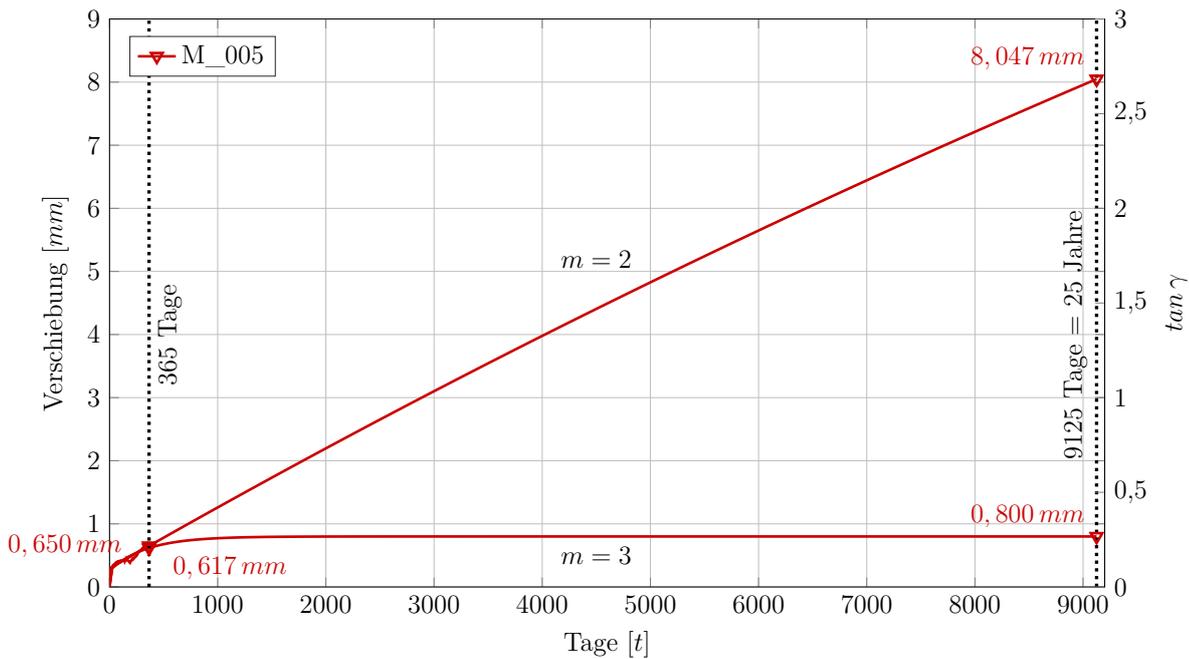


Abb. 5.3.: Simulation der Kleinproben M über 25 Jahre mit unterschiedlichen Belastungen mit Hilfe des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt mit $m = 2$ beziehungsweise $m = 3$

anderen Serien aus den dargestellten Erläuterungen hinweggesehen werden. Grundsätzlich stellen auch die Modellierungen mit nur einem Kelvin-Voigt'schen Körper aus den in Abschnitt 3.2 erklärten Gründen keine gute Näherung dar. Somit liegen die ermittelten und als sinnvoll erachteten Ergebnisse der Verformung nach 25 Jahren unabhängig vom Belastungsniveau und nach Ausschluss der Serien L_004, M_004 und M_005 zwischen $0,680\text{ mm}$ und $1,673\text{ mm}$. Der obere Grenzwert stammt dabei aus der Serie S2_005, bei der der Verformungszuwachs durch die klimatischen Verhältnisse während des Versuchs erst verspätet einsetzte, siehe Abschnitt 4.3.2.1. Dadurch werden hier die späteren Kriechanteile durch die Simulation stärker bewertet, was tendenziell eine Überschätzung der weiteren Kriechverformungen nach sich zieht. Somit stellt der Wert von $1,673\text{ mm}$ eine konservative obere Grenze für die vermutete Verformung der Klebefuge nach 25 Jahren dar.

Grundsätzlich kann auf Basis der durch die rheologische Modellierung gewonnenen Daten bei den untersuchten Lastniveaus von einer Gesamtverformung von etwa $0,800\text{ mm}$ nach 25 Jahren ausgegangen werden.

5.2. Finite-Elemente-Simulationen der Kleinprobekörper

Die Versuche aus Abschnitt 4.3 wurden mit Probekörpern durchgeführt, die in der Geometrie an die Vorgaben der ETAG 002-1 [2] angepasst waren. Die detaillierten Abmessungen sind bereits in Abbildung 4.3 dargestellt, eine Seitenansicht ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Durch die Art der Belastung wird neben einer Schubverformung auch eine Momentenbeanspruchung auf die Klebefuge aufgebracht, was sich im Verformungsverhalten widerspiegelt. So war vor allem bei den Kurzzeitversuchen eine Rotation der Glasscheibe unter Belastung festzustellen. Diese erzeugt an der Oberseite der Klebefuge Zug-, an der Unterseite Druckspannungen. Das Verhalten eines Kleinprobekörpers unter Last ist in Abbildung 5.4 schematisch dargestellt.

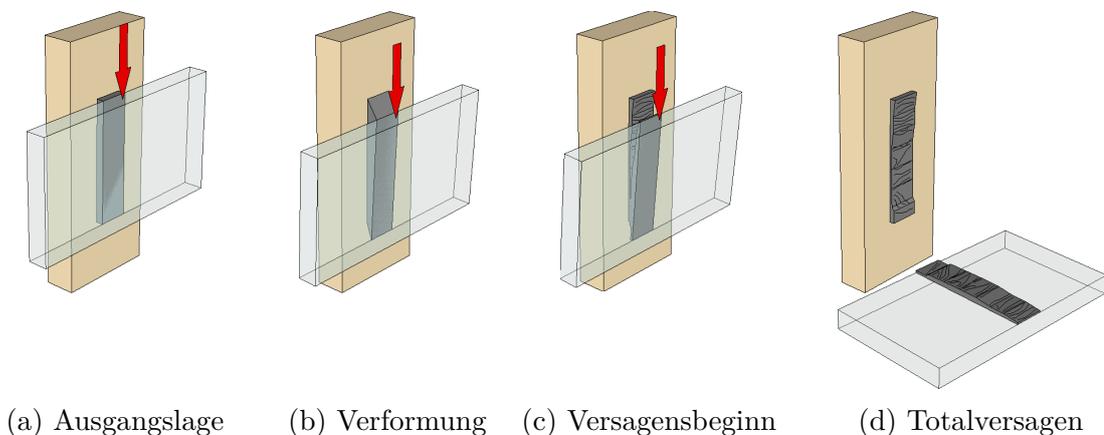


Abb. 5.4.: Verformungsfortschritt eines Kleinprobekörpers

Das Versagen wird dabei durch ein Reißen der obersten Schicht der Klebefuge induziert. Dieser Riss schreitet anschließend nach unten fort, bis die gesamte Klebefuge versagt. Nach dem ersten Riss war in vielen Fällen noch eine Laststeigerung möglich. Bei einigen Proben kommt es während des Risswachstums ausgehend vom oberen Ende der Klebefuge auch zu einem Einreißen der untersten Schicht. Ein Rissfortschritt nach oben war allerdings nie zu beobachten. Um das Bruchverhalten genau festzustellen, wurde eine Videoanalyse durchgeführt. Die Auswertung ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

Die Verdrehung der Glasscheibe ist darin deutlich zu erkennen. Die Rotation nimmt während des Versuchsfortschritts laufend zu. Auffallend ist jedoch, dass sie gegen Ende wieder abnimmt und der Versagensmechanismus dafür in ein stärkeres Abgleiten innerhalb der Klebefuge übergeht.

In der Forschungsarbeit der TU Dresden [27] wurden Probekörper verwendet, bei denen eine reine Schubbeanspruchung auf die Klebefuge aufgebracht wurde. Dabei wurden

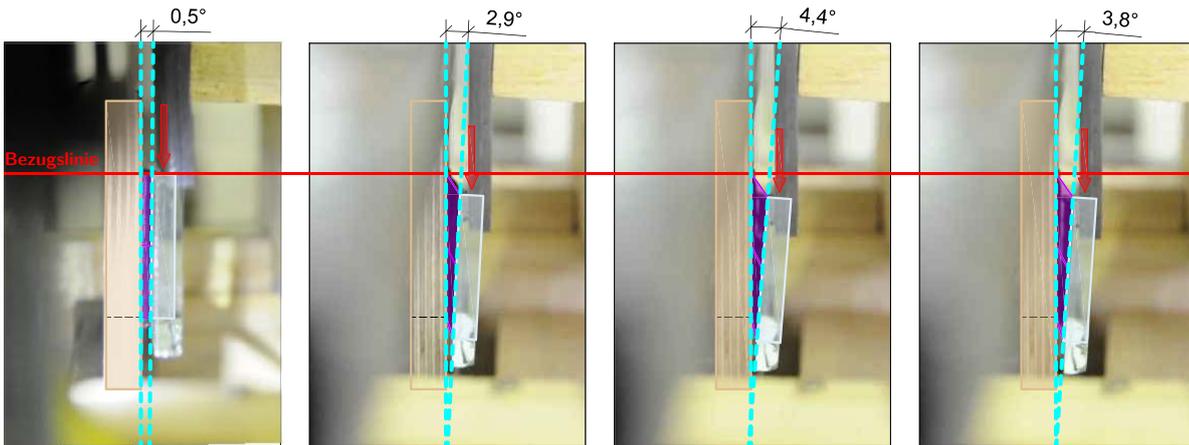


Abb. 5.5.: Videoanalyse des Verformungsfortschritts eines Kleinprobekörpers

tendenziell höhere Kurzzeitfestigkeiten als bei den hier vorgestellten Versuchen erreicht. Ein erster Vergleich der Probekörper und deren Verhalten unter Last findet sich bereits in [73]. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Probekörpergeometrie die erreichten Ergebnisse beeinflusst. Um das Ausmaß der auftretenden Zugspannungen am oberen Ende der Klebefuge festzustellen, wurde der Probekörper mittels FE-Methode analysiert. Die Verdrehung wird mit linear elastischem Materialverhalten der Klebefuge unterschätzt, siehe dazu Abbildung 5.6.

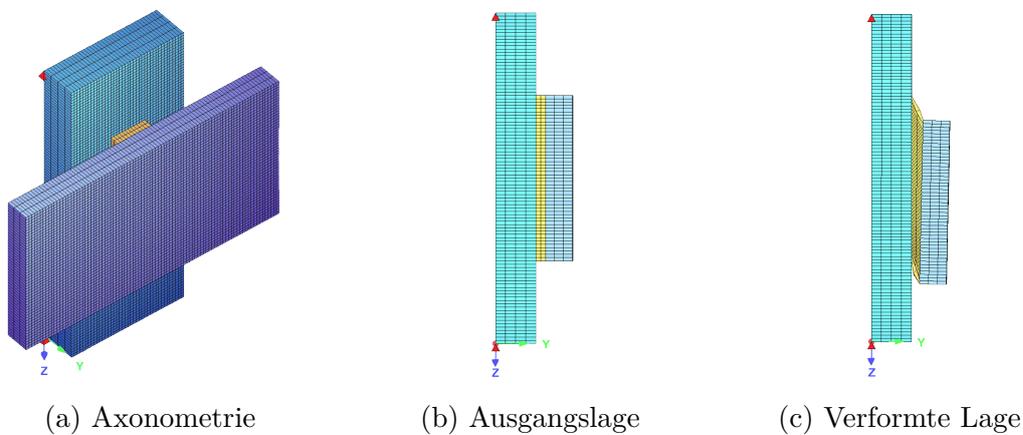
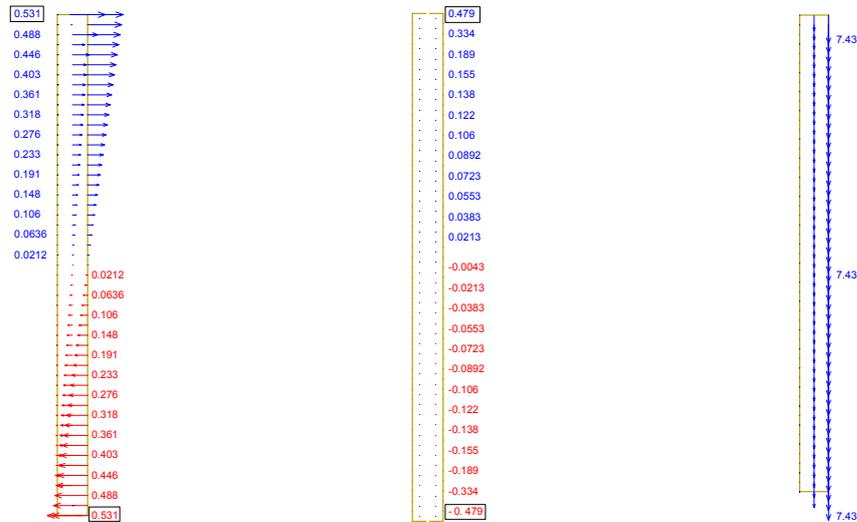


Abb. 5.6.: FE-Modellierung eines Kleinprobekörpers

Dennoch ergibt sich bei einer Last F von $0,6 \text{ kN}$, was bei reiner Schubbeanspruchung und einer Klebefläche A von 600 mm^2 einer Schubspannung von $1,0 \text{ N/mm}^2$ entsprechen würde, eine maximale Horizontalverschiebungen an der Oberkante der Klebefuge von etwa $0,53 \text{ mm}$, siehe Abbildung 5.7. Dies resultiert in einer maximalen Zugspannung von $0,48 \text{ N/mm}^2$. Bedenkt man die in [5] ermittelte Zugfestigkeit des verwendeten Klebstoffs

5. Analyse des Kriech- und Bruchverhaltens

von etwa $1,0 \text{ N/mm}^2$, wird deutlich, dass eine Verschiebung dieses Ausmaßes deutlichen Einfluss auf das Bruchverhalten hat.



(a) Verschiebung aus der Ebene der Verklebung (b) Auftretende Zug- und Druckspannungen (c) Verschiebungen entlang der Verklebung

Abb. 5.7.: Auswertung der FE-Modellierung

Dies erklärt auch das in Abbildung 5.4 beschriebene Bruchverhalten der Kleinprobekörper. Berechnet man die in den Kurzzeitversuchen erreichten Schubspannungen ohne Berücksichtigung dieses Effekts, liegen die Ergebnisse auf der sicheren Seite, da im Allgemeinen von höheren tatsächlichen Schubspannungen ausgegangen werden kann, wie unter anderem in [27] gezeigt. Andererseits stimmen die Ergebnisse der Kleinprobekörper gut mit den Ergebnissen an den mittelgroßen Versuchsproben überein, siehe Tabelle 4.68. Es ergeben sich bei den mittelgroßen Probekörpern niedrigere Schubfestigkeiten, obwohl der Effekt der Verdrehung der Glasscheibe aufgrund der größeren Klebefugenlänge keine Rolle spielt. Daraus kann geschlossen werden, dass die gewählte Versuchsanordnung der Kleinprobekörper für die Ermittlung tatsächlicher Materialeigenschaften nicht geeignet ist, für die Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten und Bemessungsspannungen jedoch konservative Ergebnisse liefert und somit auf der sicheren Seite liegt. Die Schubspannungen können somit auch bei derart kurzen Klebefugenlängen durch den in [13] bestätigten Ansatz der ETAG 002-1 [2] von $\tau = F/A$ berechnet werden.

6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute

Mit dem Thema des Langzeitverhaltens von mit Silikon verklebten HGV-Konstruktionen beschäftigen sich neben der TU Wien auch andere Institutionen. Auf vergleichbare experimentelle Untersuchungen soll in diesem Abschnitt näher eingegangen werden. Forschungsarbeiten, die sich mit Sicherheitskonzepten auseinandersetzen, wurden bereits in Abschnitt 2.2 behandelt. Für die Darstellung in den Diagrammen werden für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche die in Abschnitt 4.2 angeführten Prinzipien bezüglich Farbgebung und Markierung beibehalten. Die externen Versuchsergebnisse werden jeweils in einer eigenen Farbe, unabhängig vom jeweiligen Lastniveau dargestellt. Die Markierungen sind ebenso unabhängig vom Probekörpertypus. Das Lastniveau sowie die Belastungsdauer der Forschungsergebnisse der anderen Institute werden eigens angeführt und sind des Weiteren dem Seriennamen zu entnehmen.

6.1. Holzforschung Austria

Die HFA führte bis 2008 mehrere Forschungsprojekte durch, in denen das Klebstoffverhalten von HGV-Konstruktionen genau untersucht wurde. Im letzten Forschungsprojekt [5] lag der Schwerpunkt auf dem Langzeitverhalten unterschiedlicher Klebstoffe. Dieses Thema wird neben dem Forschungsbericht auch in einer Dissertation behandelt [74]. Es wurden mehrere Klebstoffe untersucht, die Ergebnisse stellen die Grundlage für die Auswahl des Klebstoffs, mit welchem die weiteren Forschungsarbeiten durchgeführt wurden, dar. Somit wurde damals derselbe Klebstoff behandelt, mit dem auch die Experimente im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Es wurde ein Langzeitversuch gemäß der in der ETAG 002-1 [2] veranschlagten Randbedingungen durchgeführt. Die Probekörpergeometrie der Versuche war identisch zu den Kleinproben aus dieser Arbeit, siehe Abbildung

6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute

4.3(a). Die Probekörper wurden nach Verklebung für mindestens 28 Tage bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert, bevor sie den Untersuchungen unterzogen wurden. Diese setzten sich ebenfalls aus einer Überprüfung der Kurzzeitfestigkeit, Beobachtung des Verhaltens unter Dauerbeanspruchung, Überprüfen der Restscherfestigkeit und zyklischen Versuchen zusammen.

Die Untersuchungen unterscheiden sich zu den in Abschnitt 4 vorgestellten Experimenten vor allem in der Wahl der Lastniveaus und den klimatischen Randbedingungen. Alle Versuche wurden unter stabilem Laborklima von 20°C / 65 % oder erhöhter Klimastat bei einer Temperatur von 55°C durchgeführt. Die Belastungsdauer betrug 91 Tage. Dabei kristallisierte sich am Ende der Versuchsserie für den relevanten Klebstoff das Belastungsniveau von $0,04\text{ N/mm}^2$ als geeignet heraus. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch dieses Belastungsniveau als Grundlage gewählt.

Das angesprochene Lastniveau wurde unter den klimatischen Verhältnissen von 20°C untersucht, die dabei gemessenen Verformungen sind in Abbildung 6.1 und Tabelle 6.1 im Vergleich zur Serie S1_004 dargestellt. Es zeigt sich ein ähnlicher Verformungsverlauf mit durchschnittlich etwas höheren Verschiebungen. Rückverformungen sind über die Belastungsdauer gesehen keine festzustellen, da es auch keine Veränderungen der klimatischen Randbedingungen gab.

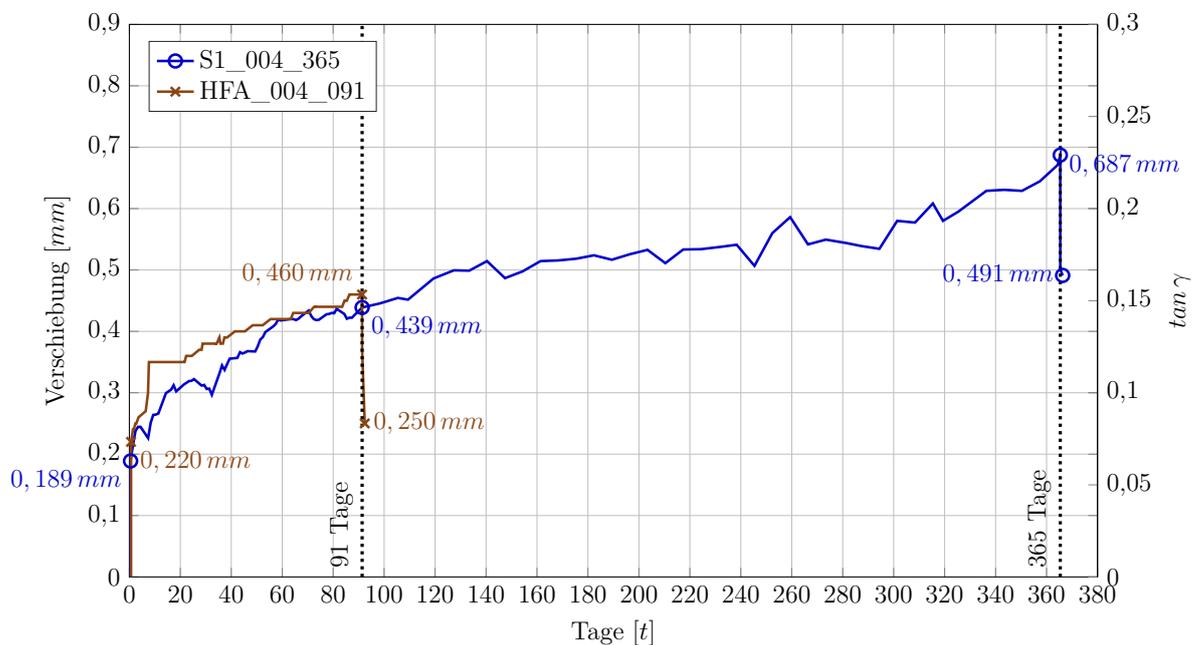


Abb. 6.1.: Gesamtverformung der Kleinproben S1_004 über 365 Tage und der Kleinproben HFA_004 über 91 Tage mit einer Belastung von $0,04\text{ N/mm}^2$ und 24 h anschließender Entlastungsphase

Tab. 6.1.: Verformungswerte der Serie HFA_004_091 im Vergleich zu S1_004_365 in [mm]

Seriennummer	nach Belastung w_0	nach 91 Tagen w_{91}	nach 365 Tagen w_{365}	nach Entlastung w_{365+e} bzw. w_{91+e}	24 h nach Entlastung w_{365+1} bzw. w_{91+1}
S1_004_365	0,189	0,439	0,687	0,501	0,491
HFA_004_091	0,220	0,460	–	0,370	0,250

Die Vergleichsversuche dieser Arbeit bestätigen die damaligen Ergebnisse aus [5] bezüglich des Kriechverhaltens unter Dauerbelastung bei einem Lastniveau von $0,04 N/mm^2$.

In den Untersuchungen der HFA kam weiters ein Lastniveau von $0,066 N/mm^2$ zum Einsatz, welches als zu hoch eingestuft wurde. In Abbildung 6.2 und Tabelle 6.2 sind die gemittelten Werte der Serien S3_006_091 und HFA_0066_098 dargestellt. Weshalb für die Probekörper der HFA eine Belastungsdauer von 98 Tagen gewählt wurde, konnte nicht geklärt werden. Ebenso wurde bei diesen Prüfkörpern eine längere Entlastungsphase überprüft.

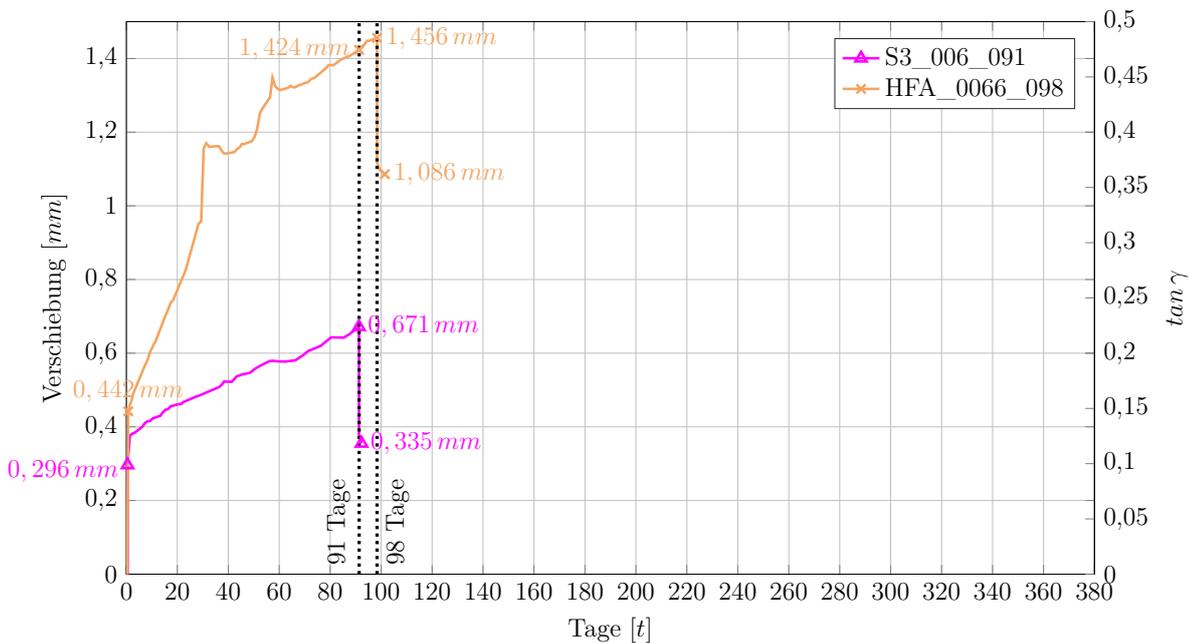


Abb. 6.2.: Gesamtverformung der Kleinproben S3_006 über 91 Tage und der Kleinproben HFA_0066 über 98 Tage mit einer Belastung von $0,066 N/mm^2$ und anschließender Entlastungsphase

6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute

Tab. 6.2.: Verformungswerte der Serie HFA_0066_098 im Vergleich zu S3_006_091 in [mm]

Seriennum- mer	nach Belastung w_0	nach 91 Tagen w_{91}	nach 98 Tagen w_{98}	nach Entlastung w_{91+e} bzw. w_{98+e}	nach Entlastung w_{91+1} bzw. w_{98+3}
S3_006_091	0,296	0,671	–	0,379	0,335
HFA_0066_098	0,442	1,424	1,456	1,118	1,086

Es zeigt sich eine starke Diskrepanz in den auftretenden Verformungen. Worin diese begründet sind, lässt sich nicht feststellen. Es erscheint jedoch als unwahrscheinlich, dass zwischen den Probekörpern mit einer Dauerlast von $0,04 N/mm^2$ und jenen mit $0,066 N/mm^2$ derart große Unterschiede im Kriechverhalten des Klebstoffs entstehen, wie sie im Rahmen der Forschungsarbeit der HFA [5] auftraten. Ein weiteres Indiz für Unregelmäßigkeiten in der damaligen Versuchsdurchführung stellen die Vergleichsversuche der TU Dresden [27] dar. Dort wurden am selben Klebstoff Belastungen von $0,10 N/mm^2$ und $0,30 N/mm^2$ dauerhaft aufgebracht, was einer Laststeigerungen auf beinahe das fünffache Belastungsniveau entspricht. Dabei lagen die gemessenen Kriechverformungen in einer ähnlichen Größenordnung zur Serie HFA_0066_098, wobei andere Probekörper zum Einsatz kamen, siehe Abbildung 6.3. Auf die weiteren beobachteten Lastniveaus von der TU Dresden wird in Abschnitt 6.2 näher eingegangen.

Wie zuvor erwähnt, wurde im Rahmen von [5] auch die Kurzzeitfestigkeit überprüft, die dabei erzielten Ergebnisse ohne jegliche Vorbeanspruchung sind in Tabelle 6.3 im Vergleich zu den Resultaten aus Tabelle 4.12 eingetragen. Mit der Serie S1_000_000 werden durchwegs höhere Werte erzielt, die Differenzen sind allerdings marginal.

Ebenso wurden die Probekörper nach 91 Tagen unter Dauerlast einer Überprüfung der Restscherfestigkeit unterzogen. Dabei flossen unterschiedliche Vorbelastungen ein, wobei die maximale Dauerschubbeanspruchung im Forschungsbericht der HFA [5] mit $0,04 N/mm^2$ begrenzt wurde. Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit jenen aus Tabelle 4.16, siehe Tabelle 6.4. Auch hier ergibt sich eine geringfügig höhere mittlere Schubfestigkeit bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche, durch die höhere Streuung wird dieser Vorteil bei Berechnung der 5%-Quantile beinahe ausgeglichen. Im Allgemeinen stimmen die Versuchsergebnisse gut überein.

Weiters wurden in [5] zyklische Belastungsversuche nach der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Methode durchgeführt. Es wurde ein Belastungsniveau von $\tau_{des} = R_{u,5}/3$ gewählt, was

Tab. 6.3.: Vergleich der Serie S1_000_000 zu den Untersuchungen der HFA [5] ohne Vorbelastung

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_000_000		bzw. nach [5]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 8$	5
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,168 \text{ N/mm}^2$	$1,001 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,070 \text{ N/mm}^2$	$0,076 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,060$	–
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 1,028 \text{ N/mm}^2$	$0,824 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 1,015 \text{ N/mm}^2$	–
Gleitung	$\tan \gamma = 2,87$	2,61
Schubmodul	$G = 0,407 \text{ N/mm}^2$	$0,374 \text{ N/mm}^2$

Tab. 6.4.: Vergleich der Serie S1_004_091 zu den Untersuchungen der HFA [5] nach 91 Tagen Vorbelastung

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_004_091		bzw. nach [5]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 10$	8
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,010 \text{ N/mm}^2$	$0,969 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,083 \text{ N/mm}^2$	$0,069 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,083$	–
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,850 \text{ N/mm}^2$	$0,832 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,835 \text{ N/mm}^2$	–
Gleitung	$\tan \gamma = 2,84$	2,76
Schubmodul	$G = 0,355 \text{ N/mm}^2$	$0,372 \text{ N/mm}^2$

6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute

einer Maximalbelastung von $\tau_{des} = 0,275 \text{ N/mm}^2$ entspricht. Im Gegensatz dazu wurden die zyklischen Versuche dieser Arbeit mit einem Lastniveau von $\tau_{des} = 0,328 \text{ N/mm}^2$ durchgeführt. Der Unterschied resultiert aus dem höheren $R_{u,5}$ -Wert der Kleinprobekörper ohne Vorbelastung, siehe Tabelle 6.3. Die genaue Herleitung des τ_{des} -Werts wird bereits bei den zyklischen Versuchen in Abschnitt 4.3.1.2.4 erklärt.

In Tabelle 6.5 wird ein Vergleich der Resultate der Restscherfestigkeit nach zyklischer Beanspruchung zwischen der Serie S1_000_000_z aus Tabelle 4.26 und den Versuchskörpern der HFA gezogen.

Tab. 6.5.: Vergleich der Serie S1_000_000_z zu den Untersuchungen der HFA [5]

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_000_000_z		bzw. nach [5]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$	5
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,239 \text{ N/mm}^2$	$1,108 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,170 \text{ N/mm}^2$	$0,047 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,137$	–
5%-Quantile der Schubfestigkeit nach [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,791 \text{ N/mm}^2$	$0,998 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit nach [2]	$R_{u,5}^{(2)} = –$	–
Gleitung	$\tan \gamma = 2,61$	2,91
Schubmodul	$G = 0,475 \text{ N/mm}^2$	0,348

Es zeigt sich wiederum ein sehr ähnliches Verhalten, wobei die Probekörper der HFA eine geringere Streuung aufweisen und somit einen deutlich besseren $R_{u,5}^{(1)}$ -Wert erreichen. Auffällig ist ebenfalls, dass bei den Kleinversuchen der HFA im Gegensatz zur Serie S1_000_000_z keine Versteifung gegenüber den Probekörpern ohne jegliche vorangegangene Beanspruchung festgestellt werden kann.

In [5] wurden keine weiteren zyklischen Versuche nach vorangegangener Dauerbeanspruchung durchgeführt. Die drei zuvor vorgestellten Kurzzeituntersuchungen sowie die Langzeitbeobachtung aus Abbildung 6.1 und Tabelle 6.3 können allerdings miteinander verglichen werden und zeigen im Großen und Ganzen eine gute Übereinstimmung, was für die Konsistenz der erzielten Ergebnisse spricht.

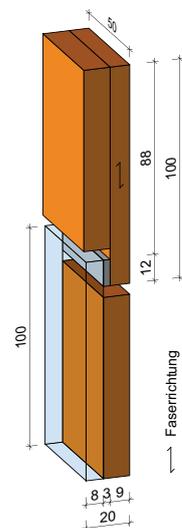
6.2. TU Dresden

An der TU Dresden wurden in den letzten Jahren Untersuchungen zu den Materialeigenschaften verschiedenster Klebstoffe durchgeführt [27, 28, 75–78]. Dabei kam auch der Klebstoff OttoColl S660[®] zum Einsatz. Es wurde dabei sowohl an Kleinprobekörpern

als auch an mittelgroßen Versuchsobjekten das Langzeitverhalten dieses Klebstoffs unter Dauerbeanspruchung beobachtet. Ein erster Vergleich zwischen den Versuchen der TU Dresden und der TU Wien wurde bereits in [73] vorgestellt.

6.2.1. Kleinprobekörper

Die Versuche an der TU Dresden wurden bei einer Temperatur von 23°C durchgeführt, die in Abbildung 6.3 dargestellten Kleinprobekörper für 1000 Stunden belastet. Das entspricht ungefähr 41,7 Tagen. Es wurden verschiedene Lastniveaus untersucht, wobei die Dauerspannung von $0,05\text{ N/mm}^2$ identisch zu den in dieser Arbeit vorgestellten Versuchen war. Daher soll auf jene Untersuchungen genauer eingegangen werden.



(a) Geometrie und Abmessungen des Probekörpers



(b) Versuchsaufbau

Abb. 6.3.: Geometrie, Abmessung und Versuchsanordnung des Scherprüfkörpers für die Kriechversuche der TU Dresden [27]

An der TU Dresden konnten bedingt durch die besonderen Gegebenheiten der Versuchseinrichtung lediglich die Kriechverformungen gemessen werden. Die elastische Anfangsverformung wurde aus den Kurzzeitprüfungen rückgerechnet. Um diese Unsicherheit im Vergleich auszuschließen, werden in Abbildung 6.4 lediglich die Kriechverformungen der Serien S1_005_365, S2_005_210, S3_005_091 und der in weiterer Folge TUD_005_041_1 genannten Serie dargestellt. Auch auf eine Darstellung der Rückverformung bei Entlastung der Probekörper wird verzichtet.

Durch die große Differenz in der Dauer der Beanspruchung ist die Verformungskurve

6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute

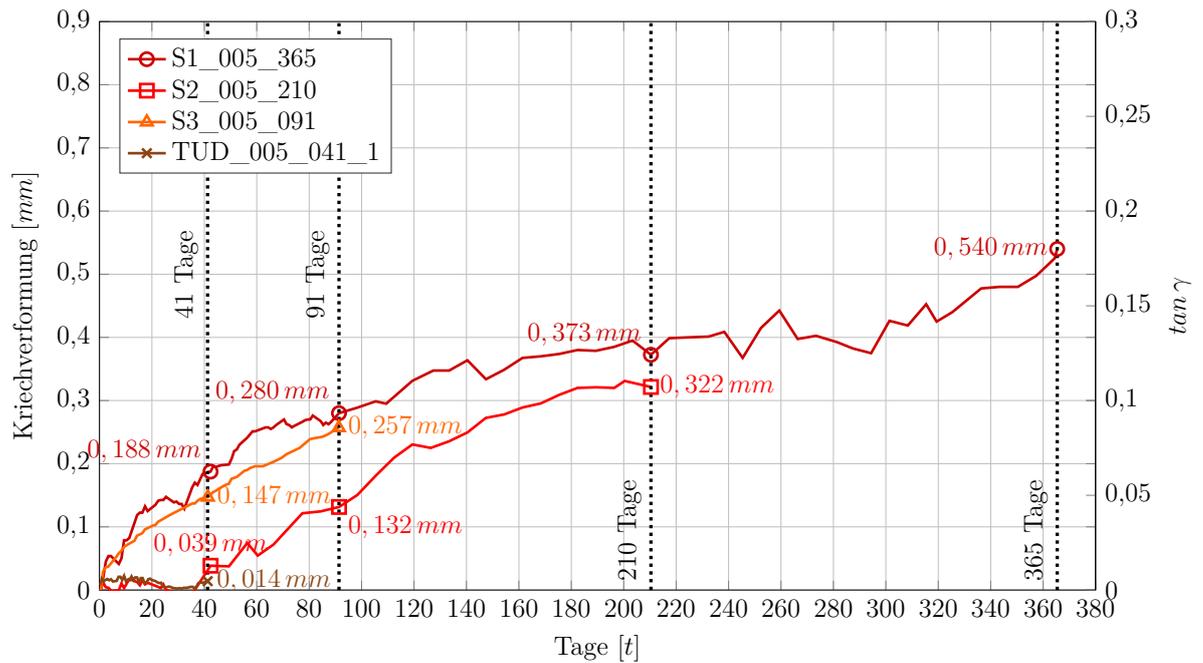


Abb. 6.4.: Kriechverformungen der Serien S1 bis S3 und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$

der Probekörper der TU Dresden nur schwer auszumachen. Daher werden in Abbildung 6.5 dieselben Serien dargestellt, allerdings wird die x-Achse logarithmisch skaliert. So wird ein Schwerpunkt auf die frühzeitigen Kriechverformungen gelegt. Die erreichten Kriechverformungen sind in Tabelle 6.6 aufgelistet.

Tab. 6.6.: Kriechverformungen der Serien S1 bis S3 und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$

Seriennummer	nach	nach	nach	nach
	41 Tagen w_{41}	91 Tagen w_{91}	210 Tagen w_{210}	365 Tagen w_{365}
S1_005_365	0,188	0,280	0,373	0,540
S2_005_210	0,039	0,132	0,322	—
S3_005_091	0,147	0,257	—	—
TUD_005_041_1	0,014	—	—	—

In beiden Abbildungen wird deutlich, dass die Probekörper der TU Dresden kaum Kriechverformungen erleiden. Sie verlaufen bis zum Abbruch des Versuchs nahe der Nulllinie, gleichmäßig zu den Versuchen der Serie S2, welche aufgrund der klimatischen Bedingungen im Versuchsraum zu Beginn kaum krochen, siehe dazu Abschnitt 4.3.2.1. Bei den Probekörpern der TU Dresden wird auch die Belastung für die Klebefuge

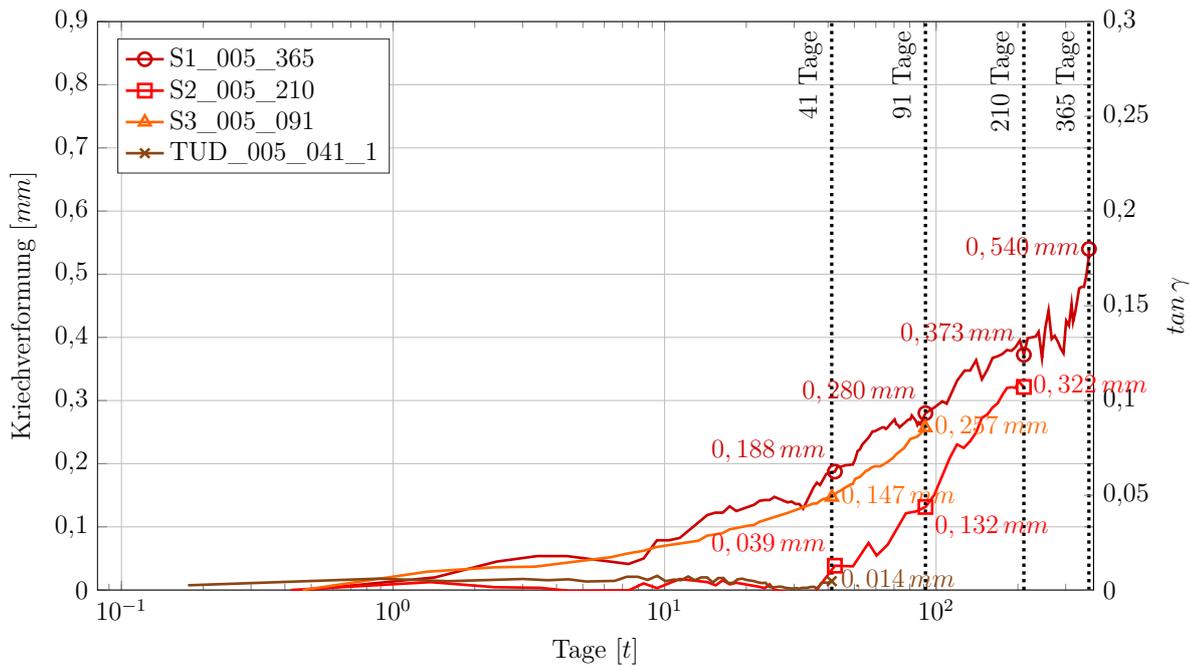


Abb. 6.5.: Kriechverformungen der Serien S1 bis S3 und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$ in logarithmischer Darstellung

günstiger aufgebracht. Es entsteht durch die Last kein Moment um die Verklebung wie bei den Probekörpern nach ETAG 002-1 [2], siehe Abschnitt 5.2. Dadurch entstehen keine Zugspannungen und die Klebefuge wird rein durch Schubkräfte beansprucht.

Auch an der TU Dresden wurde vor Beginn der Langzeituntersuchungen die Festigkeit des verwendeten Klebstoffs anhand einer Scherprüfung der Probekörper überprüft. Die Resultate sind im Vergleich zu jenen ohne Vorbelastung der Serie S1 (Tabelle 4.12) in Tabelle 6.7 zu sehen. Es zeigt sich sehr ähnliches Verhalten in beiden Serien. Durch die größere Streuung der Probekörper aus [27] ergibt sich für diese Serie lediglich ein kleinerer $R_{u,5}^{(2)}$ -Wert. Dieser liegt im Bereich der errechneten 5%-Quantile der HFA [5], siehe Tabelle 6.3.

Da die Versuche der TU Dresden nach etwa 41 Tagen beendet wurden, kann bezüglich der Restscherfestigkeit kein direkter Vergleich gezogen werden, da für diese Arbeit keine Resultate mit dieser Langzeitbeanspruchung vorliegen. In der Serie S1 wurden jedoch Probekörper nach 35 Tagen entlastet, siehe Abbildung 4.20 und Tabelle 4.21. Da sich der Einfluss aus sechs weiteren Tagen der Dauerlast in Grenzen halten sollte, werden diese Kleinprobekörper zu einem Vergleich der Restscherfestigkeiten herangezogen, siehe Tabelle 6.8.

Es fällt auf, dass an der TU Dresden eine deutlich höhere mittlere Schubfestigkeit erreicht

6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute

Tab. 6.7.: Vergleich der Serie S1_000_000 zu den Untersuchungen der TU Dresden [27] ohne Vorbelastung

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_000_000		bzw. nach [27]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 8$	10
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,168 \text{ N/mm}^2$	$1,197 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,070 \text{ N/mm}^2$	$0,158 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,060$	0,132
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 1,028 \text{ N/mm}^2$	$0,894 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 1,015 \text{ N/mm}^2$	$0,865 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,87$	3,07
Schubmodul	$G = 0,407 \text{ N/mm}^2$	$0,390 \text{ N/mm}^2$

Tab. 6.8.: Vergleich der Serie S1_005_035 zu den Untersuchungen der TU Dresden [27] nach etwa 41 Tagen Vorbelastung

Ergebnisse der Versuchsreihe S1_005_035		bzw. nach [27]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 5$	2
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 1,081 \text{ N/mm}^2$	$1,408 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,102 \text{ N/mm}^2$	$0,216 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,060$	0,153
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,843 \text{ N/mm}^2$	–
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = 0,830 \text{ N/mm}^2$	–
Gleitung	$\tan \gamma = 2,67$	2,95
Schubmodul	$G = 0,404 \text{ N/mm}^2$	$0,478 \text{ N/mm}^2$

wird. Dies kann einerseits in der Art der Beanspruchung liegen, da diese Probekörper rein auf Schub belastet wurden. Andererseits wurden lediglich zwei Stück geprüft, was die Aussagekraft der Ergebnisse deutlich mindert. Auch die in Tabelle 6.7 gezeigten Resultate zeigen keinen dermaßen großen Unterschied, weshalb darauf geschlossen werden kann, dass die Probekörper nach 41 Tagen Dauerlast aus Tabelle 6.8 als nicht repräsentativ für eine ganze Serie angenommen werden können.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die gewählte Probekörpergeometrie das Kurz- und Langzeitverhalten derart beeinflusst, dass in solch genauem Messbereich Unterschiede zu erkennen sind. Während die Probekörpergeometrie der TU Dresden genauere Ergebnisse bezüglich der tatsächlichen Materialeigenschaften unter reiner Schubbeanspruchung liefert, spielen beim Versuchsaufbau der TU Wien weitere Einflüsse eine Rolle. Durch die zusätzliche Momentenbeanspruchung können die Ergebnisse als auf der sicheren Seite liegend angesehen werden. Die Vergleichsbetrachtungen zeigen, dass die Störeinflüsse äußerst gering sind und für die baupraktische Anwendung vernachlässigt werden können. Die Vergleiche mit den experimentellen Untersuchungen der TU Dresden zeigen somit auch, dass durch die Probekörpergeometrie der ETAG 002-1 [2] aus Abbildung 4.3(a) eine ausreichende Genauigkeit gewährleistet werden kann.

6.2.2. Mittelgroße Probekörper

Für die Untersuchungen an mittelgroßen Probekörpern wurde an der TU Dresden jene Geometrie ohne gezahnte Koppelleiste verwendet, welche bereits in Abbildung 4.63 vorgestellt wurde. Einziger Unterschied war, dass anstelle des Abstandhalters aus Teflon, welcher nach der Herstellung entfernt wurde, ein klebendes Abstandhalterband aus Polyurethanschaum verwendet wurde [27]. Die Probekörper wurden mittels einer Hydraulikpresse belastet, die Messuhren zur Aufnahme der Verformungen waren dabei an der oberen Glaskante angebracht. In diesen Punkten unterscheidet sich der Versuchsaufbau von jenem aus Abschnitt 4.4.1. Die Kurzzeitversuche wurden am selben Prüfstand durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsstands wird in [27] gegeben.

Auch bei dieser Versuchsreihe wurde das Lastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$ sowohl in Dresden als auch in Wien eingesetzt. Wiederum wurde an der TU Dresden die Belastung für 1000 Stunden aufrecht erhalten, in Abbildung 6.6 und Tabelle 6.9 ist ein Vergleich der dort gemessenen Verformungen zu jenen aus Abschnitt 4.4.1 dargestellt. Es wird in diesem Fall direkt auf die logarithmische Darstellung zurückgegriffen. Auch eine Messung der elastischen Anfangsverformung war in diesem Fall eindeutig möglich, weshalb wieder die

6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute

Gesamtverformung der Probekörper dargestellt wird.

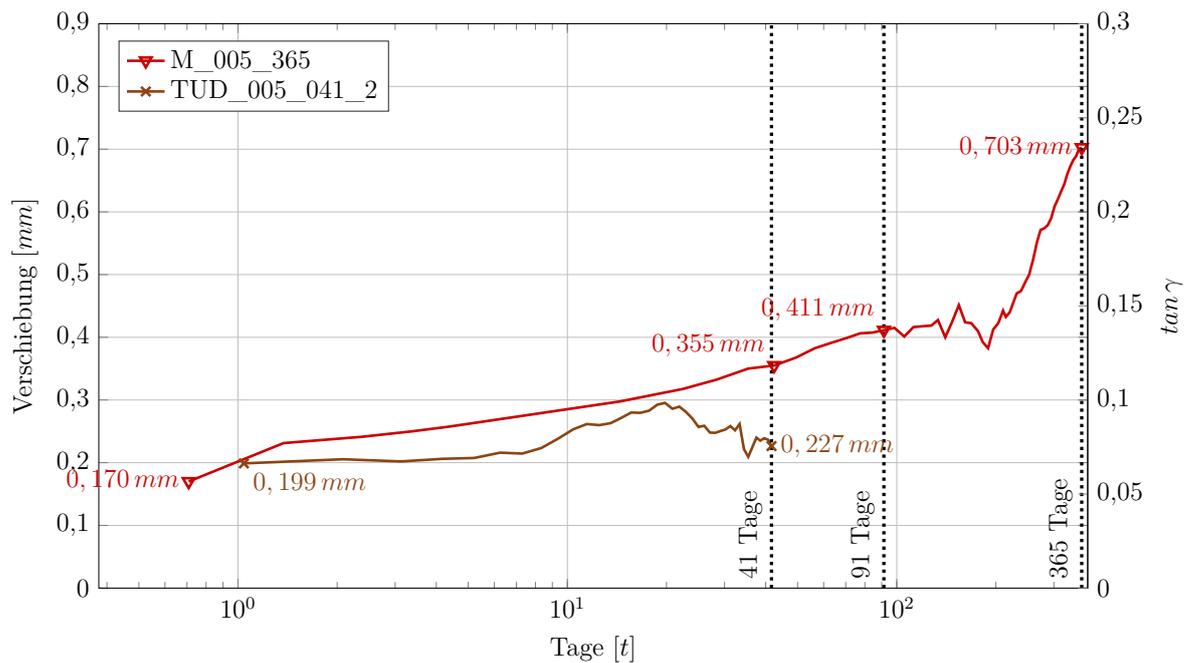


Abb. 6.6.: Verformungen der Serie M und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$ in logarithmischer Darstellung

Tab. 6.9.: Verformungen der Serie M und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$

Seriennummer	nach Belastung w_0	nach 41 Tagen w_{41}	nach 91 Tagen w_{91}	nach 365 Tagen w_{365}
M_005_365	0,170	0,355	0,411	0,703
TUD_005_041_2	0,199	0,227	—	—

Die einzelnen Serien zeigen sehr ähnliches Kriechverhalten, bis die Verformungen der Probekörper der TU Dresden nach etwa 20 Tagen wieder zurückgehen. Dies ist laut [27, 73] auf Änderungen der relativen Luftfeuchte im Versuchsraum zurückzuführen. Diese wirkt sich über das Quellverhalten der BFU-Koppelleiste auf die Verformungsmessungen aus. Ansonsten zeigen die Serien der TU Dresden und der TU Wien konsistentes Kriechverhalten, wodurch die jeweiligen Ergebnisse bestätigt werden können.

Die Vergleichsergebnisse der Scherfestigkeiten, die in der Kurzzeitprüfung ohne jegliche Vorbelastung erreicht wurden, sind in Tabelle 6.10 dargestellt.

Bei den Versuchen der TU Dresden werden etwas höhere Festigkeiten bei geringerer Streuung erreicht. Durch die höhere Probekörperanzahl hat dies starke Auswirkungen

Tab. 6.10.: Vergleich der Serie M_000_000 zu den Untersuchungen der TU Dresden [27] ohne Vorbelastung

Ergebnisse der Versuchsreihe M_000_000		bzw. nach [27]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 3$	5
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,870 \text{ N/mm}^2$	$0,972 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,092 \text{ N/mm}^2$	$0,046 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,105$	0,047
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,562 \text{ N/mm}^2$	$0,865 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = -$	$0,859 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 1,85$	1,87
Schubmodul	$G = 0,470 \text{ N/mm}^2$	$0,520 \text{ N/mm}^2$

auf den berechneten $R_{u,5}$ -Wert. Die Schubgleitung $\tan \gamma$ liegt im selben Bereich, wodurch sich nach [27] ein etwas höherer Schubmodul ergibt. Im Großen und Ganzen stimmen die Ergebnisse gut überein.

Auch bei den mittelgroßen Versuchskörpern wurden die Probekörper nach Abschluss der Langzeitbelastung bis zum totalen Versagen geprüft. Da nach 41 Tagen keine Vergleichsversuche der Serie M aus Abschnitt 4.4.2 zur Verfügung stehen, werden die Versuche nach 91 Tagen aus Abbildung 4.78 und Tabelle 4.65 den Experimenten der TU Dresden gegenüber gestellt, siehe Tabelle 6.11.

Tab. 6.11.: Vergleich der Serie M_005_091 zu den Untersuchungen der TU Dresden [27] nach etwa 41 Tagen Vorbelastung

Ergebnisse der Versuchsreihe M_005_091		bzw. nach [27]
Anzahl der Prüfkörper	$n = 4$	4
Mittlere Schubfestigkeit	$\tau_m = 0,963 \text{ N/mm}^2$	$0,893 \text{ N/mm}^2$
Standardabweichung der Schubfestigkeit	$s_x = 0,149 \text{ N/mm}^2$	$0,050 \text{ N/mm}^2$
Variationskoeffizient	$CoV = 0,155$	0,056
5%-Quantile der Schubfestigkeit [1]	$R_{u,5}^{(1)} = 0,571 \text{ N/mm}^2$	$0,763 \text{ N/mm}^2$
5%-Quantile der Schubfestigkeit [2]	$R_{u,5}^{(2)} = -$	$0,760 \text{ N/mm}^2$
Gleitung	$\tan \gamma = 2,01$	1,75
Schubmodul	$G = 0,480 \text{ N/mm}^2$	$0,511 \text{ N/mm}^2$

Auch hier stimmen die Ergebnisse gut überein. Durch die geringere Streuung der TU Dresden wird eine höhere 5%-Quantile erreicht, ansonsten sind die Ergebnisse sehr ähnlich und zeigen keinen Festigkeitsverlust gegenüber den unbelasteten Versuchen.

An der TU Dresden [27] wurden neben dem vorgestellten Lastniveau kleine und

mittelgroße Probekörper mit Spannungen bis zu $0,30 \text{ N/mm}^2$ für 1000 Stunden belastet. Dabei traten zwar große elastische Verformungen auf, die Kriechverformungen hielten sich aber in Grenzen und waren am Ende der 1000 Stunden weitgehend abgeklungen. Bei keinem der Probekörper trat tertiäres Kriechen auf. Auch in der Restscherfestigkeit war kein Verlust gegenüber anderen Prüfserien feststellbar.

Bei den Kleinproben ist das stark erhöhte Dauerlastniveau gegenüber den in dieser Arbeit behandelten Versuchen auch auf die bereits mehrfach erwähnten Unterschiede in der Probekörpergeometrie zurückzuführen, zeigt aber das prinzipielle Leistungsvermögen des verwendeten Klebstoffs. Es ist allerdings zu vermuten, dass über die von der ETAG 002-1 [2] veranschlagte Lebensdauer von 25 Jahren bei einem derart hohen Dauerlastniveau durch weitere Umwelteinflüsse baupraktisch zu große Verformungen entstehen würden, die entweder zum Bruch der Klebefuge oder zu Problemen mit der Gebrauchstauglichkeit der Gesamtkonstruktion führen würden.

Da das Lastniveau von $0,30 \text{ N/mm}^2$ aber etwa 35 % des $R_{u,5}$ -Werts darstellt, wird offensichtlich, dass das in der ETAG 002-1 veranschlagte Sicherheitsniveau von $1/44,44 \equiv 2,25 \%$ deutlich zu konservativ ist. Hier wird augenscheinlich, dass der verwendete Klebstoff langfristig mehr Potential besitzt, als ihm derzeit zugetraut wird.

6.3. IFT Rosenheim

Am ift Rosenheim wurde bereits Mitte der 80er-Jahre eine dreigeschossige SSG-Fassade errichtet, bei der die Lasten der äußeren Scheibe der Isolierverglasung lediglich durch eine Verklebung abgetragen wurden. Der Fassadenaufbau sowie das detaillierte Überwachungskonzept und die Versuchsauswertung werden in [46] detailliert beschrieben. Dieser Arbeit [46] werden auch die folgenden Informationen entnommen.

Es war keine mechanische Halterung oder zusätzliche Lastabtragung des Eigengewichts vorhanden. Dies war durch eine ZiE möglich, welche jedoch ein Monitoring über fünf Jahre voraussetzte. Während dieser Zeit fand eine laufende Überprüfung der Fassadenelemente statt. Nach einer Lebensdauer von 23 Jahren wurden die Elemente im Jahr 2010 abmontiert und anschließend für zwei Jahre in einer unbeheizten Halle gelagert. Der verwendete Klebstoff der Firma Dow Corning DC[®] 983 wurde nach dieser Zeit eingehend auf seine Eigenschaften analysiert. Der Klebstoff ist der in dieser Arbeit geprüften Verklebung mit OttoColl[®] S660 sehr ähnlich, jedoch für herkömmliche SSG-Verglasungen entwickelt und nicht speziell für HGV-Konstruktionen.

Bei der Fassade des ift kam kein Holz zum Einsatz, bietet aber eine der wenigen

Möglichkeiten, das Verhalten eines Silikonklebstoffs über eine derart lange Zeitspanne zu beobachten. Nach den 23 Jahren im Gebrauchszustand und den weiteren zwei Jahren Lagerung wurden einzelne Scheiben mittels Wasserstrahlschneidens zu kleinen Probekörpern mit einer Klebefugenlänge von 50 mm zerschnitten. An diesen Versuchskörpern wurden anschließend Zug- und Schubversuche bei unterschiedlichen Temperaturen (-20°C , 23°C , 60°C und 80°C) durchgeführt.

Auch vor dem Einbau in die Fassade wurden Proben genommen um diese zu überprüfen. Es zeigt sich sowohl bei den Zug- als auch bei den Schubversuchen in der ersten Testphase von fünf Jahren nach Einbau der Elemente, in der jährlich Proben genommen wurden, bei keiner Beanspruchung ein Festigkeitsverlust. Auch nach 23 bewitterten und zwei unbewitterten Jahren blieb die Festigkeit des Klebstoffs bei Zug- und Schubbeanspruchung erhalten. Der Grenzwert von 75 % der Anfangsfestigkeit laut ETAG 002-1 [2] wurde lediglich bei -20°C mit 65 % bei Zugbeanspruchung und mit 63 % bei Schubbeanspruchung sowie bei 23°C mit 71 % ebenfalls bei Schubbeanspruchung unterschritten.

Parallel zur ersten Testphase wurden analoge Probekörper im Normklima von 23°C und 50 % relativer Luftfeuchte unbelastet gelagert. Auch diese wurden anschließend bis zum Bruch geprüft und den Anfangsfestigkeiten gegenübergestellt. Bei diesen Versuchen zeigt sich teilweise eine Abnahme der Festigkeit im selben Ausmaß wie nach 23 Jahren unter freier Bewitterung. Bei einzelnen Versuchen werden sogar geringere Festigkeitswerte erreicht, obwohl aufgrund der Randbedingungen der Kontrollgruppe von keiner Schädigung der Klebefuge ausgegangen werden kann. Dies spricht dafür, dass nicht die Belastungsgeschichte selbst signifikanten Einfluss auf die Festigkeit des Klebstoffs hat, sondern die natürliche Streuung einen Großteil davon ausmacht. Dies muss daher unterschieden werden, da die Streuung der Festigkeitseigenschaften in einem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept über den Materialsicherheitsfaktor γ_M berücksichtigt werden soll, während der Einfluss der Langzeitbeanspruchung über den Modifikationsbeiwert k_{mod} definiert wird.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Untersuchungen der ift-Fassade aus [46] zeigen, dass eine Langzeitbeanspruchung von Silikonklebstoffen durchaus möglich ist, ohne einen Festigkeitsverlust zu erleiden, welcher etwaige Schäden der Konstruktion nach sich ziehen könnte. Auch diese Untersuchungen bestätigen somit den bisher gewonnenen Eindruck, dass die Festigkeitseigenschaften der behandelten Klebstoffe von der Belastungsgeschichte weitgehend unabhängig sind.

6.4. Fassade Otto-Chemie

Ein umfangreicher Freilandversuch von HGV-Elementen findet derzeit an der Fassade des Logistikzentrums der Firma Otto-Chemie statt [48]. Dabei werden zwei HGV-Elemente untersucht, die ohne jegliche Unterstützung zur Lastabtragung des Eigengewichts eingebaut wurden. Der Eigengewichtsabtrag erfolgt ausschließlich über die Verklebung. Eine Gesamtübersicht der Fassade ist in Abbildung 6.7 zu sehen.



Abb. 6.7.: Logistikgebäude der Firma Otto-Chemie [70]

Die Elemente ruhen auf dem System der HFA aus Abbildung 2.3(a) und haben eine Größe von etwa 125 cm Breite und maximal 250 cm Höhe. Es wurde ein Messsystem an der Fassade installiert, welches Daten bezüglich des Klimas und der Verformungen aufzeichnet. Das Konzept des Monitorings wird in der Diplomarbeit von Göppert [70] ausführlich vorgestellt, weshalb an dieser Stelle nur die wichtigsten Dinge zusammengefasst werden.

Ein Horizontalschnitt durch die Fassadenkonstruktion ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Darin sind auch die einzelnen Messpunkte vermerkt.

Nicht angeführt sind dabei die Messstellen der Verformungen. Es wurden die Absenkung der Innenscheibe zur Unterkonstruktion sowie die Absenkung der Außenscheibe zur Unterkonstruktion gemessen.

Das Monitoringkonzept hat dabei zwei Hauptziele. Zum Einen ist die Kriechverformung der Klebefugen von Interesse, zum Anderen soll die Auffeuchtung der Koppelleiste aus BFU kontrolliert werden. In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf das Verhalten der Klebefuge gelegt, um Rückschlüsse auf die durchgeführten experimentellen Untersuchungen ziehen zu können.

Durch den in Abbildung 6.8 dargestellten Aufbau des HGV-Elements ergibt sich bei

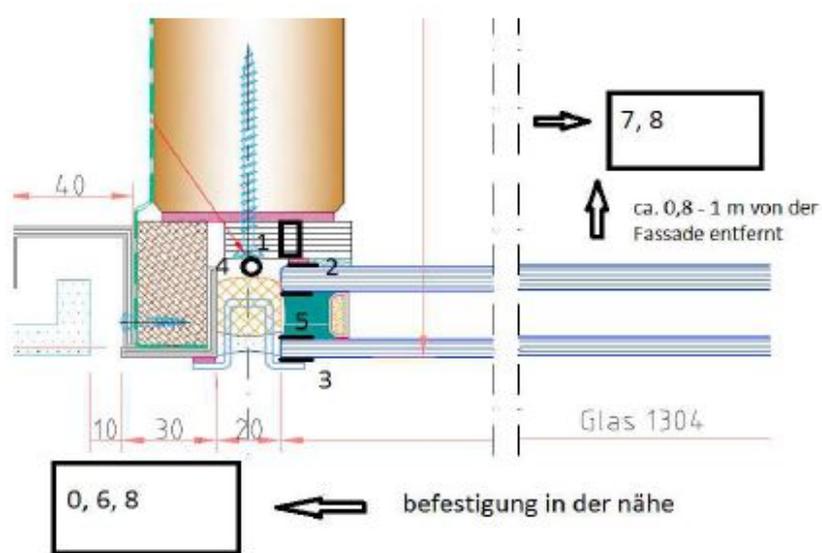


Abb. 6.8.: Horizontalschnitt mit Lage und Anordnung der Messstellen [70]

- 0 - Strahlungssensoren (Globalstrahlung und UV-Strahlung)
- 1 - Klimasensor für Temperatur/Feuchte in der Koppelleiste
- 2 - Thermoelement für die Temperatur in der Klebefuge zwischen Glas und Koppelleiste
- 3 - Thermoelement für die Oberflächentemperatur der Außenscheibe
- 4 - Klimasensor für Temperatur/Feuchte im Glasfalz
- 5 - Thermoelement für Temperatur im Randverbund der Scheibe
- 6 - Klimasensor außen für Temperatur/Feuchte
- 7 - Klimasensor innen für Temperatur/Feuchte
- 8 - Differenzdruck (Druckmessung im Raum vor der Fassade)

6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute

einer Dicke der inneren Glasscheibe von 8 mm und der äußeren von 6 mm bei einer Größe von etwa 125 cm auf 250 cm ein Eigengewicht von etwa 1 kN . Teilt man diese Eigenlast vereinfacht auf die vertikalen Verklebungen auf der rechten und linken Seite des HGV-Elements auf, ergibt sich bei einer Klebefugenbreite von 12 mm eine Dauerschubbelastung von $0,017\text{ N/mm}^2$ auf die lastabtragende Verklebung zwischen innerer Glasscheibe und Koppelleiste. In der Realität werden auch die horizontalen Verklebungen entlang des Fuß- und Kopfriegels einen geringen Beitrag zur Lastabtragung leisten, dieser wird außer Acht gelassen, da die Berechnung auf diese Art und Weise auf der sicheren Seite liegt und der Einfluss der Horizontalverklebung nicht ausreichend quantifiziert werden kann. Das errechnete Lastniveau liegt deutlich unter den im Zuge dieser Arbeit untersuchten Belastungen, die Kriechverformungen sollten also geringere Werte aufweisen. Jedoch spielen größere klimatische Einflüsse eine Rolle, die hier überprüft werden können.

Das Monitoring der HGV-Elemente startete Ende Mai 2014 [72] und ist vorerst für die Dauer von 10 Jahren geplant [48]. Aus rechtlichen Gründen dürfen an dieser Stelle lediglich die Ergebnisse bis Mitte Februar 2015 vorgestellt werden. Der Zeitraum der Auswertung umfasst somit 271 Tage. Derselbe Bereich wurde bereits in einem Bericht des ift-Rosenheim [72] und einer Projektarbeit der TU Wien behandelt [71].

Wie eingangs erwähnt, wurden zwei Scheiben untersucht, jedoch fiel bei einer Scheibe die Verformungsmessung zwischen innerer Glasscheibe und Koppelleiste gleich zu Beginn aus, weswegen hier nur die Daten eines HGV-Elements vorliegen. In Abbildung 6.9 sind die Daten der intakten Messstelle zwischen innerer Glasscheibe und Koppelleiste aufgetragen und in Tabelle 6.12 angeführt. Der Messpunkt zwischen äußerer Glasscheibe und Koppelleiste registriert erwartungsgemäß leicht höhere Werte, da zwei tragende Verklebungen in Serie zur Anwendung kommen, gleicht qualitativ aber der Verformungskurve aus Abbildung 6.9, weshalb sich hier ausschließlich auf die höhere belastete Klebefuge konzentriert werden soll. Da die Messinstrumente jede Minute einen Wert registrieren, sind in Abbildung 6.9 vereinfacht nur die Tagesmittelwerte dargestellt, um eine Tendenz des Kriechverhaltens zu erkennen.

Tab. 6.12.: Kriechverformungen der inneren Klebefuge eines Elements der Fassade des Logistikzentrums mit einer Belastung von etwa $0,017\text{ N/mm}^2$ in $[\text{mm}]$

Seriennummer	nach 91 Tagen w_{91}	nach 271 Tagen w_{271}
Otto_0017_271	0,121	0,269

Auffällig ist die zu Beginn gleichmäßige Verformung bis etwa Tag 190. Hier wird die Maximalverformung von $0,407\text{ mm}$ gemessen. Ab diesem Zeitpunkt sind die Verformungen

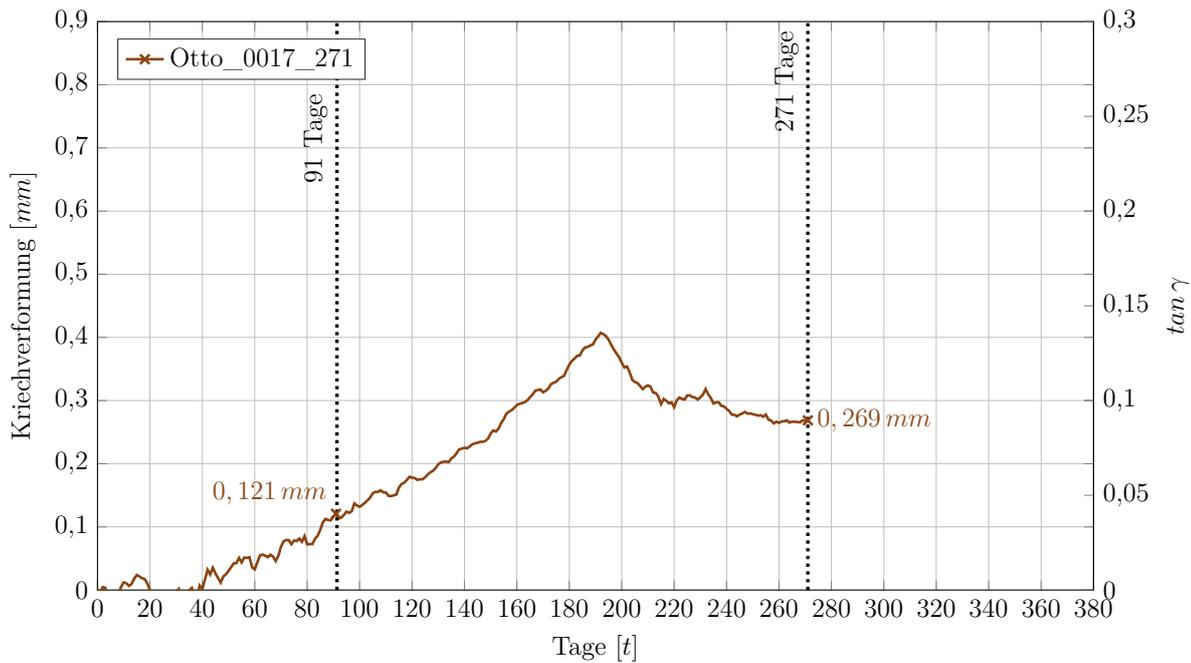


Abb. 6.9.: Kriechverformungen der inneren Klebefuge eines Elements der Fassade des Logistikzentrums mit einer Belastung von etwa $0,017 \text{ N/mm}^2$

rückläufig.

Die Abnahme der Verformungen nach etwa 190 Tagen legt einen Blick auf die klimatischen Verhältnisse nahe. Im Abschlussbericht des ift-Rosenheim [72] wird festgehalten, dass das Zusammenspiel der niedrigen Außentemperatur bei gleichzeitiger geringer Raumluftfeuchte verantwortlich für die Rückverformung ist. Aus diesem Grund sind in Abbildung 6.10 die Messergebnisse dieser beiden Messstellen dargestellt. Die Bezeichnung $T_{1.6}$ steht dabei für die Temperatur der Scheibe 1 an Messstelle 6 und $F_{1.7}$ für die relative Luftfeuchte der Scheibe 1 an Messstelle 7 gemäß Abbildung 6.8.

Sowohl der Verlauf der relativen Luftfeuchte im Innenraum sowie die äußere Lufttemperatur zeigen eine stetige Abnahme. Rund um Tag 190 ist allerdings kein markantes klimatisches Ereignis feststellbar, das auf die rasch einsetzende Rückverformung der lastabtragenden Verklebung schließen lässt. Dass aber durchaus ein Zusammenhang zwischen den klimatischen Verhältnissen und den Verformungen besteht, zeigt sich ab Tag 220. Hier nimmt die Außentemperatur innerhalb weniger Tage um fast 30°C zu. In diesem Zeitraum findet in der Klebefuge auch wieder ein Anwachsen des Kriechens statt, während in der darauffolgenden Kälteperiode wieder ein Rückgang feststellbar ist.

Laut den vorgestellten Ergebnissen ist ein Einfluss des Klimas ähnlich jenem bei den Laborversuchen aus Abschnitt 4 erkennbar. Um diesen quantifizieren zu können, ist noch

6. Vergleich experimenteller Untersuchungen anderer Forschungsinstitute

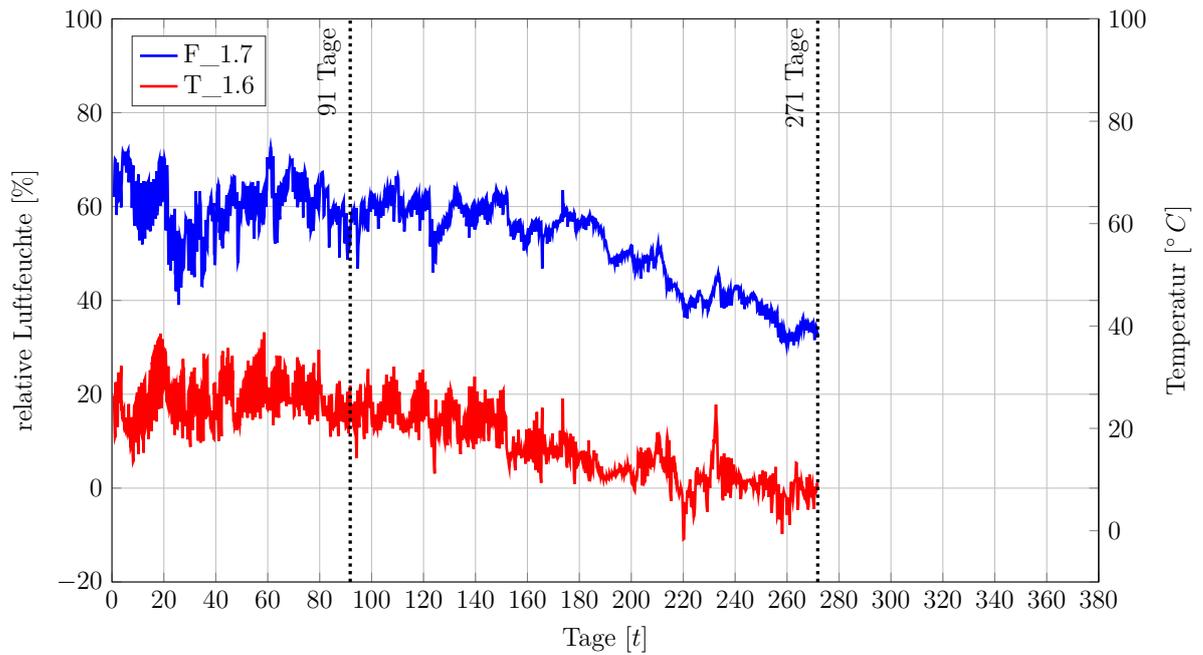


Abb. 6.10.: Klimatische Bedingungen während des Freilandversuchs

weitere Forschungsarbeit zu tätigen. Grundsätzlich stimmen die resultierenden Verformungen aus Last und einwirkenden Umwelteinflüssen mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den experimentellen Untersuchungen überein. Es zeigen sich bisher keine unerwarteten Ereignisse, die das Klebefugenverhalten negativ beeinflussen. Auszugehen ist davon, dass die Klebefuge positiv sowie auch negativ sensibler auf klimaabhängige Einwirkungen reagiert, als unter den verhältnismäßig stabilen Laborbedingungen.

Es ist auch in Zukunft unabdingbar, Freilandversuche wie diesen durchzuführen und genau zu beobachten und auszuwerten, da über eine langfristige Observation unzählige Daten gewonnen und interpretiert werden können. Bis dato kann festgehalten werden, dass sich in den ersten 271 Tagen keine außergewöhnlichen Ereignisse zugetragen haben, die das Vertrauen gegenüber lastabtragenden Verklebungen beeinträchtigen. Gegenteilig zeigt sich ein den experimentellen Untersuchungen entsprechendes Ergebnis, was die Interpretation der Versuche vereinfacht und den Abschätzungen von Sicherheitsbeiwerten anhand der daraus gewonnenen Resultate keine Einschränkung auferlegt.

7. Zuverlässigkeitsanalyse

Die derzeitigen Normen im Bauwesen basieren zu weiten Teilen auf dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept. Dabei werden die Einwirkungs- und die Widerstandsseite voneinander getrennt betrachtet und die Nachweise mit Hilfe von Teilsicherheitsbeiwerten geführt. Eine kurze Einführung wird bereits in Abschnitt 2.2 gegeben. Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_F und γ_M setzen sich aus den in Abbildung 7.1 genannten Parametern zusammen und ergeben sich nach den dargestellten Beziehungen.

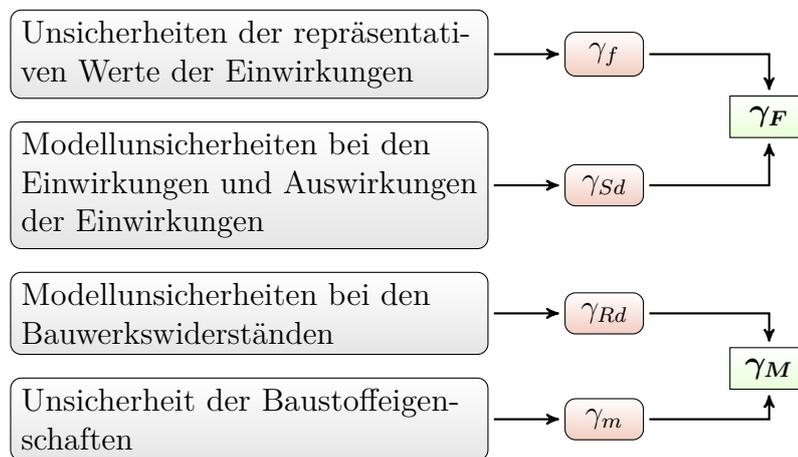


Abb. 7.1.: Beziehung zwischen den einzelnen Teilsicherheitsbeiwerten [1]

Die Herleitung der Teilsicherheitsfaktoren kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Die grundlegenden Prinzipien sind in Abbildung 7.2 dargestellt. Dabei wird zwischen deterministischen und probabilistischen Methoden unterschieden. Die in den derzeitigen Eurocodes dargestellten Sicherheitsbeiwerte beruhen im Wesentlichen auf Methode *a*, da diese aus den zuvor üblichen Normen auf Basis des deterministischen Sicherheitskonzeptes abgeleitet, jedoch auf ein semiprobabilistisches Konzept umgelegt wurden. Dabei erfolgte meist eine Rückrechnung der einzelnen Teilsicherheitsfaktoren. Mittels wahrscheinlichkeitstheoretischer Untersuchungen konnte jedoch eine detailliertere Auswertung mit unterschiedlichen Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten je nach Belastungsart und -dauer festgelegt werden. Folglich konnte durch die Abkehr von einem

globalen Sicherheitskonzept eine genauere und somit wirtschaftlichere Bemessung erfolgen, da unterschiedliche Beanspruchungen und Einflüsse auf das Material auch unterschiedlich berücksichtigt werden können. [1]

Die vollständig probabilistische Methode gibt zwar exakte Auskunft über das Zuverlässigkeitsniveau, wird aber nur äußerst selten genutzt, da meist eine ausreichende Anzahl an statistischen Daten fehlt, um eine zuverlässige Aussage treffen zu können.

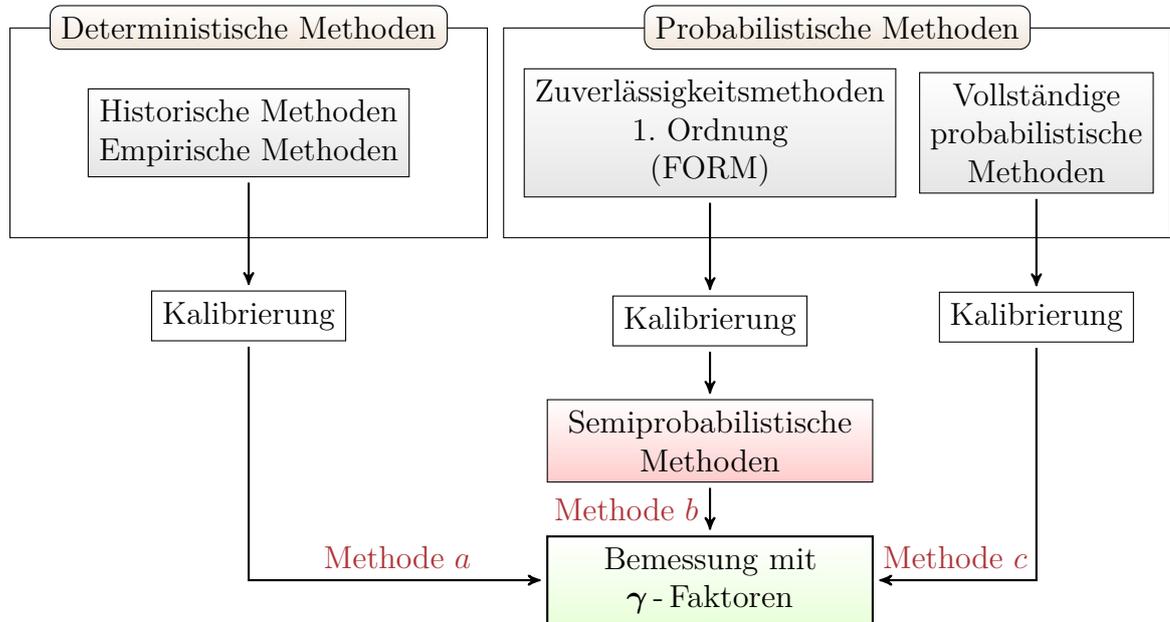


Abb. 7.2.: Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden im Bauwesen [1]

In den folgenden Abschnitten soll zuerst die FORM mit den Daten der in Abschnitt 4 gewonnenen Erkenntnisse durchgeführt werden. In weiterer Folge sollen auch die bereits in Abschnitt 2.2 dargestellten Sicherheitstheorien angewandt und die Bemessungskonzepte mittels der Ergebnisse aus Abschnitt 4 überprüft werden. Abschließend soll dieser Abschnitt basierend aus den semiprobabilistischen und deterministischen Untersuchungen mittels ingenieurmäßiger Beurteilung der Ergebnisse einen Vorschlag zu semiprobabilistischen Teilsicherheitsbeiwerten sowohl betreffend der Tragfähigkeit als auch betreffend der Gebrauchstauglichkeit liefern. Somit sollen die in Abbildung 7.2 dargestellten Methoden *a* und *b* angewandt und sinnvoll miteinander verknüpft werden.

7.1. Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung

Im Rahmen der FORM wird die Zuverlässigkeit über den Faktor β ausgedrückt. Der Zuverlässigkeitsindex β stellt über den in Gleichung 7.1 dargestellten Zusammenhang

mit P_f einen Parameter für die Versagenswahrscheinlichkeit dar. Dabei gilt, je größer β , umso geringer die Wahrscheinlichkeit des Versagens.

$$P_f = \phi(-\beta) \quad (7.1)$$

Die Beziehung zwischen der Versagenswahrscheinlichkeit P_f und dem Zuverlässigkeitsindex β kann Tabelle 7.1 entnommen werden.

Tab. 7.1.: Beziehung zwischen β und P_f [1]

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Für β werden je nach Zuverlässigkeitsklasse, welche sich an der Schadensfolgeklasse orientiert, entsprechende Mindestwerte vorgegeben. Diese sind Tabelle 7.2 zu entnehmen. HGV-Konstruktionen sind dabei gemäß [1] der Zuverlässigkeitsklasse *RC 2* zuzuordnen.

Tab. 7.2.: Empfehlungen der Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β nach [1]

Zuverlässigkeitsklasse	Mindestwert für β	
	Bezugszeitraum 1 Jahr	Bezugszeitraum 50 Jahre
<i>RC 3</i>	5,2	4,3
<i>RC 2</i>	4,7	3,8
<i>RC 1</i>	4,2	3,3

Im folgenden Kapitel wird der Versuch gewagt, einen Materialsicherheitsbeiwert γ_M nach EN 1990 Anhang B, C und D [1] herzuleiten. Dabei werden Bemessungswerte bestimmt, sodass die Grenzwerte beim Eintreten dieser nicht überschritten werden. Symbolisch muss gelten:

$$E_d < R_d \quad (7.2)$$

Die Grenzzustandsfunktion g kann aus Gleichung 7.2 folgendermaßen abgeleitet werden:

$$g = R_d - E_d = 0 \quad (7.3)$$

Mittels der Grenzzustandsfunktion aus Gleichung 7.3 kann P_f derart ausgedrückt werden, dass $g \leq 0$ Versagen der Tragkonstruktion bedeutet. Dies wird durch Gleichung 7.4 beschrieben.

$$P_f = \text{Prob}(g \leq 0) \quad (7.4)$$

Bei bekannter Grenzzustandsgleichung und bei bekannten Verteilungsfunktionen der Basisvariablen können der Sicherheitsindex β und die Versagenswahrscheinlichkeit P_f bestimmt werden. Dies ist in der hier vorliegenden Arbeit der Fall, da vereinfacht von einem Versagen der Klebefuge auf Schub ohne Berücksichtigung des Langzeitverhaltens unter einer ständigen Last G ausgegangen wird. Die Linearisierung der Grenzzustandsgleichung im Bemessungspunkt, welche das Kennzeichen der FORM darstellt, wird vorausgesetzt. Anderenfalls müsste die Zuverlässigkeitstheorie II. Ordnung - Second Order Reliability Method (SORM) angewandt werden. [79]

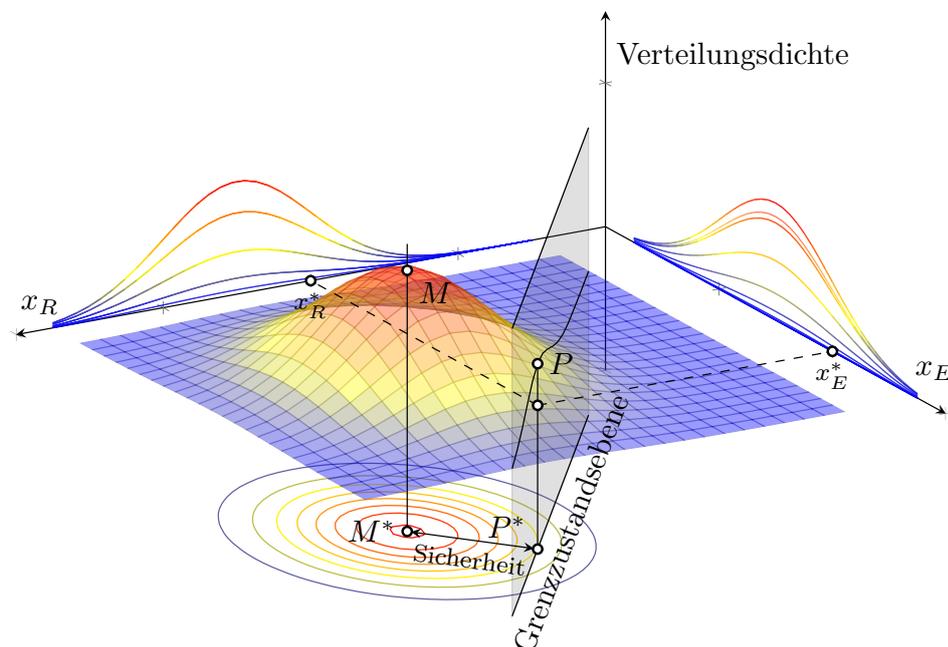


Abb. 7.3.: Verteilungsdichte der Basisvariablen und Grenzzustandsebene

In der Grenzzustandsfunktion nach Gleichung 7.3 wird der Bemessungspunkt P als jener Punkt angenommen, der dem Mittelpunkt der im Raum normalverteilten Variablen am nächsten liegt. Dies ist jener Punkt in der Grenzzustandsebene, in dem die Verteilungsdichte am größten ist. Versagen tritt am ehesten an dieser Stelle auf. In Abbildung 7.3 ist die Verteilungsdichte des gemeinsamen Auftretens von Einwirkung und Widerstand dargestellt. Dabei stellt die Grenzzustandsebene das Kriterium des Versagens dar. Die Normalverteilung des Widerstands ist dabei in Richtung der Achse x_R , jene der Einwirkung in Richtung von x_E aufgetragen.

Für alle Zustände rechts der Grenzzustandsebene tritt in Abbildung 7.3 Versagen ein, während links der Ebene die Widerstandsgröße die Größe der Einwirkung übersteigt und somit die Standfestigkeit gewährleistet ist. Der Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Höhenschichtlinien der Verteilungsdichte M^* und dem Punkt P^* stellt das Maß für die Zuverlässigkeit des dargestellten Systems dar und spiegelt damit die vorhandene Sicherheit wider. [80]

Der Grundstein zur FORM wurde in [81] gelegt. Dabei wird die Grenzzustandsfunktion in den Standardraum transformiert. Die Zufallsvariablen R und E werden standardisiert, wodurch die Variablen den Mittelwert $\mu = 0$ und die Standardabweichung $\sigma = 1$ erhalten. Der höchste Punkt des Wahrscheinlichkeitshügels liegt somit im Ursprung und die elliptischen Höhenschichtlinien aus Abbildung 7.3 werden zu Kreisen, siehe Abbildung 7.4. Die Wichtungsfaktoren α geben an, mit welchem Gewicht die einzelnen Variablen an der Versagenswahrscheinlichkeit beteiligt sind. Dabei muss stets $\sum \alpha_i^2 = 1$ gelten. Der Abstand zwischen dem Mittelpunkt M^* und dem Bemessungspunkt P^* ist in dieser Darstellung gleich dem Zuverlässigkeitsindex β . [79, 80]

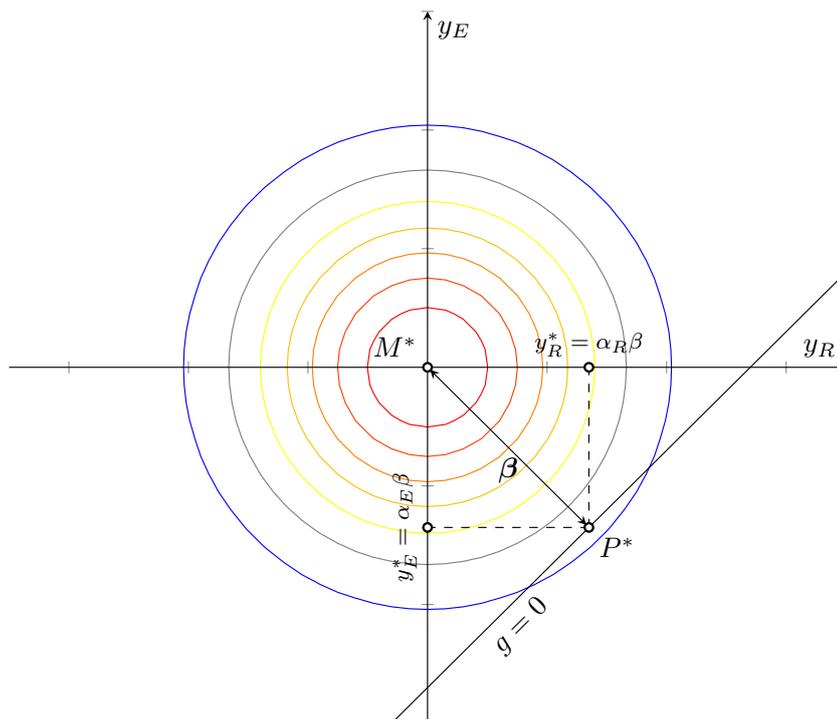


Abb. 7.4.: Bemessungspunkt und Zuverlässigkeitsindex β nach der Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung (FORM)

Die zuvor beschriebene Koordinatentransformation in den standardisierten Raum geschieht dabei über folgende Gleichungen:

7. Zuverlässigkeitsanalyse

$$\begin{aligned} y_R^* &= \frac{x_R - \mu_R}{\sigma_R} \\ y_E^* &= \frac{x_E - \mu_E}{\sigma_E} \end{aligned} \quad (7.5)$$

Auch die Grenzzustandsgleichung aus Gleichung 7.3 muss selbstverständlich transformiert werden. Durch Einsetzen der Gleichungen 7.5 ergibt sich die transformierte Grenzzustandsfunktion zu:

$$g = x_R - x_E = \mu_R + \sigma_R \cdot y_R - \mu_E - \sigma_E \cdot y_E = 0 \quad (7.6)$$

Teilt man Gleichung 7.6 durch $(-\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2})$, erhält man die Hesse'sche²⁸ Normalform der Geradengleichung nach Gleichung 7.7 [79]:

$$y_E \cdot \frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} - y_R \cdot \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} - \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} = 0 \quad (7.7)$$

Darin stellen die Bruchterme der y -Koordinaten die Wichtungsfaktoren aus Abbildung 7.4 dar. Diese sind gleichzeitig die Kosinusfunktionen der Winkel, welche die Gerade β mit den Koordinatenachsen y_R und y_E einschließt. Die Berechnung der Wichtungsfaktoren wird in Gleichung 7.8 gezeigt:

$$\begin{aligned} \alpha_R &= -\frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \\ \alpha_E &= \frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \end{aligned} \quad (7.8)$$

In der EN 1990 [1] erfolgt an dieser Stelle ein Vorzeichenwechsel, da der Wert α für ungünstige Einwirkungen und deren Auswirkungen negativ und für Widerstände positiv sein soll. Diese Vorgehensweise wird in [82] detailliert erläutert. Somit ergibt sich in der Rücktransformation in die x -Ebene gemäß EN 1990 im Vergleich zu Gleichung 7.5 ebenfalls ein Wechsel der Vorzeichen, siehe Gleichung 7.9:

$$\begin{aligned} x_R^* &= \mu_R - \alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_R \\ x_E^* &= \mu_E - \alpha_E \cdot \beta \cdot \sigma_E \end{aligned} \quad (7.9)$$

Ebenso verhält es sich mit dem Zuverlässigkeitsindex β der sich folgendermaßen ergibt:

²⁸Ludwig Otto Hesse (1811-1874)

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_R^2}} \quad (7.10)$$

In den folgenden Abschnitten soll dieser Notation Folge geleistet werden, um eine konsistente Darstellung zur EN 1990 [1] zu gewährleisten.

Da in den derzeit üblichen Bemessungsnormen von charakteristischen Werten ausgegangen wird, die Grenzzustandsfunktion aus Gleichung 7.3 allerdings auf Design-Werten beruht, ist eine Umrechnung mittels Teilsicherheitsfaktoren erforderlich. Da Teilsicherheitsbeiwerte in der Regel > 1 sind, können diese durch Umformen von

$$x_R^* = \frac{x_{R,k}}{\gamma_R} \quad (7.11)$$

für die Beanspruchbarkeitsgröße R und aus

$$x_E^* = \gamma_F \cdot x_{E,k} \quad (7.12)$$

für die Beanspruchungsgröße E berechnet werden.

Folgt man bei der Berechnung von Teilsicherheitsfaktoren dem bisher dargestellten Bemessungskonzept, ergibt sich durch die Berechnung der Wichtungsfaktoren α aus Gleichung 7.8 eine Abhängigkeit des Sicherheitsfaktors auf Widerstandsseite von der Streuung der Einwirkungsseite. Um diese Abhängigkeit zu vermeiden, werden in [1] die Werte $\alpha_E = -0,7$ und $\alpha_R = 0,8$ vorgeschlagen, wenn die Bedingung nach Gleichung 7.13 erfüllt ist.

$$0,16 < \frac{\sigma_E}{\sigma_R} < 7,6 \quad (7.13)$$

Anderenfalls sollte $\alpha = \pm 1,0$ für die Variable mit der größeren Standardabweichung und $\alpha = \pm 0,4$ für die Variable mit der kleineren Standardabweichung verwendet werden. Die festgelegten Werte für α_E und α_R dienen also der Entkoppelung der Beanspruchungs- und Beanspruchbarkeitsgrößen in der Berechnung und machen diese daher von der Varianz der jeweils anderen Größe unabhängig. [1]

7.1.1. Analyse der experimentellen Untersuchungen mittels FORM

Im folgenden Abschnitt wird die Berechnung nach FORM am Beispiel von mit Silikon verklebten HGV-Scheiben gezeigt. Dabei werden zwei unterschiedliche Fälle betrachtet.

7. Zuverlässigkeitsanalyse

Es werden die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen aus Abschnitt 4 verwendet, wobei in Fall 1 auf den Idealfall für die Berechnung von Sicherheitsbeiwerten zurückgegriffen wird, während in Fall 2 ein konservativerer Zugang gewählt wird. Es werden die Probleme in der Berechnung mittels FORM aufgezeigt, sowie die Unterschiede zur direkten Ermittlung der Sicherheitsfaktoren nach EN 1990 [1] dargestellt.

Prinzipiell wäre mit dieser Vorgehensweise auch die Ermittlung des Faktors k_{mod} möglich. Da in der ETAG 002-1 [2] eine Lebensdauer von 25 Jahren vorgesehen ist, würde sich für die Zuverlässigkeitsklasse *RC 2* ein Zuverlässigkeitsindex β von 4,0 ergeben. Für die Berechnung von k_{mod} müsste lediglich Gleichung 7.11 in Gleichung 7.14 abgewandelt werden.

$$x_R^* = \frac{x_{R,k}}{\gamma_R} \cdot k_{mod} \quad (7.14)$$

Für die tatsächliche Ermittlung des Modifikationsbeiwerts k_{mod} mittels FORM liegen jedoch zu geringe statistisch auswertbare Ergebnisse vor. Es können somit weder der Mittelwert μ_R noch Standardabweichung σ_R bestimmt werden, weshalb auf diese Berechnung nachfolgend verzichtet wird.

Um eine Ermittlung dieser Art zu ermöglichen, müsste ein anderer Versuchsablauf gewählt und eine große Anzahl an unterschiedlichen Belastungen überprüft werden. Die hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen hatten jedoch zum Ziel, die tatsächlich von der Klebefuge langfristig aufnehmbare Last zu ermitteln, weshalb die Berechnung von k_{mod} auf deterministischem Wege erfolgen kann.

In diesem Abschnitt soll somit ausschließlich auf die Besonderheiten in der Ermittlung des Materialsicherheitsfaktors γ_M eingegangen werden.

7.1.1.1. Berechnung der Teilsicherheitsbeiwerte, Fall 1

Es sollen nun die in Abschnitt 7.1 vorgestellten Berechnungen auf die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen angewandt werden. Dazu werden im ersten Schritt die Kennwerte von Kleinprobekörpern ohne jegliche Vorbelastung herangezogen. Die detaillierten Ergebnisse sind in Abbildung 4.11 und Tabelle 4.12 dargestellt, die für die Berechnung relevanten Zahlenwerte sind in Tabelle 7.3 nochmals zusammengefasst. Es wird zuerst in Variante A die Berechnung nach FORM und in Variante B die Berechnung mit den Vorgaben der EN 1990 [1] gezeigt.

7.1.1.1.1. Variante A

Bei der Berechnung nach FORM spielt auch die Einwirkungsgröße eine wesentliche Rolle. Geht man von den Kleinprobekörpern aus, entspricht das Belastungsniveau von $0,05 \text{ N/mm}^2$ bei einer Klebefläche von 600 mm^2 einer Last von 30 N . Von diesem Lastniveau wird beispielhaft ausgegangen, da es einen Mittelwert der untersuchten Belastungen darstellt. Es wird eine Streuung der Gleichlast von $32,5\%$ angenommen, die charakteristische Belastung errechnet sich nach derselben Vorgehensweise wie auf Widerstandsseite mit den Beiwerten aus Tabelle 4.1.

Die relevanten Werte sind in Tabelle 7.3 gesammelt dargestellt.

Tab. 7.3.: Statistische Parameter und charakteristische Werte der Basisvariablen, Fall 1

	Klebstoffkennwerte	ständige Last G
Mittelwert	$\tau_m = 1,168 \text{ N/mm}^2$	$\mu_E = 30 \text{ N}$
Standardabweichung	$s_x = 0,070 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_E = 9,750 \text{ N}$
charakteristischer Wert	$\tau_k = 1,028 \text{ N/mm}^2$	$G_k = 45,990 \text{ N}$

Da sich die Grenzzustandsgleichung aus Gleichung 7.3 auf die Bemessungswerte bezieht, ist die Wahl eines Teilsicherheitsfaktors zur Durchführung der FORM notwendig. Auf Einwirkungsseite wird von dem in [1] vorgeschlagenem Wert von $\gamma_G = 1,35$ ausgegangen, während auf Widerstandsseite auf den Wert nach [2] von $\gamma_M = 4,44$ zurückgegriffen wird. Dies ergibt in der Multiplikation den globalen Sicherheitsbeiwert von $\gamma_{tot} = 6,0$.

Da in Tabelle 7.3 für Widerstands- und Einwirkungsseite noch unterschiedliche Einheiten aufscheinen, muss die für die Lastabtragung benötigte Fläche nach Gleichung 7.15 berechnet werden, um auch die Kennwerte auf Seiten des Widerstands in N/mm^2 darstellen zu können.

$$\begin{aligned} \tau_d &= \frac{\tau_k}{\gamma_M} = \frac{1,028}{4,44} = 0,232 \text{ N/mm}^2 \\ G_d &= \gamma_G \cdot G_k = 1,35 \cdot 45,990 = 62,087 \text{ N} \\ A_{erf} &= \frac{G_d}{\tau_d} = \frac{62,087}{0,232} = 268,156 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (7.15)$$

Die Kennwerte des Widerstands ergeben sich somit wie folgt:

$$\begin{aligned} \mu_R &= \tau_m \cdot A_{erf} = 1,168 \cdot 268,156 = 313,206 \text{ N} \\ \sigma_R &= s_x \cdot A_{erf} = 0,070 \cdot 268,156 = 18,771 \text{ N} \end{aligned} \quad (7.16)$$

7. Zuverlässigkeitsanalyse

Anhand dieser Werte und der Mittelwerte sowie der Standardabweichung der Gleichlast können die Verteilungsdichtefunktion in den standardisierten Raum transformiert und die Wichtungsfaktoren α gemäß Gleichung 7.8 berechnet werden, wobei hier der Vorzeichenwechsel nach [1] berücksichtigt wird. Die Wichtungsfaktoren α_R und α_E ergeben sich nach Gleichung 7.17:

$$\begin{aligned}\alpha_R &= \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} = \frac{18,771}{\sqrt{18,771^2 + 9,750^2}} = 0,887 \\ \alpha_E &= -\frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} = -\frac{9,750}{\sqrt{18,771^2 + 9,750^2}} = -0,461\end{aligned}\quad (7.17)$$

Die Berechnung bringt betragsmäßig eine deutlich höhere Gewichtung auf Seiten des Widerstands, was darauf schließen lässt, dass in der üblichen Bemessung die Sicherheit auf Widerstandsseite jene der Einwirkung deutlich übersteigt. Auch die Kontrolle von $\sum \alpha_i^2 = 1$ ist erfüllt.

Mit den vorhandenen Kennwerten lässt sich der Sicherheitsindex β nach Gleichung 7.10 bestimmen:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_R^2}} = \frac{313,206 - 30}{\sqrt{18,771^2 + 9,750^2}} = 13,389 \quad (7.18)$$

Der berechnete Sicherheitsindex β übersteigt die üblichen Werte nach [1], zu sehen in Tabelle 7.2, deutlich. Dies lässt auf eine überaus konservative Bemessung schließen.

In weiterer Folge werden nach Gleichung 7.9 die Koordinaten des Bemessungspunktes P^* rücktransformiert:

$$\begin{aligned}x_R^* &= \mu_R - \alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_R = 313,206 - 0,887 \cdot 13,389 \cdot 18,771 = 90,174 \text{ N} \\ x_E^* &= \mu_E - \alpha_E \cdot \beta \cdot \sigma_E = 30 + 0,461 \cdot 13,389 \cdot 9,750 = 90,174 \text{ N}\end{aligned}\quad (7.19)$$

Es ist auf den ersten Blick erkennbar, dass anhand der in Gleichung 7.19 berechneten Koordinaten die Bedingung $x_R - x_E = 0$ der Grenzzustandsgleichung aus Gleichung 7.3 erfüllt ist.

Nun kann über den Vergleich des Bemessungspunktes P^* mit den charakteristischen Werten aus Tabelle 7.3 mittels Umformen der Gleichungen 7.11 und 7.12 auf die Teilsicherheitsbeiwerte rückgeschlossen werden. Diese ergeben sich wie folgt:

$$\begin{aligned}\gamma_R &= \frac{\tau_k \cdot A_{erf}}{x_R^*} = \frac{1,028 \cdot 268,156}{90,174} = 3,057 \\ \gamma_F &= \frac{x_E^*}{G_k} = \frac{90,174}{45,990} = 1,961\end{aligned}\tag{7.20}$$

Der in Gleichung 7.20 berechnete Wert von γ_R kann mit γ_M gleichgesetzt werden, während γ_F dem Wert für γ_G entspricht. Somit ergibt sich gegenüber den anfangs angenommenen Teilsicherheitsbeiwerten auf Widerstandsseite eine deutliche Reduzierung, während der Beiwert auf Einwirkungsseite steigt. Das Produkt der Sicherheitsbeiwerte bleibt mit 6 gleich. Interessant ist der Beiwert $\gamma_R = 3,057$, welcher in etwa dem vorgeschlagenen Sicherheitsbeiwert aus [5] entspricht, siehe Abschnitt 2.2.2.

Die Wahl von Teilsicherheitsbeiwerten bereits zu Beginn der Berechnung stellt einen negativen Aspekt dar, wobei erwähnt werden muss, dass die Verteilung der Beiwerte zwischen Widerstands- und Einwirkungsseite keine Rolle spielt. Für einen globalen Sicherheitsfaktor von 6 ergibt sich bei denselben Eingangsgrößen unabhängig von den anfangs gewählten γ_M und γ_F in jedem Fall das hier gezeigte Ergebnis.

Ein weiterer negativer Punkt ist die Abhängigkeit der beiden Variablen. Bei einer größeren Streuung der Gleichlast würde sich für den Klebstoff ein anderer Materialsicherheitsfaktor ergeben, obwohl an den Klebstoffkennwerten keine Änderung vorgenommen wird. Dieser Punkt wird durch Vorgaben in der EN 1990 [1] versucht zu umgehen. Die dadurch resultierenden Änderungen werden im Abschnitt 7.1.1.1.2 erläutert.

7.1.1.1.2. Variante B

In der Variante A wurde die Berechnung nach FORM gezeigt, in der EN 1990 [1] werden wegen der gegenseitigen Abhängigkeit von Einwirkung und Widerstand Vorgaben getroffen, um diesen Umstand zu umgehen. Es wird, wie in Tabelle 7.2 angeführt, auch ein Zuverlässigkeitsindex β vorgegeben, der erreicht werden soll.

Die statistischen Parameter aus Tabelle 7.3 werden für diese Variante direkt übernommen, auch die Berechnungen nach Gleichung 7.16 und Gleichung 7.17 bleiben bestehen. Die erste Differenz zeigt sich bei den Wichtungsfaktoren α . In Gleichung 7.21 soll gezeigt werden, dass die Vorgaben aus Gleichung 7.13 erfüllt sind.

$$\frac{\sigma_E}{\sigma_R} = \frac{9,750}{18,771} = 0,519\tag{7.21}$$

Das Verhältnis von σ_E/σ_R liegt zwischen 0,16 und 7,6, womit $\alpha_R = 0,8$ und $\alpha_E = -0,7$

7. Zuverlässigkeitsanalyse

festgelegt werden dürfen.

Da in diesem Beispiel rein die Bestimmung von Teilsicherheitsfaktoren gezeigt werden soll und das Langzeitverhalten noch außer acht gelassen wird, wird der Zuverlässigkeitsindex nach Tabelle 7.2 vereinfacht mit 4,7 festgelegt. Dies basiert auf der Annahme, dass eine HGV-Konstruktion nach EN 1990, Anhang B [1] der Schadensfolgeklasse *CC 2* und der Zuverlässigkeitsklasse *RC 2* zugeteilt werden kann.

Auf Basis dieser Festlegungen kann die Bestimmung der Bemessungskordinaten von P^* gemäß Gleichung 7.9 erfolgen.

$$\begin{aligned}x_R^* &= \mu_R - \alpha_R \cdot \beta \cdot \sigma_R = 313,206 - 0,8 \cdot 4,7 \cdot 18,771 = 242,627 \text{ N} \\x_E^* &= \mu_E - \alpha_E \cdot \beta \cdot \sigma_E = 30 + 0,7 \cdot 4,7 \cdot 9,750 = 62,078 \text{ N}\end{aligned}\tag{7.22}$$

Hier erkennt man direkt die Abweichungen von Variante A aus Abschnitt 7.1.1.1.1, da die Bedingung $x_R - x_E = 0$ der Grenzzustandsgleichung eindeutig nicht eingehalten wird. Im Gegenzug besteht kein Zusammenhang zwischen der Streuung der Einwirkungs- und der Widerstandsgröße.

In weitere Folge können in dieser Variante die resultierenden Teilsicherheitsfaktoren, ident zu Gleichung 7.20 berechnet werden.

$$\begin{aligned}\gamma_R &= \frac{\tau_k \cdot A_{erf}}{x_R^*} = \frac{1,028 \cdot 268,156}{242,627} = 1,136 \\ \gamma_F &= \frac{x_E^*}{G_k} = \frac{62,078}{45,990} = 1,350\end{aligned}\tag{7.23}$$

Auch in diesem Fall können γ_R mit γ_M und γ_F mit γ_G gleichgesetzt werden. Es zeigt sich, dass sich auf Einwirkungsseite für eine Gleichlast bei einer Streuung von 32,5% des Mittelwerts bei Berechnung nach EN 1990 [1] der bekannte Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_F = 1,35$ ergibt. Auf der Widerstandsseite nimmt die Sicherheit gegenüber Variante A deutlich ab, anstatt eines Werts von 3,057 beträgt γ_M in diesem Fall lediglich 1,136. Dies ist vorrangig auf die äußerst geringe Streuung der Ergebnisse der gewählten Serie zurückzuführen. Wird diese erhöht, steigt auch der Sicherheitsfaktor auf der Widerstandsseite automatisch an. Als baupraktisch relevant kann dieses Ergebnis nicht angesehen werden, da einerseits die zur Berechnung herangezogene Stichprobe zu wenige Ergebnisse umfasst und andererseits keine weiteren störenden äußeren Einflüsse betrachtet wurden. Der hier errechnete Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1,136$ kann als unterer Grenzwert für den Bemessungsfall einer HGV-Konstruktion angesehen werden.

7.1.1.2. Berechnung der Teilsicherheitsbeiwerte, Fall 2

Da die erwartete Kurzzeitfestigkeit des Klebstoffs zum Beispiel zur Aufnahme von Windlasten auch nach einer beliebig langen Dauerbelastung durch das Eigengewicht noch gegeben sein soll, ist es sinnvoll, auch die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen mit Vorbelastung in die Berechnung nach FORM miteinzubeziehen. Daher wird im folgenden Abschnitt auf die Ergebnisse aus Tabelle 4.69 zurückgegriffen, in der sowohl die Resultate aus den Versuchen an Klein- als auch an den mittelgroßen Probekörpern berücksichtigt werden. Auf Einwirkungsseite werden dieselben statistischen Daten wie in Abschnitt 7.1.1.1 verwendet.

Da in Abschnitt 7.1.1.1 gezeigt wurde, dass im Rahmen der FORM bereits zu Beginn der Berechnungen die Wahl von Teilsicherheitsfaktoren notwendig ist und diese das Endergebnis beeinflussen, wird nachfolgend eine Parameterstudie gezeigt, bei der Teilsicherheitsfaktoren von $\gamma_M = 1,0$ bis $\gamma_M = 4,5$ zur Anwendung kommen. 4,5 wird auf Basis des aus der ETAG 002-1 [2] rückgerechneten Teilsicherheitsfaktors von 4,44, siehe Abschnitt 2.2.1, als Obergrenze gewählt.

In Tabelle 7.4 sind die wichtigsten statistischen Kennwerte für die weitere Berechnung zusammengefasst.

Tab. 7.4.: Statistische Parameter und charakteristische Werte der Basisvariablen, Fall 2

	Klebstoffkennwerte	ständige Last G
Mittelwert	$\tau_m = 1,035 \text{ N/mm}^2$	$\mu_E = 30 \text{ N}$
Standardabweichung	$s_x = 0,163 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_E = 9,750 \text{ N}$
charakteristischer Wert	$\tau_k = 0,768 \text{ N/mm}^2$	$G_k = 45,990 \text{ N}$

Im ersten Schritt erfolgt die Anpassung der Einheiten, wofür die Berechnung der Designwerte auf Einwirkungs- und Widerstandsseite notwendig ist. Für die ständige Last können die Werte aus Gleichung 7.15 übernommen werden, die Ergebnisse für τ_d und A_{erf} sind abhängig von der Wahl des Teilsicherheitsfaktors γ_M Tabelle 7.5 und Tabelle 7.6 zu entnehmen, wobei die Berechnung ebenfalls ident zu Gleichung 7.15 ausgeführt wird.

Tab. 7.5.: Bemessungswerte der Schubfestigkeit τ_d

τ_d [N/mm^2]	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
CoV 0,157	0,768	0,512	0,384	0,307	0,256	0,219	0,192	0,171

7. Zuverlässigkeitsanalyse

Tab. 7.6.: erforderliche Querschnittsfläche A_{erf}

A_{erf} [mm ²]	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
CoV 0,157	80,875	121,313	161,751	202,189	242,626	283,064	323,502	363,940

In weiterer Folge müssen der Mittelwert μ_R und die Standardabweichung σ_R der Widerstandsseite nach Gleichung 7.16 berechnet werden. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 7.7 und 7.8 ersichtlich.

Tab. 7.7.: Mittelwert der Widerstandsgröße μ_R

μ_R [N]	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
CoV 0,157	83,706	125,559	167,412	209,265	251,118	292,971	334,825	376,678

Tab. 7.8.: Standardabweichung der Widerstandsgröße σ_R

σ_R [N]	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
CoV 0,157	13,183	19,774	26,365	32,957	39,548	46,139	52,731	59,322

Analog zur Vorgehensweise in Abschnitt 7.1.1.1 erfolgt nun die Berechnung der Wichtungsfaktoren α_R und α_E gemäß Gleichung 7.8 im standardisierten Raum, siehe Tabelle 7.9 und 7.10.

Tab. 7.9.: Wichtungsfaktor der Widerstandsseite α_R

α_R	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
CoV 0,157	0,804	0,897	0,938	0,959	0,971	0,978	0,983	0,987

Tab. 7.10.: Wichtungsfaktor der Einwirkungsseite α_E

α_E	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
CoV 0,157	-0,595	-0,442	-0,347	-0,284	-0,239	-0,207	-0,182	-0,162

Mit den bereits errechneten Kennwerten lässt sich gemäß Gleichung 7.10 auch der Zuverlässigkeitsindex β in Abhängigkeit des Teilsicherheitsfaktors γ_M bestimmen. Die berechneten Werte sind in Tabelle 7.11 ersichtlich.

Tab. 7.11.: Zuverlässigkeitsindex β

β	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
<i>CoV</i> 0,157	3,275	4,334	4,888	5,216	5,429	5,576	5,684	5,767

Im nächsten Schritt können nach Gleichung 7.11 die Koordinaten des Bemessungspunkts P^* rücktransformiert werden, siehe Tabelle 7.12 und 7.13.

Tab. 7.12.: Koordinate x_R^* des Bemessungspunktes P^* auf Widerstandsseite

x_R^*	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
<i>CoV</i> 0,157	48,990	48,689	46,531	44,427	42,669	41,241	40,077	39,119

Tab. 7.13.: Koordinate x_E^* des Bemessungspunktes P^* auf Widerstandsseite

x_E^*	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
<i>CoV</i> 0,157	48,990	48,689	46,531	44,427	42,669	41,241	40,077	39,119

Die Grenzzustandsgleichung aus Gleichung 7.3 ist in diesem Fall eindeutig erfüllt. Der Punkt P^* liegt also wie erwartet auf der Grenzzustandsfunktion.

Nun können durch einen Vergleich der Koordinaten des Bemessungspunkts mit den charakteristischen Werten aus Tabelle 7.4 die entsprechenden Teilsicherheitsfaktoren hergeleitet werden. Die Berechnung der in den Tabellen 7.14 und 7.15 dargestellten Werte, erfolgt analog zur Berechnung aus Gleichung 7.23.

Tab. 7.14.: theoretischer Sicherheitsfaktor γ_R auf Widerstandsseite

γ_R	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
<i>CoV</i> 0,157	1,267	1,913	2,669	3,494	4,365	5,269	6,197	7,142

Tab. 7.15.: theoretischer Sicherheitsfaktor γ_F auf Einwirkungsseite

γ_F	Teilsicherheitsbeiwert γ_M							
	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
<i>CoV</i> 0,157	1,065	1,059	1,012	0,966	0,928	0,897	0,871	0,851

Man erkennt, dass die Teilsicherheitsfaktoren in Abhängigkeit des Eingangswerts von γ_M stark variieren. Für den Faktor γ_F , der in diesem Fall mit γ_G gleichgesetzt werden kann, ergeben sich in allen Fällen Beiwerte kleiner als der nach EN 1990 [1] vorgegebene Wert von 1,35. Es erfolgt durch die verhältnismäßig große Streuung der Festigkeitswerte eine Verschiebung der Sicherheit auf Widerstandsseite.

In Tabelle 7.2 wird für die Zuverlässigkeitsklasse *RC 2*, der eine HGV-Konstruktion zugeordnet werden kann, ein Sicherheitsindex von $\beta = 4,7$ verlangt. Dieser Wert stellt sich laut Tabelle 7.11 am ehesten bei einem Ausgangswert von $\gamma_M = 2,0$ ein. Für diesen Eingangsfaktor ergibt sich nach Berechnung nach FORM ein Teilsicherheitsbeiwert γ_R von etwa 2,67, siehe Tabelle 7.14, was in diesem vereinfachten Fall dem Materialsicherheitsfaktor γ_M des untersuchten Klebstoffs entspricht.

7.1.2. Resümee

In Abschnitt 7.1.1.1 wurde die FORM auf Basis der Ergebnisse der Kleinprobekörper ohne jegliche Vorbelastung hergeleitet. Dabei wurde der von der ETAG 002-1 [2] veranschlagte Gesamtsicherheitsfaktor von 6 auf die ständige Last sowie die Materialfestigkeit aufgeteilt. Es ergab sich bei einem Zuverlässigkeitsindex β von etwa 13,4 ein Materialsicherheitsfaktor γ_M von 3,06. Dieser Zuverlässigkeitsindex entspricht einer Versagenswahrscheinlichkeit von etwa $P_f = 10^{-10}$.

Anschließend wurde die Vereinfachung der FORM nach EN 1990 [1] angewandt, um die Abhängigkeit von Einwirkungs- und Widerstandsseite zu vermeiden. Dies resultierte in dem äußerst niedrigen Materialsicherheitsfaktor γ_M von 1,14.

Im Fall 2 aus Abschnitt 7.1.1.2 wurden die statistischen Eingangswerte geändert. Die Annahmen beruhen auf den gesammelten Ergebnissen, unabhängig von Probekörper und Lastgeschichte, der experimentellen Untersuchungen. Dies beruht auf der Annahme, dass die entsprechende Bemessungs-Kurzzeitfestigkeit τ_d auch nach einer gewissen Dauerlast erreicht werden muss. Es wurde eine Parameterstudie, beruhend auf dem zu Beginn der Berechnung abgeschätzten Teilsicherheitsbeiwerten, durchgeführt.

Die Eingangswerte wurden eher auf der unsicheren Seite liegend gewählt, vergleiche dazu

die Festigkeiten nach Abschnitt 7.1.1.1 und nach der AbZ [45]. Daher stellt der bei einem Zuverlässigkeitsindex β von 4,89, entspricht in etwa dem verlangten Zuverlässigkeitsindex β von 4,7 nach Tabelle 7.2, errechnete Materialsicherheitsfaktor γ_M von 2,67 eine gute Näherung für einen möglichen Teilsicherheitsfaktor γ_M dar.

Es wurde gezeigt, dass rein auf Basis der Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung keine prägnante Aussage über den anzuwendenden Teilsicherheitsfaktor γ_M getroffen werden kann, da zu viele Parameter Einfluss auf das Ergebnis haben. Somit kann festgehalten werden, dass Methode *b* aus Abbildung 7.2 alleine keine Basis für die Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten darstellt. Es bedarf ebenso einer ingenieurmäßigen Einschätzung der berechneten Werte. Aus diesem Grund werden in den nachfolgenden Abschnitten noch weitere Berechnungsmodelle zur Herleitung der Beiwerte behandelt, weshalb an dieser Stelle keine endgültige Definition des Teilsicherheitsbeiwerts erfolgen soll.

7.2. Vergleich mit bekannten Bemessungskonzepten

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen aus Abschnitt 4 anhand der Sicherheitskonzepte der HFA und der TU Wien aus den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3 interpretiert werden. Die Bemessungssysteme werden auf die erzielten Ergebnisse umgelegt und ingenieurmäßig bezüglich ihrer Relevanz abgeschätzt.

Es soll zuerst das konservative Sicherheitskonzept der TU Wien aus [19] behandelt werden, bevor auf jenes der HFA aus [5] eingegangen wird.

7.2.1. TU Wien

Das Bemessungskonzept der TU Wien aus dem Forschungsbericht „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept“ [19] wurde bereits in Abschnitt 2.2.3 detailliert vorgestellt. In diesem Abschnitt sollen die vorgestellten Gleichungen auf die erzielten Messergebnisse angewandt werden.

Zu Beginn des Bemessungskonzepts steht die Ermittlung des Abklingbeiwerts α gemäß Gleichung 2.14. Dafür wird die Scherfestigkeit nach 91 Tagen Dauerbelastung und 24 Stunden anschließender Entlastungsphase $\tau_{k,91+1}$ sowie das zugehörige Lastniveau τ_{def} benötigt. Die Festlegung, die Restschubfestigkeit nach 91 Tagen zu verwenden, beruht auf den Vorgaben der ETAG 002-1 [2], Kriechversuche für maximal 91 Tage durchzuführen und der Tatsache, dass bis zum Zeitpunkt der erstellten Arbeit kaum Untersuchungen über einen größeren Zeitraum vorlagen. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit geändert,

7. Zuverlässigkeitsanalyse

es wird hier im ersten Schritt dennoch auf die Schubfestigkeit nach 91 Tagen Dauerlast zurückgegriffen, um ein einheitliches Vorgehen zu gewährleisten.

Setzt man die ermittelten Werte der Serie S1 (Tabelle 4.12) für die Lastniveaus $0,04 N/mm^2$ (Tabelle 4.16) und $0,05 N/mm^2$ (Tabelle 4.22, Tabelle 4.42) sowie aus der Serie S3 für $0,06 N/mm^2$ (Tabelle 4.39 und Tabelle 4.44) in Gleichung 2.14 ein, ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} S1_004_091: \quad & \frac{0,850}{1,028} = 0,827 \\ S1_005_091: \quad & \frac{0,562}{1,028} = 0,547 \\ S3_005_091: \quad & \frac{0,805}{0,745} = 1,081 \\ S3_006_091: \quad & \frac{0,725}{0,745} = 0,973 \end{aligned} \tag{7.24}$$

Nach Gleichung 7.24 ist die Bedingung aus Gleichung 2.14 von $\tau_{k,91+1}/\tau_k \geq 0,8$ für die Lastniveaus $0,04 N/mm^2$ und $0,06 N/mm^2$ erfüllt. Für die Dauerlast von $0,05 N/mm^2$ wird der Grenzwert von $0,8$ in Serie S1 deutlich nicht erreicht. Dazu müssen zwei Punkte festgehalten werden: Zum ersten ist die Herkunft des Grenzwerts von 80% der Anfangsfestigkeit nicht klar, da in der ETAG 002-1 [2] die Grenze mit 75% festgelegt wird. Jedoch wäre auch dieser Grenzwert bezogen auf die 5% -Quantile an dieser Stelle nicht erfüllt. Anders verhält es sich mit den Mittelwerten der Serien, wie bereits in Abbildung 4.24 gezeigt wird.

Zum zweiten sieht man schon in Gleichung 7.24, dass für Serie S3 der Nachweis auch für $0,05 N/mm^2$ erfüllt ist. Nimmt man für die Berechnung aus Gleichung 7.24 die Restscherfestigkeit der Serie S1 nach 182 Tagen (Tabelle 4.23), wäre die Bedingung ebenso eingehalten. Dass es an dieser Stelle mit der Serie S1_005 Probleme gibt, rührt auch aus der Tatsache, dass in dieser Serie jeweils nur fünf Probekörper überprüft wurden, wohingegen die charakteristische Schubspannung τ_k auf Basis der Ergebnisse aus zehn Prüfungen ermittelt wurde, was durch den Beiwert k_n direkten Einfluss auf die Ermittlung der $R_{u,5}$ -Werte hat.

Bezieht man Gleichung 2.14 auf die Ergebnisse der mittelgroßen Probekörper aus Abschnitt 4.4.2, würde die Grenzbedingung für alle Lastniveaus, unabhängig von der Dauer der Vorbelastung, erfüllt sein, siehe Gleichung 7.25. Die Werte werden den Tabellen 4.61, 4.63 und 4.65 entnommen.

$$\begin{aligned}
 M_{004_091}: \quad & \frac{0,754}{0,562} = 1,342 \\
 M_{005_091}: \quad & \frac{0,571}{0,562} = 1,016
 \end{aligned}
 \tag{7.25}$$

Die Lastniveaus $0,05 \text{ N/mm}^2$ und somit in weiterer Folge auch $0,06 \text{ N/mm}^2$ auf Basis dieses Nachweises direkt als mögliche Dauerbelastung auszuschließen, erscheint auf Grund der gewonnen Erkenntnisse als willkürlich. Dennoch soll für die weitere Berechnung das Lastniveau $0,04 \text{ N/mm}^2$ detailliert betrachtet werden, da in diesem Fall der Abklingbeiwert α und somit der Materialsicherheitsfaktor γ_M definitiv mit 6 festgelegt werden kann.

Die Erfüllung von Gleichung 2.14 ist für die Bestimmung von $k_{mod,lang}$ zwingend vorgeschrieben. Der Modifikationsbeiwert für langfristige Einwirkung berechnet sich in weiterer Folge aus Gleichung 2.15 und ergibt sich für die ermittelten Werte nach Gleichung 7.26:

$$k_{mod,lang} = \frac{0,04 \cdot 6}{1,028} = 0,233 \tag{7.26}$$

Die Obergrenze für $k_{mod,lang}$ ist laut [19] allerdings mit 0,2 festgelegt. Somit können die von [19] vorgeschlagenen Bemessungsbeiwerte von $\gamma_M = 6$ und $k_{mod,lang} = 0,2$ bestätigt werden. Der theoretische Wert $k_{mod,lang}$ laut Gleichung 7.26 würde sich für das Lastniveau $\tau_{def} = 0,06 \text{ N/mm}^2$ auf 0,351 erhöhen.

An dieser Stelle soll festgehalten werden, dass das Bemessungskonzept der TU Wien ein allgemeingültiges, für jeglichen Klebstoff anwendbares, darstellen soll. Diesbezüglich haben die streng gesetzten Grenzen durchaus ihre Berechtigung. Es wird allerdings kein Spielraum gewährt, um die Sicherheitsbeiwerte bei entsprechend guten Resultaten des untersuchten Klebstoffs zu verringern. Aus diesem Grund eignet sich diese Art der Berechnung nicht für die direkte Bestimmung von Berechnungsbeiwerten wie γ_M und k_{mod} .

Für die Berechnung des Verformungsbeiwerts k_{def} kommt Gleichung 2.16 zum Einsatz. Diese Gleichung spiegelt das Verhältnis der Kriechverformungen in den ersten 91 Tagen zur elastischen Anfangsverformung wider und nimmt auf die Berechnung von k_{def} aus EN 1995 [7] Bezug. Obwohl die Lastniveaus $0,05 \text{ N/mm}^2$ und $0,06 \text{ N/mm}^2$ laut Gleichung 7.24 bei strenger Interpretation bereits ausgeschlossen werden müssten, wird in weiterer Folge dennoch die Bestimmung von k_{def} mit allen untersuchten Belastungen gezeigt, siehe Gleichung 7.27. Die Werte für die Anfangsverformung w_0 sowie für die Verformung

7. Zuverlässigkeitsanalyse

nach 91 Tagen unter Dauerlast w_{91} werden dafür für Serie S1 Tabelle 4.10, für Serie S2 Tabelle 4.31 und für Serie S3 Tabelle 4.37 entnommen.

$$\begin{aligned} \text{S1_004_365: } & \frac{0,439}{0,189} - 1 = 1,323 \\ \text{S1_005_365: } & \frac{0,530}{0,250} - 1 = 1,120 \\ \text{S2_005_210: } & \frac{0,329}{0,198} - 1 = 0,662 \\ \text{S3_005_091: } & \frac{0,452}{0,195} - 1 = 1,318 \\ \text{S3_006_091: } & \frac{0,671}{0,296} - 1 = 1,267 \end{aligned} \tag{7.27}$$

Es zeigt sich, ausgenommen Serie S2, ein sehr einheitliches Bild. Die Gründe, warum die Verformungen der Serie S2_005_210 in den ersten 91 Tagen derart gering ausfallen, wurden in Abschnitt 4.3.2.1 bereits ausführlich erläutert. Auf Basis der durchgeführten Versuche würde sich ein Verformungsbeiwert k_{def} von etwa 1,3 ergeben. Durch die zusätzlichen Einwirkungen an realen Bauwerken im Vergleich zum Versuchsstand, ist eine weitere Erhöhung ratsam. Beispielhaft sind in Tabelle 4.11 die Verhältniswerte nach längeren Belastungsdauern für Serie S1 angeführt. Analoge Tabellen finden sich auch bei den anderen Serien. Für eine Belastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ würde bei Miteinbeziehung der Verformungswerte nach 365 Tagen der Wert für k_{def} auf 2,63 anwachsen.

Zum Vergleich wird auch hier die Berechnung mit den mittelgroßen Probekörpern in Gleichung 7.28 angeführt. Die Berechnungswerte für w_0 und w_{91} stammen aus Tabelle 4.59.

$$\begin{aligned} \text{M_004_365: } & \frac{0,312}{0,150} - 1 = 1,080 \\ \text{M_005_365: } & \frac{0,411}{0,170} - 1 = 1,418 \end{aligned} \tag{7.28}$$

Auch hier ergeben sich Werte für k_{def} in derselben Größenordnung wie bei den Kleinprobekörpern. Es ist kein Größenfaktor festzustellen.

Die theoretische Verformung nach 25 Jahren Lebensdauer des HGV-Elements ist für die jeweilige Serie in Tabelle 5.1 aus den rheologischen Untersuchungen angegeben. Auf Basis dieser Werte lässt sich eine gute Näherung für k_{def} bestimmen. Es wird Gleichung 2.16 verwendet, jedoch wird die Endverformung nach 25 Jahren anstatt der Verformung nach 91 Tagen w_{91} verwendet.

Wie bereits in Abschnitt 5.1 erläutert, bieten die Modelle der Serien S1_004, S1_005, S3_005 und S3_006 die zuverlässigsten Vorhersagen möglicher Endverformungen. Konservativ kann diese auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse etwa mit $\approx 0,800\text{ mm}$ angenommen werden. Für die Anfangsverformung wird ein Wert von $w_0 = 0,250\text{ mm}$ abgeschätzt. Setzt man diese Annahmen nun in Gleichung 2.16 ein, erhält man folgendes Ergebnis:

$$\frac{0,800}{0,250} - 1 = 2,2 \quad (7.29)$$

Ein Verformungsbeiwert k_{def} von 2,2 wirkt aus ingenieurmäßiger Sicht auf Basis der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse als zuverlässigere und genauere Abschätzung, als jene in den Gleichungen 7.27 und 7.28 berechneten Werte, da die Kriechversuche aus Abschnitt 4 zeigen, dass die Verformungszunahme nach 91 Tagen unter keinem der überprüften Lastniveaus abgeschlossen ist.

7.2.2. Holzforschung Austria

Im Rahmen von [5] hat sich die HFA eines Verformungskriteriums bedient, um die Gesamtsicherheit auf Materialseite festlegen zu können. Der dafür in Gleichung 2.8 ermittelte, im Vergleich zu anderen Bemessungskonzepten niedrige Wert von $1/15$ rührt zu einem großen Teil aus der Annahme von $\tau_k = 0,6\text{ N/mm}^2$. Dieser Wert wurde nicht versuchstechnisch ermittelt, die Versuche in [5] zeigen für die charakteristische Festigkeit $0,824\text{ N/mm}^2$, was mit den Ergebnissen der hier untersuchten Probekörper gut übereinstimmt, siehe Abschnitt 6.1.

Wie in Abschnitt 4 gezeigt wurde, kann im Kriechverhalten kein relevanter Unterschied zwischen den Lastniveaus von $0,04\text{ N/mm}^2$, $0,05\text{ N/mm}^2$ und $0,06\text{ N/mm}^2$ festgestellt werden. Bei allen Dauerschubbeanspruchungen werden die Verformungskriterien und Einschränkungen in der Restscherfestigkeit eingehalten. Somit gibt es keinen Grund, das maximale Dauerschubspannungsniveau auf $\tau_{def} = 0,04\text{ N/mm}^2$ zu beschränken. Diese These wird auch von den Ergebnissen aus [27] bestätigt, wo Schubspannung bis zu $0,30\text{ N/mm}^2$ untersucht und im Versuchsverlauf ein deutliches Abklingen der Kriechverformungen festgestellt wurde. Um die mögliche Dauerschubspannung auf ein derart hohes Lastniveau zu erhöhen, liegen derzeit zu wenige experimentelle Untersuchungen über eine große Zeitspanne vor. Eine Dauerbelastung mit $0,06\text{ N/mm}^2$ erscheint hingegen als durchaus möglich.

Setzt man nun $\tau_{def} = 0,06\text{ N/mm}^2$ und gemäß Tabelle 4.69 $\tau_k = 0,768\text{ N/mm}^2$, ergibt

7. Zuverlässigkeitsanalyse

sich laut Gleichung 2.8 folgende Materialsicherheit für eine Langzeitbelastung:

$$\frac{\tau_{def}}{\tau_k} = \frac{0,06}{0,768} = \frac{1}{12,8} \quad (7.30)$$

Geht man in dieser Berechnung von der idealen Kurzzeitfestigkeit von $\tau_k = 1,028 \text{ N/mm}^2$ laut Tabelle 4.12 aus, erhöht sich die Gesamtsicherheit auf $1/17,13$. Diese Vorgehensweise ist relevant, um Vergleiche zu Abschnitt 7.2.1 und [19], wo direkt auf die charakteristische Festigkeit ohne jegliche Vorbelastung verwiesen wird, ziehen zu können.

Durch die Änderung des Dauerschubspannungsniveaus erreicht man trotz der größeren charakteristischen Festigkeit ähnliche Werte, wie von der HFA in [5] vorgeschlagen. Um kleinere Schwankungen in den Ergebnissen der Experimente auszugleichen, erscheint eine Festlegung des Sicherheitsniveaus auf Widerstandsseite von $\approx 1/15$ als plausibel.

In [5] wurde der Materialsicherheitsfaktor γ_M auf Basis der zyklischen Versuche mit 3 festgelegt. Die Ergebnisse der damaligen Untersuchungen konnten im Rahmen dieser Arbeit bestätigt werden, siehe Abschnitt 6.1, durch die Berechnungen in Abschnitt 7.1 erscheint $\gamma_M = 3$ ebenfalls als möglich.

Für den Modifikationsbeiwert für Langzeitbeanspruchungen $k_{mod,lang}$ würde sich nach Gleichung 2.10 ebenfalls der Wert 0,2 ergeben.

Für den Verformungsbeiwert k_{def} ist laut [5] das Verhältnis der Schubmoduln ohne und nach Dauerbeanspruchung maßgebend, siehe Gleichung 2.11. Für die entsprechenden Ergebnisse aus Abschnitt 4 ergeben sich dabei folgende Werte:

$$\begin{aligned} \text{S1_004_091: } & \frac{0,407}{0,355} = 1,146 \\ \text{S1_005_091: } & \frac{0,407}{0,357} = 1,140 \\ \text{S3_005_091: } & \frac{0,364}{0,378} = 0,963 \\ \text{S3_006_091: } & \frac{0,364}{0,370} = 0,984 \end{aligned} \quad (7.31)$$

Für mittelgroße Versuchskörper ergeben sich die Resultate aus Gleichung 7.32:

$$\begin{aligned} \text{M_004_091: } & \frac{0,470}{0,489} = 0,961 \\ \text{M_005_091: } & \frac{0,470}{0,454} = 1,035 \end{aligned} \quad (7.32)$$

Diese Berechnungen bestätigen die Annahmen aus [5], dass für langfristige Lasten unter

normaler Temperaturbeanspruchung $k_{def} = 1,0$ anzusetzen ist. Für erhöhte Temperaturbeanspruchung wird $k_{def} = 1,6$ ident zu [19] angenommen.

Da k_{def} im Allgemeinen zur Ermittlung der quasiständigen Verformung herangezogen wird, mutet die Bestimmung dessen auf Basis der Schubsteifigkeit aus Kurzzeitversuchen merkwürdig an, ist jedoch an die Bestimmung gemäß EN 1995 [7] angelehnt. Für die Berechnung der Verformung unter quasiständiger Belastung liefert diese Berechnung im Vergleich zu Abschnitt 7.2.1 riskante Werte. Diese würden sich auch nicht ändern, wenn statt der Schubsteifigkeit nach 91 Tagen G_{91} mit jener nach 365 Tagen Dauerbeanspruchung G_{365} gerechnet werden würde.

Plausibler erscheint hier die Verwendung des ebenfalls in [5] vorgestellten kombinierten Verformungsmoduls, der für die Berechnung der Verformung unter Dauerlast herangezogen werden kann. Dieser kombinierte Verformungsmodul G_{ges} berechnet sich nach Gleichung 7.33

$$G_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{kriech}}} \quad (7.33)$$

Der Verformungsmodul ohne Dauerbeanspruchung G_0 kann für Kleinprobekörper Tabelle 4.12 entnommen werden. Der Verformungsmodul unter Kriechen kann aus dem Zusammenhang des Dauerlastniveaus und der entsprechenden Schubgleitung $\tan \gamma$ festgestellt werden. In Abbildung 7.5 sind dafür die Kriechverformungen nach 91 Tagen in Abhängigkeit des Dauerlastniveaus dargestellt.

Da die mittelgroßen Probekörper tendenziell größere Schubsteifigkeiten zeigten (siehe Tabelle 4.68) wird hier nur auf die Kleinprobekörper Bezug genommen, da eine Mischung der Serien das Ergebnis verfälschen würde. Ebenso wird Serie S2 aufgrund der starken Beeinflussung des Kriechverhaltens in den ersten 91 Tagen durch die klimatischen Bedingungen von der Auswertung ausgenommen. Die detaillierte Beschreibung des klimatischen Einflusses findet sich in Abschnitt 4.3.2.1.

Der lineare Zusammenhang zwischen dem Dauerschubspannungsniveau τ_{def} und der Kriechverformung nach 91 Tagen ist in Abbildung 7.5 deutlich zu erkennen. Mit dem aus der Grafik ermittelten Verformungsmodul des Kriechens G_{kriech} kann der kombinierte Verformungsmodul G_{ges} gemäß Gleichung 7.33 folgendermaßen ermittelt werden:

$$G_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{0,407} + \frac{1}{0,512}} = 0,227 \text{ N/mm}^2 \quad (7.34)$$

Für den Verformungsmodul G_0 wird vereinfacht der Verformungsmodul der Serie S1

7. Zuverlässigkeitsanalyse

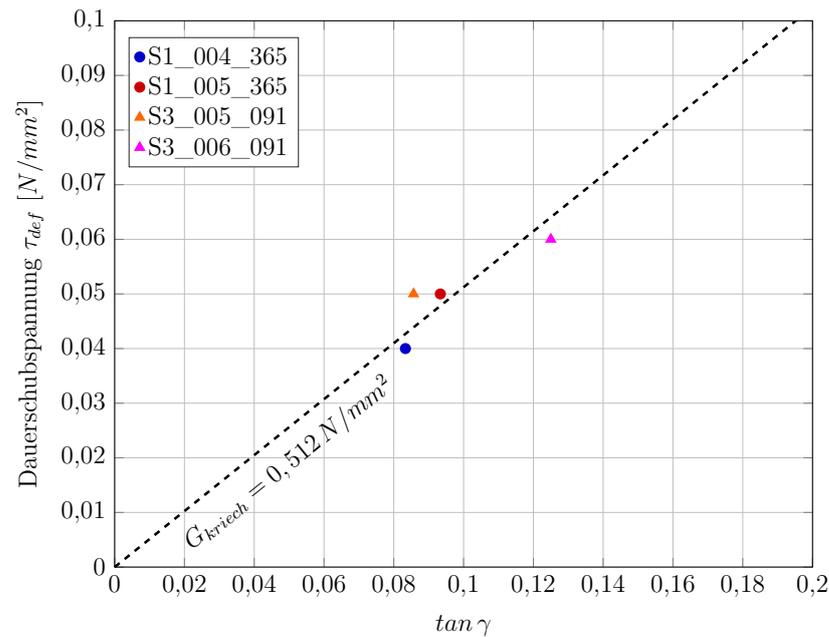


Abb. 7.5.: Schubgleitung zufolge Kriechen nach 91 Tagen Dauerlast in Abhängigkeit vom Belastungsniveau

aus Tabelle 4.12 angenommen.

Das Ergebnis für den kombinierten Verformungsmodul von $G_{ges} = 0,227 \text{ N/mm}^2$ stimmt mit jenem der HFA aus [5] von $0,20 \text{ N/mm}^2$ sehr gut überein.

Nun erscheint es naheliegend zur Berechnung von k_{def} Gleichung 2.11 zu Gleichung 7.35 abzuändern.

$$k_{def} = \frac{G_0}{G_{ges}} = \frac{0,407}{0,227} = 1,794 \quad (7.35)$$

Diese Berechnung liefert deutlich höhere Werte für k_{def} , welcher sich bei der Verwendung der Kriechverformungen nach 365 Tagen weiter deutlich steigern würde. Für diese Zeitspanne liegen bei den Kleinprobekörpern allerdings nur die Ergebnisse der Serie S1 vor, weshalb auf eine detaillierte Auswertung verzichtet wird.

Hier müssten theoretisch die Verformungen nach 25 Jahren in die Berechnung einfließen und Gleichung 7.36 zur Anwendung kommen.

$$k_{def} = \frac{G_0}{G_{ges,fin}} - 1 \quad (7.36)$$

Es ist davon auszugehen, dass bei Kenntnis des Verformungsmoduls $G_{ges,fin}$ k_{def} einen ähnlichen Wert zu jenem aus Gleichung 7.29 annehmen würde.

7.3. Definition von Sicherheitsbeiwerten

In den vergangenen Abschnitten 7.1 und 7.2 wurden unterschiedliche Methoden gezeigt, um aus den experimentellen Untersuchungen die notwendigen Sicherheitsbeiwerte für den Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis des begutachteten Klebstoffs herzuleiten. Es wurden dabei zuerst die Berechnungen gemäß FORM gezeigt, welche auf einer probabilistischen Methode beruht, während anschließend eine deterministische Herangehensweise gewählt wurde. In beiden Abschnitten wurde auf die Besonderheiten und Schwierigkeiten der jeweiligen Methode hingewiesen, weshalb in diesem Abschnitt eine Zusammenfassung und Interpretation der möglichen Ergebnisse dargestellt wird.

Während die Herleitung gemäß EN 1990 [1] den Vorteil der Unabhängigkeit von Einwirkungs- und Widerstandsseite aufweist, ergibt sich dabei im Vergleich zum derzeitigen Normenstand ein äußerst geringer Teilsicherheitsfaktor für die Materialeigenschaft. Diese Ergebnisse erscheinen jedoch auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen als zu riskant. Deutlich realistischere Werte ergeben sich durch die Berechnung nach FORM bei höherem Zuverlässigkeitsindex als durch [1] verlangt.

In den deterministischen Methoden beziehen sich alle bisher definierten Bemessungskonzepte auf eine Belastungsdauer von höchstens 91 Tagen, da bisher langfristige Untersuchungen fehlten. Da im Rahmen dieser Arbeit Probekörper bis zu 365 Tage begutachtet wurden, konnten diese Bemessungskonzepte verfeinert und ergänzt werden. Da dies einen enormen Zeitaufwand voraussetzt, werden Versuchskonzepte über diese Zeitspanne nicht regelmäßig durchgeführt werden. Zur direkten Überprüfung der Materialeigenschaften sind Versuche über 91 Tage durchaus zu empfehlen, es muss aber damit gerechnet werden, dass im weiteren Zeitverlauf zusätzliche Verformungen und eine etwaige Abminderung der Kurzzeitfestigkeit auftreten. Dies muss in der Bestimmung der Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden.

Für den Materialsicherheitsfaktor γ_M wurden in Abschnitt 7.1 Werte zwischen 1,14 und 3,06 hergeleitet. Die Gründe, warum die niedrigeren Ergebnisse zur weiteren Berechnung nicht in Frage kommen, wurden in Abschnitt 7.1.2 bereits erläutert. Während sich laut dem Bemessungskonzept der TU Wien [19] aus Abschnitt 7.2.1 $\gamma_M = 6$ ergibt, stimmen die höheren Berechnungsergebnisse der FORM mit den Annahmen der HFA [5] aus Abschnitt 7.2.2 gut überein. Weshalb die Ansätze der TU Wien für den vorliegenden Fall nicht direkt umlegbar sind, wurde in Abschnitt 7.2.1 aufgezeigt.

Es kann nach dem derzeitigen Stand der Kenntnisse davon ausgegangen werden, dass

7. Zuverlässigkeitsanalyse

$\gamma_M = 3$ für reine Schubbeanspruchung eine realistische Annahme darstellt. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass Lastüberlagerungen aus Wind, Eigengewicht und etwaigen Schiefstellungen, wie sie in realen Bauwerken auftreten können, noch nicht ausreichend untersucht wurden. Kurzzeitige Einwirkungen wie Wind treten über die gesamte Nutzungsdauer auf, zum jeweiligen Zeitpunkt kann es also bereits Schwächungen des Materials durch fortschreitendes Kriechen geben. Diese Auswirkung muss in die Bemessung der Kurzzeitfestigkeit mit eingehen. Für das gemeinsame Auftreten unterschiedlicher Einwirkungen erscheint daher der Materialsicherheitsfaktor von $\gamma_M = 3$ als riskant, weshalb eine Annahme von $\gamma_M = 3,5$ empfohlen wird. Dies stellt einen Mittelweg aus dem berechneten Wert von 3 und dem sich laut ETAG 002-1 [2] für veränderliche Einwirkungen aus dem globalen Sicherheitsfaktor $\gamma_{tot} = 6$ ergebenden Materialsicherheitsfaktor von $\gamma_M = 4$ dar.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen die Vorteile des behandelten Silikonklebstoffs unter dauerhafter Schubbeanspruchung und den geringen Einfluss der Langzeitbelastung auf die Materialeigenschaften. Der derzeit vorgesehene Beiwert $k_{mod,lang}$ laut ETAG 002-1 [2] von 0,1 erscheint daher als deutlich zu konservativ. Bereits in den Forschungsarbeiten der HFA und der TU Wien wurde eine Erhöhung auf $k_{mod,lang} = 0,2$ vorgeschlagen. Durch die in Abschnitt 4 gewonnenen Erkenntnisse scheint eine weitere Steigerung von $k_{mod,lang}$ durchaus möglich. Wendet man das Modell der HFA aus Gleichung 2.9 mit den in Abschnitt 7.2.2 für die Gesamtsicherheit auf Materialseite gewonnenen Erkenntnissen an, ergeben sich nach Gleichung 7.37 folgende Sicherheiten:

$$\frac{\tau_{def}}{\tau_k} = \frac{k_{mod,lang}}{\gamma_M} = \frac{k_{mod,lang}}{3,5} = \frac{1}{17,13} \text{ bis } \frac{1}{12,8} \quad (7.37)$$

Durch Umformen kann $k_{mod,lang}$ im Bereich folgender Grenzwerte angenommen werden:

$$\begin{aligned} \frac{3,5}{17,13} &\leq k_{mod,lang} \leq \frac{3,5}{12,8} \\ 0,20 &\leq k_{mod,lang} \leq 0,28 \end{aligned} \quad (7.38)$$

Laut den Berechnung nach dem Bemessungskonzepts der TU Wien aus Abschnitt 7.2.1 ergaben sich abgesehen vom vorgegebenen Grenzwert von $k_{mod,lang} \leq 0,2$ Werte für $k_{mod,lang}$ zwischen 0,23 und 0,35. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Gleichung 7.38 und aus Interpretation der Ergebnisse der Langzeituntersuchungen aus Abschnitt 4 kann $k_{mod,lang} = 0,25$ festgelegt werden. Gemeinsam mit dem Materialsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 3,5$ resultiert dies in einer Gesamtsicherheit auf Widerstandsseite von $1/14$ und liegt

damit sehr nah an der vorgeschlagenen Sicherheit der HFA aus [5] von $1/15$. Verglichen mit jenem Sicherheitskonzept ergibt sich eine Verschiebung der Sicherheitsbeiwerte, mit einer strengeren Berücksichtigung der veränderlichen Einflüsse, wohingegen die Sicherheit bezüglich ständiger Einwirkungen durch die Erhöhung des Modifikationsbeiwerts $k_{mod,lang}$ beinahe gleich bleibt.

Bezüglich des Verformungsbeiwerts k_{def} für die Anwendung der HGV-Elemente in Fassaden haben sich in den Abschnitten 7.2.1 und 7.2.2 unterschiedliche Ansätze ergeben. Eine Bestimmung mittels FORM war auf Basis der bisherigen Versuchsergebnisse nicht möglich. Dafür wurde in Abschnitt 5.1 anhand rheologischer Untersuchungen eine Abschätzung der Verformung nach 25 Jahren durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden anhand des Bemessungskonzepts der TU Wien in Gleichung 7.29 angewandt. Dabei wurde $k_{def} = 2,2$ ermittelt. Es zeigt sich hier ein höherer Wert als von der HFA in [5] und der TU Wien in [19] mit $1,6$ veranschlagt. Auch die Berechnung anhand des kombinierten Kriechfaktors G_{ges} aus Gleichung 7.35 liefert ein größeres Ergebnis.

Betrachtet man die Kriechkurven der experimentellen Untersuchungen aus Abschnitt 4 erscheint die Annahme von $k_{def} = 1,6$ in Anbetracht des kurzen Beobachtungszeitraums als zu gewagt. In der weiteren Nutzungsdauer können durch zusätzliche Lastüberlagerungen und außergewöhnliche klimatische Einflüsse nicht abschätzbare Erscheinungen auftreten, die das weitere Verformungsverhalten der Klebefuge beeinflussen. Aus diesen Gründen wird eine Erhöhung des Verformungsbeiwerts auf $k_{def} = 2,2$ empfohlen.

Zusammengefasst werden aus der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse für den verwendeten Klebstoff folgende bemessungsrelevante Beiwerte empfohlen:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad \gamma_M &= 3,5 \\ \Rightarrow \quad k_{mod,lang} &= 0,25 \\ \Rightarrow \quad k_{def} &= 2,2 \end{aligned}$$

Es soll festgehalten werden, dass die hier unterbreiteten Sicherheitsbeiwerte lediglich für den untersuchten Klebstoff vorgeschlagen werden. Für anderen Klebstoffe sind ähnliche Untersuchungen durchzuführen. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass für ähnliche zweikomponentige Silikonklebstoffe, wie jenem, der in der Fassade des Gebäudes des ift-Rosenheim verwendet wurde, siehe Abschnitt 6.3, dieselben Bemessungsbeiwerte angewandt werden können. Für Epoxidharze oder Acrylate sind hingegen weitreichendere Untersuchungen, wie sie unter anderem von der TU Dresden in [27] durchgeführt wurden, notwendig, um etwaige Sicherheitsbeiwerte herleiten zu können.

7. Zuverlässigkeitsanalyse

Die Festigkeiten des untersuchten Silikonklebstoffs reichen bereits aus, um das Eigengewicht von üblichen Isolierglasscheiben nach den vorgeschlagenen Bemessungsansätzen dauerhaft abtragen zu können. In Abbildung 7.6 ist die maximale Größe einer beispielhaften Isolierglasscheibe mit Dreifachverglasung dargestellt. Dabei wurden aufgrund der Geometrie, die eine größere Höhe als Breite aufweist, vereinfacht nur die vertikalen Klebefugen zur Lastabtragung für die Berechnung herangezogen. Die Annahmen liegen somit auf der sicheren Seite.

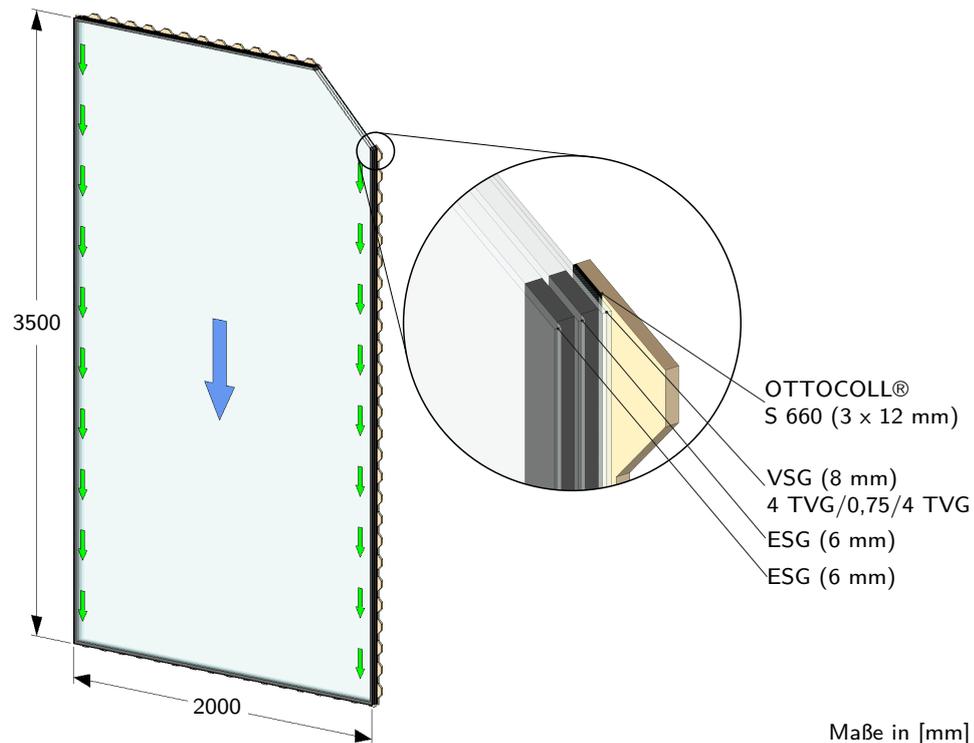


Abb. 7.6.: Maximale Größe einer beispielhaften Isolierglasscheibe

Es zeigt sich, dass die Lasten geschosshoher Fassadenelemente, bei Berechnung mit den vorgeschlagenen Sicherheitsbeiwerten, dauerhaft abgetragen werden können und somit auf eine mechanische Halterung der Isolierglasscheibe verzichtet werden kann. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass auch die Klebefugen zwischen den einzelnen Scheiben eine entsprechende Tragfähigkeit aufweisen.

8. Resümee und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wird in Kombination mit einem Forschungsprojekt der TU Wien [8] ein umfangreiches Versuchskonzept entworfen, durchgeführt und ausgewertet, um die Eigenschaften der Silikonverklebung von HGV-Konstruktionen unter bestimmten äußeren Einwirkungen genauer kennenzulernen und zu untersuchen. Die erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 4 ausführlich behandelt. In den darauf folgenden Abschnitten 5 und 6 werden die Versuchsergebnisse mittels mechanischer Modelle und FE-Methode analysiert und mit anderen experimentellen Untersuchungen verglichen. Daraus können wichtige Erkenntnisse zur Bestimmung der Zuverlässigkeit der erzielten Ergebnisse gewonnen werden.

Basierend auf den daraus resultierenden Erfahrungen wird in Abschnitt 7 der Versuch gewagt, die Untersuchungen mittels probabilistischer und deterministischer Methoden auszuwerten und auf notwendige Sicherheitsbeiwerte eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts rückzuschließen. Da in der gesamten Arbeit der Schwerpunkt auf das Langzeitverhalten von Silikonverklebungen gelegt wird, war vor allem der Bestimmung der Sicherheitsbeiwerte γ_M , $k_{mod,lang}$ und k_{def} große Aufmerksamkeit gewidmet. Für alle drei genannten Beiwerte wird in Abschnitt 7.3 ein Vorschlag zur weiteren Verwendung in der Bemessung von HGV-Konstruktionen eingebracht. Dieser Vorschlag wird mit bereits bekannten Bemessungskonzepten verglichen und die Gründe für etwaige Abweichungen detailliert erläutert.

Im Vergleich zur derzeit gültigen Technischen Richtlinie ETAG 002-1 [2], die zwar lediglich für SSG-Systeme mit Aluminium- und nichtrostenden Stahlkonstruktionen Gültigkeit besitzt, jedoch häufig als Basis zur Bemessung von HGV-Konstruktionen herangezogen wird, wird bezüglich einer ständigen Dauerlast eine Verringerung der Gesamtsicherheit von $1/60$ auf $\sim 1/19$ vorgeschlagen, da die Untersuchungen der Silikonverklebung deutlich größeres Potential in der Aufnahme von Dauerlasten zeigen als überwiegend angenommen. Dies bestätigen auch weitere Forschungsarbeiten [5, 27, 46, 71, 72]. Der Gesamtsicherheitsfaktor resultiert aus dem Sicherheitsfaktor auf Widerstandsseite von $1/44,44$ laut EATG 002-1 [2] beziehungsweise $1/14$ nach Abschnitt 7.3 und dem

Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_F = 1,35$ für ständige Dauerlasten.

Diese Sicherheit ist verglichen zu anderen Baustoffen trotz der Abminderung äußerst konservativ, vergleiche hierzu Abbildung 2.5. Dennoch ist viel weitere Forschungs- und Überzeugungsarbeit notwendig, um höhere Akzeptanz geringerer Sicherheiten für Silikonklebstoffe im Bauwesen zu etablieren. Während im Automobilbau die Verwendung lastabtragender Silikonverklebungen seit Jahrzehnten anerkannt ist, herrscht im Bausektor enorme Skepsis. Um das Vertrauen zu erhöhen sind Freilandversuche wie jene des Logistikzentrums der Firma Otto-Chemie, erläutert in Abschnitt 6.4 sowie in [70–72], von enormer Wichtigkeit. Mit derartigen Monitoringkonzepten kann die Zuverlässigkeit tragender Verklebungen an realen Bauwerken unter tatsächlich auftretenden Umwelteinflüssen nachgewiesen werden. Eine Fortführung der Untersuchungen über die vorgesehene Dauer von 10 Jahren sowie eine detaillierte Auswertung der Versuchsergebnisse inklusive entsprechender Veröffentlichung sind unabdingbar, um den gesamten Bausektor von der Leistungsfähigkeit von Verklebungen zu überzeugen und eine Minimierung der vorgeschriebenen Berechnungsbeiwerte zu erreichen.

Die klimatischen Bedingungen und weitere äußere Einwirkungen hatten im Zuge dieser Arbeit großen Einfluss auf die Verformungsmessungen während der Dauerlastversuche. Die Auswirkungen resultierten weitgehend aus der Formänderung der BFU-Leiste, wie im Abschnitt 4 gezeigt wurde. Daher wäre es ratsam, einen anderen Versuchsaufbau zu wählen und an reinen Klebstoffproben die entsprechenden Eigenschaften zu überprüfen und mit den hier vorgestellten Ergebnissen zu vergleichen. Somit können unerwünschte Einflüsse aus dem Substrat ausgeschlossen werden. Im Zuge weiterer Forschungsarbeiten sollen idente Versuchsszenarien mit unterschiedlichen Klebstoffen durchgeführt werden, um auf ein gemeinsames Sicherheitskonzept schließen zu können.

An der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung²⁹ (BAM) wurde ein Prüfkonzept entworfen, welches den gesamten Lebenszyklus einer SSG-Verklebung simuliert. Dabei erfolgt zyklisch eine mehrachsige Beanspruchung der Klebefuge sowie eine den Anforderungen der ETAG 002-1 [2] entsprechende Bewitterung. Das gesamte Prüfkonzept sowie erste Ergebnisse werden unter anderem in [83, 84] vorgestellt. Auf Basis der durch dieses Versuchsprogramm gewonnenen Daten soll eine sicherheitstechnische Beurteilung durchgeführt werden, um eine Reduktion der Bemessungsbeiwerte zu erwirken und SSG-Fassaden ein größeres Einsatzspektrum zu eröffnen. Mit Hilfe des vorgestellten Prüfkonzepts können diverse Klebstoffe auf ihre Eignung als lastabtragende Verklebung über eine Lebensdauer von bis zu 50 Jahren überprüft werden.

²⁹Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, D-12205 Berlin

Ein weiterer Klebstoff, der sich für den Einsatz an HGV-Konstruktionen eignet, wird derzeit an einem Prototypen der TU Dresden in Zusammenarbeit mit der Firma Gump & Maier³⁰ getestet. Zusätzlich zum Eigengewichtsabtrag werden dort die Glasscheiben auch zur Aussteifung des Gebäudes herangezogen. Die Klebefuge wird somit durch weitere Kräfte beansprucht, wodurch es zu umfangreichen Lastüberlagerungen kommt. An diesem Projekt kann vor allem der Einsatz alternativer, steiferer Klebestysteme überprüft werden, um dem Ziel der Gebäudeaussteifung durch HGV-Elemente durch größere Elementsteifigkeiten Rechnung zu tragen.

Die derzeit marktüblichen Konzepte [45] weisen eine zu geringe Steifigkeit gegenüber horizontal in Scheibenebene wirkenden Kräften auf, um eine ausreichende Aussteifung größerer Gebäude zu realisieren. Aus diesem Grund wurde bereits 2011 von der TU Wien ein alternatives System vorgestellt [19], welches die Übertragung höherer Kräfte gewährleisten soll. Ein Querschnitt der entwickelten Konstruktion ist in Abbildung 2.2(b) dargestellt. Dieses Prinzip der gleichzeitigen umlaufenden Schubverklebung mit zusätzlicher Klotzung der Glasscheibe in den Eckbereichen wurde bis dato jedoch nicht an realen Bauwerken eingesetzt. Es würde sich der Vorteil ergeben, die Elemente kraftschlüssig aneinander reihen zu können [85] und dadurch eine höhere Steifigkeit zu erreichen. Eine umfangreiche Studie des Potentials zur Gebäudeaussteifung mittels HGV-Konstruktionen wurde bereits in [21, 32] vorgestellt. Es wurde auch das Für und Wider gekoppelter Konstruktionen diskutiert. Vor Allem die Lagerung der HGV-Elemente inklusive der Anschlussdetails an die übrigen Bauteile stellt dabei noch eine große Herausforderung dar. Um den Marktanteil von HGV-Konstruktionen zu erhöhen, bedarf es auf diesem Gebiet in den nächsten Jahren noch weiterer Forschungsarbeit, insbesondere an Hand von Großprobenversuchen an real einzubauenden Elementen. Anhand solcher Untersuchungen könnte das tatsächliche Aussteifungspotential besser erforscht und im Idealfall erhöht werden.

Die Entwicklungsarbeit im Holz-Glas-Verbundbau ist in den letzten Jahren weit fortgeschritten, dennoch gibt es immer noch offene Punkte, die einer Klärung bedürfen. Einerseits sind das die immer noch unbekanntenen Reaktionen der Klebstoffe auf Lastüberlagerungen nach vorangegangener Alterung. Andererseits herrscht noch Unklarheit über die Möglichkeit, tatsächlich mehrgeschossige Gebäude mittels HGV-Elementen auszusteiern. Während für das Langzeitverhalten hauptsächlich Untersuchungen an realen Bauwerken und langfristige Studien des Verformungsverhalten unter den unterschiedlichsten äußeren Einflüssen notwendig sind, sind zur Erforschung und Erhöhung des

³⁰Gump & Maier GmbH, Hauptstraße 65, D-86637 Binswangen

8. Resümee und Ausblick

Aussteifungspotentials noch weitere Laborversuche und technische Entwicklungen nötig, um eine wirtschaftlich und statisch sinnvolle Lösung anbieten zu können.

Nur wenn diese Punkte erreicht werden, kann den Anforderungen von Bauherrn sowie planenden und ausführenden Firmen Genüge geleistet werden, um einen vermehrten Einsatz von HGV-Konstruktionen an Bauwerken zu erzielen.

A. Anhang

A.1. Datenblatt OttoColl[®] S660

Siehe ab nächster Seite.

OTTOCOLL®**S 660****Technisches Datenblatt****Eigenschaften:**

- Neutraler, kondensationsvernetzender 2K-Silicon-Klebstoff auf Alkoxy- Basis
- Extrem UV-beständig, reiß- und kerbfest
- Nicht korrosiv
- Sehr gute Haftung auf Glas und Holz
- Hoher Dehn-Spannungswert gewährleistet eine hohe Stabilität der Klebung
- Härtet bei Raumtemperatur
- Minimale Geruchsbelästigung
- Reduzierte Zykluszeiten – aufgrund der schnellen Aushärtung können geklebte Teile extrem schnell weiterverarbeitet werden
- Hohe mechanische Belastbarkeit
- Geringer Volumenschwund während der Aushärtung (ca. 4%)
- Sehr gute Temperaturbeständigkeit
- Hervorragende Beständigkeit gegenüber Wasser und Feuchtigkeit

Anwendungsgebiete:

- Kleben von Holz-Glas-Verbundelementen
- Spannungsausgleichendes Kleben und Dichten unterschiedlicher Werkstoffe wie Glas, Holz, Metall und Kunststoffe

Normen und Prüfungen:

- Zertifiziert nach GOS

Besondere Hinweise:

Vor dem Einsatz des Produktes hat der Anwender sicherzustellen, dass die Werkstoffe/Materialien in dem Kontaktbereich mit diesem und miteinander verträglich sind und sich nicht schädigen oder verändern (z. B. verfärben). Bei Werkstoffen/Materialien, die in der Folge im Bereich des Produktes verarbeitet werden, hat der Anwender im Vorfeld abzuklären, dass deren Inhaltsstoffe bzw. Ausdünstungen zu keiner Beeinträchtigung oder Veränderung (z. B. Verfärbung) des Produktes führen können. Gegebenenfalls hat der Anwender Rücksprache mit dem jeweiligen Hersteller der Werkstoffe/Materialien zu nehmen.

Die konstruktiven Details der Klebung müssen mit unserer Anwendungstechnik abgestimmt werden, insbesondere die Verträglichkeit mit Kontaktmaterialien wie Isolierglasrandverbund, Dichtungen etc.

Bei der Aushärtung werden allmählich geringe Mengen Alkohol frei.

Während der Verarbeitung und Aushärtung für gute Belüftung sorgen.

Nach erfolgter Aushärtung ist das Produkt völlig geruchlos, physiologisch unbedenklich und indifferent. Verarbeitung mit Druckluftpistole P TS 460 XH

Technische Daten:**Einzelkomponenten:
Komponente A**

Farbe	weiß
Viskosität bei 23 °C	pastös
Dichte bei 23 °C nach ISO 1183-1 [g/cm ³]	~ 1,31
Lagerstabilität bei 23 °C/50 % rLf [Monate]	8

OTTOCURE S-CA 2010

Farbe	schwarz
Viskosität bei 23 °C	pastös, standfest
Dichte bei 23 °C nach ISO 1183-1 [g/cm³]	~ 1,17
Mischungsverhältnis nach Gewicht (Grundmasse A : Härter B)	11,0 : 1
Mischungsverhältnis nach Volumen (Grundmasse A : Härter B)	10 : 1
Lagerstabilität bei 23 °C/50 % rLf [Monate]	8

**Unvulkanisierte Masse:
mit OTTOCURE S-CA 2010**

Farbe	schwarz
Viskosität bei 23 °C	pastös, standfest
Dichte bei 23 °C nach ISO 1183-1 [g/cm³]	~ 1,3
Verarbeitungstemperatur von/bis [°C]	+ 5 / + 30
Shore-A-Härte nach 4 h	~ 25 - 30
Shore-A-Härte nach 24 h	~ 38 - 42
Shore-A-Härte nach 3 d	~ 45
Topfzeit bei 23 °C/50 % rLf [min]	~ 15 - 35
Volumenschwund nach ISO 10563 [%]	~ 4

Vulkanisat:

Dichte bei + 23 °C [g/cm³]	~ 1,3
Shore-A-Härte nach ISO 868	~ 45
Temperaturbeständigkeit von/bis [°C]	- 40 / + 150
Zugfestigkeit nach ISO 37, S3A [N/mm²]	~ 2,9
Reißdehnung nach ISO 37, S3A [%]	~ 350
Dehnspannungswert bei 100 % nach ISO 37, S3A [N/mm²]	~ 1,0

Diese Werte sind nicht zur Erstellung von Spezifikationen bestimmt. Bitte wenden Sie sich vor der Erstellung von Spezifikationen an OTTO-CHEMIE.

Vorbehandlung:

Die Haftflächen müssen gereinigt und jegliche Verunreinigungen, wie Trennmittel, Konservierungsmittel, Fett, Öl, Staub, Wasser, alte Kleb-/Dichtstoffe sowie andere die Haftung beeinträchtigende Stoffe entfernt werden. Reinigen von nicht-porösen Untergründen: Reinigung mit OTTO Cleaner T (Ablüfzeit ca. 1 Minute) und sauberem, flusenfreiem Tuch. Reinigen von porösen Untergründen: Oberflächen mechanisch, z.B. mit einer Stahlbürste oder einer Schleifscheibe, von losen Partikeln säubern. Die Haftflächen müssen sauber, fettfrei, trocken und tragfähig sein.

Grundierungstabelle:

Die Anforderungen an elastische Abdichtungen und Klebungen sind abhängig von den jeweiligen äußeren Einflüssen. Extreme Temperaturschwankungen, Dehn- und Scherkräfte, wiederholter Kontakt mit Wasser etc. stellen hohe Ansprüche an eine Haftverbindung. In solchen Fällen ist bei Empfehlungen (z.B. +/OTTO Primer 1216) die Verwendung des genannten Primers ratsam, um eine möglichst belastbare Verbindung zu erzielen.

Glas	+
Holz, unbehandelt	+ (1)
GFK	1101

1) Bei starker Wasserbelastung bitten wir um Rücksprache mit unserer Anwendungstechnik.

+ = ohne Grundierung gute Haftung

- = nicht geeignet

T = Test/Vorversuch empfohlen

Anwendungshinweise:

Maximale Abweichung vom Mischungsverhältnis: Das angegebene Mischungsverhältnis kann um maximal +/- 10 % variiert werden, um die Aushärtezeit zu beeinflussen.

Verarbeitung 2K-Kleb- und Dichtstoffe aus side-by-side Kartusche:

Zuerst werden die Verschlussstöpsel der beiden Komponenten entfernt. Kartusche in die Pistole einlegen. Material ausdrücken, bis bei beiden Komponenten Material austritt. Material abwischen und Statikmischer mit Überwurfmutter befestigen. Homogenität der Mischung prüfen.

Für Dichtungen der Misch- und Dosieranlage, die in direktem Kontakt mit dem Kleb-/ Dichtstoff stehen, empfehlen wir (weichmacherfreie) EPDM-Dichtungen zu verwenden. Bei Einsatz anderer Dichtungsmaterialien bitten wir um Rücksprache mit der Anwendungstechnik.

Luft einschließen während des Mischens sind zu vermeiden. Dazu empfehlen wir die Verwendung einer Mischanlage.
Die Umgebungstemperatur während der Aushärtung darf maximal 60 °C betragen.
Die Komponente A reagiert nicht mit Luftfeuchtigkeit und ist unter Normalbedingungen (23° C, 50 % rLF) stabil.
Die Komponente B ist empfindlich gegenüber Luftfeuchtigkeit und muss deshalb vor Feuchtigkeit geschützt werden.
Um optimale Haftung und gute mechanische Eigenschaften zu erzielen, muss der Einschluß von Luft in der Klebfuge vermieden werden.
Verarbeiten/Glätten: Der Kleb-/Dichtstoff muss innerhalb seiner Topfzeit geglättet werden, um den innigen Kontakt mit der Haftfläche und den Flanken zu gewährleisten. Es darf kein Glättmittel verwendet werden.
Wegen der Vielzahl möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung und der Anwendung ist vom Verarbeiter stets eine Probeverarbeitung und -anwendung vorzunehmen.
Das konkrete Aufbrauchsdatum ist dem Gebindeaufdruck zu entnehmen und zu beachten.
Wir empfehlen, unsere Produkte in den ungeöffneten Originalgebinden trocken (< 60 % rLF) im Temperaturbereich von + 15° C bis + 25° C zu lagern. Werden die Produkte über längere Zeiträume (mehrere Wochen) bei höherer Temperatur/ Luftfeuchtigkeit gelagert und / oder transportiert, kann eine Verringerung der Haltbarkeit bzw. eine Veränderung der Materialeigenschaften nicht ausgeschlossen werden.
Zur Sicherstellung der korrekten Mischung sind vom Anwender verarbeitungsbegleitende Qualitätskontrollen durchzuführen. Die jeweils erforderlichen Prüfungen sind dem Dokument "Verarbeitungsbegleitende Qualitätskontrollen 2K-Silicone" zu entnehmen, das über die Anwendungstechnik erhältlich ist.

Lieferform: Gebinde und Farben auf Anfrage

Sicherheitshinweise: Bitte das Sicherheitsdatenblatt beachten.

Entsorgung: Hinweise zur Entsorgung siehe Sicherheitsdatenblatt.

Mängelhaftung: Alle Angaben in dieser Druckschrift basieren auf derzeitigen technischen Kenntnissen und Erfahrungen. Sie befreien den Verarbeiter wegen der Vielzahl möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung und Anwendung nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Die Angaben in dieser Druckschrift und Erklärungen der Otto-Chemie im Zusammenhang mit dieser Druckschrift stellen keine Übernahme einer Garantie dar. Garantieerklärungen bedürfen zu ihrer Wirksamkeit der gesonderten ausdrücklichen schriftlichen Erklärung der Otto-Chemie. Die in diesem Datenblatt angegebenen Beschaffenheiten legen die Eigenschaften des Liefergegenstandes umfassend und abschließend fest. Verwendungsvorschläge begründen keine Zusicherung der Eignung für den empfohlenen Einsatzzweck. Wir behalten uns das Recht zur Anpassung des Produktes an den technischen Fortschritt und an neue Entwicklungen vor. Für Anfragen stehen wir gerne zur Verfügung, auch bezüglich etwaiger spezieller Anwendungsproblematiken. Unterliegt die Anwendung, für die unsere Produkte herangezogen werden, einer behördlichen Genehmigungspflicht, so ist der Anwender für die Erlangung dieser Genehmigungen verantwortlich. Unsere Empfehlungen befreien den Anwender nicht von der Verpflichtung, die Möglichkeit der Beeinträchtigung von Rechten Dritter zu berücksichtigen und, wenn nötig, zu klären. Im Übrigen verweisen wir auf unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen, insbesondere auch bezüglich einer etwaigen Mängelhaftung. Sie finden unsere AGB unter <http://www.otto-chemie.de>

A.2. Rheologische Modellierung der Messergebnisse

Tab. A.1.: Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S1 mit einer Dauerbelastung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$

	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
E_0	0,18236	247,92	1057,2	84,680
E_1	0,10556	0,16036	0,42920	0,20412
λ_1	98,470	0,93480	2,3700	0,67980
E_2		0,10860	0,24560	0,10512
λ_2		124,50	2,7140	448,20
E_3			0,10856	1,4680
λ_3			132,70	3,2800
E_4				0,22704
λ_4				46,130
RSS	0,11010	0,07001	0,06967	0,05647
R^2	0,92670	0,9534	0,9536	0,96240
\bar{R}^2	0,92530	0,95150	0,95080	0,95930
$RMSE$	0,03269	0,02633	0,02653	0,02413
365 Tage $[mm]$	0,589	0,598	0,601	0,612
25 Jahre $[mm]$	0,598	0,618	0,625	0,780

Tab. A.2.: Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S1 mit einer Dauerbelastung von $0,05 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$

	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
E_0	0,18535	612,50	750,50	610,00
E_1	0,11745	0,12255	0,12390	0,78100
λ_1	88,100	110,70	95,760	3,9370
E_2		0,16325	0,70250	0,17955
λ_2		0,86360	0,01205	335,80
E_3			0,22410	0,21095
λ_3			1,1160	0,65730
E_4				0,22450
λ_4				63,990
RSS	0,13570	0,08206	0,12410	0,07371
R^2	0,92900	0,95710	0,93520	0,96140
\bar{R}^2	0,92760	0,95540	0,93140	0,95830
$RMSE$	0,03630	0,02850	0,03510	0,02757
365 Tage $[mm]$	0,689	0,699	0,689	0,708
25 Jahre $[mm]$	0,695	0,714	0,698	0,802

Tab. A.3.: Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S2 mit einer Dauerbelastung von $0,05 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$

	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
E_0	0,31205	33,555	0,63500	0,27640
E_1	0,02015	0,03318	0,63550	0,49645
λ_1	1202,0	715,00	0,00115	0,02007
E_2		0,30415	6,9150	0,32735
λ_2		0,41450	207,70	0,30660
E_3			0,03517	0,10555
λ_3			654,30	140,90
E_4				-0,17125
λ_4				0,01075
RSS	0,05096	0,04368	0,05130	0,06686
R^2	0,93910	0,94780	0,93880	0,92010
\bar{R}^2	0,93650	0,94310	0,93000	0,90420
$RMSE$	0,03328	0,03151	0,03490	0,04088
365 Tage $[mm]$	0,810	0,768	0,771	0,581
25 Jahre $[mm]$	2,641	1,673	1,586	0,616

Tab. A.4.: Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S3 mit einer Dauerbelastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$

	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
E_0	0,26725	515,00	2935,0	21,200
E_1	0,17600	0,11195	0,15885	0,85750
λ_1	45,370	139,60	79,460	1,3470
E_2		0,21420	0,27795	0,32160
λ_2		0,75220	0,69680	0,55300
E_3			1,1220	0,24330
λ_3			0,71450	109,70
E_4				0,48095
λ_4				30,280
RSS	0,04478	0,02021	0,02106	0,02410
R^2	0,85650	0,93530	0,93250	0,92270
\bar{R}^2	0,84990	0,92900	0,92220	0,90590
$RMSE$	0,03227	0,02220	0,02324	0,02550
365 Tage $[mm]$	0,471	0,647	0,536	0,518
25 Jahre $[mm]$	0,471	0,680	0,539	0,526

Tab. A.5.: Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S3 mit einer Dauerbelastung von $0,06 \text{ N/mm}^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$

	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
E_0	0,19860	1764,60	1701,6	4,4214
E_1	0,16674	0,15708	0,80160	0,32460
λ_1	36,980	72,220	0,69270	0,81900
E_2		0,16260	0,18108	0,86940
λ_2		0,72450	52,070	0,72080
E_3			0,21150	0,14766
λ_3			0,68120	81,630
E_4				0,57102
λ_4				0,69080
RSS	0,12180	0,05226	0,05640	0,05198
R^2	0,79800	0,91330	0,90650	0,91380
\bar{R}^2	0,78870	0,90490	0,89210	0,89510
$RMSE$	0,05321	0,0357	0,03803	0,03748
365 Tage $[mm]$	0,662	0,749	0,690	0,774
25 Jahre $[mm]$	0,662	0,751	0,690	0,779

Tab. A.6.: Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie L mit einer Dauerbelastung von $0,04 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$

	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
E_0	0,33852	1177,2	600,40	623,20
E_1	0,26848	0,19396	0,52760	0,61000
λ_1	8,3790	0,95410	70,090	0,88850
E_2		0,50120	0,22204	0,60520
λ_2		36,690	0,82920	0,89800
E_3			0,91240	0,48640
λ_3			5,6900	24,480
E_4				0,61320
λ_4				11,015
RSS	0,02951	0,01400	0,01430	0,01493
R^2	0,68170	0,84890	0,84580	0,83890
\bar{R}^2	0,66410	0,83120	0,81680	0,79590
$RMSE$	0,02863	0,02030	0,02114	0,02231
365 Tage $[mm]$	0,267	0,286	0,299	0,279
25 Jahre $[mm]$	0,267	0,286	0,300	0,279

Tab. A.7.: Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie M mit einer Dauerbelastung von $0,04 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$

	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
E_0	0,30520	990,00	260,48	0,86880
E_1	0,21916	0,27892	0,29076	0,70880
λ_1	27,850	32,020	27,700	19,460
E_2		0,23544	4,1360	0,48320
λ_2		0,89840	349,20	0,76150
E_3			0,23512	0,62880
λ_3			0,92130	19,370
E_4				0,65560
λ_4				10,900
RSS	0,09738	0,08793	0,08734	0,09713
R^2	0,62450	0,66100	0,66320	0,62550
\bar{R}^2	0,61060	0,63490	0,62280	0,56310
$RMSE$	0,04247	0,04112	0,04179	0,04498
365 Tage $[mm]$	0,314	0,313	0,314	0,310
25 Jahre $[mm]$	0,314	0,313	0,318	0,310

Tab. A.8.: Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie M mit einer Dauerbelastung von $0,05 \text{ N/mm}^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$

	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
E_0	0,19550	121,30	1145,5	126,75
E_1	0,00102	0,17085	0,38755	0,26710
λ_1	43280	1,7100	1,1800	112,20
E_2		0,00167	0,09240	0,15360
λ_2		30570	337,00	457,60
E_3			0,38520	0,40970
λ_3			1,1810	0,84890
E_4				0,44735
λ_4				1,2460
RSS	0,16880	0,10420	0,15200	0,19140
R^2	0,84810	0,90620	0,86330	0,82780
\bar{R}^2	0,84250	0,89900	0,84690	0,79910
$RMSE$	0,05591	0,04477	0,05513	0,06314
365 Tage $[mm]$	0,668	0,650	0,617	0,593
25 Jahre $[mm]$	9,579	8,047	0,800	0,747

Abbildungsverzeichnis

2.1. Prinzip der Aussteifung einer Pfosten-Riegel-Konstruktion mit einem HGV-Element	12
2.2. Kombination zweier Tragmechanismen	13
2.3. Unterschiedliche HGV-Anschlussdetails	13
2.4. Schematische Darstellung von Beispielen der verschiedenen Arten von geklebten Glaskonstruktionen	17
2.5. Bemessungswerte nach unterschiedlichen Sicherheitskonzepten und Werkstoffen	24
3.1. Typischer zeitlicher Verlauf des Kriechens	30
3.2. Maxwell'sches Modell	31
3.3. Kelvin-Voigt'sches Modell	33
3.4. Modell nach Burgers	35
3.5. Federmodell des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt	36
3.6. Kriechkurve des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt	36
4.1. Messung des Gleitwinkels γ am Beispiel eines Kleinprobekörpers	40
4.2. Spannungszyklus des Ermüdungsversuchs	43
4.3. Abmessungen und Versuchsaufbau von Kleinprobekörpern	47
4.4. Aufbau des Dauerlastversuchs	49
4.5. Gesamtverformung der Kleinproben S1 über 365 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase	50
4.6. Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der Kleinproben S1 über 365 Tage mit den Belastungen 0,04 und 0,05 N/mm^2	52
4.7. Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie S1	53
4.8. Kriechverformung von Kleinproben über 365 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und Abzug der Verformungen zufolge Klimaeinflusses	54
4.9. Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie S1	56

4.10. Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie S1_000_000	57
4.11. Schubfestigkeiten an Kleinproben ohne Vorbelastung (S1_000_000) . . .	58
4.12. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (S1_000_365)	59
4.13. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 1 Tag Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_001)	60
4.14. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_035)	61
4.15. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_091)	62
4.16. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 182 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_182)	63
4.17. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_365)	64
4.18. Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie S1 nach einer Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$	65
4.19. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 1 Tag Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_001)	67
4.20. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_035)	68
4.21. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_091)	69
4.22. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 182 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_182)	70
4.23. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_365)	71
4.24. Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie S1 nach Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$	72
4.25. Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie S1_000_000_z	74
4.26. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach zyklischer Beanspruchung (S1_000_000_z)	75
4.27. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ und zyklischer Beanspruchung (S1_004_365_z)	76

4.28. Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie S1 mit zyklischer Vorbelastung im Vergleich zu Kleinproben ohne vorangegangener dynamischer Beanspruchung	77
4.29. Gesamtverformung der Kleinproben S2 über 210 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase	80
4.30. Gesamtverformung der Kleinproben S1 und S2 mit 0,05 N/mm ² Dauerlast und jeweils 24-stündiger Entlastungsphase	81
4.31. Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie S2	82
4.32. Kriechverformung der Kleinproben S1 und S2 mit 0,05 N/mm ² Dauerlast unter denselben Klimabedingungen mit unterschiedlicher Belastungsgeschichte	82
4.33. Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der Kleinproben S2 über 210 Tage mit einer Belastungen von 0,05 N/mm ²	83
4.34. Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie S2	84
4.35. Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie S2_005_210	84
4.36. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 210 Tagen Vorbelastung mit 0,05 N/mm ² (S2_005_210)	85
4.37. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach Vorbelastung mit 0,05 N/mm ² der Serie S2 im Vergleich zu den Ergebnissen aus Serie S1	86
4.38. Gesamtverformung der Kleinproben S3 über 91 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase	88
4.39. Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie S3	90
4.40. Gesamtverformung der Kleinproben S1, S2 und S3 mit 0,05 N/mm ² Dauerlast und jeweils 24-stündiger Entlastungsphase	91
4.41. Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der Kleinproben S3 über 91 Tage mit den Belastungen 0,05 und 0,06 N/mm ²	91
4.42. Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie S3	92
4.43. Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie S3_000_000	93
4.44. Schubfestigkeiten an Kleinproben ohne Vorbelastung (S3_000_000) . . .	94
4.45. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (S3_000_091)	95
4.46. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Lagerung in der Klimakammer (S3_000_091_k)	96

4.47. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S3_005_091)	98
4.48. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,06 N/mm^2$ (S3_006_035)	99
4.49. Schubfestigkeiten an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,06 N/mm^2$ (S3_006_091)	100
4.50. Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie S3 mit unterschiedlichen Lastgeschichten	102
4.51. Abmessungen eines L-förmigen Kleinprobekörpers	103
4.52. Gesamtverformung der Kleinproben L über 131 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase	105
4.53. Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der Kleinproben L über 131 Tage mit der Belastung von $0,04 N/mm^2$	106
4.54. Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie L	107
4.55. Gesamtverformung der Kleinproben S1 und L mit $0,04 N/mm^2$ Dauerlast und jeweils 24-stündiger Entlastungsphase	107
4.56. Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie L	108
4.57. Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie L_000_000	108
4.58. Schubfestigkeiten an Kleinproben mit L-Leiste ohne Vorbelastung (L_000_000)	109
4.59. Schubfestigkeiten an Kleinproben mit L-Leiste nach 131 Tagen Vorbelas- tung durch Eigengewicht der Glasscheibe (L_000_131)	110
4.60. Schubfestigkeiten an Kleinproben mit L-Leiste nach 68 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (L_004_068)	111
4.61. Schubfestigkeiten an Kleinproben mit L-Leiste nach 131 Tagen Vorbelas- tung mit $0,04 N/mm^2$ (L_004_131)	112
4.62. Schubfestigkeiten der Kleinproben aus Serie L mit unterschiedlichen Last- geschichten	114
4.63. Abmessungen und Anordnung der zwei Verschraubungsvarianten der mittelgroßen Versuchskörper	117
4.64. Aufbau des Versuchsstands der Langzeituntersuchungen	118
4.65. Gesamtverformung der mittelgroßen Versuchskörper M über 365 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und 24 h anschließender Entlastungsphase	119

4.66. Verformungszuwachs innerhalb von 21 Tagen der mittelgroßen Versuchskörper M über 365 Tage mit den Belastungen 0,04 und 0,05 N/mm^2 . . .	121
4.67. Mittlere klimatische Bedingungen im Versuchsraum während der Serie M	122
4.68. Lage des Versuchsraums	123
4.69. Positionierung der Probekörper im Versuchsraum	123
4.70. Solare Einwirkungen im Versuchsraum	124
4.71. Gesamtverformung der einzelnen Scheiben der Serie M	125
4.72. Durchgeführte Scherprüfungen in der Serie M	126
4.73. Beispielhafte Spannungs-Schubgleitungs-Linie einer Probe der Serie M_004_091	127
4.74. Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung (M_000_000)	128
4.75. Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung mit nicht gezahnter Koppelleiste (M_000_000_mod)	129
4.76. Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern nach 91 Tagen Vorbelastung mit 0,04 N/mm^2 (M_004_091)	130
4.77. Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern nach 365 Tagen Vorbelastung mit 0,04 N/mm^2 (M_004_365)	131
4.78. Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern nach 91 Tagen Vorbelastung mit 0,05 N/mm^2 (M_005_091)	132
4.79. Schubfestigkeiten an mittelgroßen Probekörpern nach 365 Tagen Vorbelastung mit 0,05 N/mm^2 (M_005_365)	133
4.80. Schubfestigkeiten der mittelgroßen Versuchskörper aus Serie M mit unterschiedlichen Lastgeschichten	135
5.1. Gesamtverformung der Kleinproben S1 über 365 Tage mit unterschiedlichen Belastungen und die Simulation mit Hilfe des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt	141
5.2. Simulation der Kleinproben S1 über 25 Jahre mit unterschiedlichen Belastungen mit Hilfe des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt . . .	142
5.3. Simulation der Kleinproben M über 25 Jahre mit unterschiedlichen Belastungen mit Hilfe des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt mit $m = 2$ beziehungsweise $m = 3$	143
5.4. Verformungsfortschritt eines Kleinprobekörpers	144
5.5. Videoanalyse des Verformungsfortschritts eines Kleinprobekörpers	145
5.6. FE-Modellierung eines Kleinprobekörpers	145

5.7.	Auswertung der FE-Modellierung	146
6.1.	Gesamtverformung der Kleinproben S1_004 über 365 Tage und der Kleinproben HFA_004 über 91 Tage mit einer Belastung von $0,04 N/mm^2$ und 24 h anschließender Entlastungsphase	148
6.2.	Gesamtverformung der Kleinproben S3_006 über 91 Tage und der Kleinproben HFA_0066 über 98 Tage mit einer Belastung von $0,066 N/mm^2$ und anschließender Entlastungsphase	149
6.3.	Geometrie, Abmessung und Versuchsanordnung des Scherprüfkörpers für die Kriechversuche der TU Dresden	153
6.4.	Kriechverformungen der Serien S1 bis S3 und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 N/mm^2$	154
6.5.	Kriechverformungen der Serien S1 bis S3 und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 N/mm^2$ in logarithmischer Darstellung	155
6.6.	Verformungen der Serie M und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 N/mm^2$ in logarithmischer Darstellung	158
6.7.	Logistikgebäude der Firma Otto-Chemie	162
6.8.	Horizontalschnitt mit Lage und Anordnung der Messstellen	163
6.9.	Kriechverformungen der inneren Klebefuge eines Elements der Fassade des Logistikzentrums mit einer Belastung von etwa $0,017 N/mm^2$	165
6.10.	Klimatische Bedingungen während des Freilandversuchs	166
7.1.	Beziehung zwischen den einzelnen Teilsicherheitsbeiwerten	167
7.2.	Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden im Bauwesen	168
7.3.	Verteilungsdichte der Basisvariablen und Grenzzustandsebene	170
7.4.	Bemessungspunkt und Zuverlässigkeitsindex β nach der Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung (FORM)	171
7.5.	Schubgleitung zufolge Kriechen nach 91 Tagen Dauerlast in Abhängigkeit vom Belastungsniveau	190
7.6.	Maximale Größe einer beispielhaften Isolierglasscheibe	194

Tabellenverzeichnis

4.1. Faktor k_n für charakteristische Werte gem. EN 1990, Tabelle D.1	40
4.2. Die Variable $\tau_{\alpha\beta}$ in Abhängigkeit der Prüfkörperanzahl	42
4.3. Seriennummer	45
4.4. Lastniveau	45
4.5. Belastungsdauer	46
4.6. Eventuelle Zusatzbezeichnung	46
4.7. Durchgeführte Serien in Abhängigkeit von Lastniveau und Belastungsdauer	46
4.8. In Serie 1 durchgeführte Kriechversuche	48
4.9. In Serie 1 durchgeführte Überprüfungen der Scherfestigkeit	49
4.10. Verformungswerte der Serie S1 in $[mm]$	50
4.11. Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung	51
4.12. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben ohne Vorbelastung (S1_000_000)	58
4.13. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelas- tung durch Eigengewicht der Glasscheibe (S1_000_365)	59
4.14. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 1 Tag Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_001)	61
4.15. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelas- tung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_035)	62
4.16. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelas- tung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_091)	63
4.17. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 182 Tagen Vorbelas- tung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_182)	64
4.18. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelas- tung mit $0,04 N/mm^2$ (S1_004_365)	65
4.19. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie S1 mit einer Vorbelastung von $0,04 N/mm^2$	66

4.20. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 1 Tag Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_001)	67
4.21. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_035)	68
4.22. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_091)	69
4.23. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 182 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_182)	70
4.24. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S1_005_365)	71
4.25. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie S1 mit einer Vorbelastung von $0,05 N/mm^2$ und $0,04 N/mm^2$	73
4.26. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach zyklischer Beanspruchung (S1_000_000_z)	75
4.27. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ und zyklischer Beanspruchung (S1_004_365_z)	76
4.28. Übersicht der Nachweise der Serie S1	78
4.29. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie S1	78
4.30. In Serie 2 durchgeführte Kriechversuche und Überprüfungen der Scherfestigkeit	79
4.31. Verformungswerte der Serie S2 in $[mm]$	79
4.32. Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung	80
4.33. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 210 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (S2_005_210)	85
4.34. Übersicht der Nachweise der Serie S2	86
4.35. In Serie 3 durchgeführte Kriechversuche	87
4.36. In Serie 3 durchgeführte Überprüfungen der Scherfestigkeit	87
4.37. Verformungswerte der Serie S3 in $[mm]$	88
4.38. Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung	89
4.39. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben ohne Vorbelastung (S3_000_000)	94
4.40. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (S3_000_091)	95

4.41. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Lagerung in der Klimakammer (S3_000_091_k)	97
4.42. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelas- tung mit $0,05 N/mm^2$ (S3_005_091)	97
4.43. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 35 Tagen Vorbelas- tung mit $0,06 N/mm^2$ (S3_006_035)	99
4.44. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben nach 91 Tagen Vorbelas- tung mit $0,06 N/mm^2$ (S3_006_091)	100
4.45. Übersicht der Nachweise der Serie S3	101
4.46. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie S3 mit unter- schiedlichen Lastgeschichten im Vergleich zu Serie S1	102
4.47. In Serie L durchgeführte Kriechversuche	103
4.48. In Serie L durchgeführte Überprüfungen der Scherfestigkeit	104
4.49. Verformungswerte der Serie L in $[mm]$	104
4.50. Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung	105
4.51. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben mit L-Leiste ohne Vorbe- lastung (L_000_000)	110
4.52. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben mit L-Leiste nach 131 Tagen Vorbelastung durch Eigengewicht der Glasscheibe (L_000_131)	111
4.53. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben mit L-Leiste nach nach 68 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (L_004_068)	112
4.54. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben mit L-Leiste nach nach 131 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (L_004_131)	113
4.55. Übersicht der Nachweise der Serie L	113
4.56. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben der Serie L mit unter- schiedlichen Lastgeschichten im Vergleich zu Serie S1	115
4.57. In Serie M durchgeführte Kriechversuche	117
4.58. In Serie M durchgeführte Überprüfungen der Scherfestigkeit	118
4.59. Verformungswerte der Serie M in $[mm]$	120
4.60. Verhältnis von Kriechverformungen beziehungsweise Rückverformungen zur elastischen Anfangsverformung	120
4.61. Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern ohne Vor- belastung (M_000_000)	127

4.62. Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern ohne Vorbelastung mit nicht gezahnter Koppelleiste (M_000_000_mod)	128
4.63. Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (M_004_091)	130
4.64. Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,04 N/mm^2$ (M_004_365)	131
4.65. Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern nach 91 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (M_005_091)	133
4.66. Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern nach 365 Tagen Vorbelastung mit $0,05 N/mm^2$ (M_005_365)	134
4.67. Übersicht der Nachweise der Serie M	134
4.68. Auswertung der Schubversuche an mittelgroßen Probekörpern der Serie M mit unterschiedlichen Lastgeschichten im Vergleich zu Serie S1	136
4.69. Auswertung der Schubversuche an Kleinproben und mittelgroßen Versuchskörpern mit unterschiedlichster Vorbelastung	137
5.1. Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt aller Serien mit unterschiedlichen Dauerbelastungen und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$	140
6.1. Verformungswerte der Serie HFA_004_091 im Vergleich zu S1_004_365 in $[mm]$	149
6.2. Verformungswerte der Serie HFA_0066_098 im Vergleich zu S3_006_091 in $[mm]$	150
6.3. Vergleich der Serie S1_000_000 zu den Untersuchungen der HFA ohne Vorbelastung	151
6.4. Vergleich der Serie S1_004_091 zu den Untersuchungen der HFA nach 91 Tagen Vorbelastung	151
6.5. Vergleich der Serie S1_000_000_z zu den Untersuchungen der HFA	152
6.6. Kriechverformungen der Serien S1 bis S3 und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 N/mm^2$	154
6.7. Vergleich der Serie S1_000_000 zu den Untersuchungen der TU Dresden ohne Vorbelastung	156
6.8. Vergleich der Serie S1_005_035 zu den Untersuchungen der TU Dresden nach etwa 41 Tagen Vorbelastung	156

6.9. Verformungen der Serie M und der Probekörper der TU Dresden mit einem Lastniveau von $0,05 N/mm^2$	158
6.10. Vergleich der Serie M_000_000 zu den Untersuchungen der TU Dresden ohne Vorbelastung	159
6.11. Vergleich der Serie M_005_091 zu den Untersuchungen der TU Dresden nach etwa 41 Tagen Vorbelastung	159
6.12. Kriechverformungen der inneren Klebefuge eines Elements der Fassade des Logistikzentrums mit einer Belastung von etwa $0,017 N/mm^2$ in $[mm]$	164
7.1. Beziehung zwischen β und P_f	169
7.2. Empfehlungen der Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β	169
7.3. Statistische Parameter und charakteristische Werte der Basisvariablen, Fall 1	175
7.4. Statistische Parameter und charakteristische Werte der Basisvariablen, Fall 2	179
7.5. Bemessungswerte der Schubfestigkeit τ_d	179
7.6. erforderliche Querschnittsfläche A_{erf}	180
7.7. Mittelwert der Widerstandsgröße μ_R	180
7.8. Standardabweichung der Widerstandsgröße σ_R	180
7.9. Wichtungsfaktor der Widerstandsseite α_R	180
7.10. Wichtungsfaktor der Einwirkungsseite α_E	180
7.11. Zuverlässigkeitsindex β	181
7.12. Koordinate x_R^* des Bemessungspunktes P^* auf Widerstandsseite	181
7.13. Koordinate x_E^* des Bemessungspunktes P^* auf Widerstandsseite	181
7.14. theoretischer Sicherheitsfaktor γ_R auf Widerstandsseite	181
7.15. theoretischer Sicherheitsfaktor γ_F auf Einwirkungsseite	182
A.1. Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S1 mit einer Dauerbelastung von $0,04 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$	203
A.2. Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S1 mit einer Dauerbelastung von $0,05 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$	204
A.3. Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S2 mit einer Dauerbelastung von $0,05 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$	204

A.4. Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S3 mit einer Dauerbelastung von $0,05 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$	205
A.5. Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie S3 mit einer Dauerbelastung von $0,06 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$	205
A.6. Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie L mit einer Dauerbelastung von $0,04 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$	206
A.7. Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie M mit einer Dauerbelastung von $0,04 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$	206
A.8. Parameter des verallgemeinerten Modells nach Kelvin-Voigt der Serie M mit einer Dauerbelastung von $0,05 N/mm^2$ und Vorhersage der Verschiebung nach 365 Tagen beziehungsweise 25 Jahren in $[mm]$	207

Quellenverzeichnis

- [1] *ÖNORM EN 1990: Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2013.
- [2] *ETAG Nr. 002-1: Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen. Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme*. OIB-467-011/13. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2013.
- [3] *Österreichischer Waldbericht 2015: Nachhaltige Waldwirtschaft in Österreich*. Wien: Republik Österreich - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015.
- [4] *ÖNORM B 3716-1: Glas im Bauwesen - Konstruktiver Glasbau. Teil 1: Grundlagen*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2016.
- [5] Georg Neubauer und Klaus Peter Schober. *Holz-Glas-Verbundkonstruktionen*. Forschungsbericht. Holzforschung Austria, 2008.
- [6] Werner Hochhauser. „Ein Beitrag zur Berechnung und Bemessung von geklebten und geklotzten Holz-Glas-Verbundscheiben“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2011.
- [7] *ÖNORM EN 1995-1-1: Eurocode 5 - Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2015.
- [8] *Entwicklung und Langzeituntersuchungen von Holz-Glas-Verbundkonstruktionen mit gleichzeitiger Verklebung und Verklotzung*. Forschungsbericht. Technische Universität Wien, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau (ITI), 2015.
- [9] Jan Hamm. „Tragverhalten von Holz und Holzwerkstoffen im statischen Verbund mit Glas“. Dissertation. EPF Lausanne, 1999.
- [10] Jan Hamm. „Development of timber-glass prefabricated structural elements“. In: *IABSE Symposium Report* 85.10 (2001).

- [11] Klaus Kreher. „Tragverhalten und Bemessung von Holz-Glas-Verbundträgern unter Berücksichtigung der Eigenspannungen im Glas“. Dissertation. EPF Lausanne, 2004.
- [12] Klaus Kreher und Julius Natterer. „Timber-Glass Composite Girders for a Hotel in Switzerland“. In: *Structural Engineering International* 14.2 (2004).
- [13] Peter Niedermaier. „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen - Ein Beitrag zur Aussteifung von filigranen Holztragwerken“. Dissertation. Technische Universität München, 2005.
- [14] Heinrich Kreuzinger und Peter Niedermaier. „Glas als Schubfeld“. In: *Tagungsband Ingenieurholzbau; Karlsruher Tage*. 2005.
- [15] Thomas Edl und Klaus Peter Schober. *Statisch wirksame Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zur Aussteifung von Holzbauten*. Forschungsbericht. Holzforschung Austria, 2005.
- [16] Thomas Edl. „Entwicklung von wandartigen verklebten Holz-Glas-Verbundelementen und Beurteilung des Tragverhaltens als Aussteifungsscheibe“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2008.
- [17] Österreichische Gesellschaft für Holzforschung. „Verbundelement aus Glas“. Patent AT 502 470 B1. Registriert am: 06.07.2005. Veröffentlicht am: 15.08.2007.
- [18] Matthias Rinnhofer. „Holz-Glas-Verbundelemente: Theoretische und experimentelle Untersuchung des Langzeitverhaltens von verklebten Holz-Glas-Verbundscheiben“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2014.
- [19] Werner Hochhauser, Wolfgang Winter und Klaus Kreher. *Holz-Glas-Verbundkonstruktionen: Berechnung und Bemessungskonzept*. Forschungsbericht. Technische Universität Wien, Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau (ITI), 2011.
- [20] Technische Universität Wien. „Verbundkonstruktion aus einer Glasscheibe und einer Rahmenkonstruktion“. Patent AT 511 373 B1. Registriert am: 27.04.2011. Veröffentlicht am: 15.05.2013.
- [21] Alireza Fadaei, Matthias Rinnhofer und Wolfgang Winter. „Aktivierung der Verglasung zur Aussteifung mehrgeschossiger Bauten“. In: *Glasbau 2017* (2017).
- [22] Klaus Kreher und Werner Hochhauser. *Berechnung von nachgiebigem Verbund, von der exakten zur Näherungslösung - Theorie und Praxis*. Forschungsbericht. Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Holzforschung, 2009.

- [23] Lukas Neumann, Anton Arnold und Werner Hochhauser. „Zur Stabilität von geklebten und geklotzten Glasscheiben: Beurteilung der Dunkerley’schen Geraden zur Beulwertbestimmung“. In: *Bauingenieur* Band 88 (2013).
- [24] Klaus Peter Schober, Thomas Anderl und Gerhard Grüll. *Grundlagen zur Entwicklung einer neuen Holzfenstergeneration - 1. Forschungsjahr*. Forschungsbericht. 2006.
- [25] Klaus Peter Schober, Thomas Anderl und Gerhard Grüll. *Grundlagen zur Entwicklung einer neuen Holzfenstergeneration - 2. Forschungsjahr*. Forschungsbericht. Holzforschung Austria, 2007.
- [26] Klaus Peter Schober, Thomas Anderl und Gerhard Grüll. *Grundlagen zur Entwicklung einer neuen Holzfenstergeneration - 3. Forschungsjahr*. Forschungsbericht. Holzforschung Austria, 2009.
- [27] Felix Nicklisch. „Ein Beitrag zum Einsatz von höherfesten Klebstoffen bei Holz-Glas-Verbundelementen“. Dissertation. Technische Universität Dresden, 2016.
- [28] Felix Nicklisch und Bernhard Weller. „Adhesive bonding of Timber and Glass in load-bearing facades - evaluation of the ageing behaviour“. In: *World Conference on Timber Engineering*. 2016.
- [29] *European Technical Approval*. ETA-01/0005. Brüssel: European Organisation for Technical approvals, 2006.
- [30] Miroslav Premrov und Vesna Zegarac Leskovar. „The advantages of wood in positive-energy construction“. In: *5^{èr}ne Forum International Bois Construction FBC*. 2015.
- [31] Miroslav Stepinac, Vlatka Rajcic und Roko Zarnic. „Timber-structural glass composite systems in earthquake environment“. In: *Gradevinar 68/3* (2016). DOI: 10.14256/JCE.1505.2015.
- [32] Alireza Fadai, Matthias Rinnhofer und Wolfgang Winter. „Stiffening multistory timber-glass composites facades in tall buildings“. In: *Engineered Transparency 2016* (2016).
- [33] Marcin Kozłowski, Erik Serrano und Bertil Enquist. „Experimental investigations on timber-glass composite I-beams“. In: *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference* (2014).
- [34] Marcin Kozłowski. „Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams“. Dissertation. Silesian University of Technology, 2014.

- [35] Miroslav Premrov, Mateja Zlatinek und Anddrej Strukelj. „Experimental analysis of load-bearing timber-glass I-beam“. In: *Construction of Unique Buildings and Structures* 4 (19) (2014).
- [36] Alireza Fadaei, Matthias Rinnhofer und Wolfgang Winter. „Experimentelle Untersuchung von verklebten Holz-Glas-Verbund-Trägern unter Kurzzeitbeanspruchung“. In: *Glasbau 2016* (2016).
- [37] Louise Blyberg, Erik Serrano, Bertil Enquist und Magdalena Sterley. *Timber/Glass Adhesive Bonds - Experimental testing and evaluation methods*. Forschungsbericht. Linnaeus University, 2010.
- [38] *ÖNORM EN 13022-1: Glas im Bauwesen - Geklebte Verglasungen. Teil 1: Glasprodukte für Structural-Sealant-Glazing (SSG-) Glaskonstruktionen für Einfachverglasungen und Mehrfachverglasungen mit oder ohne Abtrag des Eigengewichts*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
- [39] *ÖNORM EN 13022-2: Glas im Bauwesen - Geklebte Verglasungen. Teil 2: Verglasungsvorschriften für Structural-Sealant-Glazing (SSG-) Glaskonstruktionen*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
- [40] *ÖNORM EN 15434: Glas im Bauwesen. Produktnorm für lastübertragende und/oder UV-beständige Dichtstoffe (für geklebte Verglasungen und/oder Isolierverglasungen mit exponierten Dichtungen)*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2010.
- [41] *ISO 28278-1: Glass in building - Glass products for structural sealant glazing. Part 1: Supported and unsupported monolithic and multiple glazing*. International Organisation for Standardization, 2011.
- [42] *ISO 28278-2: Glass in building - Glass products for structural sealant glazing. Part 2: Assembly rules*. International Organisation for Standardization, 2011.
- [43] *OIB - Richtlinie 4: Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit*. OIB-330.4-020/15. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2015.
- [44] *Konsolidierte Fassung der Liste der Bauprodukte und der Anlagen A und B der Baustoffliste ÖE*. OIB-095.2-025/13. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2013.
- [45] *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung*. Z-70.1-226. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2016.

- [46] Nikolaus Graf. „Materialorientierte experimentelle Untersuchung und statistische Auswertung einer real gealterten ift-Fassade in Anlehnung an die EOTA ETAG 002-1“. Bachelorarbeit. Hochschule Rosenheim, 2012.
- [47] Superlab. *SL-Massivholz Schattenbox - Allgemeine Projektbeschreibung*. Forschungsbericht. Wien: Dold und Hasenauer OG, 2008.
- [48] Hermann Otto GmbH, Hrsg. *Überraschend anders: Geklebte Holz-Glas-Fassade für ein Industriegebäude*. Zugegriffen am: 29.12.2015. 2014. URL: www.bautext.de/cp_view/images/fckfiles/file/OTTO_pressemappe_bautext_2014.pdf.
- [49] *DIN EN 13986: Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen. Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2015.
- [50] Frank Wellershoff. „Aussteifung von Gebäudehüllen durch randverklebte Glasscheiben“. In: *Stahlbau 77* (2008). DOI: 10.1002/stab200810002.
- [51] Stefan Peters. „Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen“. Dissertation. Universität Stuttgart, 2006.
- [52] Herbert Mang und Günter Hofstetter. *Festigkeitslehre*. 4. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [53] Robert Hooke. *A description of helioscopes, and some other instruments*. London, 1676.
- [54] Newton Isaac. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. London, 1687.
- [55] Stefan Hering. „Charakterisierung und Modellierung der Materialeigenschaften von Rotbuchenholz zur Simulation von Holzverklebungen“. Dissertation. ETH Zürich, 2011.
- [56] Holger Meinhard. „Rheologische Untersuchungen zu Härte-Druckexperimenten im Nanometerbereich“. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1999.
- [57] Peter Eyerer, Thomas Hirth und Peter Elsner. *Polymer Engineering - Technologien und Praxis*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [58] Dietmar Gross, Werner Hauger und Peter Wriggers. *Technische Mechanik 4 - Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*. 9. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [59] *ift-Richtlinie VE-08/3: Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme*. Rosenheim: ift Rosenheim, 2014.

- [60] *Richtlinie - Beurteilungsgrundlage für geklebte Verglasungssysteme*. Holzforschung Austria, 2015.
- [61] Michael Schäper. „Zur Anwendung der logarithmischen Normalverteilung in der Materialprüfung“. In: *Bautechnik 87* Heft 9 (2010), S. 541–549. DOI: 10.1002/bate.201010036.
- [62] Lutz Fischer. „Bestimmung des 5%-Quantils im Zuge der Bauwerksprüfung“. In: *Bautechnik 72* Heft 11 (1995), S. 712–722.
- [63] Georg Neubauer und Klaus Peter Schober. *Handbuch für den Einsatz von Holz-Glas-Verbundelementen; für Lizenznehmer des HFA-Patents Nr. 502470*. 2008.
- [64] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG. *www.zamg.at*. Zugegriffen am: 15.08.2016. 2016. URL: www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterkarte.
- [65] Leonard Mullins. „Softening of Rubber by Deformation“. In: *Rubber Chemistry and Technology 42* (1963).
- [66] Konstantin Sedlan. „Viskoelastisches Materialverhalten von Elastomerwerkstoffen: Experimentelle Untersuchung und Modellbildung“. Dissertation. Universität Gesamthochschule Kassel, 2000.
- [67] Andreas Schleicher. „Fire Protection Concepts for Timber Glass Composite Facades“. In: *MATEC Web of Conferences 46* (2016). DOI: 10.1051/mateconf/20164605003.
- [68] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG. *www.zamg.at*. Zugegriffen am: 25.09.2016. 2016. URL: www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/mai-2014-kuehl-und-stellenweise-extrem-nass.
- [69] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG. *www.zamg.at*. Zugegriffen am: 25.09.2016. 2016. URL: www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/sonnigster-juni-seit-elf-jahren.
- [70] Philip Göppert. „Handbuch für ein allgemeingültiges Monitoringkonzept für geklebte Glasfassaden im Freilandversuch“. Diplomarbeit. Hochschule Rosenheim, 2014.
- [71] Shapol Khan. „Interpretation der Zwischenergebnisse eines Freilandversuchs zu einem Structural-Sealant-Glazing-System“. Projektarbeit. Technische Universität Wien, 2016.

- [72] *Abschlussbericht Nr. 13-003500-PR01 (PB-K09-11-de-02)*. Forschungsbericht. ift Rosenheim, 2015.
- [73] Alireza Fadai, Felix Nicklisch und Matthias Rinnhofer. „Timber-Glass-Composite: Long-term behavior“. In: *World Conference on Timber Engineering*. 2016.
- [74] Georg Neubauer. „Entwicklung und Bemessung von statisch wirksamen Holz-Glas-Verbundkonstruktionen zum Einsatz im Fassadenbereich“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2011.
- [75] Felix Nicklisch, Michael Dorn, Bernhard Weller und Erik Serrano. „Joint study on material properties of adhesives to be used in load-bearing timber-glass composite elements“. In: *Engineered Transparency 2014* (2014).
- [76] Felix Nicklisch und Bernhard Weller. „Kriechverhalten von Klebeverbindungen am Beispiel von Holz-Glas-Verbundelementen“. In: *Glasbau 2015* (2015).
- [77] Felix Nicklisch, Sebastian Hernandez, Maximilian Schlehlein und Bernhard Weller. „Pavillon mit aussteifender Holz-Glas-Verbundfassade“. In: *Glasbau 2016* (2016).
- [78] Felix Nicklisch, Johannes Giese-Hinz und Bernhard Weller. „Glued windows and timber-glass facades - performance of a silicone joint between glass and different types of wood“. In: *Engineered Transparency 2016* (2016).
- [79] Wolfgang Graße. „Zuverlässigkeitskonzept (Teil II)“. In: *1. Dresdner Probabilistik-Symposium - Sicherheit und Risiko im Bauwesen* (2003).
- [80] Jörg Schneider. *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure*. Zollikon, 2013.
- [81] Abraham Hasofer und Nils Lind. „Exact and Invariant Second-Moment Code Format“. In: *Engineering Mechanics Division ASCE 100.1* (1974), S. 1227–1238.
- [82] Lutz Fischer. „Sicherheitskonzept für neue Normen - ENV und DIN-neu - Grundlagen und Hintergrundinformationen - Teil 9: Einführung in die Zuverlässigkeitstheorie tragender Baukonstruktionen“. In: *Bautechnik 76, Heft 10* (1999), S. 921–932.
- [83] Rico Kaatz und Christoph Recknagel. „Advanced Evaluation of Structural Sealant Glazing Systems by a New System Test Approach“. In: *STP1583* (2015). DOI: 10.1520/STP158320140074.
- [84] Christoph Recknagel und Rico Kaatz. „Exploration and Evaluation of the Performance and Durability of SSG Systems by Dynamic-Mechanical System Testing“. In: *STP1583* (2015). DOI: 10.1520/STP158320140064.

- [85] Franz Weissensteiner. „Holz-Glas-Verbundkonstruktionen im Einsatz an thermischen Pufferzonen. Prototypischer Einsatz am Beispiel eines Anbaus“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2013.