

# Quantifizierung der Resttragfähigkeit von Verbundglas

REST-VSG: Rechnerische und Experimentelle  
Studien zur Ermittlung der Resttragfähigkeit  
von VSG

**T 3378**

T 3378

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0591-8

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# Forschungsvorhaben: Quantifizierung der Resttragfähigkeit von Verbundglas

REST-VSG: Rechnerische und Experimentelle Studien zur Ermittlung der  
Resttragfähigkeit von VSG

## Haftungsausschluss

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Quantifizierung der bauartspezifischen Anforderung, Resttragfähigkeit, nachdem aktuell lediglich einzelne Eigenschaften von Bauprodukten normativ erfasst sind. Dafür sollen anhand einzelner, exemplarischer Produkte Verfahren identifiziert werden, die es ermöglichen diese Anforderung bestmöglich zu charakterisieren. Vielversprechende Verfahren werden anschließend auf eine breitere Produktpalette übertragen. Dennoch wird im Rahmen dieses Vorhabens kein Anspruch auf die Vollständigkeit der Produktpalette erhoben. Des Weiteren findet auch keine Wertung der Produkte statt, sondern lediglich eine Wertung der Verfahren zur Charakterisierung der Produkte.

Teile der Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes wurden bereits in einer Dissertation und einem Journal Paper veröffentlicht. Die Universitäten (TU Darmstadt und Universität der Bundeswehr München) behalten das Recht die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zu veröffentlichen.

Botz, Martin, Dissertation: Beitrag zur versuchstechnischen und numerischen Beschreibung von Verbundglas mit PVB-Zwischenschicht im intakten und gebrochenen Zustand, Uni BW M (2020)

Schuster, M., Schneider, J. & Nguyen, T.A. Investigations on the execution and evaluation of the Pummel test for polyvinyl butyral based interlayers. *Glass Struct Eng* (2020).  
<https://doi.org/10.1007/s40940-020-00120-y>

## Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	AP1: Literaturrecherche .....	1
2.1	Stand der Technik.....	1
2.1.1	Kugelfallversuch.....	2
2.1.2	Pendelschlagversuch.....	3
2.1.3	Druckscherversuch / Kompressionsscherversuch .....	4
2.1.4	Pummeltest .....	5
2.2	Stand der Forschung.....	12
2.2.1	Untersuchungen zur Zeit- und Temperaturabhängigkeit unter großen Verzerrungen .	13
2.2.2	Untersuchungen zum Bruchbild/ Rissverteilung und Lastabtrag .....	15
2.2.3	Untersuchungen zur Haftung .....	17
3	AP2: Haftung/Pummel/Haftscherversuche .....	22
3.1	Entwicklung eines Auswerteverfahrens für den Pummeltest.....	22
3.1.1	Zielsetzung.....	22
3.1.2	Versuchsauswertemethoden .....	22
3.1.3	Vereinheitlichung der Pummelskala .....	40
3.1.4	Neue Pummelskala .....	51
3.2	Pummeltests an Kleinproben.....	55
3.2.1	Versuchs- und Probekörperübersicht.....	55
3.2.2	Versuchsaufbau- und durchführung.....	56
3.2.3	Versuchsergebnisse .....	58
3.2.4	Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen.....	71
3.3	Pummeltest an Großproben .....	72
3.3.1	Zielsetzung.....	72
3.3.2	Versuchs- und Probekörperübersicht .....	72
3.3.3	Versuchsaufbau und -durchführung.....	72
3.3.4	Versuchsauswertung.....	73
3.4	Haftscherversuche.....	79
3.4.1	Zielsetzung.....	79
3.4.2	Versuchsübersicht.....	79
3.4.3	Versuchsaufbau- und durchführung.....	80
3.4.4	Versuchsauswertung.....	80
4	AP3: Versuche zur Charakterisierung der Resttragfähigkeit .....	82
4.1	TCB – Test: Großteilversuche .....	83
4.1.1	Zielsetzung.....	83

4.1.2	Probekörperübersicht .....	84
4.1.3	Versuchsübersicht.....	86
4.1.4	Versuchsaufbau und -durchführung .....	87
4.1.5	Versuchsauswertung.....	89
4.2	TCB – Test: Kleinteilversuche .....	104
4.2.1	Zielsetzung.....	104
4.2.2	Versuchsübersicht.....	104
4.2.3	Versuchsauswertungsmethoden .....	108
4.2.4	Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen-.....	112
4.3	Pendelschlagversuche .....	113
4.3.1	Zielsetzung.....	113
4.3.2	Versuchsübersicht.....	113
4.3.3	Versuchsaufbau- und durchführung .....	114
4.3.4	Versuchsauswertung.....	115
5	AP4: Übertragen auf Zwischenschicht .....	117
5.1	Unterschiedliche Materialeigenschaften.....	117
5.2	Pummeltest an Kleinproben .....	118
5.3	Pummeltest an Großproben .....	119
5.3.1	Zielsetzung.....	119
5.3.2	Versuchs- und Probekörperübersicht .....	120
5.3.3	Versuchsaufbau- und durchführung .....	120
5.3.4	Versuchsauswertung.....	120
5.4	TCB – Test: Großteilversuche .....	121
5.4.1	Zielsetzung.....	121
5.4.2	Versuchsübersicht.....	121
5.4.3	Versuchsaufbau und -durchführung .....	121
5.4.4	Versuchsauswertung.....	122
5.5	Pendelschlagversuch .....	127
5.5.1	Zielsetzung.....	127
5.5.2	Versuchsübersicht.....	127
5.5.3	Versuchsaufbau- und durchführung .....	127
5.5.4	Versuchsauswertung.....	127
6	Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse .....	129
6.1	Versuche zur Charakterisierung der Haftung.....	129
6.2	Versuche zur Charakterisierung der Resttragfähigkeit.....	132
6.3	Korrelation zwischen Versuchen zur Charakterisierung der Haftung .....	133

7	AP5: Normungsvorschlag .....	136
7.1	Charakterisierung der Haftung mittels Pummelversuch .....	136
7.2	Charakterisierung der Resttragfähigkeit mittels des TCB-Tests .....	140
7.3	Charakterisierung der Resttragfähigkeit mittels des Pendelschlagversuchs .....	142
8	Literaturangaben .....	146
9	Anhang .....	150
9.1	Geometrie der Klein-Pummelproben und den Lagerungsbedingungen.....	150
9.2	Bilder der gepummelten Kleinproben .....	156
9.3	Kraft-Zeit-Verläufe (rot) und Beschleunigungs-Zeit-Verläufe (Blau) .....	160
9.4	Lichteinstellungen – Aufnahme Pummelbilder .....	168
9.5	Matlab Codes zur auswertung der Pummeltests .....	168
9.6	Pummelauswertung – Darstellung des ausgewerteten Bereichs.....	177
9.7	Versuchsvorschrift Zwick TCB .....	193
9.8	Zusätzliche Daten zu den kleinen TCB Proben .....	195
9.9	Matlab Code zur Bestimmung der delaminierten Fläche .....	195
9.10	Bilder zur delaminierten Fläche .....	196

# 1 Einleitung

Die moderne Architektur ist seit Jahren bestrebt, transparente Gebäudehüllen zu realisieren. Neben bautechnischen Anwendungen haben die Automobil-, Militär- und Raumfahrtindustrie sowie die Solarindustrie mehrere Anwendungen für unterschiedlichste Konstruktionen aus Glas. Diese hohe Nachfrage nach Konstruktionen aus Glas und Glasverbundwerkstoffen erfordert grundlegende Kenntnisse und Verständnis für die materialgerechte Auslegung und Dimensionierung aller beteiligten Baustoffe. Im Bauwesen wird aufgrund hoher Sicherheitsanforderungen hauptsächlich Verbundglas (VG) bzw. Verbundsicherheitsglas (VSG) eingesetzt. VG ist ein Sandwichverbundwerkstoff, der aus mindestens zwei Glasscheiben und einer oder mehreren polymeren Zwischenschichten hergestellt wird. Diese polymere Zwischenschicht bewirkt mechanisch gesehen eine zeit- und temperaturabhängige Schubkopplung zwischen den Glasscheiben. Erfüllt das VG bestimmte Anforderungen an die Zwischenschicht, das Bruch- und Nachbruchverhalten, spricht man von Verbundsicherheitsglas (VSG). Je nach nationalen Normen und Vorschriften ist die Verwendung von VSG bei absturzsichernden und begehbaren Verglasungen oder Überkopfverglasungen erforderlich.

Aktuell ist weder in [1], noch in [2] eine Möglichkeit gegeben, VSG grundsätzlich bezüglich der Haftung und des Resttragverhaltens zu klassifizieren. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es daher, unter Verwendung experimenteller und rechnerischer Ansätze Vorschläge für eine normative Regelung zu finden. Dazu werden verschiedene Versuche bzw. Versuchsaufbauten in Hinblick auf die Eignung zur Charakterisierung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas untersucht und gegebenenfalls entsprechend modifiziert. Anschließend finden eine Auswertung der modifizierten Versuche und eine Bewertung hinsichtlich der Eignung zur Quantifizierung der Resttragfähigkeit statt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Pummeltest, einem modifizierten Pendelschlagversuch (vgl. [2]) und dem TCB-Test (vgl. [3]).

Zuletzt werden entsprechende Vorschläge zur normativen Regelung der Quantifizierung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas gemacht, die Eingang in die aktuelle Normung finden sollen.

## 2 AP1: Literaturrecherche

Um eine Grundlage für das Forschungsvorhaben zu schaffen, findet zunächst eine in zwei Teile gegliederte Literaturrecherche statt. Zuerst wird der aktuelle Stand der Technik dargelegt und anschließend der aktuelle Stand der Forschung analysiert und beschrieben.

### 2.1 Stand der Technik

Da Glas ohne Vorankündigung spröde bricht, ist der Bruchzustand von Glas von besonderer Bedeutung. Besitzt eine Verglasung somit Anforderungen an eine sogenannte Resttragfähigkeit, ist die Verwendung von Verbundsicherheitsglas obligatorisch.

Unter Resttragfähigkeit ist nach [4] die „*Fähigkeit einer Verglasungskonstruktion im Falle eines festgelegten Zerstörungszustands unter definierten äußeren Einflüssen (Last, Temperatur, usw.) über einen ausreichenden Zeitraum standsicher/tragfähig zu bleiben*“ zu verstehen. Eine Konstruktion gilt dabei als standsicher, solange die Verglasung nicht von den Lagern herunterrutscht und unter der

Konstruktion liegende Verkehrsflächen nicht durchherabfallende Bruchstücke der zerstörten Verglasung gefährdet werden. Um als standsicher zu gelten muss eine Verglasung diese Anforderungen für eine bestimmte zeitliche Dauer, die als Standzeit bezeichnet wird, erfüllen. Eine ausreichende Resttragfähigkeit kann dabei durch Einhaltung konstruktiver Vorgaben, Berechnung sowie durch experimentellen Nachweis erbracht werden. Der rechnerische Nachweis beschränkt sich dabei aktuell auf Systeme mit mindestens einer intakten Scheibe (Zustand II), welche für die weitere Bemessung nur noch berücksichtigt werden darf. Ein rechnerischer Nachweis im Zustand III (vollständig gebrochen) ist nicht möglich.

Für den experimentellen Nachweis der Resttragfähigkeit muss die Verglasung an definierten Punkten mit einem Körner angeschlagen und gebrochen werden, wobei die Verglasung mit einer vollflächigen Last von mindestens  $0,5 \text{ kN/m}^2$  belastet wird. Das System gilt als ausreichend resttragfähig, wenn es über eine Zeitdauer von 24 h nicht aus der Lagerung fällt und keine die Verkehrsfläche gefährdenden Glasbruchstücke herabfallen [5]. Der zulässige Temperaturbereich für den experimentellen Nachweis liegt bei  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ , also genau im Bereich der Glasübergangstemperatur von Standard-PVB. Auf Grund dessen sind große Abweichungen in den Versuchsergebnissen möglich, sofern der gleiche Versuchsaufbau bei  $15^\circ\text{C}$  oder  $25^\circ\text{C}$  geprüft wird. Auch in den Normen anderer Nationen und dem Entwurf des Eurocodes Glas ist ein rechnerischer Nachweis der Resttragfähigkeit im Bruchzustand 3 nicht existent.

Eine näherungsweise Berechnung der Resttragfähigkeit ist in der aktuellen Version der Glasbemessungssoftware *MEPLA SJ (Version 5.0)* vorhanden. Dabei erfolgt die Berechnung des Bruchzustandes über eine Untersuchung der Hauptzugspannungen in den Gaußpunkten des FE-Netzes. Überschreiten die Hauptzugspannungen in einer Richtung einen gewissen Grenzwert, wird ein Bruchzustand aktiviert und in diesem Bereich eine Rissfläche erzeugt, an der anschließend nur noch Druckkräfte übertragen werden können. Dieses Verfahren ist jedoch lediglich eine Näherungslösung, da das komplexe Materialverhalten der polymeren Zwischenschicht sowie das Verhalten des Verbundes zwischen Glas und Zwischenschicht, das im gebrochenen Zustand von Delamination geprägt ist, nicht abgebildet werden.

Im Folgenden sind einige Versuche aufgeführt, die unter anderem während der werksinternen Qualitätskontrolle von Zwischenschicht bzw. Verbundglasherstellern durchgeführt werden, um primär die Haftung zu charakterisieren. Nachdem die Haftung eng mit der Resttragfähigkeit verbunden ist, können aus den entsprechenden Versuchsparametern auch Rückschlüsse auf das Resttragverhalten gezogen werden.

### 2.1.1 Kugelfallversuch

Der Kugelfalltest (harter Stoß) ist in der deutschen Norm [6] und in der [1], sowie der [7] geregelt. In einem definierten Versuchsaufbau wird eine genormte Stahlkugel auf eine Verglasung fallen gelassen, wobei nach der maximal möglichen Fallhöhe, ohne ein Durchschlagen der Verglasung durch die Kugel, kategorisiert wird. Zusätzlich wird die Masse der abgelösten Glassplitter bewertet.

Wenn die Kugel das Glas nicht durchschlägt und keine die Verkehrsfläche gefährdenden Glasbruchstücke herabfallen, gilt der Versuch als bestanden. Bei diesem Versuch führt eine geringere Haftung zu besseren Ergebnissen, da über ein gezieltes Ablösen der Zwischenschicht mehr Energie dissipiert werden kann.



Abbildung 2-1 Exemplarischer Aufbau eines Kugelfallversuchs

### 2.1.2 Pendelschlagversuch

Der Pendelschlagversuch (weicher Stoß) ist nach DIN EN 12600 [2] ein Aufprallversuch ähnlich dem Kugelfallversuch. Dabei simuliert das Doppelreifenpendel mit unterschiedlichen Fallhöhen den Aufprall einer Person bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Der Test gilt als bestanden, wenn keine der vier Proben bricht oder gefahrlos bricht. Bei letzterem wird das Ergebnis durch das Gewicht und die Größe der Glassplitter definiert.

Je nach erreichter Fallhöhe und Bruchverhalten erfolgt eine Klassifizierung der Verglasung. Auch hier wird, analog zum Kugelfallversuch, das Verhalten unmittelbar nach Einbringen des Bruchzustandes unter dynamischer Einwirkung untersucht.

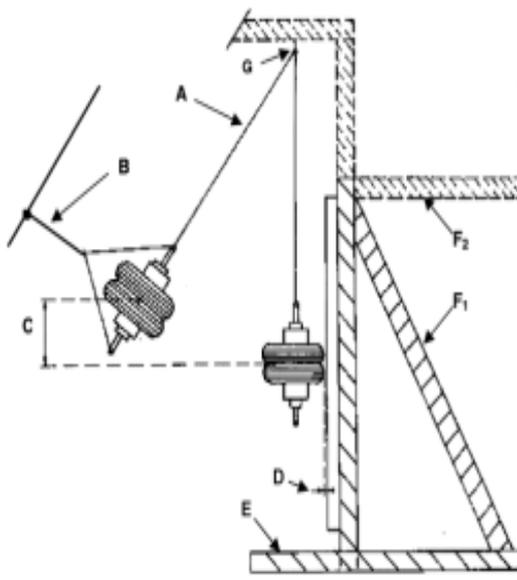


Abbildung 2-2 Schematische (links) und exemplarische (rechts) Darstellung des Pendelschlagversuchs

Tabelle 1 Legende zu Abbildung 2-2 (links)

## Legende

A	Aufhängeseil
B	Zugseil
C	Fallhöhe
D	Abstand Stoßkörper/Prüfkörper
E	Bodenträger
F <sub>1</sub>	Aussteifungsprofil
F <sub>2</sub>	Wandhalter (optional)
G	Halter
	(5 mm ≤ D ≤ 15 mm)

## 2.1.3 Druckscherversuch / Kompressionsscherversuch

Ein weiterer Versuch zur Untersuchung der Haftung ist der Druckscherversuch bzw. Kompressionsscherversuch. Auch dieser Versuch ist bislang nicht genormt, ist aber ein Standardprüfverfahren der Zwischenschichthersteller. Als Grundlage liegt hier lediglich eine Prüfanweisung der Firma *Kuraray* vor [8]. Bei diesem Versuch werden aus einem Verbundglas quadratische Probekörper mit einer Kantenlänge von ca. 25 mm herausgeschnitten. Anschließend werden die unter einem Winkel von 45° eingespannten Probekörper in einer Universalprüfmaschine unter Druckbeanspruchung einer Scherbelastung ausgesetzt, bis der Probekörper versagt bzw., bis eine Glasscheibe von der Zwischenschicht geschert ist. Als Kenngröße wird in diesem Test der Adhäsionswiderstand zwischen Glas und Folie bei Raumtemperatur bestimmt ([8], [9]).

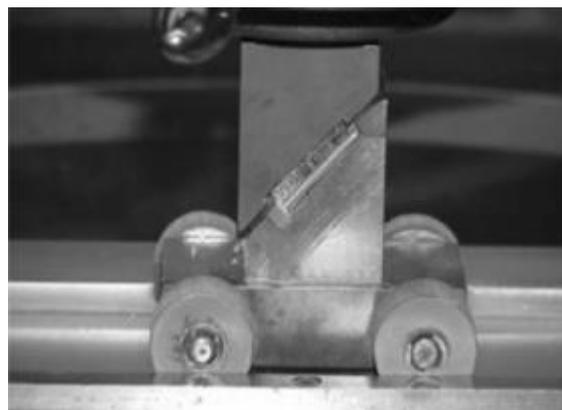
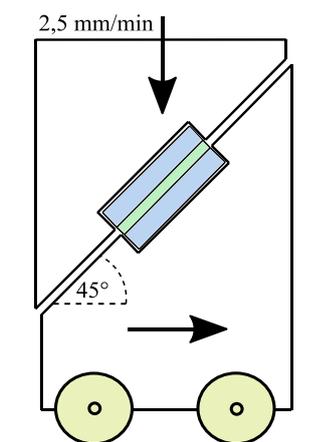


Abbildung 2-3 Schematische (links) und exemplarische (rechts) Darstellung des Druckscherversuchs nach [8], [10]

#### 2.1.4 Pummeltest

Der Pummel-Test (weitere Beschreibung in den Kapiteln 2.2.3 und 3) ist die gebräuchlichste Testmethode zur Abschätzung der Haftung zwischen Glas und Zwischenschicht in Produktionsanlagen. Nachdem die Probe mehrere Stunden lang auf die gewünschte Temperatur von  $-18^{\circ}\text{C}$  gebracht wurde, wird sie auf eine geeignete Hartmetallbasis gelegt. Dann wird eine bestimmte Glasoberfläche durch Hammerschläge (manuell, halbautomatisch z.B. durch einen hydraulisch oder elektrisch gesteuerten Hammer, der immer auf die gleiche Stelle schlägt, so dass das Laminat manuell oder vollautomatisch bewegt werden muss) pulverisiert. Eine Seite der Probe wird auf der Zinnseite (Sn) und eine Seite der Probe auf der Luft/Feuerseite (F) geschlagen. Die Auswertung erfolgt visuell mit Hilfe von Referenzbildern oder Tabellen, die den prozentualen Anteil der freien Folienoberfläche angeben. Die Haftungsskala, auch als Pummelwerte bekannt, reicht von 0 (geringe Haftung) bis 10 (hohe Haftung). Gegenüber den anderen oben vorgestellten Testmethoden hat der Pummel-Test den Vorteil, dass er ohne großen Aufwand durchgeführt werden kann. Zudem sind keine aufwendigen und teuren Prüfmaschinen oder Probenvorbereitungen erforderlich. Für eine manuelle Durchführung sind lediglich ein Hammer und eine abgewinkelte Metallstütze erforderlich. Das Fehlen von Normen führt jedoch zu enormen Unterschieden in der Durchführung und Auswertung. Die Prüfmethode hängt stark von der Erfahrung des Probanden ab. Insbesondere die Anzahl und Intensität der Hammerschläge kann zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Darüber hinaus können Änderungen des Neigungswinkels zwischen Probe und Metalloberfläche zu unterschiedlichen Bruchmustern führen [11]. Die unterschiedlichen Pummelwerte ergeben sich zusätzlich aus der subjektiven Bewertung, die mit dem bloßen Auge des Prüfers beurteilt wird. Eine Standardisierung des Ausführungsverfahrens und der Bewertung würde schließlich eine objektive Aussage ermöglichen.

#### **Patentschriften**

Der Pummel-Test wurde zum ersten Mal im US-Patent US 3,434,915 erwähnt, das 1965 von [12] für Verbundsicherheitsglas in Windschutzscheiben von Autos angemeldet wurde. Nach diesem Patent werden die Prüfkörper (ohne Maßangaben) zunächst  $16 \pm 4$  h bei einer Temperatur von ca.  $-18^{\circ}\text{C}$  gelagert. Der abgekühlte Probekörper wird gegen eine abgewinkelte Metalloberfläche gehalten. Die Probe ist so geneigt, dass eine Seite des Glases das Metall nur mit der Kante berührt. Dann wird die Oberfläche mit einem Flachkopfhämmer pulverisiert. Die zerstörte Oberfläche hat einen Durchmesser von mindestens 7,62 cm, und die verbleibenden Glaspartikel sollten nicht größer als 0,64 cm sein. Danach werden die losen Glasfragmente durch leichtes Schütteln vorsichtig entfernt und der Grad der Adhäsion wird anhand einer Tabelle mit Pummelwerten für verschiedene freie Folienoberflächen bestimmt, siehe Tabelle 3.

Tabelle 2 Übersicht zur Beschreibung des Pummeltests in unterschiedlichen Patenten und Normen

Patent / Norm	Lagerungs-dauer	Lagerungs-temp.	Abmess-ungen mm	Glasdicke	Hammer	Nei-gung
US 3,434,915	16 ± 4 h	-18 °C	— *	— *	Flachkopf	— *
US 4,144,376	2~8 h	-18 °C	150 × 300	— *	Flachkopf	45°
EP 1470 182 B1	≥24 h	-18 °C (± 2 °C)	80 × 300	2x 2.1 mm FG	500 g, abgerundet	5°
US 6,984,679 B2	4 h	-18 °C	100 × 300	2x 2 mm FG	automatisiert *	45°
JC/T 2166	2 h	-18 °C (± 1 °C)	76 × 300	— *	454 g, Flachkopf	45°
GB/T 32020	2 h	-18 °C (± 1 °C)	150 mm × 300 mm	2x 3 mm Floatglas	450 g, Flachkopf	30°

\*Keine Angabe in der entsprechenden Quelle

Im Jahr 1977 wurde das US-Patent US 4,144,376 [13] angemeldet. Hier wird ein Verfahren beschrieben, mit dem die Haftung einer weichmacherhaltigen, teilacetalisierten Polyvinylalkoholfolie auf die geforderten Pummel-Haftwerte geregelt werden kann. Dabei wurde PVB-Harz mit konventionellen Methoden in neu ermittelten Mengen für Verbundsicherheitsglas verarbeitet. Die Proben für den Pummel-Test hatten die Abmessungen 150×300 mm und wurden für 2-8 h bei einer Temperatur von -18 °C (± 0,5 °C) gekühlt. Anschließend wurden die Proben auf einen 45° abgewinkelten Metallblock gelegt. Die Glasoberfläche wurde mit einem Flachkopfhämmer behandelt, bis das Glas vollständig pulverisiert war. Die Prüffläche betrug 100×150 mm. Der Pummeltest wurde nach dem US-Patent 3,434,915 durchgeführt und ausgewertet.

Tabelle 3 Übersicht zur Bewertung des Pummeltests in unterschiedlichen Patenten und Normen

Freie Folienfläche [%] US 3,434,915 & US 4,144,376 GB/T 32020	Freie Folienfläche [%] US 6,984,679 B2**	Freie Folienfläche [%] EP 1 470 182 B1	Freie Folienfläche [%] JC/T 2166	Pummelwert
-	-	Große Bereiche völliger Ablösung	-	-1
100	n.a.*	100	95-100	0
95	n.a.	99	90-95	1
90	97	97	85-90	2
85	n.a.	92	60-85	3
60	83	83	40-60	4
40	n.a.	67	20-40	5
20	43	43	10-20	6
10	n.a.	20	5-10	7
5	n.a.	8	2-5	8
2	n.a.	1	<2	9
0	n.a.	0	/	10

\*n.a. = nicht ausgewertet; \*\*aus einem Graph abgeschätzte Werte

Der Pummel-Test wird auch im US-Patent US 6,984,679 B2 [14] beschrieben und dient zur Überprüfung des Haftniveaus. Die Testproben, bestehend aus 2x2 mm Floatglas (100x300 mm), werden für 4 h bei einer Temperatur von -18 °C gelagert. Das Laminat wird anschließend auf eine 45° geneigte Unterlage gelegt und mit einem automatischen Hammer zerstört. Das Schlagmuster ist vorgegeben und die Auswertung erfolgt anhand einer Grafik, die die freigelegte Folienfläche in Abhängigkeit der Pummelwerte abbildet. In Tabelle 3 sind exemplarisch ein Paar aus dem Diagramm abgeleitete Werte angegeben. Vergleicht man diese mit den Werten aus US 3.434.915, so sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Beispielsweise entspricht in US 3.434.915 ein Pummel-Wert von 2 einer freien Folienoberfläche von 90%, ein Pummel-Wert von 4 einer freien Folienoberfläche von 60% und Pummel 6 einer freien Folienoberfläche von 20%, während in US 6.984.679 B2 Pummel 2 einer freien Folienfläche von ~97%, Pummel 4 einer freien Folienfläche von ~83% und Pummel 6 einer freien Folienfläche von ~43% entspricht.

Das Europäische Patent EP 1 470 182 B1 [15] behandelt eine plastifizierte Folie aus teilacetalisierten Polyvinylalkoholen als Zwischenschicht für Verbundsicherheitsglas. Diese Lamine werden unter anderem dem im Patent beschriebenen Pummel-Test unterzogen. Die Prüfkörper (80x300 mm) bestehen aus zwei 2,1 mm dicken Floatglasscheiben und werden für mindestens 24 h in einer Kühlkammer bei einer Temperatur von -18°C (± 2°C) gelagert. Die Proben werden dann auf eine Stahlunterlage mit einer Neigung von 5° gelegt und mit einem Hammerkopf (500 g, runder Kopf) gleichmäßig geschlagen. Die Schlagintensität beträgt 1 Nm pro Schlag. Um sicherzustellen, dass die Glasplatte an jedem Punkt vollständig zerstört wird, überlappen sich alle Schläge um 75%. Mindestens 6 cm (von der gemessenen Unterkante) werden zerstört. Nachdem die Probe leicht abgeklopft wurde, wird eine Sichtprüfung bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Pummelwerte (0 bis 10) werden anhand der freigelegten Folienflächen zugeordnet. Weist ein Prüfmuster große Bereiche mit vollständiger Ablösung auf, kann ihm der Pummelwert -1 zugeordnet werden. Die Zuordnung der Pummelwerte in Abhängigkeit von der freien Folienoberfläche entspricht der Grafik aus [14].

In jüngerer Zeit wurden zwei chinesische Normen entwickelt, die als Leitfaden für die Durchführung und Auswertung des Pummeltests dienen sollen, nämlich [16] und [17].

Bei der [17] handelt es sich um eine unverbindliche nationale chinesische Norm (Normebene 1) mit dem Titel „Polyvinylbutyral Zwischenschicht für Verbundglas“. Sie ist für alle Regionen Chinas gültig. JC/T 2166-2013 [16] ist eine chinesische Handelsnorm (Norm der Ebene 2), die PVB-basierte Zwischenschichten für Verbundglas behandelt. Normen der Ebene 2 sind nach Industriesektor eingeteilt, wobei JC für den Sektor „Baumaterialien“ steht.

Wie in Tabelle 2 aufgeführt, werden in den beiden oben genannten Normen unterschiedliche Probenabmessungen empfohlen, die 150×300 mm (GB/T 32020) bzw. 76mm×300 mm (JC/T 2166) betragen. Beide Normen schlagen eine Lagerzeit von 2 h in einer Kühlkammer bei einer Temperatur von  $-18^{\circ}\text{C} (\pm 1^{\circ}\text{C})$  vor. Außerdem sind leichte Unterschiede bei den Testbedingungen zu beobachten. Im JC/T 2166 wird die Probe auf eine um  $45^{\circ}$  geneigte Unterlage gelegt (wobei die Probe einen zusätzlichen Winkel von  $5^{\circ}$  zur geneigten Oberfläche aufweist) und mit einem 454 g schweren Flachkopfhämmer zerstört, während im GB/T 32020 eine Neigung von  $30^{\circ}$  und ein 450 g schwerer Flachkopfhämmer verwendet wird.

Zusätzlich ist der Pummelvorgang laut der GB/T 32020 innerhalb von 3 min abzuschließen.

Die Einstufung in eine Pummelklasse erfolgt in beiden Fällen mittels Beurteilung der freigelegten Folienfläche in %, siehe Tabelle 3. Die Klassifizierung in der GB/T 32020 (Pummel 0-10) entspricht dabei der aus den Patenten US 3,434,915 & US 4,144,376. Im Gegensatz zu den restlichen Patenten und Richtlinien, ist in der JC/T 2166 für jede Pummelstufe (0-9) eine untere und obere Grenze an freier Folienfläche angegeben, siehe Tabelle 3.

Tabelle 2 fasst die wichtigsten Parameter zur Versuchsdurchführung und Tabelle 3 zur Versuchsauswertung zusammen. Abbildung 2-4 zeigt eine Zusammenfassung der freigelegten Folienflächen in Abhängigkeit des Pummelwertes für unterschiedliche Patente bzw. Normen.

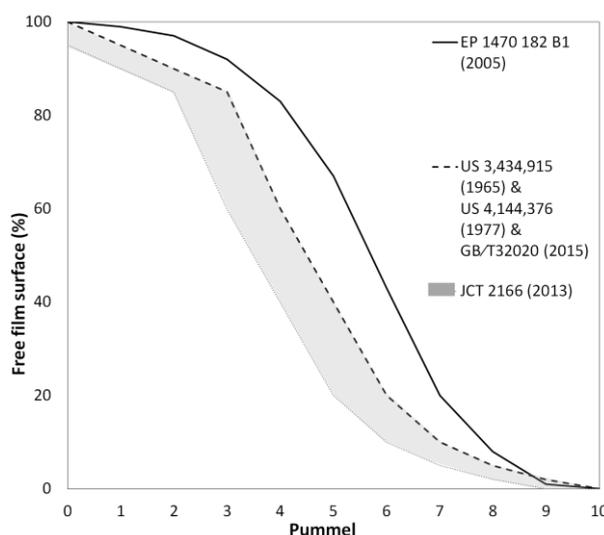


Abbildung 2-4 Zusammenfassung der Pummelstufung in Abhängigkeit der freigelegten Folienfläche

## Herstellerrichtlinien

### **Standard PVB**

Eastman hat den Autoren sowohl Referenzbilder zur Pummelklassifizierung als auch eine Beschreibung zur Durchführung des Experiments zur Verfügung gestellt. Die Referenzbilder der Pummel-Klassen 1-9 sind in Abbildung 2-5 aufgeführt. Die Beschreibung des Experiments ist auch in [18] zu finden. Für die Probenlagerung (ohne Angabe der Abmessungen) wird empfohlen, die laminierten Proben für eine ausreichende Zeit (1-6 h je nach Gefrierschrank) in einen  $-18^{\circ}\text{C}$ -Gefrierschrank zu legen, damit sie ein Temperaturngleichgewicht erreichen können. Nachdem die Proben konditioniert sind, sollte das Pummelverfahren innerhalb von Sekunden nach Entnahme aus dem Gefrierschrank beginnen. Es wird empfohlen, die Probe in einem Winkel von etwa  $5^{\circ}$  zur Ebene der Pummelplatte zu halten, so dass nur der Rand des ungebrochenen Glases die Platte berührt. Das Laminat sollte nach und nach in Schritten von etwa 10 mm entlang der unteren 15 mm des Laminats geschlagen werden. Wenn die untere Kante vollständig pulverisiert ist, müssen die nächsten 15 mm auf die gleiche Weise pulverisiert werden. Dies muss wiederholt werden, bis mindestens 7-10 cm des Laminats geschlagen wurden. Es wird sorgfältig darauf geachtet, dass die gesamte glatte Glasoberfläche pulverisiert wird. Loser Glasstaub muss durch leichtes Bürsten des geschlagenen Laminats entfernt werden. Für die Bewertung und Pummel-Klassifizierung wird empfohlen, das Laminat auf einen schwarzen Hintergrund zu legen und die Probe mit den Referenzbildern zu vergleichen.

Everlam stellt eine Broschüre zur Verfügung, die eine Beschreibung des Pummel-Verfahrens sowie die Bewertung für LAM50/550 -PVB -Lamine enthält. Hier müssen die Testproben (ohne Abmessungen) für 3 h auf eine Temperatur von  $-18^{\circ}\text{C}$  abgekühlt werden. Die Probe wird dann von Hand mit einem Flachkopfhämmer mit einem Gewicht von 500 g auf einem Amboss bei  $5^{\circ}$  manuell geschlagen. Die Schläge werden mit einem Abstand von 1,25 cm in einer Reihe und mit 2 cm Abstand zwischen den Reihen ausgeführt. Das zerstörte Laminat wird mit den Referenzbildern (Abbildung 2-5) visuell inspiziert. Darüber hinaus sind ein Auswertungsdiagramm auf der Grundlage der Werte des US 4,144,376 und Korrelationsdiagramme der Pummelwerte mit CSS (Kompressionsscherversuch) und Kugelfall-Leistungen enthalten.

In Kuraray's Handbuch, das sich mit der Verarbeitung von Trosifol® PVB befasst, wird die Versuchsdurchführung des Pummeltests kurz beschrieben [19]. Die Probenabmessungen betragen 80x200 mm (bzw. 80x300 mm für Windschutzscheibenproben) und die Floatglasdicke sollte 4 mm nicht überschreiten. Die Probe wird für mindestens 2 h bei einer Temperatur von  $-18^{\circ}\text{C}$  gelagert. Das Pummel-Verfahren ist halbautomatisch. Das Glas bildet einen kleinen Winkel zur geneigten Metallunterlage. Nach dem Handbuch wird anhand eines Diagrammes zwischen hoher und mittlerer Glashaftung unterschieden. Zusätzlich zum Handbuch stellte Kuraray den Autoren ein Poster mit Referenzbildern der Pummelwerte 1 bis 10 für Trosifol®-Folien zur Verfügung. Diese sind in Abbildung 2-5 dargestellt. Außerdem ist ein Pummel-Handbuch auf der Website des Herstellers zu finden [20]. Bei Laminaten mit PVB entsprechen die dort angegebenen Pummel-Standards (Pummelverfahren, Referenzbilder, Grafik mit freier Folienoberfläche, Korrelationen zu CSS und Kugelfalltests) denen von Everlam. Es ist zu beachten, dass die Referenzbilder vom Poster und dem Pummel-Standardhandbuch abweichen (siehe Abbildung 2-5).

### Steiferes PVB

Neben den genannten Arbeitsanweisungen für Standard PVB bieten Kuraray und Everlam zusätzliche Anleitungen für steiferes PVB an.

In der Broschüre von Everlam wird der Pummelvorgang für das steifere LAM72T beschrieben. Hierbei sind die Proben bei Raumtemperatur (20-25°C) zu lagern und zu prüfen. Die Probe wird flach (0°) auf einem Amboss mit einem 500g Flachhammer beginnend von der unteren Kante bearbeitet. Der Abstand zwischen zwei Hammerschlägen innerhalb einer Reihe beträgt 1,25cm, der zwischen zwei Reihen 2cm. Es ist mindestens eine Fläche von 100x100 mm zu pummeln. Die Auswertung erfolgt an Hand der in Abbildung 2-5 (Zeile 3) dargestellten Referenzbildern.

In der allgemein bauaufsichtlichen Zulassung Z-70.3-256 „Verglasungen aus Verbund-Sicherheitsglas mit der PVB-Folie Trosifol® Extra Stiff B130“ (2020, gültig bis 2025) [21] wird der Pummeltest für das steifere PVB Produkt Trosifol Extra Stiff B130 beschrieben. Typische Probekörperabmessungen werden mit 80x300mm (aber mindestens 80x150mm) und einem Glasaufbau von 3mm Floatglas und 0,76mm Zwischenschicht angegeben. Die Proben sind vor der Prüfung mindestens 4h bei einer Temperatur von 5°C+/-2°C zu lagern und anschließend bei gleicher Temperatur zu pummeln. Damit lediglich die Kante des Probekörpers Kontakt zur Unterlage hat, wird der Probekörper in einem Winkel von 5° zur geneigten Pummelplatte oder zum Schlagstock gelegt. Es wird ein 500g schwerer Flachkopfhämmer verwendet um 6-10 cm der Probe nach einem vorgegebenen Schlagmuster zu bearbeiten. Der Pummelvorgang beginnt an der unteren Kante und die einzelnen Schläge sollen ca. 50% überlappen, was einem Abstand von ca. 2cm entspricht. Die Einstufung in eine Pummelklasse erfolgt visuell durch einen Vergleich der gepummelten Probe (auf braunem Kraftpapier) mit den Referenzproben (Bilder aus Tabelle 2, Zeile 2) verglichen. Der Pummelwert 0 entspricht keiner Haftung und ist nicht in Form eines Referenzbildes abgebildet.

### Ionoplast

Es gibt auch Arbeitsanleitungen für den Pummel-Test an Verbundsicherheitsglas mit Ionoplast (SentryGlas®). In der Arbeitsanweisung von Du Pont De Nemours [22] sind die zu pummelnden Proben für mindestens 24h bei 20°C +/-5°C zu lagern. Der Winkel zwischen Probe und geneigter Unterlage beträgt 5°. Die Proben werden so lange mit gleichmäßigen Hammerschlägen (500g Schlosserhammer mit Kugelfinne) oder mit einer Pummelmaschine bearbeitet (Zeilenweise), bis 8-10cm der Probe auf voller Breite geprüft sind. Es wird angegeben, dass dazu ca. 80-100 Schläge erforderlich sind. Zur Beurteilung der Pummelstufe ist der glasfreie Folienanteil der Probe und die Glassplittergröße mit den Referenzproben vor Ort zu vergleichen.

Der allgemein bauaufsichtlichen Zulassung Z-70.3-253 „Verglasungen aus Verbund-Sicherheitsglas mit der Zwischenschicht SentryGlas® SG5000“ (2020, gültig bis 2025) [23] ist eine Prüfbeschreibung für den Pummel-Test beigefügt. In dieser werden Probekörperabmessungen von 80x300mm (aber mindestens 80x150mm) mit einem Glasaufbau von 3mm Floatglas und 1,52mm Zwischenschicht angegeben. Die Proben sind vor der Prüfung mindestens 30min bei Raumtemperatur 25°C+/-5°C zu lagern. Der Probekörper wird in einem Winkel von 5° zur geneigten Pummelplatte oder zum Schlagstock gelegt. Somit hat nur die untere Kante der Probe Kontakt zur Unterlage. Zum Pummeln wird ein 500g schwerer Flachkopfhämmer verwendet. 6-10 cm der Probe werden von der unteren Kante beginnend entsprechend einem überlappenden Schlagmuster bearbeitet. Damit die Glasoberfläche pulverisiert, wird eine Überlappung der Schläge von 50% empfohlen, was einem Abstand von ca. 2cm entspricht. Zur Beurteilung der Pummelklasse (0-10) werden die Proben auf braunes Kraftpapier gelegt und sorgfältig mit den Referenzproben (Bilder aus Tabelle 2, Zeile 2)

verglichen. Der Pummelwert 0 entspricht keiner Haftung und ist nicht in Form eines Referenzbildes abgebildet.

Im Pummel-Handbuch [20] wird für Lamine mit SentryGlas® Zwischenschichten eine Lagerungs- und Prüftemperatur von 22°C angegeben. Die Proben sollen während dem Pummelvorgang flach auf dem Amboss liegen. Die Abstände zweier in einer Reihe benachbarter Schläge soll 1,25cm und der Abstand zwischen zwei Pummelreihen 2cm betragen. Gepummelt wird mit einem 500g schweren, flachen Hammerkopf. Die Einstufung in eine Pummelklasse erfolgt in diesem Handbuch unabhängig von der Folienart (PVB oder SentryGlas) an Hand der gleichen Referenzbilder. Diese entsprechen, wie bereits weiter oben erwähnt, denen von Everlam, siehe Abbildung 2-5.

Die Referenzbilder unterschiedlicher Folienhersteller sind in Abbildung 2-5 zusammengefasst.

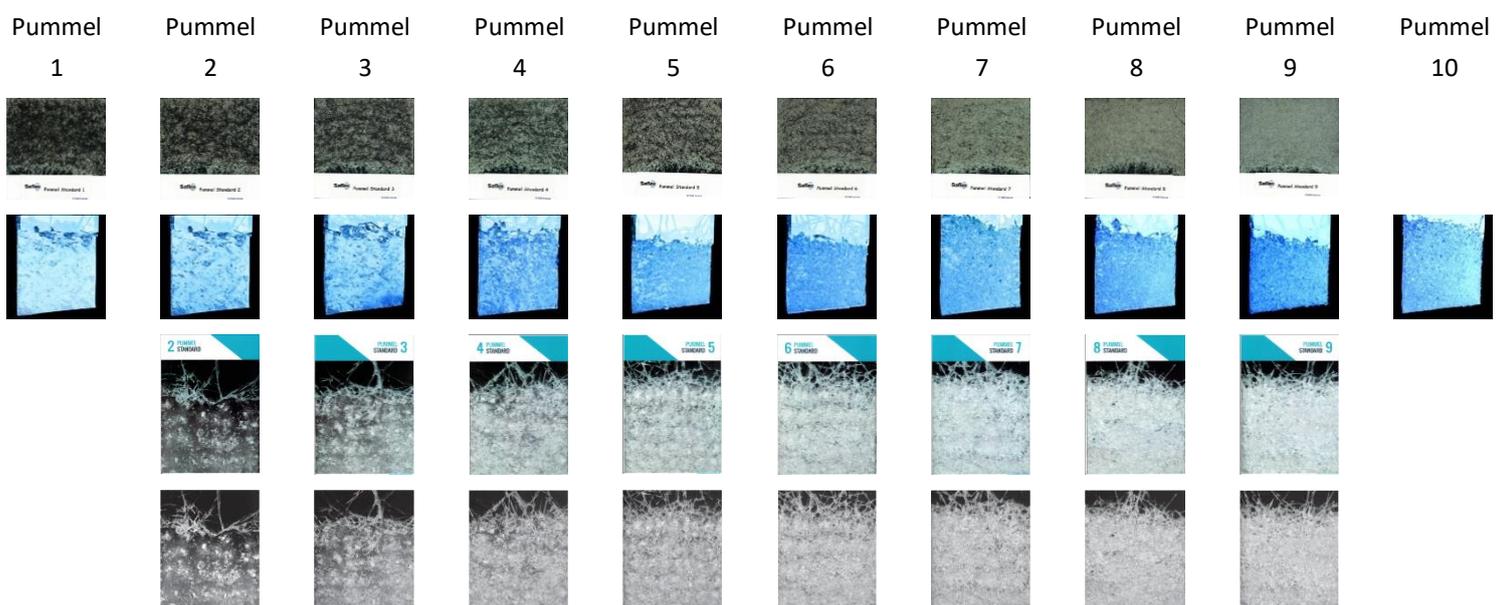


Abbildung 2-5 Zusammenfassung der Referenzbilder von unterschiedlichen Folienherstellern

## EVA

Der Pummeltest wird nur selten für EVA-Folien angewendet, da hier stets hohe Pummelwerte zu erwarten sind und damit nur eine geringe Aussagekraft einhergeht. [9]

Zusätzlich zu den Literaturrecherchen zum Stand der Technik des Pummeltests hat im Rahmen des Projektes folgender Austausch zwischen Industrie und Universitäten stattgefunden:

- Besichtigung Kuraray, Troisdorf.
  - Datum: 31.01.2019
  - Teilnehmer: Uni BWM, TUDa
- Besichtigung Eastman, Gent.
  - Datum: 20.–21.02.2019
  - Teilnehmer: TUDa
- Projektbesprechung in Darmstadt
  - Datum: 27.05.2019

- Teilnehmer: Uni BWM, TUDa, DIBt, Verrotec, BF, Saint Gobain, AGC Interpane, Kuraray, Eastman, GLAAST, Folienwerk Wolfen
- Projektbesprechung in Würzburg
  - Datum: 15.10.2019
  - Teilnehmer: Uni BWM, TUDa, DIBt, BF, Saint Gobain, Interpane, BGT, Kuraray, Everlam, Eastman, Kömmerling/Fuller, Wernberg
- Fragebogen von DIBt an VSG Hersteller Teilnehmer: Sencoglas, Guardian, SGT

## 2.2 Stand der Forschung

Wenn man sich mit dem Begriff „Resttragfähigkeit“ beschäftigt, ist es zunächst wichtig die verschiedenen, möglichen Bruchzustände zu definieren. In Abbildung 2-6 sind diese einzeln dargestellt.

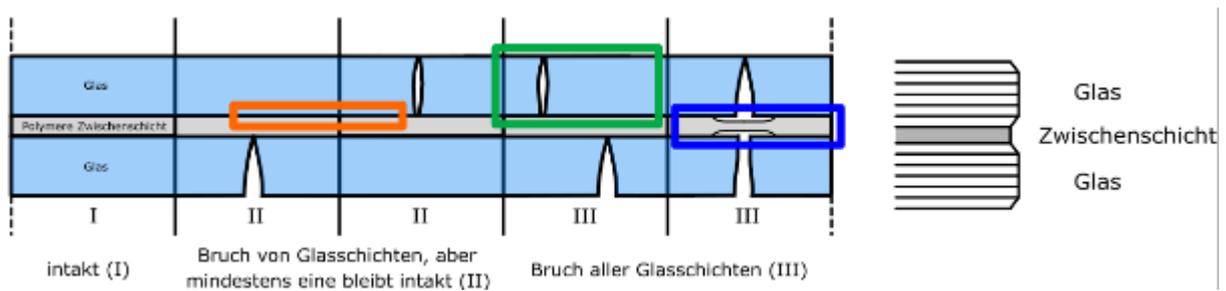


Abbildung 2-6 Überblick über die einzelnen Bruchzustände

Der gebrochene Zustand bzw. die Resttragfähigkeit wurden in den letzten 20 Jahren intensiv untersucht. Es existiert eine Vielzahl an Einflussfaktoren, die in Bezug auf das Resttragverhalten untersucht werden müssen. In Abbildung 2-7 ist eine Übersicht über die wesentlichen Einflussfaktoren gegeben. Um für eine Normung allgemein gültige Aussagen über das Resttragverhalten treffen zu können bzw. einen Berechnungsansatz für gebrochenes Glas zu entwickeln, sollten Randbedingungen wie die Lagerung zunächst nicht betrachtet werden. Die zu untersuchenden Einflussfaktoren sind in der Abbildung kursiv dargestellt.

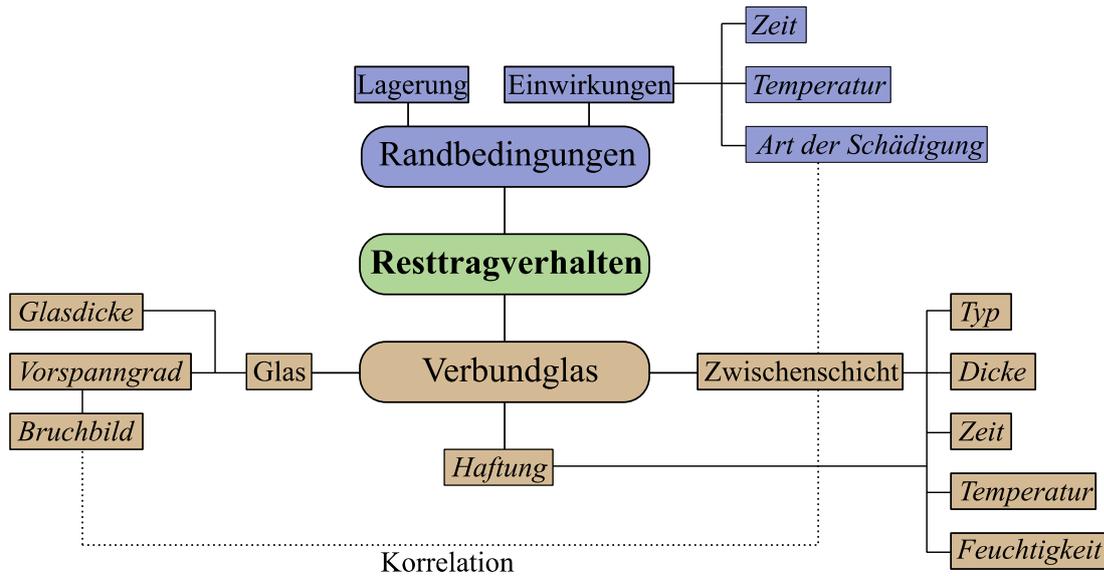


Abbildung 2-7 Einflussfaktoren auf das Resttragverhalten

Untersuchungen zum Trag- und Resttragverhalten unter dynamischer Einwirkung (Explosions-/ Stoßeinwirkung) wurden unter anderem in [24 bis 32] durchgeführt und können in der entsprechenden Literatur nachvollzogen werden. Eine Analyse des Bruchvorgangs in Abhängigkeit des Vorspanngrades findet nicht statt. Forschungsergebnisse hierzu finden sich u.a. in [33 bis 38] Im Folgenden werden die wesentlichen Forschungsergebnisse im Zusammenhang mit dem Resttragverhalten im Zustand 3 von Verbundglas zusammengefasst. Dabei wird auf die Einflussfaktoren: Bruchbild (Rissverteilung), Haftung, Feuchtigkeit und die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der Zwischenschicht unter großen Verzerrungen eingegangen.

Neben den auf Versuchsdaten basierenden Erkenntnissen und entwickelten Materialmodellen existieren in der Literatur auch rein theoretische Überlegungen zur numerischen Berechnung von gebrochenem Glas. Hier wird auf die Ergebnisse in [39 bis 41] verwiesen.

### 2.2.1 Untersuchungen zur Zeit- und Temperaturabhängigkeit unter großen Verzerrungen

Im gebrochenen Zustand können die Grenzen der linearen Viskoelastizität leicht überschritten werden. Bei grob brechendem Glas kann es dabei lokal und bei gebrochenem ESG global zu großen Verzerrungen in der Zwischenschicht kommen (vgl. Abbildung 2-8).

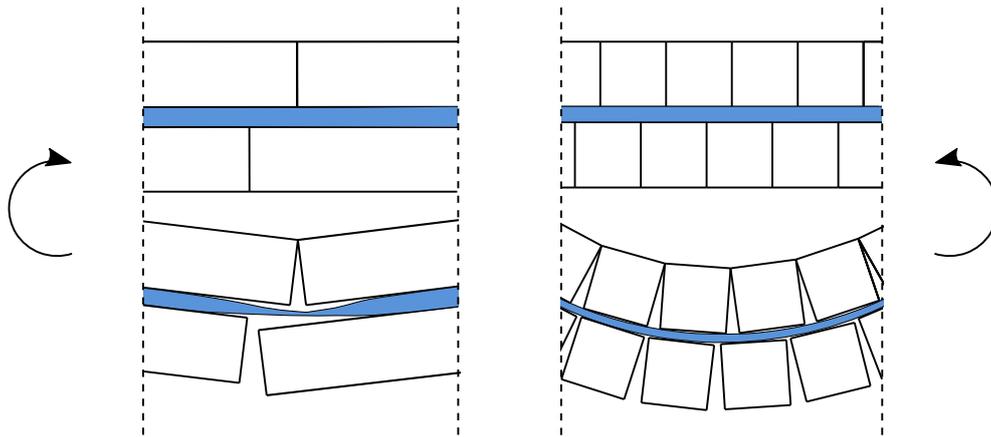


Abbildung 2-8 Beanspruchung der Zwischenschicht bei grob brechendem Glas (links) und fein brechendem Glas (rechts)

Das Materialverhalten von Polymeren unter großen Verzerrungen lässt sich mit Materialgesetzen der Hyperelastizität beschreiben. Um den gesamten Energieraum messtechnisch erfassen zu können und Parameter für hyperelastische Materialmodelle zu bestimmen, sind neben uniaxialen Zugversuchen auch planare sowie biaxiale Zugversuche notwendig. Da die Durchführung uniaxialer Zugversuche versuchstechnisch einfach durchzuführen ist, liegen hier für verschiedene Zwischenschichtmaterialien die meisten Daten vor. Eine systematische Untersuchung von Standard-PVB (*Trosifol BG*) unter verschiedenen Wegraten bei einer Temperatur von 22–23°C wurde in [31] durchgeführt. Weitere Versuchsergebnisse uniaxialer Zugversuche an PVB finden sich in [42 bis 46]. Insgesamt zeigt sich erwartungsgemäß, dass höhere Dehnraten zu einem deutlich steiferen Materialverhalten führen (vgl. Abbildung 2-9, rechts). Da in den Versuchen teils unterschiedliche Wegraten gefahren werden und es nicht immer eindeutig ist, ob technische oder wahre Bezugsgrößen ausgewertet werden bzw. in manchen Quellen lediglich die Wegrate und nicht die tatsächliche Dehnrate betrachtet wird, ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse nur bedingt zielführend. Die Materialmodellierung in [31] erfolgt für verschiedene Modelle der Hyperelastizität (*Mooney-Rivlin, Yeoh, Ogden*) und entsprechende Parameter werden bereit gestellt. In [33] werden ebenfalls uniaxiale Versuchsdaten von Standard-PVB (*Trosifol BG*) bei Raumtemperatur ausgewertet und Materialparameter für hyperelastische Materialmodelle (*Mooney-Rivlin, Neo-Hooke, Extended Tube*) angegeben. Zusätzlich erfolgt dort eine Unsicherheitsquantifizierung der verwendeten Materialmodelle. Ergebnisse für planare und biaxiale Versuche an PVB sind bislang kaum verfügbar. Versuchsergebnisse bei Temperaturen über und unter dem Glasübergangsbereich von Standard-PVB sind ebenfalls bislang kaum vorhanden. In [45, 47 bis 49] finden sich Versuchsergebnisse uniaxialer Zugversuche an PVB bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten. Für Temperaturen unter der Glasübergangstemperatur steigt die Steifigkeit stark an. Allerdings sinkt die Duktilität des Materials, d.h. mit sinkender Temperatur steigt die Bruchspannung und sinkt die Bruchdehnung (vgl. Abbildung 2-9, links). In Abbildung 2-9 wird auch die mögliche Diskrepanz der Ergebnisse bei gleichen Versuchen deutlich. Ein Vergleich der Kurven bei 23°C und einer Dehnraten von  $0,1 \text{ s}^{-1}$  zeigt eine extreme Abweichung in den Ergebnissen. Eine mögliche Ursache kann darin liegen, dass unterschiedliche PVB-Typen getestet wurden. Während in [31] der PVB-Typ beschrieben wird (*Trosifol BG*), ist in [47] nur von PVB im Allgemeinen die Rede. Eine weitere Ursache kann in einer fehlerhaften Versuchsauswertung liegen (in beiden Versuchen erfolgte die Messung der Dehnung mittels optischer Bildauswertung).

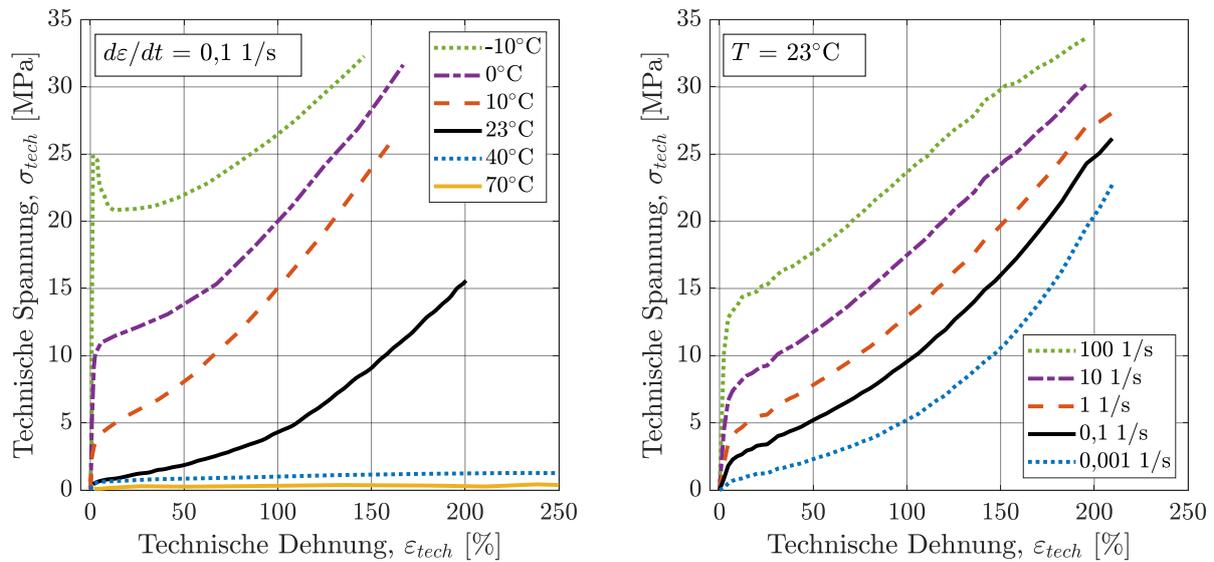


Abbildung 2-9 Spannungs-Dehnungsdiagramm von PVB bei verschiedenen Temperaturen nach [47] und Dehnraten nach [31]

## 2.2.2 Untersuchungen zum Bruchbild/ Rissverteilung und Lastabtrag

In Abhängigkeit des Vorspanngrades und der Art der Schädigung entsteht ein charakteristisches Bruchbild. Es wird dabei zunächst zwischen grob brechendem Glas (Float Glas, TVG) und in kleine Glasbruchstücke zerspringendem Glas (ESG) unterschieden. Bei der Verwendung von ESG spielt die Art der Schädigung eine untergeordnete Rolle, da im Schädigungsfall die ganze Scheibe charakteristisch bricht. Hier kann es lediglich zu Unterschieden in der resultierenden Fragmentgröße der einzelnen Glasbruchstücke kommen, je nachdem, ob die Schädigung beispielsweise durch eine statische oder dynamische Einwirkung eingebracht wurde. Bei grob brechendem Glas hat die Art der Schädigung dagegen einen wesentlichen Einfluss auf das resultierende Bruchbild. So führt beispielsweise ein thermischer Glasbruch in der Regel lediglich zu einem bzw. wenigen Rissen im Randbereich, welche im ungünstigsten Fall über die komplette Scheibe laufen. Auch eine Brucherzeugung durch eine statische Einwirkung resultiert im Bereich der Spannungsspitzen in nur wenigen Rissen. Wird ein grob brechendes Glas dagegen durch eine dynamische Einwirkung gebrochen (z.B. Stoßeinwirkung), entstehen im Bereich der Einwirkung auf Grund des hohen lokalen Energieeintrages viele kleine Glasbruchstücke und die Risse breiten sich in der Regel vom Zentrum der Einwirkung radial zum Randbereich aus. Auch die Lagerung hat einen Einfluss auf das Bruchbild; lokale Einspannungen (z.B. Punkt- oder Klemmhalter) führen ebenfalls zu einer Verfeinerung des Bruchbildes in diesen Bereichen.

Das Bruchbild eines Verbundglases hat im Zustand 3 einen maßgebenden Einfluss auf das Tragverhalten. Untersuchungen zum Bruchbild und Tragverhalten grob brechender Verbundgläser wurden u.a. in [3, 50] durchgeführt. In [50] wurden Versuche zum Lastabtrag an vierseitig (quadratische Scheiben) und zweiseitig linienförmig (rechteckige Scheiben) gelagerten gebrochenen Verbundgläsern durchgeführt.

Wesentliche Erkenntnisse aus [51] und [50] sind:

- Im Zustand 3 führt eine Steigerung der Zwischenschichtdicke und ein unsymmetrischer Glasaufbau (obere Glasschicht dicker als untere) zu einer Steigerung der Resttragfähigkeit.
- Es bilden sich Fließgelenklinien an Stellen aus, bei denen die Risse in den Glasschichten nahezu koinzident verlaufen.
- Es konnten unterschiedliche Bruchmechanismen (Fächer-, Pyramiden-, Eck, Linienmechanismus) beobachtet werden, wobei diese vom eingebrachten Bruchbild bzw. der Lagerung abhängen.
- Eine vierseitig gelagerte Scheibe hat eine größere Resttragfähigkeit als eine zweiseitig gelagerte Scheibe.
- Der endgültige Versagenszustand tritt ein, wenn in der oberen Glasschicht keine Druckkräfte mehr übertragen werden können.

Neben diesen Erkenntnissen aus den Versuchen wurde über den Ansatz einer Fließgelenktheorie versucht, das Tragverhalten der gebrochenen Scheiben zu berechnen. Ein Vergleich zwischen Berechnung und Versuchsergebnis ergab Abweichungen in Bezug auf die Verformung von 8-64%, wobei die Ergebnisse der Berechnung nicht immer auf der sicheren Seite lagen. Daher ist dieser Ansatz nur bedingt für die Bemessung eines gebrochenen Verbundglases im Zustand 3 geeignet. Darüber hinaus wurden die Versuche in dieser Arbeit mit einer Zwischenschicht aus PVB durchgeführt, ohne dass dieses näher klassifiziert wird. Die Versuche wurden alle bei Raumtemperatur durchgeführt, ein Einfluss der Temperatur und Feuchtigkeit wurde nicht betrachtet. Die Untersuchungen in [3] beschränken sich auf den koinzidenten Riss einer zweiseitig linienförmig gelagerten Scheibe im sogenannten TCB-Versuch. Wesentliche Erkenntnis unter anderem in [50] ist, dass sich an den Bruchlinien Fließgelenke ausbilden, an denen der primäre Lastabtrag im gebrochenen Zustand stattfindet. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Resttragfähigkeit in Bezug auf die resultierenden Verformungen mit steigender Steifigkeit der Zwischenschicht zunimmt. In [52] erfolgte ebenfalls die Untersuchung der Resttragfähigkeit an vierseitig gelagerten Verbundgläsern (quadratisches Format), wobei hier verschiedene Bruchzustände erzeugt wurden. Es erfolgte ein Anschlagen der Scheiben an definierten Punkten mit einem Körner sowie eine Brucherzeugung an den Diagonalen. In dieser Versuchsserie wurden eine Reihe von PVB Folientypen untersucht (*BG R10 (neu LR)*, *BG R15 (neu MR)*, *BG R20 (neu NR)*, *ES*, *SC*, *SC+*). In Bezug auf den Haftgrad konnte kein eindeutiger Unterschied festgestellt werden. Auch hier führte die Verwendung einer steifen PVB Zwischenschicht (*ES*) zur höchsten und eine weiche Zwischenschicht (*SC*) zur geringsten Resttragfähigkeit in Bezug auf die maximal aufnehmbare Last im quasi-statischen Versuch. Bei der Durchführung von Kriechversuchen an gebrochenen Verbundgläsern konnte festgestellt werden, dass eine höhere Haftung der Zwischenschicht zu einem Einreißen der Zwischenschicht führen kann, was zu einer schnelleren Versagenszeit führt.

Der Lastabtrag von gebrochenen ESG wurde u.a. in [50, 51, 53, 54] untersucht. In [10] wurden Zugversuche an gebrochenem ESG mit PVB Zwischenschicht bei einer Temperatur von 10 °C durchgeführt. Wesentliche Erkenntnis dieser Versuche war, dass sich das Materialverhalten von gebrochenem ESG unter Zugbelastung mit einem bilinearen Materialmodell näherungsweise beschreiben lässt. In [54] erfolgt die Untersuchung des Tragverhaltens von gebrochenem Verbundglas aus ESG mit einer zusätzlichen Bewehrungseinlage in der Zwischenschicht. Eine Aussage über das allgemeine Tragverhalten im Zustand 3 ist daher auf Grundlage dieser Arbeit nicht möglich. In [50, 51] wurden Resttragfähigkeitsversuche an gebrochenem Verbundglas mit Standard-PVB

durchgeführt. Da alle Probekörper für den dort gewählten Versuchsaufbau sofort versagten, kann aus diesen Versuchen kein Erkenntnisgewinn generiert werden.

### 2.2.3 Untersuchungen zur Haftung

Da die Haftung der Zwischenschicht ein wesentlicher Einflussfaktor auf das Resttragverhalten ist, erfolgte zu diesem Einflussparameter eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen. Im Folgenden werden die einzelnen Versuche kurz beschrieben und die wesentlichen Erkenntnisse herausgestellt.

#### **Through-Crack-Tensile (TCT) Versuch**

Der Through-Crack-Tensile (TCT) Versuch hat sich inzwischen als Versuch zur Untersuchung des Delaminationsverhaltens verschiedener Zwischenschichten etabliert. Bei diesem Versuch wird ein Verbundglas gezielt beidseitig koinzident gebrochen oder ein entsprechender Probekörper direkt hergestellt. Der Probekörper wird dann lotrecht zu der Bruchkante einer Zugbelastung ausgesetzt, wobei der Versuch in der Regel weg- bzw. dehnratengesteuert durchgeführt wird. In Abbildung 2-10 ist der Versuch schematisch dargestellt. Bei zunehmender Dehnung löst sich die Zwischenschicht vom Glas (die Zwischenschicht delaminiert), um eine weitere Längenänderung der Zwischenschicht zu ermöglichen. Neben den Haftungseigenschaften kann man mit diesem Versuch auch das Steifigkeitsverhalten der Zwischenschicht unter großen Verzerrungen ermitteln. Erstmals beschrieben wurde dieser Test bereits 1997 in [55], wo bereits unterschiedliche Haftgrade untersucht wurden. Primäres Ziel dieses Versuches ist die Bestimmung einer Energiefreisetzungsrate, d.h. die Grenzflächenenergie der interlaminaeren Adhäsion zu bestimmen. TCT-Versuche an verschiedenen Zwischenschichttypen unter verschiedenen Bedingungen (Variation der Dehnrates, Temperatur, Zwischenschichtdicke etc.) wurden u.a. in [3, 27, 31, 56 bis 60] durchgeführt.

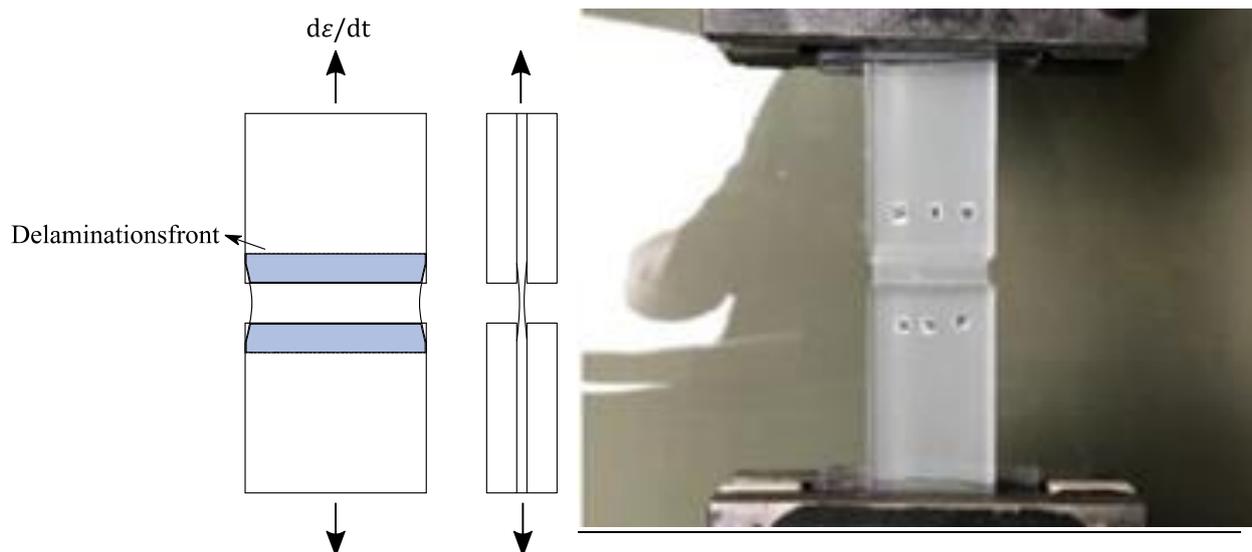


Abbildung 2-10 Schematische (links) und exemplarische (rechts) Darstellung des TCT-Versuchs

Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse aus den Versuchsreihen abgeleitet werden:

- Die Temperatur hat einen sehr großen Einfluss auf das Haftungsvermögen. Bei hohen Temperaturen nimmt die Delamination stark zu und die Steifigkeit der Zwischenschichten ab. Bei Raumtemperatur führen bereits kleine Temperaturabweichungen zu großen Streuungen in den Ergebnissen (bei der Untersuchung von Standard-PVB).
- Die Bestimmung einer Energiefreisetzungsrate ist nur möglich, wenn sich mit beginnender Delamination ein ungefähr konstantes Kraftniveau ausbildet. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass dies stark von der Prüfgeschwindigkeit abhängig ist und eine höhere Geschwindigkeit zu konsistenten Ergebnissen führt.
- Es kommt insgesamt zu großen Streuungen in den Ergebnissen, da sich die Delaminationsfront selten gleichmäßig ausbreitet. Dies lässt darauf schließen, dass der Haftverbund zwischen Glas und Zwischenschicht nicht gleichmäßig ist.
- Zwischenschichten mit hoher Haftung (z.B. BG R20 (neu NR), SentryGlas) zeigen so gut wie kein Delaminationsverhalten. Infolge dessen wird bei diesen Zwischenschichten die Bruchdehnung erreicht, bevor die Zugkraft ausreicht, um den Haftverbund zwischen Glas und Zwischenschicht zu überwinden. Allerdings ergeben sich für Zwischenschichten mit höherer Haftung deutlich größere Zugfestigkeiten.

Die in Versuchen ermittelte Energiefreisetzungsrate kann genutzt werden, um Materialmodelle für die Beschreibung des Delaminationsvorgangs zu kalibrieren. Ein solches Materialmodell ist beispielsweise das Kohäsivzonenmodell, welches allgemein den Bruchprozess in einem Körper beschreibt [61]. Kohäsivzonenmodelle haben sich aber nicht nur in der numerischen Simulation von Bruchprozessen in homogenen Materialien, sondern auch in der Beschreibung von Bruchvorgängen in Grenzflächen etabliert. Für eine allgemeine Beschreibung des Kohäsivzonenmodells, auch mit der Formulierung verschiedener Kohäsivgesetze, wird an dieser Stelle auf [62 bis 64] und [3] verwiesen. Von Bedeutung ist, dass die Energiefreisetzungsrate der maßgebende Materialparameter für dieses Modell ist, welches in gängiger FEM-Software implementiert ist. Eine numerische Berechnung durchgeführter TCT-Versuche erfolgt in [3] mit der FEM Software ANSYS (V 14.5). Dabei konnte festgestellt werden, dass die in der FE-Modellierung vorgenommenen Einstellungen (Netzeinstellungen, Kontaktdefinition, Elementtypen, Werkstoffgesetze, Kohäsivgesetz) zu einer großen Variation der Ergebnisse führen und infolge dessen teilweise große Unterschiede zwischen Experiment und numerischen Modell vorliegen. Allerdings kann gezeigt werden, dass eine Delamination der Zwischenschicht mit diesem Modell numerisch stabil abgebildet werden kann und es sich so für die Implementierung in ein Resttragfähigkeitsmodell eignet. Insgesamt ist der TCT-Versuch somit ein gutes und einfaches Mittel, um erste Materialparameter für die Modellierung von gebrochenem Glas zu bestimmen. Kritisch bewertet werden kann beim TCT-Versuch, dass das gebrochene Verbundglas lediglich einer Zugbelastung ausgesetzt wird. In der Realität liegt im Bereich der Risse in der Regel ein komplexer Beanspruchungszustand vor. Darüber hinaus lassen sich nach [3] Energiefreisetzungsrate nur für Wegraten > 60 mm/min zuverlässig ermitteln. Inwiefern durch diesen Versuch repräsentative Materialparameter für die Modellierung einer gebrochenen Verbundglasscheibe unter statischer Last erbracht werden können, ist daher zu hinterfragen [3, 9].

### **Through-Cracked-Bending Test (TCB)**

Beim Through-Cracked-Bending (TCB) Versuch wird eine Verbundglasscheibe in definierter Weise gebrochen und dann einachsiger Zugspannung einer Biegebeanspruchung ausgesetzt. Die eingebrachten Risse liegen dabei koinzident in der Mitte der Scheibe übereinander. Mit diesem Versuch können das ungünstigste Bruchverhalten und Belastungsszenario einer gebrochenen Verbundglasscheibe

simuliert werden („Worst Case Szenario“). Dieser Test gibt dabei sowohl Aufschluss über die Haftung zwischen Glas und Zwischenschicht als auch über die Resttragfähigkeit generell. Aus diesem Grund wird dieser Test im Folgenden für die Quantifizierung der Resttragfähigkeit verwendet

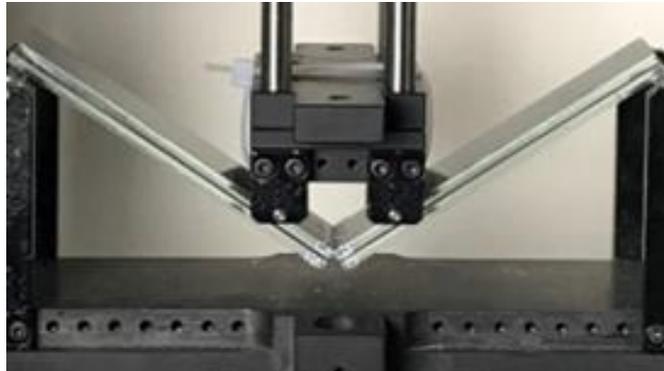


Abbildung 2-11 Exemplarische Darstellung des TCB -Test

Erstmals konzipiert wurde dieser Versuch in [55] als 3-Punkt-Biegeversuch. Durch die Modifizierung in einen 4-Punkt-Biegeversuch kann dieser Aufbau optimiert werden, da dann ein konstantes Biegemoment und keine Querkraft zwischen den Lastrollen sichergestellt wird. Dieser Versuchsaufbau wurde in [3] intensiv getestet. Dabei wurden verschiedene Zwischenschichtmaterialien (PVB BG R20 (neu NR) und SC, SentryGlas) getestet. Diese Versuche wurden als Relaxationsversuche durchgeführt. Das gebrochene Glas wurde einer definierten Verformung ausgesetzt und anschließend die resultierende Kraft über die Zeit gemessen. Das Maß der Verformung wurde dabei über einen Grenzwert der maximal möglichen Sehnenverkürzung bei einem minimalen Auflagereinstand von 15 mm ermittelt, bevor die Scheibe aus dem Auflager fallen würde. Es wurden Großbauteilversuche (1.100 mm x 360 mm) sowie Kleinbauteilversuche (115 mm x 30 mm) durchgeführt. Da das Eigengewicht der Scheiben im Großbauteilversuch bereits zu einem sofortigen Versagen der Scheibe führen kann, wurde der Versuchsaufbau für diese Formate so konzipiert, dass die Scheiben nach oben gezogen wurden. Alle Versuche erfolgten bei Raumtemperatur. In den Versuchen konnte festgestellt werden, dass bei der Verwendung steifer Zwischenschichten und mit hoher Haftung (SentryGlas, BG R20 (neu NR)) ein Anfahren der definierten Verformung nicht möglich war, da die Zwischenschicht vorher einriss. Daher wurde hier ein geringeres Verformungsniveau gewählt. Die resultierenden Kräfte waren bei diesen Zwischenschichten deutlich größer als bei der weichen Zwischenschicht mit geringerer Haftung. Aus den Versuchen wurde geschlossen, dass sich für die Resttragfähigkeit Verbundglas mit SentryGlas am besten eignet, gefolgt von PVB BG R20 (neu NR). Als Maß für die Resttragfähigkeit wurde dabei die resultierende Last nach 24 Stunden herangezogen.

### Pummelversuch

In mehreren Forschungsprojekten zum Thema Adhäsion wurden Pummelversuche durchgeführt und Korrelationen mit anderen Adhäsionsversuchen untersucht.

[65] untersuchte den Adhäsionsmechanismus zwischen Glas und Zwischenschicht mittels der zwei Testmethoden Pummel-Test und Druckschertest. Beim Pummel-Test wurde die laminierte Glasprobe (ohne Angabe der Abmessungen) auf -18 °C abgekühlt und mit einem ca. 453 g schweren Hammer auf einer Stahlplatte gehämmert, bis beide Seiten der Probe pulverisiert waren. Die zerstörte Probe wurde dann visuell nach der Pummelskala 0-10 bewertet. Durch den Vergleich der Ergebnisse der

beiden Prüfmethode wird deutlich, dass diese in der Regel nahezu linear korrelieren, wenn die Bedingung erfüllt ist, dass die Prüfkörper aus der gleichen Charge stammen.

Franz [3] nutzte im Rahmen seiner Dissertation den Pummel-Test zur Überprüfung der Laminatqualität und den Schertest zum Nachweis der Haftfestigkeit. Auf die Beschreibung der Durchführung des Schertests wird hier verzichtet. Die Pummelproben bestanden aus 2×3 mm Floatglas und 1,52 mm PVB-Folie. Die Folie wies drei verschiedene Haftgrade auf (BG R10 (neu LR), BG R15 (neu MR) und BG R20 (neu NR), Trosifol-Zwischenlagen). Die Abmessungen betragen 80×300 mm. Die Lamine wurden zwei Stunden lang bei -18 °C gelagert. Dann wurden die Zinn- und die Feuerseite mit einem Hammer geschlagen, um die Haftung beider Glasseiten zu bestimmen. Zur Auswertung wurden die zerstörten Proben visuell mit Referenzbildern verglichen und auf einer Pummelskala von 0 bis 10 klassifiziert. Franz [3] verglich die Pummelergebnisse mit den aus dem Scherversuch resultierenden Scherfestigkeiten. Er zeigte, dass die Haftscherfestigkeit mit steigendem Pummelwert zunimmt.

[66] untersuchten die Haftung von Verbundglas als Funktion des Feuchtigkeitsgehalts innerhalb der Folie mit drei verschiedenen Testmethoden. Mit Hilfe eines Spektrophotometers konnten sie die Lichtdurchlässigkeit mehrerer Glasscheiben bei einer bestimmten Wellenlänge (die von der Zwischenschichtfeuchte abhängig ist) bestimmen. Darüber hinaus wurden der VW-Pull-Test und der Pummeltest angewandt. Die Proben hatten die Abmessungen 100×200 mm und eine Gesamtdicke von etwa 8,5 mm. Beide Seiten der Probe wurden mit einem Hammer zerstört. Die Ergebnisse zeigten, dass Proben mit einem Feuchtigkeitsgehalt unter 0,67 % zu einem hohen Pummelwert (Pummel 7 bis 8) und Proben mit einem Feuchtigkeitsgehalt über 0,67 % zu niedrigen Pummelwerten (Pummel < 3) führten.

In seiner Bachelorarbeit befasste sich [11] hauptsächlich mit der Auswertung des Pummel-Tests. Dazu untersuchte er verschiedene Verfahren, wie z.B. Gewichtsänderung, Änderung der Lichtdurchlässigkeit des Verbundsicherheitsglases, Profilanalyse des Probekörpers, maximale Spannung und maximale Dehnung von Pummelproben. Die Probekörper hatten eine Abmessung von 25×7,5 cm. Sie bestanden aus zwei Floatglasscheiben von je 2,95 mm und einer 0,76 mm PVB-Folie. Es wurden drei verschiedene Haftungs-niveaus untersucht. Die Proben wurden bei Temperaturen von -24 °C, -18 °C und über -18 °C (keine Angaben) für etwa zwei Stunden gelagert. Der Pummel-Test wurde auf einer schrägen Metalloberfläche durchgeführt. Dadurch wurde verhindert, dass die Glasfragmente auf der Probe zurückbleiben konnten. Die Probe wurde auch leicht von der Metalloberfläche weggekippt, um einen besseren Aufpralleffekt zu erzielen. Die Auswertung zeigte, dass bei Temperaturen über -18 °C die Zwischenschicht zu elastisch wurde, so dass die Fragmente durch die Hammerschläge in die Folie gedrückt wurden und sich nicht von der Folie lösten.

### **Haftscherversuch**

Die Bestimmung der Haftung von PVB mittels Haftscherversuchen wurde in verschiedenen Studien untersucht (vgl. u.a. [3], [67]). Dabei kamen neben dem beschriebenen Kompressionsscherversuch auch andere Versuchsaufbauten zum Einsatz und es wurden unterschiedliche Wegraten gefahren, was einen Vergleich der Ergebnisse nur begrenzt ermöglicht. Die Temperatur bei diesen Versuchen betrug  $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Der entsprechende Versuchsaufbau ist in Abbildung 2-12 schematisch dargestellt. Die Glasdicke der Probekörper betrug 3 mm und die Zwischenschichtdicke 0,76 mm. Es wurden drei verschiedene Wegraten (1, 6, 600 mm/min) gefahren. Die Ergebnisse der Versuche in Bezug auf die Mittelwerte  $\bar{x}$  und Standardabweichungen  $s$  der maximalen Scherspannungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

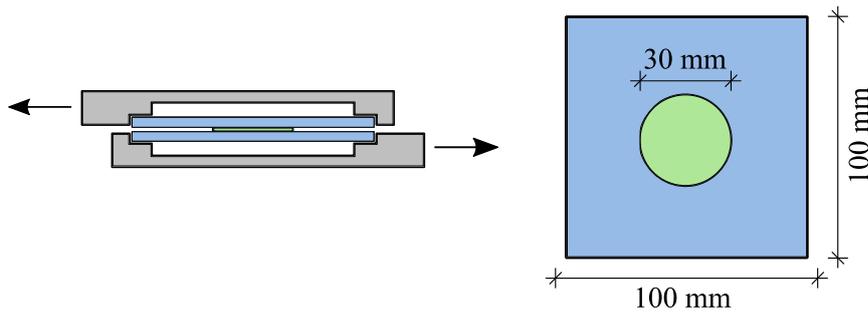


Abbildung 2-12 Versuchsaufbau der Haftscherversuche, nach [3]

Tabelle 4 Ergebnisse der Haftscherversuche an Standard-PVB mit verschiedenen Haftgraden in Bezug auf die maximale Haftscherspannung, nach [3]

Wegrate [mm/min]	R10		R15		R20	
	$\bar{x}$ [MPa]	s [MPa]	$\bar{x}$ [MPa]	s [MPa]	$\bar{x}$ [MPa]	s [MPa]
1	-	-	-	-	10,9	3,1
6	6,84	4,02	7,36	1,48	13,4	3,02
600	9,39	1,58	9,94	1,45	16,5	2,32

Die Wegrate hat einen großen Einfluss auf die resultierende maximale Haftscherspannung. Insgesamt liegen die Ergebnisse des niedrigen und mittleren Haftgrades deutlich unter den Werten für den hohen Haftgrad. In allen Versuchen kommt es zu einer relativ großen Streuung. In [3] wird dies mit Qualitätsschwankungen im Herstellungsprozess begründet. In diesen Versuchen erfolgte keine optische Erfassung der Probekörper während des Versuchs. Es kann somit keine Aussage getroffen werden, in welchem Bereich die initiale Delamination einsetzt, bevor der Probekörper versagt.

### Weitere Versuche zur Untersuchung der Haftung

Neben den hier beschriebenen Versuchen existieren in der Literatur noch weitere Versuche zur Untersuchung der Haftung und Berechnung einer Energiefreisetzungsrates, die auch zur Untersuchung polymerer Zwischenschichten im Glasbau dienen können und teilweise angewandt wurden. Hierzu gehören unter anderem der Peel-Test [68], der DCB-Versuch (Double-Cantilever-Beam) [69], der ENF-Versuch (End-Notched-Flexure) [70] sowie der VW-Pull Versuch [3]. In [3] wird ausführlich diskutiert, dass sich diese Versuche für die Untersuchung des Resttragfähigkeitsverhaltens nur bedingt eignen. Daher erfolgt im Rahmen dieser Arbeit keine nähere Beschreibung dieser Versuche und für weiterführende Informationen wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

### 3 AP2: Haftung/Pummel/Haftscherversuche

Im Folgenden findet eine experimentelle bzw. methodische Untersuchung des Verbundverhaltens von Verbundsicherheitsglas statt. Es werden dafür der Pummeltest und der Haftscherfesttest, die beide bereits in Kapitel 2.1 und 2.2 angeführt wurden, durchgeführt. Zunächst werden die entsprechenden Probekörper dargestellt und eine entsprechende Versuchsmatrix definiert. Anschließend werden die Durchführung der Versuche und deren Auswertung näher beschrieben. In Kapitel 6.3 werden die gewonnenen Erkenntnisse dann verwendet um zum einen eine Korrelation zu Versuchen zur Charakterisierung der Resttragfähigkeit herzustellen. Zum anderen werden in Kapitel 7 entsprechende Vorschläge zur Einbringung der Versuche in einen normativen Kontext gemacht.

#### 3.1 Entwicklung eines Auswerteverfahrens für den Pummeltest

##### 3.1.1 Zielsetzung

In diesem Kapitel wird das Ziel verfolgt, eine objektive Auswertemethodik für den Pummeltest zu erstellen. Diese soll auf der Untersuchung von digitalen Bildern der gepummelten Proben basieren. Dazu werden zunächst unterschiedliche Auswertemethoden vorgestellt. Im Anschluss werden Referenzbilder-Datensätze verschiedener Folienhersteller betrachtet und miteinander verglichen. Am Ende dieses Kapitels wird die neue Pummelskala eingeführt, die im Anschluss zur Bewertung der durchgeführten Pummeltests herangezogen wird.

##### 3.1.2 Versuchsauswertemethoden

Um den menschlichen Einfluss auf die Auswertung der Testproben zu verringern, wurden in MATLAB automatisierte Bildanalyseverfahren geschaffen (Die entsprechenden Codes sind dem Anhang 9.5 zu entnehmen). Drei verschiedene Auswertungstypen wurden dabei eingangs ausschließlich an mit den Eastman-Referenzbildern untersucht:

- Methode A: Analyse der freien Folienoberfläche mit Binärbildern
- Methode B: Statistische Auswertung erster Ordnung der Graustufenbilder
- Methode C: Texturanalyse mit Co-Occurance-Matrizen und Statistiken zweiter Ordnung

Das Verfahren wird zunächst anhand von zwei verschiedenen Pummel-Bildern (Pummel 1 und Pummel 7) kurz erläutert. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der drei Methoden für alle 9 Referenzbilder gezeigt. Ziel ist es, eine Auswertungsmethodik zu finden, die deutliche Unterschiede in den neun Referenzbildern findet und so eine spätere automatisierte Zuordnung in eine Pummel-Klasse ermöglicht. Vorab werden die Grundlagen zur digitalen Bildauswertung vorgestellt.

#### **Allgemeines zur digitalen Bildauswertung**

Ein digitales Bild besteht aus verschiedenen Bildelementen, den sogenannten Pixeln, und wird über eine zweidimensionale Matrix dargestellt. Die Dimensionen dieser Matrix entsprechen der Bildgröße. Jedes Element der Matrix ist mit einem endlichen, diskreten Quantil der numerischen Darstellung für seine Intensität in einer bestimmten Farbkarte belegt.

Binäre Bilder bestehen nur aus zwei Quantisierungsebenen 0 und 1, die üblicherweise Schwarz-Weiß darstellen. Graustufenbilder sind Einkanalbilder und werden mit positiven ganzen Zahlen dargestellt. Der Wertebereich wird durch die Bit-Zahl (Farbtiefe) des Bildes bestimmt. Ein typisches Graustufenbild verwendet  $k=8$  Bits, was bedeutet, dass ein Pixel im Bild  $2^k=2^8=256$  verschiedene Intensitätswerte annehmen kann. Die niedrigste Intensitätsstufe entspricht Schwarz (0) und die höchste Stufe entspricht Weiß (255). Farbbilder sind Mehrkanalbilder. In der Regel werden sie in den Primärfarben Rot, Grün, Blau (RGB-Modell) erstellt. Jede dieser Farbkomponenten besteht in der Regel aus 8 Bits. Ähnlich wie bei den 8-Bit-Graustufenbildern liegt der Wertebereich der Komponenten zwischen  $[0, \dots, 255]$ . Durch additive Farbmischung der Primärfarben können eine Vielzahl von Farben und Tönen dargestellt werden. Neben dem RGB-Modell gibt es auch andere Farbkarten, wie z.B. das CMYK-Farbmodell (Cyan-Magenta-Gelb-Schwarz).

RGB-Bilder werden durch Eliminierung der Farbton- und Sättigungsinformationen unter Beibehaltung der Luminanz in Graustufenbilder umgewandelt. Die Luminanz wird mit einer gewichteten Summe der drei Grundfarben berechnet:  $0,299 \times \text{Rot} + 0,587 \times \text{Grün} + 0,114 \times \text{Blau}$ . Zur Umwandlung eines Graustufenbildes in ein Binärbild ist ein Schwellenwert erforderlich. Dieser definiert, bis zu welchem Grauwert ein Pixel noch als schwarz bzw. ab welchem Grauwert ein Pixel noch als weiß gilt. Der Schwellenwert kann entweder manuell oder automatisch eingestellt werden.

Die einfachsten und intuitivsten Bildmerkmale für die Bildanalyse werden aus Histogrammen der Graustufen im Bild berechnet, die das statistische Auftreten der verschiedenen Graustufen beschreiben. Zu diesem Zweck wird die Anzahl der Pixel mit demselben Grauwert gezählt und in einem Vektor gespeichert. Oft wird dieser Vektor als Balkendiagramm dargestellt, dessen X-Achse die Intensität angibt und dessen Y-Achse die Anzahl der Pixel mit genau dieser Intensität darstellt. Aus dem Intensitätsdiagramm eines Bildes kann eine Statistik erster Ordnung berechnet werden. Dazu gehören z.B. die Berechnung des mittleren Grauwerts, des medianen Grauwerts, des mittleren Kontrastwerts, ausgedrückt mit der Standardabweichung, der Varianz der Grauwerte, der Schiefe des Histogramms usw. Diese Merkmale basieren auf den Werten der einzelnen Pixel, vernachlässigen jedoch die relative Position der Pixel zueinander und vernachlässigen daher die so genannte Bildtextur.

Abbildung 3-1 zeigt zwei Bilder A und B mit der gleichen Anzahl von Quantisierungsstufen (1=Schwarz, 4=Weiß). Obwohl unser Auge offensichtlich zwei verschiedene Bilder wahrnimmt, ergeben beide Bilder das gleiche Histogramm.

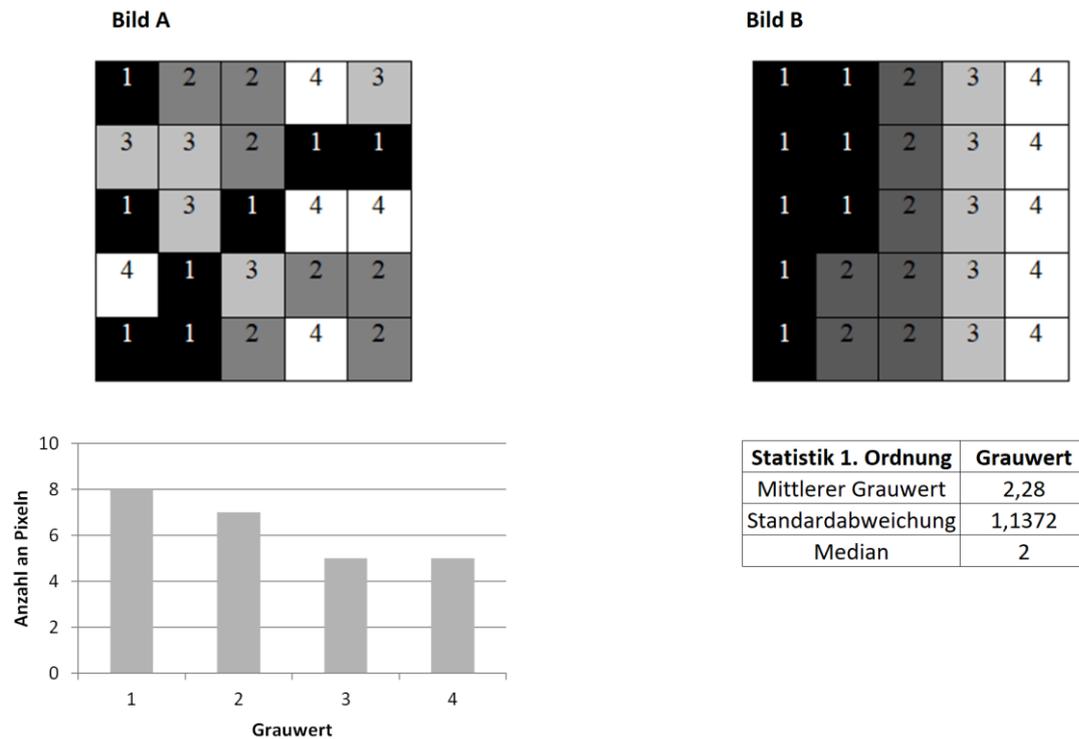


Abbildung 3-1 Zwei unterschiedliche Grauwertbilder mit demselben Histogramm und identischen statistischen Werten erster Ordnung

Zur Analyse der Bildtextur sind Statistiken höherer Ordnung erforderlich. Diese berücksichtigen die Interaktion zwischen zwei oder mehr Pixeln gleichzeitig. Methoden, die dies ermöglichen, sind z.B. die Local Binary Pattern-Methode, der Einsatz von Gabor-Filtern oder die Erstellung und Auswertung von Grey-Level-Co-Occurrence-Matrizen (GLCM). GLCM wurden erfolgreich in der medizinischen Analytik eingesetzt, z.B. in der Röntgenmammographie, bei Hirntumoren, bei der Erkennung von Gewebedefekten, bei der Bildklassifikation von Satellitenbildern, bei der Gesichtserkennung und vielen anderen, weshalb diese Methode in dieser Arbeit weiter untersucht wird.

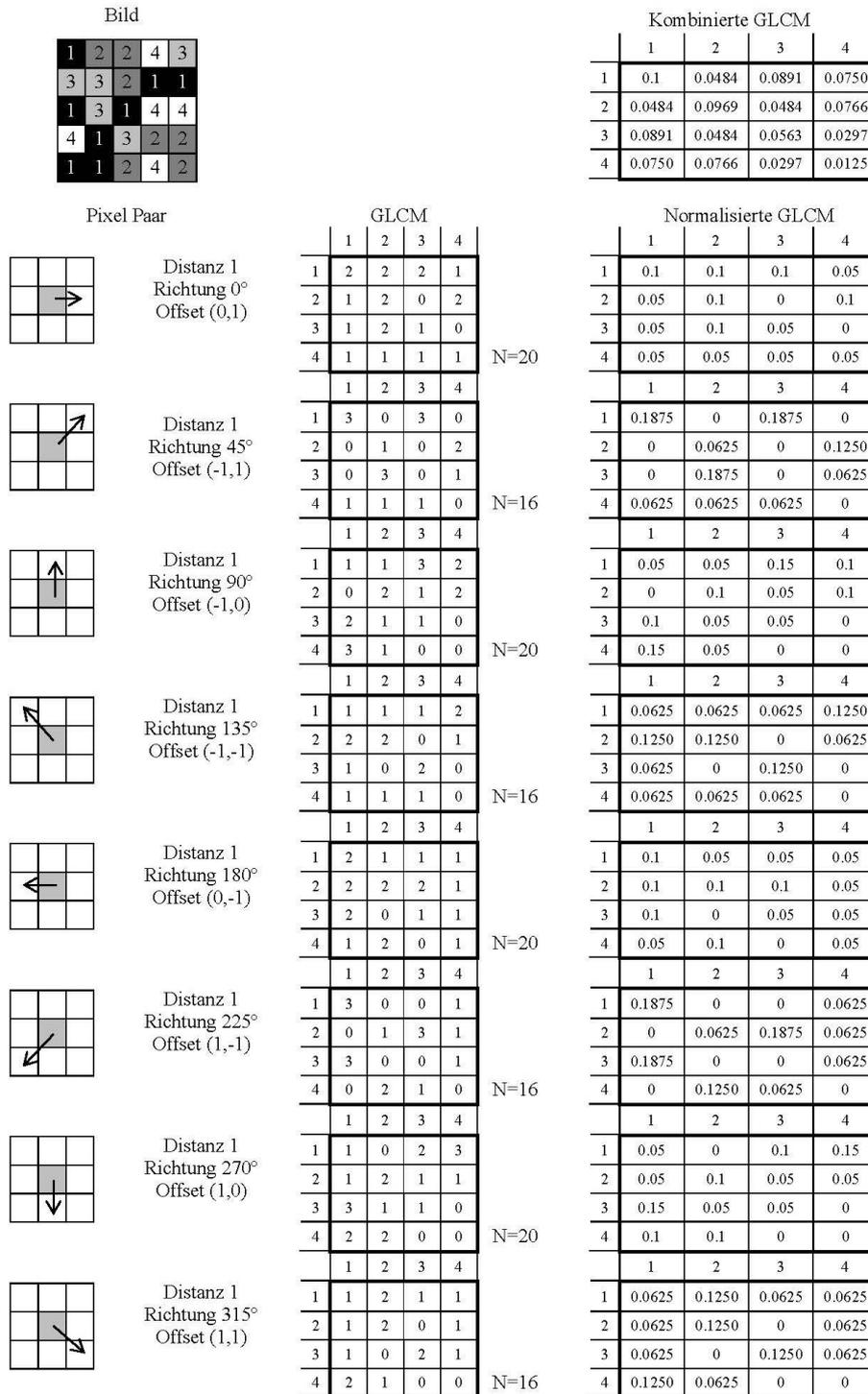


Abbildung 3-2 Erstellung der GLCM für die acht unmittelbaren Nachbarn

Das GLCM ist eine quadratische Matrix, deren Größe NxN durch die Anzahl der Graustufen N im quantisierten Bild angegeben wird. Die Matrixelemente  $GLCM[i,j]$  geben an, wie oft ein Pixel mit dem Grauwert  $i \in [0:N]$  und ein Pixel mit dem Grauwert  $j \in [0:N]$  in einer räumlichen Beziehung im Bild vorkommen. Die räumliche Beziehung, auch Offset genannt, definiert die Richtung und den Abstand zwischen dem interessierenden Pixel und seinem Nachbarn. Für den rechten unmittelbaren Nachbarn entspricht die Richtung 0 und der Abstand 1, was einem Offset-Vektor von (0,1) entspricht. Es ist auch möglich, weiter entfernte Nachbarn zu untersuchen. Die Berücksichtigung einer einzigen

Richtung führt zu einer rotationssensitiven GLCM. Für acht unmittelbare Nachbarn (Abstand =1) eines Pixels können acht Offset-Vektoren und acht entsprechende GLCMs erzeugt werden, siehe Abbildung 3-2, und fusioniert werden. Die Berücksichtigung von Offset-Vektoren mit entgegengesetzten Richtungen ist gleichbedeutend mit einer Auswertung der Pixelbeziehungen in z.B. horizontaler oder vertikaler Richtung statt rechts oder links bzw. oben oder unten und führt zu symmetrischen GLCMs. Um verschiedene Offsets zu kombinieren, werden die GLCMs durch Division jedes Matrixelements mit der Summe aller Elemente normiert. Die normierten Elemente können als die gemeinsame Auftrittswahrscheinlichkeit  $p(i,j)$  des betrachteten Pixelpaares mit den Graustufen  $i$  und  $j$  betrachtet werden. Das endgültige, fusionierte GLCM erhält man, indem man die Mittelwerte der gemeinsamen Auftrittswahrscheinlichkeiten der betrachteten Offsets erzeugt. Diese endgültige Matrix kann mit den Haralick-Parametern beschrieben werden [71]. Die meist verwendeten Haralick Features sind ([72] und [73]):

- **Haralick Feature Kontrast:**

Der Kontrast, auch als Varianz oder Trägheit bekannt, ist ein Maß für Intensitätsschwankungen zwischen einem Pixel und seinem Nachbarn über das gesamte Bild. Je höher der Kontrast, desto mehr bewegen sich die Einträge des normierten GLCM von der Matrixdiagonale weg. Der minimale Wert ist 0, er tritt bei einem konstanten Bild auf.

$$\sum_{i,j} p(i,j) \cdot |i - j|^2$$

- **Haralick Feature Korrelation**

Die Korrelation ist ein Maß dafür, wie korreliert ein Pixel mit seinem Nachbarn über das gesamte Bild hinweg ist. Der Bereich ist  $[-1:1]$ , wobei 1 einer vollkommen positiven Korrelation und -1 einer vollkommen negativen Korrelation entspricht. Für ein konstantes Bild kann keine Korrelation berechnet werden.

$$\sum_{i,j} p(i,j) \cdot \frac{(i - \mu_x)(j - \mu_y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Wobei:

$\mu_x$  = Mittelwert der partiellen Wahrscheinlichkeitsfunktion in x-Richtung (Spalte)

$\sigma_x \sigma_x$  = Standardabweichung der partiellen Wahrscheinlichkeitsfunktion in x-Richtung (Spalte)

$$\mu_x = \sum_{i,j} i \cdot p(i,j) \quad \text{und} \quad \sigma_x = \sqrt{\sum_{i,j} (i - \mu_x)^2 \cdot p(i,j)}$$

$\mu_y$  und  $\sigma_y$  werden analog berechnet. Für symmetrische GLCMs gilt  $\mu_i = \mu_j$  and  $\sigma_i = \sigma_j$ .

- **Haralick Feature Energie**

Die Energie, auch bekannt als Gleichförmigkeit oder zweites Winkelmoment, ist gleich der Summe der quadrierten Elemente im normierten GLCM. Sie ist ein Maß für die Texturrauhigkeit. Wenn Pixel eine ähnliche Intensität haben, ist die Energie hoch. Der Bereich beträgt [0:1]. Die Energie eines konstanten Bildes ist gleich 1.

$$\sum_{i,j} p(i,j)^2$$

- **Haralick Feature Homogenität**

Die Homogenität ist ein Maß dafür, wie nahe die Elemente des normierten GLCM an seiner Diagonale liegen. Typischerweise nimmt die Homogenität mit abnehmendem Kontrast zu. Die Homogenität hat einen Bereich von [0:1]. Für ein diagonales GLCM ist die Homogenität gleich 1.

$$\sum_{i,j} \frac{p(i,j)}{1 + |i - j|^2}$$

Um die Bedeutung der einzelnen Merkmale zu verdeutlichen, werden exemplarisch einfache künstlich erzeugte Graustufenbilder untersucht. In diesen Bildern sind die Gegenrichtungen bereits kombiniert, so dass nur 4 einzelne GLCM gezeigt werden. GLCMs können auch als 2-dimensionales Histogramm dargestellt werden, indem die Matrixelemente in dem Grauwert dargestellt werden, der dem Matrixeintrag entspricht. Helle Grauwerte repräsentieren eine hohe Auftrittswahrscheinlichkeit (Obergrenze: weiß, 1), dunkle eine geringere Wahrscheinlichkeit (Untergrenze: schwarz, 0).

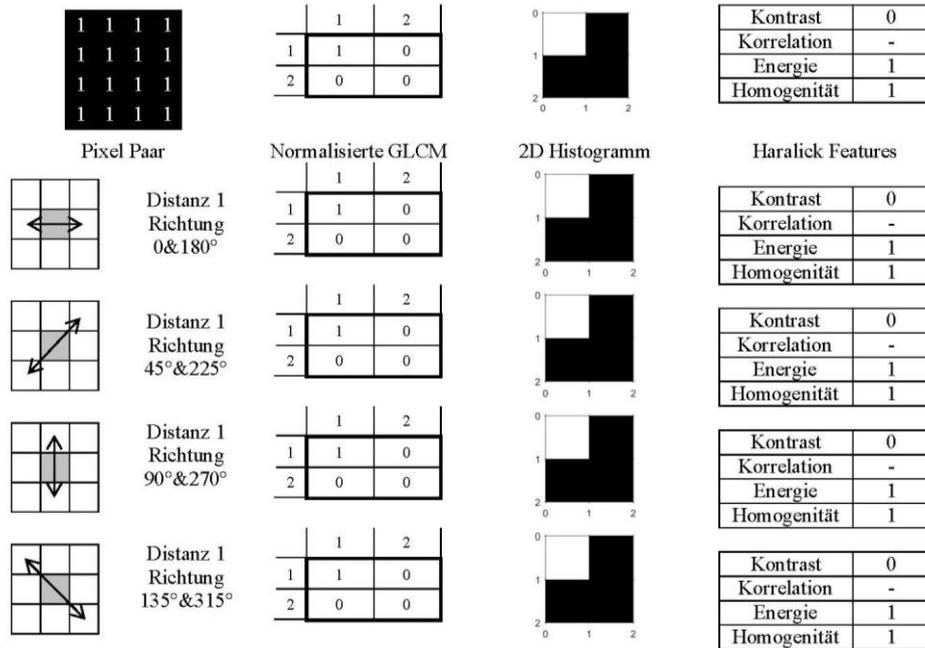


Abbildung 3-3 Bestimmung von GLCM- und Haralick-Merkmalen, Beispiel 1

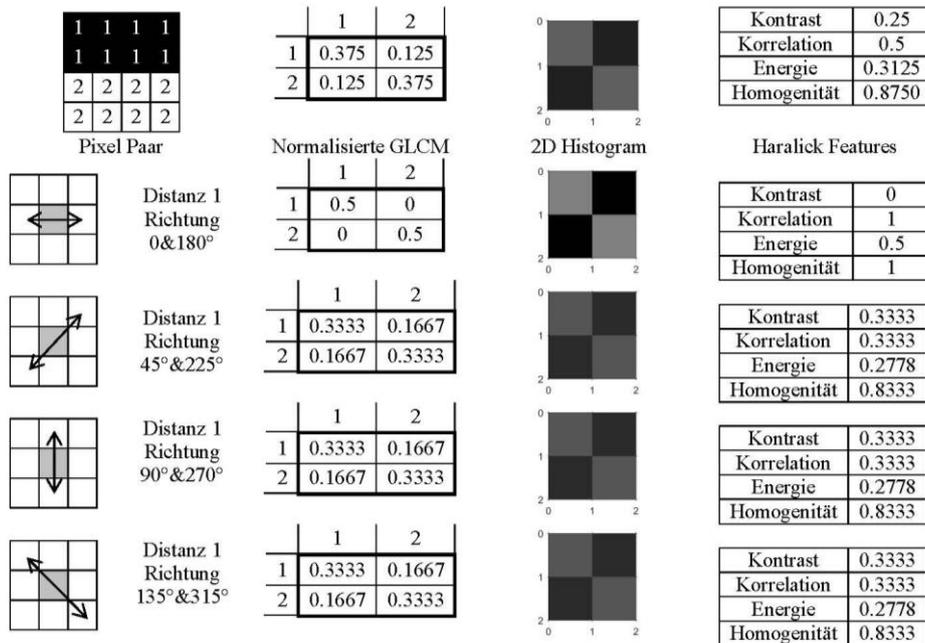


Abbildung 3-4 Bestimmung von GLCM- und Haralick-Merkmalen, Beispiel 2

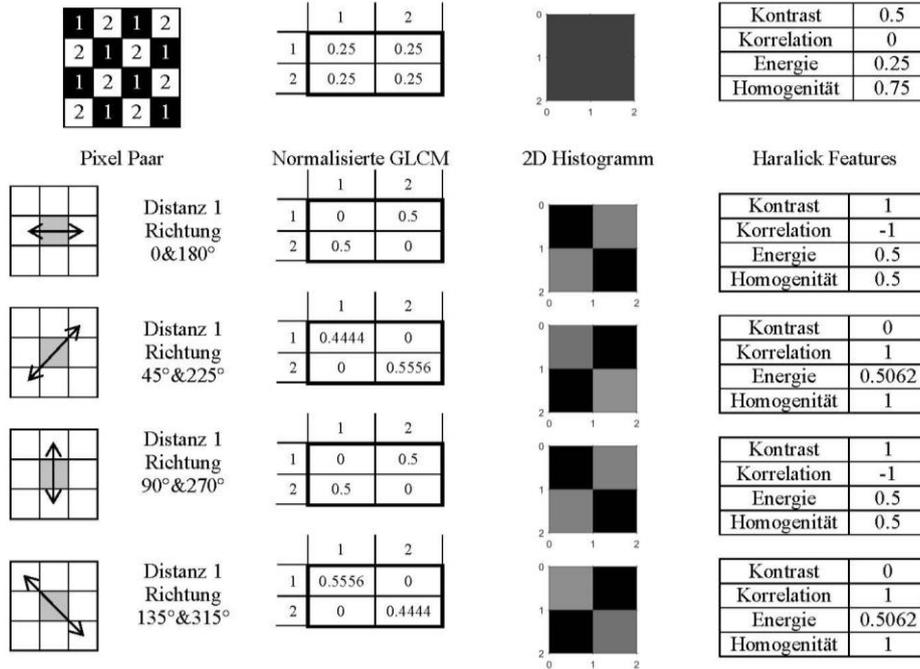


Abbildung 3-5 Bestimmung von GLCM- und Haralick-Merkmalen, Beispiel 3

Vergleicht man die drei einfachen Beispiele mit Bildern, die ausschließlich aus 2 Grauwerten bestehen, lassen sich die Haralick-Merkmale sehr gut erklären.

Im Fall des konstanten Bildes sind sowohl das fusionierte GLCM als auch die vier einzelnen normalisierten GLCMs identisch. Dies liegt daran, dass das Bild unabhängig von der Rotation ist. Nur das Element GLCM(1,1) ist belegt. Der Wert ist 1, was bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, dass der Nachbar den gleichen Grauwert wie das betrachtete Pixel hat, 100% beträgt.

Das zweite Bild besteht aus zwei Hälften, wobei die obere Hälfte aus schwarzen und die untere Hälfte aus weißen Pixeln besteht. Werden nur die horizontalen Nachbarn betrachtet, entsteht ein GLCM, bei dem nur die Diagonale belegt ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass 2 schwarze Pixel benachbart sind, ist genauso hoch wie die Wahrscheinlichkeit, dass 2 weiße Nachbarn horizontal benachbart sind (0,5 und 0,5). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein schwarzes Pixel horizontal an ein weißes Pixel angrenzt (und umgekehrt), ist 0. Das 2D-Histogramm erscheint daher auf der Diagonale in einem mittleren Grauton, während die übrigen Elemente in Schwarz dargestellt werden. Der Kontrast in horizontaler Richtung ist also 0 (nicht vorhanden), die Homogenität 1 (voll entwickelt). Horizontal benachbarte Pixel korrodieren zu 100% und die Energie liegt im mittleren Bereich. Betrachtet man die übrigen drei Richtungen, so sind die GLCMs identisch. Das bedeutet zum Beispiel, dass es ebenso wahrscheinlich ist, dass das Pixelpaar (1,1) in diagonaler oder vertikaler Richtung auftritt, nämlich 33,333%.

Das sich wiederholende Muster in Abbildung 3-6 veranschaulicht die Haralick-Merkmale am besten. Sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass das benachbarte Pixel sich farblich von dem betrachteten Pixel unterscheidet, 100%. Die Diagonalen des GLCM sind also leer und den übrigen Elementen wird jeweils der Wert 0,5 zugewiesen. Der Kontrast ist voll ausgeprägt. Zwei horizontal oder vertikal benachbarte Pixel erzwingen die Korrelation -1. Die

Energie und die Homogenität liegen im mittleren Bereich. In der diagonalen Richtung (links oder rechts) gibt es immer Pixel mit der gleichen Farbe, d.h. diagonal benachbarte Pixel haben eine perfekte Korrelation. Hier sind nur die Diagonalen der GLCMs belegt. Der Kontrast ist in diesem Fall 0, während die Homogenität mit dem Wert 1 voll entwickelt ist. Das kombinierte GLCM hat nur gleich große Matrixeinträge, so dass das 2D-Histogramm konstant ist. Das bedeutet, dass es ebenso wahrscheinlich ist, dass einer der acht Pixel-Nachbarn die gleiche oder eine andere Pixelfarbe hat.

Vergleicht man nun die fusionierten GLCMs der drei Beispiele, so nimmt der Kontrast zu, Homogenität, Korrelation und Energie ab.

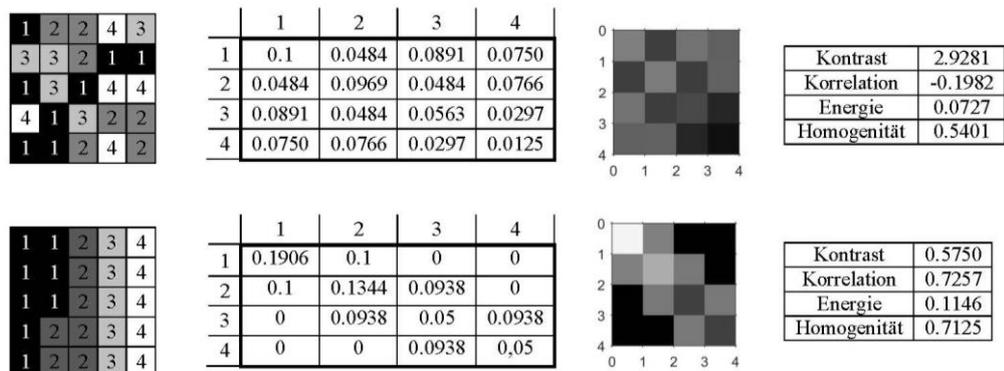


Abbildung 3-6 Fusionierte und normalisierte GLCM- und Haralick-Merkmale für zwei Bilder mit dem gleichen Histogramm

Das GLCM-Verfahren wird nun an den anfangs gezeigten Bilder (Abbildung 3-2) mit gleichem Histogramm angewendet. Die GLCMs und Haralick-Parameter zeigen deutliche Unterschiede. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass diese Bilder bei der Betrachtung der Statistik 1. Ordnung nicht unterscheidbar waren. Im oberen Bild ist der Kontrast zwischen direkt benachbarten Pixeln deutlich höher, während die Homogenität und Energie geringer sind als im unteren Bild. Im oberen Bild nimmt die Korrelation sogar einen negativen Wert an. Dieses Beispiel zeigt das hohe Potenzial dieses Texturerkennungs-Tools. In Bezug auf die Auswertung von Pummelbildern wird auch die Textur des pulverisierten Glases bewertet (grob für niedrige Pummelwerte, fein für hohe Pummelwerte). Dadurch wird die Auswertung unabhängiger von den Lichtverhältnissen.

### **Methode A: Analyse der freien Folienoberfläche mit Binärbildern**

Die erste Idee zur automatisierten Bewertung basiert auf der in den Patenten beschriebenen Bewertungsmethode. Wie bereits oben beschrieben, erfolgt die Zuweisung eines Pummelwertes in der Regel über die prozentual freie Folienfläche.

Dementsprechend sollten sowohl das Bild der Pummelprobe als auch die Referenzbilder zunächst in ein binäres Schwarz-Weiß-Bild umgewandelt und dann die Anzahl der schwarzen (freie Folien-) und weißen (Glas-) Pixel bestimmt werden. Durch Vergleich des mit den Referenzbildern soll schließlich ein Pummelwert zugewiesen werden.

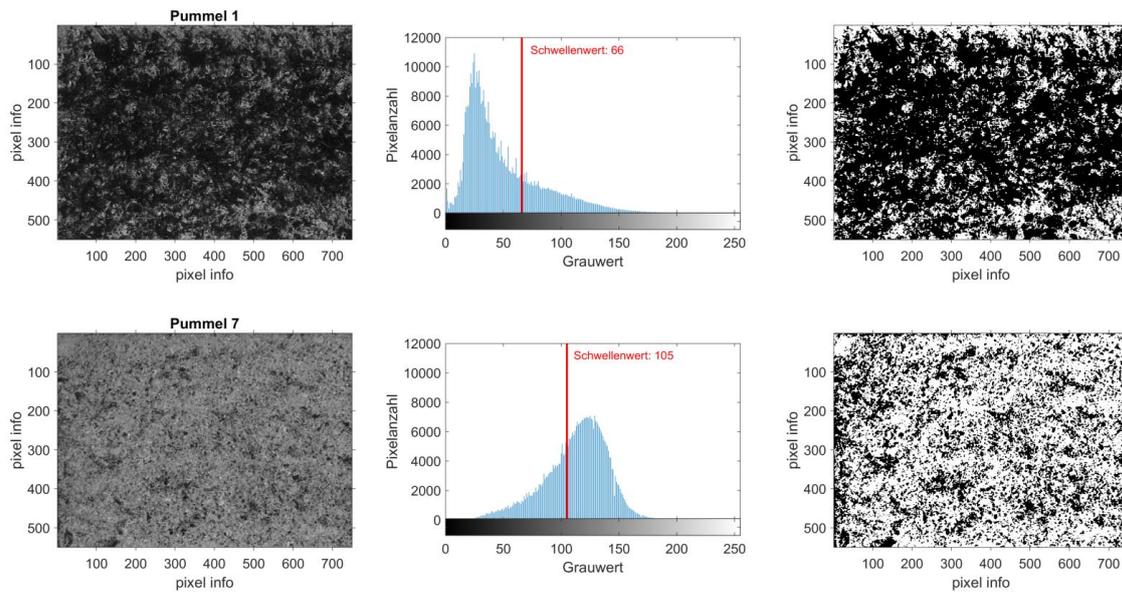


Abbildung 3-7 Umwandlung eines Graustufenbildes in ein Binärbild für das Referenzbild Pummel 1 und 7

Die Bestimmung eines Schwellenwertes für die Umwandlung in ein Binärbild hat sich jedoch als problematisch erwiesen. Um den menschlichen Einfluss so gering wie möglich zu halten, wurde beschlossen, den Schwellenwert mit dem Otsu-Algorithmus [74] zu bestimmen. Die Pixel des Graustufenbildes werden so in zwei Gruppen aufgeteilt, dass die Varianz innerhalb der Gruppe so gering wie möglich und gleichzeitig die Varianz zwischen den Gruppen so hoch wie möglich ist. Die Methode von Otsu führt zu guten Ergebnissen, wenn das Histogramm eine bimodale Verteilung hat und ein tiefes und scharfes Tal zwischen zwei Peaks vorhanden ist.

Tabelle 5 Schwarz/Weiß-Pixel und Schwellenwert nach dem Otsu-Algorithmus für die 9 Referenzbilder

Pummel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Schwarzanteil [%]	74.98	64.59	60.38	53.77	51.79	45.94	34.08	36.48	39.07
Weißanteil [%]	25.02	35.41	39.62	46.23	48.21	54.06	65.92	63.52	60.93
Normalisierter Schwellenwert	0.26	0.28	0.31	0.34	0.34	0.34	0.41	0.44	0.49
Absoluter Schwellenwert	66	72	79	86	86	86	105	112	125

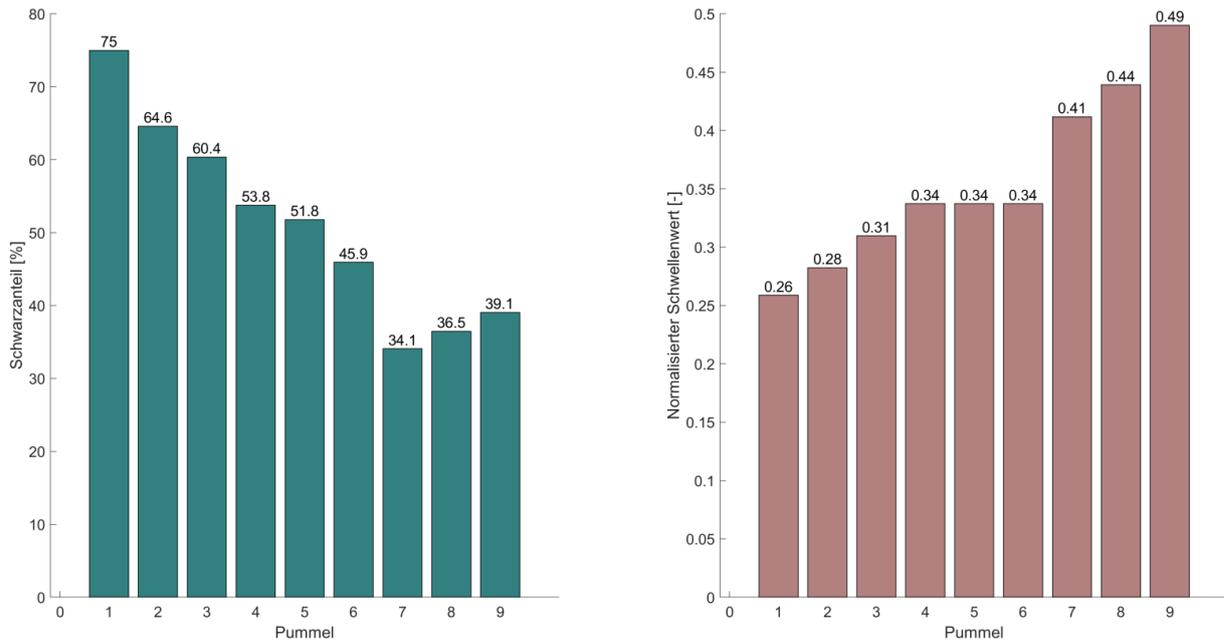


Abbildung 3-8 Freie Folienfläche [%] und Otsu-Schwellenwert für die 9 Referenzbilder

Betrachtet man das Grauwert-Histogramm der beiden Referenz-Pummelbilder in Abbildung 3-7, wird deutlich, dass es keine Bimodalität gibt, was zu Fehlern bei der automatisierten Schwellenwertbestimmung nach Otsu führen kann. Betrachtet man die automatisch ermittelten Schwellenwerte aller neun Referenzbilder, so lassen sich drei verschiedene Bereiche erkennen: Der erste Bereich umfasst Pummel 1 - 3 und weist vergleichsweise niedrige Schwellenwerte auf. Für die Pummelbilder 4-6 (Bereich 2) wurde der identische, mittelhohe Schwellenwert bestimmt. Der dritte Bereich umfasst Pummel 7-9 mit vergleichsweise hohen Schwellenwerten.

Werden nun die Referenzbilder in Binärbilder mit den einzelnen Schwellenwerten umgewandelt und anschließend die Anteile der schwarzen Pixel bestimmt, so wird das gewünschte Ergebnis nicht erreicht (Abbildung 3-8, Tabelle 5). Ab Pummelwert 7 steigt der Anteil der schwarzen Pixel wieder an, was eine Pummelklassenzuordnung nach diesem Kriterium ausschließt. Eine Klassifikation anhand des Schwellenwertes scheint hier sinnvoller zu sein.

Wird für alle neun Referenzbilder ein konstanter Schwellenwert verwendet (in diesem Fall wurde der nach Otsu ermittelte Mittelwert der einzelnen Schwellenwerte verwendet), so ergibt sich ein anderes Ergebnis (Abbildung 3-9, Tabelle 6). Hier nimmt der Schwarzanteil mit steigendem Pummelwert immer ab. Allerdings zeigt sich auch hier, dass die Schwarzanteile der mittleren Pummelwerte sehr nahe beieinander liegen und eine Zuordnung in diesem Bereich schwierig sein kann. Vergleicht man das Ergebnis mit den in den Patenten angegebenen Werten, erhält man Abbildung 3-9, rechts.

Tabelle 6 Schwarz/Weiß-Pixel mit einem konstanten Schwellenwert von 0,356 (Mittelwert der Schwellenwerte von Tabelle 5)

Pummel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Schwarzanteil [%]	86.33	76.08	69.23	56.98	55.10	50.25	19.29	12.37	2.31
Weißanteil [%]	13.67	23.92	30.77	43.02	44.90	49.75	80.71	87.63	97.69
Normalisierter Schwellenwert	0.3560	0.3560	0.3560	0.3560	0.3560	0.3560	0.3560	0.3560	0.3560
Absoluter Schwellenwert	91	91	91	91	91	91	91	91	91

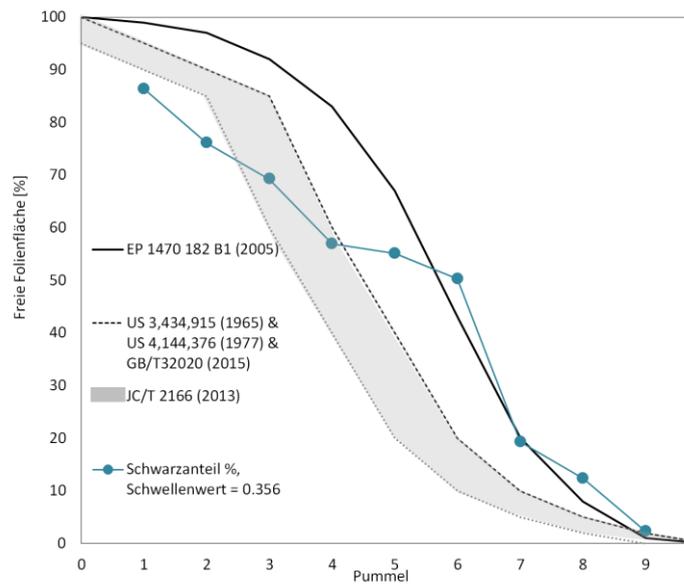
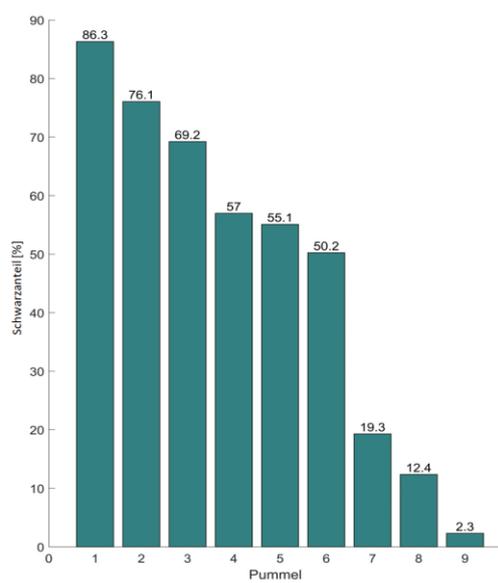


Abbildung 3-9 Freie Folielfläche [%] für konstanten Schwellenwert für die 9 Referenzbilder

### Methode B: Statistische Auswertung erster Ordnung der Graustufenbilder

Um das Problem des Findens eines geeigneten Schwellenwertes (siehe Methode A) zu vermeiden, wertet Methode B die Grauwertbilder mit einer Statistik 1. Ordnung aus. Zu diesem Zweck werden die Histogramme der Grauwert-Referenzbilder untersucht. Dies ist in Abbildung 3-10 exemplarisch für Pummel 1 und Pummel 7 dargestellt.

Der Mittelwert ist ein Maß für die Helligkeit des Bildes, wobei ein hoher Mittelwert einem insgesamt helleren und ein niedriger Mittelwert einem insgesamt dunkleren Bildeindruck entspricht. Die Standardabweichung und die quadratische Abweichung (auch Varianz genannt) sind Parameter, die die Grauwertverteilung charakterisieren. Die Varianz ist ein Maß für die Streuung der Grauwerte um den Mittelwert und gibt daher Auskunft über den globalen Kontrast (hohe Varianz) und die Homogenität (niedrige Varianz).

Ein weiteres wichtiges Merkmal der Grauwertverteilung ist der Median. Dies ist der Grauwert, bei dem 50% aller Pixel im Bild einen höheren Grauwert und 50% aller Pixel im Bild einen niedrigeren Grauwert haben. Wenn der Median und der Mittelwert identisch sind, ist die Grauwertverteilung symmetrisch; wenn sie sich unterscheiden, ist die Grauwertverteilung asymmetrisch.

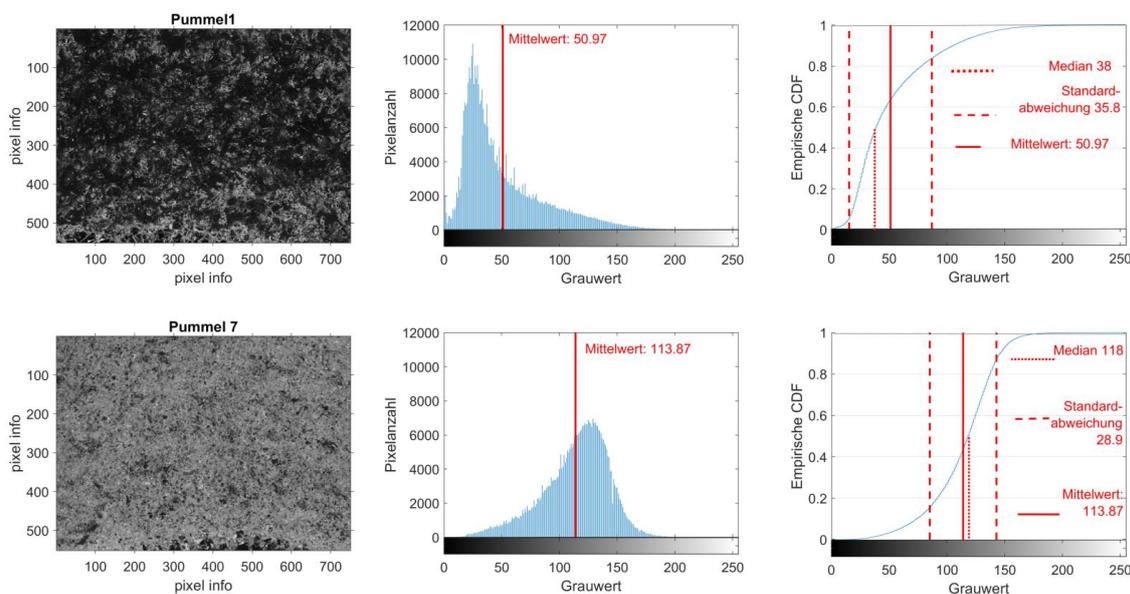


Abbildung 3-10 Bestimmung der kumulativen Grauwertverteilung als Referenz Pummel 1 und 7

Die untersuchten Zuordnungskriterien sind: Mittelwert, Median und kumulative Verteilungsfunktion. Die kumulativen Verteilungsfunktionen aller 9 Pummel-Referenzbilder sind in Abbildung 3-11 dargestellt. Hier fällt besonders auf, dass sich die Verteilungsfunktionen der mittleren Pummelwerte schneiden (Pummel 4-Pummel 6). Mittelwerte, Medianwerte, Standardabweichungen und Varianzen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Abbildung 3-12 die mittleren Grauwerte und Medianwerte. Die Standardabweichung ist ebenfalls in Form eines Fehlerbalkens um den Mittelwert herum dargestellt.

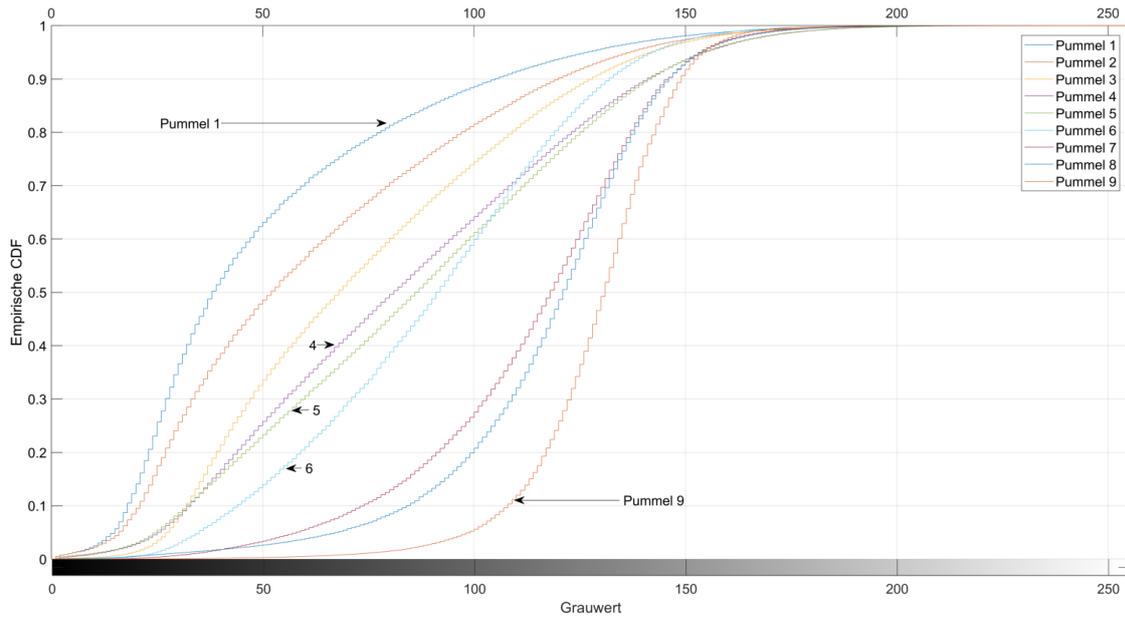


Abbildung 3-11 Empirische kumulative Verteilungsfunktionen der Referenz-Graustufenbilder

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der mittlere und mediane Grauwert mit zunehmendem Pummelwert zunimmt, während die Standardabweichung und die Varianz mit zunehmendem Pummelwert erst etwas zunehmen und dann wieder abnehmen.

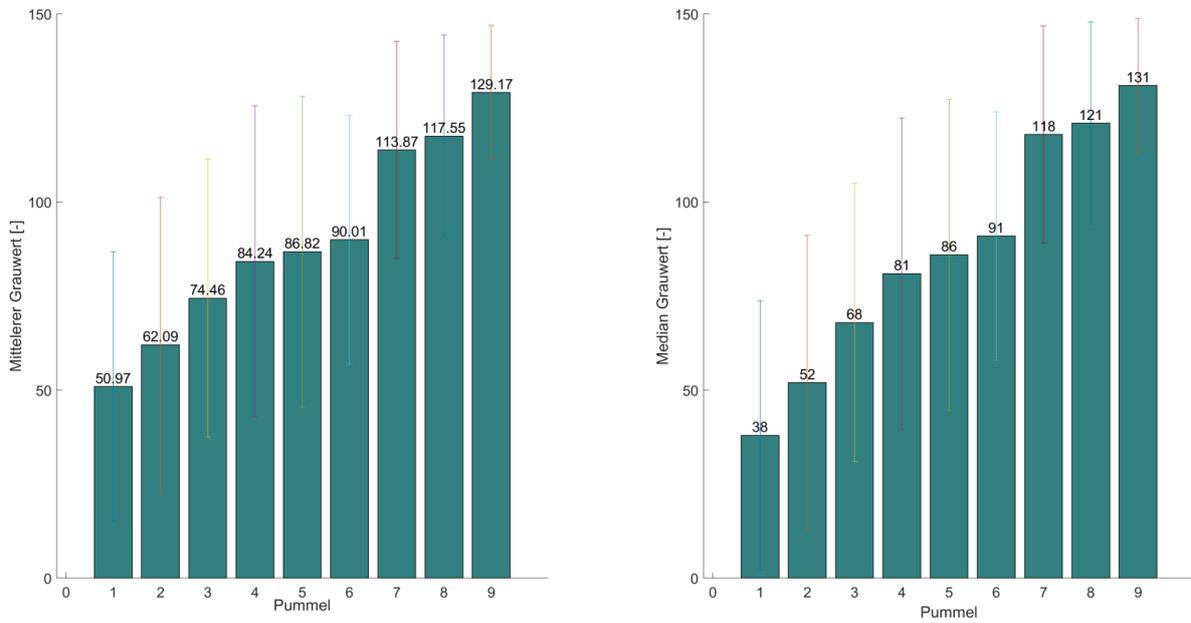


Abbildung 3-12 Mittlerer Grauwert und medianer Grauwert für die Referenzbilder

Tabelle 7 Median, Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der Grauwertverteilungen

Pummel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Median [-]	38,00	52,00	68,00	81,00	86,00	91,00	118,00	121,00	131,00
Mittelwert [-]	50,97	62,09	74,46	84,24	86,82	90,01	113,87	117,55	129,17
Standardabweichung [-]	35,81	39,16	37,01	41,38	41,33	33,02	28,85	26,90	17,90
Varianz [-]	1282,10	1533,80	1369,72	1712,14	1707,83	1090,07	832,59	723,63	320,36

Es wurde versucht einen Zusammenhang zwischen den Grauwertverteilungen und den in den Patenten (US 6, 984, 679 B2 (2006)) gegebenen Tabellen, die die Pummelklassifizierung anhand der freien Folienfläche vornehmen, aufzustellen. Für jeden Pummelwert der Eastman Referenzbilder wurde ein empirischer Wert  $P_G$  aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der Grauwertverteilung errechnet:

$$P_{G,i} = \mu_{G,i} / \sigma_{G,i}$$

$\mu_{G,i}$  Mittelwert der Grauwerte des Bildes

$\sigma_{G,i}$  Standardabweichung der Grauwerte des Bildes

Die Ergebnisse dieser Werte korrelieren gut mit der logarithmischen Verteilung der definierten Pummelskala,  $P_{GF,log,i}$ , wenn die Ergebnisse auf die Grenzwerte der Pummelwerte 1 und 9 skaliert werden. Die Definition der Pummelskala wird hier auf die verbleibende Glasfläche bezogen.

$$P_{GF,log,i} = \log_{10}(GF_i)$$

$GF_i$  Verbleibende Glasfläche

Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 und Abbildung 3-13 dargestellt. Für Pummelwerte zwischen 1 und 5 ist die Bewertung deutlich sensitiver und damit auch ungenauer. Erst ab einem Pummelwert von 5 – 9 lässt sich eine klare Abgrenzung erkennen.

Tabelle 8 Ergebnisse der Auswertung der Referenz-Pummelbilder und definierten Pummelskala in Abhängigkeit der verbleibenden Glasfläche

Pummel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{G,i}$	1,42	1,59	2,01	2,04	2,10	2,73	3,95	4,37	7,22
$P_{GF,log,i}$	0,004	0,036	0,097	0,244	0,481	0,770	1,097	1,523	2,0

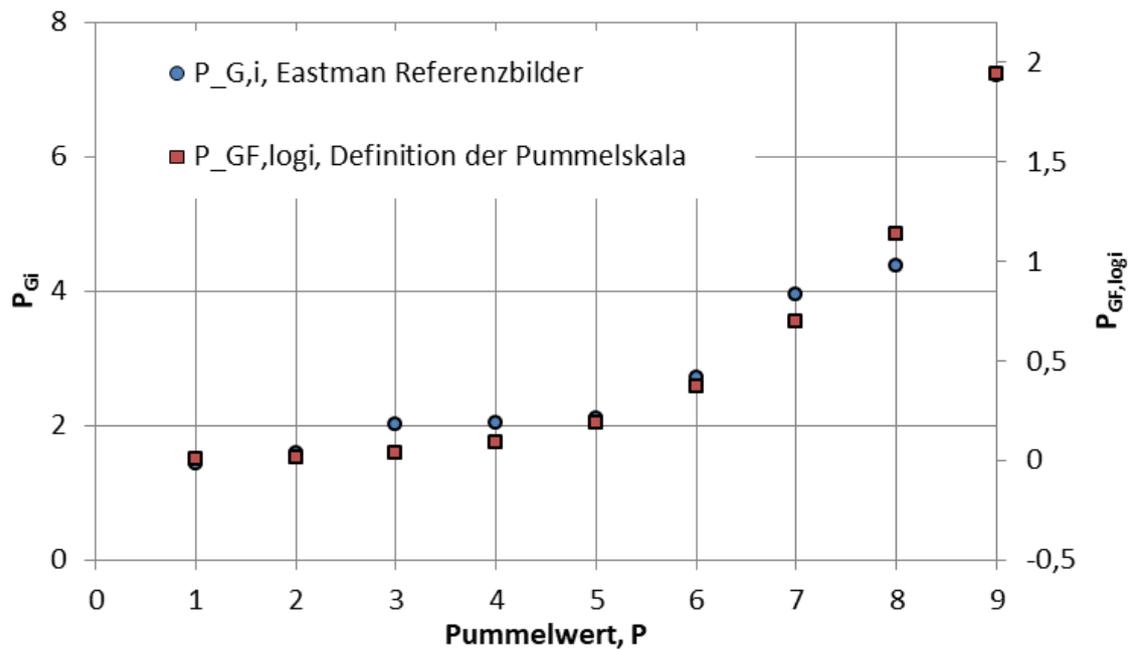


Abbildung 3-13 Diagramm der Pummelskala in Abhängigkeit der Grauwertverteilung und der verbleibenden Glasfläche

Über eine Näherungsfunktionen des in Abbildung 3-13 dargestellten Verlaufs, würde sich der Pummelwert  $P$  eines Probekörpers direkt über den berechneten Mittelwert der Grauwerte und der Standardabweichung der Grauwerte ermitteln lassen. Zunächst ist der gefundene Zusammenhang jedoch für eine größere Datenbasis mit Pummelbildern (mit bekannten Pummelwerten) zu überprüfen.

### Methode C: Texturanalyse mit Co-Occurance-Matrizen und Statistiken zweiter Ordnung

Die zuvor vorgestellten Methoden A und B sind nicht grundsätzlich abzulehnen. Es konnte jedoch ein entscheidender Nachteil dieser beiden Auswertemethoden aufgezeigt werden: Unterschiedliche Bildmuster können die gleichen Histogramme haben und lassen sich daher mit Statistiken 1. Ordnung nicht voneinander unterscheiden. Darüber hinaus haben die Methoden A und B den Nachteil, dass sie sehr stark von den Lichtverhältnissen abhängig sind, unter denen die Bilder aufgenommen wurden.

Um den Einfluss verschiedener Beleuchtungen zu minimieren, können die Grauwert-Histogramme der Bilder vor der Texturanalyse entzerrt werden. Die Histogramm-Entzerrung ist eine Methode, die den Intensitätsbereich des Histogramms auf den gesamten Intensitätsbereich ausdehnt und damit den Kontrast verbessert. Die entzerrten Histogramme haben 64 Bins und sind im Vergleich zu den ursprünglichen Histogrammen flach. Dies ist in Abbildung 3-14 dargestellt. Abbildung 3-14 a) zeigt das ursprüngliche Graustufenbild des Referenzbildes "Pummel 7", das Graustufenbild mit anschließend reduzierter Helligkeit und das Graustufenbild mit anschließend erhöhter Helligkeit. Zusätzlich sind die jeweiligen Grauwert-Histogramme dargestellt. Es ist offensichtlich, dass die Auswerteverfahren nach der Statistik 1. Ordnung (abgeleitet aus dem Grauerthistogramm) direkt davon beeinflusst werden. Das Originalbild hat z.B. einen mittleren Grauwert von 113,87, das abgedunkelte Bild von 71,20 und das erhellte Bild von 160,76. Abbildung 3-14 b) zeigt die entsprechenden Bilder nach dem Histogrammausgleich.

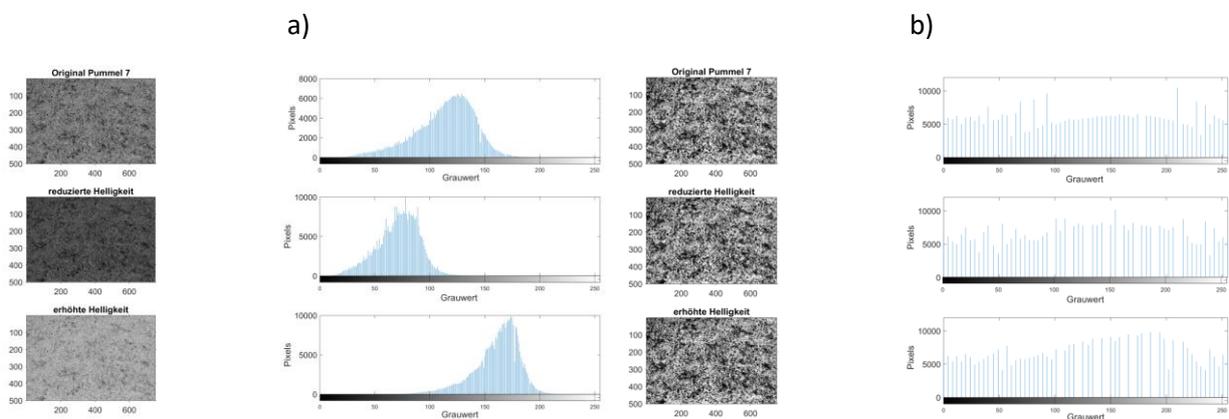


Abbildung 3-14 a) Verschiedene Beleuchtungen von Pummel 7 b) Bilder nach Histogrammausgleich

Abbildung 3-15 zeigt die kombinierte GLCM (alle acht Nachbarn wurden berücksichtigt) beispielhaft für Pummel 1 und 7. Da in einem entzerrten Pummelbild 64 Grauwerte dargestellt sind, werden hier nicht die GLCMs in Matrixform dargestellt, sondern nur die 2D-Histogramme.

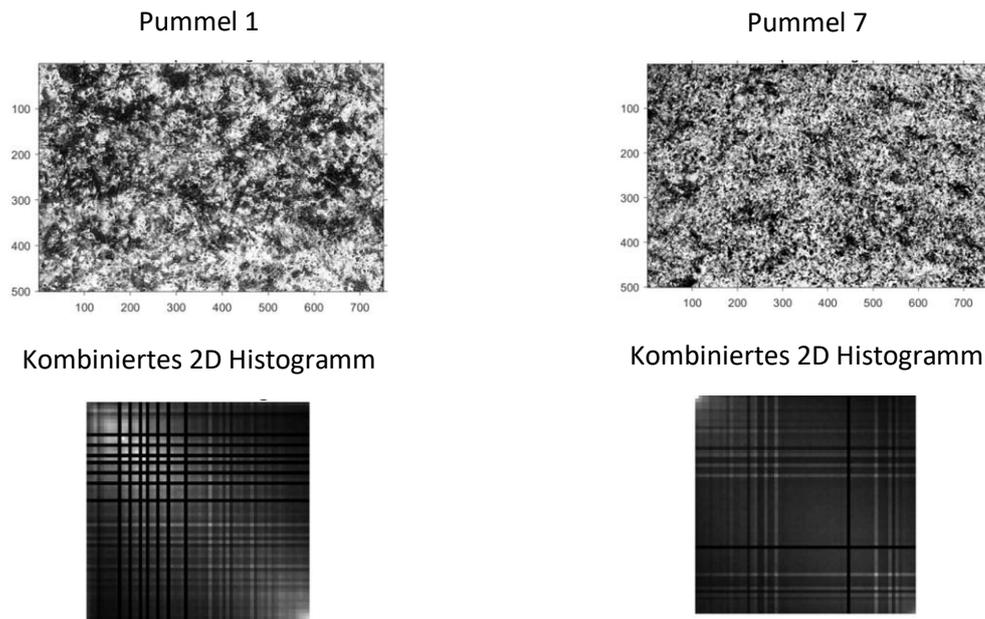


Abbildung 3-15 Co-Occurrence-Matrix Pummel 1 b) Co-Occurrence-Matrix Pummel 7

Der Abstandsfaktor (Offset-Distanz) zwischen Nachbarn wurde auf 4 gesetzt. Der Wert 4 ergab sich aus einer Vorstudie, in der das Korrelationsmerkmal bei unterschiedlichen Abständen ausgewertet wurde. Bei der Beobachtung des direkten Nachbarn (Abstand=1) gab es kaum Unterschiede im Korrelationsfaktor der neun Referenzbilder. Der Grund dafür, dass die direkt benachbarten Pixel immer gut korrelieren, liegt darin, dass die Texturunterschiede erst bei einem größeren Pixelabstand auftreten. Erst ab einem Abstand von 4 oder mehr machten sich Unterschiede bemerkbar. Dementsprechend ist der Abstand abhängig von der Bildauflösung, die weiter untersucht werden muss.

Abbildung 3-16 zeigt die vier Hauptmerkmale von Haralick für alle 9 entzerrten Referenzbilder. Mit Ausnahme der Energie haben alle Merkmale einen mehr oder weniger monotonen Verlauf, so dass die Pummelskala durch einen Vektor charakterisiert werden kann, der die drei Merkmale Korrelation, Kontrast und Homogenität enthält. Darüber hinaus zeigt Abbildung 3-16, dass identische Ergebnisse für diese drei Parameter erzielt werden, wenn die entzerrten Bilder verschiedener Beleuchtungen verwendet werden. Daher scheint diese Methode im Hinblick auf die Eliminierung unterschiedlicher Beleuchtungsbedingungen effektiv zu sein.

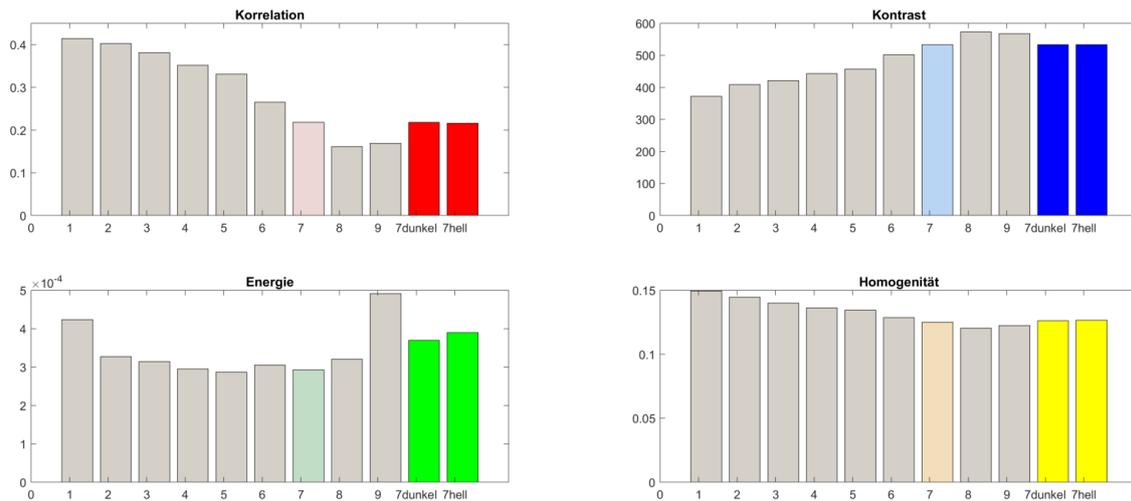


Abbildung 3-16 Haralick-Funktionen für alle 9 Referenzbilder, Pixelabstand: 4, 64 Graustufen

### Zwischenfazit:

Von den drei vorgestellten Auswertemethoden scheint Methode C (Texturanalyse mit Co-Occurrence-Matrizen und Statistiken zweiter Ordnung) die vielversprechendste Methode zu sein. Es konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von entzerrten Grauwertbildern die Wirkung unterschiedlicher Beleuchtungen reduziert. Das GLCM enthält Informationen über die räumliche Anordnung benachbarter Pixel-Intensitäten. An einem einfachen Beispiel konnte gezeigt werden, dass die Bilder, die nicht nach Statistik 1. Ordnung unterschieden werden konnten, unterschiedliche Haralick Parametern (Korrelation, Kontrast, Energie und Homogenität) aufweisen.

Bisher wurden die drei Auswertungsmethoden mit nur einem Satz Referenzbilder getestet. Im nächsten Abschnitt werden daher Referenzbilder anderer Folienhersteller herangezogen.

### 3.1.3 Vereinheitlichung der Pummelskala

Die unterschiedlichen Folienhersteller verwenden jeweils eigene Referenzbilder zur Zuordnung eines Pummelwertes. Betrachtet man die Klassifizierung anhand der Referenzbilder verschiedener Hersteller, so erkennt man, dass sich bereits die Haftungsskala bei den Folienherstellern unterscheidet. Kuraray vergleicht die Muster mit Pummel-Werten von 1 bis 10, Eastman mit den Werten von 1 bis 9 und Everlam nur mit den Pummel-Werten von 2 bis 9. Gründe für weitere Unterschiede sind unterschiedliche Lichtverhältnisse und der unterschiedliche Aufnahmewinkel der Proben.

Um eine objektive Bewertungsskala zu erhalten, werden die Referenzbilder der unterschiedlichen Hersteller miteinander verglichen. Zusätzlich zu den Referenzbildern, hat Everlam Referenzmuster für die Pummelstufen 2, 4, 6 und 8 zur Verfügung gestellt (Abbildung 3-17), sodass eigene Fotos dieser Referenzen herangezogen werden konnten. Die Kuraraybilder wurden aufgrund eines unterschiedlichen Aufnahmewinkels nicht zum Vergleich herangezogen.

Zum Vergleich werden die zuvor vorgestellten Auswertemethoden A, B und C genutzt.



Abbildung 3-17 Referenzmuster Everlam, Pummel 2, Pummel 4, Pummel 6 und Pummel 8. Die Probenabmessungen betragen 15x15cm

### **Methode A: Analyse der freien Folienoberfläche mit Binärbildern**

Zunächst werden die Everlam Referenzbilder betrachtet. Mit Hilfe des Otsu Algorithmus wurden die Schwellenwerte aller Referenzbilder (Pummel 2 – 9) und die sich daraus ergebenden Anteile an schwarzen Pixeln (freie Folienfläche) sowie an weißen Pixeln (Glasrückstände) ermittelt. Die Ergebnisse sind im oberen Teil der Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9 Everlam Referenzbilder Schwarzanteil und Schwellenwert oben: Otsu Algorithmus, unten: konstanter Schwellenwert von 0,6848 (Absolutwert=175)

Pummel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Schwarzanteil [%]	/	54,45	43,83	33,28	33,02	26,64	23,72	24,74	38,70
Normalisierter Schwellenwert	/	0,3765	0,5647	0,6706	0,7176	0,7412	0,7765	0,8000	0,8314
Schwarzanteil [%]	/	95,23	71,59	36,99	21,92	12,38	5,80	3,30	2,25
Normalisierter Schwellenwert	/	0,6848	0,6848	0,6848	0,6848	0,6848	0,6848	0,6848	0,6848

Analog zu den Eastman-Bildern erhält man bei der Verwendung des Otsu Algorithmus einen mit der Pummelstufe zunehmenden Schwellenwert. Der Anteil an schwarzen Pixeln hingegen ist bis zur Pummelstufe 7 abfallend, nimmt danach jedoch wieder zu.

Wendet man bei allen Referenzbildern jedoch einen konstanten Schwellenwert von 0,6848 (Mittelwert der nach Otsu ermittelten Schwellenwerte für die einzelnen Referenzbilder), so ergibt sich mit steigendem Pummelwert eine abnehmende freie Folienfläche (schwarze Pixel). Die Ergebnisse sind im unteren Teil der Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 10 Eigene Everlam Bilder Schwarzanteil und Schwellenwert oben: Otsu Algorithm, Mitte: konstanter Schwellenwert von 0,6529 aus den 4 eigenen Bildern, unten: konstanter Schwellenwert von 0,6848 aus den 8 Referenzbildern

PummeI	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Schwarzanteil [%]	/	62,93	/	53,62	/	31,33	/	29,50	/
Normalisierter Schwellenwert	/	0,4588	/	0,6314	/	0,7137	/	0,8078	/
Schwarzanteil [%]	/	94,27	/	56,54	/	19,99	/	2,68	/
Normalisierter Schwellenwert	/	0,6529	/	0,6529	/	0,6529	/	0,6529	/
Schwarzanteil [%]	/	95,95	/	63,12	/	25,68	/	4,48	/
Normalisierter Schwellenwert	/	0,6848	/	0,6848	/	0,6848	/	0,6848	/

Das gleiche Vorgehen wurde für die eigens aufgenommenen Bilder der Referenzmuster 2, 4, 6, 8 durchgeführt. Die Ergebnisse der automatisierten Schwellenwertermittlung nach Otsu sind in Tabelle 10 oben und die für einen konstanten Schwellenwert in Tabelle 10 mitte und unten angegeben.

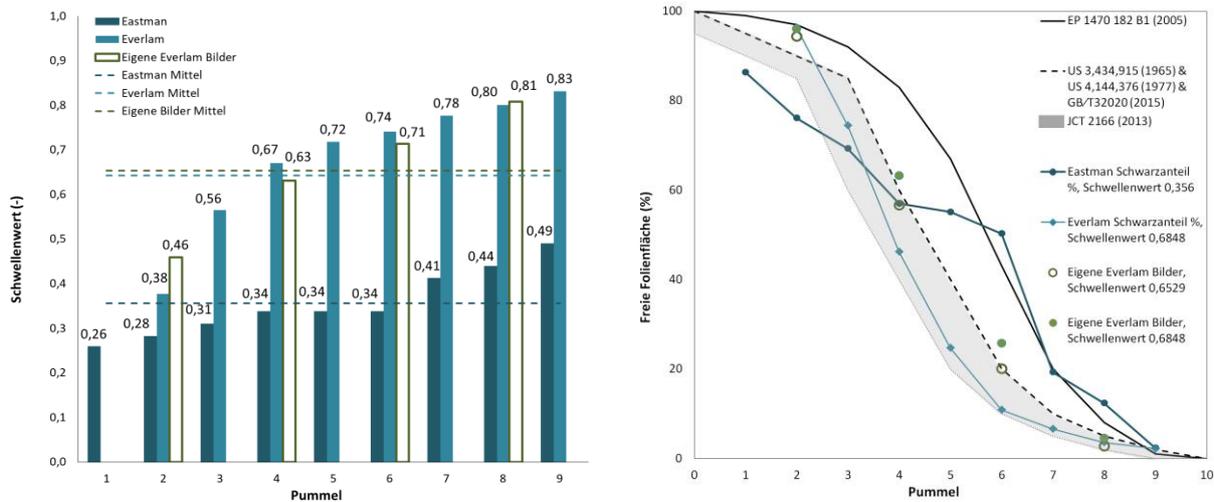


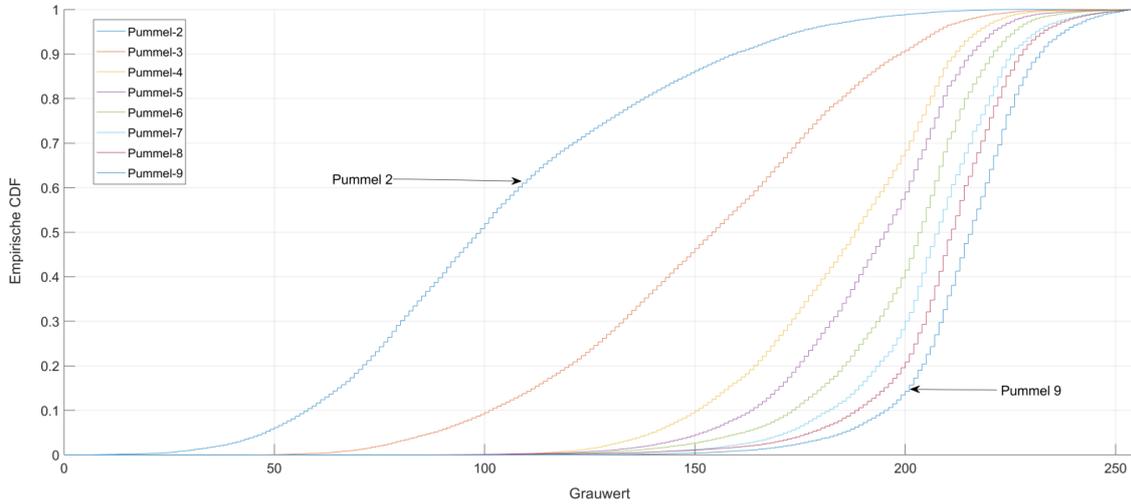
Abbildung 3-18 links: Schwellenwerte nach Otsu, rechts: Vergleich der freien Foliienfläche [%] bei Verwendung von konstanten Schwellenwerten

In Abbildung 3-18 sind alle Ergebnisse der Auswertemethode A zusammengefasst. Obwohl sich unter Verwendung von konstanten Schwellenwerten ein zu den Patentschriften und chinesischen Normen ähnlicher Verlauf für die freie Foliienfläche ergibt (siehe Abbildung 3-18 rechts), so zeigt Abbildung 3-18 links, dass die nach Otsu ermittelten Schwellenwerte der einzelnen Referenzbilder und somit auch die mittleren Schwellenwerte je Bildserie sehr unterschiedlich sind. Die Schwellenwerte der Everlam-Bilder sind deutlich größer als die der Eastman-Bilder.

**Method B: Statistische Auswertung erster Ordnung der Graustufenbilder**

Abbildung 3-19 a) zeigt die kumulative Grauwerteilungsfunktion der Referenzbilder von Everlam, Abbildung 3-19 b) zeigt die der eigenen Bilder der Referenzmuster 2, 4, 6, 8.

a) Grauwertverteilungen der Everlam Referenzbilder



b) Grauwertverteilungen der eigens aufgenommenen Bilder der Referenzmuster

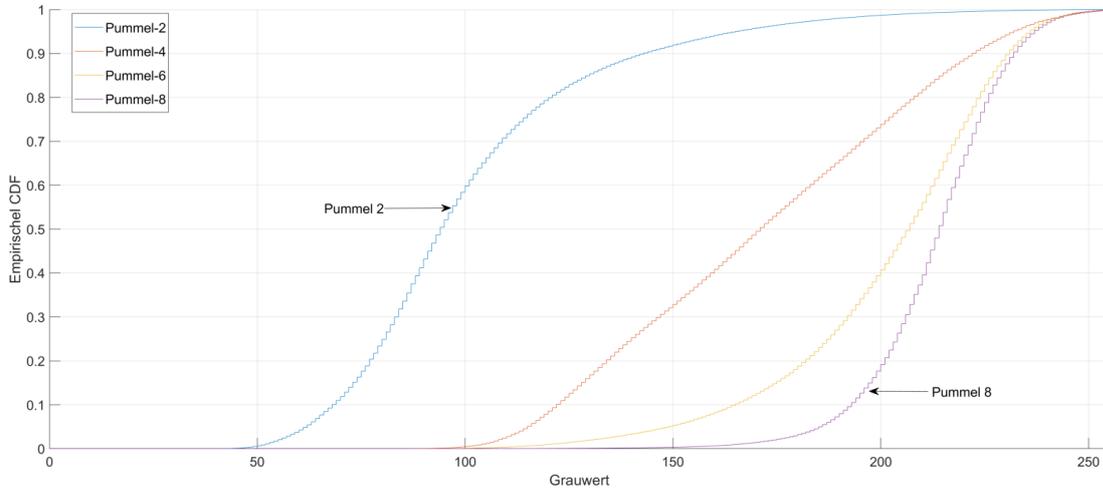


Abbildung 3-19 Grauwertverteilungen der a) Everlam Referenzbilder, b) eigens aufgenommenen Bilder der Referenzmuster

Tabelle 11 fasst die Ergebnisse (Median, Mittelwert, Standardabweichung und Varianz) zusammen.

Tabelle 11 Median, Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der Everlam Referenzbilder

Pummel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Median [-]	/	99	154	188	195	204	208	211	216
Mittelwert [-]	/	103,90	152,10	184,69	191,86	199,68	205,82	209,47	214,26
Standardabweichung[-]	/	38,66	36,36	24,18	21,68	20,12	18,52	17,60	16,14
Varianz [-]	/	1494,78	1322,12	584,55	470,10	404,93	342,83	309,81	260,39

Tabelle 12 Median, Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der eigens aufgenommenen Bilder der Referenzmuster

Pummel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Median [-]	/	94	/	171	/	207	/	214	/
Mittelwert [-]	/	100,98	/	171,81	/	201,68	/	213,04	/
Standardabweichung[-]	/	31,30	/	37,18	/	26,63	/	16,23	/
Varianz [-]	/	979,64	/	1382,23	/	709,17	/	263,27	/

Abbildung 3-20 zeigt den Mittel und Medianwert aller untersuchten Referenzdatensätze.

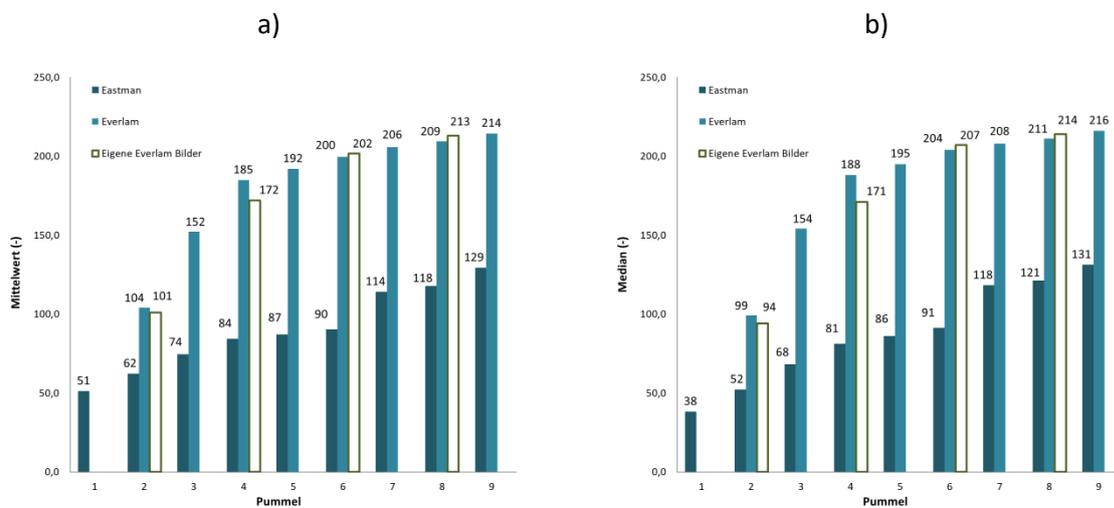


Abbildung 3-20 Vergleich des (a) Mittelwertes und (b) Medianwertes aller Referenzdatensätze

Die eigens aufgenommenen Bilder der Everlam Referenzmuster 2, 4, 6, 8 führen zu ähnlichen Ergebnissen wie die Auswertung der Everlam Referenzbilder. Im Vergleich zu den Eastman Referenzbildern gibt es jedoch erhebliche Abweichungen. Die Eastman Referenzbilder sind allgemein deutlich dunkler als die Everlam Referenzbilder. Zudem bilden die Mittelwerte der Eastman Bilder nur einen kleinen Bereich des Grauwertspektrums ab (Mittlerer Grauwert Pummel 9 - Mittlerer Grauwert Pummel 2 ~ 67 Grauwerte), wohingegen die Everlam Bilder einen deutlich breiteren Grauwertebereich abdecken (Mittlerer Grauwert Pummel 9 - Mittlerer Grauwert Pummel 2 ~ 110).

Um der Problematik der unterschiedlichen Abdeckungen im Grauwertespektrum entgegenzuwirken, wurden alle verwendeten Referenzbilder vor der statistischen Auswertung mit der nachfolgenden Formel normalisiert/standardisiert.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Dabei sind:

Z: standardisierter Grauwert

X: tatsächlicher Grauwert

$\mu$ : Mittlerer Grauwert

$\sigma$ : Standardabweichung

Durch dieses Vorgehen werden alle Erwartungswerte auf 0 und alle Varianzen auf 1 gesetzt. Die Verteilungsform wird nicht geändert. Abbildung 3-21 zeigt die Ergebnisse exemplarisch für die Pummelstufen 2, 4, 6, und 8.

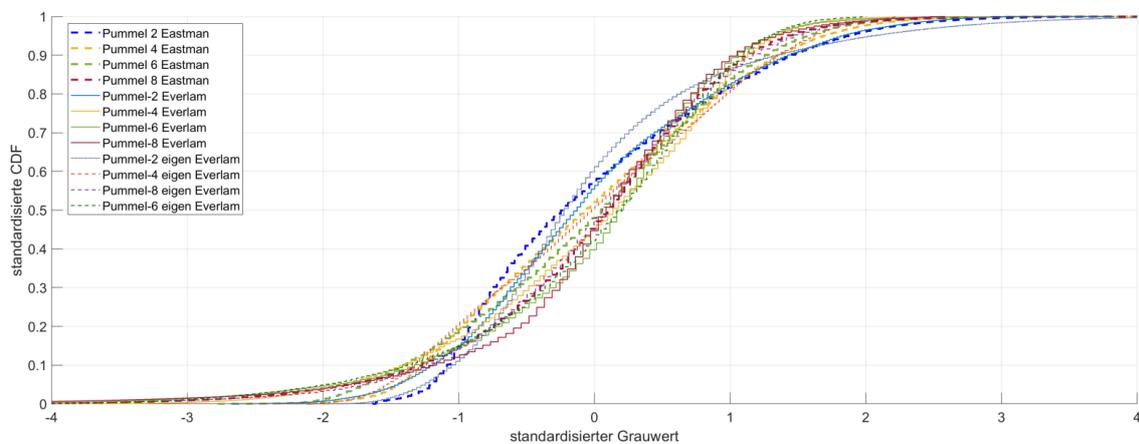


Abbildung 3-21 Vergleich der standardisierten Grauwerte-Verteilungen für die Pummelstufen 2, 4, 6 und 8 der Referenzbilder von Eastman, Everlam und der eigens aufgenommenen Bilder der Referenzmuster

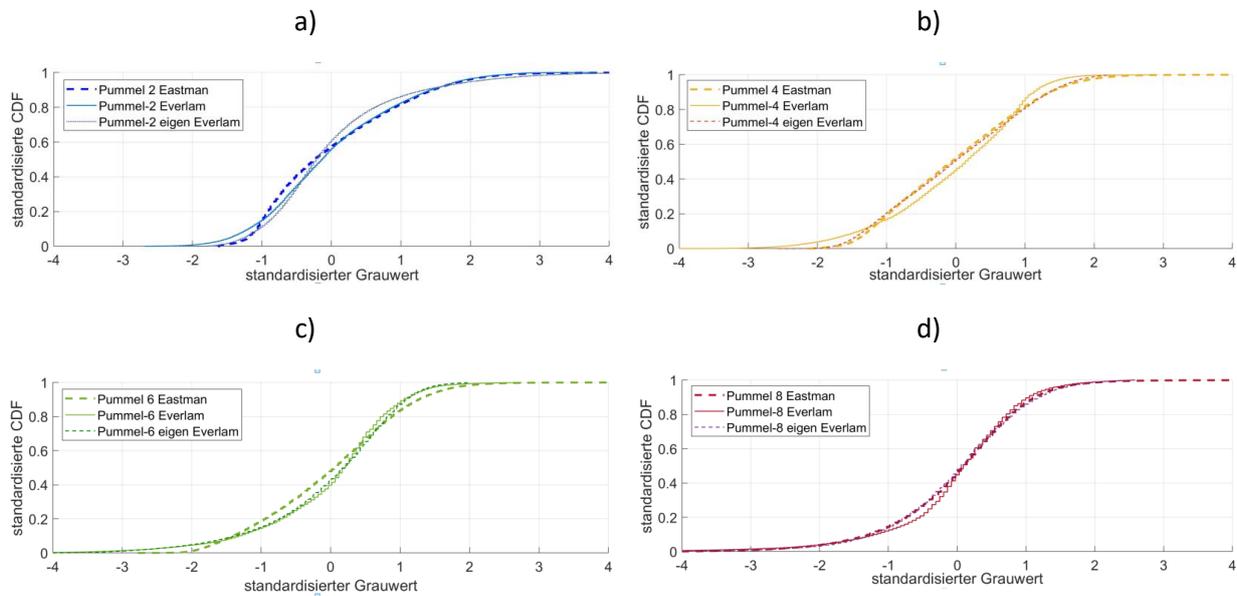


Abbildung 3-22 Vergleich der Pummelstufe a) 2, b) 4, c) 6 und d) 8

Die Formen der Verteilungsfunktionen gleicher Pummelstufen unterscheiden sich, was zu einer schwierigen Zuordnung führt.

### Methode C: Texturanalyse mit Co-Occurance-Matrizen und Statistiken zweiter Ordnung

Um Texturen unterschiedlicher Bilder miteinander vergleichen zu können, müssen die Bildmaßstäbe übereinstimmen. Der Bildmaßstab gibt an, mit wie vielen Pixeln 1cm der realen Probe abgebildet wird. Laut Herstellerangaben besitzen die auf den Referenzbildern abgebildeten Proben von Eastman eine Probenbreite von 15 cm. Unter der Annahme, dass die vollen 15 cm auf den Bildern abgebildet sind, ergibt sich für die vorhandenen Bilder ein Bildmaßstab von 56 pixels/cm.

Dieser Bildmaßstab wird nachfolgend als Referenz herangezogen und alle weiteren Bilder auf dieses Maß herunterskaliert.

Bei der Betrachtung der Referenzbilder von Everlam stellte sich heraus, dass nur Ausschnitte der gepummelten Proben (und nicht die volle Probenbreite) abgebildet sind. Da die Breite dieser Ausschnitte nicht bekannt ist, wurden zunächst die eigens aufgenommenen Bilder der Referenzproben 2, 4, 6 und 8 untersucht, siehe Abbildung 3-23. Die Breite der Referenzmuster beträgt 15 cm, und auf den Bildern ist die gesamte Probenbreite abgebildet, sodass der Bildmaßstab bekannt ist (346 pixels/cm). Nachdem dieser auf die Referenz von 56 pixels/cm runterskaliert wurde, erfolgte die Berechnung der Haralick-Features „Kontrast“, „Korrelation“, und „Homogenität“ an 6x4cm großen entzerrten Grauwert-Bildausschnitten.

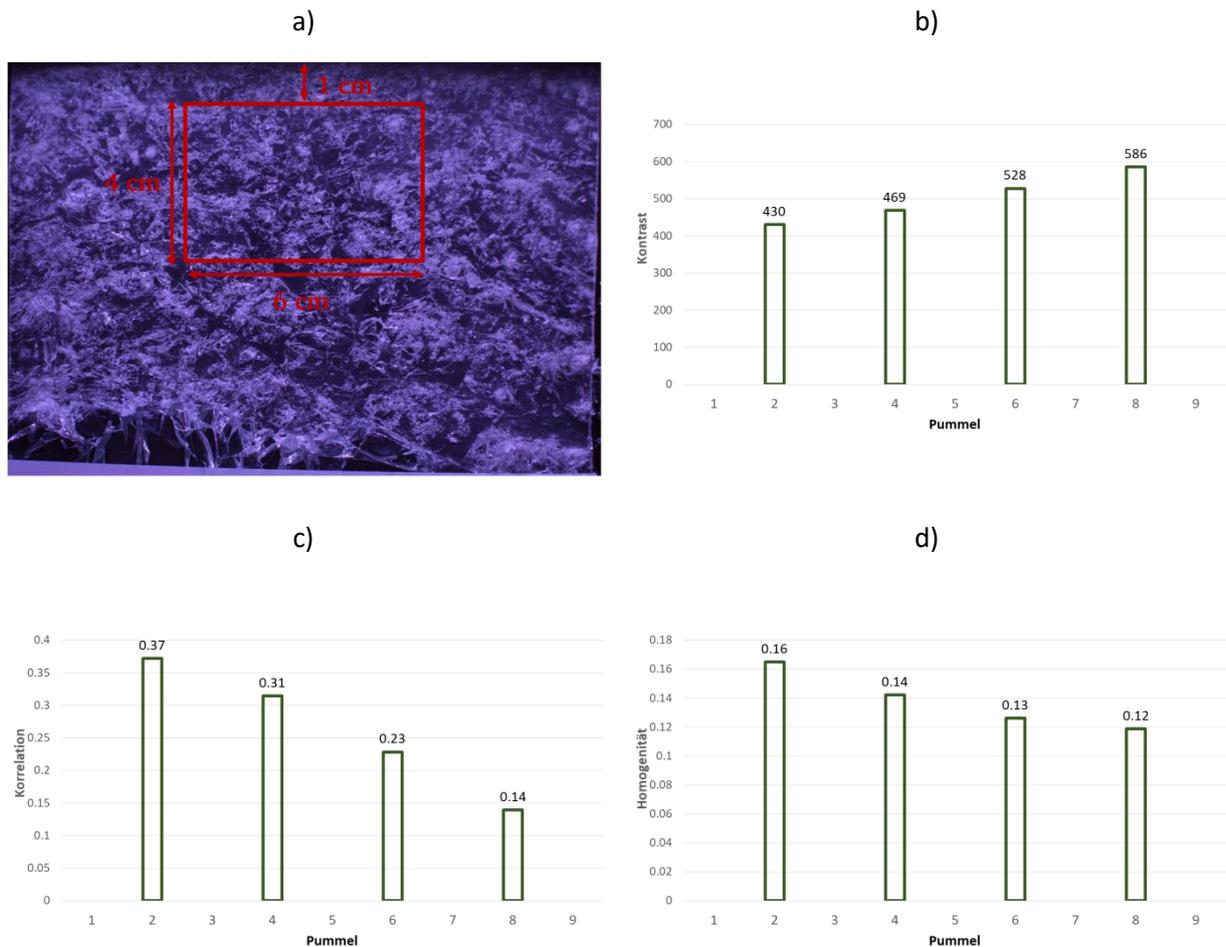


Abbildung 3-23 a) Eigene Aufnahme des Referenzmusters 4 mit Angabe des ausgewerteten Bereichs, b) Kontrast der 4 Referenzmuster, c) Korrelation der 4 Referenzmuster, d) Homogenität der 4 Referenzmuster. Bildmaßstab 56 pixels/cm, Offset Distanz 4.

Um die Everlam Referenzbilder trotzdem in den Vergleich miteinzubeziehen, wurde die auf den Referenzbildern abgebildete Breite iterativ durch einen Vergleich mit den eigens aufgenommenen Referenzmuster der Pummelstufen 2, 4, 6 und 8 ermittelt. Dazu wurde die abgebildete Probenausschnittsbreite zunächst abgeschätzt, der daraus resultierende Bildmaßstab errechnet und auf 56 pixels/cm runterskaliert, die Haralick „Korrelation“ an einem entzerrten Grauwert-Bildausschnitt errechnet und mit dem Wert aus Abbildung 3-23 verglichen. Dies wurde solange wiederholt, bis eine gute Übereinstimmung im „Korrelations“-Wert und visuell erkennbar war. Die abgebildeten Probenausschnittsbreiten wurden dabei in einem Bereich von [5:15]cm zunächst mit einer Schrittweite von 0.5cm und im Anschluss in einem kleineren Bereich mit einer Schrittweite von 0.1cm variiert. Der betrachtete Probenausschnitt wurde für diese Untersuchung aufgrund der kleinen Probenausschnittsbreite auf 4x2.6cm verringert.

In Abbildung 3-24 ist dieses Vorgehen exemplarisch für die Pummelstufe 6 dargestellt.

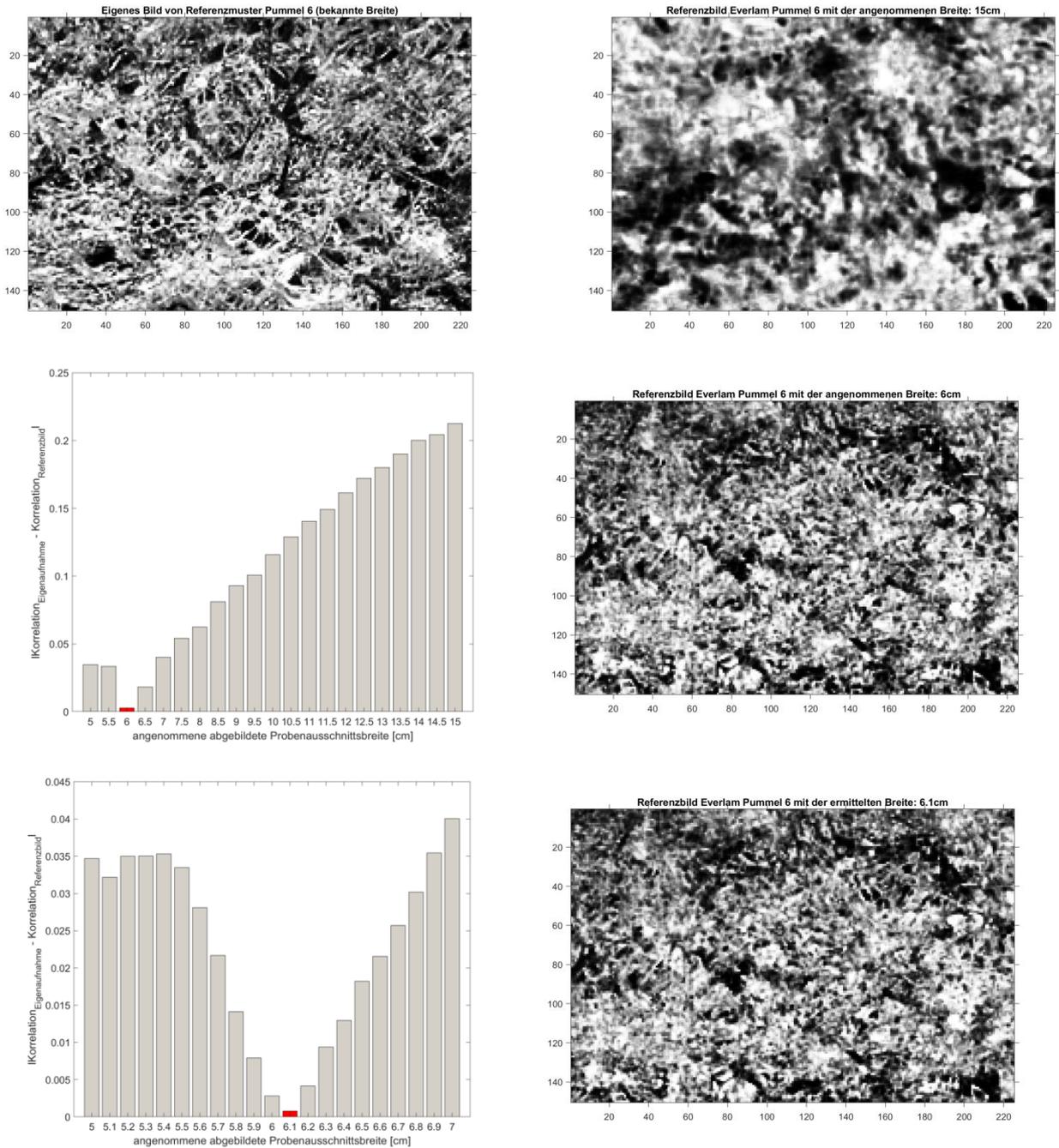


Abbildung 3-24 Iterative Ermittlung der auf den Everlam-Referenzbildern abgebildeten Probenbreiten

Die so ermittelten abgebildeten Probenbreiten betragen für:

- Pummel 2: 6.9 cm
- Pummel 4: 5.9 cm
- Pummel 6: 6.1 cm
- Pummel 8: 5.1 cm

In Abbildung 3-25 sind die Ergebnisse in Form der entzerrten Grauwertbilder dargestellt. Die obere Zeile entspricht dabei den eigens aufgenommenen Bildern und die untere Zeile den Referenzbildern.

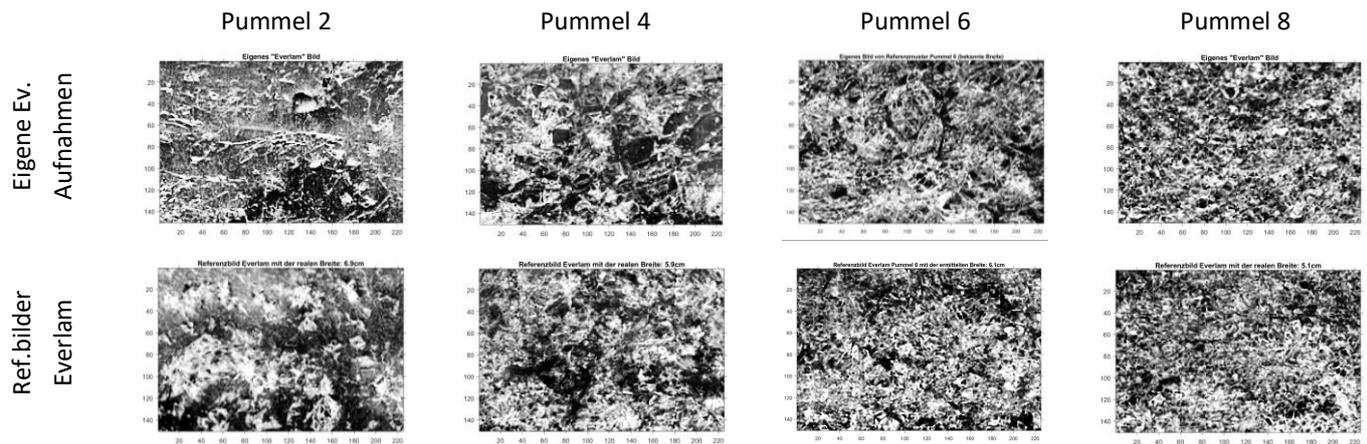


Abbildung 3-25 Vergleich der eigens aufgenommenen Bilder der Referenzmuster (oben) mit den Everlam Referenzbilder (unten) nachdem die abgebildete Probenbreite iterativ ermittelt wurde

Im Nachfolgenden wird von einer mittleren abgebildeten Probenbreite von 6cm ausgegangen.

In Abbildung 3-26, Abbildung 3-27 und Abbildung 3-28 (bzw. Tabelle 13, Tabelle 14 und Tabelle 15) werden die Haralick-Features „Kontrast“, „Korrelation“, und „Homogenität“ an 6x4cm großen (außer Everlambilder: 4x2.6 auf Grund der geringen abgebildeten Probenbreite von 6cm) entzerrten Grauwert-Bildausschnitten miteinander verglichen. Alle drei Datensätze zeigen die gleichen Trends in den Haralick Features. Obwohl bei niedrigen Pummelstufen Abweichungen im Feature „Korrelation“ zu erkennen sind, zeigt diese Methode im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung, sodass dieser Ansatz die Grundlage die neu eingeführten Pummelskala bildet.

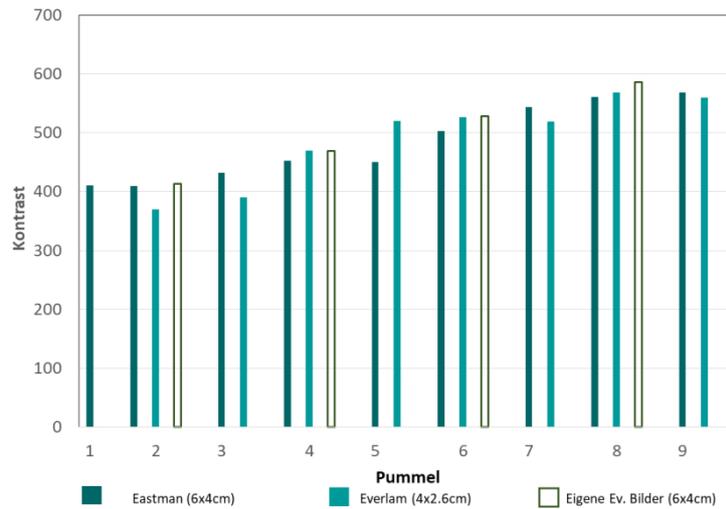


Abbildung 3-26 Kontrast aller Referenzbilder \*Everlambilder: Maßstab wurde iterativ bestimmt

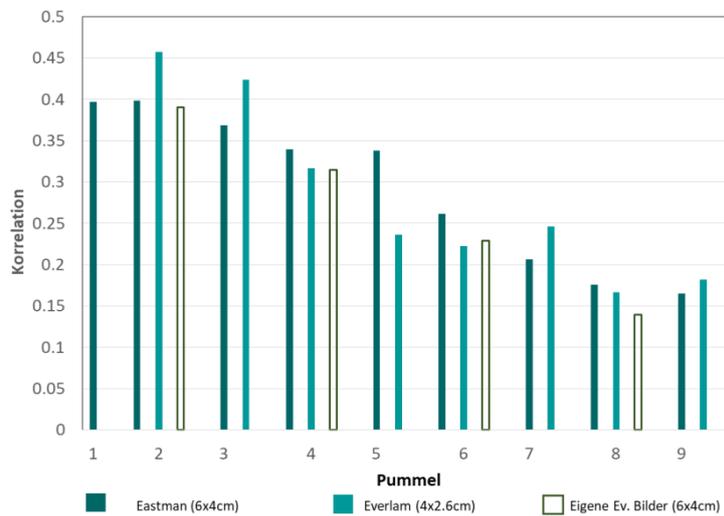


Abbildung 3-27 Korrelation aller Referenzbilder \*Everlambilder: Maßstab wurde iterativ bestimmt

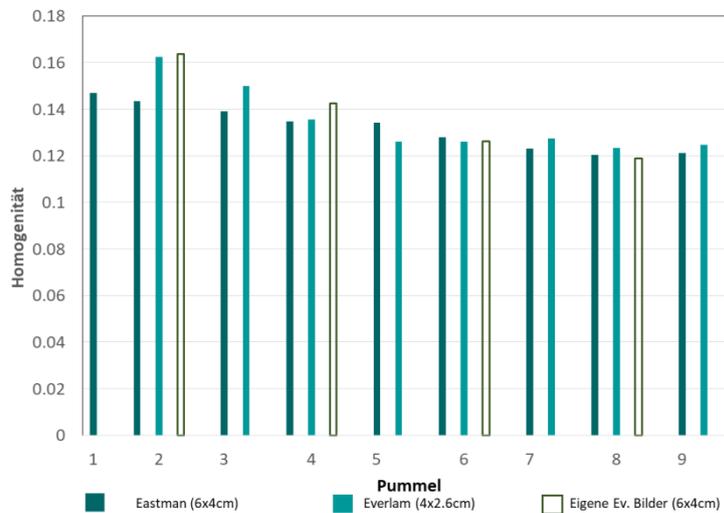


Abbildung 3-28 Homogenität aller Referenzbilder \*Everlambilder: Maßstab wurde iterativ bestimmt

Tabelle 13 Kontrast, Korrelation und Homogenität – Pummelstufe 2, 56 pixels/cm, Offset 4

Pummel 2	Eastman	Everlam	Eigene Ev.-Bilder
Kontrast	409.08	370.15	412.81
Korrelation	39.82%	45.73%	39.02%
Homogenität	14.34%	16.24%	16.36%

Tabelle 14 Kontrast, Korrelation und Homogenität – Pummelstufe 4, 56 pixels/cm, Offset 4

Pummel 4	Eastman	Everlam	Eigene Ev.-Bilder
Kontrast	452.75	469.65	468.78
Korrelation	33.92%	31.65%	31.43%
Homogenität	13.48%	13.55%	14.23%

Tabelle 15 Kontrast, Korrelation und Homogenität – Pummelstufe 6, 56 pixels/cm, Offset 4

Pummel 6	Eastman	Everlam	Eigene Ev.-Bilder
Kontrast	502.38	526.52	528.02
Korrelation	26.17%	22.22%	22.84%
Homogenität	12.80%	12.60%	12.61%

Tabelle 16 Kontrast, Korrelation und Homogenität – Pummelstufe 8, 56 pixels/cm, Offset 4

Pummel 8	Eastman	Everlam	Eigene Ev.-Bilder
Kontrast	560.97	568.51	585.88
Korrelation	17.54%	16.65%	13.92%
Homogenität	12.02%	12.33%	11.88%

### 3.1.4 Neue Pummelskala

Als Grundlage für die neue Pummelskala dient die zuvor beschriebene Methode C: „Texturanalyse mit Co-Occurance-Matrizen und Statistiken zweiter Ordnung“. Bei Texturanalysen ist der Bildmaßstab entscheidend. Es wurden ausschließlich die eigenen Aufnahmen der Everlam Referenzmuster (Pummelstufen 2, 4, 6 und 8) in die Pummelskala genutzt, da hier der Bildmaßstab genau bestimmt werden konnte. Die Beschränkung auf 56 Pixel/abgebildete Probenbreite (resultierend aus der Auflösung der Eastman-Bilder) ist nicht mehr zwingend erforderlich und es wurde eine neue Parameterstudie mit verschiedenen Bildmaßstäben und Offset-Distanzen (Abstand zum betrachteten Pixelnachbar) durchgeführt. Dabei lieferte eine Bildauflösung von 100 Pixel/cm und eine Offset-Distanz von 10 die besten Ergebnisse. Die Ergebnisse für einen Bildmaßstab von 100 Pixel/cm und unterschiedliche Offset-Distanzen sind in Abbildung 3-29 dargestellt. Man erkennt, dass sich die 4 Referenzbilder bei dieser Auflösung und dieser Offset-Distanz gut unterscheiden.

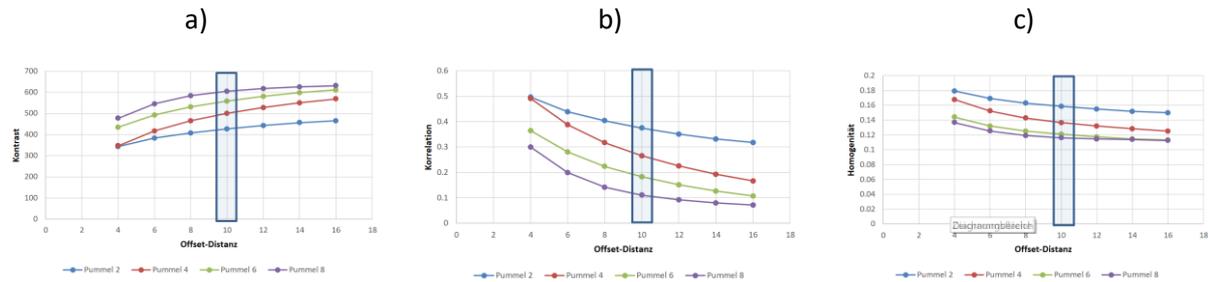


Abbildung 3-29 Ermittlung der Offset-Distanz für einen Bildmaßstab von 100 pixels/cm. a) Kontrast, b) Korrelation c) Homogenität

Diese Skala gilt für folgende Randbedingungen:

- Bildauflösung 100 Pixel/ abgebildete Probenbreite:
  - Beispiel: Wenn die gepummelte Probe eine Breite von 10cm aufweist, dann wird die Probenbreite mit 1000 Pixeln abgebildet.
- Es werden Probenausschnitte mit 6x4 cm ausgewertet (600x400 Pixel)
- Die Histogramme der Grauwertbilder werden entzerrt (64 bins) um den Lichteinfluss zu reduzieren.
- Bei der GLCM werden 8 Pixelnachbarn berücksichtigt. Der Abstand zum Nachbar beträgt 10. Die Dimension der GLCM beträgt 64x64.

Die Zuordnung in eine Pummelklasse an Hand eines Fotos der gepummelten Probe erfolgt demnach mit Hilfe von Tabelle 17 in folgenden Schritten:

- Vorbereiten des Fotos:
  - Umwandeln in Grauwertbild, zuschneiden (empfohlen werden 6x4cm), schärfen
  - Anpassen des Bildmaßstabes auf 100 Pixel/abgebildete Probenbreite
- Entzerrung des Histogramms zur Reduktion des Lichteinflusses. Das gestreckte Histogramm besitzt 64 bins (64 Grauwerte sind besetzt)
- Erstellen der Grauwertkorrelationsmatrix. Dabei sind folgende Parameter zu verwenden: Alle 8 Nachbarn sind zu betrachten. Der Abstand zum Nachbar beträgt 10. Die Dimension der GLCM beträgt 64x64.
- Berechnung der Haralick Features „Kontrast“, „Korrelation“ und „Homogenität“
- Vergleich mit den in Tabelle 17 genannten Werten. Zwischen den Pummelstufen darf linear interpoliert werden. Die drei Haralick Features werden getrennt voneinander betrachtet. Für eine Probe erhält man somit 3 Pummelwerte.
- Der finale Pummelwert ergibt sich aus dem Mittelwert der 3 einzelnen Werte.

Tabelle 17 Neue Pummelskala, gültig für 100 pixels/cm, Offset Distanz 10

Pummelstufe	Kontrast	Korrelation in %	Homogenität in %
2	427.18	37.49%	15.87%
4	500.95	26.56%	13.68%
6	559.05	18.34%	12.11%
8	605.24	11.09%	11.63%

Für das Erstellen der Fotos werden folgende Punkte empfohlen:

- Senkrechte Aufnahme der Probe
- Verwendung von diffusem und möglichst gleichmäßigem Licht
- Kalibrierung der Kameraeinstellungen mittels Graukarte
- Angabe eines Maßstabes (z.B. Markierung auf der Probe)

Die Funktionsweise der neuen Pummelskala wird mit den Referenzbildern von Everlam (Tabelle 18) getestet. Da die Eastmanbilder eine niedrigere Auflösung besitzen, werden diese hier nicht betrachtet. Abbildung 3-30 zeigt die Zuordnung am Beispiel vom Everlam-Referenzbild der Pummelstufe 4 (100 Pixel/cm, Offset 10).

Tabelle 18 Test mit den Everlam-Referenzbildern 100 pixel/cm; Offset 10

Bild	Pummel aus Kontrast	Pummel aus Korrelation	Pummel aus Homogenität	Mittelwert
Everlam-Pummel 2	<2	<2	<2	<2
Everlam-Pummel 3	2,20	2,26	3,41	2,62
Everlam-Pummel 4	4,05	4,07	4,97	4,36
Everlam-Pummel 5	6,14	6,08	5,99	6,07
Everlam-Pummel 6	6,22	6,30	5,84	6,12
Everlam-Pummel 7	4,92	5,02	5,60	5,18
Everlam-Pummel 8	6,98	7,16	6,40	6,85
Everlam-Pummel 9	7,02	6,93	6,27	6,74

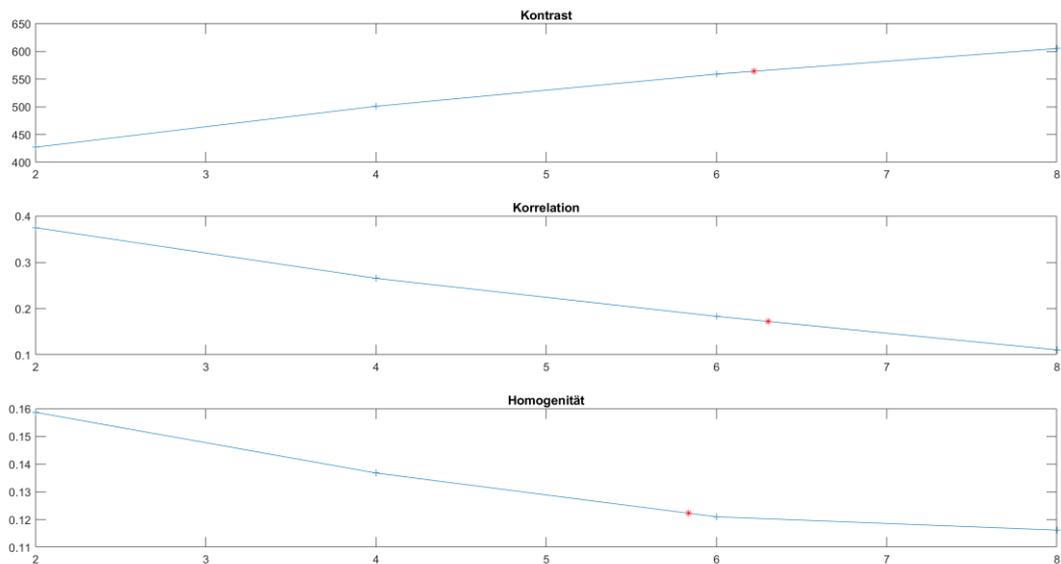


Abbildung 3-30 Pummelzuordnung: Referenzbild Everlam, Pummelstufe 6, 100 Pixels/cm, Offset 10

Anmerkung: Falls mit der niedrigeren Auflösung von 56 Pixels/cm gerechnet werden soll, so ist die Skala aus Tabelle 13-Tabelle 15 zu verwenden. Die Offset-Distanz beträgt in dem Fall 4. Die Anwendung dieser Skala wurde ebenfalls beispielhaft an den Everlam-Bildern getestet (Tabelle 19).

Tabelle 19 Test mit den Everlam-Referenzbildern 56 pixel/cm; Offset 4

Bild	Pummel aus Kontrast	Pummel aus Korrelation	Pummel aus Homogenität	Mittelwert
Everlam-Pummel 2	<2	<2	<2	<2
Everlam-Pummel 3	<2	<2	3,26	/
Everlam-Pummel 4	4,12	4,16	4,92	4,4
Everlam-Pummel 5	6,1	6,13	6,02	6,08
Everlam-Pummel 6	6,44	6,51	6,37	6,44
Everlam-Pummel 7	5,81	5,93	6,1	5,95
Everlam-Pummel 8	7,24	7,36	6,97	7,19
Everlam-Pummel 9	7,47	7,41	7,08	7,32

## 3.2 Pummeltests an Kleinproben

### 3.2.1 Versuchs-und Probekörperübersicht

Die neu entwickelte Skala wird in diesem Kapitel an eigens durchgeführten Versuchen getestet.

Tabelle 20 Versuchsmatrix Pummeltest an Kleinproben

Versuchsreihe	Folientyp	Pummelvorgang	Lagerungstemperatur	Anzahl an Versuchen
1	Saflex® RB (PVB)	manuell, Person 1	-18 °C	5
	Saflex® RB (PVB)	manuell, Person 2	-18 °C	5
	Saflex® RB (PVB)	manuell, Person 3	-18 °C	5
	Saflex® RB (PVB)	Pummelapparat	-18 °C	10
	Saflex® RB (PVB)	Pummelapparat	21 °C	3
	Saflex® RB (PVB)	Pummelapparat	60 °C	3
2	Saflex® RB41 Std (PVB)	Pummelapparat	-18 °C	3
		Manuell		1
	Saflex® RB41 High Moisture (PVB)	Pummelapparat	-18 °C	3
		Manuell		1
	Saflex® RB41 Low Moisture (PVB)	Pummelapparat	-18 °C	5
	Saflex® RA41 (PVB, Hgh Adhesion)	Pummelapparat	-18 °C	3
		Manuell		1
	Saflex® RC41 (PVB, Low Adhesion)	Pummelapparat	-18 °C	3
Manuell		1		
3	EVA Glaast (keine genauere Angaben)	Pummelapparat	-18°C	3
	EVA Glaast (keine genauere Angaben)	Pummelapparat	-50°C	3

Die Probengeometrie der in Tabelle 20 aufgeführten Proben betrug 3 mm Floatglas / 0,76 mm PVB bzw. EVA/ 3 mm Floatglas. Die Abmessungen betragen 100x300 mm.

Insgesamt wurden drei Versuchsserien untersucht:

1. Versuchsreihe bestand aus dem gleichen Probentyp. Der Pummelvorgang wurde manuell oder mit Pummelapparat durchgeführt. Zudem wurden unterschiedliche Lagerungstemperaturen untersucht.
2. Versuchsreihe bestand aus 5 unterschiedlichen Probentypen, wobei jedoch stets PVB basierte Zwischenschichten zum Einsatz kamen. Der Pummelvorgang erfolgte überwiegend mit dem Pummelapparat und die Lagerungstemperatur war bei allen Proben identisch (-18°C).
3. Versuchsreihe bestand aus Proben mit EVA-basierten Zwischenschichten. Der Pummelvorgang erfolgt im Pummelapparat und es wurden zwei unterschiedliche Lagerungstemperaturen untersucht. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Kapitel 5.3 dargestellt.

Die genauen Angaben zu den Proben, sowie zu den Lagerungsbedingungen sind dem Anhang (Kapitel 9.1) zu entnehmen.

### 3.2.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Alle Proben wurden vor der Lagerung mit einem Impaktmuster aus 56 Impaktfeldern (7 Reihen von 8 Impaktfeldern, Abbildung 3-31 b) versehen. Zusätzlich wurde die Zinn- und Luftseite mit einer UV-Lampe detektiert und markiert. Nach Notierung der Glasdicke, der Laminatdicke und der Masse wurden die Proben in einer Klimakammer bei einer konstanten Temperatur von  $-18^{\circ}\text{C}$  bzw.  $60^{\circ}\text{C}$  (siehe Versuchsübersicht) und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 25-30%rH für  $\sim 24\text{h}$  gelagert. Die Tests wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Zuerst wurde die Zinnseite getestet. Dann wurde die Glasprobe leicht abgeklopft. Die visuelle Auswertung erfolgte jeweils direkt vor Ort anhand der Referenzbilder von Kuraray. Darüber hinaus wurde die gepummelte Probe gewogen und ein Bild für die spätere Auswertung aufgenommen. Um nach der Durchführung des Tests identische Aufnahmebedingungen für die Probenbilder zu gewährleisten, wurde eine Kameravorrichtung genutzt. Diese besteht aus einem Karton aus Graupappe mit schwarzen Innenwänden und zwei gegenüberliegenden offenen Seiten. Auf einer offenen Seite ist eine Lichtquelle in einem definierten Abstand positioniert. Die Probe kann durch die andere offene Seite in den Kasten gelegt werden, wobei darauf geachtet wird, dass die Pummelprobe nach jedem Test in die gleiche Position gebracht wird. In die Oberseite des Kastens wurde eine Aussparung integriert, damit die Kamera auf dem Kasten platziert werden und Bilder von der gleichen Position aus aufnehmen kann. Zudem wird dazu geraten, die Kameraeinstellungen mittels Graukarte zu kalibrieren. Bevor die Luftseite getestet wurde, wurde die Probe für weitere 15 Minuten in die Klimakammer zurückgelegt. Auch diese Seite wurde wieder visuell bewertet, gewogen und in der Kameravorrichtung (Abbildung 3-31 a) fotografiert. Mit einem Infrarot-Thermometer wurde die Temperatur der Glasoberfläche vor und nach dem Experiment aufgezeichnet.

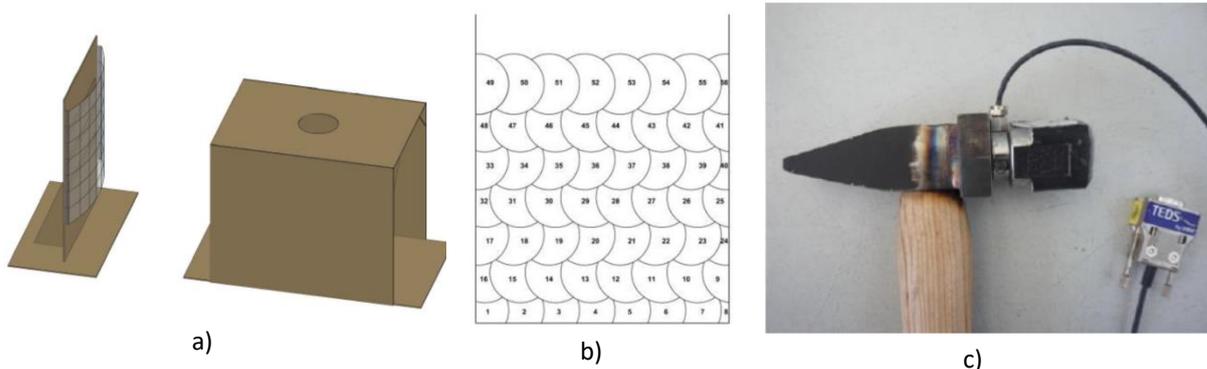


Abbildung 3-31 a) Skizze der Kameravorrichtung b) Schlagmuster c) Modifizierter Impulshammer.

Der menschliche Einfluss wurde untersucht, indem das manuelle Experiment von drei verschiedenen Personen durchgeführt wurde. Weitere Versuchsreihen wurden mit der in Abbildung 3-32 gezeigten Pummel-Apparatur durchgeführt, so dass Vergleiche zwischen dem manuellen und dem halbautomatischen Pummel-Test gezogen werden konnten. Für alle Versuche wurde der gleiche Hammer verwendet. In Vorversuchen wurde ein Schlosserhammer mit einem Hammerkopfgewicht von 800 g ausgewählt. Bei allen manuellen Versuchen und einem Teil der Versuche mit dem

Pummelgerät wurde die angewandte Kraft gemessen. Zu diesem Zweck wurde der Hammer mit einer Ring-Kraftmessdose (und teilweise mit einem Beschleunigungssensor) ausgerüstet (Abbildung 3-31 c).

Die Pummel-Apparatur besteht aus einem Stahlrahmen. An den Stahlrahmen ist eine Metallplatte in einem Winkel von  $45^\circ$  angeschweißt, auf der die Glasplatte so befestigt werden kann, dass sie in einem flachen Winkel von etwa  $5^\circ$  zur geneigten Metallplatte steht. Der obere Teil der Probe wird eingespannt, während der untere Teil auf der geneigten Platte aufliegt. Eine Gewindestange an der Klemme ermöglicht es, die Probe entlang der geneigten Platte zu bewegen. Der Hammer schlägt von oben auf die Probe. Er wird so eingestellt, dass er im rechten Winkel auf die Glasplatte trifft. Die maximale Fallhöhe entspricht der vertikalen Ausrichtung des Hammerstiels. Darüber hinaus kann die Position des Hammers horizontal entlang der Achse verschoben werden. Die Hammerhalterung ist so ausgelegt, dass verschiedene Hämmer verwendet werden können.



Abbildung 3-32 a) Skizze des Pummelapparats, b) Pummelapparat

### 3.2.3 Versuchsergebnisse

Bilder von den gepummelten Proben sind dem Anhang (9.2) zu entnehmen.

#### Vergleich: manuelles Pummeln – Pummelapparat

Die erste Versuchsreihe bestand ausschließlich aus der gleichen Art von Probekörper. Diese Untersuchung wurde durchgeführt um den Einfluss des Menschen während des manuellen Pummelns zu untersuchen. Zu diesem Zweck haben drei verschiedenen Personen den manuellen Pummelvorgang an jeweils 3-5 Proben durchgeführt. Dabei wurde der Pummelvorgang durch eine im Hammer integrierte Kraftmessdose aufgenommen. In diesem Abschnitt werden repräsentative Kraft-Zeit-Verläufe dargestellt und die manuell gepummelten Proben einer Pummelklasse zugeordnet. Zudem werden die Ergebnisse der mittels Pummelapparat geprüften Proben dargestellt und den manuellen Ergebnissen gegenübergestellt.

Abbildung 3-33 (Zeilen 2-4) zeigt die aufgebrauchten Kräfte während des manuellen Pummelverfahrens von drei verschiedenen Probanden am Beispiel jeweils einer Probe. Die restlichen Verläufe können dem Anhang (9.3) entnommen werden. Eine Peak-Gruppierung entspricht dem Pummeln einer Reihe. Die Abschnitte dazwischen zeigen die Zeit, die benötigt wurde, um die Probe nach unten zu bewegen. Abbildung 3-34 zeigt die entsprechenden Pummelbilder und Abbildung 3-35 die ausgewerteten Probenausschnitte.

Pummel Apparat

Name: 4.1\_Sn

Reihen insgesamt: 7

gemessen: 4

Schläge: 56

Testperson 1

Name: 1.5\_F

Reihen: 7

Schläge: 57

Testperson 2

Name: 2.3\_Sn

Reihen: 4

Schläge: 40

Testperson 3

Name: 3.4\_Sn

Reihen: 5

Schläge: 50

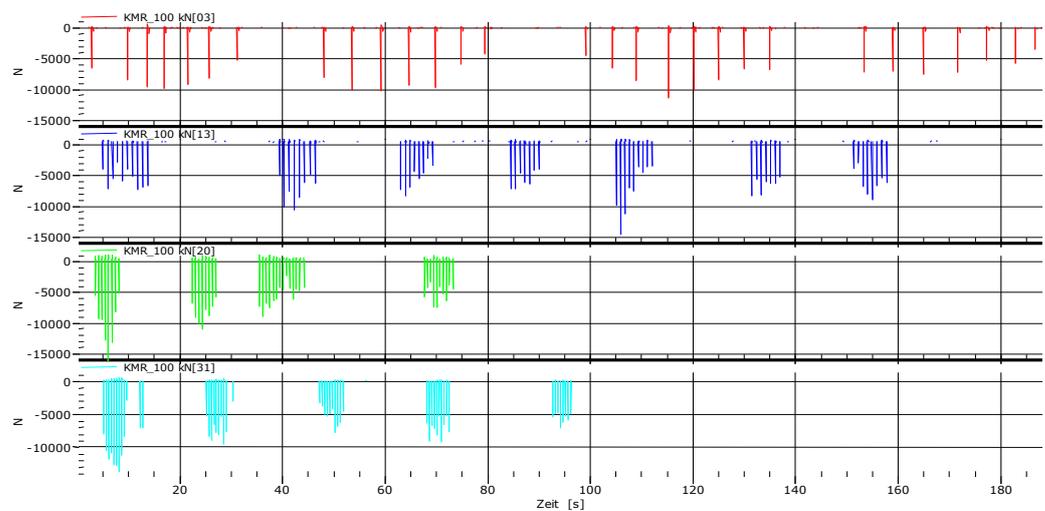
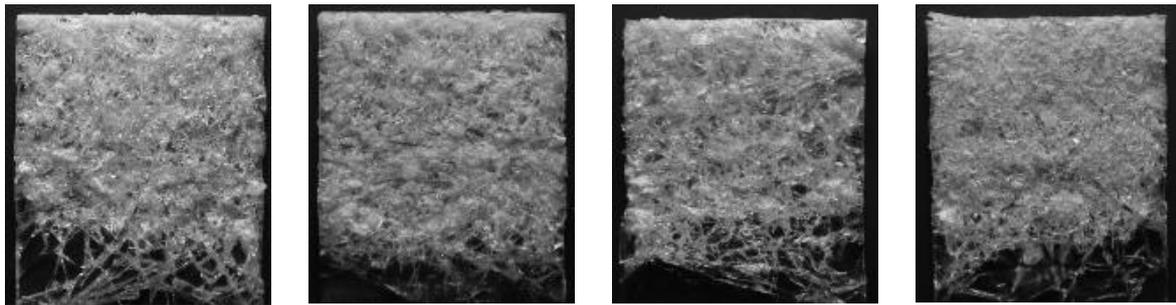


Abbildung 3-33 Kräfte während des Pummelns mit dem Pummelgerät (1 Reihe) und manuell



a) Pummel Apparat

4.1\_Sn (Pummel 4)

b) Testperson 1

1.5\_F (Pummel 4)

c) Testperson 2

2.3\_Sn (Pummel 4)

d) Testperson 3

3.4\_Sn (Pummel 6)

Abbildung 3-34 Ergebnisse für verschiedene Testpersonen

Bei Anwendung der neuen Pummelskala erhält man die in Tabelle 21 aufgeführten Ergebnisse. Abbildungen der untersuchten Probenausschnitte können dem Anhang 9.6 entnommen werden.

Tabelle 21 Vergleich Manuell und Pummelapparat: Automatisierte Pummelklassifizierung mit der neuen Pummelskala, 100 pixels/cm, Offset Distanz 10, Bildausschnitt 6x4 cm, 1cm Randabstand

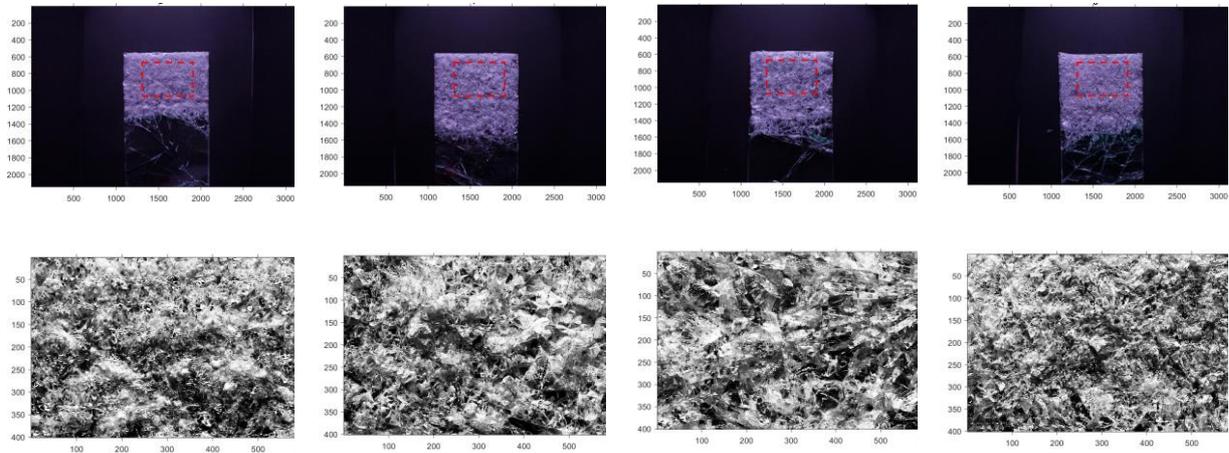
	Bildname	Pummel aus Kontrast	Pummel aus Korrelation	Pummel aus Homogenität	Mittelwert	Gerundet
Manuell – Testperson 1	'1.1_F.JPG'	4,44	4,48	5,10	4,67	5
	'1.1_Sn.JPG'	4,98	5,01	5,22	5,07	5
	'1.2_F.JPG'	4,85	4,87	5,24	4,98	5
	'1.2_Sn.JPG'	5,11	5,15	5,43	5,23	5
	'1.3_F.JPG'	4,81	4,85	5,37	5,01	5
	'1.3_Sn.JPG'	5,50	5,59	5,62	5,57	6
	'1.4_F.JPG'	4,92	4,96	5,48	5,12	5
	'1.4_Sn.JPG'	6,57	6,55	6,26	6,46	6
	'1.5_F.JPG'	3,90	3,90	4,84	4,21	4
'1.5_Sn.JPG'	5,09	5,15	5,54	5,26	5	
Manuell – Testperson 2	'2.1_F.JPG'	4,62	4,58	4,92	4,71	5
	'2.1_Sn.JPG'	4,38	4,37	4,88	4,54	5
	'2.2_F.JPG'	3,65	3,58	4,40	3,88	4
	'2.2_Sn.JPG'	2,76	2,72	3,75	3,08	3
	'2.3_F.JPG'	6,40	6,43	6,09	6,31	6
	'2.3_Sn.JPG'	3,79	3,83	4,52	4,05	4
	'2.4_F.JPG'	3,59	3,61	4,38	3,86	4
	'2.4_Sn.JPG'	3,95	3,99	4,76	4,23	4
	'2.5_F.JPG'	3,19	3,14	4,31	3,55	4
'2.5_Sn.JPG'	4,32	4,35	4,83	4,50	5	

Manuell – Testperson 3	'3.1_F.JPG'	6,44	6,48	6,40	6,44	6
	'3.1_Sn.JPG'	5,83	5,94	5,88	5,88	6
	'3.2_F.JPG'	5,42	5,51	5,74	5,56	6
	'3.2_Sn.JPG'	6,42	6,35	6,26	6,34	6
	'3.4_F.JPG'	4,62	4,58	5,12	4,77	5
	'3.4_Sn.JPG'	5,96	6,05	6,36	6,12	6
	'3.5_F.JPG'	4,88	4,88	5,40	5,06	5
	'3.5_Sn.JPG'	6,43	6,61	6,58	6,54	7
Pummelapparat (ohne Aufzeichnung der Kraft)	'4.1_F.JPG'	6,57	6,59	6,55	6,57	7
	'4.1_Sn.JPG'	3,84	3,86	5,11	4,27	4
	'4.2_F.JPG'	5,63	5,79	5,97	5,80	6
	'4.2_Sn.JPG'	<2	<2	3,28	/	/
	'4.3_F.JPG'	5,31	5,33	5,51	5,38	5
	'4.3_Sn.JPG'	4,62	4,62	5,40	4,88	5
	'4.4_F.JPG'	4,10	4,11	5,18	4,47	4
	'4.4_Sn.JPG'	2,05	2,09	3,91	2,68	3
	'4.5_F.JPG'	4,82	4,81	5,46	5,03	5
	'4.5_Sn.JPG'	2,19	2,25	3,98	2,80	3
Pummelapparat (mit Kraftmessung)	'5.1_F.JPG'	4,19	4,23	5,04	4,48	4
	'5.1_Sn.JPG'	4,05	4,06	4,61	4,24	4
	'5.2_F.JPG'	5,01	5,07	5,48	5,18	5
	'5.2_Sn.JPG'	6,13	6,17	6,01	6,11	6
	'5.3_F.JPG'	4,09	4,11	4,99	4,40	4
	'5.3_Sn.JPG'	5,23	5,29	5,45	5,32	5
	'5.4_F.JPG'	7,12	7,14	7,15	7,14	7
	'5.4_Sn.JPG'	2,88	2,91	4,21	3,33	3
	'5.5_F.JPG'	6,10	6,20	6,61	6,31	6
	'5.5_Sn.JPG'	5,64	5,70	5,93	5,76	6

## Fazit:

- Variation innerhalb Testperson 1: gering, Werte zwischen 4-6, Mittelwert 5,1, gerundet 5
- Variation innerhalb Testperson 2: etwas höher, Werte zwischen 3 und 6, Mittelwert: 4,4, gerundet 4
- Variation innerhalb Testperson 3: gering, Werte zwischen 5 und 7, Mittelwert: 5,9, gerundet 6
- Variation innerhalb einer Serie geringer als erwartet, aber Unterschiede zwischen Personen erkennbar.
- Pummelapparat, mit Kraftaufzeichnung: Variation größer als manuelles Pummeln, Mittelwert: 4,6, gerundet 5
- Pummelapparat, ohne Kraftaufzeichnung: Variation größer als manuelles Pummeln, Mittelwert: 5

Es wird vermutet, dass die Kraft im Pummelapparat zu niedrig ist und dadurch zu viele intakte Glasrückstände vorhanden bleiben. Zudem dauert der Pummelvorgang mit dem Pummelapparat zu lange, weshalb die Probe zum Schluss zu warm ist, und die Bruchstücke nicht abfallen, sondern in die Folie eingedrückt werden. Abbildungen der restlichen untersuchten Probenausschnitte können dem Anhang 9.6 entnommen werden.



4.1\_Sn (Pummel 4)

1.5\_F (Pummel 4)

2.3\_Sn (Pummel 4)

3.4\_Sn (Pummel 6)

Abbildung 3-35 Zusammenfassung der Ergebnisse – Vergleich manuell und Pummelapparat (Serie 1-5 der Versuchsreihe 1)

### Vergleich: Unterschiedliche Lagerungstemperaturen

Die Ergebnisse der Versuchsserie 6 und 7 der Versuchsreihe 1 (unterschiedliche Lagerungstemperaturen) sind in Tabelle 22 dargestellt. Abbildungen der untersuchten Probenausschnitte können dem Anhang 9.6 entnommen werden.

Tabelle 22 Unterschiedliche Lagerungsbedingungen: Automatisierte Pummelklassifizierung mit der neuen Pummelskala, 100 pixels/cm, Offset Distanz 10, Bildausschnitt 6x4 cm, 1cm Randabstand

	Bildname	Pummel aus Kontrast	Pummel aus Korrelation	Pummel aus Homogenität	Mittelwert	Gerundet
Lagerungstemp_ +20°C	'6.1_F.JPG'	5,38	5,44	5,44	5,42	5
	'6.1_Sn.JPG'	3,14	3,17	4,25	3,52	4
	'6.2_F.JPG'	3,99	4,01	4,89	4,30	4
	'6.2_Sn.JPG'	2,45	2,50	3,65	2,86	3
	'6.3_F.JPG'	4,64	4,65	5,27	4,85	5
	'6.3_Sn.JPG'	5,25	5,30	5,39	5,31	5
Lagerungstemp_ +60°C	'7.1_F.JPG'	<2	<2	3,16	/	/
	'7.1_Sn.JPG'	3,12	3,10	4,12	3,45	3
	'7.2_F.JPG'	2,42	2,41	3,49	2,77	3
	'7.2_Sn.JPG'	2,68	2,63	3,40	2,90	3
	'7.3_F.JPG'	3,19	3,26	4,27	3,57	4
	'7.3_Sn.JPG'	3,43	3,45	4,13	3,67	4

Fazit:

Bei zu hohen Temperaturen werden zu niedrige Pummelstufen ermittelt. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Bruchstücke bei erhöhter Temperatur nicht abfallen, sondern in die weiche Folie gedrückt werden. Intakte Glasoberflächen werden dann fälschlicherweise als freie Folienfläche interpretiert, siehe Abbildung 3-37. Der Pummeltest sollte also stets bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur der Zwischenschicht durchgeführt werden.

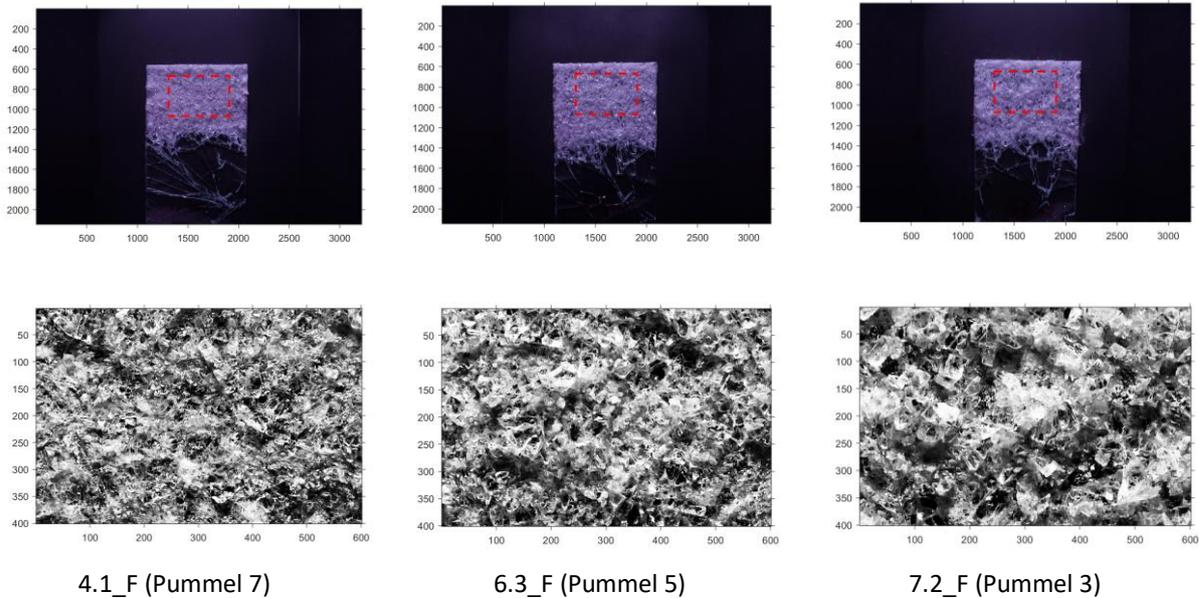


Abbildung 3-36 Zusammenfassung der Ergebnisse – Vergleich unterschiedliche Lagerungstemperaturen (Serie 6-7 der Versuchsreihe 1)

**Vergleich: unterschiedliche PVB-Probentypen**

Ziel der Versuchsserie 2 war die Bestätigung des entwickelten Prüf- und Auswerteverfahrens. Dazu wurden 5 unterschiedliche PVB-Typen (überwiegend) im Pummelapparat untersucht. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der automatisierten Pummelklassifizierung gezeigt (Tabelle 23). Bei den mit „APP“ endenden Bezeichnungen handelt es sich jeweils um eine bereits getestete Probe, lediglich die Lichtbedingungen während des Fotografierens haben sich verändert. Abbildungen der untersuchten Probenausschnitte können dem Anhang 9.6 entnommen werden.

Tabelle 23 Unterschiedliche PVB-Probentypen: Automatisierte Pummelklassifizierung mit der neuen Pummelskala, 100 pixels/cm, Offset Distanz 10, Bildausschnitt 6x4 cm, 1cm Randabstand

	Bildname	Pummel aus Kontrast	Pummel aus Korrelation	Pummel aus Homogenität	Mittelwert	Gerundet
RB41 STD	S1 F	5,19	5,34	5,36	5,3	5
	S1 Sn	5,58	5,56	5,2	5,45	5
	S3 F	6,26	6,21	5,6	6,02	6
	S3 Sn	5,54	5,68	5,41	5,54	6
	S5 F	6,24	6,23	5,79	6,09	6
	S5 Sn	5,7	5,78	5,41	5,63	6

	S5 Sn L2 APP	3,78	3,82	4,34	3,98	4
	S4 Sn L2 MAN	6,16	6,17	6,05	6,13	6
RB41 High Moisture	S1 F	4,01	4,07	4,24	4,11	4
	S1 Sn	5,1	5,19	5,25	5,18	5
	S3 F	3,79	3,85	4,52	4,05	4
	S3 Sn	6,49	6,45	5,94	6,29	6
	S4 F	4,16	4,11	4,46	4,24	4
	S4 Sn	5,04	5,06	5,04	5,05	5
	S4 Sn L2 APP	4,15	4,2	4,74	4,36	4
	S5 Sn L2 MAN	5,42	5,48	5,66	5,52	6
	RB41 Low Moisture	S1 F	4,78	4,94	5,32	5,01
S1 Sn		5,06	5,08	5,29	5,14	5
S2 F		5,25	5,22	5,11	5,19	5
S2 Sn		6,3	6,23	5,61	6,05	6
S3 F		3,3	3,28	4,22	3,6	4
S3 Sn		4,91	5	5,1	5	5
S4 F		5,44	5,65	5,22	5,44	5
S4 Sn		4,88	4,9	5,02	4,93	5
S5 F		4,99	5,01	4,99	5	5
S5 Sn		5,45	5,6	5,57	5,54	6
S1 Sn L2 App		5,04	5,11	5,29	5,15	5
/						
RA41	S3 F	5,73	5,75	5,41	5,63	6
	S3 Sn	4,18	4,25	4,88	4,44	4
	S4 F	5,57	5,69	5,53	5,6	6
	S4 Sn	6,02	6,17	5,68	5,96	6
	S5 F	3,56	3,61	4,29	3,82	4
	S5 Sn	4,82	4,9	5,16	4,96	5
	S3 Sn L2 App	5,09	5,11	5,41	5,2	5
	S4 Sn L2 Man	3,96	4,07	4,7	4,24	4
RC41	S2 F	3,31	3,36	4,21	3,63	4
	S2 Sn	4,94	5,09	5,18	5,07	5
	S3 F	4,94	4,88	5,17	5	5
	S3 Sn	4,85	4,95	5,18	4,99	5
	S4 F	3,51	3,59	4,29	3,8	4
	S4 Sn	5,53	5,61	5,33	5,49	5
	S3 Sn L2 App	3,92	3,94	4,91	4,26	4
	S1 Sn L2 Man	3,74	3,74	4,6	4,03	4

## Fazit:

- L1: weißes Licht, L2: violettes Licht, L2 führt zu um den Wert  $\sim 1$  unterschiedlichem Pummelwert. Diese Abweichung wird als akzeptabel eingestuft. Die größte Abweichung tritt bei der Serie 1 auf. Die Einstellungen des violetten Lichtes sind dem Anhang (9.4) zu entnehmen.
- Manuelles Pummeln liefert vor allem bei den ersten zwei Serien höhere Pummelwerte. Dies verstärkt die Vermutung, dass die mit dem Pummelapparat aufgebrauchte Kraft zu gering ist.
- Unterschiede zwischen den einzelnen Serien nur gering:
  - Mittelwert Serie 1 Pummelapparat: 5,6, gerundet 6
  - Mittelwert Serie 2 Pummelapparat: 4,6 gerundet 5
  - Mittelwert Serie 3 Pummelapparat: 5,1 gerundet 5
  - Mittelwert Serie 4 Pummelapparat: 5,2 gerundet 5
  - Mittelwert Serie 5 Pummelapparat: 4,6 gerundet 5
- Theoretische Pummeleinstufung: Die einzelnen Serien sollten theoretisch durch unterschiedliche Pummelwerte unterscheidbar sein. Die zu erwartende Rangfolge wäre von hohem zu niedrigem Pummelwert:
  - Serie 4
  - Serie 3
  - Serie 1
  - Serie 2
  - Serie 5

Auch dies verstärkt die Vermutung eines unzureichenden Pummelns, weshalb vereinzelte Proben einem zweiten Pummeldurchlauf unterzogen wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung ist weiter unten dargestellt.

Exemplarische Ergebnisse sind in Abbildung 3-37 dargestellt.

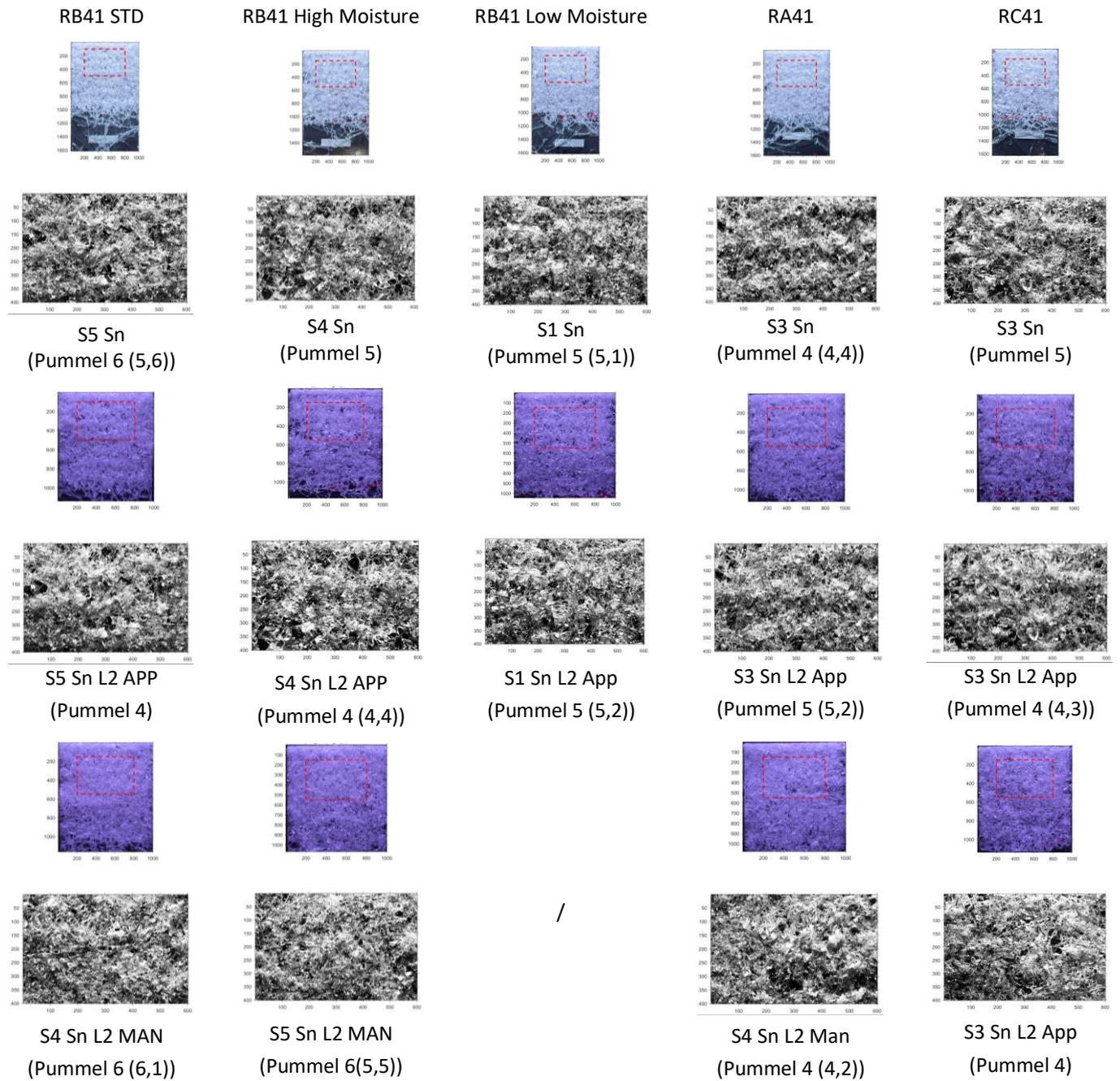


Abbildung 3-37 Zusammenfassung der Ergebnisse – Vergleich unterschiedliche PVB-Probetypen (Versuchsreihe 2)

### Vergleich: visuell zugeordneter Pummelwert und Untersuchung der Massendifferenz vor und nach dem Pummelvorgang

Für alle an den Kleinproben durchgeführten Pummelversuche wurde neben der automatisierten Auswertung auch eine visuelle Beurteilung durchgeführt. Zudem wurde die Masse vor und nach jedem Pummelvorgang dokumentiert und die prozentuale Massendifferenz ausgewertet. In diesem Abschnitt werden die entsprechenden Ergebnisse vorgestellt. Zudem wird untersucht, ob eine Korrelation zwischen Massendifferenz und Pummelwert zu erkennen ist. Die Massendifferenz wird dabei anhand von nachfolgender Gleichung ermittelt:

$$\Delta m = \frac{m_{vP} - m_{nP}}{m_{vP}} 100\%$$

Diese Auswertungsmethode würde eine schnelle und einfache Möglichkeit darstellen das Haftniveau eines Glaslaminates einzustufen. Die Massendifferenzen, sowie der visuell und automatisch ermittelte Pummelwert sind in Tabelle 24 gegeben.

Tabelle 24 Automatisch und visuell zugeordneter Pummelwert und Massendifferenz

	Bildname	Pummel GLCM	Pummel visuell	Massenverlust in %
Manuell – Testperson 1	'1.1_F.JPG'	4,67	7-8	29,58
	'1.1_Sn.JPG'	5,07	8	20,58
	'1.2_F.JPG'	4,98	8-9	26,27
	'1.2_Sn.JPG'	5,23	7	20,81
	'1.3_F.JPG'	5,01	7	28,25
	'1.3_Sn.JPG'	5,57	8-9	20,45
	'1.4_F.JPG'	5,12	6-7	32,45
	'1.4_Sn.JPG'	6,46	8	24,50
	'1.5_F.JPG'	4,21	6-7	30,06
	'1.5_Sn.JPG'	5,26	6-7	24,32
Manuell – Testperson 2	'2.1_F.JPG'	4,71	8	24,01
	'2.1_Sn.JPG'	4,54	-	22,20
	'2.2_F.JPG'	3,88	-	22,19
	'2.2_Sn.JPG'	3,08	-	17,07
	'2.3_F.JPG'	6,31	8	27,44
	'2.3_Sn.JPG'	4,05	7	14,29
	'2.4_F.JPG'	3,86	8	29,01
	'2.4_Sn.JPG'	4,23	8	20,76
	'2.5_F.JPG'	3,55	-	29,51
	'2.5_Sn.JPG'	4,5	7	17,57

Manuell – Testperson 3	'3.1_F.JPG'	6,44	6-7	33,06
	'3.1_Sn.JPG'	5,88	8	19,03
	'3.2_F.JPG'	5,56	6	36,12
	'3.2_Sn.JPG'	6,34	8	24,72
	'3.4_F.JPG'	4,77	-	34,30
	'3.4_Sn.JPG'	6,12	-	24,23
	'3.5_F.JPG'	5,06	6-7	34,18
	'3.5_Sn.JPG'	6,54	6-7	22,88
Pummelapparat (ohne Kraftmessung)	'4.1_F.JPG'	6,57	7	21,29
	'4.1_Sn.JPG'	4,27	7	25,63
	'4.2_F.JPG'	5,80	6	25,71
	'4.2_Sn.JPG'	/	7	27,81
	'4.3_F.JPG'	5,38	6	19,83
	'4.3_Sn.JPG'	4,88	6	26,33
	'4.4_F.JPG'	4,47	6	23,15
	'4.4_Sn.JPG'	2,68	5	29,82
	'4.5_F.JPG'	5,03	7	16,71
	'4.5_Sn.JPG'	2,80	7	28,97
Pummelapparat (mit Kraftmessung)	'5.1_F.JPG'	4,48	7	17,62
	'5.1_Sn.JPG'	4,24	8-9	22,46
	'5.2_F.JPG'	5,18	6-7	31,14
	'5.2_Sn.JPG'	6,11	7	23,08
	'5.3_F.JPG'	4,4	6	33,43
	'5.3_Sn.JPG'	5,32	5-6	27,02
	'5.4_F.JPG'	7,14	6	29,21
	'5.4_Sn.JPG'	3,33	6	21,24
	'5.5_F.JPG'	6,31	6-7	26,80
	'5.5_Sn.JPG'	5,76	6-7	23,74

RB41 STD	S1 F	5,3	7	24,01
	S1 Sn	5,45		19,55
	S3 F	6,02	6	12,91
	S3 Sn	5,54		32,44
	S5 F	6,09	7	24,86
	S5 Sn	5,63		23,08
RB41 High Moisture	S1 F	4,11	5	24,02
	S1 Sn	5,18		20,27
	S3 F	4,05	5	30,84
	S3 Sn	6,29		25,61
	S4 F	4,24	6	24,01
	S4 Sn	5,05		21,51
RB41 Low Moisture	S1 F	5,01	8	24,51
	S1 Sn	5,14		22,29
	S2 F	5,19	7	28,69
	S2 Sn	6,05		18,20
	S3 F	3,6	7	32,43
	S3 Sn	5		19,34
	S4 F	5,44	8	23,55
	S4 Sn	4,93		20,13
	S5 F	5	7	23,81
	S5 Sn	5,54		21,88
RA41	S3 F	5,63	4	23,01
	S3 Sn	4,44		20,90
	S4 F	5,6	5	28,46
	S4 Sn	5,96		20,30
	S5 F	3,82	5	24,86
	S5 Sn	4,96		21,16
RC41	S2 F	3,63	4	30,31
	S2 Sn	5,07		18,49
	S3 F	5	5	34,10
	S3 Sn	4,99		19,51
	S4 F	3,8	5	23,35
	S4 Sn	5,49		19,91

Zwischen der visuellen Zuordnung und automatisierten Pummelzuordnung treten teils große Unterschiede auf. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Proben nicht immer gleichmäßig gepummelt wurden bzw. teilweise noch zu große Bruchstücke an den Proben hafteten (also unzureichend gepummelt) und das Ergebnis der automatisierten Pummelklassifizierung somit vom

gewählten auszuwertenden Probenausschnitt abhängig ist. Abbildungen der untersuchten Probenausschnitte können dem Anhang 9.6 entnommen werden.

Es ist zudem bislang kein Zusammenhang zwischen der Pummelklasse mit der Massendifferenz zu erkennen, siehe Abbildung 3-38. Die Massendifferenzen sollten jedoch weiterhin dokumentiert werden, um den Zusammenhang bei einem größerem Probenumfang erneut zu prüfen. Außerdem sollte die Größe der gepummelten Fläche noch in die Betrachtung miteinbezogen werden.

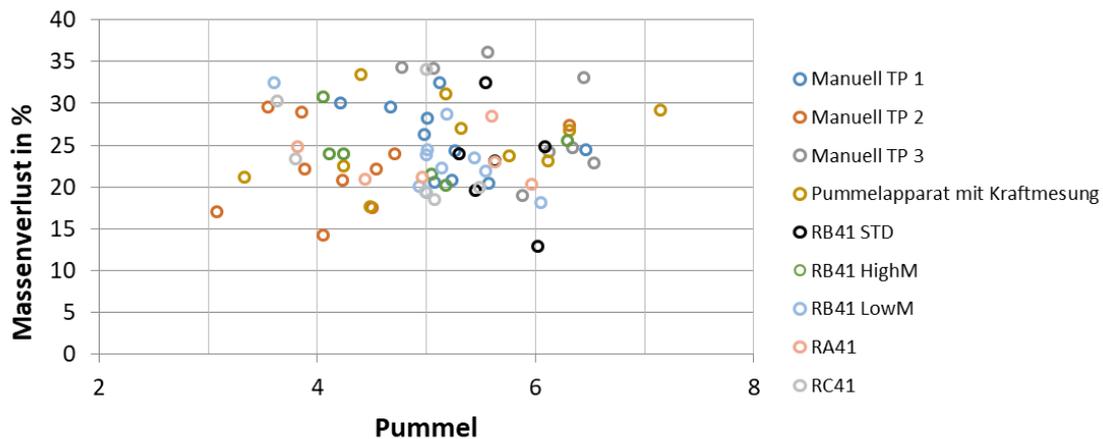


Abbildung 3-38 Prozentuale Massendifferenz in Abhängigkeit des automatisch ermittelten Pummelwertes

### Erneute Bewertung nach Eliminierung nicht pulverisierter Glasbruchstücke

Wie zuvor beschrieben, stellte sich heraus, dass ein Großteil der Proben unzureichend gepummelt wurde. Es befanden sich immer noch kleine Glasbruchstücke auf den Proben, die nicht pulverisiert waren. Dies unterschätzte den Pummelwert, da diese Glasbruchstücke fälschlicherweise als freie Folienfläche interpretiert werden. Daraufhin wurden vereinzelte, bereits gepummelte Proben erneut bei  $-18^{\circ}\text{C}$  gelagert und solange manuell mit dem Hammer bearbeitet, bis die ganze Oberfläche vollständig pulverisiert war. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-39 und Tabelle 25 dargestellt.

Die Ergebnisse liegen nun in der erwarteten Größenordnung. Dies bestätigt zum einen die entwickelte Auswertemethodik, zum anderen wird jedoch deutlich, dass der Pummelvorgang an sich noch dahingehend verbessert werden muss, dass die ganze Glasoberfläche pulverisiert. Der Pummelapparat liefert zurzeit keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Zudem ist anzumerken, dass die Proben nach dem ersten Pummelvorgang bis zum erneuten Pummeln keinem kontrollierten Klima (Aufbewahrung im Büroraum) ausgesetzt waren. Da durch den ersten Pummelvorgang bereits Folienfläche freigelegt wurde, ist davon auszugehen, dass der Feuchtegehalt innerhalb der Folie nicht mehr dem ursprünglichem entsprach. Demnach ist nicht verwunderlich, dass die ermittelten Pummelstufen der Serien 1-3 (STD, HM, LM) zu ähnlichen Ergebnissen führen. Vor allem die Serie LM sollte bei kontrollierter Feuchtigkeit einen höheren Pummelwert besitzen.

Es wird empfohlen die gleichen Serien erneut zu prüfen. Dabei könnten die Proben von erfahrener Pummel-Personal (z.B. bei Folien Herstellern) oder mit dort vorhandenen Pummelmaschinen gepummelt und die Auswertung mittels Texturanalyse wiederholt werden. Die Ergebnisse sind weiter unten dargestellt.

Tabelle 25 Automatisch und visuell zugeordneter Pummelwert nach erneutem Pummeln

Bildname	Pummel aus Kontrast	Pummel aus Korrelation	Pummel aus Homogenität	Mittelwert	Gerundet	Visuelle Einschätzung
RB41 STD S-1 F	6,84	6,89	7,41	7,05	7	6,5
RB41 STD S-1 Sn	>8	>8	>8	>8	8	6,5
HM S-1 F	6,89	6,99	6,94	6,94	7	7
HM S-1 Sn	5,90	5,99	5,90	5,93	6	6
LM S-3 F	5,71	5,82	5,91	5,81	6	6,5
LM S-3 Sn	5,50	5,56	5,75	5,60	6	6,75
RA S-5 F	6,68	6,73	6,98	6,80	7	8
RA S-5 Sn	7,54	7,57	>8	~8	8	7,5
RC S-4 F	6,53	6,54	6,93	6,67	7	6,5
RC S-4 Sn	4,36	4,38	4,93	4,56	5	5

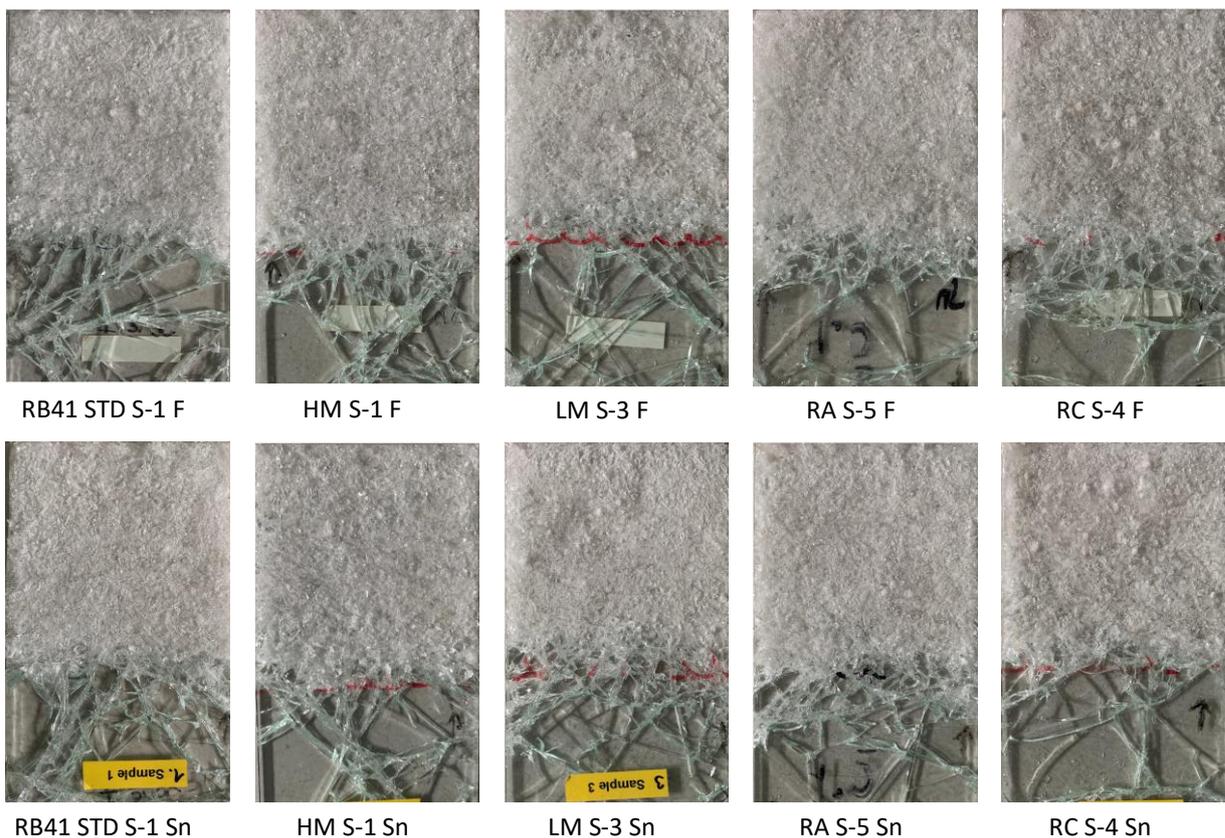


Abbildung 3-39 Bilder nach erneutem Pummeln

### 3.2.4 Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen

- Masterthesis TU Darmstadt: Tuong An Nguyen 2019:  
Untersuchungen zur experimentellen Umsetzung und Auswertung des „Pummeltests“ als Haftprüfung für Verbundsicherheitsglas
- Masterthesis TU Darmstadt: Fabian Rieß 2020:  
Untersuchungen zur Haftung und zum Resttragverhalten von gebrochenem Verbundsicherheitsglas
- Journal Paper in Glass Structures and Engineering:  
Schuster, M., Schneider, J. & Nguyen, T.A. Investigations on the execution and evaluation of the Pummel test for polyvinyl butyral based interlayers. *Glass Struct Eng* (2020).  
<https://doi.org/10.1007/s40940-020-00120-y>

### 3.3 Pummeltest an Großproben

Hintergrund dieser Versuchsreihe ist es gezielt die Korrelation zwischen TCB-Versuch zur Charakterisierung der Resttragfähigkeit und Pummeltest zu untersuchen. Aus diesem Grund werden die Pummeltests an den Versuchsscheiben der TCB-Versuche durchgeführt. Das bedeutet, dass die Abmessungen von den im vorherigen Kapitel definierten Abmessungen abweichen. Des Weiteren wird auch die Durchführung der Tests manuell durchgeführt, nachdem die größeren Scheibendicken ein "Pummeln" mit dem Pummelapparat nicht ermöglichen.

#### 3.3.1 Zielsetzung

Ziel dieser Versuche ist es den Ergebnissen aus den TCB-Großteilversuchen entsprechende Pummelwerte zuzuweisen und dadurch eine Verbindung zwischen beiden Tests herstellen zu können. Es sollen letztlich aus dem Haftgrad, der aus den Pummeltests bestimmt wird, Rückschlüsse auf die Resttragfähigkeit gezogen werden können.

#### 3.3.2 Versuchs- und Probekörperübersicht

Alle Versuche wurden an Probekörpern symmetrischer VSG-Aufbauten mit Zwischenschichtdicken von 0.76 mm vom Typ Trosifol Clear der Firma *kuraray* durchgeführt.

Tabelle 26 Versuchsmatrix Pummeltest an Großproben

Anzahl [-]	Glasdicke [mm]	Haftgrad	Prüftemperatur [°C]	Lagerungstemperatur [°C]
4	4	Mittel (kurz MR bzw. BG R15)	23	-18
4	8	Mittel (kurz MR bzw. BG R15)	23	-18
3	6	Niedrig (kurz LR bzw. BG R10)	23	-18
5	6	Mittel (kurz MR bzw. BG R15)	23	-18
4	6	Hoch (kurz NR bzw. BG R20)	23	-18

#### 3.3.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Die im TCB-Versuch geprüften Scheiben wurden nach dem Versuch im Rissbereich getrennt. Eine Hälfte wurde für die hier beschriebenen Pummelversuche verwendet, die andere Hälfte wurde für die im nächsten Kapitel beschriebenen Haftscherversuche verwendet. Die Versuche fanden im Labor des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München statt.

Für die Prüfung wurde ein Gestell aus Stahl konstruiert, damit jede Scheibe unter annähernd gleichen Bedingungen geprüft werden konnte. Das Pummeln der Scheiben erfolgte mit einem Schlosserhammer mit einem Kopfgewicht von 0,5 kg. Jede Scheibe wurde vom gleichen Prüfer gepummelt und bewertet. Vor der Prüfung wurden die Probekörper für mind. 24 h bei -18 °C

gelagert. Das Pummeln der Scheiben erfolgte auf die Luftseite der Scheiben auf einer Fläche von ca. 120 mm x 240 mm. Nach dem Pummeln wurden die Scheiben unter gleich bleibenden Bedingungen fotografiert, wobei der Hintergrund (schwarz und grün) und die Belichtung („hell“ und „dunkel“) variiert wurden. Für jeden Hintergrund und jede Belichtung erfolgte eine Bewertung durch den Prüfer und eine automatisierte Auswertung.

### 3.3.4 Versuchsauswertung

Tabelle 27 fasst die Ergebnisse der automatisierten Pummelklassifizierung an den Großproben zusammen. Abbildungen der untersuchten Probenausschnitte können dem Anhang 9.6 entnommen werden.

Tabelle 27 Großproben: Automatisierte Pummelklassifizierung mit der neuen Pummelskala, 100 pixels/cm, Offset Distant 10, Bildausschnitt 6x4 cm

	Bildname	Pummel aus Kontrast	Pummel aus Korrelation	Pummel aus Homogenität	Mittelwert	Gerundet
2x4mm_23Grad_MR_PK1	grün_dunkel	3,59	3,56	4,13	3,76	4
	grün_hell	4,76	4,84	5,11	4,9	5
	schwarz_dunkel	3,72	3,73	4,3	3,92	4
	schwarz_hell	4,72	4,78	5,07	4,86	5
2x4mm_23Grad_MR_PK2	grün_dunkel	5,49	5,53	5,34	5,45	5
	grün_hell	7,18	7,15	6,39	6,91	7
	schwarz_dunkel	5,9	5,92	5,56	5,79	6
	schwarz_hell	7,14	7,1	6,51	6,92	7
2x4mm_23Grad_MR_k_PK1	grün_dunkel	4,32	4,31	4,8	4,48	4
	grün_hell	5,81	5,82	5,64	5,76	6
	schwarz_dunkel	3,88	3,81	4,48	4,06	4
	schwarz_hell	5,79	5,81	5,68	5,76	6
2x4mm_23Grad_MR_k_PK2	grün_dunkel	2,73	2,73	3,4	2,95	3
	grün_hell	3,92	3,94	4,23	4,03	4
	schwarz_dunkel	3,05	3,01	3,54	3,2	3
	schwarz_hell	3,59	3,6	3,86	3,68	4

2x6mm_23Grad_ LR_PK1	grün_dunkel	<2	<2	2,82	/	/
	grün_hell	2,83	2,84	3,75	3,14	3
	schwarz_dunkel	2,94	2,93	3,75	3,21	3
	schwarz_hell	<2	<2	3,07	/	/
2x6mm_23Grad_ LR_PK2	grün_dunkel	2,79	2,78	3,78	3,12	3
	grün_hell	4,29	4,23	4,63	4,38	4
	schwarz_dunkel	2,11	2,11	3,36	2,53	3
	schwarz_hell	3,52	3,53	4,33	3,79	4
2x6mm_23Grad_ LR_PK3	grün_dunkel	<2	<2	2,66	/	/
	grün_hell	2,96	2,98	3,81	3,25	3
	schwarz_dunkel	<2	<2	<2	<2	<2
	schwarz_hell	2,78	2,74	3,84	3,12	3
2x6mm_23Grad_ MR_PK1	grün_dunkel	2,2	2,17	3,02	2,46	2
	grün_hell	5,39	5,38	4,99	5,25	5
	schwarz_dunkel	3,05	3,04	3,51	3,2	3
	schwarz_hell	5,78	5,82	5,33	5,64	6
2x6mm_23Grad_ MR_PK2	grün_dunkel	3,86	3,88	4,5	4,08	4
	grün_hell	6,81	6,79	6,15	6,58	7
	schwarz_dunkel	5,01	5,07	5,24	5,11	5
	schwarz_hell	6,8	6,82	6,14	6,59	7
2x6mm_23Grad_ MR_PK3	grün_dunkel	5,1	5,05	4,91	5,02	5
	grün_hell	7,24	7,21	6,13	6,86	7
	schwarz_dunkel	3,69	3,67	4,08	3,81	4
	schwarz_hell	7,16	7,1	6,27	6,84	7
2x6mm_23Grad_ MR_PK4	grün_dunkel	4,7	4,66	4,96	4,77	5
	grün_hell	6,88	6,89	6,16	6,64	7
	schwarz_dunkel	5,27	5,31	5,3	5,29	5
	schwarz_hell	6,93	6,93	6,14	6,67	7
2x6mm_23Grad_ MR_PK5	grün_dunkel	3,6	3,58	3,99	3,72	4
	grün_hell	6,07	6,11	5,26	5,81	6
	schwarz_dunkel	2,47	2,44	3,35	2,75	3
	schwarz_hell	6,36	6,36	5,57	6,1	6
2x6mm_23Grad_ _NR_PK1	grün_dunkel	4,91	4,86	4,75	4,84	5
	grün_hell	6,47	6,45	5,57	6,16	6
	schwarz_dunkel	4,48	4,49	4,49	4,49	4
	schwarz_hell	6,67	6,63	5,62	6,31	6

2x6mm_23Grad_ NR_PK2	grün_dunkel	4,36	4,4	4,78	4,51	5
	grün_hell	7,37	7,31	6,77	7,15	7
	schwarz_dunkel	5,31	5,33	5,28	5,31	5
	schwarz_hell	7,26	7,17	6,24	6,89	7
2x6mm_23Grad_ NR_PK3	grün_dunkel	5,96	6,09	5,49	5,85	6
	grün_hell	7,48	7,47	6,28	7,08	7
	schwarz_dunkel	6,44	6,57	5,72	6,24	6
	schwarz_hell	7,61	7,66	6,92	7,4	7
2x6mm_23Grad_ NR_PK4	grün_dunkel	<2	<2	2,48	/	/
	grün_hell	3,74	3,76	3,98	3,83	4
	schwarz_dunkel	2,38	2,36	3,18	2,64	3
	schwarz_hell	4,14	4,08	4,23	4,15	4
2x8mm_23Grad_ MR_PK1	grün_dunkel	<2	<2	<2	<2	<2
	grün_hell	3,74	3,75	3,37	3,62	4
	schwarz_dunkel	<2	<2	2,06	/	/
	schwarz_hell	3,85	3,84	3,39	3,69	4
2x8mm_23Grad_ MR_PK2	grün_dunkel	<2	<2	2,75	/	/
	grün_hell	2,16	2,14	3,22	2,51	3
	schwarz_dunkel	<2	<2	2,81	/	/
	schwarz_hell	2,08	2,15	3,25	2,49	2
2x8mm_23Grad_ MR_k_PK1	grün_dunkel	2,42	2,47	3,29	2,73	3
	grün_hell	4,78	4,91	4,59	4,76	5
	schwarz_dunkel	3,06	3,06	3,57	3,23	3
	schwarz_hell	5,07	5,07	4,78	4,97	5
2x8mm_23Grad_ MR_k_PK2	grün_dunkel	2,7	2,73	3,46	2,96	3
	grün_hell	5,71	5,8	4,85	5,45	5
	schwarz_dunkel	2,5	2,58	3,46	2,85	3
	schwarz_hell	5,8	5,93	5,04	5,59	6

## Fazit:

Zunächst konnte festgestellt werden, dass sich sowohl bei der subjektiven Bewertung durch den Prüfer, wie auch bei der maschinellen Auswertung ein Unterschied im Pummelwert auf Grund unterschiedlicher Belichtung und Hintergrunde ergab. Zum einen führte eine hellere Belichtung zu einem etwas höherem Pummelwert als eine schwache Belichtung, wobei der Unterschied in der Regel 1-2 Pummelwerten entsprach. Nachfolgend werden daher nur „grün\_hell“ und „schwarz\_hell“ bewertet.

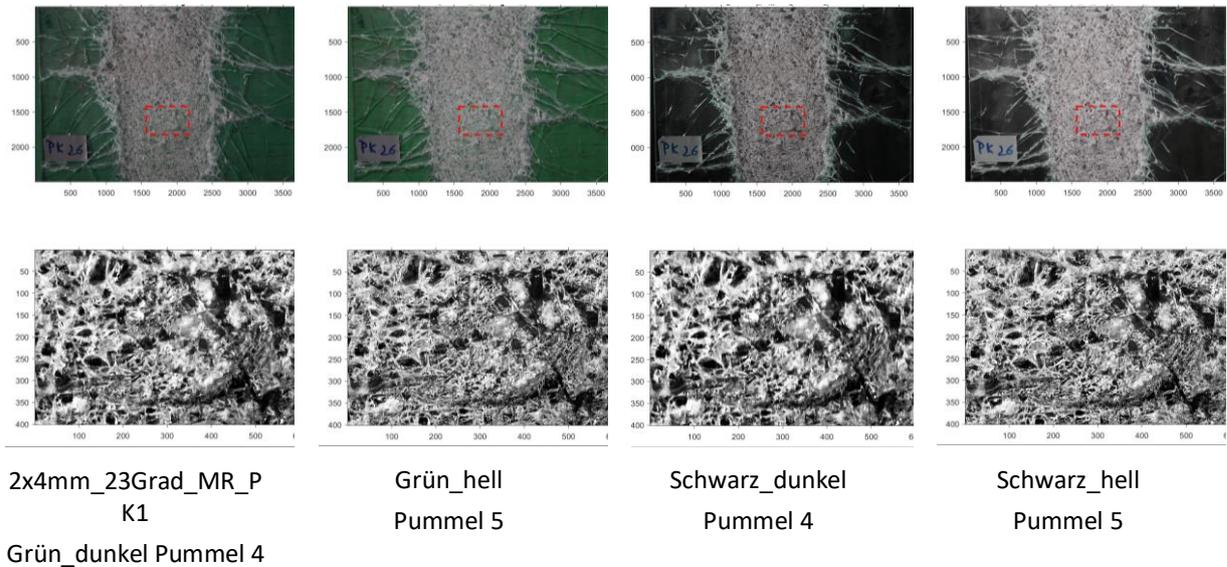


Abbildung 3-40 Exemplarische Ergebnisse für unterschiedliche Lichtverhältnisse

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass mit steigender Glasdicke der Pummelvorgang und die Bewertung der Probekörper schwieriger wurde. Da mehr Energie notwendig war, um das Glas mit dem Hammer zu brechen, ist die Zwischenschicht teilweise eingerissen. Zusätzlich bildeten sich große Glasbruchstücke, welche sich nicht weiter zerstören ließen, ohne ein Reißen der Zwischenschicht hervorzurufen, was in teilweise sehr unregelmäßigen Pummelbildern resultierte, siehe Abbildung 3-42 und Abbildung 3-41. Die Plausibilität der Ergebnisse der automatisierten Pummelklassifizierung ist daher mittels ausgewerteten Probenausschnitts zu prüfen.

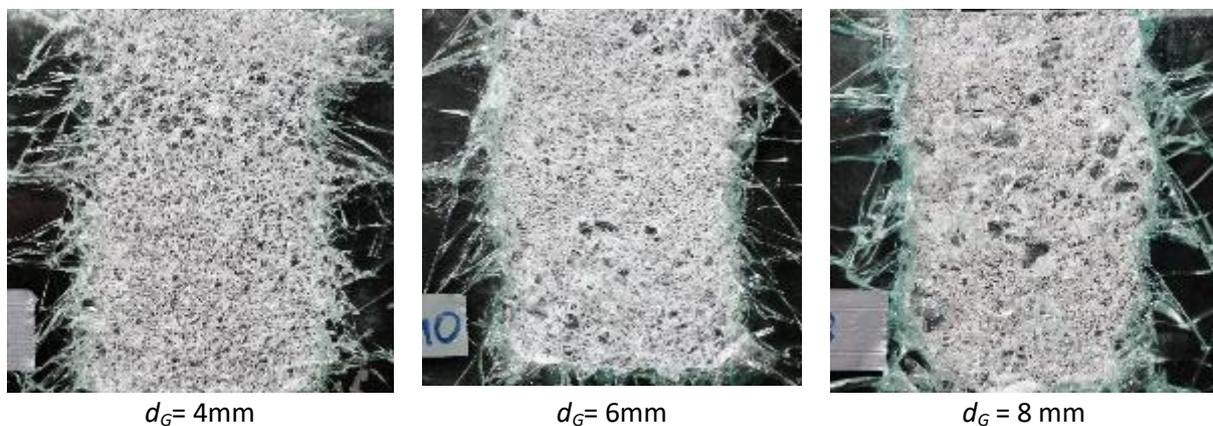


Abbildung 3-41 Pummelerggebnisse für verschiedene Glasdicken bei gleichem Haftgrad (MR)

Abbildung 3-42 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der automatisierten Pummelklassifizierung für Proben unterschiedlicher Glasstärken aber gleicher Zwischenschicht (MR) und Temperatur (23°C). Der mittlere Pummelwert beträgt bei einer Glasstärke von:

- 4mm: Mittelwert: 5,5, gerundet 6
- 6mm: Mittelwert: 6,5, gerundet 7
- 8mm: Mittelwert: 4,3 gerundet 4

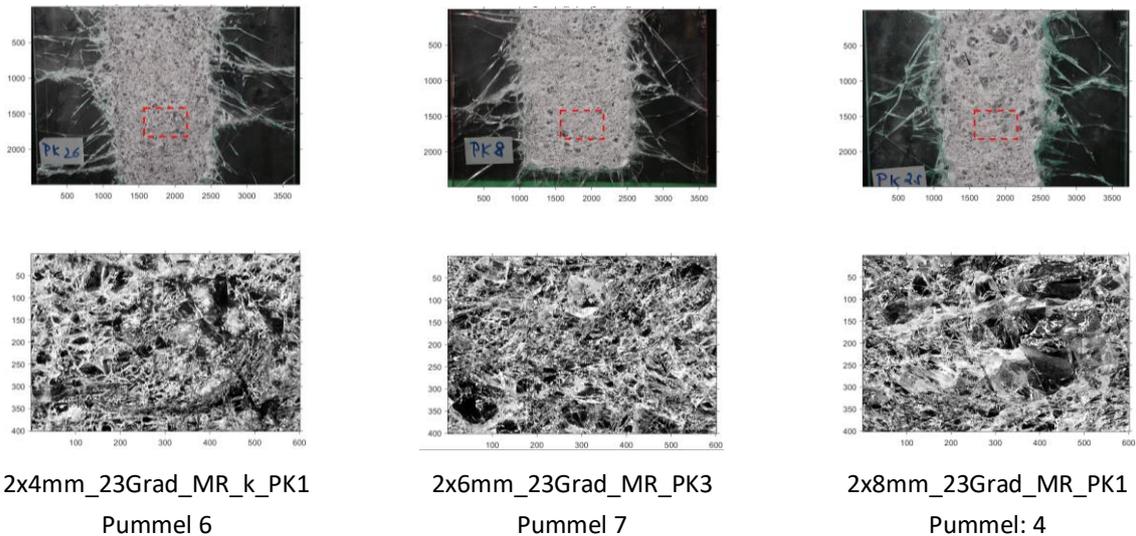


Abbildung 3-42 Exemplarische Ergebnisse für unterschiedliche Glasdicken

In Bezug auf den Haftgrad konnte ein deutlicher Unterschied zwischen dem niedrigen (LR) und den höheren Haftgraden festgestellt werden. Bei den höheren Haftgraden (MR und NR) wurden im Mittel keine Unterschiede im Pummelwert erfasst. In Abbildung 3-43 ist beispielhaft ein Prüfkörper mit niedrigem und einer mit hohem Haftgrad, beide mit einer Glasdicke von 6 mm, dargestellt. Teilweise konnte innerhalb eines Probekörpers eine große Varianz in der Haftung der Glasbruchstücke festgestellt werden, vgl. Abbildung 3-43 (rechts).

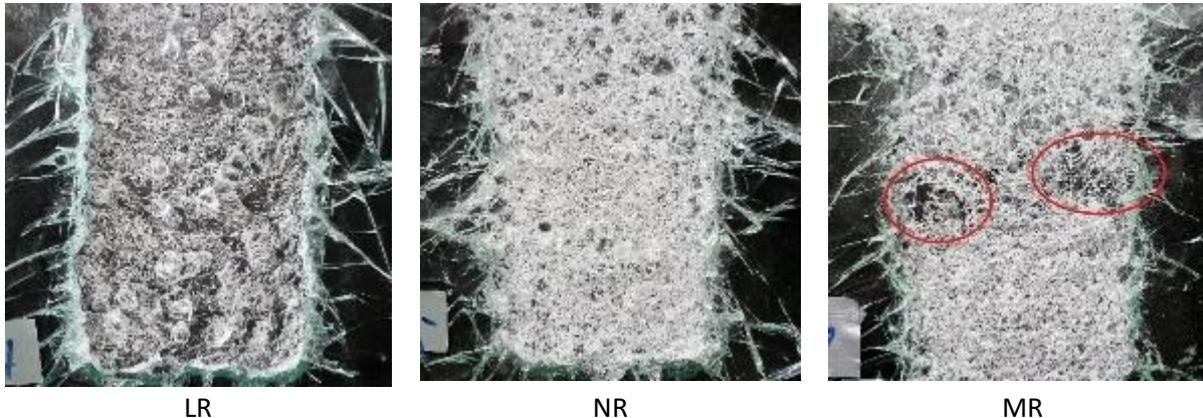
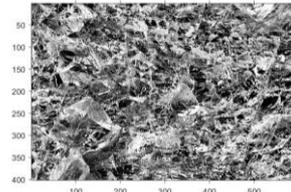
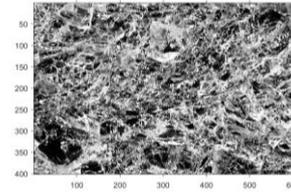
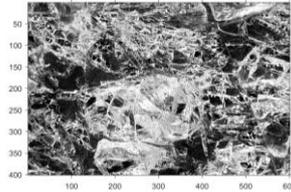
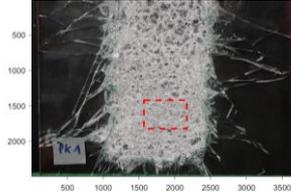
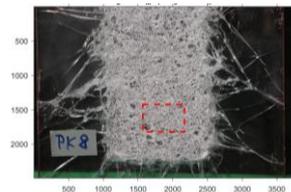
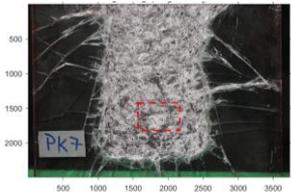


Abbildung 3-43 Pummelergebnis für einen niedrigen und hohen Haftgrad (links / mitte), Streuung des Pummelergebnisses im Probekörper (rechts), Glasdicke jeweils 6 mm

Abbildung 3-44 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der automatisierten Pummelklassifizierung für Proben mit unterschiedlichen Haftgraden jedoch gleicher Glasstärke (6mm) und Temperatur (23°C). Dabei wurden die „schwarz\_helle“ Bilder verwendet. Die mittleren Pummelwerte lauten:

- LR: niedrige Haftung. Mittelwert: 3,4, gerundet 3
- MR und NR: höhere Haftung als LR, kaum Unterscheide zwischen MR und NR
- Mittelwert MR: 6,5, gerundet 7
- Mittelwert NR: 6



2x6mm\_23Grad\_LR\_PK3  
Pummel 3

2x6mm\_23Grad\_MR\_PK3  
Pummel 7

2x6mm\_23Grad\_NR\_PK3  
Pummel 7

Abbildung 3-44 Exemplarische Ergebnisse für unterschiedliche Haftgrade

### 3.4 Haftscherversuche

#### 3.4.1 Zielsetzung

Wie in Kapitel 2.2.3 ist der Haftscherversuch neben dem Pummelversuch ein mögliches Prüfverfahren, um die Haftung zwischen Glas und Zwischenschicht zu charakterisieren. Im Gegensatz zum Pummelversuch liefert der Haftscherversuch ein konkretes quantifiziertes Ergebnis in Form der maximalen Haftscherspannung, welches nicht durch die Subjektivität des Prüfers beeinflusst werden kann. In der Regel wird dieser Versuch in der Produktionskontrolle als Druck-Scherversuch durchgeführt (vgl. [8]). Dies hat den Nachteil, dass die Materialbeanspruchung im TCB-Versuch im Bereich des Rissversatzes nicht abgebildet werden kann, da dort keine zusätzliche Druckbeanspruchung vorliegt. Daher wurde ein Scherversuch konzipiert, bei dem der Probekörper möglichst eine reine Schubbeanspruchung erfährt. Orientiert wurde sich dabei am shear-pancake-test aus [75]. In Abbildung 3-45 sind der schematische und der tatsächliche Versuchsaufbau dargestellt. Im Gegensatz zum Druck-Scherversuch hat dieser Aufbau den Nachteil, dass durch die Exzentrizität zwischen Lasteinleitung und Lagerpunkt ein zusätzliches Moment einwirkt, welches sich nicht ohne weiteres eliminieren lässt. Da hier jedoch ein Vergleich zwischen den verschiedenen Probekörpern angestellt werden soll und jeder Versuch in der gleichen Versuchseinrichtung unter gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt wird, kann dieser Umstand vernachlässigt werden.

#### 3.4.2 Versuchsübersicht

Analog zu den Pummeltests an Großproben (vgl. 3.3) wurden auch die Probekörper für die Haftscherversuche aus den TCB-Probekörpern gewonnen.

Die Probekörper wurden aus der jeweiligen Scheibenhälfte, welche nicht für den Pummelversuch verwendet wurde, mit einem Diamantbohrer ausgebohrt. Aus jeder Scheibe wurden vier Scherprobekörper entnommen und geprüft. Der Durchmesser der Probekörper betrug ca. 46 mm.

Tabelle 28 Versuchsbericht Haftscherversuch

Anzahl [-]	Glasdicke [mm]	Haftgrad	Temperatur [°C]
12	6	Niedrig (LR)	23
26	6	Mittel (MR)	23
25	6	Hoch (NR)	23
12	6	Mittel (MR)	30
12	6	Mittel (MR)	40
27	8	Mittel (MR)	23

### 3.4.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Die im Versuchsaufbau (vgl. Abbildung 3-45) erkennbaren Schrauben dienen lediglich zur Lagesicherung des Probekörpers. Sie wurden nur lose angezogen und sind an einer Seite vertikal frei verschiebbar.

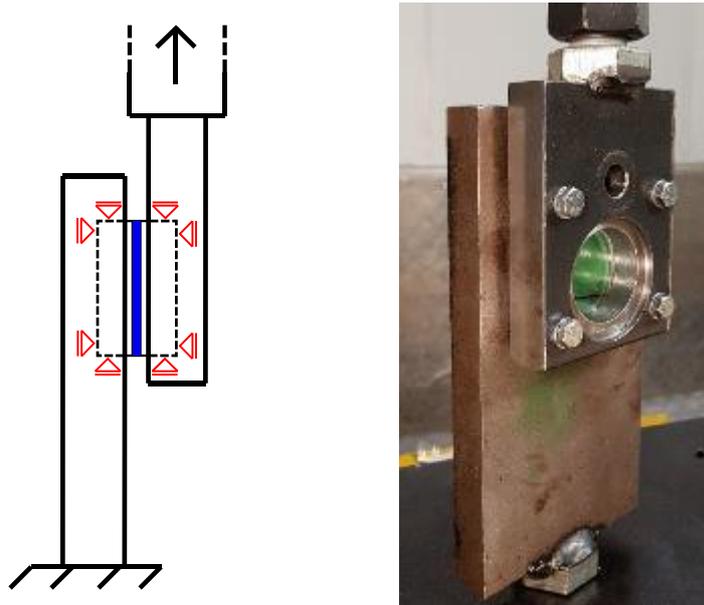


Abbildung 3-45 Schematische Darstellung des Scherversuchs (links), tatsächlicher Versuchsaufbau (rechts)

Der Versuch wurde lagegeregelt mit einer Traversengeschwindigkeit von 0,5 mm/min durchgeführt, in Anlehnung an die Prüfnorm zur Bestimmung des Scherverhaltens von Verklebungen [76]. Die Scherversuche wurden nur an den Scheiben mit 6 und 8 mm dickem Glas durchgeführt. Um beobachten zu können, ob es beim Scherversuch auch zur Delamination in der Fläche auf Grund von reinem Schub kommt, wurden die Probekörperhalter so modifiziert, dass eine freie Sicht auf den Großteil der Scherfläche möglich war. Die Temperatur konnte auf eine Genauigkeit von  $\pm 0,5$  °C geregelt werden. Weitere Details zur Anfertigung und genauen Geometrie der einzelnen Probekörper sowie zum Versuchsaufbau- und der Durchführung können [77] entnommen werden.

### 3.4.4 Versuchsauswertung

Auf Grund von Vorschädigungen mancher Probekörper durch das Ausbohren versagten einige Probekörper durch einen vorzeitigen Glasbruch. Diese Probekörper wurden nicht in die Auswertung mit einbezogen. Mit steigendem Haftgrad versagten die Probekörper schlagartig mit einem massiven Glasbruch, wenn die Zwischenschicht zu delaminieren begann (vgl. Abbildung 3-46 links). Für einen geringen Haftgrad bzw. Versuche bei hohen Temperaturen delaminierte die Zwischenschicht ohne einen Glasbruch hervorzurufen (vgl. Abbildung 3-46 Mitte). In Tabelle 29 sind die Ergebnisse der Haftscherversuche hinsichtlich des Mittelwerts und Standardabweichung der maximalen Schubspannung  $\tau_{max}$  aller getesteter Probekörper der jeweiligen

Parametereinstellung dargestellt. Die Probekörperanzahl (PK-Anzahl) entspricht dabei den ohne vorzeitigen Glasbruch auswertbaren Versuchen.



Abbildung 3-46 Probekörper mit hohem (links) und niedrigem (mitte) Haftgrad nach Versuchsende; Delaminationsblasen innerhalb der Scherfläche im Haftscherversuch mit niedrigem Haftgrad

Tabelle 29 Versuchsergebnisse der Haftscherversuche

Anzahl [-]	Glasdicke [mm]	Haftgrad	Temp. [°C]	$\bar{x}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	s [N/mm <sup>2</sup> ]	s/ $\bar{x}$ [%]
12	6	Niedrig (LR)	23	5,97	1,36	22,8
26	6	Mittel (MR)	23	9,75	1,33	13,6
25	6	Hoch (NR)	23	10,90	2,31	21,2
12	6	Mittel (MR)	30	5,45	1,56	28,6
12	6	Mittel (MR)	40	4,00	1,26	31,5
27	8	Mittel (MR)	23	9,00	1,46	16,2

Eine Darstellung der Schubspannung  $\tau$  über die Gleitung  $\gamma$  erfolgt für repräsentative Probekörper in Abbildung 3-47. Eine detaillierte Darstellung aller Versuche findet sich in [77]. Wie beim Pummelversuch lässt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der Haftschersfestigkeit eines niedrigen Haftgrades (*R10/LR*) und der höheren Haftgrade feststellen, wobei der Unterschied zwischen dem mittleren und hohen Haftgrad gering ist. Hier ist allerdings anzumerken, dass beim hohen Haftgrad nicht bei jedem Versuch eindeutig erkennbar war, ob das Versagen durch das Einsetzen der Delamination oder einem vorzeitigen Glasbruch einsetzte. Die Ergebnisse der Versuche mit dickerem Glas (8 mm) deuten auf eine etwas geringere Haftung hin. Für höhere Temperaturen nimmt die Schubsteifigkeit schon im Anfangsbereich massiv ab. Die maximale Gleitung ist etwas höher als bei den Versuchen bei 23 °C, die maximale Haftscherspannung wird mehr als halbiert.

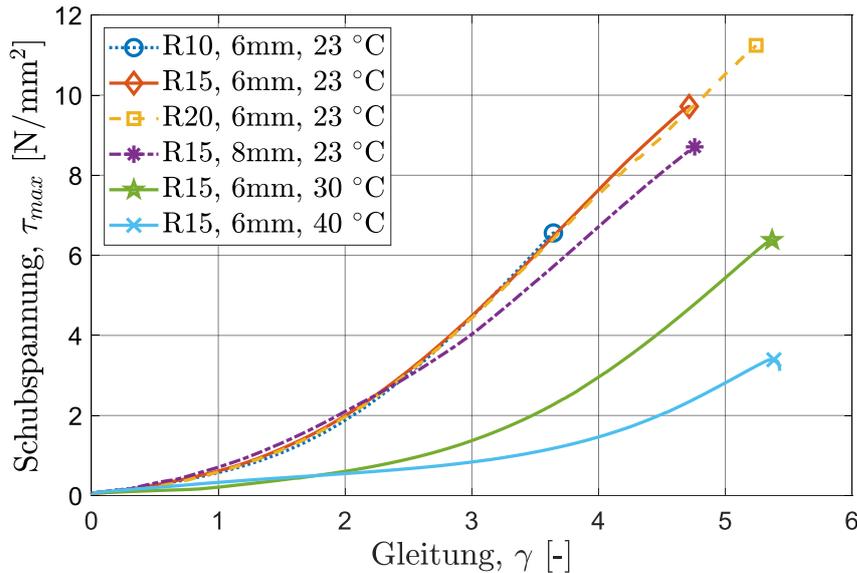


Abbildung 3-47 Repräsentative Versuchsergebnisse des Scherversuchs für die untersuchten Parameter

Bei hohen Temperaturen bzw. einem niedrigem Haftgrad konnte während des Versuchs eine beginnende Delamination innerhalb der Scherfläche festgestellt werden (vgl. Abbildung 3-46 rechts). Dies zeigt, dass ein reiner Schubspannungszustand zu einer Delamination der Zwischenschicht führen kann. Dass dieser Effekt im Haftscherversuch nicht bei allen Versuchskörper zu beobachten war, lässt sich vermutlich durch die zu hohe Traversengeschwindigkeit erklären.

#### 4 AP3: Versuche zur Charakterisierung der Resttragfähigkeit

Wie eingangs beschrieben, ist die Resttragfähigkeit von Glasbauten ein aktuell vielbeachtetes Thema. Ein Nachweis der Resttragfähigkeit ist jedoch aktuell nur über aufwendige Bauteile möglich. Ziel der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Versuchskonzepte ist es, bereits bei der Produktion erste Aussagen über die Resttragfähigkeit eines Glasaufbaus treffen zu können. In Kombination mit der Ermittlung der entsprechenden Haftung soll schließlich ein Resttragfähigkeitsbeurteilung stattfinden. Es werden dafür der TCB-Test und der Pendelschlagversuch verwendet. Die Wahl fiel auf diese beiden Versuche, einerseits, weil sie leicht durchzuführen sind, andererseits, weil die meisten Hersteller Pendelschlag und 4-Punkt-Biege Versuchsstände bereits besitzen.

In diesem Kapitel soll die Grundlage für einen Vorschlag zur Normung der Resttragfähigkeit geschaffen werden. Für die gewählten Tests, mithilfe derer die Resttragfähigkeit unter statischer (TCB-Test) und dynamischer Einwirkung (Pendelschlagversuch) untersucht werden kann, gilt es entsprechende Parameter und Randbedingungen zu definieren. Es werden dafür Versuche mit variierten Einflussparametern durchgeführt und diese entsprechend bewertet.

#### 4.1 TCB – Test: Großteilversuche

Im Kontext der Resttragfähigkeit, muss man zwischen fein- und grobbrechenden Gläsern unterscheiden. Die höhere Resttragfähigkeit besitzen grobbrechende Gläser, weshalb diese Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sind. Nachdem das Bruchbild von grobbrechendem Glas stochastisch und nicht vorhersehbar ist, wird im Folgenden der ungünstigste, mögliche Fall behandelt. Es handelt sich dabei um ein zweiseitig gelagertes System mit einem koinzidenten Riss beider Scheiben des VSG, in Feldmitte. Um die Resttragfähigkeit entsprechend quantifizieren zu können, genügt es den ungünstigsten Fall zu charakterisieren. In Abbildung 4-1 ist der Aufbau des TCB-Tests dargestellt.

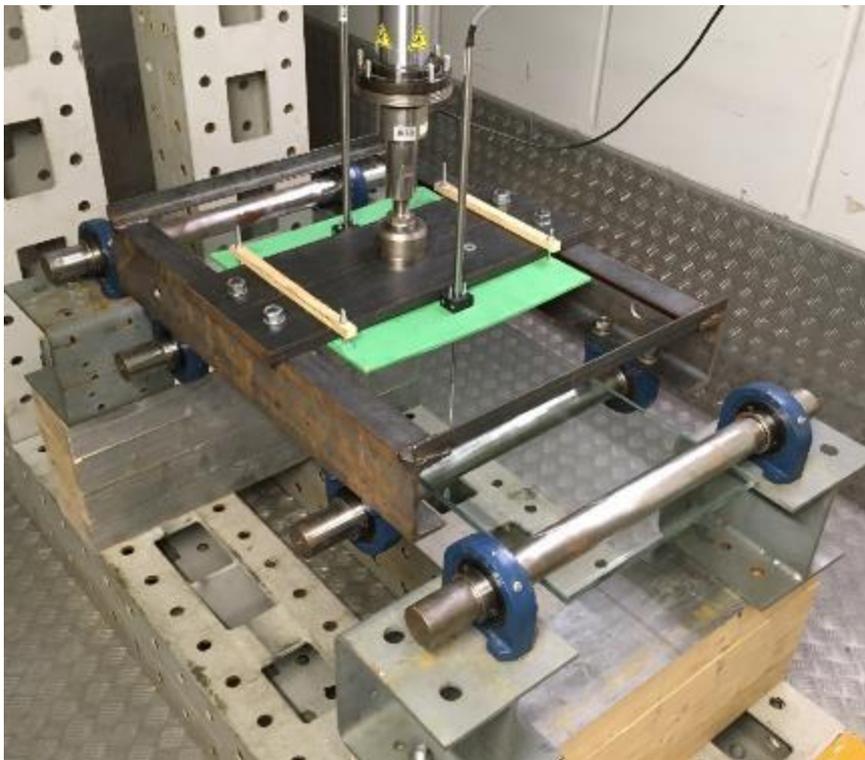


Abbildung 4-1 Versuchsaufbau TCB-Test

##### 4.1.1 Zielsetzung

Das Ziel ist die Schaffung eines einfachen Versuchs zur Quantifizierung der Resttragfähigkeit unter statischer Einwirkung. Dazu wurde analog zu [78] als Probekörper (PK) ein Verbundglas mit den Abmessungen von 1.100 mm x 360 mm gewählt. Als Versuchsaufbau wurde analog zu [3] ein modifizierter Vier-Punkt-Biege-Versuchsaufbau konzipiert, in dem das Verbundglas nach oben gezogen wird, um Einflüsse aus Eigengewicht zu eliminieren. Der Versuchsaufbau mit Abmessungen ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Im Gegensatz zu den Versuchen in [3] wurden die Versuche als Kriechversuch durchgeführt, da so das Tragverhalten einer gebrochenen Scheibe unter konstanter Belastung abgebildet werden kann, was einem realistischen Lastszenario am ehesten entspricht. Die Versuche innerhalb dieses Kapitels wurden an Standard-PVB mit unterschiedlichen Haftgraden der Firma *kuraray* (Typ *Trosifol Clear*) durchgeführt.

#### 4.1.2 Probekörperübersicht

Alle im Rahmen von AP3 getesteten VSG-Scheiben, im Folgenden als Probekörper (PK) bezeichnet, bestehen aus zwei Scheiben und einer Zwischenschicht der Nenndicke 0.76 mm und haben einen symmetrischen Aufbau.

Die Probekörper wurden unter gleichen Bedingungen bei der Firma *kuraray (Trosifol Werk)* so laminiert, dass die Zwischenschicht immer zu einer Luft- und einer Zinnseite der jeweiligen Gläser angeordnet war. Dabei wurden die PK in mehreren Chargen produziert und geliefert.

Die Glasdicke der Einzelscheiben der PK mit der Konfiguration 6/0.76/6 wurden vor dem Laminieren im Werk an sechs Stellen bestimmt. Im Labor des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München wurde anschließend mit einer digitalen Schieblehre die Gesamtdicke der Probekörper an vier Stellen gemessen und darüber die resultierende Zwischenschichtdicke bestimmt.

Anschließend wurde je eine Statistik für die Dicke Zwischenschichten und die Dicke der Einzelgläser erstellt. Die entsprechenden, wesentlichen statistischen Kenngrößen (Mittelwert, Standardabweichung, Min-Wert, Max-Wert) sind Tabelle 30 zu entnehmen. An die Verteilung der entsprechenden Messgrößen werden anschließend Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen gefittet und die sich ergebenden kumulierten Verteilungsfunktionen sowie die Abweichung zwischen Messwerten und entsprechender Funktion dargestellt (Probability-Plot), vgl. Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit einer ähnlichen Studie [33] zu ermöglichen, werden die selben Verteilungsfunktionen zu Grunde gelegt. Die ermittelten Parameter der Verteilungsfunktionen sind in [33] aufgeführt. Die Bezeichnung der Parameter orientiert sich dabei an der Nomenklatur der verwendeten Auswertesoftware *MATLAB (R2018v)*.

Tabelle 30 Statistische Auswertung der Probekörper der TCB-Versuche in Bezug auf die Glas- und Zwischenschichtdicken

Parameter	$d_G$ [mm]	$d_F$ [mm]
PK Anzahl, n	86	43
Mittelwert, $\bar{x}$	5.863	0.743
St.abw., s	0.032	0.034
$d_{Min}$	5.816	0.667
$d_{Max}$	5.950	0.833

Tabelle 31 Parameter der Verteilungsfunktionen für die Glasdicke und Zwischenschichtdicke

	Glasdicke				Zwischenschichtdicke			
	Burr	Normal	Logistic	t-Location-Scale	Burr	Normal	Logistic	t-Location-Scale
$\alpha$	5,826	-	-	-	0,7203	-	-	-
$c$	1706,7	-	-	-	62,24	-	-	-
$k$	0,0909	-	-	-	0,4213	-	-	-
$\mu$	-	5,863	5,860	5,863	-	0,7426	0,740	0,7411
$\sigma$	-	0,0316	0,0183	0,0314	-	0,0336	0,0186	0,0305
$v$	-	-	-	3,92E+06	-	-	-	11,8185

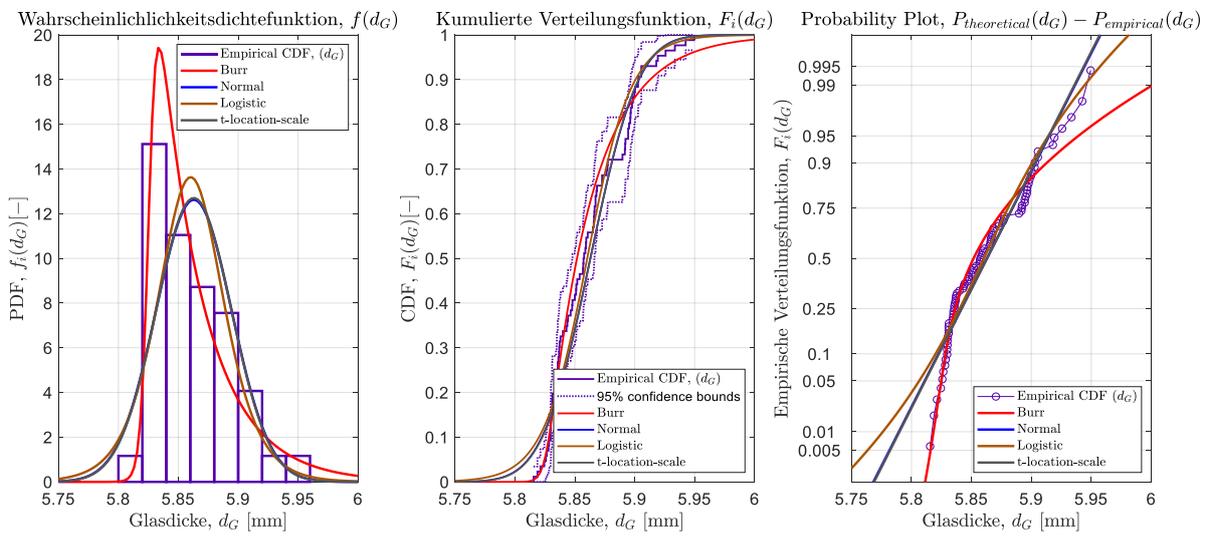


Abbildung 4-2 Statistische Auswertung der Einzelglasdicken der TCB-Versuche mit 2x 6 mm

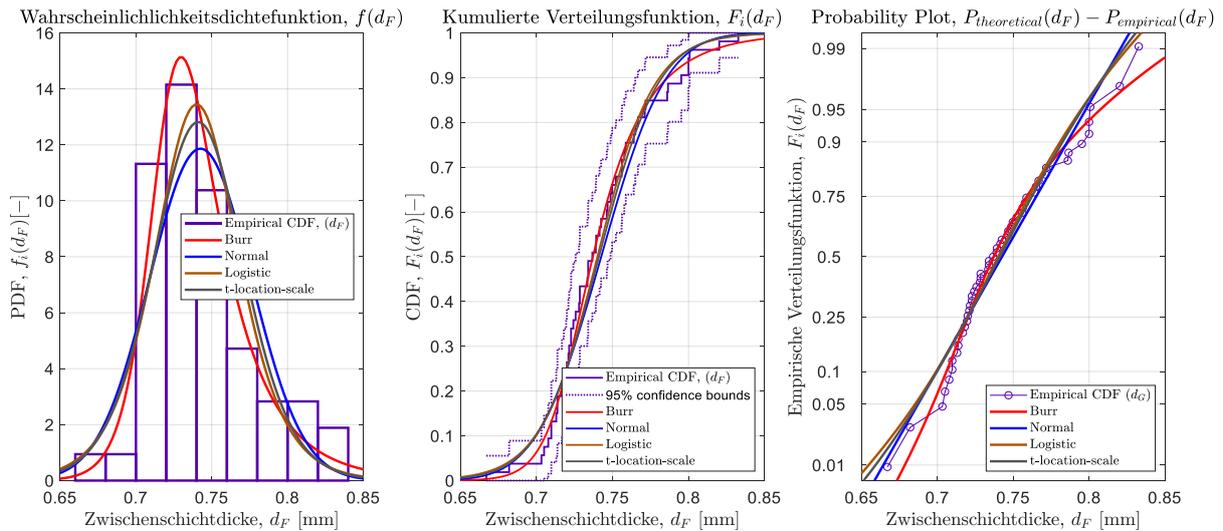


Abbildung 4-3 Statistische Auswertung der Zwischenschichtdicken der TCB-Versuche aller Probekörper

Während die Glasdicken im Werk mikrometergenau vermessen wurden, erfolgte die Messung der Foliendicke wie beschrieben über die manuelle Messung der Gesamtdicke mit einer elektronischen Schieblehre mit einer Auflösung von 0,01 mm. Hier ist daher von einer deutlich größeren Messunsicherheit auszugehen, was sich auch in den Ergebnissen in Bezug auf die Streuung widerspiegelt.

#### 4.1.3 Versuchsübersicht

Wie in 4.1.1 beschrieben sind im Folgenden die entsprechenden Einflussparameter dargestellt, die variiert werden, um die aussagekräftigste Konfiguration zu ermitteln. Neben Scheibendicke, Haftgrad, Temperatur und Lastniveau wurde auch die Art des Risses bzw. Bruches variiert. Beim ursprünglichen TCB-Test, wie in [3] beschrieben, wird der Riss koinzident in Feldmitte eingebracht. Nachdem im Rahmen dieses Forschungsvorhaben gezeigt werden konnte, dass die Risse in der Regel nicht exakt koinzident verlaufen, sondern einen kleinen Versatz aufweisen, wurden neben den koinzident gebrochenen Scheiben, Scheiben mit einem Riss mit planmäßigem Versatz geprüft. Außerdem wurde eine Rissinitiation durch Kugelfall untersucht.

In den folgenden Tabellen (Tabelle 32 - Tabelle 34) sind für die jeweiligen Rissarten die untersuchten Parameter dargestellt.

Tabelle 32 Versuchsmatrix – koinzidenter Riss

Anzahl [-]	Glasdicke [mm]	Haftgrad	Temperatur [°C]	Lastniveau [N]
2	4	Mittel (MR)	23	40
3	6	Mittel (MR)	23	30
3	6	Mittel (MR)	23	40
5	6	Hoch (NR)	23	40
3	8	Mittel (MR)	23	40

Tabelle 33 Versuchsmatrix – versetzter Riss

Anzahl [-]	Glasdicke [mm]	Haftgrad	Temperatur [°C]	Lastniveau [N]
8	4	Mittel (MR)	23	240
3	6	Niedrig (LR)	23	240
7	6	Mittel (MR)	23	240
7	6	Hoch (NR)	23	240
3	6	Mittel (MR)	30	120
3	6	Mittel (MR)	40	120
8	8	Mittel (MR)	23	240

Tabelle 34 Versuchsmatrix – Kugelfall

Anzahl [-]	Glasdicke [mm]	Haftgrad	Temperatur [°C]	Lastniveau [N]
6	6	Hoch (NR)	23	40

#### 4.1.4 Versuchsaufbau und -durchführung

Das gewählte Lastniveau wurde auf Grundlage von Vorversuchen ermittelt und festgelegt. Motiviert wurde dies durch die Überlegung, dass eine gebrochene Scheibe im Resttragfähigkeitsfall über einen gewissen Zeitraum Lasten abtragen können muss, ohne zu versagen. Daher wurde ein Lastniveau bestimmt, bei dem das System nicht innerhalb kürzester Zeit versagt, aber trotzdem ein hohes Verformungsniveau oder Versagen nach langer Lastdauer ( $\approx 24$  h) erreicht wird. Es wurde ein Basistemperaturniveau von 23 °C gewählt, da dies die übliche Prüftemperatur für die Prüfung von Bauteilen ist, um so eine Reproduzierbarkeit und Vergleich der Versuche für andere Forschungsstellen möglich zu machen. Zusätzlich wurden Versuche bei 30 °C und 40 °C durchgeführt,

um den Einfluss der Temperatur zu untersuchen. Die Temperatur konnte in der Prüfkammer auf  $\pm 0,5$  °C genau geregelt werden. Die Luftfeuchtigkeit konnte nicht geregelt werden, wurde aber fortlaufend gemessen und lag bei allen Versuchen zwischen 25–40% RH. Abgesehen von den Versuchen mit der Risserzeugung durch Kugelfallversuch erfolgte die Testdurchführung für alle Probekörper auf die gleiche Weise:

1. Konditionieren des PK auf die entsprechende Temperatur
2. Anritzen beider Scheiben des PK mit Glasschneider und Schneidlineal
3. Manuelles Brechen einer Scheibe
4. Einlegen des PK in die Versuchseinrichtung mit der gebrochenen Scheibe nach unten
5. Brechen der oberen Scheibe mittels Zylinder mit einer Traversengeschwindigkeit von 5 mm/min (lagegeregelt), anschließend Entlasten des PK
6. Anfahren der Prüflast,  $F_M$ , mit einer Geschwindigkeit von 5 N/s (kraftgeregelt)
7. Halten der Last (kraftgeregelt) bis zum Versagen oder für mind. 24 Stunden und kontinuierliche Messung der Verformung an mehreren Stellen.

Um zu gewährleisten, dass die Risse ideal übereinanderliegen (koinzidenter Riss) bzw. den gewünschten Versatz haben, wurde eine Holzschablone konstruiert, an der das Schneidlineal angelegt wurde. Zusätzlich wurden die Scheiben so in die Versuchsrichtung eingelegt, dass die Luftseite immer nach unten und die Zinnseite nach oben angeordnet war. In Tabelle 35 sind die wesentlichen Parameter des Versuches aufgelistet. Die Verformung in Scheibenmitte  $w_g$  wurde mittels zweier induktiver Wegaufnehmer, welche im gleichen Abstand zur Scheibenmitte angeordnet wurden, und dem gemessenen Traversenweg ermittelt. Auf Grund großer Verformungen kann kein konstantes Biegemoment angenommen werden, da mit steigender Verformung Horizontalkräfte an den Auflagern auftreten. Das resultierende Biegemoment in Scheibenmitte, welches über Glas (Druckkomponente) und Zwischenschicht (Zugkomponente) abgetragen werden muss, ist in der nachfolgenden Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 35 Parameter des TCB Versuchs

Parameter	Bezeichnung	Einheit
$w_T$	Traversenweg	[mm]
$w_{1/2}$	Weg (Wegaufnehmer)	[mm]
$F_M$	Kraft (Kraftmessdose)	[N]
$\alpha = \arctan(w_T/250 \text{ mm})$	Drehwinkel	[°]
$w_g = w_{1/2} + w_T + 133 \text{ mm} \cdot \tan(\alpha)$	Gesamtweg in Scheibenmitte	[mm]
$M_{Res} = \frac{F_M}{2} \cdot (250 \text{ mm} + \tan(\alpha) \cdot w_g)$	Resultierendes Biegemoment	[Nmm]

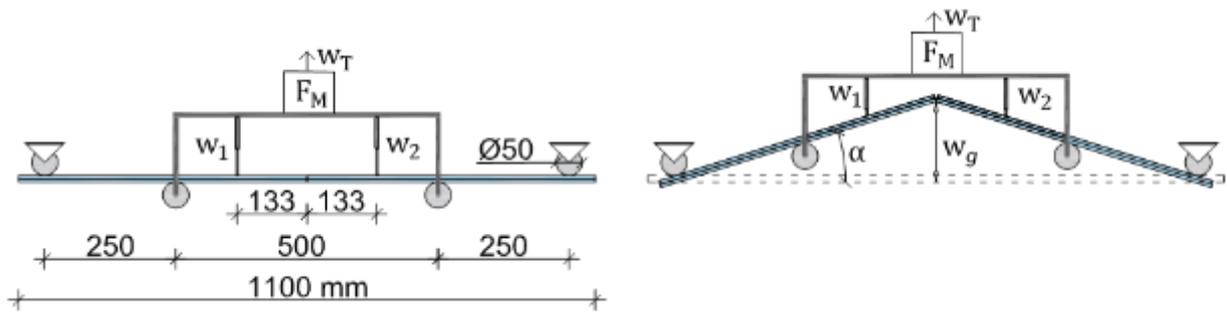


Abbildung 4-4 Aufbau des TCB – Tests und Darstellung der einzelnen Parameter

#### 4.1.5 Versuchsauswertung

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse getrennt für den koinzidenten Riss, den versetzten Riss und den Riss, initiiert durch Kugelfall, dargestellt. Es werden dabei die beiden Versagensszenarien „Rutschen der Scheibe vom Auflager“ und „Reißen der Folie“ definiert.

##### Koinzidenter Riss

Bereits beim Brechen der Scheibe konnte festgestellt werden, dass die manuelle Erzeugung exakt übereinanderliegender Risse nicht möglich ist. Der Grund dafür ist, dass der Rissverlauf nie perfekt orthogonal zur Glasoberfläche verläuft. In Abbildung 4-5 ist beispielhaft ein Riss mit dem entsprechenden Versatz nach dem manuellen Brechen des PK dargestellt.

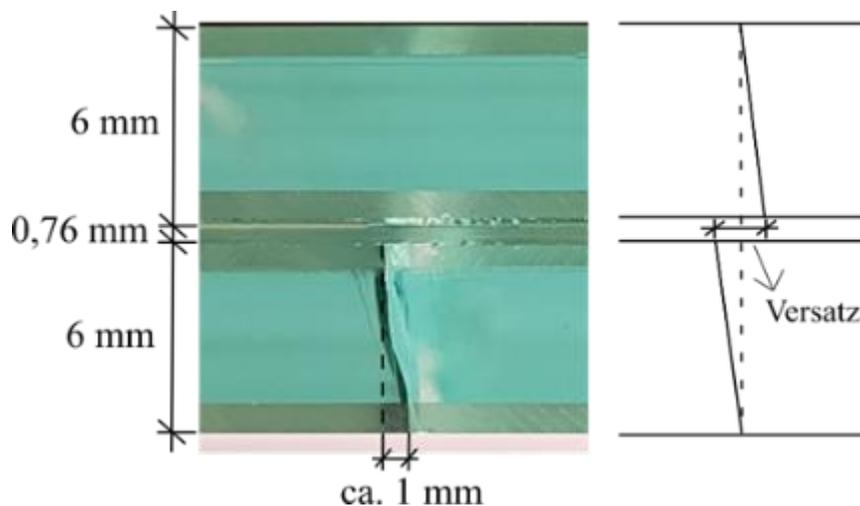


Abbildung 4-5 Versatz des Risses nach dem manuellen Brechen

Über die Messung der Verformung können die Dehnung und Spannung in der Zwischenschicht berechnet werden. Hierzu wird zunächst die Annahme getroffen, dass Zugkräfte,  $F_z$ , über die Zwischenschicht und Druckkräfte,  $F_D$ , über die untere Glasscheibe abgetragen werden. Über das resultierende Biegemoment und den inneren Hebelarm,  $h_i$ , können die Kräfte berechnet werden. Die theoretische Ausgangslänge der Zwischenschicht im Bereich des Risses,  $l_{i,0}$ , beträgt 0 mm. Folglich führt eine Berechnung der Dehnung zu unendlich großen Ergebnissen. Durch das Brechen der Scheibe im Versuch und die anschließende Lastaufbringung kommt es schon zu Beginn zu minimalen,

nicht messbaren Delaminationen, wodurch die Ausgangslänge eine gewisse Größe  $l_{i,0} > 0$  mm beträgt. Für die weiteren Berechnungen wird daher eine Ausgangslänge der Zwischenschicht von  $l_{i,0} = 0,1$  mm angenommen (messtechnisch konnte dieser Wert nicht ermittelt werden). Für die Berechnung der Spannungen ist zu beachten, dass die Querkontraktion der Zwischenschicht über die Breite,  $b_F$ , behindert ist. Eine Querschnittsabnahme ist nur in Dickenrichtung,  $d_F$ , möglich.

Auf Grund der großen Verformungszunahme schon zu Versuchsbeginn lieferte eine optische Aufnahme des Rissbereichs von unten keine verwertbaren Ergebnisse (d.h. die Delamination konnte quantitativ nicht über die Zeit erfasst werden). Die Delamination wurde daher erst nach dem Versuch detektiert, indem in den Rissbereich ein Eindringmittel (MET-L-CHEK, Penetrant Dye VP 30) eingebracht wurde.

a) Auswertung der Gesamtverformung

In Abbildung 4-6 sind die Weg-Zeit-Verläufe der Versuche mit koinzidentem Riss dargestellt.

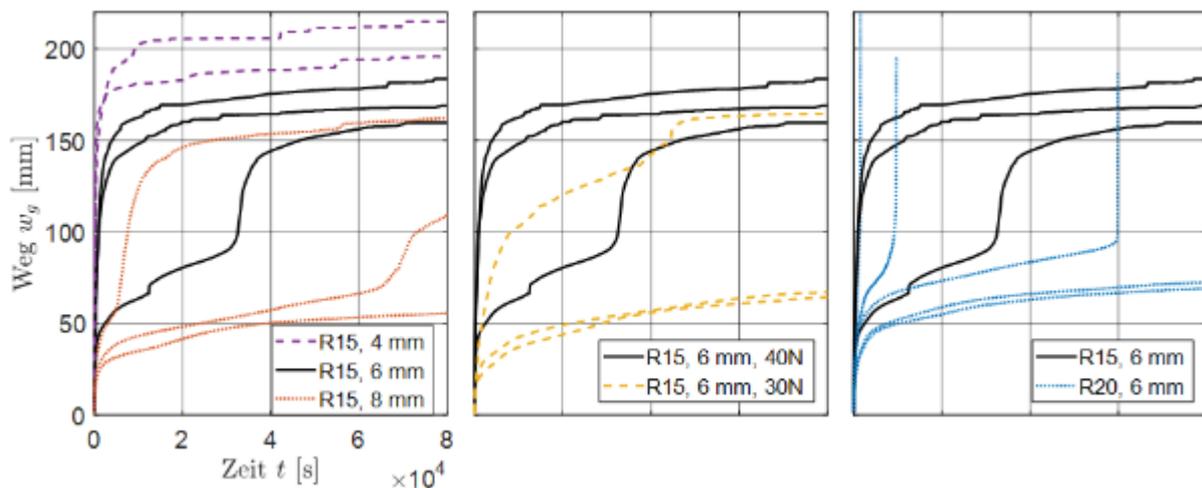


Abbildung 4-6 Versuchsergebnisse TCB-Versuch mit koinzidentem Riss, Links: Einfluss der Glasdicke ( $d_g = 4, 6, 8$  mm), Mitte: Einfluss des Lastniveaus (FM = 40 / 30 N), Rechts: Einfluss des Haftgrades (R15 / MR, R20 / NR)

Je kleiner die Glasdicke  $d_g$  ist, desto geringer wird der innere Hebelarm und desto größer die resultierende Zugkraft in der Zwischenschicht. Daher steigt die Verformung tendenziell mit dünnerem Scheibenaufbau. Auffällig ist, dass ein Versuch mit 2x 6 mm eine deutlich geringere Anfangsverformung aufweist und erst nach ca. 10 h auf ein ähnlich hohes Verformungsniveau steigt, wie die anderen Probekörper. Als Grund hierfür konnte festgestellt werden, dass dieser Probekörper einen relativ großen Versatz der Risse aufwies. Es kann gezeigt werden, dass ein minimaler Versatz bereits einen sehr großen Einfluss auf das Resttragverhalten hat. Des Weiteren zeigt ein Probekörper mit einem Aufbau von 2x 8 mm eine deutlich größere Verformung bereits nach kurzer Zeit und ein anderer Probekörper einen großen Verformungszuwachs nach ca. 20 h. Hier konnte nach dem Versuch eine deutlich größere Delaminationsfläche (vgl. Abbildung 4-8) gemessen werden. Daraus kann gefolgert werden, dass die Haftung zwischen Glas und Folie trotz gleichen Folientyps, Glasaufbau und Belastung starken Streuungen unterliegt.

Es kann kein linearer Zusammenhang zwischen Lastniveau und Verformung festgestellt werden. Hieraus kann geschlossen werden, dass das Dehnungsniveau der Zwischenschicht

jenseits der Linearitätsgrenze liegt. Zum anderen ist die Delamination der Zwischenschicht von einer Grenzlast-/Spannung abhängig. Ein Probekörper mit geringerem Lastniveau (30 N) zeigt eine deutlich größere Verformung als die anderen Probekörper bei diesem Lastniveau. Die Ursache hierfür liegt in einem Ausfall der Temperatursteuerung im Klimacontainer, die zu einer Erwärmung des Probekörpers auf 26 °C führte. Dies verdeutlicht den großen Einfluss der Temperatur, welche nicht nur Einfluss auf die Steifigkeit, sondern auch auf die Haftung zwischen Glas und Zwischenschicht hat. Für die Durchführung von Resttragfähigkeitsversuchen lässt sich daraus ableiten, dass es evtl. möglich ist, ein höheres Lastniveau äquivalent durch eine Steigerung der Temperatur abzubilden oder umgekehrt.

Der Haftgrad hat einen sehr großen Einfluss auf das Resttragverhalten. Für den hohen Haftgrad kam es bei drei von fünf Probekörpern zu einem Riss in der Zwischenschicht und so zu einem schlagartigen Versagen des Systems. Für den Fall, dass kein Reißen der Zwischenschicht auftrat, lagen die Verformungen deutlich unter dem Niveau mit mittlerem Haftgrad. Für den mittleren Haftgrad konnte nur ein partielles Einreißen der Zwischenschicht festgestellt werden (Abbildung 4-7). Dies trat an Stellen auf, an denen keine oder nur eine geringere Delamination detektiert werden konnte.



Abbildung 4-7 Koinzidenter Riss mit partiellem Reißen der Zwischenschicht (links) und Versatz der Risse (rechts)

#### b) Auswertung der delaminierten Flächen

In Abbildung 4-8 ist die nach den Versuchen ermittelte Delaminationsfläche  $A_{del}$  dargestellt. Die Berechnung erfolgte über eine optische Auswertung mittels Matlab. Für die Probekörper mit hohem Haftgrad, R20 (NR), konnte nach dem Versuch mit dem Eindringmittel keine Delamination detektiert werden. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass die Delamination primär einseitig auftritt (vgl. Abbildung 4-9, unten). Nur teilweise war eine beidseitige Delamination zu beobachten. Dies führte zu einer großen Gesamtdelaminationsfläche. Die großen Streuungen, gerade bei den Scheiben mit 2x 8 mm, können u.a. auf den unterschiedlichen Versatz der Risse zurückgeführt werden. In Abbildung 4-9 sind exemplarisch Probekörper mit markierter Delaminationsfläche dargestellt.

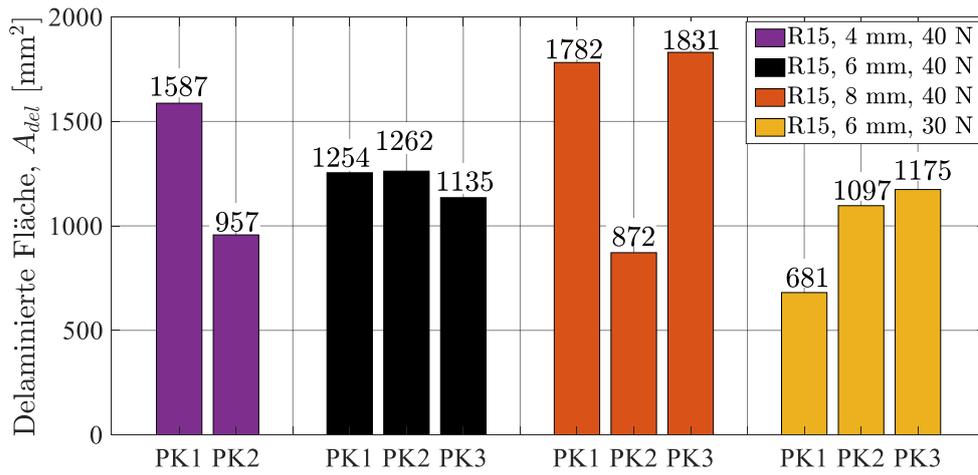
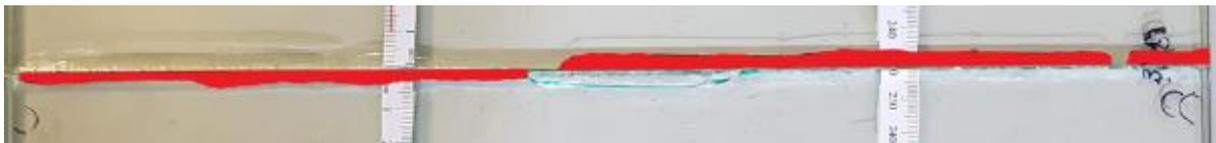


Abbildung 4-8 Delaminierte Fläche  $A_{del}$  nach dem TCB-Versuch mit koinzidentem Riss



R15 (MR), 4 mm, 40 N, PK1



R15 (MR), 4 mm, 40 N, PK2



R15 (MR), 6 mm, 40 N, PK3



R15 (MR), 8mm, 40 N, PK1



R15 (MR), 8mm, 40 N, PK2

Abbildung 4-9 Probekörper mit Darstellung/Markierung der delaminierten Fläche

c) Auswertung von Spannung und Dehnung

In Abbildung 4-10 ist das Tragverhalten im Bereich des Risses für den koinzidenten Riss schematisch dargestellt.

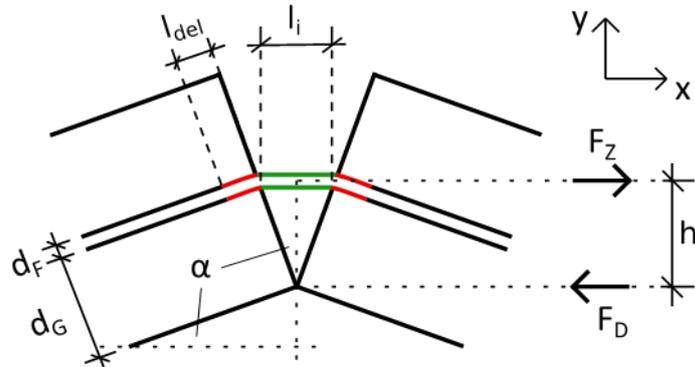


Abbildung 4-10 Tragverhalten im Bereich des Risses

In Tabelle 36 sind die genutzten Berechnungsansätze aufgeführt.

Tabelle 36 Parameter beim koinzidenten Riss

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Gleichung
$d_G$	Glasdicke	[mm]	
$d_F$	Zwischenschichtdicke	[mm]	
$b_F$	Zwischenschichtbreite	[mm]	
$l_i = 2 \cdot (d_G + \frac{d_F}{2}) \cdot \sin(\alpha)$	Zwischenschichtlänge im Riss	[mm]	(1)
$l_{del}$	Länge der Delamination	[mm]	
$h_i = (d_G + \frac{d_F}{2}) \cdot \cos(\alpha)$	Innerer Hebelarm	[mm]	(2)
$F_Z = \frac{M_{Res}}{h_i}$	Zugkraft (Zwischenschicht)	[N]	(3)
$F_D = F_Z$	Druckkraft (Glas)	[N]	(4)
$\epsilon_{tech,x} = \frac{l_i - l_{i,0}}{l_{i,0}}$	Technische Dehnung in x - Richtung	[mm/mm]	(5)
$\epsilon_{w,x} = \ln(1 + \epsilon_{tech,x})$	Wahre Dehnung in x - Richtung	[mm/mm]	(6)
$\epsilon_{w,y} = \frac{1}{1 + \epsilon_{w,x}} - 1$	Wahre Dehnung in y - Richtung	[mm/mm]	(7)
$\sigma_{tech,x} = \frac{F_Z}{A_{F,0}} = \frac{F_Z}{d_{F,0} \cdot b_{F,0}}$	Technische Spannung in x - Richtung	[N/mm <sup>2</sup> ]	(8)
$\sigma_{w,x} = \frac{F_Z}{A_F(t)} = \frac{F_Z}{(d_{F,0} \cdot \epsilon_{w,y} + d_{F,0}) \cdot b_{F,0}}$	Wahre Spannung in x - Richtung	[N/mm <sup>2</sup> ]	(9)

Die Berechnung des inneren Hebelarms (vgl. Tabelle 36 Gleichung (2)) beruht auf der Annahme, dass schon nach kurzer Versuchszeit die Verformung so groß ist, dass die Druckkräfte nur noch über die äußerste Glaskante abgetragen werden. Hier ist anzumerken, dass dies nicht auf der „sicheren Seite liegend“ ist und die tatsächlich vorhandene Zugkraft in der Zwischenschicht vor allem im Anfangszeitbereich deutlich größer sein kann.

In Abbildung 4-11 sind die wahren Dehnungen in der Zwischenschicht im Bereich des Risses dargestellt. Um den Einfluss der Delamination auf die resultierende Dehnung in der Zwischenschicht aufzuzeigen, erfolgt die Darstellung ohne und mit Berücksichtigung der Delamination. Zur Berücksichtigung der Delamination wird vereinfacht angenommen, dass die Delamination auf Grund der konstanten Belastung linear ansteigt. Die Delaminationslänge  $l_{del}$  für jeden Zeitschritt ergibt sich so zu:

$$l_{del} = \frac{A_{del}/b_f}{t_g} \quad \Rightarrow \varepsilon_{w,x} = \ln \left( 1 + \frac{l_i - l_{i,0} + l_{del}}{l_{i,0} + l_{del}} \right) \quad (10)$$

mit  $t_g$  = Versuchszeit in Sekunden

Dieses Delaminationsinkrementell wird dann bei der Berechnung der Dehnung in jedem Zeitschritt berücksichtigt und liefert eine Näherung an den tatsächlichen Dehnungsverlauf der Zwischenschicht im Riss über die Zeit.

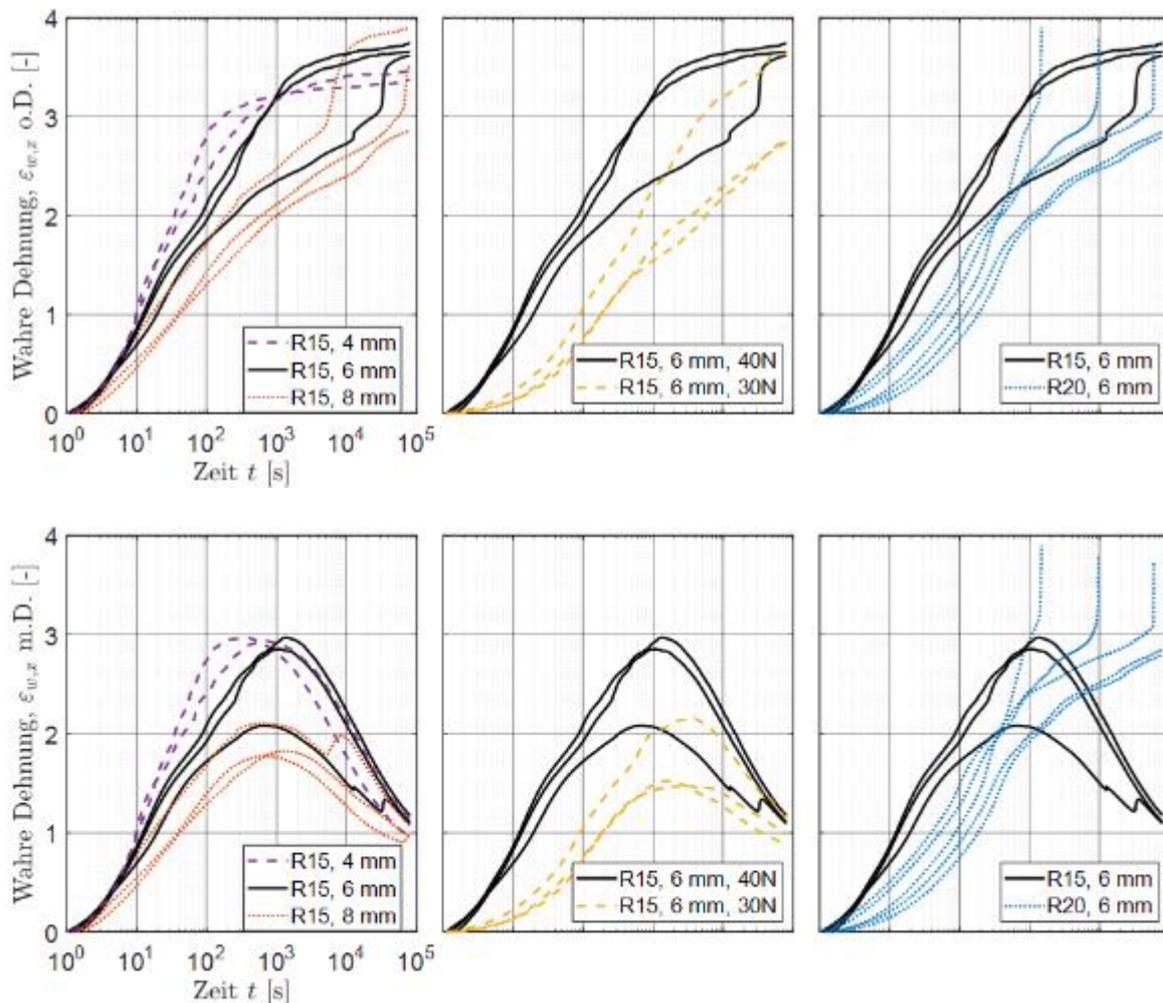


Abbildung 4-11 Wahre Dehnung der Zwischenschicht im Riss ohne rechnerische Berücksichtigung der Delamination (o.D.) (oben) und mit rechnerischer Berücksichtigung der Delamination (m.D.) (unten)

Die minimale technische Bruchdehnung von Standard-PVB (Typ Trosifol Clear) bei Raumtemperatur liegt bei 280 % . Dies entspricht einer wahren Dehnung von 1,34. Dieser Wert wird auch unter Berücksichtigung der Delamination bei weitem überschritten. Dies deutet darauf hin, dass die Delamination trotz konstanter Belastung nicht linear ansteigt, sondern im Anfangszeitbereich deutlich schneller voranschreitet. Durch die Annahme eines konstanten inneren Hebelarms wird die Anfangszugbelastung in der Zwischenschicht darüber hinaus unterschätzt. Bekräftigt wird dies bei Betrachtung des Verformungsverlaufs über die Zeit (vgl. Abbildung 4-6), da dieser ebenfalls nicht linear zunimmt. Die hier getroffenen Annahmen/Vereinfachungen sind somit nicht geeignet, um die Delamination über die Zeit abbilden zu können. Ohne eine genaue messtechnische Erfassung der Delamination über die Zeit (die hier nicht möglich war), ist eine adäquate Berechnung der resultierenden Dehnung somit nicht möglich. Die berechnete wahre Enddehnung nach 24 Stunden unter Berücksichtigung der gesamten Delaminationsfläche liegt für den mittleren Haftgrad (R15/ MR) bei ca. 1,2 (230 %). Hier ist die Bruchdehnung folglich nahezu erreicht. Da sich die Delamination, wie in Abbildung 4-9 gezeigt, nicht gleichmäßig über die Scheibenbreite vollzieht, lassen sich so die lokalen Einrisse der Zwischenschicht (vgl. Abbildung 4-7, links) erklären.

Die resultierenden wahren Spannungen über die Zeit werden nach Gleichung (5.20) berechnet und sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Die wahre Spannung in der Zwischenschicht liegt nur für die Probekörper mit 4 mm dickem Glas im Bereich der technischen Mindest-Reißfestigkeit von PVB (für Typ BG > 23 N/mm<sup>2</sup>). Da es teilweise zu einem Einreißen der Zwischenschicht und bei den Probekörpern mit hohem Haftgrad bei drei Probekörpern zu einem kompletten Versagen gekommen ist, kann davon ausgegangen werden, dass das Erreichen der Bruchdehnung das maßgebende Versagenskriterium für dieses Belastungsszenario ist.

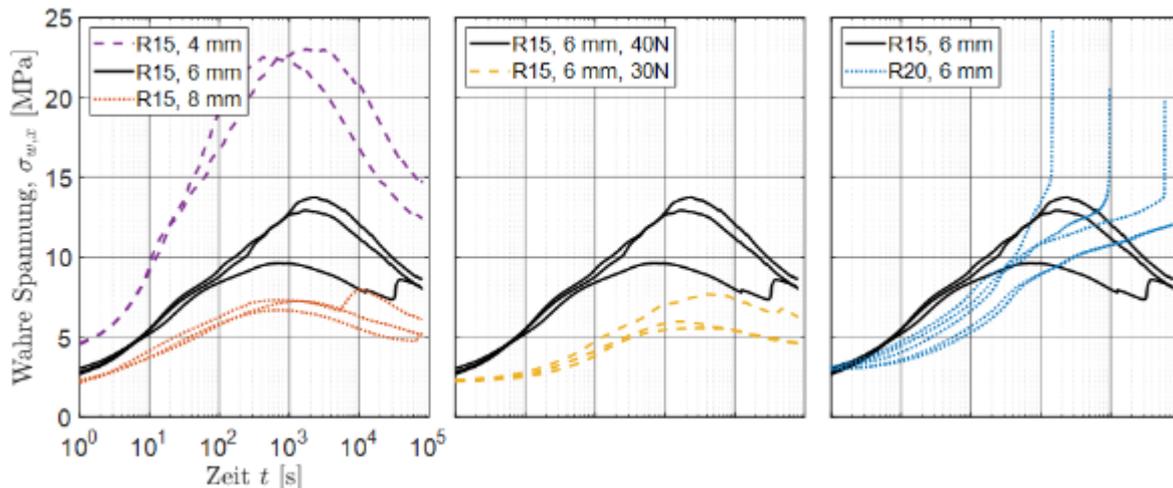


Abbildung 4-12 Wahre Spannung im TCB-Versuch mit koinzidentem Riss in der Zwischenschicht im Rissbereich

#### d) Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

TCB-Versuche mit koinzidentem Riss bilden das „worst-case“-Szenario einer gebrochenen Verbundglasscheibe hinsichtlich der Beanspruchung und des Systemwiderstands ab. Die Versuche haben gezeigt, dass die Erzeugung von perfekt koinzidenten Rissen mit dem angewandten Verfahren nur bedingt möglich ist. Die im Versuch auftretenden Verformungen übersteigen nach kurzer Zeit ein Niveau, bei dem ein Glas bei üblichen Glaseinstandsgrößen aus dem Auflager rutschen würde. Zudem ist das aufnehmbare Lastniveau sehr gering und liegt unter der theoretischen Belastung aus Eigengewicht. Hier ist allerdings anzumerken, dass eine ideal gelenkige, verschiebliche Auflagerung in Realität nicht vorhanden ist. Bei einer linienförmigen gelagerten Verglasung werden die Ränder in der Regel durch Verglasungsgummis versiegelt, wodurch eine gewisse Einspannung im Auflager vorhanden ist und deutlich größere Lasten abgetragen werden können. Die Versuche eignen sich daher sehr wohl, um wesentliche Erkenntnisse über das Resttragverhalten von Verbundglas bei einem koinzidenten Riss zu erhalten. Der Einfluss der Glasdicke ist mechanisch nachvollziehbar, da mit zunehmender Glasdicke der innere Hebelarm zunimmt und die Zugkraft in der Zwischenschicht und damit die Dehnung kleiner wird. Ein schlechtes Haftvermögen der Zwischenschicht kann auf Grund von Delamination trotzdem zu großen Verformungen führen (vgl. Versuche mit 8 mm dickem Glas). Darüber hinaus besteht kein linearer Zusammenhang zwischen Belastung und Verformungsverhalten. Der Haftgrad hat den größten Einfluss auf das Resttragverhalten. Die zunehmende Delamination führt für den mittleren Haftgrad zu sehr großen Verformungen. Es kommt aber nur zu einem partiellen Reißen der Zwischenschicht und das System versagt nicht. Ein hoher Haftgrad führt zu geringer Delamination und Verformung. Hier besteht allerdings die Gefahr, dass die Bruchdehnung der polymeren Zwischenschicht überschritten wird und die gesamte Zwischenschicht einreißt und das System infolgedessen versagt. Eine Berechnung der Dehnung der Zwischenschicht

unter Berücksichtigung der Delamination ist mit den hier im Versuch ermittelten Messgrößen nur bedingt möglich, da nur die Delaminationsfläche nach Versuchsende berechnet werden konnte. Hier sind weitere Untersuchungen, genauere optische Messverfahren notwendig, um das Einsetzen und Fortschreiten der Delamination auch über die Zeit quantitativ erfassen zu können.

### Versetzter Riss

Neben dem „worst-case“-Szenario direkt übereinanderliegender Risse wurde auch das Resttragverhalten mit einem definierten versetzten Riss untersucht. Der Versatz zwischen den Rissen wurde dabei auf 10 mm (willkürlich) festgelegt. Wesentlichen Einfluss auf das Versagen des Systems hat nun das Haftvermögen der Zwischenschicht im Bereich des Risses. Bei allen durchgeführten Versuchen im Rahmen dieses Kapitels konnte das gleiche Versagensmuster festgestellt werden. Zunächst kommt es zu einer zunehmenden Verformung auf Grund des viskoelastischen Materialverhaltens der Zwischenschicht. Anschließend setzt am Rissursprung eine fortschreitende Delamination ein. Zusätzlich konnte innerhalb des Überlagerungsbereichs der Risse eine Blasenbildung observiert werden. Über die Zeit vergrößerten sich die Delaminationsfront und Blasen, bis sie sich verbanden und schließlich der komplette Bereich des Versatzes delaminiert war, woraufhin die Scheibe auf Grund großer Verformungen versagte. Es konnte zunächst nicht festgestellt werden, ob die Blasen innerhalb der Zwischenschicht oder im Grenzbereich zwischen Glas und Zwischenschicht auftraten. In Abbildung 4-13 ist schematisch der Ablauf des Versuchs mit versetztem Riss dargestellt. Zusätzlich zum realen Verlauf ist die Verformungskurve für den Fall, dass keine Delamination auftritt (o.D.) dargestellt. In Abbildung 4-14 (rechts) ist beispielhaft die Delamination eines Probekörpers zum Zeitpunkt  $t_2 - t_3$  abgebildet.

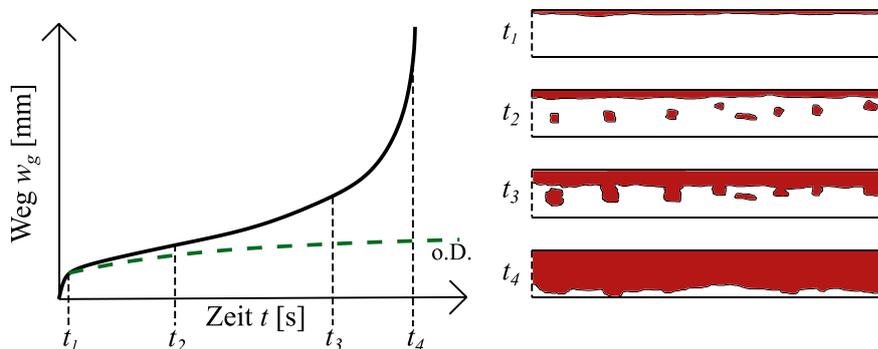


Abbildung 4-13 Schematischer Weg-Zeit Verlauf des TCB-Versuch mit versetztem Riss (links), Fläche der Delamination im Versatz zu bestimmten Zeitpunkten (rechts)



Abbildung 4-14 TCB-Versuch mit versetztem Riss (links), Delamination im Überlappungsbereich der Risse (rechts)

## a) Auswertung der Gesamtverformung

In Abbildung 4-15 ist der Einfluss der Glasdicke auf das Tragverhalten mit versetztem Riss dargestellt. Es wurden jeweils 7 Probekörper mit 2x 6 mm und 2x 8 mm dicken Glasscheiben und 8 Probekörper mit 2x 4 mm dicken Glasscheiben getestet. Dabei kam es zu einer sehr großen Streuung der Ergebnisse. Um eine tendenzielle Aussage treffen zu können, ist in Abbildung 4-15 (rechts) der Mittelwert der jeweiligen Ergebnisse dargestellt. Zusätzlich ist bei einer Verformung von 40 mm die Standardabweichung mittels Fehlerbalken geplottet.

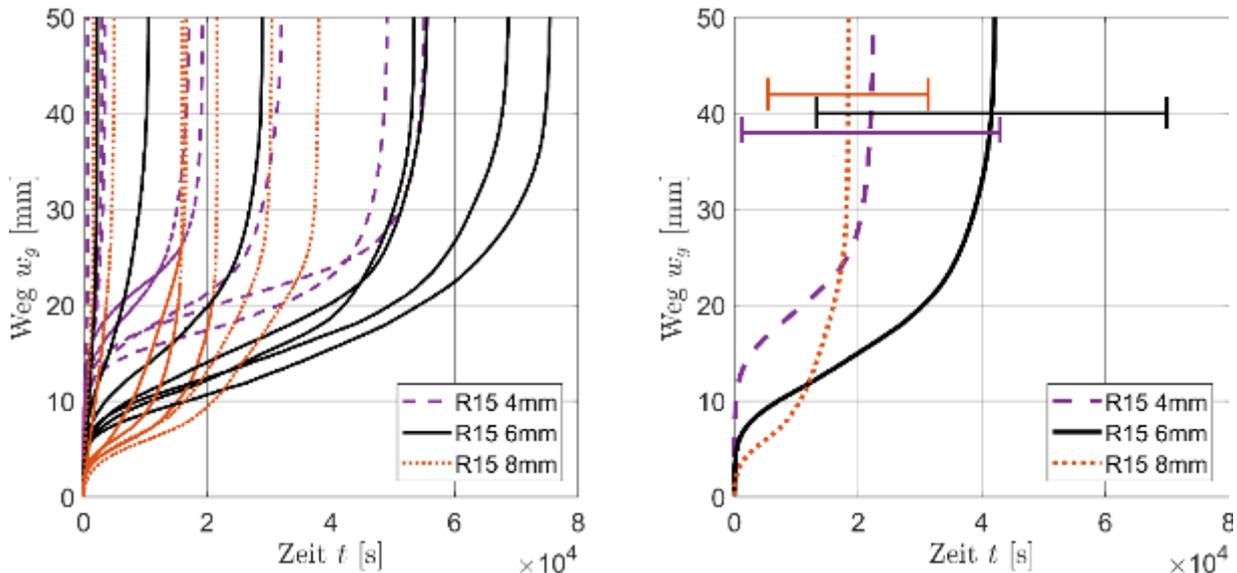


Abbildung 4-15 Einfluss der Glasdicke beim versetzten Riss, Weg-Zeit-Verlauf aller PK (links), Weg-Zeit-Verlauf der gemittelten Kurven mit Fehlerbalken ( $\pm s$ ) ausgewertet bei  $w_y=40$  mm (rechts)

Die Anfangsverformung ist für den Aufbau mit 8 mm Glas am kleinsten und für den Aufbau mit 4 mm am größten. Dies ist mechanisch nachvollziehbar, da hier analog zum Versuch mit koinzidentem Riss der innere Hebelarm mit steigender Glasdicke größer wird. Auffällig ist, dass die Delamination der Scheiben mit 2x 8 mm im Mittel schneller voranschreitet und die Scheiben sogar am frühesten versagen. Die Haftung zwischen Zwischenschicht und Glas scheint folglich von der Glasdicke abhängig zu sein. Gründe für die große Streuung können analog zum koinzidenten Riss die nicht perfekt orthogonal verlaufenden Risse sein. Zudem ist die Haftung zwischen Glas und Zwischenschicht noch abhängig von der Sauberkeit der Glasscheiben vor dem Laminieren und dem Wassergehalt der Zwischenschicht. In Abbildung 4-16 ist der Einfluss des Haftgrades dargestellt. Da es hier zu sehr großen zeitlichen Unterschieden der Verformungsverläufe kam, ist die Zeitachse logarithmisch dargestellt; bemerkenswert sind auch hier die großen Streuungen. Daher ist Abbildung 4-16 (rechts) der Mittelwert der Ergebnisse für den jeweiligen Haftgrad inklusive Standardabweichung bei einer Verformung von 40 mm dargestellt. Im Mittel versagen die Scheiben mit geringem Haftgrad (R10 / LR) bereits nach ca. 0,9 h, die Scheiben mit mittlerem Haftgrad nach ca. 11 h und die Scheiben mit hohem Haftgrad nach ca. 50 h. Der Haftgrad hat somit einen sehr großen Einfluss auf das Resttragverhalten beim versetzten Riss. Vergleicht man die Fehlerbalken der Standardabweichung, überschneiden sich die Bereiche für den mittleren und hohen Haftgrad. Daher sind hier nur über eine größere Anzahl an Versuchen repräsentative und signifikante Aussagen möglich.

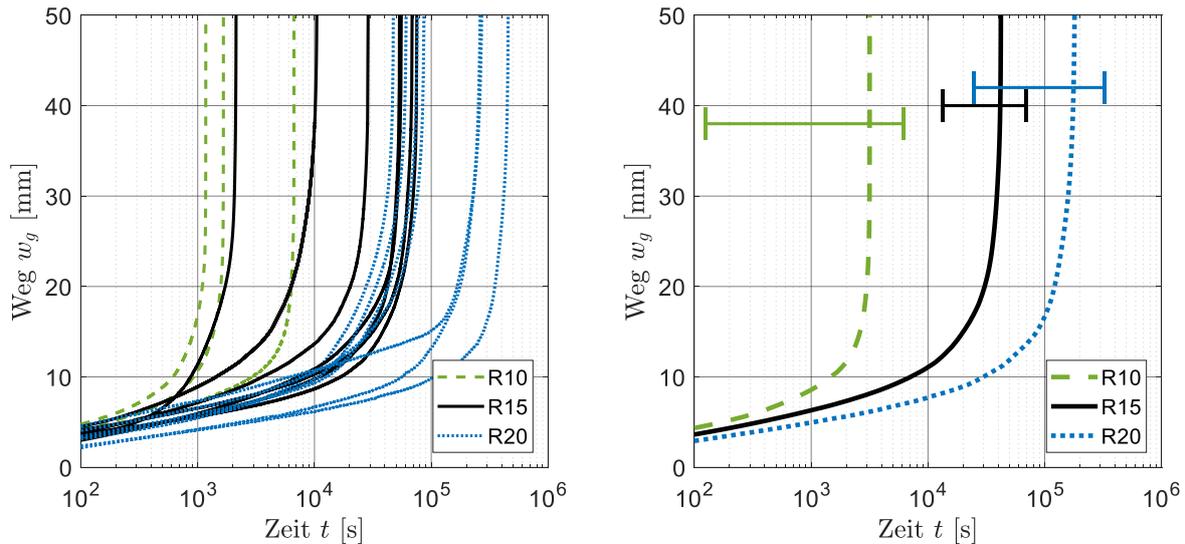


Abbildung 4-16 Einfluss des Haftgrades beim versetzten Riss, Weg-Zeit-Verlauf aller PK (links), Weg-Zeit-Verlauf der gemittelten Kurven mit Fehlerbalken ( $\bar{x} \pm s$ ) ausgewertet bei  $w_g=40$  mm (rechts)

In Bezug auf die Bildung von Blasen im Überlappungsbereich der Risse konnte festgestellt werden, dass die Zwischenschicht im Bereich des Versatzes für den geringen und mittleren Haftgrad keine Schädigungen aufwies. Folglich kam es lediglich zu einer Ablösung zwischen Glas und Zwischenschicht. Für den hohen Haftgrad konnten nach dem Versuch Risse in der Zwischenschicht beobachtet werden. In Abbildung 4-17 sind diese Risse und Blasen nach dem Versuch für einen Probekörper mit hohem Haftgrad dargestellt.



Abbildung 4-17 Blasen und Risse der Zwischenschicht mit hohem Haftgrad im Bereich des Versatzes nach dem Versuch

Bei den Versuchen mit hoher Temperatur wurde beim ersten Probekörper bei 30 °C das gleiche Lastniveau gewählt wie bei den Versuchen bei 23 °C. Hierbei versagte der Probekörper sofort. Daher wurde für die Versuche bei höherer Temperatur das Lastniveau halbiert. In Abbildung 4-18 sind die Ergebnisse für die Versuche bei 30 °C und 40 °C dargestellt. Für die gemittelten Kurven ist zum Vergleich das Ergebnis bei 23 °C dargestellt. Wie zu erkennen ist, kommt es bei den Probekörpern bei 30 °C zu einer sehr großen Streuung (Versagenszeiten zwischen 0,9 h und 140 h). Ein Grund hierfür konnte anhand der Begutachtung der Probekörper nicht ermittelt werden.

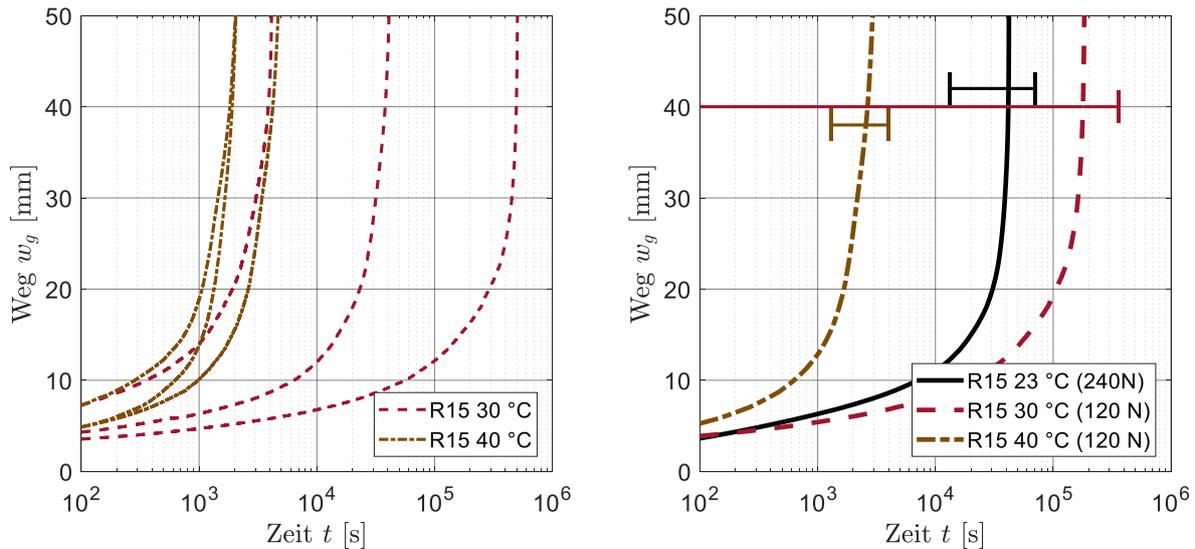


Abbildung 4-18 Einfluss der Temperatur beim versetzten Riss, Weg-Zeit-Verlauf aller PK (links), Weg-Zeit-Verlauf der gemittelten Kurven mit Fehlerbalken ( $x \pm s$ ) ausgewertet bei  $w_g=40$  mm (rechts)

Die Versuche bei 40 °C haben eine geringe Streuung und liegen auf einem ähnlichen Niveau wie die Versuche bei geringem Haftgrad. Ein Vergleich des gemittelten Ergebnisses der Versuche bei 23 °C mit doppeltem Lastniveau zeigt, dass dieses zwischen den Versuchen bei hoher Temperatur liegt. Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass für Resttragfähigkeitsversuche eine höhere Temperatur durch ein höheres Lastniveau abgebildet werden kann.

#### b) Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse:

TCB-Versuche mit versetztem Riss eignen sich gut, um das Lastabtragungsverhalten von gebrochenen Verbundgläsern zu untersuchen, bei denen die Risse nicht koinzident übereinander verlaufen. Zunächst konnte über alle Versuche eine sehr große Streuung in den Ergebnissen festgestellt werden. Als Grund hierfür müssen zwei wesentliche Faktoren betrachtet werden:

1. Es kann zu Qualitätsunterschieden in der Lamination kommen. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind hier: „Ebenheit“ der Glasscheiben, Feuchtigkeit der Zwischenschicht, Temperatur und Druck im Laminationsprozess, Reinheit (Qualität des Waschwassers und der Glasoberfläche) der Glasscheiben. Zudem variieren die tatsächlichen Glas- und Zwischenschichtdicken.
2. Versuchsbedingt kann es auf Grund des Bruchverhaltens zu Streuungen im tatsächlichen Versatz kommen (resultierende Fläche des Überlappungsbereichs), da die Scheiben nicht perfekt orthogonal brechen. Zusätzlich kann es zu leichten Temperaturunterschieden innerhalb der Versuche kommen ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ).

Eine Delamination vom Rissursprung ist bekannt und wird auch durch bspw. TCT-Tests hinreichend untersucht. Die Delamination im Versatzbereich wurde bislang nicht betrachtet, ist aber ein wesentlicher Faktor für das Systemverhalten. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, warum und wann es zu der Blasenbildung in der polymeren Zwischenschicht kommt.

Dickeres Glas scheint im Mittel eine schlechtere Haftung aufzuweisen als dünnes Glas. Auch hier sind weitere Versuche notwendig, um diese These zu bestätigen. Die Haftung zwischen Glas und

Zwischenschicht ist der maßgebende Faktor für die Resttragfähigkeit beim versetzten Riss. Ein höherer Haftgrad führt im Mittel zu einer deutlichen längeren Standzeit. Im Gegensatz zum koinzidenten Riss ist hier ein hoher Haftgrad positiv für das Resttragverhalten (kein komplettes Reißen der Folie), wobei auch hier nach dem Versuch Risse in der Zwischenschicht festgestellt werden konnten. Die Temperatur hat einen maßgebenden Einfluss auf das Resttragverhalten, da nicht nur die Steifigkeit der Zwischenschicht, sondern auch die Haftung negativ beeinflusst wird. Die Ergebnisse zeigen, dass für Resttragfähigkeitsversuche bei Raumtemperatur der Einfluss der Temperatur über eine Steigerung des Lastniveaus möglich ist. Für Versuche im intakten linearen Bereich ist dies nur über eine Steigerung der Lastdauer möglich. Hier sind weitere Versuche notwendig, um einen funktionalen Zusammenhang zwischen Temperatur und Lastniveau zu ermitteln.

### Risserzeugung durch Kugelfall

Für den Vergleich mit einem zufällig erzeugten Glasbruch wurden 6 Versuche mit einer Risserzeugung durch einen Kugelfall durchgeführt (Probekörper aus 2x 6mm Glas / 0,76 mm BG R20). Hierzu wurden die Scheiben mit einem Auflagerabstand von 1000 mm auf Stahlleisten gelagert und anschließend eine 1,01 kg schwere Stahlkugel aus einer Höhe von 2 m in die Mitte der Scheibe fallen gelassen ( $T = 23^\circ\text{C}$ ). Hierbei kam es schon bei der Brucherzeugung zu deutlichen Unterschieden. Bei zwei Probekörpern sind nach dem ersten Abwurf der Kugel bereits beide Scheiben des Laminats gebrochen. Bei drei Probekörpern ist beim ersten Abwurf lediglich die untere Scheibe gebrochen. Anschließend wurden diese Scheiben gedreht und durch einen zweiten Abwurf wurde die andere Scheibe gebrochen. Bei einem Probekörper kam es erst beim dritten Abwurf zum Brechen der unteren Scheibe. Auch hier wurde die Scheibe gedreht und die andere Scheibe durch einen erneuten Abwurf gebrochen. Zum Vergleich der Bruchbilder wurden die Glasbruchstücke der unteren Scheibe gezählt und die Flächen der Bruchstücke berechnet. In Abbildung 4-19 ist die Bruchstückverteilung dargestellt. Bei den durch einen Abwurf gebrochenen Probekörpern (PK1 und PK4) sind deutlich mehr kleinere Glasbruchstücke vorhanden. Insgesamt liefert der Kugelfallversuch in Bezug auf die Bruchstückgrößenverteilung ein reproduzierbares Ergebnis.

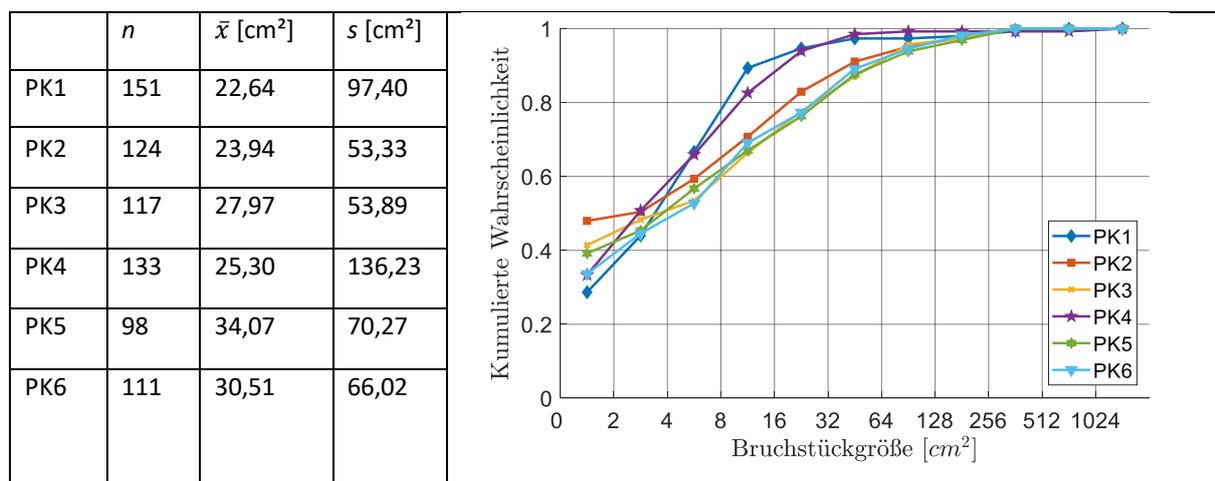


Abbildung 4-19 Bruchstückgrößenverteilung der unteren Scheibe nach Bruch durch Kugelfall mit Bruchstückanzahl  $n$ , Mittelwert der Bruchstückgröße  $\bar{x}$  und Standardabweichung der Bruchstückgrößen  $s$

Nach dem Brechen des Probekörpers wurde dieser in die Versuchseinrichtung eingebaut und mit der gleichen Last belastet, wie bei den Versuchen mit koinzidentem Riss ( $F_M = 40 \text{ N}$ ,  $T = 23 \text{ C}$ ). Drei Probekörper (PK3 – PK6) wurden vor dem Belasten für 24 h in ein Wasserbad eingelegt, um den Einfluss der Feuchtigkeit auf das Resttragverhalten zu untersuchen.

#### a) Auswertung der Gesamtverformung

Im Vergleich zum koinzidenten Riss sind die Verformungen bei den durch Kugelfall gebrochenen Scheiben im Mittel größer (vgl. Abbildung 4-20 links). Bei den trocken geprüften Probekörpern ist bei einem Probekörper die Zwischenschicht über nahezu die gesamte Breite gerissen und der Probekörper versagte. Tendenziell ist ein großer Einfluss durch Feuchtigkeit erkennbar. Bei zwei Probekörpern sind die Verformungen speziell im Anfangsbereich deutlich größer als bei den trockenen Probekörpern (vgl. Abbildung 4-20 rechts).

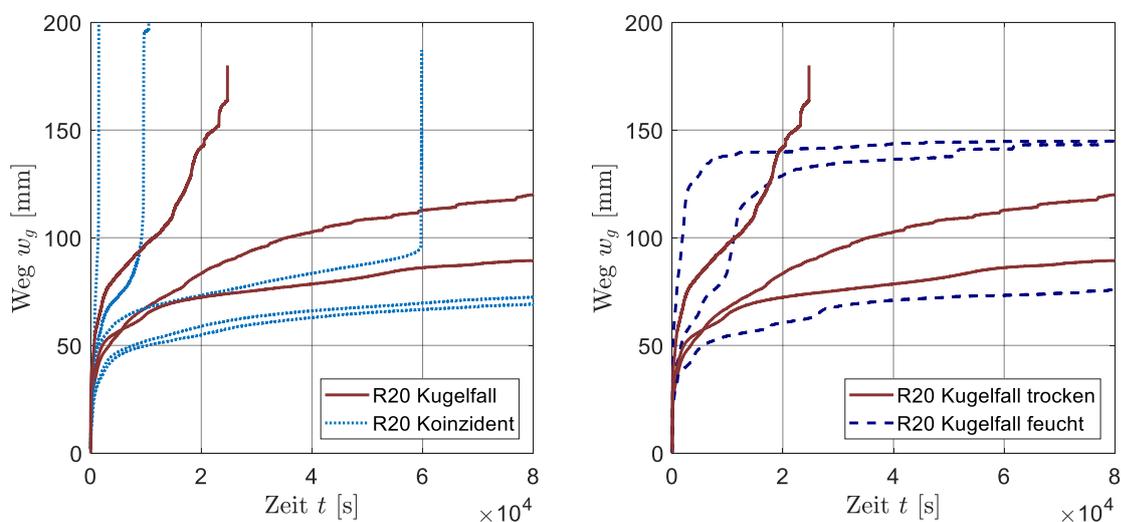


Abbildung 4-20 Versuchsergebnisse TCB-Versuch mit Risserzeugung durch Kugelfall, links: Vergleich mit koinzidentem Riss, rechts: Einfluss der Feuchtigkeit

Bei einem der Probekörper mit Wasserlagerung sind die Verformungen geringer als bei den trockenen Probekörpern. Eine Erklärung hierfür liefert die Betrachtung der Bruchbilder und des Verformungsverhaltens. Es konnte allgemein festgestellt werden, dass sich die Probekörper unter Last primär an einer Hauptbruchlinie biegen und nur dort eine Krümmung erkennbar ist. Der restliche Teil der gebrochenen Scheibe bleibt nahezu eben. Die Hauptbruchlinien der Probekörper sind für alle 6 Probekörper vergleichbar und verlaufen mindestens bis zur Hälfte der Scheibe nahezu gerade. An diesen Bruchlinien konnte festgestellt werden, dass die Risse in der oberen und unteren Glasscheibe nahezu koinzident übereinanderlagen. Dies zeigt, dass das „worst-case“-Szenario direkt übereinanderliegender Risse zumindest für den Fall einer 2-seitig linienförmig gelagerten Verbundglasscheibe durchaus ein realistisches Bruchscenario darstellt und für die Erstellung von Resttragfähigkeitsmodellen und einer Prüfanweisung berücksichtigt werden sollte. In Abbildung 4-21 sind die Probekörper mit Rissbild dargestellt. Die im Versuch beobachtete Hauptbruchlinie ist rot markiert. Beim Probekörper mit den geringsten Verformungen (PK6) ist zu erkennen, dass die Hauptbruchlinie im Gegensatz zu den anderen Probekörpern leicht diagonal verläuft. Daher sind hier die Verformungen unabhängig von der Konditionierung deutlich geringer.

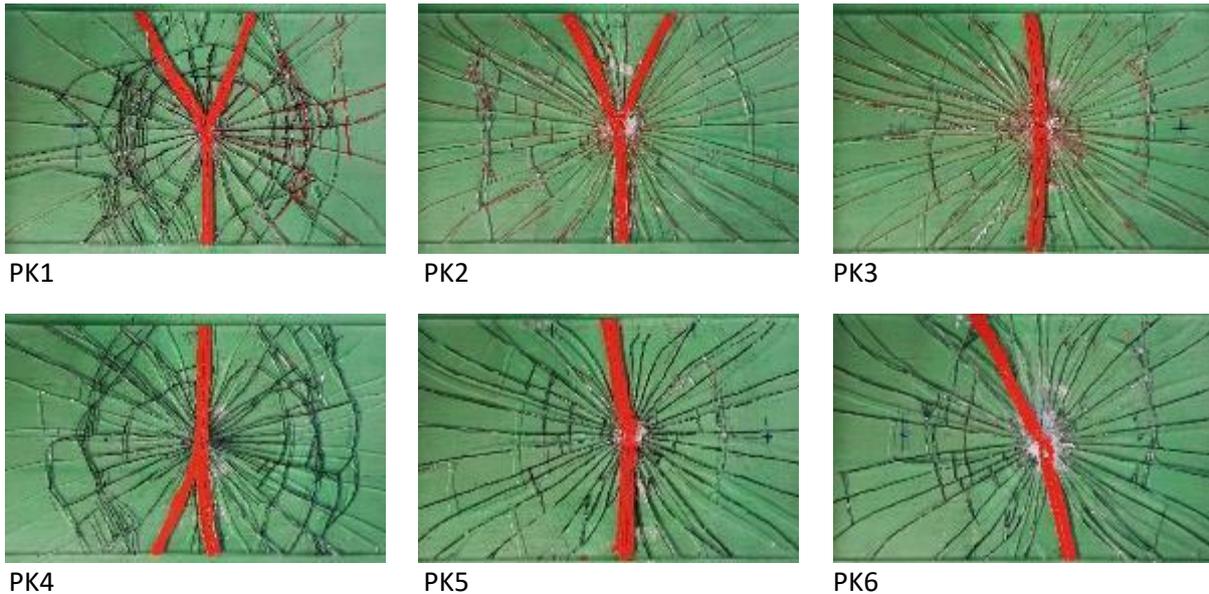


Abbildung 4-21 Rissmuster nach Kugelfall mit Hauptbruchlinien (rot markiert)

#### b) Vergleich der Ergebnisse mit anderen Versuchsreihen

In [50] wurden verschiedene Versuche zum Lastabtrag von gebrochenem Verbundglas durchgeführt und das Lastabtragungsverhalten untersucht. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Versuche liegen qualitativ in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus [50]. In beiden Fällen kommt es zu einer Ausbildung von Fließlinien, an denen sich die Hauptkrümmung des Systems vollzieht und der primäre Lastabtrag stattfindet.

#### c) Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse:

Die Versuche mit durch Kugelfall gebrochenen Probekörpern zeigen, dass der Fall des koinzidenten Risses auch durch einen realitätsnah erzeugten Glasbruch auftreten kann. Darüber hinaus kann auf Grundlage der Versuche festgestellt werden, dass für grob brechendes Glas nicht die Bruchstückgröße und Verteilung, sondern die Entstehung von Hauptbruchlinien für das Resttragverhalten maßgebend sind. Für den Fall einer zweiseitig gelagerten Scheibe verlaufen diese Linien nahezu gerade und mittig durch die Scheibe. Ein TCB-Versuch mit koinzidentem Riss ist somit ein sinnvolles Szenario, um diese Fallgestaltung abzubilden. Die Versuche nach Wasserlagerung zeigen, dass auch im Bauteilversuch in der Tendenz ein Einfluss der Feuchtigkeit erkennbar ist.

#### 4.1.6 Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen

- Seminararbeit Uni BW M: Daniel Königs 2019: Kugelfallversuche zur Untersuchung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas
- Bachelorthesis Uni BW M: Marcel Schmitt 2019
- Untersuchungen zum Einfluss der Rissverteilung auf das Tragverhalten von gebrochenem Floatglas

- Masterthesis Uni BW M: Lars Christ 2020  
Untersuchungen zum Resttragverhalten von Verbundglas hinsichtlich der Haftung zwischen Glas und Zwischenschicht, Universität der Bundeswehr München, Masterarbeit, 2019
- Dissertation: Martin Botz 2020 Beitrag zur versuchstechnischen und numerischen Beschreibung von Verbundglas mit PVB-Zwischenschicht im intakten und gebrochenen Zustand, Uni BW M (2020)

## 4.2 TCB – Test: Kleinteilversuche

### 4.2.1 Zielsetzung

Neben den TCB Versuchen an den Großproben, wurde auch welche an Kleinproben durchgeführt. Ein Problem bei den Großproben mit koinzidentem Riss war z.B. das Erzeugen von perfekt übereinander liegenden Rissen. Mit den Kleinproben war es auf Grund der geringeren Glasstärken einfacher dies zu realisieren.

Zudem sollte geprüft werden ob ein Zusammenhang zwischen den Pummelergebnissen an den Kleinproben und den TCB-Ergebnissen an den Kleinproben besteht.

### 4.2.2 Versuchsübersicht

Tabelle 37 Versuchsmatrix TCB an Kleinproben

Folientyp	Anzahl an Versuchen
Saflex® RB41 Std (PVB)	2
Saflex® RB41 High Moisture (PVB)	2
Saflex® RB41 Low Moisture (PVB)	2
Saflex® RA41 (PVB, high adhesion)	2
Saflex® RC41 (PVB, low adhesion)	2

Die Abmessungen der Proben aus Tabelle 37 betragen 200x30mm und der Glasaufbau 3mm FG – 0,76mm Zwischenschicht – 3mm FG (identischer Aufbau zu den Pummel Kleinproben). Zusätzliche Angaben sind dem Anhang 9.8 zu entnehmen.

### **Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung**

Die Probenvorbereitung beinhaltete folgende Schritte:

- Proben vermessen, reinigen und markieren (Feldmitte für den Riss und Auflager)
- Definierte Vorschädigung mittels Universal Surface Tester (UST), siehe Abbildung 4-22. Es wurde ein Schädigungsdruck von 69.2N (maximaler Maschinenwert +50N Zusatzlast) verwendet und jede Seite wurde doppelt mit einem Schneidrädchen (BO 03B145) vorgeschädigt.
- Brechen der unteren Glasscheibe in der Universalprüfmaschine Zwick Röll (Programm ist dem Anhang 9.7 zu entnehmen). Nachdem die vorgeschädigten Verbundgläser in die Vier-Punkt-Biegeversuchsapparatur eingebaut waren, wurden die Lastschneiden, die mit der

Traverse der Universalprüfmaschine gesteuert werden, kontrolliert bis zum Kontakt weggesteuert mit 10 mm/ min abgelassen. Der Kontakt wurde durch einen Widerstand der größer als 2 N ist automatisch von der Prüfmaschine identifiziert. Anschließend wurde die Traverse mit einer Geschwindigkeit von 0,3 mm/ min nach unten gefahren, sodass sich im Verbundglas sehr langsam eine Spannung, die nur zum Bruch der zu den Lastschneiden abgewandten Glasscheibe führte, aufbaute. Der Bruch wurde automatisch bei einem 10%igen Kraftabfall erkannt, woraufhin die Traverse wieder ihre Ausgangsposition einnahm.

- Drehen der Probe
- Brechen der zweiten Glasscheibe in der Universalprüfmaschine Zwick Röll und anschließende TCB Prüfung mit verschiedenen Laststufen, siehe Abbildung 4-23, Abbildung 4-24 und Programm im Anhang 9.7. Der zweite Bruch erfolgte analog zum ersten Bruch (10 mm/min bis zum Kontakt, bis ein Widerstand von 2N registriert wurde, dann mit 0,3mm/min bis zum Bruch, der mit einem Kraftabfall von 10% identifiziert wurde). Sobald der zweite Bruch des Probekörpers eintrat, begann der TCB Test.

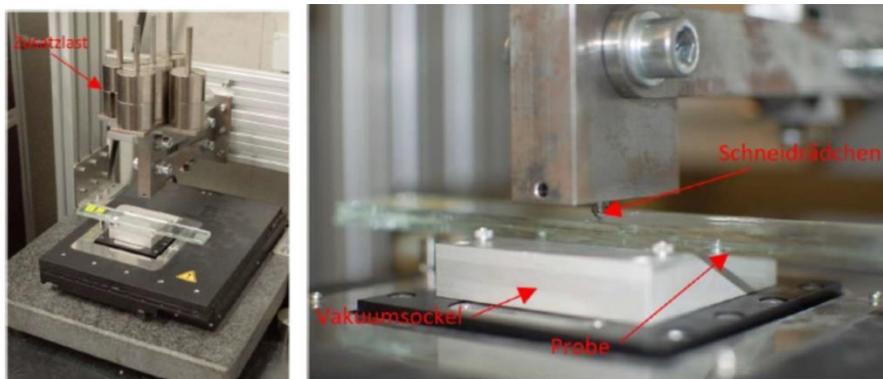


Abbildung 4-22 links: Probe im Universal Surface Tester, rechts: Vorschädigung im Universal Surface Tester

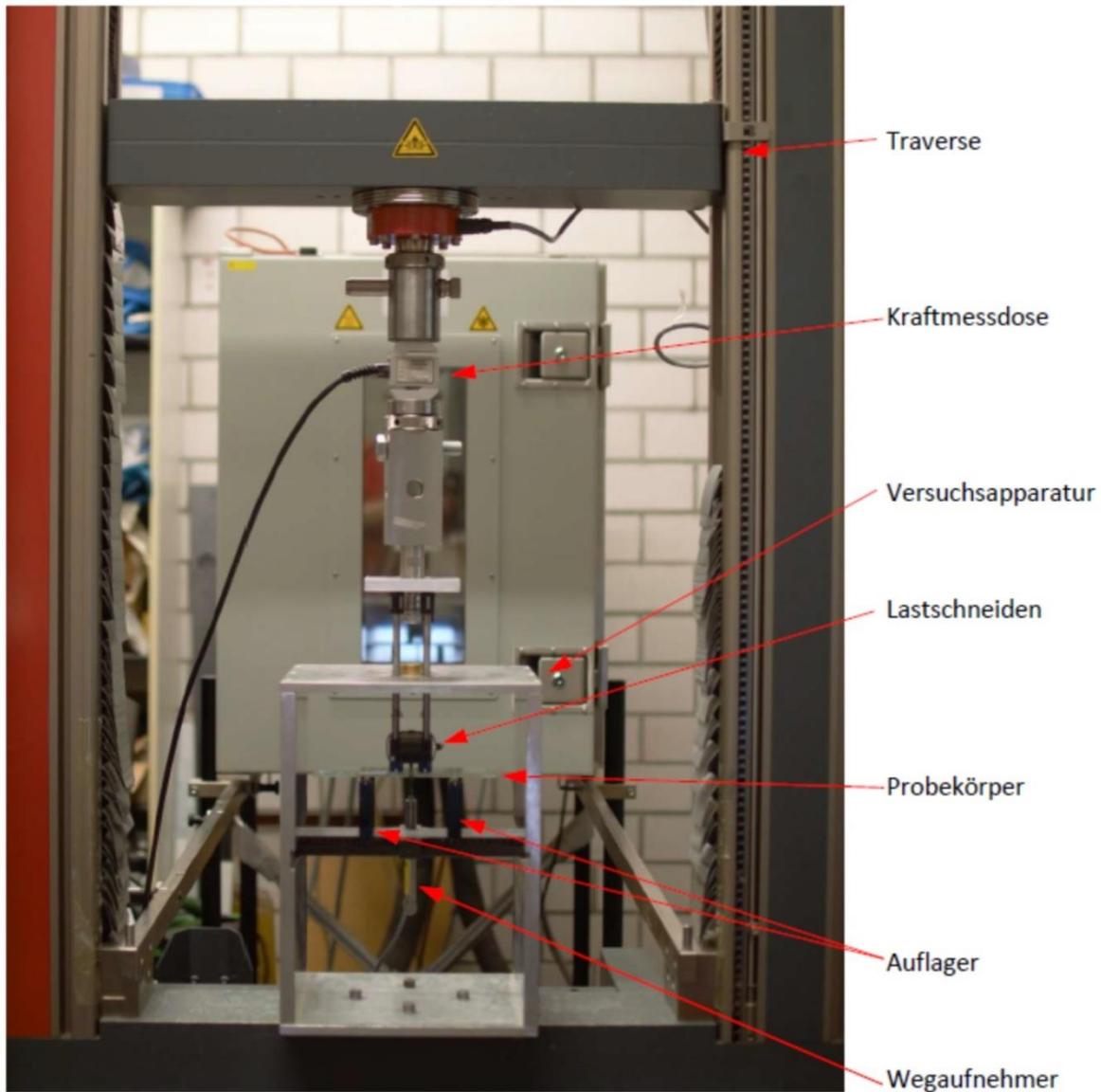


Abbildung 4-23 Aufbau des 4 Punkt-Biegeversuchs

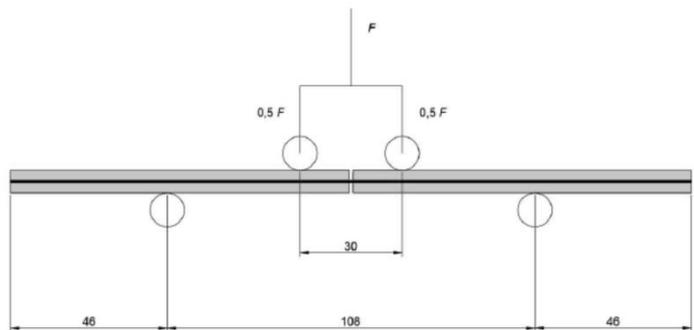


Abbildung 4-24 links: Probe im 4-Punktbiegeversuch, rechts: Skizze mit Abmessungen

Während der gesamten Versuchsdauer wurden die Kraft mit einer Kraftmessdose (Typ S2M, HBM) und die Verformung mit einem Wegaufnehmer(Typ WA-L, HBM). Die Kraftmessdose war zwischen

der Traverse der Universalprüfmaschine und der Vierpunktbiege-Versuchsapparatur eingebaut. Der Wegaufnehmer war mittig am Verbindungsstück der Lastschneiden angebracht und hat somit den Verfahrweg der Lastschneiden gemessen. Dieser Weg entspricht der Probenverformung unterhalb der Lastschneiden. Die Verformung in Feldmitte ergibt sich für das statische System zu:

$$w = \frac{54}{39} w_{\text{wegaufnehmer}} \sim 1,4 w_{\text{wegaufnehmer}}$$

Dies ist grafisch in Abbildung 4-25 dargestellt.

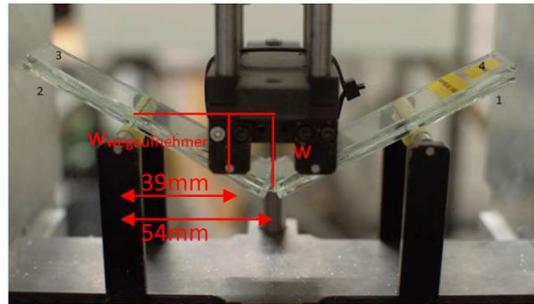


Abbildung 4-25 Probe im verformten Zustand, Verformung in Feldmitte in Abhängigkeit des gemessenen Weges

### Ermittlung der Belastung

Das statische System des kleinen Vierpunkt-Biegeversuches ist in Abbildung 4-24. dargestellt. Die Stützweite (108mm) wurde so gewählt, dass das Eigengewicht der Probe einen möglichst geringen Einfluss hat.

Die Belastung wurde in vier Stufen aufgebracht, wobei eine Stufe jeweils einen Zeitraum von einer Stunde abdeckte. Die maximale Stufe orientiere sich an den Großteilversuchen aus Kapitel 4.1.

Um die Ergebnisse der Kleinproben mit den Bauteilversuchen vergleichbar zu machen, wurde die letzte Belastungsstufe so gewählt, dass eine vergleichbare Zugspannung in der Folie entsteht. Durch die Geometrie der Bauteilversuche (6mm FG – 0,76mm ZS – 6mm Floatglas) und das gewählte statische System entsteht für die gewählte Belastung von 40N ein Biegemoment von 5000 Nmm in Feldmitte. Die Zugkraft in der Folie kann durch die Berücksichtigung des Hebelarms (6,38mm = 6mm FG + 0,5x0,76mm ZS) zu 786,70 N errechnet werden. Da der Folienquerschnitt 273,6mm<sup>2</sup> beträgt (360mm x 0,76mm), entspricht dies einer Zugspannung von ca. 2,90 MPa.

Um diese Spannung auch in den Kleinproben (3mm FG – 0,76mm ZS – 3mm FG. Hebelarm = 3,38mm) mit dem entsprechenden statischen System zu erhalten, ist eine äußere Last von 11,32N erforderlich.

Die vier Laststufen betragen:

- 1,5 N (1h)
- 3N (1h)
- 6N (1h)
- 11,83N (1h)

### Ermittlung der Abbruchbedingung

[3] ermittelte die maximale zulässige Durchbiegung in Feldmitte anhand eines Durchbiegungs-Stützweitenverhältnisses, welches darauf basiert, dass die Probe bei Erreichen einer bestimmten Durchbiegung von den Auflagern rutscht. Dabei wird von dem Mindesteinstand von 15 mm ausgegangen. [3] legt fest, dass die Lasteinleitung der Plattenlagerung ein Drittel des Glaseinstandes beträgt.

Das kritische Durchbiegung-Stützweitenverhältnis beträgt demnach:

$$\frac{w}{l_s} = 0,0967$$

Wobei:  $w$  = Durchbiegung in Feldmitten und  $l_s$  = Stützweite

Für das vorliegende statische System der Kleinproben ergibt sich somit eine maximal zulässige Verformung von 10,44 mm ( $l_s=108$ mm).

In Voruntersuchungen zeigte sich jedoch, dass diese Grenzverformung in wenigen Sekunden/Minuten erreicht wird. Der er Traversenweg der Lastschneiden in den Vorversuchen erreichte stets Werte um 15-20mm. Daher wurde beschlossen, die maximal zulässige Verformung zu erhöhen und den maximalen Traversenweg auf 30mm (Verformung in Feldmitte ~41,54mm) zu beschränken.

#### 4.2.3 Versuchsauswertungsmethoden

Abbildung 3-25 und Abbildung 3-26 zeigen die Verformung-Zeit Verläufe der durchgeführten TCB Versuche. Die maximalen Verformungen am Ende jeder Laststufe (LS) sind ebenfalls in den Abbildungen dargestellt, wobei die Werte von kleiner nach großer Verformung aufsteigend sortiert sind. Die unterschiedlichen Farben entsprechen dabei den verschiedenen Probenotypen.

Lediglich der Probenotyp „RB High Moisture“ erreicht das Ende der vier Laststufen in beiden Durchläufen. Alle anderen Proben haben bereits davor den maximalen Weg von 30mm erreicht. Einige der Proben wiesen zusätzlich bei Erreichen der Abbruchbedingung einen Riss (Abbildung 4-29) auf.

Bei den angegebenen Verformungen handelt es sich um die Traversenwege der Lastschneiden. Die Verformungen der Probe in Feldmitte können mittels  $1,4w_{\text{wegaufnehmer}}$  errechnet werden.

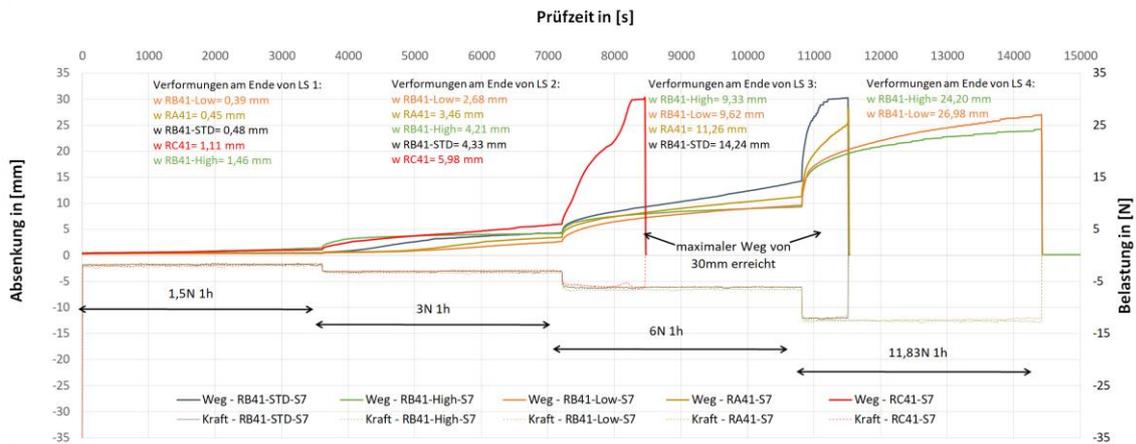


Abbildung 4-26 Verformungs-Zeit Kurven für alle Laststufen – 1. Durchlauf

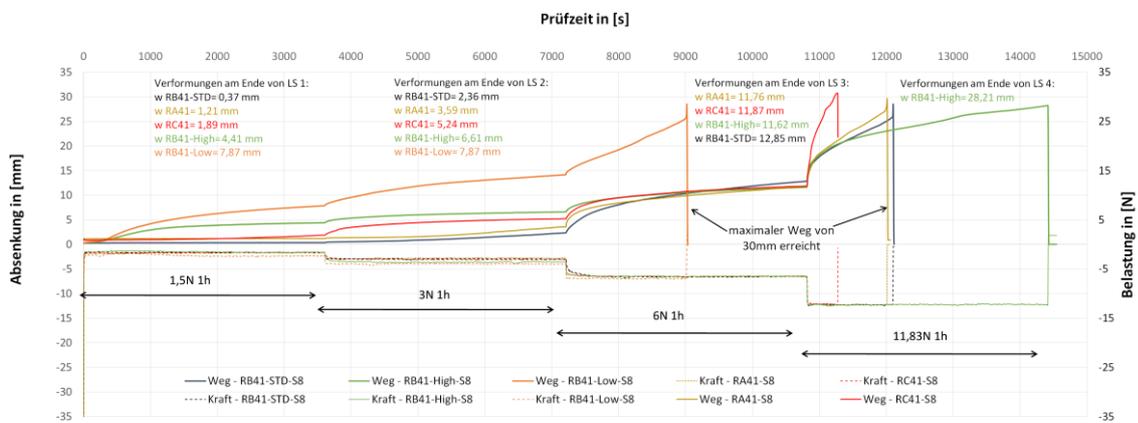
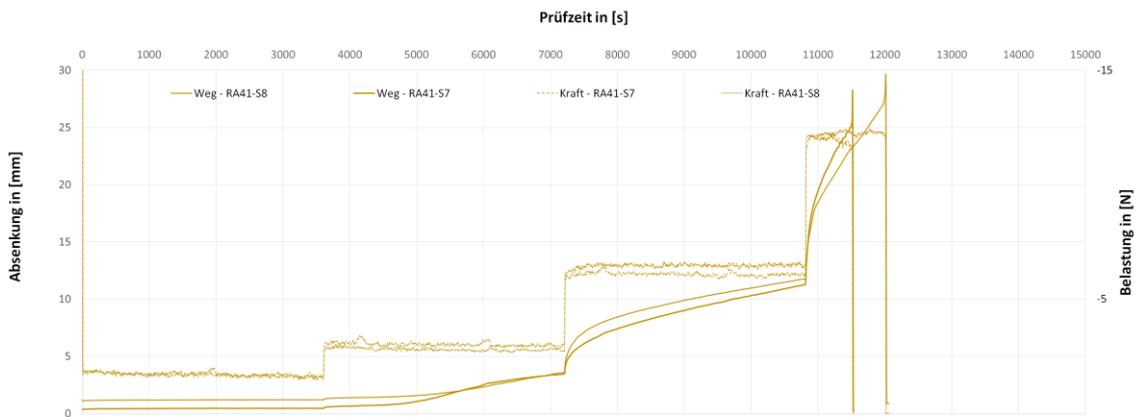


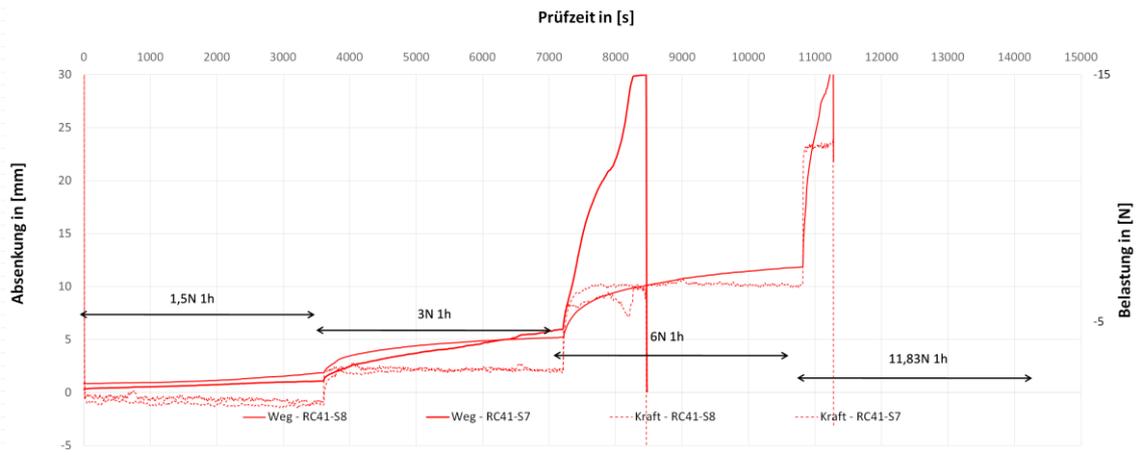
Abbildung 4-27 Verformungs-Zeit Kurven für alle Laststufen – 2. Durchlauf

Zusätzlich ist festzuhalten, dass kein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen Verformung und Folientyp festgestellt werden konnte, siehe Abbildung 4-28. Vor allem der Probentyp „RB Low Moisture“ zeigt in beiden Durchgängen große Unterschiede im Verhalten.

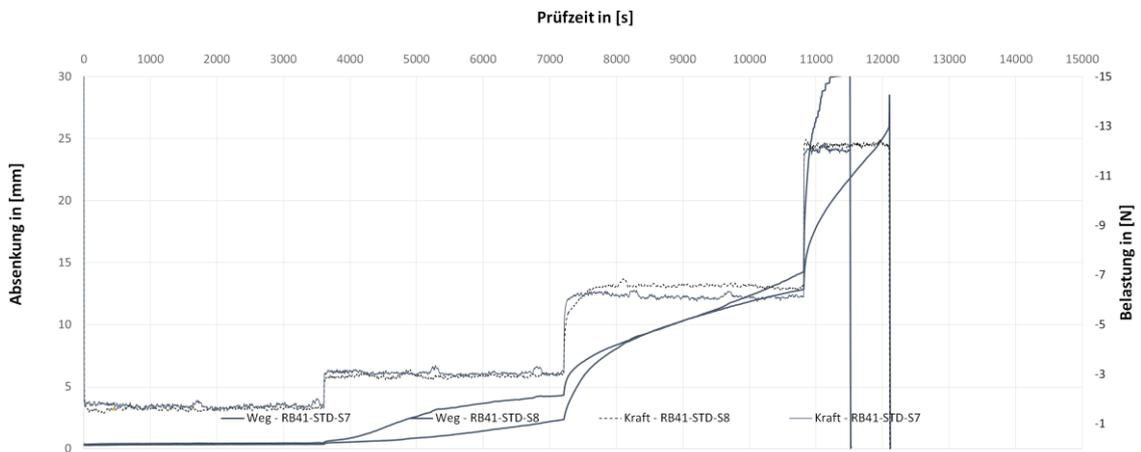
a)



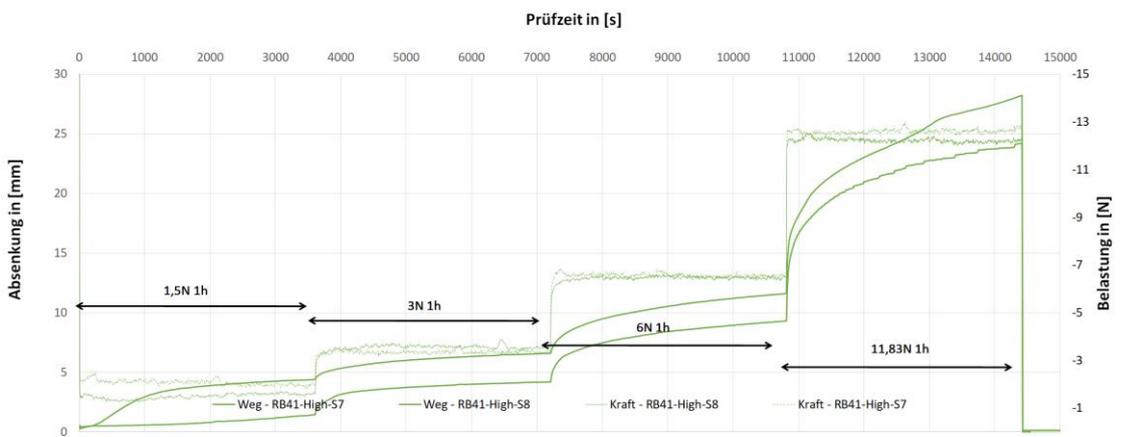
b)



c)



d)



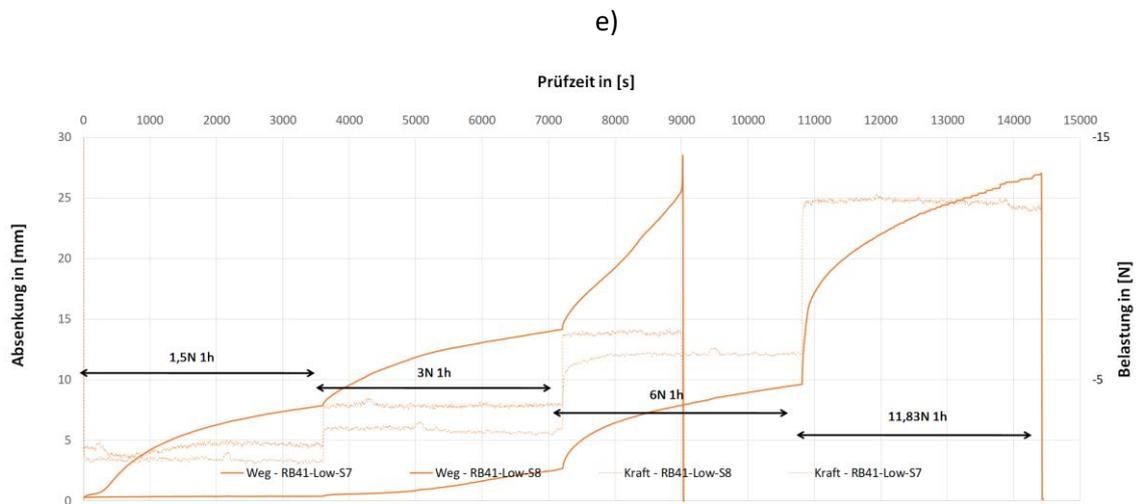


Abbildung 4-28 Verformungs-Zeit Kurven für alle Laststufen – 1 und 2. Durchlauf a) RA, b) RC, c) RB STD, d) RB HM, e) RB LM

Neben den Verformungs-Zeitverläufen wurde auch die delaminierte Fläche nach Versuchsende ausgewertet. Dazu wurden die Proben im Anschluss an den TCB Versuch vor einem unifarbene Hintergrund fotografiert. Die Auswertung der delaminierten Fläche erfolgte digital mittels MatLab, wobei der Maßstab Pixel/cm durch die tatsächlichen Probenbreiten ermittelt wurde.



Abbildung 4-29 Risse nach Versuchsende. Links: erster; rechts: zweiter Durchgang

Durch manuelles Nachzeichnen der Delaminationsfront werden die Grenzen der delaminierten Flächen definiert. MatLab wandelt nach Fertigstellung dieser Grenzen das Farbbild in ein binäres Bild um. Dabei stellt die weiße Fläche die delaminierte Fläche und die schwarze Fläche den übrigen nicht delaminierten Probekörper dar, siehe Abbildung 4-30. Der verwendete MatLab Code kann dem Anhang 9.8 entnommen werden. Alle ausgewerteten Delaminationsflächen können dem Anhang 0 entnommen werden.

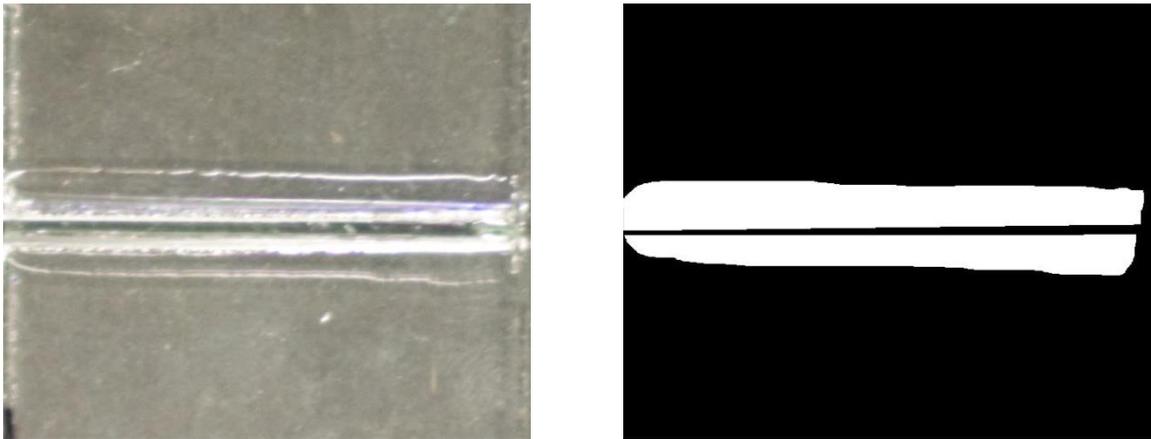


Abbildung 4-30 Exemplarische Auswertung der delaminierten Fläche

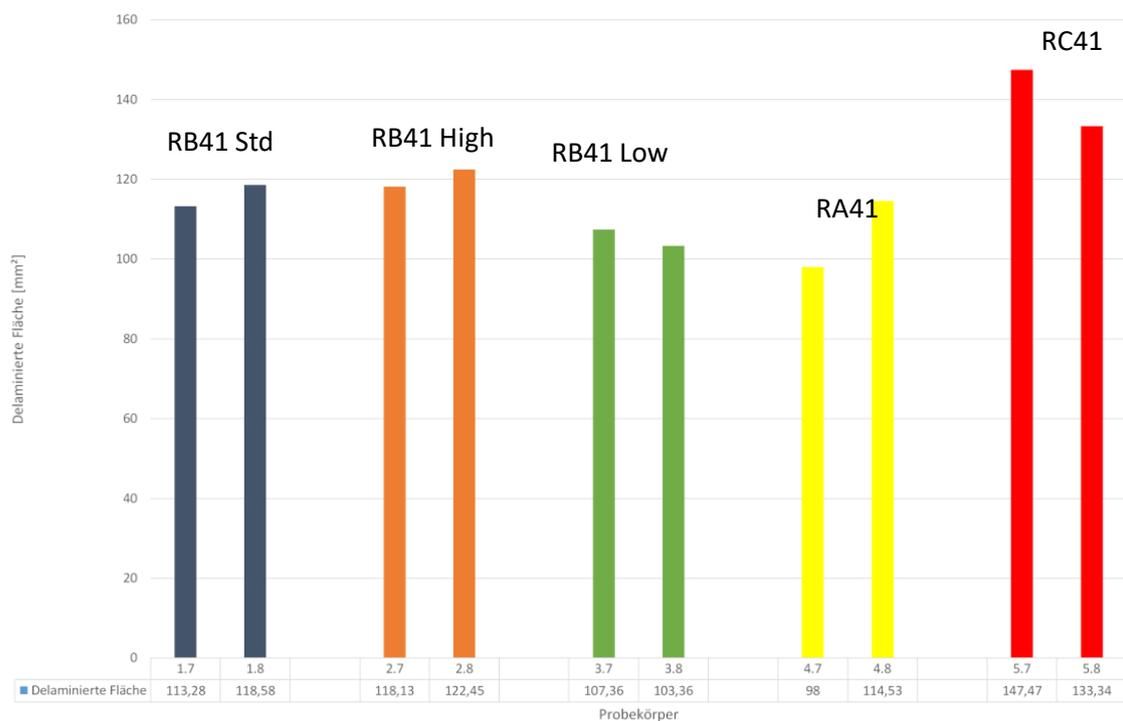


Abbildung 4-31 Delaminierte Flächen aller Proben

Abbildung 4-31 fasst die Ergebnisse der delaminierten Flächen zusammen. Die delaminierte Flächen RB41 High (high Moisture) sind nur geringfügig höher als die der RB41 STD. Die Delaminationsfläche der RB41 Low (Low Moisture) weist die geringsten Werte auf. Die Delaminiationsflächen der RA und RC Proben weisen die größten Werte auf.

#### 4.2.4 Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen-

- Masterthesis: Fabian Rieß 2020:  
Untersuchungen zur Haftung und zum Resttragverhalten von gebrochenem Verbundsicherheitsglas

### 4.3 Pendelschlagversuche

Ergänzend zu den TCB-Versuchen (vgl. Kapitel 4.1) werden ebenfalls an VSG aus grobbrechenden Gläsern (Float) und einer Zwischenschicht aus Standard PVB (Firma kuraray), Resttragfähigkeitsversuche durchgeführt. Als Versuchsaufbau wurde ein modifizierter Pendelschlagversuch konzipiert, in dem das Verbundglas vor dem „Pendeln“ gezielt durch eine Bohrung vorgeschädigt wird. Dazu wurde als Probekörper (PK) ein Verbundglas mit den Abmessungen von 1.938 mm x 876 mm gewählt. Die Versuche innerhalb dieses Kapitels wurden an Standard-PVB der Firma *kuraray* (Typ *Trosifol Clear*) durchgeführt.

#### 4.3.1 Zielsetzung

Das Ziel ist die Schaffung eines einfachen Versuchs zur Quantifizierung der Resttragfähigkeit unter dynamischer Einwirkung. Der Pendelschlagversuch nach [2] wird dafür so modifiziert, dass man anhand des Versuchs das Resttragverhalten einer VSG-Scheibe unter dynamischer Belastung abschätzen kann. Die Scheibe wird dafür gezielt mit einer Bohrung im Kreuzungspunkt ihrer Diagonalen vorgeschädigt. Der Durchmesser der Bohrung beträgt dabei 20 mm. Der Auftreffpunkt des Doppelreifens liegt im Zentrum der Bohrung, sodass diese der Auftrefffläche des Pendels einbeschrieben ist.

In Kapitel 4.3 wird zunächst ausschließlich PVB mit einem mittleren Haftgrad (kuraray: Trosifol Clear, R 15) verwendet. Es werden dabei einige Parameter variiert, um die bestmögliche Kombination für die Übertragung auf andere Zwischenschichttypen zu ermitteln. Glasdicke (6 mm), Haftgrad (mittel) und Prüftemperatur (23 °C) wurden dabei bereits im Rahmen der TCB-Tests entsprechend festgelegt, sodass in diesem Kapitel lediglich die Fallhöhe des Pendels variiert wird.

#### 4.3.2 Versuchsübersicht

Die Fallhöhe des Pendels wird gemäß [2] gewählt. Beginnend mit der geringsten Fallhöhe, wird diese so lange erhöht bis es zu einem klar definierbaren Bruchbild kommt. Der Bohrungsdurchmesser beträgt dabei 20 mm.

Tabelle 38 Versuchsparameter Pendelschlagversuche

Anzahl [-]	Pendelfallhöhe [mm]
1	450
2	1200

## 4.3.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Aufbau entspricht, wie bereits beschrieben, den Vorgaben gemäß [2] (vgl. Abbildung 2-2 und Abbildung 4-32). Die Versuche wurden im Labor des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Die Temperatur lag im Schnitt bei  $22 \pm 0,5 \text{ °C}$  und die relative Luftfeuchtigkeit bei  $47 \pm 1 \text{ %}$ . Der Luftdruck des Stoßkörpers betrug je Reifen  $0,33 \text{ MPa}$ .

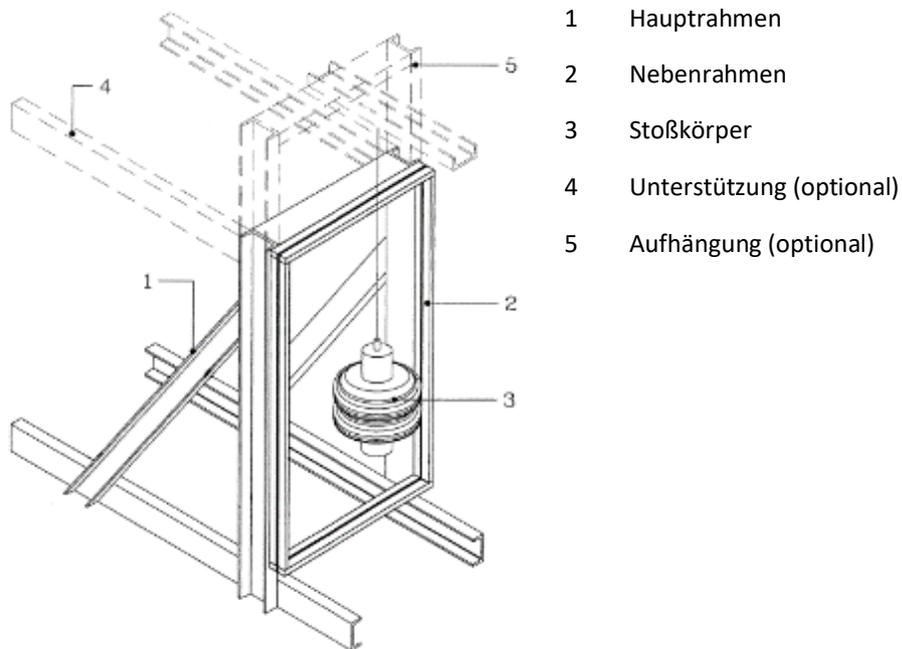


Abbildung 4-32 Prüfraumen mit Stoßkörper nach DIN EN 12600

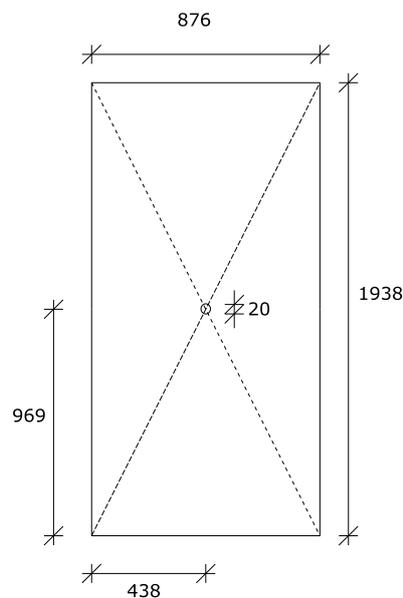


Abbildung 4-33 Probekörper für den Pendelschlagversuch mit einer entsprechenden Bohrung in den Kreuzungspunkten der Diagonalen, Einheiten [mm]

Die Bohrungen wurden mit einem entsprechenden Diamanthohlbohrer mit Industriestandard und einer Magnetbohrmaschine der Firma Fein (Abbildung 4-34) ausgeführt. Die Drehzahl des Bohrers wurde dabei auf 250 Umdrehungen pro Minute begrenzt.



Abbildung 4-34 Exemplarische Darstellung des Diamanthohlbohrer, Durchmesser 20 mm (links) und der Magnetbohrmaschine (rechts)

Zur Durchführung des Versuchs wurde das Einfachglas zuerst von einer Seite und dann von der anderen Seite gebohrt, um zu verhindern, dass das Glas bricht. Anschließend wurde das Glas in den Pendelrahmen eingebaut und mit der gewählten Fallhöhe gependelt.

#### 4.3.4 Versuchsauswertung

Die Auswertung ist ebenfalls an der EN 12600 orientiert, wobei zusätzlich eine genaue Untersuchung der Rissausbreitung sowie des Bruchbildes stattfindet. Der Einschlag des Pendels wurde dafür mit einer High-Speed-Kamera aufgezeichnet.

##### a) Auswertung Bruchbild

In Abbildung 4-36 sind die Bruchbilder für eine Pendelfallhöhe von 450 mm und 1200 mm zu sehen. Es ist festzustellen, dass das Bruchbild mit der Fallhöhe 1200 mm eine Verfeinerung des Bruchbildes mit der Fallhöhe von 450 mm darstellt. Dies ist auf den Energieeintrag des Stoßkörpers zurückzuführen. Es entstehen in beiden Fällen zahlreiche Risse. Bei einer Fallhöhe von 1200 mm bilden sich im Bereich der Bohrung radial linienförmige Öffnungen im Prüfkörper. Eine Kugel mit einem Durchmesser von 76 mm unter Anwendung einer maximalen Kraft von 50 N (gemäß Anhang A [2], allerdings hier nur 25 N) passt nicht hindurch. Bei beiden Pendelfallhöhen fallen keine Glasbruchstücke herunter. Es fallen lediglich Glassplitter auf beiden Seiten während des Aufpralls des Stoßkörpers herunter, welche jeweils ein Gewicht von 0,5 bis 2 g aufweisen.

##### b) Auswertung horizontale Verformung in Feldmitte

Weiterhin wurde die horizontale Verformung  $w_h$  des PK mittig des Aufprallbereiches gemessen. Für die Fallhöhe 1200 mm liegt diese reproduzierbar bei  $w_h = 8 \text{ cm}$ .

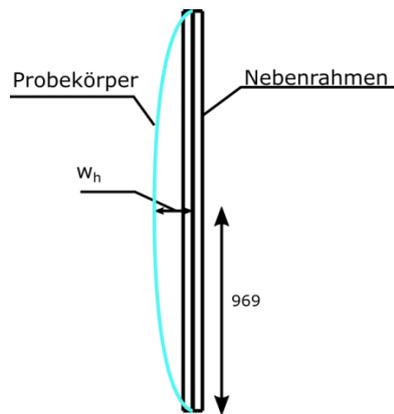


Abbildung 4-35 Seitenansicht Nebenrahmen, Messen der horizontalen Verformung in Feldmitte



Abbildung 4-36 Bruchbilder nach Pendelschlag, links: 450 mm Fallhöhe, rechts: 1200 mm Fallhöhe

### c) Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Die Vorschädigung des Glases mit einer Bohrung in den Kreuzungspunkten der Diagonale führt zu einem reproduzierbaren Bruchbild. Es besteht keine Gefahr von herabfallenden Glasbruchstücken. Die horizontale Verformung im Aufprallbereich kann neben dem Bruchbild zur Beurteilung der Resttragfähigkeit herangezogen werden.

## 5 AP4: Übertragen auf Zwischenschicht

### 5.1 Unterschiedliche Materialeigenschaften

Die meist verwendeten Zwischenschichten im Bauwesen sind Polyvinyl-basiert (z.B. von Eastman, Kuraray und Everlam). Dabei wird meist zwischen Standard-PVB, Strukturellem und Akustik-PVB unterschieden. Im Wesentlichen entschieden diese Typen im Gehalt des Weichmachers. Ein geringer Weichmachergehalt verschiebt die Glasübergangstemperatur im Vergleich zum Standard PVB (ca. bei Raumtemperatur) zu höheren Temperaturen (ca. 50°C) und ein höherer Weichmachergehalt zu niedrigeren Temperaturen (ca. 5°C). Zudem handelt es sich bei manchen Akustikzwischenschichten um Multilayer mit steiferen Deckschichten und einem sehr weichen Kern. Bei PVB handelt es sich um einen amorphen Thermoplast. PVB-Zwischenschichten sind somit unvernetzt und schmelzbar. Zudem verhält sich PVB im baupraktisch relevanten Bereich weitestgehend thermorheologisch einfach, sodass das zeit- und temperaturabhängige Materialverhalten bei kleinen Verformungen mittels Prony-Reihe und Zeit-Temperaturverschiebungsprinzip beschrieben werden kann. Diese sind z.B. in allgemein bauaufsichtlichen Zulassungen vermerkt. Bei Überschreiten der Linearitätsgrenzen (große Verformungen) verändert sich das Materialverhalten und es müssen hyperelastisch und /oder nichtlinear viskoelastische Modelle herangezogen werden.

Andere verfügbare Zwischenschichten sind beispielsweise Ethylenvinylacetat (z.B. von Glaast, Folienwerk Wolfen,..) und Ionoplast (Sentryglas). EVA wird den Elastomeren und Sentryglas den teilkristallinen Kunststoffen zugeordnet. Es konnte gezeigt werden [79], dass EVA teilkristalline Phasen aufweist. Gleiches gilt für Sentryglas. Demnach tritt bei diesen Zwischenschichten themorheologisch komplexes Materialverhalten auf. Im Gegensatz zu PVB liegen werden hier in den allgemein bauaufsichtlichen Zulassungen nur Tabellen mit konkreten Schubmodulwerten für verschiedene Belastungssituationen angegeben. Für beide Materialien liegen in der Literatur deutlich weniger Forschungsergebnisse vor.

Die Reißdehnung und Bruchspannung der Folien werden im uniaxialen Zugversuch ermittelt.

Abbildung 5-1 stellt exemplarisch die Glasübergangstemperaturen verschiedener Folienarten gegenüber. Bruchspannung, Reißdehnung, Steifigkeiten usw. sind z.B. [31, 80, 81] oder den technischen Datenblätter der Hersteller zu entnehmen.

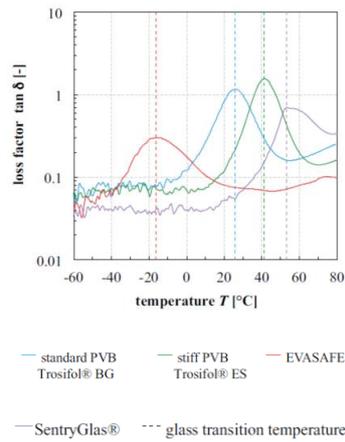


Abbildung 5-1 Glasübergangstemperaturen von PVB, EVA und Sentryglas, aus [82]

### 5.2 Pummeltest an Kleinproben

Neben den PVB Proben wurden auch EVA Proben untersucht. Dabei wurden zwei unterschiedliche Lagerungstemperaturen betrachtet. Die erste Lagerungstemperatur entspricht den üblichen  $-18^{\circ}\text{C}$  und die zweite wurde zu  $-50^{\circ}\text{C}$  gewählt. Die Wahl dieser Temperatur wird damit begründet, dass EVA eine Glasübergangstemperatur von  $\sim -20^{\circ}\text{C}$  besitzt. Da die Foliensteifigkeit bei Temperaturen über der Glasübergangstemperatur deutlich abnimmt und dadurch beim Pummeln die Glasstücke in die Folie gedrückt werden, was das Pummelbild verfälscht. Es wird vermutet, dass bei  $-50^{\circ}\text{C}$  die Probe so kalt ist, dass bis zum Vollenden des Pummels die Glasübergangstemperatur nicht überschritten wird.

Tabelle 39 Versuchsmatrix Pummeltest an Kleinproben mit EVA

Versuchsreihe	Folientyp	Pummelvorgang	Lagerungstemperatur	Anzahl an Versuchen
3	EVA Glaast (keine genauere Angaben)	Pummelapparat	$-18^{\circ}\text{C}$	3
	EVA Glaast (keine genauere Angaben)	Pummelapparat	$-50^{\circ}\text{C}$	3

Die Pummelwerte sind deutlich niedriger ausgefallen als erwartet, siehe Tabelle 40. Bei genauerem Betrachten (Abbildung 4-26) fällt auf, dass die Proben unzureichend gepummelt wurden. Es ist jedoch eine leichte Tendenz zu erkennen, dass bei tieferer Lagerungstemperatur, niedrigere Pummelwerte erzielt werden.

Tabelle 40 Automatisierte Pummelklassifizierung mit der neuen Pummelskala, 100 pixels/cm, Offset Distanz 10, Bildausschnitt 6x4 cm, 1cm Randabstand

	Bildname	Pummel aus Kontrast	Pummel aus Korrelation	Pummel aus Homogenität	Mittelwert	Gerundet
EVA -18°C	1_1	3,9	3,95	4,5	4,12	4
	1_2	3,63	3,67	4,43	3,91	4
	1_3	4,05	4,02	4,5	4,19	4
EVA -50°C	2_1	2,11	2,23	3,44	2,59	3
	2_2	3,02	3,02	3,97	3,34	3
	2_3	3,66	3,67	4,23	3,85	4

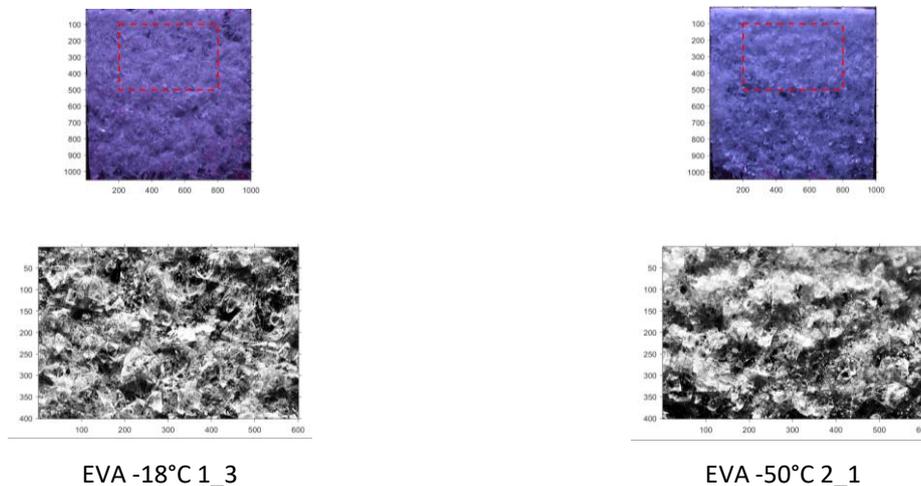


Abbildung 5-2 exemplarische Ergebnisse der EVA Proben

Um eine allgemeinere Aussagen treffen zu können ist eine höhere Probenanzahl erforderlich. Zudem sollte der Pummelapparat zuvor verbessert werden, damit sichergestellt wird, dass die Proben ausreichend gepummelt wurden.

### 5.3 Pummeltest an Großproben

Die Tests wurden manuell durchgeführt, nachdem die größeren Scheibendicken ein "Pummeln" mit dem Pummelapparat nicht ermöglichen.

#### 5.3.1 Zielsetzung

Ziel dieser Versuche ist es den Ergebnissen aus den TCB-Großteilversuchen entsprechende Pummelwerte zuzuweisen und dadurch eine Verbindung zwischen beiden Tests herstellen zu

können. Es sollen letztlich aus dem Haftgrad, der aus den Pummeltests bestimmt wird, Rückschlüsse auf die Resttragfähigkeit gezogen werden können.

### 5.3.2 Versuchs- und Probekörperübersicht

Alle Versuche (Tabelle 41) wurden an Probekörpern symmetrischer VSG-Aufbauten mit Zwischenschichtdicken von 0.76 mm vom Typ EVA und SentryGlas durchgeführt.

Tabelle 41 Versuchsmatrix Pummeltest an Großproben

Anzahl [-]	Glasdicke [mm]	Zwischenschicht	Prüftemperatur [°C]	Lagerungstemperatur [°C]
2	6	EV200	23	-18
1		EV100		
2		SentryGlas		23

### 5.3.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau, sowie die -durchführung entsprechen dem Abschnitt 3.3. Lediglich die Lagerungstemperatur liegt für SentryGlas bei 23 °C (siehe Tabelle 41). Die Lagerungstemperatur der EVA Proben betrug -18°C, da tiefere Temperaturen (unterhalb der Glasübergangstemperatur) nicht realisiert werden konnten.

### 5.3.4 Versuchsauswertung

Es konnte festgestellt werden, dass mit der Glasdicke der Pummelvorgang und die Bewertung der Probekörper nicht möglich war. Der hohe Energieeintrag, um das Glas mit dem Hammer zu brechen, führte zum Einreißen der Zwischenschichten. Zusätzlich bildeten sich große Glasbruchstücke, welche sich nicht weiter zerstören ließen, ohne ein Reißen der Zwischenschicht hervorzurufen, was in teilweise sehr unregelmäßigen Pummelbildern resultierte (siehe Abbildung 5-3).



Abbildung 5-3 Beispielhafte Pummelergebnisse für EVA (links) und SentryGlas (rechts)

Es konnte daher weder eine visuelle noch eine automatisierte Pummelklassifizierung erfolgen. Es wird daher empfohlen den Pummeltest ausschließlich an Kleinproben durchzuführen.

## 5.4 TCB – Test: Großteilversuche

### 5.4.1 Zielsetzung

Die in Kapitel 4.1 an VSG mit einer Zwischenschicht aus PVB erörterten Versuchsparameter werden entsprechend auf VSG mit anderen Zwischenschichten angewendet. Es werden dabei Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA der Firma Glaast) und ein Ionoplast (SentryGlas der Firma Kuraray) untersucht.

### 5.4.2 Versuchsübersicht

Der Haftgrad der Zwischenschichten innerhalb dieses Kapitels wurde nicht gesondert eingestellt. Aufgrund des hohen Haftgrades der Folien, trat bei den ersten beiden Versuchen mit versetztem Riss (vgl. Tabelle 42) ein Glasbruch auf, weshalb die weiteren Versuche mit koinzidentem Riss durchgeführt wurden (vgl. Tabelle 43).

Tabelle 42 Versuchsmatrix – versetzter Riss

Anzahl [-]	Zwischenschicht	Temperatur [°C]	Lastniveau [N]
2	Daylight (EV200)	23	240

Tabelle 43 Versuchsmatrix – koinzidenter Riss

Anzahl [-]	Zwischenschicht	Temperatur [°C]	Lastniveau [N]	Lastaufbringung
1	Daylight (EV200)	23	40	konstant
3	Secure (EV 100)	23	40	konstant
3	SentryGlas	23	40	konstant
3	SentryGlas	23	40, 80	stufenweise

### 5.4.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung entsprechen dem Abschnitt 4.1.4, um, unter Voraussetzung der Vergleichbarkeit, die Validität des TCB-Tests für andere Zwischenschichttypen zu untersuchen.

Für die PK 4, 5 und 6 mit SentryGlas wurde zusätzlich ein Lastniveau von 80 N untersucht. Die Testdurchführung dieser PK erfolgte wie folgt:

1. Konditionieren des PK auf die entsprechende Temperatur
2. Anritzen beider Scheiben des PK mit Glasschneider und Schneidlineal

3. Einlegen des PK in die Versuchseinrichtung und Brechen der oberen Scheibe mittels Zylinder mit einer Traversengeschwindigkeit von 5 mm/min (lagegeregelt), anschließend Entlasten des PK
4. Umdrehen des PK in der Versuchseinrichtung mit der gebrochenen Scheibe nach unten
5. Brechen der oberen Scheibe mittels Zylinder mit einer Traversengeschwindigkeit von 5 mm/min (lagegeregelt), anschließend Entlasten des PK
6. Anfahren der Prüflast,  $F_M$ , mit einer Geschwindigkeit von 5 N/s (kraftgeregelt)
7. Halten der Last von 40 N (kraftgeregelt) bis zum Versagen oder für mind. 24 Stunden und kontinuierliche Messung der Verformung an mehreren Stellen.
8. Halten der Last von 80 N (kraftgeregelt) bis zum Versagen oder für weitere mind. 24 Stunden und kontinuierliche Messung der Verformung an mehreren Stellen.

Die getesteten VSG-Scheiben bestehen aus zwei Scheiben mit einer Nenndicke von 6 mm und einer Zwischenschicht mit einer Nenndicke von 0,76 mm. Die Zwischenschichten sind immer zur Zinnseite der Gläser angeordnet.

#### 5.4.4 Versuchsauswertung

##### **Koinzidenter Riss**

Für die folgenden Auswertungen wurden dieselben Annahmen wie für PVB im Abschnitt 4.1.5 getroffen. Die Delamination konnte auch hier nicht über die Zeit erfasst werden. Im Vergleich zu PVB konnte für die PK 4, 5 und 6 mit SentryGlas ein koinzidenter Riss mittels beidseitigem Brechen mit Zylinder sichergestellt werden (siehe Abbildung 5-4).



Abbildung 5-4 koinzidenter Bruch, maschinell erzeugt

## a) Auswertung der Gesamtverformung

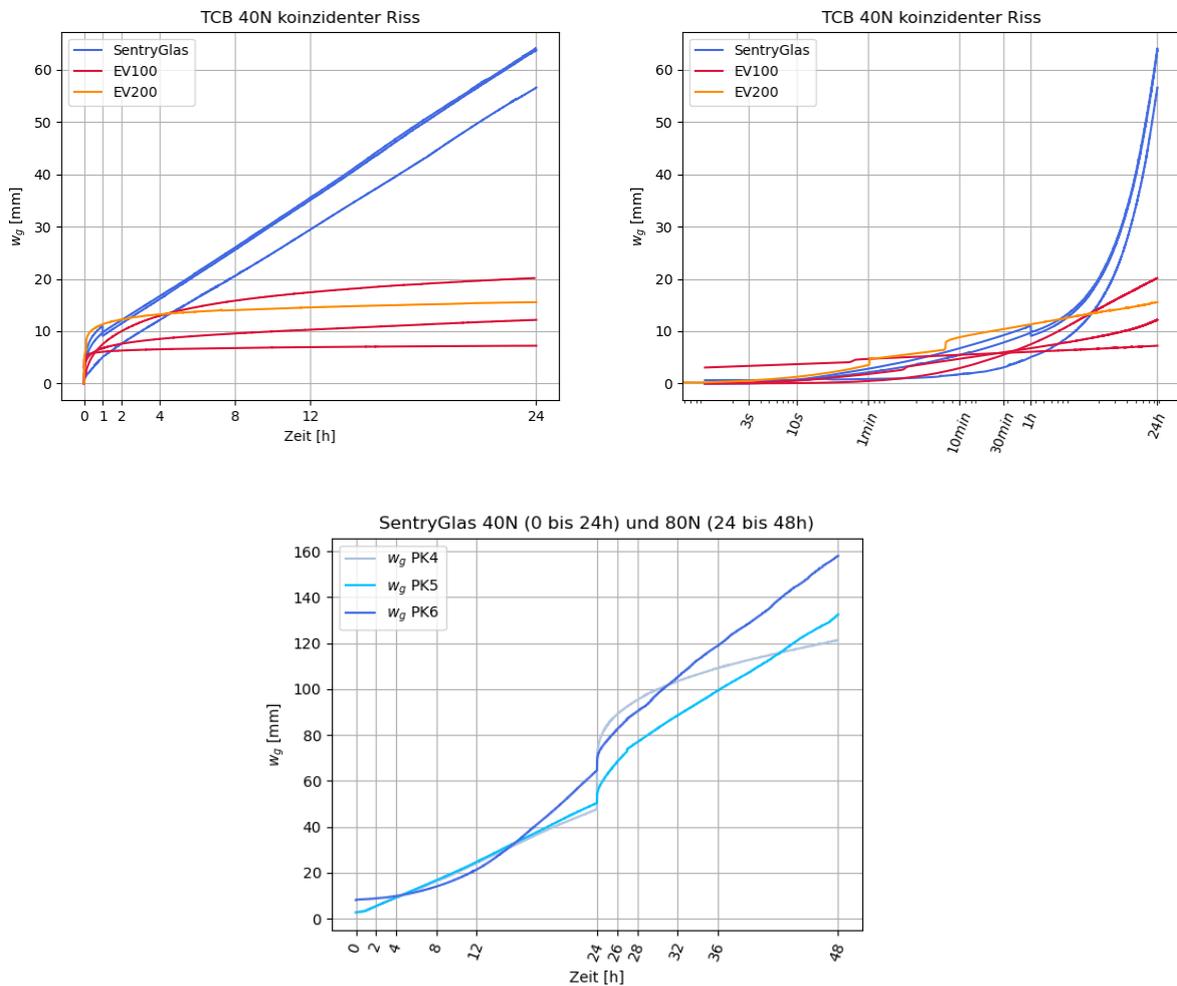


Abbildung 5-5 Versuchsergebnisse TCB-Versuch mit koinzidentem Riss

Die Folien weisen innerhalb der ersten Stunde des Versuchs eine ähnliche Verformung auf. Erst im Zeitraum zwischen einer Stunde bis 24 Stunden ist bei der Zwischenschicht SentryGlas eine deutlich größere Verformung im Vergleich zu EVA festzustellen. Dennoch liegen die Verformungen deutlich unter der Verformung mit der Zwischenschicht aus Standard PVB (vgl. Abbildung 4-6). Bei den PK 4, 5 und 6 mit SentryGlas (Abbildung 5-5) wurde die Last stufenweise nach 24 Stunden auf 80 N erhöht. Die Verformung steigt bei den PK 5 und 6 nahezu linear weiter an, während sich der PK 4 nichtlinear verformt. Dies lässt auf ein unterschiedliches Delaminationsverhalten schließen.

## b) Auswertung der delaminierten Flächen

Die Berechnung der delaminierten Flächen erfolgte über eine optische Auswertung mittels Python. In Abbildung 5-6 ist exemplarisch das für die Auswertung der delaminierten Flächen eingebrachte Eindringmittel zu sehen. Es ist bereits beim manuellen Brechen vor dem Versuch festzustellen, dass im Bereich des koinzidenten Risses ein Rissbild entsteht, welches die Auswertung mithilfe des Eindringmittels schwierig macht. Weiterhin kommt es im Bereich der Druckzone zu weiterem Glasbruch während der Versuchs, was das Eindringmittel ebenfalls verdeutlicht. Aufgrund des

Bruchbilds war es kaum möglich eine exakte Delaminationsfläche auszuwerten. Es ergeben sich große Streuungen zwischen Flächen von  $700 \text{ mm}^2$  bis  $1700 \text{ mm}^2$  innerhalb derselben Folientypen.



EV200, 40N, PK3



EV100, 40N, PK3



SentryGlas, 40N, PK3

Abbildung 5-6 Probekörper mit eingebrachtem Eindringmittel

Für die PK 4, 5 und 6 mit SentryGlas wurde das Brechen beider Scheiben mittels Zylinder gewählt. Dies führte zu einem deutlich besseren Bruchbild und einer besseren Auswertung der Delaminationsfläche. In Abbildung 5-7 ist exemplarisch ein PK dargestellt.



Abbildung 5-7 PK 5 SentryGlas mit eingebrachtem Eindringmittel

Des Weiteren konnte bei dem Lastniveau von 80 N nach 48 h ein partielles Einreißen der Zwischenschicht festgestellt werden (siehe Abbildung 5-8). Zudem ließen sich Blasen (markiert durch schwarze Pfeile) feststellen. Wann diese entstehen ließ sich während des Versuchs nicht feststellen.

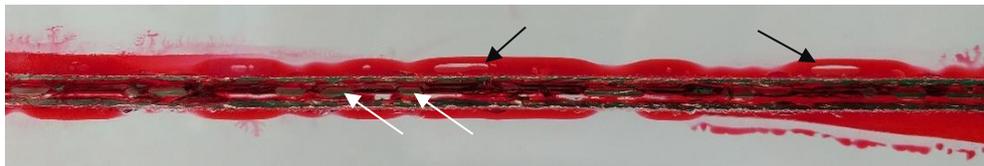


Abbildung 5-8 PK 5 SentryGlas, eingebrachtes Eindringmittel, weiße Pfeile: partielles Einreißen, schwarze Pfeile: Blasenbildung

### c) Auswertung von Spannung und Dehnung

Für die Auswertung werden die Annahmen und Berechnungsansätze aus Tabelle 36 herangezogen. In Abbildung 5-9 sind die wahren Dehnungen in der Zwischenschicht im Bereich des Risses dargestellt. Die Delaminationsfläche konnte insgesamt nach 24 Stunden bzw. 48 Stunden ausgewertet werden. Daher ergibt sich nur ein Wert für die wahre Dehnung mit Einfluss der Delamination nach 24 bzw. 48 Stunden.

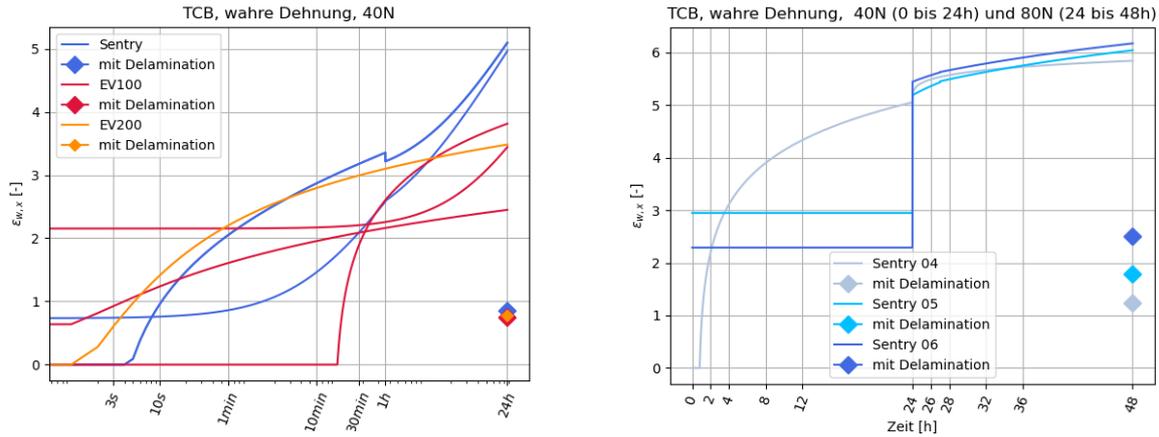


Abbildung 5-9 Wahre Dehnung der Zwischenschicht im Riss

Nach [83] liegt die minimale technische Bruchdehnung von SentryGlas bei Raumtemperatur bei circa 420 %. Dies entspricht einer wahren Dehnung von etwa 1,6. Mit einer Belastung von 80 N bei weiteren 24 Stunden wird im Mittel der Grenzwert der wahren Dehnung erreicht. Wie der tatsächliche Verlauf mit Berücksichtigung der Delamination verläuft kann nur mit einer Aufnahme des zeitlichen Fortschritts der Delamination ermittelt werden. Nach [84] liegt für EV100 die minimale technische Bruchdehnung bei circa 350%, und für EV200 bei circa 450 %. Dies entspricht einer wahren Dehnung von 1,5 bzw. für EV200 1,7. Nach einer Belastung von 40 N nach 24 Stunden liegen die hier ermittelten wahren Dehnungen für EVA mit Einfluss der Delamination unter 1. Die jeweiligen Grenzwerte sind demnach noch nicht erreicht.

Die resultierenden wahren Spannungen über die Zeit werden nach Gleichung (9) nach Tabelle 35 berechnet und sind in Abbildung 5-10 dargestellt. Die wahre Spannung in der Zwischenschicht SentryGlas liegt nach 48 h mit Delamination noch unter der technischen Mindest-Reißfestigkeit von circa 33 MPa nach [83] . Auch hier kann wie bei PVB das Erreichen der Bruchdehnung als maßgebendes Versagenskriterium herangezogen werden.

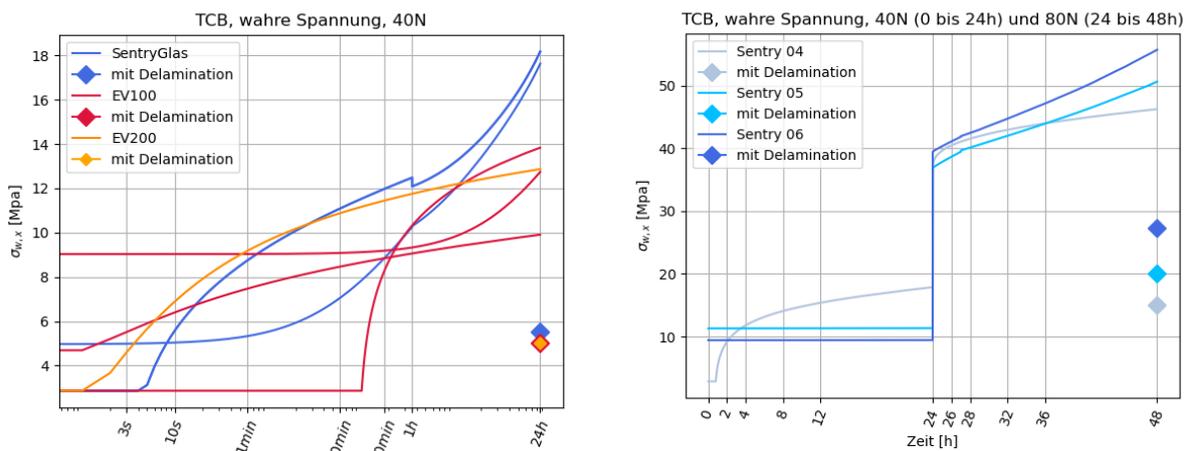


Abbildung 5-10 Wahre Spannung im TCB Versuch mit koinzidentem Riss in der Zwischenschicht im Rissbereich

d) Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Der hohe Haftgrad der untersuchten Zwischenschichten EV100, EV200 und SentryGlas führt zu kleinen Verformungen und zu geringer Delamination im TCB-Versuch. Es besteht die Gefahr, dass die Bruchdehnung der Zwischenschichten überschritten wird und durch Einreißen der Schicht das System versagt. Eine genaue Untersuchung des Delaminationsfortschritts während des Versuchs muss zudem erfolgen, um die wahre Dehnung während des Versuchs ermitteln zu können. Für eine Belastung von 40 N über 24 Stunden versagte kein PK. Auch eine Verdopplung der Belastung auf 80 N bei SentryGlas führte zu keinem Versagen dieser PK. Durch das Brechen mittels Zylinder in der Versuchseinrichtung und die erhöhte Belastung kann die Delaminationsfläche nach 48 Stunden mittels optischer Auswertung sehr gut ermittelt werden.

**Versetzter Riss**

a) Auswertung der Gesamtverformung

Die hohe Haftung der Zwischenschicht EV200 führte beim versetzten Riss gemäß 4.1.4 zum Glasbruch.

b) Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Die Durchführung des TCB-Versuchs für steife Folien mit hoher Haftung führt bei einem versetzten Riss zu Glasbruch im Bereich des Risses. Das Resttragverhalten wird hier maßgeblich über Reibung und Übertragung von Druckkräften durch das Glas bestimmt. Der versetzte Riss ist für steife Folien mit einem hohen Haftgrad für den TCB-Versuch nicht geeignet. Eine Vergleichbarkeit, und damit Reproduzierbarkeit ist nicht gegeben.

## 5.5 Pendelschlagversuch

### 5.5.1 Zielsetzung

Die in Kapitel 4.3 an VSG mit einer Zwischenschicht aus PVB erörterten Versuchsparameter werden entsprechend auf VSG mit anderen Zwischenschichten angewendet. Es werden dabei Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA) und ein Ionoplast (SentryGlas der Firma Kuraray) untersucht.

### 5.5.2 Versuchsübersicht

Tabelle 44 Versuchsparameter Pendelschlagversuche

Anzahl [-]	Zwischenschicht	Pendelfallhöhe [mm]
1	Daylight (EV200)	1200
1	Daylight (EV200)	450
2	SentryGlas	1200

### 5.5.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Aufbau, sowie die Durchführung entsprechen Absatz 4.3.3.

### 5.5.4 Versuchsauswertung

#### a) Auswertung Bruchbild

In Abbildung 5-11 sind die Bruchbilder für EV200 für eine Pendelfallhöhe von 450 mm und 1200 mm zu sehen. Es ist festzustellen, dass es bei einer Fallhöhe von 1200 mm zu einem Versagen des Verbundglases kommt. Bei einer Fallhöhe von 450 mm besteht das Einfachglas. Es entstehen zahlreiche Risse. Es bilden sich im Bereich der Bohrung radial linienförmige Öffnungen im Prüfkörper. Eine Kugel mit einem Durchmesser von 76 mm unter Anwendung einer maximalen Kraft von 50 N passt nicht hindurch. Es fallen keine Glasbruchstücke herunter. Es fallen lediglich Glassplitter auf beiden Seiten während des Aufpralls des Stoßkörpers herunter, welche jeweils ein Gewicht von 0,5 bis 2 g aufweisen.

Das Verbundglas mit SentryGlas besteht eine Pendelfallhöhe von 1200 mm. Es entstehen zahlreiche Risse. Es bilden sich im Bereich der Bohrung radial linienförmige Öffnungen im Prüfkörper. Eine Kugel mit einem Durchmesser von 76 mm unter Anwendung einer maximalen Kraft von 50 N passt nicht hindurch. Es fallen keine Glasbruchstücke herunter. Es fallen lediglich Glassplitter auf beiden Seiten

während des Aufpralls des Stoßkörpers herunter, welche jeweils ein Gewicht von 0,5 bis 2 g aufweisen.

b) Auswertung horizontale Verformung in Feldmitte

Weiterhin wurde die horizontale Verformung  $w_h$  des PK mittig des Aufprallbereiches gemessen. Für EV200 und der Fallhöhe 450 mm liegt diese bei  $w_{h,EV200} = 4 \text{ cm}$ . Für SentryGlas und der Fallhöhe 1200 mm liegt diese bei  $w_{h,SentryGlas} = 4,5 \text{ cm}$ .



Abbildung 5-11 Bruchbilder oben: EV200 nach Pendelschlag, links: 1200 mm Fallhöhe, rechts: 450 mm Fallhöhe; Bruchbilder unten: SentryGlas nach Pendelschlag, Fallhöhe jeweils 1200 mm

### c) Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Die Vorschädigung des Glases mit einer Bohrung in den Kreuzungspunkten der Diagonale führt zu einem reproduzierbaren Bruchbild. Es besteht keine Gefahr von herabfallenden Glasbruchstücken. Die horizontale Verformung im Aufprallbereich kann neben dem Bruchbild zur Beurteilung der Resttragfähigkeit herangezogen werden.

## 6 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

### 6.1 Versuche zur Charakterisierung der Haftung

Im Rahmen dieses Projektes wurde der Pummeltest als Haftprüfung untersucht. Dabei wurde sowohl die Durchführung des Tests als auch die Auswertung betrachtet. Aktuell wird der Pummeltest überwiegend manuell durchgeführt und visuell klassifiziert, was je nach Erfahrung der durchführenden Person zu starken Unterschieden führen kann. Zudem existiert keine einheitliche Pummelskala, die eine einheitliche Bewertung gepummelter Proben erlaubt. Demnach waren die Hauptziele bezüglich des Pummeltests, die Entwicklung einer neuen Pummelskala und das Eliminieren der Subjektivität bei der Durchführung und Auswertung.

Zur Entwicklung einer einheitlichen Pummelskala, wurden die Referenzbilder von verschiedenen Folienherstellern (Eastman und Everlam, Kuraray Bilder konnten wegen der schrägen Perspektive nicht genutzt werden) herangezogen. Zusätzlich zu den Referenzbildern, stellte Everlam Referenzproben der Pummelklassen 2, 4, 6 und 8 zur Verfügung, welche im Anschluss fotografiert und ausgewertet werden konnten. All diese Referenzdaten wurden drei unterschiedlichen Auswertemethoden unterzogen:

- Methode A: Analyse der freien Folienoberfläche mit Binärbildern
- Methode B: Statistische Auswertung erster Ordnung der Graustufenbilder
- Methode C: Texturanalyse mit Co-Occurance-Matrizen und Statistiken zweiter Ordnung

Es konnte gezeigt werden, dass Methode A und B eher ungeeignet sind, wenn die Lichtbedingungen während der Aufnahmen nicht bekannt sind. Sowohl der Schwellenwert, welcher für die Umwandlung in ein binäres Bild notwendig ist, als auch die statistischen Größen erster Ordnung (mittlerer Grauwert, Median, Standardabweichung usw.) sind direkt von den Lichtverhältnissen abhängig. Ein Vergleich der verschiedenen Datensätze mit den Methoden A und B führte demnach zu keinen einheitlichen Ergebnissen, weshalb diese Methoden nicht für die Vereinheitlichung der Pummelskala herangezogen wurden. Es sei jedoch angemerkt, dass diese Methoden für konstante Lichtverhältnisse durchaus funktionieren könnten. Außerdem können die einzelnen Pummelstufen eines Referenz-Datensatzes (unter Voraussetzung, dass alle Bilder eines Referenz-Datensatzes bei gleichem Licht aufgenommen wurden) mit diesen Methoden miteinander verglichen werden. So haben diese Methoden gezeigt, dass die Pummelstufen innerhalb eines Referenz-Datensatzes an in manchen Bereichen kaum unterscheidbar sind. Beispielsweise sind in den Eastman Referenzbildern nur kleine Unterschiede im mittleren Grauwert der Pummelbilder 4-6 zu erkennen. Daher stellt sich die Frage, ob die 10 Pummelstufen wirklich notwendig sind, oder ob manche Stufen zusammengefasst werden können.

Methode C bietet den Vorteil, dass die Textur der Pummelbilder untersucht wird, was bedeutet, dass die Lichtverhältnisse während der Aufnahme einen geringeren Einfluss auf die Auswertung haben. Bei der Texturanalyse wird das Vorkommen von Pixelpaaren innerhalb des Bildes untersucht und in eine Gray-Level-Co-Occurance Matrix GLCM eingetragen. Aus dieser lassen sich Texturmerkmale ableiten. Die 4 bekanntesten Haralick—Merkmale sind der „Kontrast“, die „Korrelation“, die „Energie“ und die „Homogenität“. Um den Lichteinfluss weiter zu reduzieren, wurden hier gestreckte/entzerrte Grauwertistogramme verwendet. Mit dieser Funktion wird der Intensitätsbereich des Grauwerte-Histogramms auf den gesamten Intensitätsbereich ausdehnt. Das neue ausgedehnte/entzerrte/gestreckte Histogramm weist dadurch einen flachen Verlauf auf, was bedeutet, dass die Grauwerte gleich verteilt sind. Im Rahmen dieses Projektes konnte gezeigt werden, dass die Texturmerkmale „Kontrast“, „Korrelation“ und „Homogenität“ von den drei unterschiedlichen Referenzdaten (Eastmanbilder, Everlambilder und eigene Bilder der Referenzmuster 2, 4, 6,8) nach der Histogramm-Entzerrung ähnliche Werte aufweisen, weshalb diese Methode als geeignetes Verfahren zur Erstellung einer einheitlichen Pummelskala eingestuft wurde. Um die Texturanalyse richtig durchführen zu können ist es unabdinglich den Bildmaßstab (Anzahl an Pixel/ cm abgebildete Probenbreite) zu kennen. Es ist daher zu empfehlen einen Maßstab auf der Probe anzubringen, welcher es erlaubt den Bildmaßstab während der digitalen Bildbearbeitung zu bestimmen. Zudem wird empfohlen, die Proben senkrecht zur Glasebene auf einem schwarzen Hintergrund zu fotografieren. Um die automatisierte Auswertung zu beschleunigen, kann zudem eine Kameravorrichtung nützlich sein, die jede gepummelte Probe im gleichen Abstand und bei gleichem Licht aufnimmt. Außerdem kann eine Graukarte genutzt werden, um die Kameraeinstellungen ("ISO-Empfindlichkeit", "Blendenzahl" und "Verschlusszeit") zu kalibrieren. Durch Verwendung eines konstantes Lichtes können nach einer ausreichend großen Datenmenge nochmal die Funktionen der einfacheren Methoden A und B geprüft werden. Zudem wird empfohlen die Masse vor und nach dem Pummeln, sowie die Größe der gepummelten Fläche zu notieren, da eine Korrelation mit der Pummelstufe erst nach einer ausreichend großen Datenmengen geprüft werden kann.

Die im Rahmen dieses Projektes neu entwickelte Pummelskala besteht aus den 4 Referenzpummelstufen (2, 4, 6 und 8), wessen Texturmerkmale von den eigens aufgenommenen Bildern der Everlam-Referenzmuster abgeleitet wurden. Sie ist für einen Bildmaßstab von 100 Pixel/cm und eine Offset-Distanz von 10 gültig. Alternativ wurde für Bilder mit geringerer Auflösung eine Pummelskala für einen Bildmaßstab von 56 Pixel/cm und eine Offset-Distanz von 4 vorgeschlagen. Die Zuweisung zu einem Pummelwert erfolgt dadurch, dass die drei Haralick-Features „Kontrast“, „Korrelation“ und „Homogenität“ der gestreckten/entzerrten Grauwertbilder der skalierten (auf 100 Pixel/cm bzw. 56 Pixel/cm) Pummelbilder errechnet werden und mit den Werten aus der Skala verglichen werden. Zwischen zwei Pummelstufen darf linear interpoliert werden. Dadurch ergeben sich für jede Probe 3 Pummelwerte. Der finale Pummelwert ergibt sich aus dem Mittelwert der 3 einzelnen Werte.

Nach der Erstellung der neuen Pummelskala wurden Pummeltests an diversen Kleinproben durchgeführt. Die Abmessungen dieser Proben betrug 300x100 cm und der Glasaufbau 3mm Floatglas – 0.76mm Zwischenschicht – 3mm Floatglas. Der Großteil der Versuche (52/58) befasste sich mit diversen PVB-Zwischenschichten der Firma Eastman. Es wurden die Einflussfaktoren „manuelles Pummeln – habautomatisches Pummeln im Pummelapparat“, „unterschiedliche Lagerungstemperaturen“, „unterschiedliche Beleuchtung“ und „unterschiedliche PVB-Typen bzw. Haftgrade“ untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Proben Großteils (sowohl beim Pummelapparat, als auch manuell) unzureichend gepummelt wurden, was dazu führte, dass noch zu große Bruchstücke an der Folie haften blieben und das automatisierte Auswerteverfahren den Pummelwert grundsätzlich unterschätzte, da intakte Glasoberfläche fälschlicherweise als freie

Folienfläche interpretiert wird. Die hier ermittelten Pummelwerte entsprechen demnach nicht den tatsächlich vorhandenen Pummelwerten. Es ist daher beim Pummelvorgang unbedingt darauf zu achten, dass die ganze zu untersuchende Glasfläche vollständig pulverisiert. Trotz der allgemeinen Unterschätzung der Pummelwerte konnte festgestellt werden, dass die beim manuellen Pummeln von ein und derselben Person nur kleine Varianzen auftraten, wohingegen die Pummelbilder unterschiedlicher Personen zu unterschiedlichen Ergebnissen führten. Dem könnte durch die Nutzung eines halbautomatischen oder vollautomatischen Pummelapparats entgegengewirkt werden. Die Parameter (Kraft bzw. Impuls) des Pummelapparats sind jedoch noch so zu definieren, dass die Glasoberfläche vollständig pulverisiert. Zudem konnte festgestellt werden, dass hohe Lagerungstemperaturen zu einer weiteren Unterschätzung des Pummelwertes führen. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Foliensteifigkeit bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur stark abnimmt und die Glasbruchstücke während des Pummelns in die Folie gedrückt werden anstatt abzufallen. Dies führt wieder dazu, dass das haftende Glas als frei Folienfläche interpretiert wird. Für Standard- (und Akustik) PVB hat sich eine Lagerungstemperatur von  $-18^{\circ}\text{C}$  bewährt. Für steiferes PVB könnte eine Lagerungstemperatur von  $\sim 5^{\circ}\text{C}$  und für Ionoplast eine Lagerungstemperatur von  $\sim 25^{\circ}\text{C}$  ausreichen. EVA besitzt eine Glasübergangstemperatur von ca.  $\sim 20^{\circ}\text{C}$ , weshalb die Lagerungstemperatur analog zu den anderen Folien deutlich niedriger gewählt werden müsste (ca.  $\sim 50^{\circ}\text{C}$ ). Allerdings stellt sich hier die Frage, ob dies noch praktisch umsetzbar ist. Es wurde zudem festgestellt, dass die Beleuchtung nicht zu dunkel gewählt werden sollte. Bezüglich unterschiedlicher PVB-Probetypen konnte aufgrund der unzureichend gepummelten Proben keine großen Unterschiede festgestellt werden. Es wird empfohlen, die gleichen Serien erneut zu untersuchen. Dabei sollen die Proben von erfahrener Pummel-Personal (z.B. bei Folien Herstellern) oder mit dort vorhandenen Pummelmaschinen gepummelt und die Auswertung mittels Texturanalyse wiederholt werden.

Neben den Kleinproben, erfolgten auch Pummeltests an den großen TCB-Probekörpern. Diese wurde aus den Probekörpern der großen TCB Versuche gewonnen. Auch hier handelte es sich überwiegend um PVB-Zwischenschichten, jedoch von einem anderen Hersteller (Kuraray). Hier wurden unter anderem unterschiedliche Glasstärken untersucht, wobei jedoch festgestellt wurde, dass bei erhöhter Glasstärke, der Pummelvorgang erschwert ist, was in unregelmäßigeren Pummelbildern resultierte, was wiederum die automatisierte Bildauswertung erschwerte. Zudem kam es durch den erhöhten Energieeintrag vermehrt zu Folienrissen. Es wird daher empfohlen die Pummeltests auf Kleinproben mit Glasstärken von maximal 3 mm zu beschränken.

Allgemein ist bezüglich des Pummeltests festzuhalten, dass das größte Problem während der Untersuchungen im Pummeltest war, dass auf den meisten gepummelten Proben nach dem Pummelvorgang noch zu große Glasbruchstücke haften blieben, was die Auswertung erschwerte bzw. die Ergebnisse verfälschte. Demnach besteht weiterer Forschungsbedarf darin, die Pummelparameter (Kraft, Impuls) dahingehend zu optimieren, dass die Glasoberfläche vollständig pulverisiert. Zusätzlich könnte man versuchen, die Glasoberfläche zu färben. Dies würde zum einen dem Prüfer einfacher erkennbar machen, ob ausreichend gepummelt wurde und zum anderen Reflektionen in den Bildern vermeiden. Zudem kann die automatisierte Auswertemethode noch dahingehend erweitert werden, dass unregelmäßige Bruchstrukturen automatisch detektiert werden. Dazu könnte die Texturanalyse in einem übers Bild wanderndes Fenster angewendet werden. Zudem kann die Pummelskala durch Erstellen einer größeren Datenbasis noch verfeinert werden. Dazu ist es wichtig, dass erfahrene Pummeler (z.B.: Hersteller) Fotos der gepummelten Probe, mit Angabe eines Maßstabes, dem Massenverlust und Ihrer visuellen Pummeleinschätzung sammeln. Wenn eine ausreichend große Datenbasis vorhanden ist, kann auch auf Methoden der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens zurückgegriffen werden. Diese Methoden wurden bereits

erfolgreich zur Erkennung von Glasbruchbildern eingesetzt (vgl. [7]). Die in dieser Arbeit gelegten Überlegungen können als Basis zur Entwicklung eines Modells der maschinellen Erkennung von Pummelbildern mit Methoden der künstlichen Intelligenz herangezogen werden.

Als zweite Prüfmethode zur Charakterisierung der Haftung wurde der Haftscherversuch untersucht. Im Gegensatz zum Pummelversuch liefert der Haftscherversuch ein konkretes quantifiziertes Ergebnis in Form der maximalen Haftscherspannung. Im Gegensatz zum Druck-Scherversuch, wie er in der Produktionskontrolle üblich ist, wurde ein Scherversuch konzipiert, bei dem der Probekörper möglichst eine reine Schubbeanspruchung erfährt. Entsprechende der Pummeltests an Großproben wurden die Probekörper für die Haftscherversuche aus den TCB-Probekörpern gewonnen. Die Haftscherspannungen in Abhängigkeit von Temperatur, Glasdicke und Haftgrad wurden entsprechend ausgewertet. Für eine quantitative Beschreibung der Haftung eignet sich der Haftscherversuch sehr gut. Die hier durchgeführten Versuche lieferten quantifizierbare Ergebnisse mit einer relativ geringen Streuung. Der Versuch bietet sich im ersten Ansatz für einen genormten Bauteilversuch zur Resttragfähigkeit an.

## 6.2 Versuche zur Charakterisierung der Resttragfähigkeit

Der TCB-Test ist lediglich zur Klassifizierung von Folien im höheren Steifigkeitsbereich geeignet. Dabei ist der koinzidente Riss zu untersuchen. Ein Brechen der Scheiben sollte nur mittels Zylinder erfolgen. Das vorherige Anritzen führte bei den Zwischenschichten EVA und SentryGlas im Gegensatz PVB zu übereinander liegenden Bruchkanten (vgl. Abbildung 4-5 mit Abbildung 5-4). Für das Maß zur Beurteilung der Resttragfähigkeit ist die Gesamtdurchbiegung heranzuziehen. Diese ist messtechnisch am einfachsten zu ermitteln. Allerdings muss hier bereits zwischen den Folientypen EVA und SentryGlas differenziert werden, da die Durchbiegungen in den Versuchen bereits nach einer Stunde deutlich divergieren. Weiterhin ist noch jeweils ein Lastniveau zu ermitteln, welches zu Durchbiegungen mit geringeren Streuungen führt. Eine Alternative wäre auch, über die Einstellung der Temperatur ein eindeutiges Verhalten der jeweiligen Zwischenschicht zu erzeugen und für einen Normungsversuch vorzugeben. Hier kann für PVB gegebenenfalls eine Temperatur von  $15 \pm 2 \text{ °C}$  zu besseren Ergebnissen führen. Für EVA oder SentryGlas wäre ein Temperaturbereich von etwa  $30 \pm 2 \text{ °C}$  denkbar. Dies setzt für die Durchführung der Versuche jedoch eine Klimakammer oder Vergleichbares voraus. Bezüglich der gewählten Lastniveaus scheint bei der Zwischenschicht SentryGlas eine Kriechlast von 80 N bei  $23 \text{ °C}$  am Aussagekräftigsten. Dies konnte allerdings nur in ersten Versuchen festgestellt werden. Weitere Versuche fehlen hier noch zur Validierung. Durch die große Durchbiegung der Verbundgläser mit SentryGlas ist weiterhin noch der Einfluss des Eigengewichts, welches zu einer zusätzlichen Zugkraft in der Folie während des Versuchs führt zu untersuchen. Des Weiteren fehlt gänzlich die Beobachtung des Delaminationsprozesses während der Versuche. Der Aufbau des Versuchs muss folglich noch so weit modifiziert werden, um mit geeigneten Messmitteln das Delaminationsverhalten über die Zeit auswerten zu können. Für weiche Folien ist der TCB-Versuch grundsätzlich noch anzupassen, um reproduzierbare Ergebnisse erhalten zu können. Die hier durchgeführten Versuche reichen für einen Normungsvorschlag noch nicht aus. Es konnten aber für weitere Versuche wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Allerdings streuen die Ergebnisse mit dem bisherigen Aufbau übermäßig. Hier können gegebenenfalls mit einer Randeinspannung oder anderen weiteren Lagerbedingungen bessere Ergebnisse erzielt werden.

Für die Beurteilung der Resttragfähigkeit sind grundsätzlich weitere Versuche mit einem koinzidenten Riss zu empfehlen. Das Bruchverhalten der Verbundgläser im Kugelfallversuch als auch im Pendelschlagversuch bestätigt das Auftreten von koinzidenten Rissen in den Hauptbruchlinien. In diesen Bereichen ist die Tragfähigkeit der Folie maßgebend und bestimmt das Resttragverhalten.

Der Pendelschlagversuch mit einer Vorschädigung des Verbundglases mittels einer Bohrung in den Schnittpunkten der Diagonalen führt zu reproduzierbaren Bruchbildern und lässt eine Differenzierung von VSG bezüglich der Resttragfähigkeit zu. Hier bietet es sich an noch weitere Vorschädigungsszenarien zu untersuchen, zum Beispiel Bohrungen entlang der Diagonalen mit definiertem Abstand zur Randeinspannung. Weiterhin können die definierten Bohrungen bereits ab Werk für die Testscheiben gefertigt werden und das manuelle Bohren entfällt für die Versuchsvorbereitung. Es sind in Zukunft weitere Versuche anzustreben, um die Parameter Glasdicke und damit auch die Fallhöhe für einen Normungsvorschlag weiter anpassen zu können. Es empfiehlt sich das Testen mit einem Glasaufbau von 4 mm (Float) / 0.76 mm (Zwischenschicht) / 4 mm (Float). Der Versuch kann für die untersuchten Zwischenschichten unter Laborbedingungen durchgeführt werden. Auch die Versuchsvorbereitung mit Bohren und Einbau, sowie die Durchführung sind leicht verständlich zu praktizieren. Mittels Vergleich des Bruchbilds und dem Messen der horizontalen Durchbiegung im Aufprallbereich des Stoßkörpers kann die Resttragfähigkeit bei dynamischer Belastung primitiv ausgewertet werden. Der hier vorgestellte modifizierte Pendelschlagversuch eignet sich nach der Erkenntnis erster Versuche gut für die Beurteilung der Resttragfähigkeit unter dynamischen Lasten.

### 6.3 Korrelation zwischen Versuchen zur Charakterisierung der Haftung

Die folgende Auswertung gilt nur für die Probekörper mit der Zwischenschicht PVB. Die durchgeführten Versuche lassen sich nutzen, um zu überprüfen, ob die ermittelte Resttragfähigkeit im Großbauteilversuch (TCB-Versuch mit versetztem Riss) mit einem einfachen Pummelversuch oder Haftscherversuch korreliert. Als Bezugsgrößen wurden dazu die Versagensdauer im TCB-Versuch, der Pummelwert und die ermittelte maximale Haftscherspannung verwendet. In Abbildung 6-1 sind die Ergebnisse für die jeweiligen Probekörper und Systemparameter dargestellt. Die Ergebnisse der Pummel- und Haftscherversuche sind dabei auf einer Skala (rechte y-Achse) dargestellt, um den Vergleich der drei Versuche zu ermöglichen. Die hier ermittelten Pummelwerte erfolgten visuell. Die Versagensdauer korreliert global betrachtet nur bedingt mit dem Pummelversuch und dem Haftscherversuch. Bei einer lokalen Betrachtung einzelner Probekörper lassen sich gleichwohl Zusammenhänge erkennen. Für den Probekörper mit Haftgrad *R15* (MR) und der geringsten Versuchsdauer liegt auch die maximale Haftscherspannung deutlich unter denen der anderen Probekörper. Für die Probekörper mit der maximalen Versuchsdauer ergibt sich im Mittel der höchste Wert in der Haftscherspannung. Für den Haftgrad *R20* (NR) haben die beiden Probekörper mit der geringsten Lastdauer bei den Scherversuchen eine deutlich größere Streuung. Das lässt darauf schließen, dass die Lamination der Zwischenschicht ungleichmäßig ist, was im TCB-Versuch zu einem schnelleren Versagen führen kann. Für den niedrigen Haftgrad liegen sowohl Versagensdauer als auch Haftscherfestigkeit und Pummelwert auf einem sehr niedrigen Niveau. Bei 30 °C versagt ein Probekörper deutlich früher als die anderen. Hier liegt sowohl die Haftscherspannung als auch der Pummelwert auf einem deutlich niedrigeren Niveau, eine Korrelation ist somit vorhanden. In der Tendenz korreliert die Versagensdauer eher mit der maximalen Haftscherspannung als dem Pummelwert.

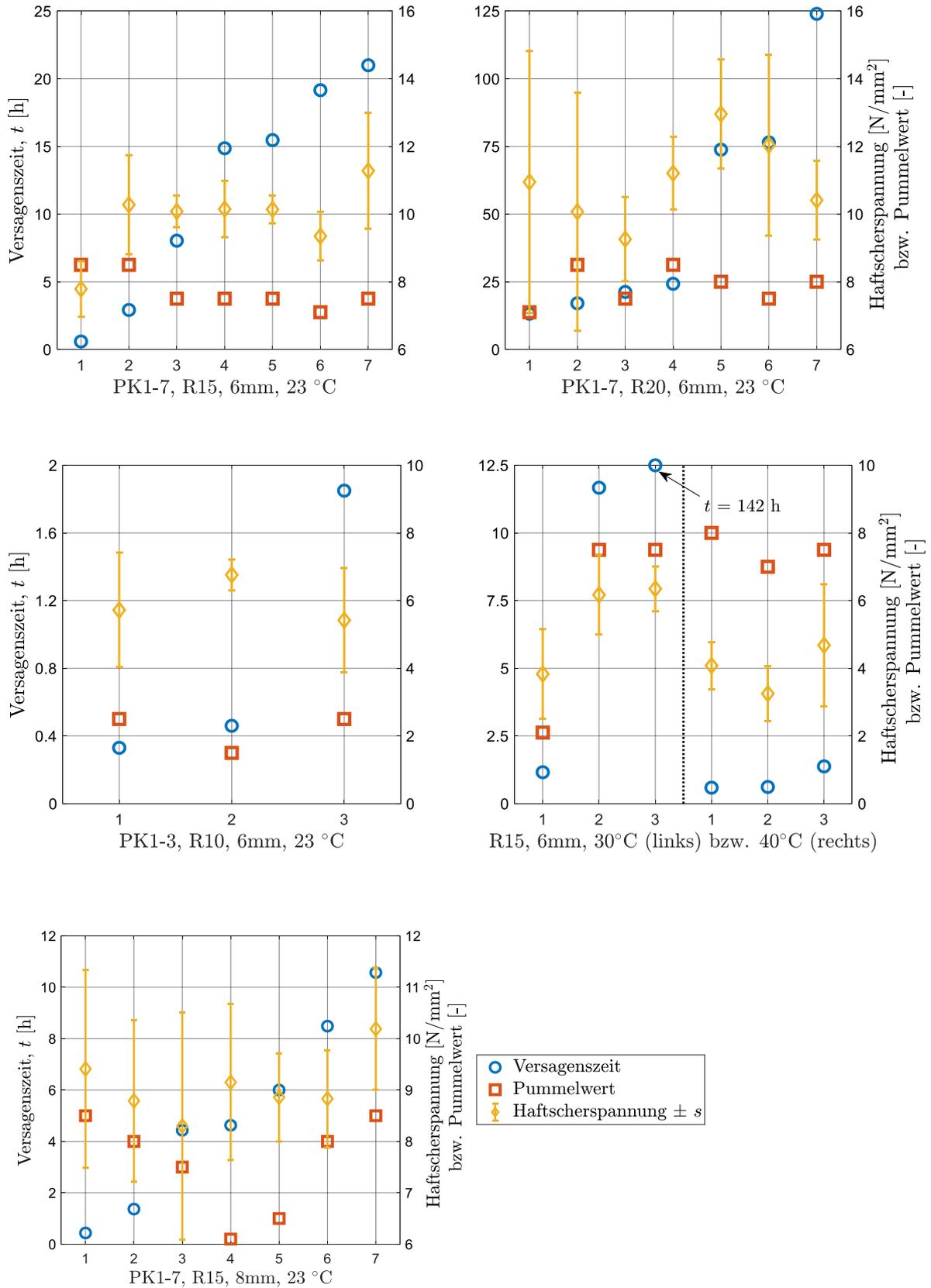


Abbildung 6-1 Korrelation zwischen TCB-, Pummel- und Haftscherversuchen

Bei den Kleinbauteilversuchen wurde die delaminierte Fläche den automatisch ermittelten Pummelwerten gegenüber gestellt. Dazu wurden die Pummel-Ergebnisse aus Tabelle 25 (jeweils

nicht gerundeter Mittelwert aus Zinn- und Feuerseite) bzw. Abbildung 3-39 und die delaminierten Flächen (Mittelwert aus beiden Durchgängen) aus Abbildung 4-31 herangezogen. In Abbildung 6-2 ist der Zusammenhang zwischen Pummelwert und delaminierter Fläche zu erahnen. Diese muss jedoch noch mit einer höheren Probenanzahl verifiziert werden.

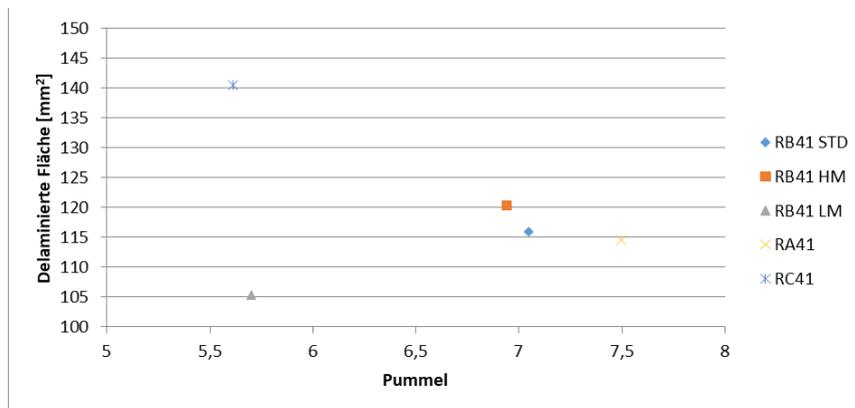


Abbildung 6-2 Korrelation delaminierte Fläche und Pummelwert aus den Kleinteilversuchen

#### Zusammenfassung der Ergebnisse:

Durch die Bauteilversuche (TCB-Versuche mit PVB) konnten neue wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, da der TCB-Versuch das erste Mal bei verschiedenen Temperaturen, im Vergleich verschiedener Glasdicken und Haftgrade (von Standard-PVB) sowie mit verschiedenen Rissgeometrien durchgeführt wurde. Für eine quantitative Beschreibung der Haftung eignet sich der Haftscherversuch sehr gut. Wesentliche Erkenntnis aus dem Pummelversuch war die Lokalisierung von stark unterschiedlichem Haftvermögen der Zwischenschicht innerhalb eines Probekörpers, womit die großen Streuungen im TCB-Versuch zum Teil erklärt werden können. Sowohl im TCB-Versuch als auch im Haftscherversuch führt eine Steigerung der Temperatur zu einer extremen Reduktion der Steifigkeit und des Haftvermögens mit entsprechenden Auswirkungen auf das Systemverhalten.

## 7 AP5: Normungsvorschlag

Wie beschrieben, ist lediglich eine Korrelation zwischen Pummelwert und delaminierter Fläche beim kleinen TCB-Test zu erkennen. Die Folgerung ist daher, dass normativ der TCB-Test zur Charakterisierung der Haftung und der Resttragfähigkeit geeignet ist, der Haftscher- oder Pummeltest jedoch nicht, um die Resttragfähigkeit zu quantifizieren. Obwohl die bisher durchgeführten Versuche noch nicht für einen Normungsvorschlag ausreichen, werden im Folgenden die gesammelten Erfahrungen in Form von möglichen Prüfkonzepten (als Vorstufe einer Norm) dargelegt. Dabei werden die Charakterisierung der Haftung und die Charakterisierung der Resttragfähigkeit getrennt voneinander betrachtet. Der dargestellte modifizierte Pendelschlagversuch ist normativ zur Beurteilung der Resttragfähigkeit unter dynamischer Belastung in den ersten Ansätzen geeignet.

### 7.1 Charakterisierung der Haftung mittels Pummelversuch Probekörper:

- Ebenes Glas
- Geometrie: 10x30 cm wird empfohlen. Mindestbreite 8 cm
- Glasaufbau: 3mm FG – 0.76mm Zwischenschicht – 3mm FG
- Die Probekörper sind im typischen Laminationsprozess herzustellen
- Anzahl an Probekörper: mind. 3

### Versuchsvorbereitung:

- Kennzeichnung der Sn- und F-Seite
- Aufbringen eines Maßstabes, z.B. Aufkleben eines 1cm breiten Streifens
- Aufbringen des Schlagmusters. Bei 10cm breiten Proben werden 8 Schläge/Reihe empfohlen. Es sind mindestens 7 Reihen zu pummeln, was ca. einer gepummelten Fläche von 10cm entspricht. Bei einer Probenbreite von 10cm kann folgende Vorlage genutzt werden:

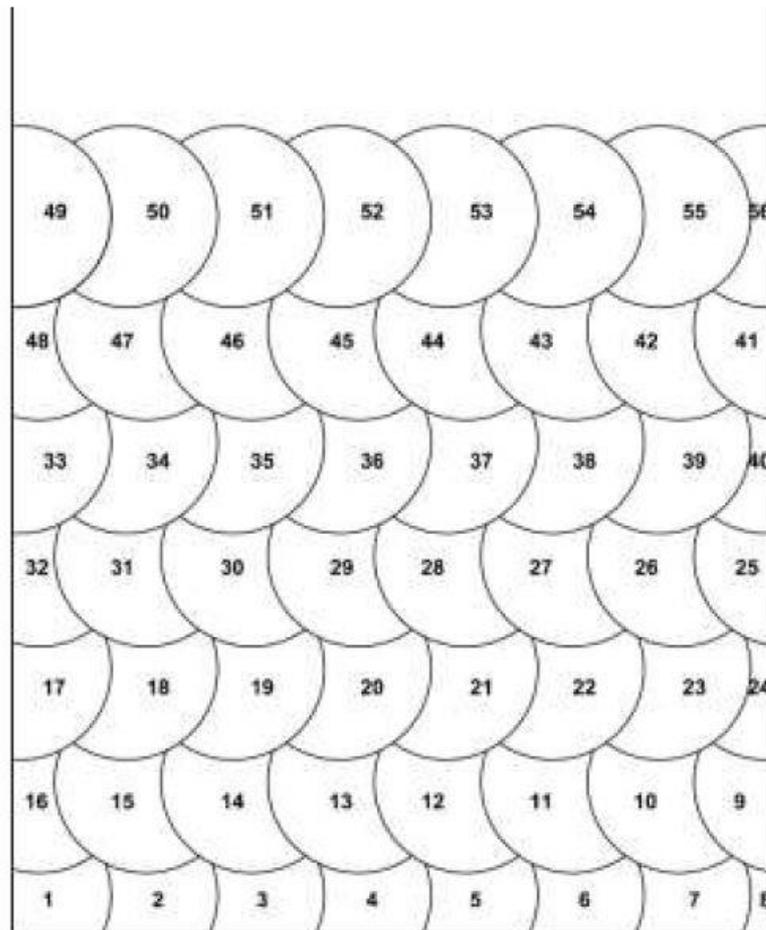


Abbildung 7-1 Schlagmuster für 10cm breite Proben

- Probenlagerung: mind. 4h (ausgenommen bei einer Lagerungstemperatur von Raumtemperatur) Die Lagerungstemperatur ist in Abhängigkeit der Glasübergangstemperatur bzw. Foliensteifigkeit zu wählen. Beispiele:
  - Standard- und Akustik PVB: Lagerungstemperatur:  $-18^{\circ}\text{C}$
  - Strukturelles PVB: Lagerungstemperatur:  $5^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
  - Ionoplast: Lagerungstemperatur:  $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

#### Versuchsdurchführung Seite:

- Der Versuch kann halbautomatisch, vollautomatisch oder manuell von einem erfahrenen Mitarbeiter durchgeführt werden.
- Der Probekörper wird mit der untersten Kante auf eine um  $45^{\circ}$  geneigte Stahlplatte gelegt. Der Winkel zwischen der Probe und der Stahlplatte beträgt  $5^{\circ}$ .
- Zum Pummeln wird ein Flachkopfhämmer verwendet (Masse bzw. Impulskraft muss noch definiert werden, hier wurden 800g genutzt)
- Bei manueller Durchführung ist auf gleichmäßige Schläge zu achten
- Es ist darauf zu achten, dass der komplette zu pummelnde Bereich nach Versuchsende pulverisiert ist. Es dürfen keine Glasbruchstücke mit intakter/glatter Oberfläche zurückbleiben.

- Der Pummelvorgang ist schnellstmöglich abzuschließen. Es ist sicherzustellen, dass der Probekörper nach Abschluss des Pummelvorgangs immer noch eine Temperatur unter Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) aufweist.
- Nachdem der Pummelvorgang abgeschlossen ist, ist der Probekörper vorsichtig abzuklopfen
- Die Masse bzw. Massendifferenz ist zu notieren
- Die Probe ist visuell in eine Pummelklasse einzuordnen. Dabei ist die Wahl der genutzten Referenzbilder (vorzugsweise Referenzmuster) anzugeben. Es kann hilfreich sein, einen Stift o.ä. zu nutzen, um zu erfühlen, ob es sich um freigelegte Folie handelt.
- Die gepummelte Probe ist zu fotografieren (siehe Auswertung).
- Danach ist die Probe wieder für mind. 15 min zu konditionieren und das ganze wird am umgedrehten Laminat wiederholt.

#### Programmgestützte Versuchsauswertung:

- Zur Erstellung eines optimalen Fotos und einer guten programmgestützten Auswertung wird empfohlen:
  - Nutzung einer Fotobox mit definierten Abständen. Hier wurde beispielsweise eine Box aus Graupappe genutzt. Die Innenseiten sind schwarz. An der Oberseite befindet sich eine Aussparung zur Positionierung der Kamera. Die Vorder- und Rückseite sind offen. Die Probe wird an der Vorderseite reingelegt. Die Probenbeleuchtung erfolgt durch die Rückseite.
  - Die Probe wird flach in die Fotobox gelegt, sodass ein Foto senkrecht zur Probenebene entsteht. Der Untergrund soll schwarz sein. Auf dem Foto muss die Maßstabskennzeichnung deutlich erkennbar sein.
  - Es ist diffuses Licht zu verwenden. Die Lichtverhältnisse sind so zu wählen, dass es weder zur Überbelichtung, noch zur Unterbelichtung kommt. Hier wurden 30 LEDs (3 Streifen mit je 10 LEDs, LED Typ WS2812B) in einem Abstand von 24 cm zur Fotobox genutzt. Die Lichteinstellungen betragen überwiegend RGB= 255, 176, 240, die Helligkeit betrug 150. Dies resultierte in violetterem Licht, siehe Anhang 9.4.
  - Die Kameraeinstellungen "ISO-Empfindlichkeit", "Blendenzahl" und "Verschlusszeit" sind mittels Graukarte zu kalibrieren.
- Es wird die Zuordnung mittels Texturanalyse empfohlen. Diese enthält folgende Schritte:
  1. Vorbereiten des Fotos:
    - Umwandeln in Grauwertebild, zuschneiden (empfohlen werden 6x4cm), schärfen
    - Anpassen des Bildmaßstabes auf 100 Pixel/abgebildete Probenbreite. Um den aktuellen Bildmaßstab zu ermitteln, wird der auf der Probe angebrachte Maßstab verwendet. Anmerkung: Alternativ kann mit einer niedrigeren Auflösung von 56 Pixel/abgebildete Probenbreite gearbeitet werden. Die Pummelskala ist dann jedoch anzupassen.
  2. Entzerrung des Histogramms zur Reduktion des Lichteinflusses. Das gestreckte Histogramm besitzt 64 bins (64 Grauwerte sind besetzt)

3. Erstellen der normierten Grauwertkorrelationsmatrix. Dabei sind folgende Parameter zu verwenden: Alle 8 Nachbarn sind zu betrachten. Der Abstand zum Nachbar beträgt 10. Die Dimension der GLCM beträgt 64x64.

Anmerkung: Wenn mit der niedrigeren Bildauflösung von 56 Pixel/abgebildete Probenbreite gearbeitet wird, ist ein Offset von 4 zu berücksichtigen.

4. Berechnung der Haralick Features „Kontrast“, „Korrelation“ und „Homogenität“

- Vergleich mit den in Tabelle 45 (bzw. Tabelle 46) genannten Werten. Zwischen den Pummelstufen darf linear interpoliert werden. Die drei Haralick Features werden getrennt voneinander betrachtet. Für eine Probe erhält man somit 3 Pummelwerte.
- Der finale Pummelwert ergibt sich aus dem Mittelwert der 3 einzelnen Werte.

Tabelle 45 Pummelskala 100 Pixels/cm und Offset-Distanz 10

Pummelstufe	Kontrast	Korrelation in %	Homogenität in %
2	427.18	37.49%	15.87%
4	500.95	26.56%	13.68%
6	559.05	18.34%	12.11%
8	605.24	11.09%	11.63%

Tabelle 46 Alternative Pummelskala 56 Pixels/cm und Offset-Distanz 4

Pummelstufe	Kontrast	Korrelation in %	Homogenität in %
2	412.81	39.02%	16.36%
4	468.78	31.43%	14.23%
6	528.02	22.84%	12.61%
8	585.88	13.92%	11.88%

- Zur Auswertung kann das dem Anhang beigelegte Matlab Programm genutzt werden.

## 7.2 Charakterisierung der Resttragfähigkeit mittels des TCB-Tests

Der TCB-Test mit koinzidentem Riss eignet sich für die genauere Differenzierung des Verhaltens von Folien mit höherem Haftgrad und größerer Steifig- bzw. Festigkeit. Er ermöglicht es jedoch nicht, eine generelle Vergleichbarkeit von Zwischenschichttypen unterschiedlicher Steifigkeit zu schaffen und ist insbesondere für VSG mit Zwischenschicht aus Standard PVB ungeeignet.

### 1. Anforderung an die Prüfung

Bei der Prüfung mit dem Verfahren nach Abschnitt 2 darf der Probekörper nicht vom Auflager rutschen und die Zwischenschicht nicht reißen.

### 2. Prüfverfahren

#### 2.1. Prüfeinrichtung

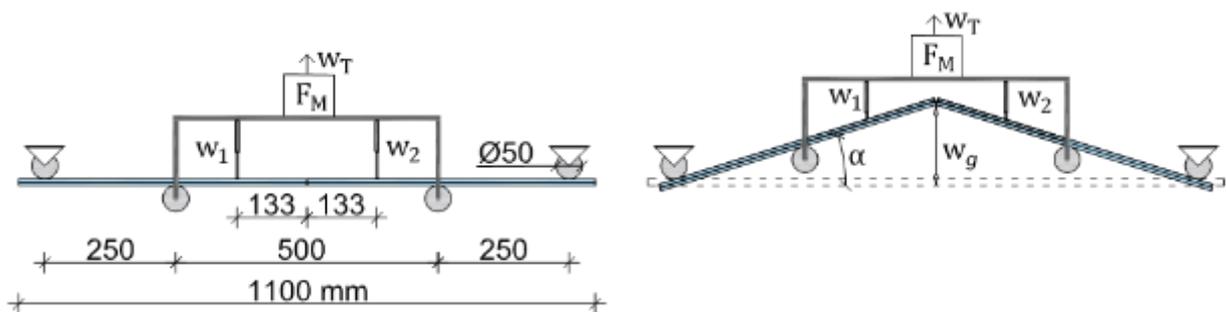


Abbildung 7-2 Aufbau des TCB – Tests und Darstellung der einzelnen Parameter

#### 2.2. Prüfkörper

##### 2.2.1. Aufbau und Abmessungen der Prüfkörper

Die Prüfkörper müssen die folgenden Abmessungen haben:

- Breite:  $(1100 \pm 2)$  mm
- Höhe:  $(360 \pm 2)$  mm

Der Glasaufbau ist festgelegt auf:

- 6 mm (Float) / 0.76 mm (Zwischenschicht) / 6 mm (Float)

### 2.2.2. Vorbereitung der Prüfkörper

Die Prüfkörper müssen mindestens 24 h bei einer Temperatur von  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  konditioniert werden. Anschließend wird der Probekörper oben und unten, in Feldmitte, entlang der gesamten Breite mit einem Diamantschneider angeritzt und in der Prüfeinrichtung (vgl. Abbildung 7-2) definiert gebrochen werden. Der Prüfzylinder ist dabei lagegerecht mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min zu verfahren bis es zum Bruch der Scheibe kommt. Anschließend muss die Scheibe um  $180^\circ\text{C}$  gedreht und die andere Seite ebenfalls gebrochen werden. Danach wird der Probekörper entlastet und verbleibt bis zum Versuchsbeginn in der entsprechenden Position in der Prüfeinrichtung.

### 2.3. Durchführung der Prüfung

Die Prüfung wird bei einer konstanten Temperatur von  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  und relativen Luftfeuchtigkeit von  $(30 \pm 10)\%$  durchgeführt. Es wird dabei eine Prüflast von 40 N mit einer Geschwindigkeit von 5 N/s kraftgeregelt angefahren und über 24 h kraftgeregelt gehalten. Im Gegensatz zum 4-Punkt-Biegeversuch nach [3] erfährt der Prüfkörper eine Zugbeanspruchung. Die Verformung wird dabei kontinuierlich mit zwei induktiven Wegaufnehmern gemessen (vgl. Abbildung 7-2).

In Kombination mit dem Verfahrensweg des Prüfzylinders wird dann die Gesamtverformung  $w_g$  (vgl. Tabelle 47) in Feldmitte bestimmt, welche im Folgenden als Grundlage der Klassifizierung fungiert.

Tabelle 47 Parameter des TCB Versuchs

Parameter	Bezeichnung	Einheit
$w_T$	Traversenweg	[mm]
$w_{1/2}$	Weg (Wegaufnehmer)	[mm]
$F_M$	Kraft (Kraftmessdose)	[N]
$\alpha = \arctan(w_T/250 \text{ mm})$	Drehwinkel	[°]
$w_g = w_{1/2} + w_T + 133 \text{ mm} \cdot \tan(\alpha)$	Gesamtweg in Scheibenmitte	[mm]

Desweiteren wird nach Ende der 24 h die delaminierte Fläche bestimmt. Dazu kann der Prüfkörper in Feldmitte mit einer entsprechenden Vorrichtung um den Maximalwert von  $w_g$  angehoben und ein Eindringmittel in den Riss eingebracht werden. Die Oberseite des Prüfkörpers entspricht dabei der Seite, die auch während des TCB-Versuchs nach oben gezeigt hat. Anschließend wird der Prüfkörper oberflächlich gereinigt und die verfärbte Fläche fotografiert. Die fotografierte Fläche wird dann bildoptisch (z.B. mit Python oder Matlab) ausgewertet.

### 3. Klassifizierung

Die Klassifizierung findet anschließend über die maximal gemessene Durchbiegung nach 24 h statt. Es werden drei Klassen festgelegt:

Tabelle 48 Differenzierung der Resttragfähigkeit von VSG unter statischer Beanspruchung

Klasse	Gesamtdurchbiegung $w_{g,max}$ [mm]	Lastniveau [N]	Lastdauer [h]
RT_s_1	$w_{g,max} \leq 25$	40	24
RT_s_2	$25 < w_{g,max} \leq 50$		24
RT_s_3	$50 < w_{g,max} \leq 150$		24

\* RT= Resttragfähigkeitsklasse, s= statisch

### 7.3 Charakterisierung der Resttragfähigkeit mittels des Pendelschlagversuchs

Die folgende Anwendung ist gültig für die Quantifizierung der Resttragfähigkeit von VSG aus grobbrechenden Gläsern mit Zwischenschicht PVB, SentryGlas und EVA. Die Prüfung erfolgt dabei für alle Zwischenschichttypen analog.

#### 1. Anforderung an die Prüfung

Bei der Prüfung mit dem Verfahren nach Abschnitt 2 darf jede Probe ungefährlich brechen. Es können zahlreiche Risse entstehen. Das Bruchbild entspricht je nach Fallhöhe und Folientyp der Vorgabe nach einer Skizze<sup>1</sup>. Es darf sich kein Versatz oder Öffnung in dem Prüfkörper bilden, durch welche eine Kugel mit einem Durchmesser von 76 mm unter Anwendung einer maximalen Kraft von 50 N (gemäß Anhang A EN 12600) hindurchpasst. Zusätzlich dürfen keine Glasstücke mit einem jeweiligen Gewicht von mehr als 3 g 3 min nach dem Pendelschlagversuch herunterfallen.

<sup>1</sup> Diese gilt es entsprechend der bereits durchgeführten und noch weiter notwendigen Versuche zu erstellen, auch im Hinblick der Prüfung weiterer Glasaufbauten, wie empfohlen mit 4mm/0,76/4mm

## 2. Prüfverfahren

### 2.1. Prüfeinrichtung

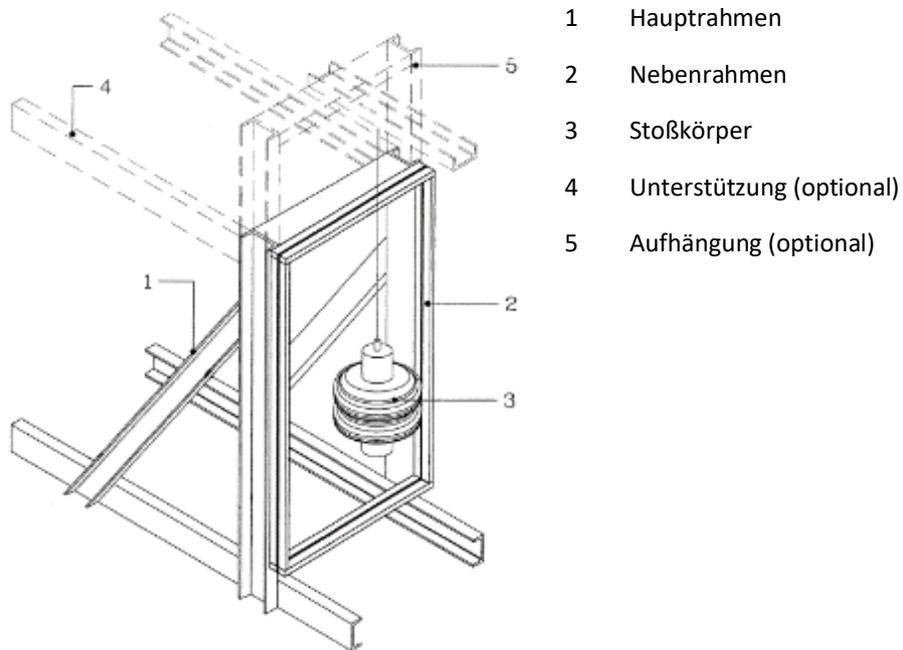


Abbildung 7-3 Prüfraumen mit Stoßkörper nach DIN EN 12600

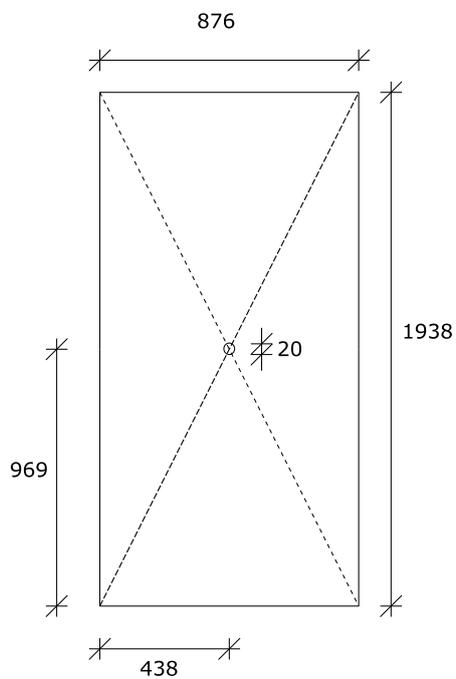


Abbildung 7-4 Probekörper für den Pendelschlagversuch mit einer entsprechenden Bohrung in den Kreuzungspunkten der Diagonalen, Einheiten [mm]

## 2.2. Prüfkörper

### 2.2.1. Aufbau und Abmessungen der Prüfkörper

Die Prüfkörper müssen die folgenden Abmessungen haben:

- Höhe:  $(1.938 \text{ mm} \pm 2) \text{ mm}$
- Breite:  $(876 \pm 2) \text{ mm}$

Der Glasaufbau ist festgelegt auf:

- 6 mm (Float) / 0.76 mm (Zwischenschicht) / 6 mm (Float)

### 2.2.2. Vorbereitung der Prüfkörper

Die Prüfkörper müssen mindestens 24 h bei einer Temperatur von  $(23 \pm 2) \text{ °C}$  konditioniert werden.

Die Bohrungen müssen vor dem Pendelversuch mit einem entsprechenden Diamanthohlbohrer mit Industriestandard und einer entsprechenden Bohrmaschine ausgeführt werden. Die Drehzahl des Bohrers ist dabei auf 250 Umdrehungen pro Minute zu begrenzen.

Zur Durchführung des Versuchs muss das Einfachglas zuerst von einer Seite und dann von der anderen Seite gebohrt werden.

## 2.3. Durchführung der Prüfung

Das gebohrte Einfachglas ist im Klemmrahmen so einzubauen, dass seine Kanten mindestens 10 mm tief auf dem Gummistreifen aufliegen. Im eingespannten Zustand dürfen die Gummistreifen um nicht mehr als 20 % ihrer Dicken zusammengepresst werden.

Beide Reifen des Stoßkörpers werden auf  $(0,35 \pm 0,02) \text{ MPa}$  Luftdruck aufgepumpt. Der Druck muss vor jedem Versuch kontrolliert werden.

Man hebe den Stoßkörper auf die Fallhöhe und stabilisiere ihn. Bei der Fallhöhe muss das Aufhängeseil straff sein und die Achse des Stoßkörpers und des Seiles sich in einer Linie befinden.

Der Stoßkörper, stabilisiert in seiner Ausgangsstellung, wird freigegeben und fällt mit einer Pendelbewegung ohne zusätzlich aufgebrachte Geschwindigkeit. Der Stoß muss im Zentrum des Prüfkörpers auftreffen und diesen nur einmal berühren. Die Prüfung ist ungültig, wenn das Pendel den Prüfkörper mehr als einmal berührt.

Die Gewichte dürfen während des Stoßes nicht mit der Glasscheibe in Kontakt kommen.

Der Prüfkörper ist nach dem Stoß zu prüfen. Es ist zu notieren, ob

- er unbeschädigt blieb oder
- er entsprechend dem Bruchbild nach einer vorgegebenen Skizze gebrochen ist und die Anforderung entsprechend Abschnitt 1 erfüllt.

Wenn der Prüfkörper den Anforderungen von Abschnitt 1 nicht entspricht, ist das Verfahren zu beenden.

Weiterhin ist die horizontale Durchbiegung  $w_h$  gemäß Abbildung 7-5 im Aufprallbereich zu messen.

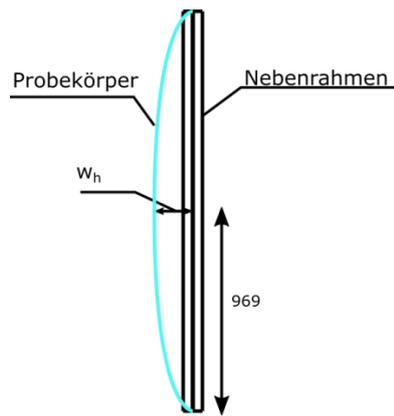


Abbildung 7-5 Seitenansicht Nebenrahmen, Messen der horizontalen Verformung in Feldmitte

### 3. Klassifizierung

Die Klassifizierung findet anschließend über die Pendelhöhe und die gemessene Durchbiegung statt. Es werden drei Klassen festgelegt:

Tabelle 49 Differenzierung der Resttragfähigkeit von VSG unter dynamischer Beanspruchung

Klasse	horizontale Durchbiegung $w_h$ [mm]	Fallhöhe [mm]
RT_d_1	$\leq 90$	1200
RT_d_2	$\leq 60$	450
RT_d_3	$\leq 30$	190

\*RT = Resttragfähigkeitsklasse, d = dynamisch

## 8 Literaturangaben

- [1] *DIN EN 14449:2017-12, Glas im Bauwesen\_ - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas\_ - Produktnorm; Deutsche und Englische Fassung prEN\_14449:2017*
- [2] *DIN EN 12600:2003-04, Glas im Bauwesen\_ - Pendelschlagversuch\_ - Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas; Deutsche Fassung EN\_12600:2002*
- [3] Franz, J.: Untersuchungen zur Resttragfähigkeit von gebrochenen Verglasungen: Investigation of the residual load-bearing behaviour of fractured glazing, Bd. 45. Springer-Verlag 2015
- [4] *DIN 18008-1:2020-05, Glas im Bauwesen\_ - Bemessungs- und Konstruktionsregeln\_ - Teil\_1: Begriffe und allgemeine Grundlagen*
- [5] *DIN 18008-6:2018-02, Glas im Bauwesen\_ - Bemessungs- und Konstruktionsregeln\_ - Teil\_6: Zusatzanforderungen an zu Instandhaltungsmaßnahmen betretbare Verglasungen und an durchsturz sichere Verglasungen*
- [6] *DIN 52338:2016-10, Prüfverfahren für Flachglas im Bauwesen\_ - Kugelfallversuch für Verbundglas*
- [7] *DIN EN 356:2000-02, Glas im Bauwesen\_ - Sicherheitssonderverglasung\_ - Prüfverfahren und Klasseneinteilung des Widerstandes gegen manuellen Angriff; Deutsche Fassung EN\_356:1999*
- [8] Kuraray: Prüfanweisung: Prüfung der Schertesthaftung an Verbundgläsern. 1994
- [9] Schneider, J., Kuntsche, J., Schula, S., Schneider, F. u. Wörner, J.-D.: Glasbau: Grundlagen, Berechnung, Konstruktion. Springer-Verlag 2016
- [10] Fahlbusch, M.: Zur Ermittlung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas am Beispiel eines Glasbogens mit Zugstab. Technische Universität 2008
- [11] Hark, M.: Approach to Quantify the Pummel Test, TU Darmstadt. Darmstadt 2012
- [12] United States Patent Office US 3,434,915
- [13] United States Patent US 4,144,376
- [14] United States Patent US 6,984,679 B2
- [15] EP 1 470 182 B1
- [16] JC/T 2166
- [17] GB/T 32020
- [18] Eastman: Architectural lamination guide, 2013
- [19] Kuraray: Manual Verarbeitung von TROSIFOL PVB-Folie, 2012
- [20] Kuraray: Trosifol Pummel test standards, 2014
- [21] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-70.3-256 Verglasungen aus Verbund-Sicherheitsglas mit der PVB-Folie Trosifol® Extra Stiff B130. 2020
- [22] Du Pont De Nemours GMBH: Arbeitsanweisung - SentryGlas® Laminat PummeltestArbeitsanweisung - SentryGlas® Laminat Pummeltest, 2009
- [23] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-70.3-253 Verglasungen aus Verbund-Sicherheitsglas mit der Zwischenschicht SentryGlas® SG5000. 2020
- [24] Bermbach, T.: Zum Resttragverhalten von Verbundsicherheitsglas unter kombinierter Luftstoß-Temperatur-Belastung. Universitätsbibliothek der Universität der Bundeswehr München 2017
- [25] Burmeister, A.: Moderne fassaden-explosionsschutz. Glas im konstruktiven Ingenieurbau, Hochschule München (2008)
- [26] Chen, S., Zang, M., Di Wang, Zheng, Z. u. Zhao, C.: Finite element modelling of impact damage in polyvinyl butyral laminated glass. Composite Structures 138 (2016), S. 1–11
- [27] Elzière, P.: Laminated glass: dynamic rupture of adhesion. 2016

- [28] Del Linz, P., Hooper, P. A., Arora, H., Smith, D., Pascoe, L., Cormie, D., Blackman, B. R.K. u. Dear, J. P.: Reaction forces of laminated glass windows subject to blast loads. *Composite Structures* 131 (2015), S. 193–206
- [29] van Dam, S.: Experimental analysis of the post-fracture response of laminated glass under impact and blast loading. Ghent University 2017
- [30] Zhang, X., Hao, H. u. Wang, Z.: Experimental study of laminated glass window responses under impulsive and blast loading. *International Journal of Impact Engineering* 78 (2015), S. 1–19
- [31] Kuntsche, J. K.: Mechanisches Verhalten von Verbundglas unter zeitabhängiger Belastung und Explosionsbeanspruchung: Mechanical behaviour of laminated glass under time-dependent and explosion loading, Bd. 46. Springer-Verlag 2015
- [32] Hooper, P. A., Sukhram, R. A.M., Blackman, B. R.K. u. Dear, J. P.: On the blast resistance of laminated glass. *International Journal of Solids and Structures* 49 (2012) 6, S. 899–918
- [33] Kraus, M. A.: Machine Learning Techniques for the Material Parameter Identification of Laminated Glass in the Intact and Post-Fracture State. Dissertation, Universität der Bundeswehr München 2018
- [34] Barsom, J. M.: Fracture of tempered glass. *Journal of the American Ceramic Society* 51 (1968) 2, S. 75–78
- [35] Pourmoghaddam, N., Kraus, M. A., Schneider, J. u. Siebert, G.: Relationship between strain energy and fracture pattern morphology of thermally tempered glass for the prediction of the 2D macro-scale fragmentation of glass. *Glass Structures & Engineering* 4 (2019) 2, S. 257–275
- [36] Nielsen, J. H.: Remaining stress-state and strain-energy in tempered glass fragments. *Glass Structures & Engineering* 2 (2017) 1, S. 45–56
- [37] Nielsen, J. H., Olesen, J. F. u. Stang, H.: The fracture process of tempered soda-lime-silica glass. *Experimental mechanics* 49 (2009) 6, S. 855
- [38] Shutov, A. I., Popov, P. B. u. Bubeev, AB: Prediction of the character of tempered glass fracture. *Glass and ceramics* 55 (1998) 1-2, S. 8–10
- [39] Galuppi, L. u. Royer-Carfagni, G.: A homogenized model for the post-breakage tensile behavior of laminated glass. *Composite Structures* 154 (2016), S. 600–615
- [40] Galuppi, L. u. Royer-Carfagni, G.: The post-breakage response of laminated heat-treated glass under in plane and out of plane loading. *Composites Part B: Engineering* 147 (2018), S. 227–239
- [41] D'Ambrosio, G., Galuppi, L. u. Royer-Carfagni, G.: Post-breakage in-plane stiffness of laminated glass: an engineering approach. *Glass Structures & Engineering* 4 (2019) 3, S. 421–432
- [42] Bennison, S., Sloan, J., Kistunas, D., Buehler, P., Amos, T. u. Smith, C. (Hrsg.): Laminated glass for blast mitigation: Role of interlayer properties, Bd. 2005. 2005
- [43] Hooper, P.: Blast performance of silicone-bonded laminated glass (2011)
- [44] Iwasaki, R., Sato, C., Latailladeand, J. L. u. Viot, P.: Experimental study on the interface fracture toughness of PVB (polyvinyl butyral)/glass at high strain rates. *International Journal of Crashworthiness* 12 (2007) 3, S. 293–298
- [45] Morison, C.: The resistance of laminated glass to blast pressure loading and the coefficients for single degree of freedom analysis of laminated glass (2010)
- [46] Zhang, X., Hao, H., Shi, Y. u. Cui, J.: The mechanical properties of Polyvinyl Butyral (PVB) at high strain rates. *Construction and building materials* 93 (2015), S. 404–415
- [47] Xu, X., Liu, B., Wang, Y. u. Li, Y.: Research on temperature and strain rate dependent viscoelastic response of polyvinyl butyral film. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* 9 (2016) 3, S. 788–793
- [48] Chen, S., Chen, X. u. Wu, X.: The mechanical behaviour of polyvinyl butyral at intermediate strain rates and different temperatures. *Construction and building materials* 182 (2018), S. 66–79

- [49] Chen, S., Wu, X. u. Rong, W.: Tensile Property of Polyvinyl Butyral at Low Strain Rate. *Polymer Materials Science & Engineering* 30 (2014) 1, S. 66–71
- [50] Kott, A. K.: Zum trag-und resttragverhalten von verbundsicherheitsglas (German text) (2006)
- [51] Kott, A. u. Vogel, T.: Versuche zum Trag-und Resttragverhalten von Verbundsicherheitsglas. vdf Hochschulverlag AG 2006
- [52] R. Carrasco: Experimental and numerical investigation of the post-breakage behaviour of laminated glass subjected to static loading, Technische Universität Masterarbeit. Darmstadt 2014
- [53] Fahlbusch, M.: Zur Ermittlung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas am Beispiel eines Glasbogens mit Zugstab. Technische Universität 2008
- [54] Feirabend, S.: Steigerung der Resttragfähigkeit von Verbundsicherheitsglas mittels Bewehrung in der Zwischenschicht (2010)
- [55] Sha, Y., Hui, C. Y., Kramer, E. J., Garrett, P. D. u. Knapczyk, J. W.: Analysis of adhesion and interface debonding in laminated safety glass. *Journal of adhesion science and technology* 11 (1997) 1, S. 49–63
- [56] Butchart, C. u. Overend, M.: Delamination in fractured laminated glass. *engineered transparency international conference at glasstec*, S. 249–257
- [57] Nhamoinesu, S. u. Overend, M. (Hrsg.): Simple models for predicting the post-fracture behaviour of laminated glass. 2010
- [58] Delincé, D., Sonck, D., Belis, J., Callewaert, D. u. van Impe, R.: Experimental investigation of the local bridging behaviour of the interlayer in broken laminated glass. *International Symposium on the Application of Architectural Glass ISAAG 2008 Conference Proceedings, Munich, October 27-28, 2008*, S. 41–49
- [59] Ferretti, D., Rossi, M. u. Royer-Carfagni, G.: Through cracked tensile delamination tests with photoelastic measurements. *Challenging Glass 3* (2012), S. 641–652
- [60] Samieian, M. A., Cormie, D., Smith, D., Wholey, W., Blackman, B. R. K., Dear, J. P. u. Hooper, P. A.: Temperature effects on laminated glass at high rate. *International Journal of Impact Engineering* 111 (2018), S. 177–186
- [61] Barenblatt, G. I.: The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 23 (1959) 3, S. 622–636
- [62] Shet, C. u. Chandra, N.: Analysis of energy balance when using cohesive zone models to simulate fracture processes. *J. Eng. Mater. Technol.* 124 (2002) 4, S. 440–450
- [63] Alfano, G. u. Crisfield, M. A.: Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *International journal for numerical methods in engineering* 50 (2001) 7, S. 1701–1736
- [64] Xu, X.-P. u. Needleman, A.: Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 42 (1994) 9, S. 1397–1434
- [65] Keller, U., Mortelmans, H.: Adhesion in laminated safety glass—what makes it work? In: *The Sixth International Conference on Architectural and Automotive Glass*
- [66] Hof, P. u. Oechsner, M.: Testing of adhesion on laminated glass using photometric measurements. In: *Glass Performance Days, Tampere, Finland*
- [67] W. Sobek, M. Kutterer, R. Messmer: Rheologisches Verhalten von PVB im Schubverbund. *Forschungsbericht* 4 1998
- [68] Kinloch, A. J., Lau, C. C. u. Williams, J. G.: The peeling of flexible laminates. *International Journal of Fracture* 66 (1994) 1, S. 45–70

- [69] Blackman, B., Dear, J. P., Kinloch, A. J. u. Osiyemi, S.: The calculation of adhesive fracture energies from double-cantilever beam test specimens. *Journal of Materials Science Letters* 10 (1991) 5, S. 253–256
- [70] Moura, M. de u. Morais, A. B. de: Equivalent crack based analyses of ENF and ELS tests. *Engineering Fracture Mechanics* 75 (2008) 9, S. 2584–2596
- [71] Tommy Löfstedt, Patrik Brynolfsson, Thomas Asklund, Tufve Nyholm u. Anders Garpebring: Gray-level invariant Haralick texture features. *PLOS ONE* 14 (2019) 2, e0212110
- [72] Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I.: Textural features for image classification. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern* 1973, S. 610–621
- [73] Zayed, N. u. Elnemr, H. A.: Statistical Analysis of Haralick Texture Features to Discriminate Lung Abnormalities. *International Journal of Biomedical Imaging* 2015 (2015)
- [74] Otsu: A threshold selection method from grey-level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern* (1979), S. 62–66
- [75] Drass, M., Schwind, G., Schneider, J. u. Kolling, S.: Adhesive connections in glass structures — part I: experiments and analytics on thin structural silicone. *Glass Structures & Engineering* 3 (2018) 1, S. 39–54
- [76] *DIN EN 14869-2:2011-07, Strukturklebstoffe\_ - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen\_ - Teil\_2: Scherprüfung für dicke Fügebauteile (ISO\_11003-2:2001, modifiziert); Deutsche Fassung EN\_14869-2:2011*
- [77] Lars Christ: Untersuchungen zum Resttragverhalten von Verbundglas hinsichtlich der Haftung zwischen Glas und Zwischenschicht, Universität der Bundeswehr Masterarbeit. München 2019
- [78] 2000-09. *EN 1288-3: Glas im Bauwesen - Bestimmung der Biegefestigkeit von Glas*, abgerufen am: 24.08.2020
- [79] Schuster, M., Kraus, M., Schneider, J., Siebert, G.: Investigations on the thermorheologically complex material behaviour of the laminated safety glass interlayer ethylene-vinyl-acetate. *Glass Structures & Engineering* 3, 373 -
- [80] Kraus, M. A., Schuster, M., Kuntsche, J., Siebert, G. u. Schneider, J.: Parameter identification methods for visco- and hyperelastic material models. *Glass Structures & Engineering* (2017) 2, S. 147–167
- [81] Kuntsche, J., Schuster, M., Schneider, J.: Engineering design of laminated safety glass considering the shear coupling: a review. *Glass Structures & Engineering* (2019) 4, S. 209–228
- [82] Kuntsche, J., Schuster, M., Schneider, J.: Engineering design of laminated safety glass considering the shear coupling: a review. *Glass Structures & Engineering* (2019) 4, S. 209–228
- [83] trosifol: Product Info: SentryGlas
- [84] Hoffmann, A.: Datasheet EV100 EV200

## 9 Anhang

### 9.1 Geometrie der Klein-Pummelproben und den Lagerungsbedingungen

#### Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 1: Manuelles Pummeln Testperson 1

Versuchsreihe 1: Testperson 1 - manuelle Durchführung mit Impulshammer (-18 °C)													
Proben-Nr.				1.1		1.2		1.3		1.4		1.5	
Orientierung				Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F
Abmessungen	Glasscheibendicke	t <sub>Glas</sub>	[mm]	-	-	-	2,84	-	-	2,82	2,84	2,83	2,84
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]	6,40		6,38		6,46		6,36		6,40	
	Gewicht	m <sub>ges</sub>	[g]	447		447		445		449		444	
Lagerungsbedingungen	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	30±5		30±5		30±5		30±5		30±5	
	Dauer			24 h 15 min		24 h 35 min		25 h 15 min		25 h 30 min		26 h 10 min	
Zwischenlagerung	Temperatur	T <sub>zwischenlagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	30±5		30±5		30±5		30±5		30±5	
	Dauer		[min]	15		15		20		20		15	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	60-70		60-70		60-70		60-70		60-70	
	Kraft		[N]	Siehe Messrechner		-		Siehe Messrechner		-		Siehe Messrechner	
Glasoberfläche	Temperatur	T <sub>Anfang</sub>	[°C]	-7,8	-5,0	-6,8	-3,2	-4,8	-3,1	-4,5	-0,8	-3,4	-3,1
		T <sub>Ende</sub>	[°C]	9,8	10,2	10,2	10,8	9,7	12,4	4,5	8,7	4,5	4,6
Umgebung	Temperatur	T <sub>Umgebung</sub>	[°C]	24,4		24,4		24,4		24,4		24,4	
	rel. Luftfeuchte		[%]	46,4		46,4		46,4		46,4		46,4	
Anmerkung				F-Seite zu viele Glasrückstände				Auflager auf F-Seite gesprungen					

Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	447		447		445		449		444	
nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	355	250	354	261	354	254	339	229	336	235

#### Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 2: Manuelles Pummeln Testperson 2

Versuchsreihe 2: Testperson 2 - manuelle Durchführung mit Impulshammer (-18 °C)													
Proben-Nr.				2.1		2.2		2.3		2.4		2.5	
Orientierung				Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F
Abmessungen	Glasscheibendicke	t <sub>Glas</sub>	[mm]	2,84	2,83	-	-	2,86	2,88	2,86	2,83	2,86	2,85
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]	6,39		6,41		6,50		6,45		6,45	
	Gewicht	m <sub>ges</sub>	[g]	455		451		455		448		444	
Lagerungsbedingungen	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	30±5		30±5		30±5		30±5		30±5	
	Dauer			25 h 45 min		25 h 55 min		26 h 06 min		26 h 10 min		26 h 15 min	
Zwischenlagerung	Temperatur	T <sub>zwischenlagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	30±5		30±5		30±5		30±5		30±5	
	Dauer		[min]	25		25		25		25		25	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner	
	Kraft		[N]	Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner	
Glasoberfläche	Temperatur	T <sub>Anfang</sub>	[°C]	-6,8	-3,8	-8,0	-1,8	-8,5	-2,2	-10,5	-7,8	-7,2	-3,2
		T <sub>Ende</sub>	[°C]	2,0	4,0	0,0	5,5	2,0	4,3	1,8	0,0	1,8	6,3
Umgebung	Temperatur	T <sub>Umgebung</sub>	[°C]	24,2		24,2		24,2		24,2		24,2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	46,4		46,4		46,4		46,4		46,4	
Anmerkung				Sn-Seite: Zu viele Glasrückstände, kein Pummelwert definierbar				Auflager auf F-Seite gesprungen				Auflager auf F-Seite gesprungen	

Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	455		451		445		448		258	
nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	354	269	374	291	390	283	355	252	366	258

## Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 3: Manuelles Pummeln Testperson 3

Versuchsreihe 3: Testperson 3 - manuelle Durchführung mit Impulshammer (-18 °C)													
Proben-Nr.			3.1		3.2		3.3		3.4		3.5		
Orientierung			Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F	
Abmessungen	Glasscheibendicke	t <sub>Glas</sub>	[mm]	2,88	2,82	-	-	-	-	2,88	2,89	2,88	2,86
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]	6,45		6,34		6,35		3,49		3,48	
	Gewicht	m <sub>ges</sub>	[g]	452		445		446		454		459	
Lagerungsbedingungen	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	30±5		30±5		30±5		30±5		30±5	
	Dauer			24 h 10 min		24 h 17 min		24 h 24 min		25 h 50 min		25 h 55 min	
Zwischenlagerung	Temperatur	T <sub>zwischenlagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	30±5		30±5		30±5		30±5		30±5	
	Dauer		[min]	25		30		15		15		10	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner	
	Kraft		[N]	Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner	
Glasoberfläche	Temperatur	T <sub>Anfang</sub>	[°C]	-7,9	-4,1	-5,9	-5,0	-7,2	1,7	-8,2	-0,8	-8,4	0,4
		T <sub>Ende</sub>	[°C]	2,0	1,9	1,1	7,6	6,6	4,9	1,1	6,2	-0,9	7,0
Umgebung	Temperatur	T <sub>Umgebung</sub>	[°C]	25		25		25		25		25	
	rel. Luftfeuchte		[%]	43,2		43,2		43,2		43,2		43,2	
Anmerkung	Beschleunigungssensor bei Sn-Seite abgefallen, Glas wird noch mal zwischen gelagert für ca. 10 min. F-Seite gleiches Problem. Folge: 3. Probe nicht auswertbar												

Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	452		445		446		454		459	
nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	366	245	335	214	-	-	344	226	354	233

## Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 4: halbautomatisiertes Pummeln (ohne Kraftaufzeichnung)

Versuchsreihe 4: halbautomatische Durchführung mit Schloßerhammer (-18 °C)													
Proben-Nr.			4.1		4.2		4.3		4.4		4.5		
Orientierung			Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F	
Abmessungen	Glasscheibendicke	t <sub>Glas</sub>	[mm]	2,82	2,87	2,83	2,9	2,88	2,9	2,83	2,88	2,82	2,88
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]	6,36		6,45		6,54		6,44		6,46	
	Gewicht	m <sub>ges</sub>	[g]	451		455		469		445		431	
Lagerungsbedingungen	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	48,3		48,2		47,5		34,3		34,0	
	Dauer			24 h		24 h 13 min		25 h 16 min		24 h		24 h 15 min	
Zwischenlagerung	Temperatur	T <sub>zwischenlagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	47,4		48,1		47,3		48,9		49	
	Dauer		[min]	30		20		15		15		15	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	77	77	88	77	77	77	77	77	88	
	Kraft		[N]										
Glasoberfläche	Temperatur	T <sub>Anfang</sub>	[°C]	-0,2		-3,5		-6,2		-5,9		-5,2	
		T <sub>Ende</sub>	[°C]	18,1		19		17,4		17,4		17,6	
Umgebung	Temperatur	T <sub>Umgebung</sub>	[°C]	23		23		23		24,4		24,4	
	rel. Luftfeuchte		[%]	29,7		29,7		29,7		30,7		30,7	
Anmerkung	Hammer verdrehte sich nach ca. 5 Schlägen. Der Hammer musste wieder in die richtige Position gebracht werden (Dauer: ca. 5 min)												

Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	451		455		469		445		431	
nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	355	264	338	244	376	277	342	240	359	255

## Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 5: halbautomatisiertes Pummeln (mit Kraftaufzeichnung)

Versuchsreihe 5: halbautomatische Durchführung mit Impulshammer (-18 °C)														
Proben-Nr.			5.1		5.2		5.3		5.4		5.5			
Orientierung			Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F	Sn	F		
Abmessungen	Glasscheibendicke	t <sub>Glas</sub>	[mm]		2,87	2,88	2,85	2,88	2,86	2,89	2,85	2,88	2,85	2,88
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]		6,54		6,51		66,53		6,47		6,51	
Lagerungsbedingungen	Gewicht	m <sub>ges</sub>	[g]		454		455		459		452		455	
	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]		30±5		30±5		30±5		30±5		30±5	
Zwischenlagerung	Dauer				24 h 30 min		25 h 30 min		24 h 15 min		24 h 20 min		25 h	
	Temperatur	T <sub>zwischenlagerung</sub>	[°C]		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]		36,4		34,8		35,7		36,9		38,5	
Hammer	Dauer		[min]		15		15		15		15		15	
	Anzahl der Schläge		[-]		42	42	54	54	54	54	54	54	54	54
Glasoberfläche	Kraft		[N]		Siehe Messrechner		-		-		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner	
	Temperatur	T <sub>Anfang</sub>	[°C]		-6,8	-3,8	-8,0	-1,8	-8,5	-2,2	-10,5	-7,8	-7,2	-3,2
		T <sub>Ende</sub>	[°C]		2,0	4,0	0,0	5,5	2,0	4,3	1,8	0,0	1,8	6,3
Umgebung	Temperatur	T <sub>Umgebung</sub>	[°C]		24,2		24,2		24,2		24,2		24,2	
	rel. Luftfeuchte		[%]		33,3		33,3		33,3		33,3		33,3	
Anmerkung				Zu viele Rückstände. Ursache: Anzahl der Schläge ist zu gering; Stelle an Auflager gerbochen, Ursache: Glas zu fest eingespannt								Glas musste zwischendurch nochmal eingespannt werden; Stelle an Auflager gerbochen, Ursache: Glas zu fest eingespannt		

Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	454		455		459		452		455	
nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	374	290	350	241	335	223	356	252	347	254

## Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 6: halbautomatisiertes Pummeln, Lagerungstemperatur 20°C

Versuchsreihe 6: halbautomatische Durchführung mit Impulshammer (20 °C)												
Proben-Nr.			6.1		6.2		6.3					
Orientierung			Sn	F	Sn	F	Sn	F				
Abmessungen	Glasscheibendicke	t <sub>Glas</sub>	[mm]		-	2,81	-	-	-	-	-	-
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]		6,44		6,49		6,47		6,47	
Lagerungsbedingungen	Gewicht	m <sub>ges</sub>	[g]		454		455		459		459	
	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]		23±2		23±2		23±2		23±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]		-		-		-		-	
Zwischenlagerung	Dauer				-		-		-		-	
	Temperatur	T <sub>zwischenlagerung</sub>	[°C]		-		-		-		-	
	rel. Luftfeuchte		[%]		-		-		-		-	
Hammer	Dauer		[min]		-		-		-		-	
	Anzahl der Schläge		[-]		54	54	54	54	54	54	54	54
Glasoberfläche	Kraft		[N]		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner	
	Temperatur	T <sub>Anfang</sub>	[°C]		21,8	22,1	22,0	21,9	23,4	23,1	23,1	23,1
		T <sub>Ende</sub>	[°C]		23,1	22,3	22,5	22,3	23,3	23,3	23,3	23,2
Umgebung	Temperatur	T <sub>Umgebung</sub>	[°C]		22		22		22,2		22,2	
	rel. Luftfeuchte		[%]		44,3		44,3		44,3		44,3	
Anmerkung				Zu viele Glasrückstände, Pummelbild nicht mit den vorhandenen Referenzbildern vergleichbar								

Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	454		455		459	
nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	361	280	365	277	371	283

### Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 7: halbautomatisiertes Pummeln, Lagerungstemperatur 60°C

Versuchsreihe 7: halbautomatische Durchführung mit Impulshammer (+60 °C)									
Proben-Nr.				7.1		7.2		7.3	
Orientierung				Sn	F	Sn	F	Sn	F
Abmessungen	Glasscheibendicke	t <sub>glas</sub>	[mm]	-	2,81	-	-	-	-
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]	6,44		6,49		6,47	
	Gewicht	m <sub>ges</sub>	[g]	460		454		461	
Lagerungsbedingungen	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	60±2		60±2		60±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	-		-		-	
	Dauer			-		-		-	
Zwischenlagerung	Temperatur	T <sub>zwischenlagerung</sub>	[°C]	60±2		60±2		60±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	25±5		25±5		25±5	
	Dauer		[min]	15		15		15	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	54	54	54	54	54	54
	Kraft		[N]	Siehe Messrechner		Siehe Messrechner		Siehe Messrechner	
Glasoberfläche	Temperatur	T <sub>Anfang</sub>	[°C]	55,7	52,2	55,4	51,6	54,5	49,5
		T <sub>Ende</sub>	[°C]	46,6	42,2	45,5	43,4	45,7	42,2
Umgebung	Temperatur	T <sub>Umgebung</sub>	[°C]	25,8		25,8		25,8	
	rel. Luftfeuchte		[%]	49,9		49,9		49,9	
Anmerkung				Zu viele Glasrückstände, Pummelbild nicht mit den vorhandenen Referenzbilder vergleichbar					

Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	460		454		461	
nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	398	328	380	317	398	329

### Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 1: RB41 STD

Versuchsreihe RB41 STD (Pummelapparat (-18°C))									
Proben-Nr.				1		3		5	
Orientierung				Sn	F	Sn	F	Sn	F
Abmessungen	Glasscheibennenddicke	t <sub>glas</sub>	[mm]	3		3		3	
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]	6,44		6,54		6,45	
	Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	440		447		455	
	nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	354	269	302	263	350	263
Lagerungsbedingungen	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[h]	-24±2		-24±2		-24±2	
Zwischenlagerung	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[min]	15		15		15	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	56 (Schlagmuster)		56 (schlagmuster)		56 (Schlagmuster)	
Glasoberfläche	Temperatur	T <sub>anfang</sub>	[°C]	-11,4		-10,8		-8,4	
		T <sub>ende</sub>	[°C]	3,8	6	4,6	4,8	4,6	6
Umgebung	Temperatur	T <sub>umgebung</sub>	[°C]	Raumklima		Raumklima		Raumklima	
Anmerkung				Sn und F Seite waren nicht eindeutig differenzierbar					

## Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 2: RB41 HM (High Moisture)

Versuchsreihe RB41 High Moisture (Pummelapparat (-18°C))									
Proben-Nr.				1		3		4	
Orientierung				Sn	F	Sn	F	Sn	F
Abmessungen	Glasscheibennendicke	$t_{\text{glas}}$	[mm]	3		3		3	
	Gesamtdicke	$t_{\text{ges}}$	[mm]	6,41		6,43		6,5	
	Gewicht vor Pummeln	$m_{\text{ges}}$	[g]	449		449		451	
	nach Pummeln	$m_{\text{ges}}$	[g]	358	272	334	231	354	269
Lagerungsbedingungen	Temperatur	$T_{\text{lagerung}}$	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[h]	-24±2		-24±2		-24±2	
Zwischenlagerung	Temperatur	$T_{\text{lagerung}}$	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[min]	15		15		15	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	56 (Schlagmuster)		56 (schlagmuster)		56 (Schlagmuster)	
Glasoberfläche	Temperatur	$T_{\text{anfang}}$	[°C]	-12,8		-13,4		-12,3	
		$T_{\text{ende}}$	[°C]	5	5	3	4,7	2,9	5,2
Umgebung	Temperatur	$T_{\text{umgebung}}$	[°C]	Raumklima		Raumklima		Raumklima	
Anmerkung									

## Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 3: RB41 LM (Low Moisture)

Versuchsreihe RB41 Low Moisture (Pummelapparat (-18°C))													
Proben-Nr.				1		2		3		4		5	
Orientierung				Sn	F								
Abmessungen	Glasscheibennendicke	$t_{\text{glas}}$	[mm]	3		3		3		3		3	
	Gesamtdicke	$t_{\text{ges}}$	[mm]	6,48		6,48		6,42		6,38		6,4	
	Gewicht vor Pummeln	$m_{\text{ges}}$	[g]	462		456		455		452		457	
	nach Pummeln	$m_{\text{ges}}$	[g]	359	271	373	266	367	248	361	276	357	272
Lagerungsbedingungen	Temperatur	$T_{\text{lagerung}}$	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25		~ 25		~25	
	Dauer		[h]	-24±2		-24±2		-24±2		-24±2		-24±2	
Zwischenlagerung	Temperatur	$T_{\text{lagerung}}$	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25		~ 25		~25	
	Dauer		[min]	15		15		15		15		15	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	56 (Schlagmuster)									
Glasoberfläche	Temperatur	$T_{\text{anfang}}$	[°C]	-11,4		-12,3		-13,2		-15,1		-11,8	
		$T_{\text{ende}}$	[°C]	5,1	7,8	7,3	8,4	4,2	4,3	6,2	11	3,8	6,2
Umgebung	Temperatur	$T_{\text{umgebung}}$	[°C]	Raumklima									
Anmerkung	Sn und F Seite waren nicht eindeutig differenzierbar												

## Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 4: RA41

Versuchsreihe RA41 (Pummelapparat (-18°C))											
Proben-Nr.				3		4		5			
Orientierung				Sn	F	Sn	F	Sn	F		
Abmessungen	Glasscheibennendicke	$t_{\text{glas}}$	[mm]	3		3		3			
	Gesamtdicke	$t_{\text{ges}}$	[mm]	6,4		6,49		6,42			
	Gewicht vor Pummeln	$m_{\text{ges}}$	[g]	445		463		449			
	nach Pummeln	$m_{\text{ges}}$	[g]	352	271	369	264	354	266		
Lagerungsbedingungen	Temperatur	$T_{\text{lagerung}}$	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2			
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25			
	Dauer		[h]	-24±2		-24±2		-24±2			
Zwischenlagerung	Temperatur	$T_{\text{lagerung}}$	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2			
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25			
	Dauer		[min]	15		15		15			
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	56 (Schlagmuster)		56 (schlagmuster)		56 (Schlagmuster)			
Glasoberfläche	Temperatur	$T_{\text{anfang}}$	[°C]	-13,8		-11,8		-14,8			
		$T_{\text{ende}}$	[°C]	4,9	4,8	1,8	1,8	0,8	4,2		
Umgebung	Temperatur	$T_{\text{umgebung}}$	[°C]	Raumklima		Raumklima		Raumklima			
Anmerkung	Sn und F Seite waren nicht eindeutig differenzierbar										

## Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 5: RC41

Versuchsreihe RC41 (Pummelapparat (-18°C))									
Proben-Nr.				2		3		4	
Orientierung				Sn	F	Sn	F	Sn	F
Abmessungen	Glasscheibennenddicke	t <sub>glas</sub>	[mm]	3		3		3	
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]	6,43		6,41		6,43	
	Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	449		451		457	
	nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	353	241	349	273	364	278
Lagerungsbedingungen	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[h]	-24±2		-24±2		-24±2	
Zwischenlagerung	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[min]	15		15		15	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	56 (Schlagmuster)		56 (schlagmuster)		56 (Schlagmuster)	
Glasoberfläche	Temperatur	T <sub>anfang</sub>	[°C]	-14		-13,5		-12,8	
		T <sub>ende</sub>	[°C]	2,4	5,1	3,3	3,2	2,9	5
Umgebung	Temperatur	T <sub>umgebung</sub>	[°C]	Raumklima		Raumklima		Raumklima	
Anmerkung									

## Kleinproben – Versuchsreihe 3: Serie 1: EVA (-18°C)

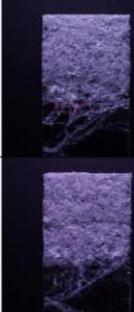
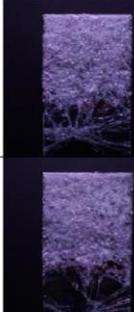
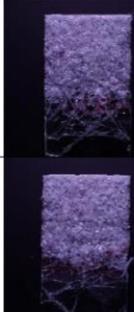
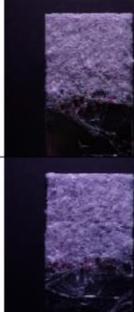
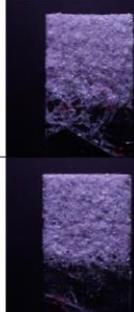
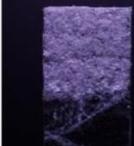
Versuchsreihe EVA (Pummelapparat (-18°C))									
Proben-Nr.				1		2		3	
Orientierung				/	/	/	/	/	/
Abmessungen	Glasscheibennenddicke	t <sub>glas</sub>	[mm]	3		3		3	
	Einzelne Glasdicken		[mm]	3,02	2,94	3	2,97	2,92	3,02
	Foliendicke		[mm]	0,61		0,56		0,62	
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]	6,57		6,53		6,56	
	Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	448		454		451	
	nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	385	/	392	/	390	/
Lagerungsbedingungen	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[h]	-24±2		-24±2		-24±2	
Zwischenlagerung	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-18±2		-18±2		-18±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[min]	15		15		15	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	56 (Schlagmuster)		56 (schlagmuster)		56 (Schlagmuster)	
Glasoberfläche	Temperatur	T <sub>anfang</sub>	[°C]	/	/	/	/	/	/
		T <sub>ende</sub>	[°C]	/	/	/	/	/	/
Umgebung	Temperatur	T <sub>umgebung</sub>	[°C]	Raumklima		Raumklima		Raumklima	
Anmerkung	Es wurde nur jeweils nur eine Seite gepummelt, ohne Bestimmung der Sn und F Seite und ohne Temp.Messung								

## Kleinproben – Versuchsreihe 3: Serie 2: EVA (-50°C)

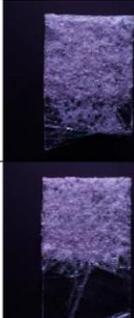
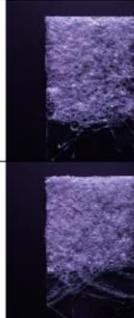
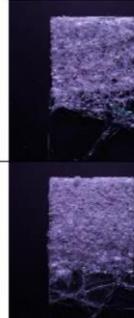
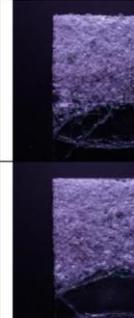
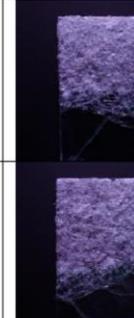
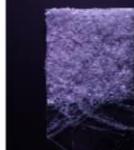
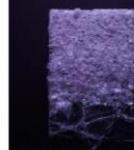
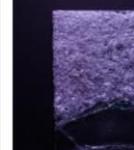
Versuchsreihe EVA (Pummelapparat (-50°C))									
Proben-Nr.				1		2		3	
Orientierung				/	/	/	/	/	/
Abmessungen	Glasscheibennenddicke	t <sub>glas</sub>	[mm]	3		3		3	
	Einzelne Glasdicken		[mm]	2,97	2,92	2,97	2,96	3	2,99
	Foliendicke		[mm]	0,59		0,57		0,54	
	Gesamtdicke	t <sub>ges</sub>	[mm]	6,48		6,5		6,53	
	Gewicht vor Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	458		456		450	
	nach Pummeln	m <sub>ges</sub>	[g]	378	/	380	/	383	/
Lagerungsbedingungen	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-50±2		-50±2		-50±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[h]	-24±2		-24±2		-24±2	
Zwischenlagerung	Temperatur	T <sub>lagerung</sub>	[°C]	-50±2		-50±2		-50±2	
	rel. Luftfeuchte		[%]	~ 25		~25		~25	
	Dauer		[min]	15		15		15	
Hammer	Anzahl der Schläge		[-]	56 (Schlagmuster)		56 (schlagmuster)		56 (Schlagmuster)	
Glasoberfläche	Temperatur	T <sub>anfang</sub>	[°C]	/	/	/	/	/	/
		T <sub>ende</sub>	[°C]	/	/	/	/	/	/
Umgebung	Temperatur	T <sub>umgebung</sub>	[°C]	Raumklima		Raumklima		Raumklima	
Anmerkung	Es wurde nur jeweils nur eine Seite gepummelt, ohne Bestimmung der Sn und F Seite und ohne Temp.Messung								

## 9.2 Bilder der gepummelten Kleinproben

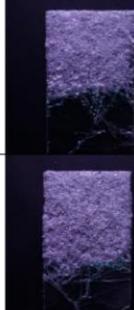
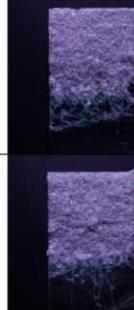
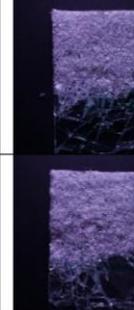
**Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 1: Manuelles Pummeln Testperson 1**

Probe	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Sn					
F					

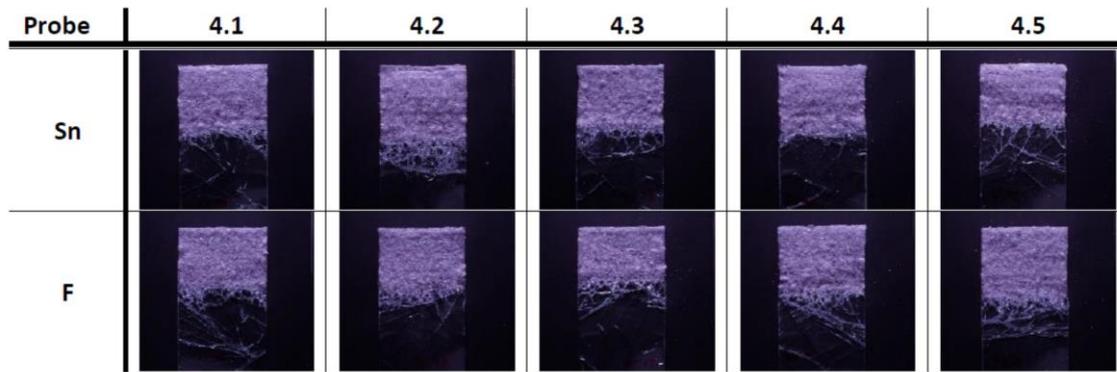
**Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 2: Manuelles Pummeln Testperson 2**

Probe	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
Sn					
F					

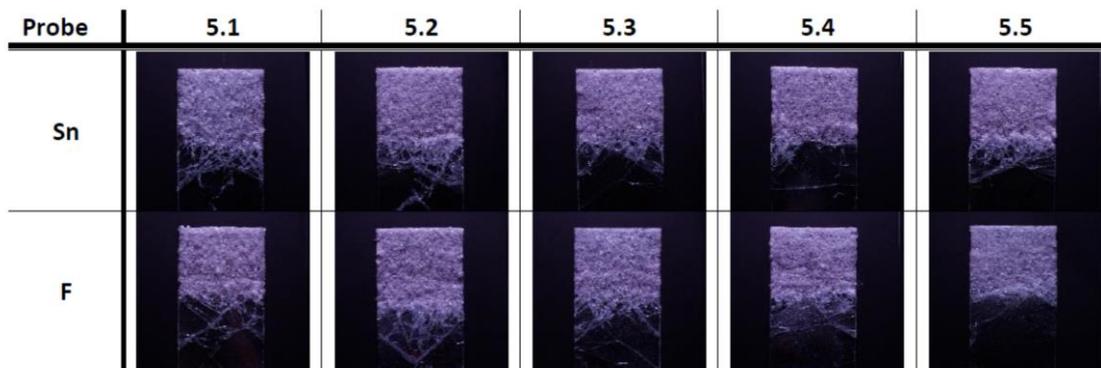
**Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 3: Manuelles Pummeln Testperson 3**

Probe	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
Sn					
F					

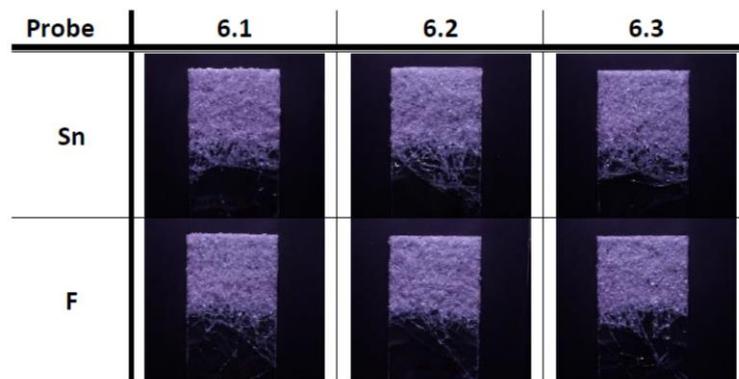
**Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 4: halbautomatisiertes Pummeln (ohne Kraftaufzeichnung)**



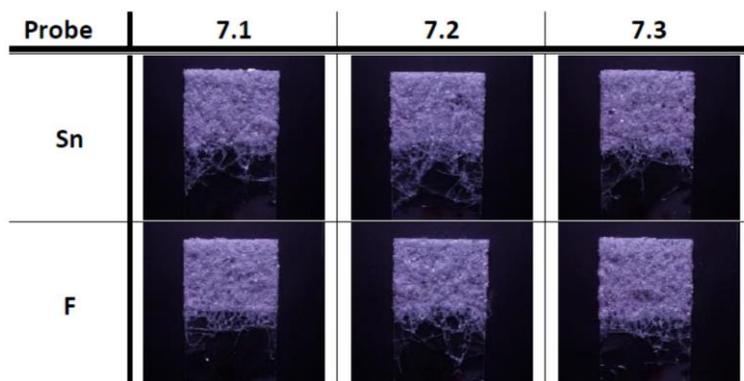
**Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 5: halbautomatisiertes Pummeln (mit Kraftaufzeichnung)**



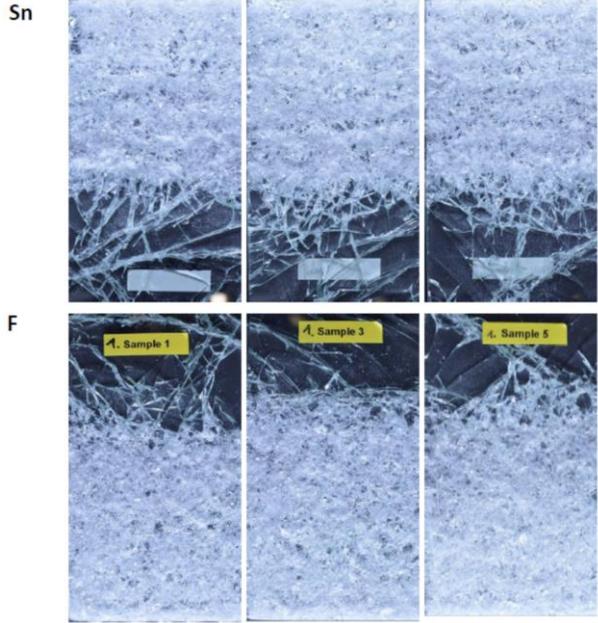
**Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 6: halbautomatisiertes Pummeln, Lagerungstemperatur 20°C**



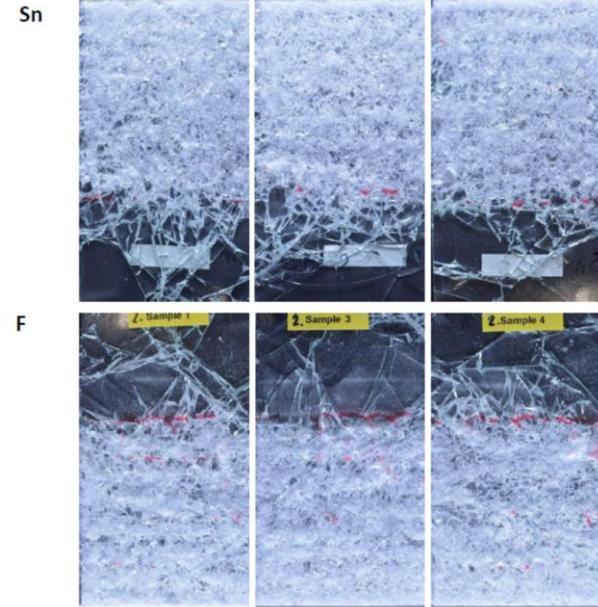
**Kleinproben – Versuchsreihe 1: Serie 7: halbautomatisiertes Pummeln, Lagerungstemperatur 60°C**



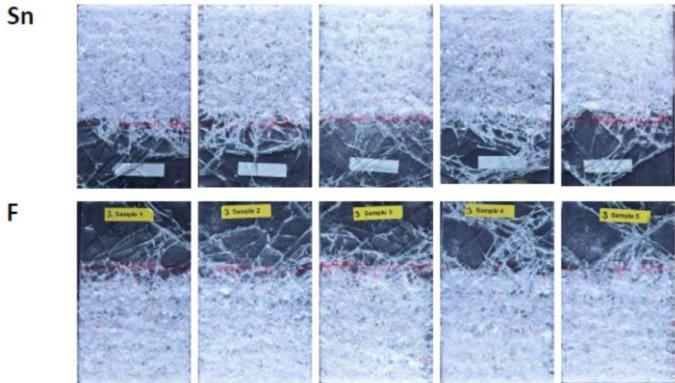
**Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 1: RB41 STD**



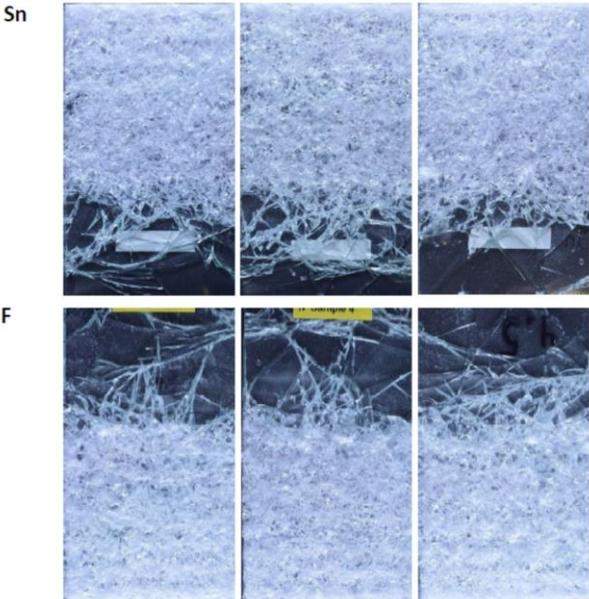
**Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 2: RB41 HM (High Moisture)**



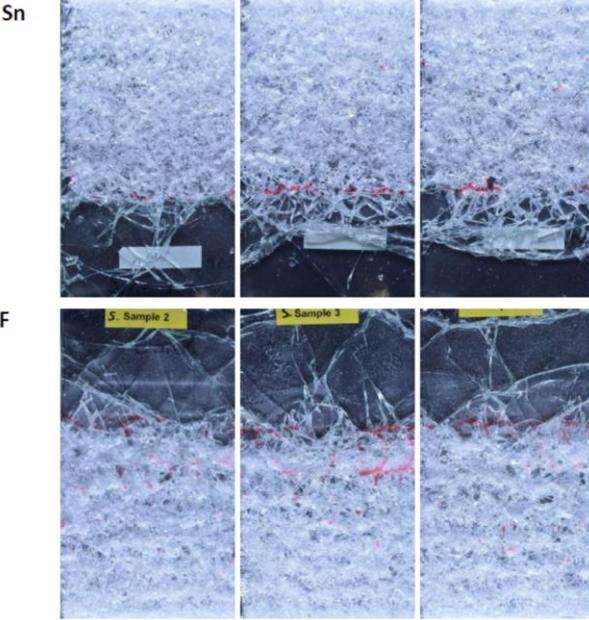
**Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 3: RB41 LM (Low Moisture)**



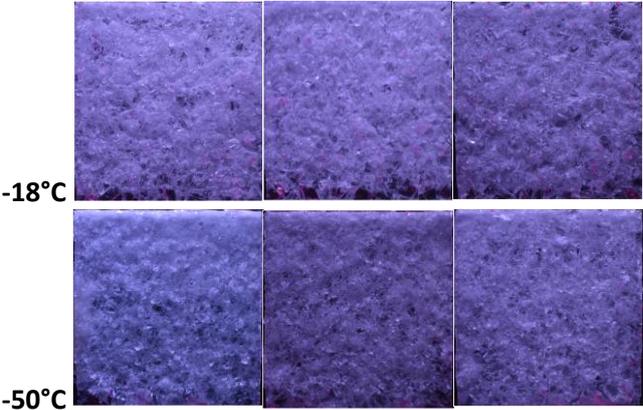
**Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 4: RA41**



**Kleinproben – Versuchsreihe 2: Serie 4: RC41**



**Kleinproben – Versuchsreihe 3: Serie 1 und 2: EVA (-18°C) und EVA (-50°C)**

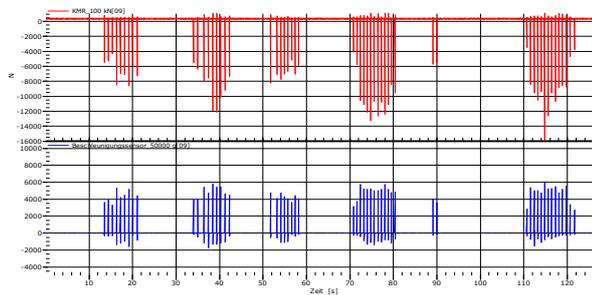


9.3 Kraft-Zeit-Verläufe (rot) und Beschleunigungs-Zeit-Verläufe (Blau)

**Manuell – Testperson 1**

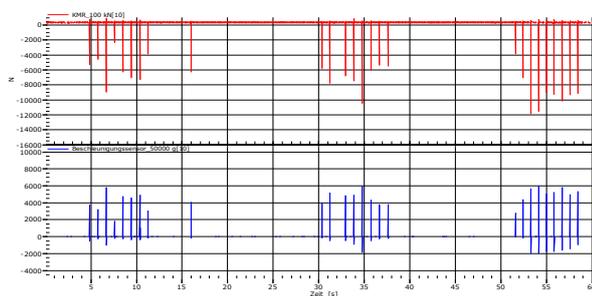
1.1 F

Reihe	Schläge
1	9
2	9
3	8
4	15
5	14
	Summe: 55



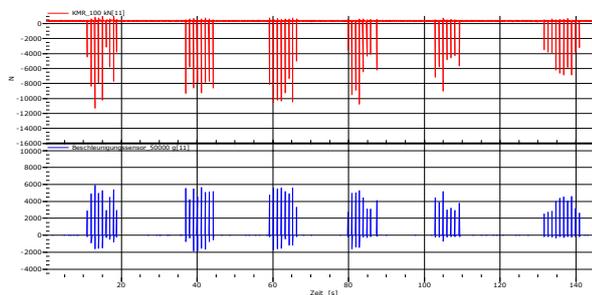
1.1 Sn

Reihe	Schläge
1	9
2	8
3	9
	Summe: 26



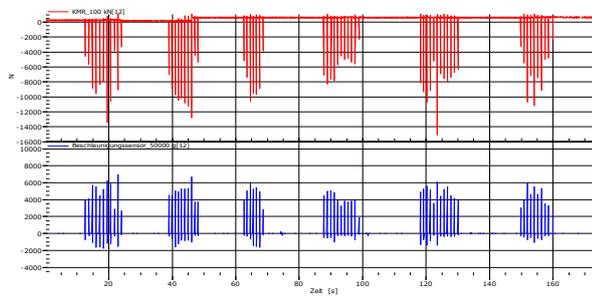
1.3 F

Reihe	Schläge
1	9
2	8
3	8
4	8
5	7
6	10
	Summe: 50



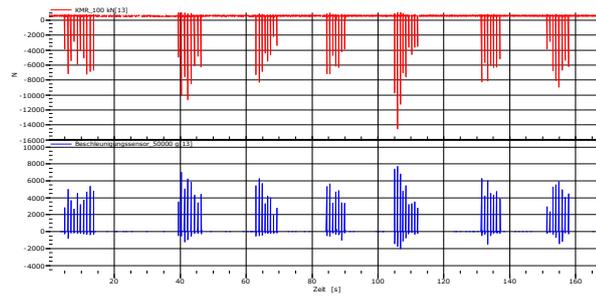
1.3 Sn

Reihe	Schläge
1	11
2	10
3	7
4	11
5	11
6	10
	Summe: 60



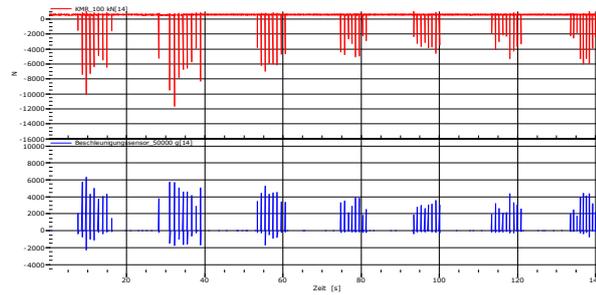
1.5 F

Reihe	Schläge
1	10
2	8
3	8
4	7
5	9
6	7
7	8
	Summe: 57



1.5 Sn

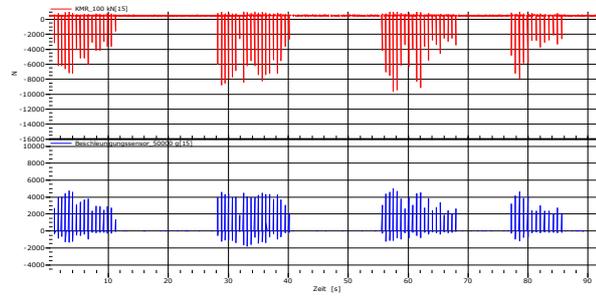
Reihe	Schläge
1	9
2	9
3	8
4	8
5	8
6	9
7	9
	Summe: 60



Manuell Testperson 2

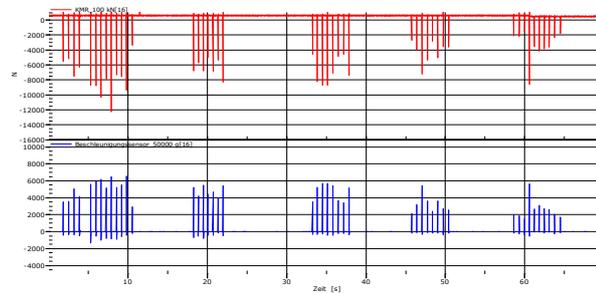
2.1 F

Reihe	Schläge
1	17
2	20
3	20
4	13
	Summe: 70



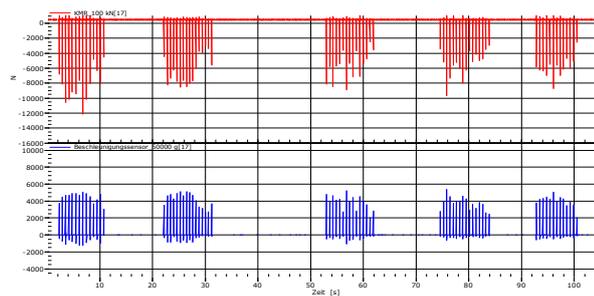
2.1 Sn

Reihe	Schläge
1	13
2	7
3	8
4	8
5	10
	Summe: 46



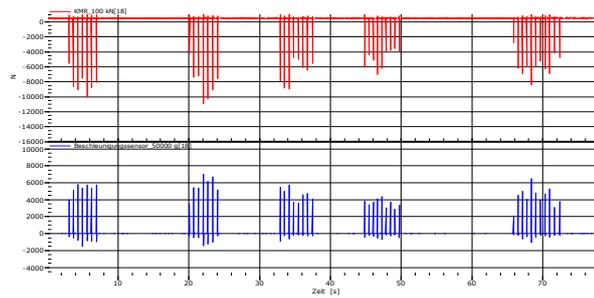
2.2 F

Reihe	Schläge
1	14
2	15
3	15
4	16
5	13
	Summe: 73



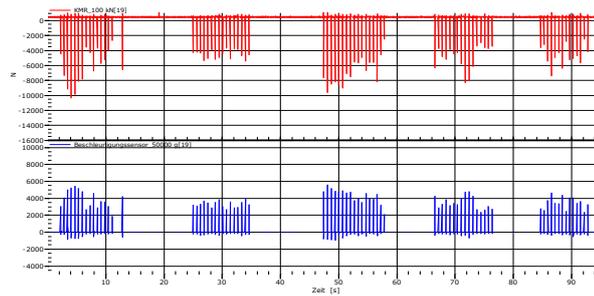
2.2 Sn

Reihe	Schläge
1	7
2	7
3	8
4	9
5	11
	Summe: 42



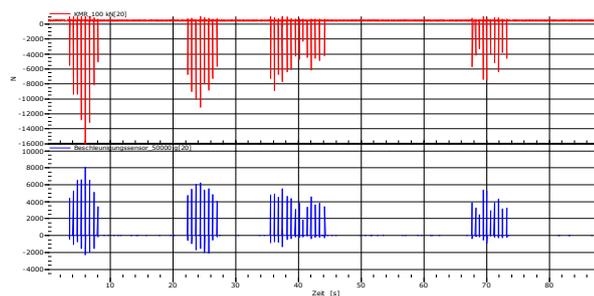
2.3 F

Reihe	Schläge
1	16
2	16
3	17
4	16
5	14
	Summe: 79



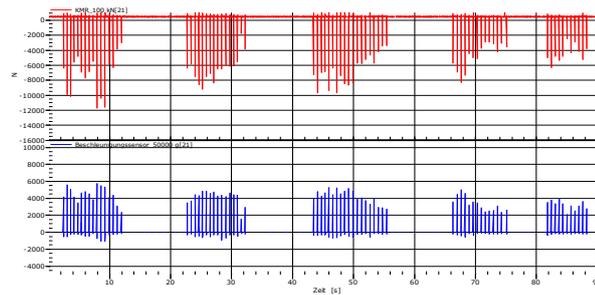
2.3 Sn

Reihe	Schläge
1	8
2	8
3	14
4	10
	Summe: 40



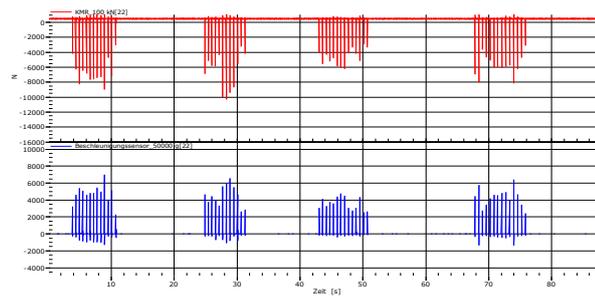
2.4 F

Reihe	Schläge
1	16
2	16
3	19
4	14
5	11
	Summe: 76



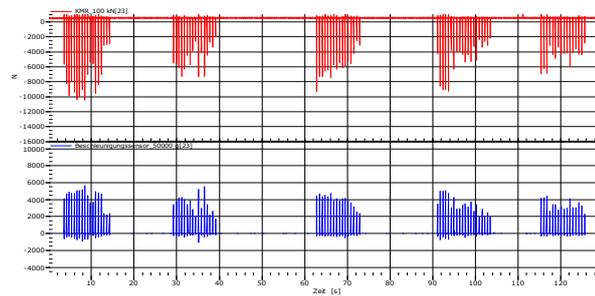
2.4 Sn

Reihe	Schläge
1	13
2	12
3	14
4	14
	Summe: 53



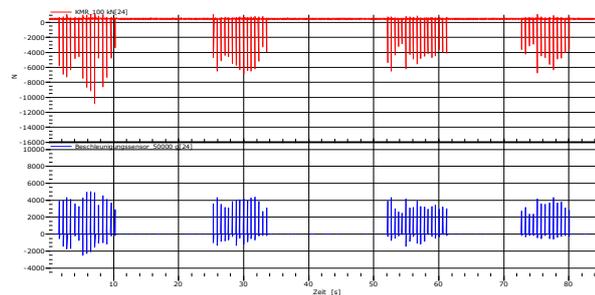
2.5 F

Reihe	Schläge
1	18
2	15
3	16
4	20
5	16
	Summe: 85



2.5 Sn

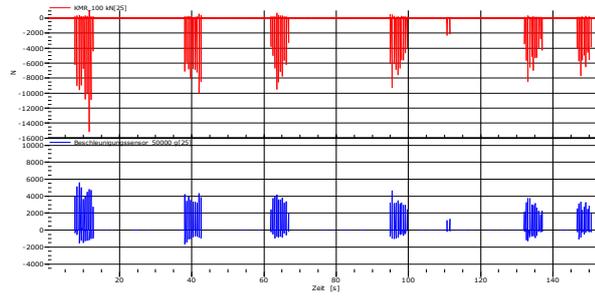
Reihe	Schläge
1	15
2	15
3	17
4	13
	Summe: 60



**Manuell Testperson 3**

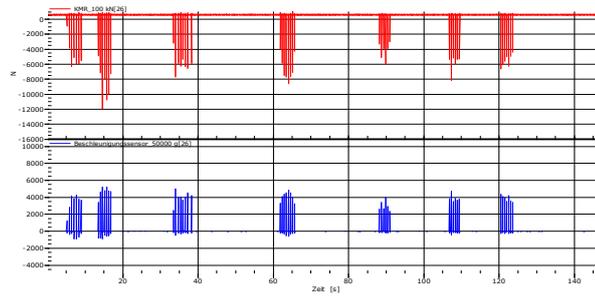
**3.1 F**

Reihe	Schläge
1	10
2	9
3	10
4	12
5	11
6	9
	Summe: 61



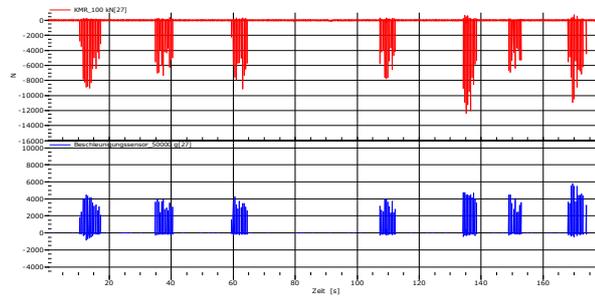
**3.1 Sn**

Reihe	Schläge
1	7
2	7
3	8
4	8
5	6
6	6
7	7
	Summe: 49



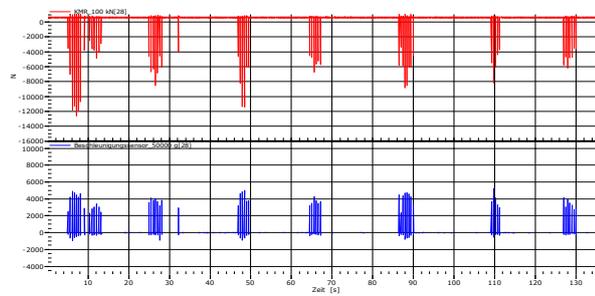
**3.2 F**

Reihe	Schläge
1	14
2	12
3	11
4	11
5	10
6	9
7	12
	Summe: 79



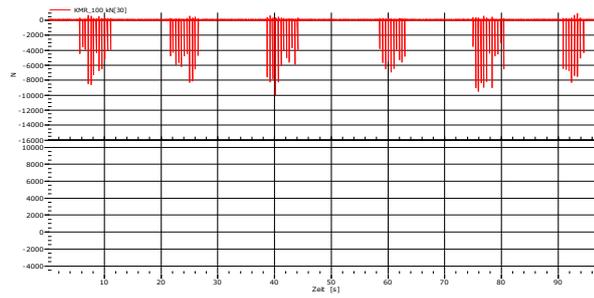
**3.2 Sn**

Reihe	Schläge
1	14
2	8
3	6
4	6
5	8
6	5
7	7
	Summe: 54



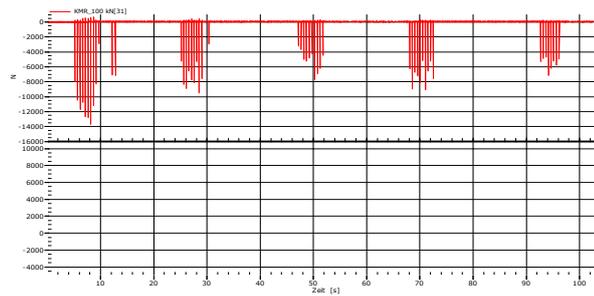
3.4 F

Reihe	Schläge
1	12
2	11
3	12
4	10
5	12
6	8
	Summe: 65



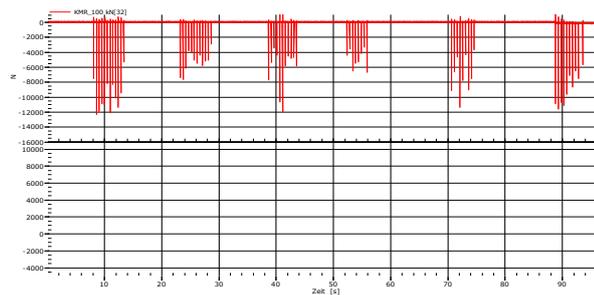
3.4 Sn

Reihe	Schläge
1	12
2	10
3	10
4	10
5	8
	Summe: 50



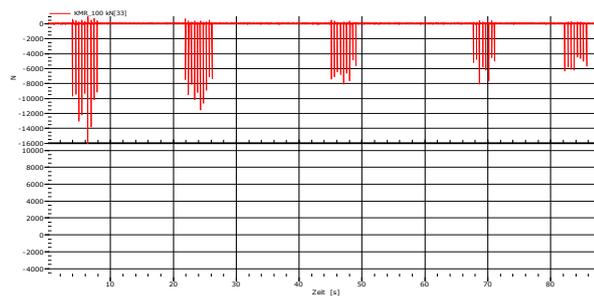
3.5 F

Reihe	Schläge
1	12
2	12
3	11
4	8
5	9
6	10
	Summe: 62



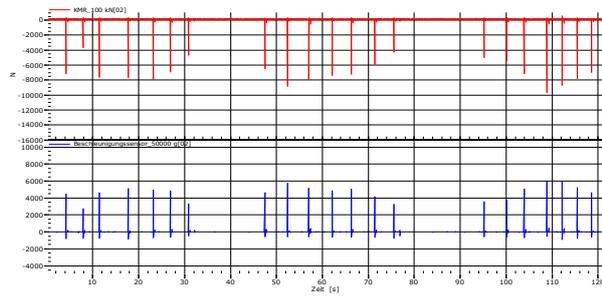
3.5 Sn

Reihe	Schläge
1	9
2	10
3	9
4	8
5	8
	Summe: 44

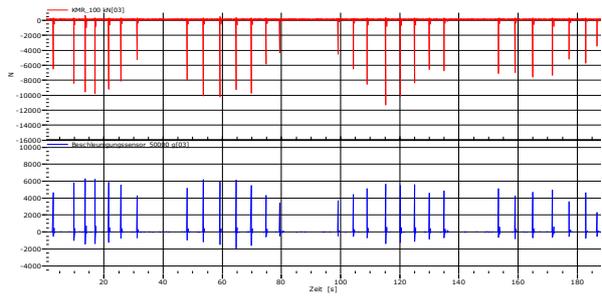


**Pummelapparat – nach Schlagmuster (56 Schläge)**

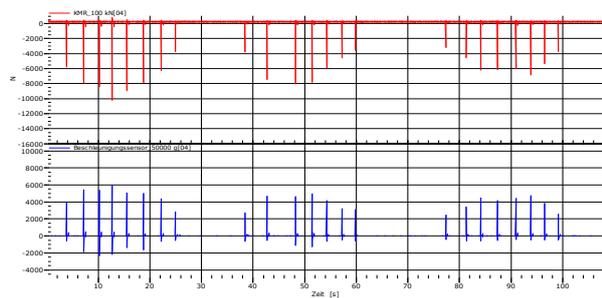
5.1 F



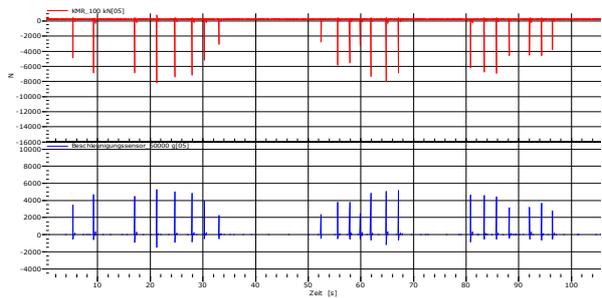
5.1 Sn



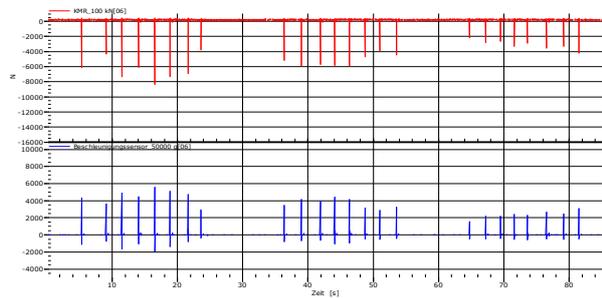
5.4 F



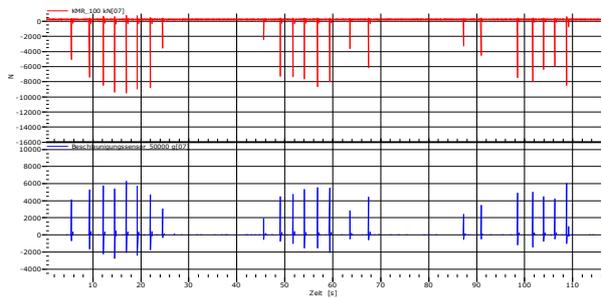
5.4 Sn



5.5 F

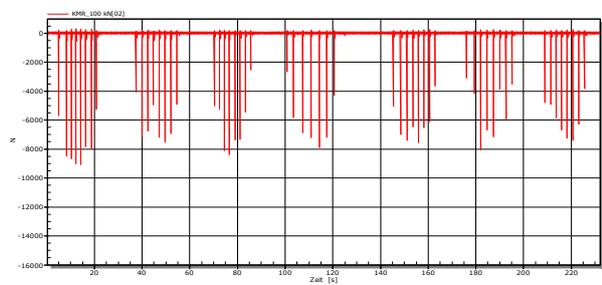


5.5 Sn

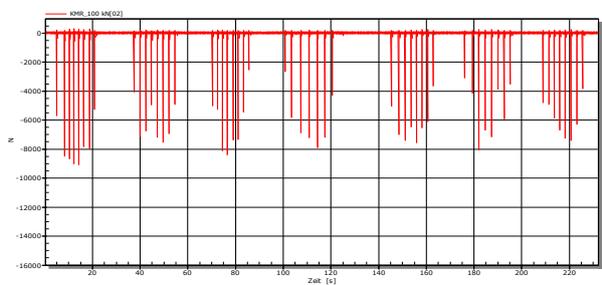


**Pummelapparat T2 (Nach Schlagmuster 56 Schläge)**

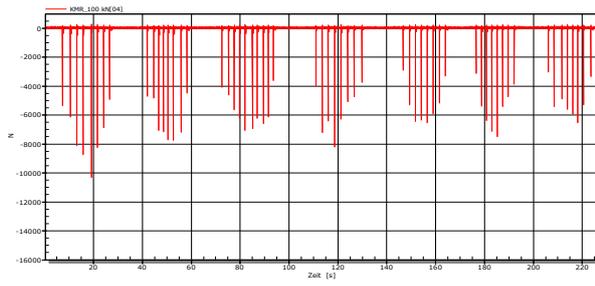
6.1 F



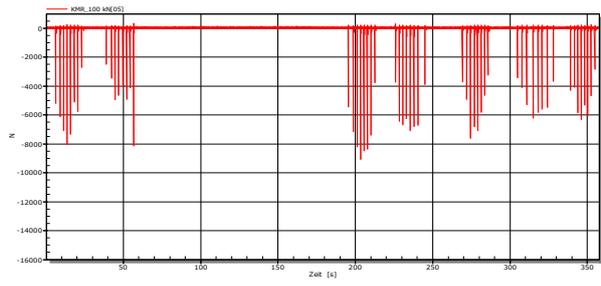
6.1 Sn



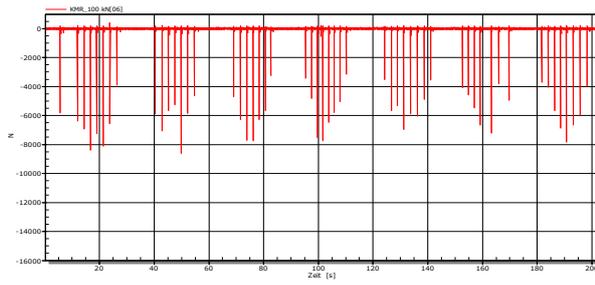
6.2 F



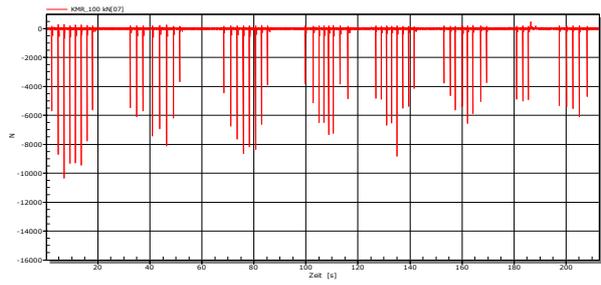
6.2 Sn



6.3 F

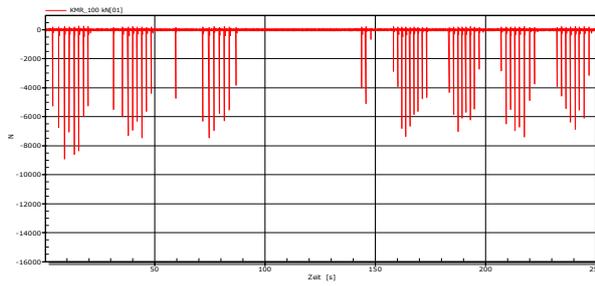


6.3 Sn

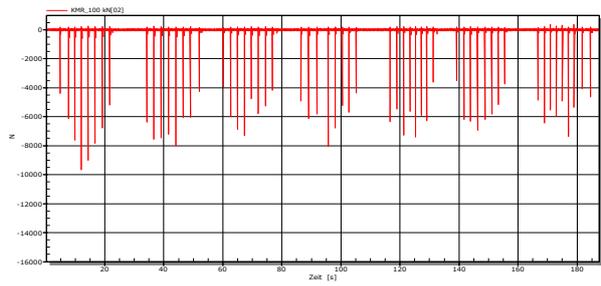


**Pummelapparat T3 (Nach Schlagmuster 56 Schläge)**

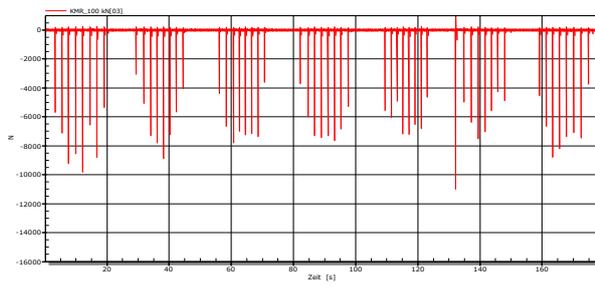
7.1 F



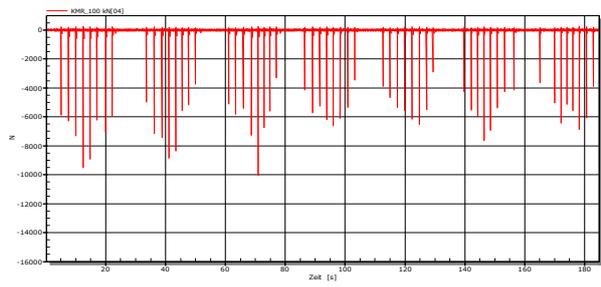
7.1 Sn



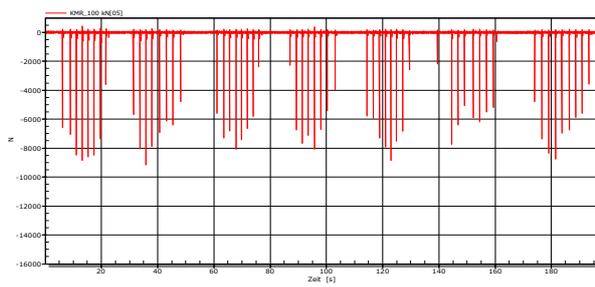
7.2 F



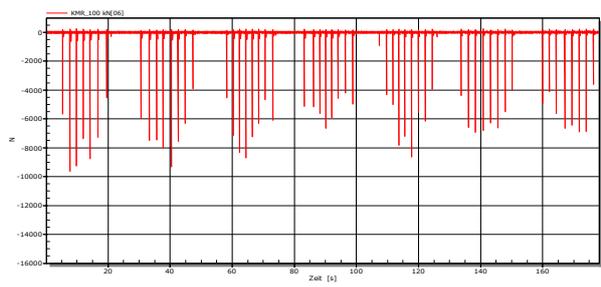
7.2 Sn



7.3 F



7.3 Sn



## 9.4 Lichteinstellungen – Aufnahme Pummelbilder

### Arduino

```
#include <FastLED.h>
#define LED_PIN 6
#define NUM_LEDS 30
#define BRIGHTNESS 150 //Helligkeit 0-200
#define LED_TYPE WS2812B
#define COLOR_ORDER GRB
CRGB leds[NUM_LEDS];
#define UPDATES_PER_SECOND 100
void setup() {
  delay( 3000 ); // power-up safety delay
  FastLED.addLeds<LED_TYPE, LED_PIN, COLOR_ORDER>(led, NUM_LEDS).setCorrection( TypicalLEDStrip );
  FastLED.setBrightness( BRIGHTNESS );
}
void loop () {
  leds[0] = CRGB::Blue;
  leds[1] = CRGB::Blue;
  for (int i = 0; i <= 29; i++) {
    leds[i] = CRGB::White; //Farbe ändern
  }
  FastLED.show();
  delay(3000);
}
```

## 9.5 Matlab Codes zur auswertung der Pummeltests

### MATLAB Skript zur Auswertung von binären Bildern

```
%% Alles schließen-----
clc
clear all
close all
%% 1. Versuchsprobe-----
%%Variablen zum Zurechtschneiden der Bilder
x1=1600; %Startpixel x-Koordinate
y1=800; %Startpixel y-Koordinate
x2=1100; %Delta x (Breite)
y2=800; %Delta y (Höhe)
%%Versuchsprobe einlesen
V = imread('5.1_F.JPG'); %Versuchsprobe einlesen
%%Bildvorbearbeitung
Vcrop = imcrop(V,[x1 y1 x2 y2]); %Bild zurecht schneiden
Vsharp = imsharpen(Vcrop); %Bild schärfen
Vgray = rgb2gray(Vsharp); %Bild in Grauwertbild

figure(1),
subplot(2,2,1), imshow(Vcrop), axis on, impixelinfo, title(['Versuchsprobe 5.1',' (F-Seite)']);
subplot(2,2,2), imshow(Vgray), axis on, impixelinfo, title('Grauwertbild');
%%Histogramm des Grauwertbildes
subplot(2,2,3), imhist(Vgray), title('Histogramm');
%%Schwellenwertermittlung
Vlevel = graythresh(Vgray);
%%Grauwertbild mittels Schwellenwert in binäres Bild wandeln
Vbw = imbinarize(Vgray,Vlevel);
subplot(2,2,4), imshow(Vbw), axis on, impixelinfo, title('binäres Bild mittels Schwellenwert');
%%Anzahl der schwarzen und weißen Pixel
Vblack = sum(Vbw(:)==0);
Vwhite = sum(Vbw(:));
Vsum = Vblack + Vwhite;
%%Anteile der schwarzen und weißen Pixel in Prozent
Vratioblack = (Vblack/Vsum)*100;
Vratiowhite = (Vwhite/Vsum)*100;
```

```

%% 2. Referenzbilder-----
imfiles = dir('*.PNG');
imtotal = numel(imfiles);
%Variablen zum Zurechtschneiden der Bilder
a1=0; %Startpixel x-Koordinate

b1=0; %Startpixel y-Koordinate
a2=750; %Delta x (Breite)
b2=550; %Delta y (Höhe)
%Start der Schleife für alle Referenzbilder
for u = 1:imtotal
f = fullfile(imfiles(u).name); %Variable f für Referenzbilder
R = imread(f); %Referenzbilder einlesen
%Bildvorbearbeitung
Rcrop = imcrop(R,[a1 b1 a2 b2]); %Bild zurecht schneiden
Rsharp = imsharpen(Rcrop); %Bild schärfen
Rgray = rgb2gray(Rsharp); %Bild in Grauwertbild
%Schwellenwertermittlung
Rlevel(:,u) = graythresh(Rgray(:));
%Grauwertbild mittels Schwellenwert in binäres Bild wandeln
Rbw = imbinarize(Rgray(:,u),Rlevel(:,u));
%Anzahl der schwarzen und weißen Pixel
Rblack(:,u) = sum(Rbw(:)==0);
Rwhite(:,u) = sum(Rbw(:));
Rsum(:,u) = Rblack(:,u) + Rwhite(:,u);
%Anteile der schwarzen und weißen Pixel in Prozent
Rratioblack(:,u) = (Rblack(:,u)/Rsum(:,u))*100;
Rratiowhite(:,u) = (Rwhite(:,u)/Rsum(:,u))*100;
end
%% 3. Anteil der schwarzen Pixel und Schwellenwerte in einem Balkendiagramm plotten lassen-----
%Schwarzanteil = freie Folienfläche
figure
subplot(1,2,1)
hold on
for x=1:imtotal %Start der Schleife für alle Referenzbilder
bar(x,Rratioblack(x),'FaceColor',[.2 .5 .5],'EdgeColor',[0 0 0],'LineWidth',.7);
str = num2str(round(Rratioblack(x)*10)/10);
text(x,Rratioblack(x),str,'horizontalalignment','center','verticalalignment','bottom');
end
p1 = bar(10,Vratioblack,'FaceColor',[0 .3 .4],'EdgeColor',[0 0 0],'LineWidth',.7); %Versuchsprobe
str = num2str(round(Vratioblack*10)/10);
text(10,Vratioblack,str,'horizontalalignment','center','verticalalignment','bottom');
title('Anteil der schwarzen Pixel'), xlabel('Pummelwert'), ylabel('Schwarze Pixel [%]');
legend(p1,'1.1 F');
ax = gca;
ax.FontSize = 13;
set(gca,'XTick',0:1:9);
hold off
%Schwellenwerte
subplot(1,2,2)
hold on
for x=1:imtotal %Start der Schleife für alle Referenzbilder
bar(x,Rlevel(x),'FaceColor',[.7 .5 .5],'EdgeColor',[0 0 0],'LineWidth',.7);
str = num2str(round(Rlevel(x)*100)/100);
text(x,Rlevel(x),str,'horizontalalignment','center','verticalalignment','bottom');
end
p2 = bar(10,Vlevel,'FaceColor',[.7 .2 .1],'EdgeColor',[0 0 0],'LineWidth',.7); % Versuchsprobe
str = num2str(round(Vlevel*100)/100);
text(10,Vlevel,str,'horizontalalignment','center','verticalalignment','bottom');
title('Schwellenwerte'), xlabel('Pummelwert'), ylabel('Schwellenwert');
legend(p2,'1.1 F');
ax = gca;
ax.FontSize = 13;
set(gca,'XTick',0:1:9);
hold off

```

## MATLAB Skript zur statistischen Auswertung von Grauwertbildern

```

%% Alles schließen-----
clc
clear all
close all
%% 1.Versuchsprobe-----
%Variablen zum Zurechtschneiden der Bilder
x1=1600; %Startpixel x-Koordinate
y1=800; %Startpixel y-Koordinate
x2=750; %Delta x (Breite)
y2=550; %Delta y (Höhe)
%Versuchsprobe einlesen
V = imread('5.1_F.JPG');
%Bildvorbearbeitung
Vcrop = imcrop(V,[x1 y1 x2 y2]); %Bild zurecht schneiden
Vsharp = imsharpen(Vcrop); %Bild schärfen
Vgray = rgb2gray(Vsharp); %Bild in Grauwertbild umwandeln
figure(1),
subplot(2,3,1), imshow(Vgray), axis on, impixelinfo, title('Versuchsprobe 5.1 (F-Seite)');
%Berechnung der statistischen Werte
VB = reshape(Vgray,[],1); %Bildmatrix in Vektor wandeln
VA = VB;
Vmax = max(VA); %Maximaler Grauwert
Vmin = min(VA); %Minimaler Grauwert
Vmu = mean(double(VA)); %Mittelwert von Grauwerte
Vmedian = median(double(VA)); %Median von Grauwerte
Vvz = var(double(VA)); %Varianz von Grauwerte
Vsigma = std(double(VA)); %Standardabweichung von Grauwertwerte
Vhwert = mode(VA); %häufigster auftretender Grauwert
%Histogramm
subplot(2,3,4), imhist(Vgray), title('Histogramm');
% 1.1.Versuchsprobe standardisieren-----
VNA = double(VA); %Umwandlung von Zahlentyp 8-Bit in Double
Vtest = double(VNA)- Vmu;
NVA = double(Vtest)./Vsigma; %Standardisierung des Bildes
%Statistische Größen
NVmax = max(NVA); %Maximaler Grauwert
NVmin = min(NVA); %Minimaler Grauwert
NVmu = mean(double(NVA)); %Mittelwert von Grauwerte
NVmedian = median(double(NVA)); %Median von Grauwerte
NVvz = var(double(NVA)); %Varianz von Grauwerte
NVsigma = std(double(NVA)); %Standardabweichung von Grauwerte
NVhwert = mode(NVA); %häufigster auftretender Grauwert
%% 1.2.Versuchsprobe Histogramm und Verteilungsfunktion plotten-----
%Versuchsprobe - normiertes Histogramm
Vnbins = Vmax;
subplot(2,3,2), histogram(VA,Vnbins,'Normalization','pdf'), title('normiertes Histogramm');
hold on
X = [0:255];
hold off
%Standardisierte Versuchsprobe - normiertes Histogramm
subplot(2,3,3), histogram(NVA,Vnbins,'Normalization','pdf'), title(sprintf('normiertes Histogramm\n der standardiserten Probe'));
hold on
X=[round(NVmin):0.15:round(NVmax)]; %X-Achse Wertebereich
hold off
%Versuchsprobe - kumulative Verteilungsfunktion
subplot(2,3,5), cdfplot(VA), title('kumulative Verteilungsfunktion'); %empirische kumulative Verteilungsfunktion
hold on
X = [0:255]
plot(X,normcdf(X,Vmu,Vsigma),'Color','r'); %kumulative Verteilungsfunktion
legend('empirische Verteilungsfunktion', 'Verteilungsfunktion','Location','best');
hold off
%Standardisiert Versuchsprobe - kumulative Verteilungsfunktion
subplot(2,3,6), cdfplot(NVA), title(sprintf('kumulative Verteilungsfunktion\n der standardiserten Probe'));
hold on
X=[round(NVmin):0.1:round(NVmax)];
plot(X,normcdf(X,NVmu,NVsigma),'Color','r'); %kumulative Verteilungsfunktion
legend('empirische Verteilungsfunktion', 'Verteilungsfunktion','Location','best');
hold off

```

```

%% 2.Referenzbild-----
%Variablen zum Zurechtschneiden der Bilder
a1=50; %Startpixel x-Koordinate
b1=50; %Startpixel y-Koordinate
a2=750; %Delta x (Breite)
b2=550; %Delta y (Höhe)
imfiles = dir('*.*png');
imtotal = numel(imfiles);
%Start der Schleife für alle Referenzbilder
for u = 1:imtotal
f = fullfile(imfiles(u).name); %Variable f für Bilder
R = imread(f); %Einlesen der aller .png Bilder
figure(u+3);
%Bild bearbeiten
Rcrop = imcrop(R, [a1 b1 a2 b2]); %Bild zurecht schneiden
Rsharp = imsharpen(Rcrop); %Bild schärfen
Rgray = rgb2gray(Rsharp); %Bild in Grauwertbild umwandeln
subplot(2,3,1), imshow(Rgray), axis on, impixelinfo, title(['Pummelwert ',num2str(u)]);
%Berechnung der statistischen Werte
RB = reshape(Rgray,[],1); %Bildmatrix in Vektor wandeln
RA(:,u) = RB(:,1);
Rmax(:,u) = max(RA(:,u)); %Maximaler Grauwert
Rhwert(:,u) = mode(RA(:,u)); %häufigster auftretender Grauwert
Rmedian(:,u) = median(double(RA(:,u))); %Median von Grauwerte
Rmu(:,u) = mean(double(RA(:,u))); %Mittelwert von Grauwerte
Rvz(:,u) = var(double(RA(:,u))); %Varianz von Grauwerte
Rsigma(:,u) = std(double(RA(:,u))); %Standardabweichung von Grauwerte
%Histogramm
subplot(2,3,4), imhist(Rgray), title('Histogramm');
%Normiertes Histogramm
Rnbins = Rmax(:,u); %Anzahl der Histogrammbalken = max. Anzahl der Grauwerte
subplot(2,3,2), histogram(RA(:,u),Rnbins,'Normalization','pdf'), title('normiertes Histogramm');
hold on
X = [0:255];
hold off
%Kumulative Verteilungsfunktion
subplot(2,3,5), cdfplot(RA(:,u)); %empirische Verteilungsfunktion
hold on
X = [0:255]
plot(X,normcdf(X,Rmu(1,u),Rsigma(1,u)), 'Color','r'), title('kumulative Verteilungsfunktion'); %kumulative Verteilungsfunktion
legend('empirische Verteilungsfunktion', 'Verteilungsfunktion', 'Location','best');
hold off;
%Alle empirischen Verteilungsfunktionen in einer Graphik
figure(2)
hold on
cdfplot(RA(:,u));
title('kumulative Verteilungsfunktionen');
legend('Pummelwert 1','Pummelwert 2','Pummelwert 3','Pummelwert 4','Pummelwert 5','Pummelwert 6','Pummelwert 7','Pummelwert 8','Pummelwert 9');
end
VAcdf = cdfplot(VA), title('kumulative Verteilungsfunktionen'); %Verteilungsfunktion der Versuchsprobe
set(VAcdf,'LineStyle','-','Linewidth',1.5,'Color','k');
legend('Pummelwert 1','Pummelwert 2','Pummelwert 3','Pummelwert 4','Pummelwert 5','Pummelwert 6','Pummelwert 7','Pummelwert 8','Pummelwert 9','5.1 F');
hold off
%% 2.1.Referenzbild normalisieren-----
NA = double(RA); %Umwandlung von Zahlentyp 8-Bit in Double
for v = 1:imtotal
test(:,v)=double(NA(:,v))- Rmu(1,v);
NRA(:,v)= double(test(:,v))./Rsigma(1,v); %Standardisierung des Bildes
figure(v+3),
%Statistische Größen
NRmax(:,v) = max(NRA(:,v)); %Maximaler Grauwert
NRmin(:,v) = min(NRA(:,v)); %Minimaler Grauwert
NRmu(:,v) = mean(NRA(:,v)); %Mittelwert von Grauwerte
NRmedian(:,v) = median(NRA(:,v)); %Median von Grauwerte
NRvz(:,v) = var(double(NRA(:,v))); %Varianz von Grauwerte
NRsigma(:,v) = std(double(NRA(:,v))); %Standardabweichung von Grauwerte
NRhwert(:,v) = mode(NRA(:,v)); %häufigster auftretender Grauwert
%normiertes Histogramm
Rnbins = Rmax(:,v);

```

```

subplot(2,3,3), histogram(NRA(:,v),Rnbins,'Normalization','pdf'), title(sprintf(['normiertes Histogramm\n des standardiserten
Pummelwertes ',num2str(v)]));
hold on
X=[round(NRmin(:,v)):0.15:round(NRmax(:,v))];
hold off
%kumulative Verteilungsfunktion
subplot(2,3,6); cdfplot(NRA(:,v)), title(sprintf(['kumulative Verteilungsfunktion\n des standardiserten Pummelwertes ',num2str(v)]));
hold on
X=[round(NRmin(:,v)):0.1:round(NRmax(:,v))];
plot(X,normcdf(X,NRmu(1,v),NRsigma(1,v)),'Color','r')
legend('empirische Verteilungsfunktion', 'Verteilungsfunktion','Location','best');
hold off
figure(3)
hold on
cdfplot(NRA(:,v))
title('standardisierte kumulative Verteilungsfunktionen');
legend('Pummelwert 1','Pummelwert 2','Pummelwert 3','Pummelwert 4','Pummelwert 5','Pummelwert 6','Pummelwert
7','Pummelwert 8','Pummelwert 9');
c(:,v) = corr2(NVA,NRA(:,v));
end
NVAcdf = cdfplot(NVA), %Verteilungsfunktion der Versuchsprobe
title('standardisierte kumulative Verteilungsfunktionen');
set(NVAcdf,'LineStyle','-','LineWidth',1.5,'Color','k');
legend('Pummelwert 1','Pummelwert 2','Pummelwert 3','Pummelwert 4','Pummelwert 5','Pummelwert 6','Pummelwert 7','Pummelwert
8','Pummelwert 9','5.1 F');
hold off
%% 3.Mittelwerte und Standardabweichungen plotten-----
figure
subplot(1,2,1)
hold on
for x=1:imtotal %Mittelwerte der Referenzbilder
bar(x,Rmu(x),'FaceColor',[.2 .5 .5],'EdgeColor',[0 0 0],'LineWidth',.7);
errorbar(x,Rmu(x),Rsigma(x));
str = num2str(round(Rmu(x)*100)/100); %Werte runden
text(x,Rmu(x),str,'horizontalalignment','center','verticalalignment','bottom'); %y-Werte anzeigen lassen
xlabel('Pummelwert'), ylabel('Mittelwert [-]');
end
p1 = bar(10,Vmu,'FaceColor',[0 .3 .4],'EdgeColor',[0 0 0],'LineWidth',.7); %Mittelwert der Versuchsprobe
errorbar(10,Vmu,Vsigma);
str = num2str(round(Vmu*100)/100); %Werte runden
text(10,Vmu,str,'horizontalalignment','center','verticalalignment','bottom'); %y-Werte anzeigen lassen
title('Mittelwerte'), legend(p1,'5.1 F');
set(gca,'XTick',0:1:9);
hold off
%% 3.1.Median mit Fehlerbalken plotten-----
subplot(1,2,2)
hold on
for x=1:imtotal %Median der Referenzbilder
bar(x,Rmedian(x),'FaceColor',[.2 .5 .5],'EdgeColor',[0 0 0],'LineWidth',.7);
errorbar(x,Rmedian(x),Rsigma(x));
str = num2str(round(Rmedian(x)*100)/100); %Werte runden
text(x,Rmedian(x),str,'horizontalalignment','center','verticalalignment','bottom'); %y-Werte anzeigen lassen
xlabel('Pummelwert'), ylabel('Median [-]');
end
p2 = bar(10,Vmedian,'FaceColor',[0 .3 .4],'EdgeColor',[0 0 0],'LineWidth',.7); %Median der Versuchsprobe
errorbar(10,Vmedian,Vsigma);
str = num2str(round(Vmedian*100)/100); %Werte runden
text(10,Vmedian,str,'horizontalalignment','center','verticalalignment','bottom'); %y-Werte anzeigen lassen
title('Median'), legend(p2,'5.1 F');
set(gca,'XTick',0:1:9);
hold off

```

## MATLAB Skript zur Texturanalyse (finale Pummelevaluation)

```

%% Alles schließen-----
clc
clear all
close all

%% Pummelskala-----
%Resolution 100, Offset 10

x=[2,4,6,8]; %Die Skala beinhaltet die Pummelwerte 2 4 6 8
%Definiert die Kontrastwerte der Pummelskala
statsTotal(1,1).Contrast= 427.1817826
statsTotal(2,1).Contrast= 500.9498219
statsTotal(3,1).Contrast= 559.0543098
statsTotal(4,1).Contrast= 605.2392997

%Definiert die Korrelationswerte der Pummelskala
statsTotal(1,1).Correlation=0.374863649
statsTotal(2,1).Correlation=0.265551834
statsTotal(3,1).Correlation=0.183363063
statsTotal(4,1).Correlation=0.110891447

%Definiert die Homogenitätswerte der Pummelskala
statsTotal(1,1).Homogeneity=0.158717577
statsTotal(2,1).Homogeneity=0.136806653
statsTotal(3,1).Homogeneity=0.121059748
statsTotal(4,1).Homogeneity=0.116254033

%Setzt die Kontrastwerte der 4 Pummelwerte in einen Vektor
y1= [statsTotal(1,1).Contrast, statsTotal(2,1).Contrast, statsTotal(3,1).Contrast, statsTotal(4,1).Contrast];
%Setzt die Korrelationswerte der 4 Pummelwerte in einen Vektor
y2= [statsTotal(1,1).Correlation, statsTotal(2,1).Correlation, statsTotal(3,1).Correlation, statsTotal(4,1).Correlation];
%Setzt die Homogenitätswerte der 4 Pummelwerte in einen Vektor
y3= [statsTotal(1,1).Homogeneity, statsTotal(2,1).Homogeneity, statsTotal(3,1).Homogeneity, statsTotal(4,1).Homogeneity];

%% Versuchsproben Typ 1 -----
% % Bilder der Serien RB41 STD, RB41 High Moisture, RB41 Low Moisture, RA,
% RC, EVA (Bilder, bei denen die Glaskanten den Bildkanten entsprechen)

% breitereal=10 %Probenbreite
% breitebild=6 %Breite des zu untersuchenden Bildausschnittes
% hoehebild=2/3*breitebild*4; %Höhe des zu untersuchenden Bildausschnittes
% rand=1; %Abstand zwischen oberer Probenkante und dem zu untersuchenden
% Bildausschnitt

%% Versuchsproben Typ 2 -----
% % Bilder der Serien 1-3 (Manuell Testerson 1-3), der Serien 4-5
% (Pummelapparat) und 6-7 (unterschiedliche Temperaturen). Bilder bei denen
% das Bild größer als die Probe ist

%Definition der Position der Probe auf dem Bild
ppi=((2785-1469)+(2780-1463)+(2782-1459))/3/10; %Mittelwert(Probenbreite in Pixel an 3 Stellen)/10cm Probenbreite --> Pixel/cm
widthp=4240/ppi %Breite den gesamtbildes in cm
upperboundary=750/ppi %775 pixel umgerechnet in cm, Beginn der oberen Probenkante

breitereal=widthp%Probenbreite
breitebild=6;%Breite des zu untersuchenden Bildausschnittes
hoehebild=4;%Höhe des zu untersuchenden Bildausschnittes
rand=1+upperboundary; %Abstand zwischen oberer Bildkante und dem zu untersuchenden
% Bildausschnitt

%% Versuchsproben Typ 3 -----
% % Bilder der Großbauteilversuche aus München

% %Definition der Position der Probe auf dem Bild
% ppi=((4150-0)+(4142-75)+(4140-106))/3/36; %Mittelwert(Probenbreite in Pixel an 3 Stellen)/36cm Probenbreite --> Pixel/cm
% widthp=4240/ppi %Breite den gesamtbildes in cm
% upperboundary=1500/ppi %eher unten auswerten
% breitereal=widthp %Probenbreite

```

```

% breitebild=6; %Breite des zu untersuchenden Bildausschnittes
% hoehebild=4; %Höhe des zu untersuchenden Bildausschnittes
% rand=1+upperboundary; %Abstand zwischen oberer Bildkante und dem zu untersuchenden
% Bildausschnitt
%
%% Vorbereitung zum Einlesen der auszuwertenden Probenbilder
imfiles = dir('*_JPG'); % jpg kann durch .png ersetzt werden
imtotal = numel(imfiles); %Anzahl an Bilder mit der oben genannten Endung

%% Auswerten der Probenbilder
for u = 1:imtotal

A = fullfile(imfiles(u).name); %Name des einzulesenden Bildes

R1=imread(A); %Einlesen des Bildes

%Bildvorbereitung
Rcrop1 = Anpassen_Eigene_Bilder(R1,breitereal,breitebild,hoehebild,rand); %Bild zurecht schneiden
Rsharp1 = imsharpen(Rcrop1); %Bild schärfen
Rgray01 = rgb2gray(Rsharp1); %Bild grau machen
Rgray1=histeq(Rgray01); %Strecken des histogramms für relative schwarz/weiß Verteilung
grayImage1=Rgray1; %einfach nur neue zuweisen, dass ein bearbeitetes Bild nach dem durchlauf des Programms noch
einsehbar ist
%ppl=size(R1,2)/breitereal; %nur bei Versuchsprobentyp 1

%Kontrollplot, zur Überprüfung des zu untersuchenden Bildausschnittes
figure
subplot(2,1,1) %Zeigt den auszuwertenden Bereich auf dem eingelesenen Bild

imshow(imresize(R1,100/ppl)), axis on, impixelinfo, title([A]);%
hold on
pixelb= breitebild*100;%berechnen der Pixelanzahl um die Breite des Ausschnitts in Pixel zu definieren
pixelh= hoehebild*100;%hier analog die Höhe des Ausschnitts
mitte= size(imresize(R1,100/ppl),2)*0.5;%genau die mitte des angepassten Bildes
abstand= rand*100;%Randabstand, dass Randeffekte ausgeschnitten werden
linksobenx=round(mitte-(pixelb/2));%linke obere Ecke des ausschnitts in x richtung
linksobeny=round(abstand);%linke obere Ecke des ausschnitts in y richtung

rectangle('Position',[linksobenx, linksobeny, pixelb, pixelh],...
'LineWidth',2,'LineStyle','--', 'EdgeColor','r')
hold off

subplot(2,1,2) %Zeigt das entzerrte Histogramm (equalized histogram) des zu untersuchenden Bildausschnittes
imshow(grayImage1), axis on, impixelinfo;% title([A]);
set(gcf,'color','w','Position', get(0, 'Screensize'));

%Ermittlung der GLCM
integerValue=64;%Anzahl an Grauwerten
D=(10:10); %Offset Einstellung von GLCM
[sD1 sD2]=size(D);

for j=1:sD2
kernel = [0, D(j); -D(j), D(j); -D(j), 0; -D(j), -D(j)]; %Definition der Nachbarn
[glcm1,SI] = graycomatrix(grayImage1, 'NumLevels', integerValue,...
'GrayLimits', [], 'offset',kernel,'symmetric',true);%Durch die Symmetrie werden alle 8 Nachbarn betrachtet

numberOfDirections = size(glcm1, 3);
for k = 1 : numberOfDirections
C=glcm1(:, :,k);%Einträge der GLCM
glcmN1(:, :,k)=glcm1(:, :,k)/sum(C(:)); %Errechnet aus den Einträgen der GLCM Wahrscheinlichkeiten
stats1(1,k)=graycoprops(glcm1(:, :,k)); %Ermittelt die Haralick Features Correlation, Contrast, Energy und Homogeneity
end

glcmN21=sum(glcmN1,3)/4 ; % Kombiniert die 4 einzelnen GLCM

statsTotalE1(1,j) = graycopropsmod(glcmN21); %Ermittelt die Haralick Features Correlation, Contrast, Energy und Homogeneity aus der
kombinierten GLCM

end
%Hilfsvariablen, neue Sortierung der bisherigen Daten

```

```

te= zeros(1,3);
te(1,1)=statsTotalE1.Contrast;
te(1,2)=statsTotalE1.Energy;
te(1,3)=statsTotalE1.Correlation;
te(1,4)=statsTotalE1.Homogeneity;

%Ermittlung des Pummelwertes durch Vergleich mit den
%Referenzpummelwerten 2, 4, 6, 8
for i=1:4

    te1(1,1)=statsTotal(i,1).Contrast; %Kontrastwert des Referenzpummels
    vg1=te1(1,1)-te(1,1); %Abweichung Kontrast Referenz - Probe
    s1(:,i) = vg1; %speichert die Differenz im Vektor s1

    te1(1,3)=statsTotal(i,1).Correlation;%Korrelationswert des Referenzpummels
    vg3=te1(1,3)-te(1,3);%Abweichung Korrelation Referenz - Probe
    s3(:,i) = vg3;%speichert die Differenz im Vektor s3

    te1(1,4)=statsTotal(i,1).Homogeneity;%Homogenitätswert des Referenzpummels
    vg4=te1(1,4)-te(1,4);%Abweichung Homogenität Referenz - Probe
    s4(:,i) = vg4;%speichert die Differenz im Vektor s4
end

%Betrachtung des Kontrastes
if statsTotalE1.Contrast< statsTotal(1,1).Contrast % Falls der Kontrast der Probe kleiner als der kleinste Kontrast der
% Referenzen ist
PummelCON=0 %Trage den Wert 0 in PummelCON
else
    if statsTotalE1.Contrast> statsTotal(4,1).Contrast % Falls der Kontrast der Probe größer als der größte Kontrast der
% Referenzen ist
PummelCON=10 %Trage den Wert 0 in PummelCON
    else %Falls Kontrast der Probe zwischen den Grenzen liegt
[dar1(1)]=min(s1(s1>0)); %Suche die kleinste positive Abweichung
[dar1(2)]=max(s1(s1<0)); %Suche die kleinste negative Abweichung

i1(1)=find(s1==dar1(1)); %Suche den Referenzpummelwert mit der kleinsten positiven Abweichung
Pummelstufe_CONa=find(s1==dar1(1))*2;
i1(2)=find(s1==dar1(2)); %Suche den Referenzpummelwert mit der kleinsten negativen Abweichung
Pummelstufe_CONb=find(s1==dar1(2))*2;

x1int=[y1(i1(1)) te(1,1) y1(i1(2))]; %Kontrastwert der nächsten Referenz 1, Kontrastwert der Probe, Kontrastwert der nächsten
Referenz 2
xcon=[y1(i1(1)) y1(i1(2))]; %Kontrastwerte der beiden nächsten Referenzen
ycon=[Pummelstufe_CONa Pummelstufe_CONb]; %Pummelwerte der nächsten Referenzen
Pummel1 = interp1(xcon,ycon,x1int,'linear'); %Interpolation zwischen den beiden nächsten Referenzen
PummelCON=round(Pummel1(2)*100)/100 %Runden des Pummelwertes auf 2 Nachkommastellen
    end
Pummel(u,1)=PummelCON; %Speichern der mittels Kontrast ermittelten Pummels
end

%Betrachtung der Korrelation
if statsTotalE1.Correlation< statsTotal(4,1).Correlation % Falls der Korrelation der Probe kleiner als die kleinste Korrelation der
% Referenzen ist
PummelCOR=10 %Trage den Wert 10 in PummelCOR
else
    if statsTotalE1.Correlation> statsTotal(1,1).Correlation % Falls der Korrelation der Probe größer als die größte Korrelation der
% Referenzen ist
PummelCOR=0 %Trage den Wert 0 in PummelCOR
    else %Falls Korrelation der Probe zwischen den Grenzen liegt
[dar3(1)]=min(s3(s3>0));%Suche die kleinste positive Abweichung
[dar3(2)]=max(s3(s3<0));%Suche die kleinste negative Abweichung

i2(1)=find(s3==dar3(1));%Suche den Referenzpummelwert mit der kleinsten positiven Abweichung
Pummelstufe_CORa=find(s3==dar3(1))*2;
i2(2)=find(s3==dar3(2));%Suche den Referenzpummelwert mit der kleinsten negativen Abweichung
Pummelstufe_CORb=find(s3==dar3(2))*2;
x2int=[y2(i2(1)) te(1,3) y2(i2(2))];%Korrelationswert der nächsten Referenz 1, Korrelationswert der Probe, Korrelationswert der
nächsten Referenz 2

```

```

xcor=[y2(i2(1)) y2(i2(2))]; %Korrelationswerte der beiden nächsten Referenzen
ycor=[Pummelstufe_CORa Pummelstufe_CORb];%Pummelwerte der nächsten Referenzen
Pummel2 = interp1(xcor,ycor,x2int,'linear');%Interpolation zwischen den beiden nächsten Referenzen
PummelCOR=round(Pummel2(2)*100)/100 %Runden des Pummelwertes auf 2 Nachkommastellen
end
Pummel(u,2)=PummelCOR; %Speichern der mittels Korrelation ermittelten Pummels
end

%Betrachtung der Homogenität
if statsTotalE1.Homogeneity< statsTotal(4,1).Homogeneity% Falls die Homogenität der Probe kleiner als die kleinste Homogenität der
% Referenzen ist
PummelHOM=10 %Trage den Wert 10 in PummelHOM
else
if statsTotalE1.Homogeneity> statsTotal(1,1).Homogeneity %Falls die Homogenität der Probe größer als die größte Homogenität der
% Referenzen ist
PummelHOM=0 %Trage den Wert 0 in PummelHOM
else %Falls Homogenität der Probe zwischen den Grenzen liegt
[dar4(1)]=min(s4(s4>0));%Suche die kleinste positive Abweichung
[dar4(2)]=max(s4(s4<0));%Suche die kleinste negative Abweichung

i3(1)=find(s4==dar4(1));%Suche den Referenzpummelwert mit der kleinsten positiven Abweichung
Pummelstufe_HOMa=find(s4==dar4(1))*2;
i3(2)=find(s4==dar4(2));%Suche den Referenzpummelwert mit der kleinsten negativen Abweichung
Pummelstufe_HOMb=find(s4==dar4(2))*2;

x3int=[y3(i3(1)) te(1,4) y3(i3(2))];%Homogenitätswert der nächsten Referenz 1, Homogenitätswert der Probe, Homogenitätswert der
nächsten Referenz 2
xhom=[y3(i3(1)) y3(i3(2))];%Homogenitätswerte der beiden nächsten Referenzen
yhom=[Pummelstufe_HOMa Pummelstufe_HOMb];%Pummelwerte der nächsten Referenzen
Pummel3 = interp1(xhom,yhom,x3int,'linear');%Interpolation zwischen den beiden nächsten Referenzen
PummelHOM=round(Pummel3(2)*100)/100 %Runden des Pummelwertes auf 2 Nachkommastellen
end
Pummel(u,3)=PummelHOM;%Speichern der mittels Homogenität ermittelten Pummels
end

%Errechnen des Gesmatpummelwertes
Pummel(u,4)=round(1/3*(PummelCON+PummelCOR+PummelHOM)*100)/100 %Mittelwert aus PummelCOR, PummelCON und
PummelHOM
Pummelname(u,1)=string(A)

%Plot mit den Ergebnissen
figure
subplot(3,1,1);
plot(x,y1,'+-');
hold on;
plot(PummelCON,te(1,1),'r*');
hold off;
title('Kontrast');

subplot(3,1,2);
plot(x,y2,'+-');
hold on;
plot(PummelCOR,te(1,3),'r*');
hold off;
title('Korrelation');

subplot(3,1,3);
plot(x,y3,'+-');
hold on;
plot(PummelHOM,te(1,4),'r*');
hold off;
title('Homogenität');
end

```

**Notwendige Funktionen:****Funktion: bildneugeschnitten**

```

function [bildneugeschnitten] = Anpassen_Eigene_Bilder(bild,Probenbreite,Bildbreite, Bildhoehe,rand)
p=bild;
pbreite=Probenbreite;
breite=Bildbreite;
hoehe=Bildhoehe;

mass = size(p,2)/pbreite; %maßstab über die Breite
skalierung= 100/mass; %vomEastman auflösung 56.6 pixel/cm
pn=imresize(p,skalierung);%neues bild erzeugen mit angepasster Auflösung
pixelb= mass*breite*skalierung;%berechnen der Pixelanzahl um die Breite des Ausschnitts in Pixel zu definieren
pixelh= mass*hoehe*skalierung;%hier analog die Höhe des Ausschnitts

%Ausschneiden
mitte= size(pn,2)*0.5;%genau die mitte des angepassten Bildes
abstand= mass*rand*skalierung;%Randabstand, dass Randeffekte ausgeschnitten werden
linksobenx=round(mitte-(pixelb/2));%linke obere Ecke des ausschnitts in x richtung
linksobeny=round(abstand);%linke obere Ecke des ausschnitts in y richtung
bildneugeschnitten=imcrop(pn,[linksobenx linksobeny pixelb pixelh]);%Ausschneiden

end

```

**Funktion: graycopropsmod (basiert auf stats = graycoprops(varargin) ©2003-2016 The MathWorks, Inc.)**

Die Funktion *graycopropsmod* wird hier nicht dargestellt. Die Funktion *graycoprops* kann jedoch innerhalb von MatLab eingesehen werden.

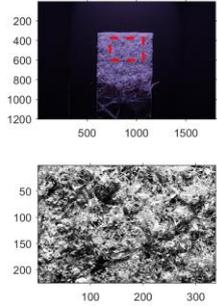
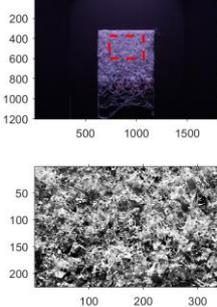
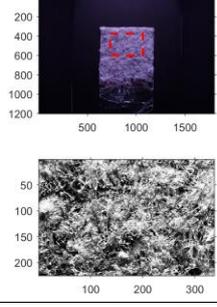
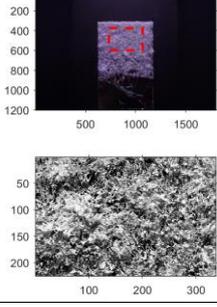
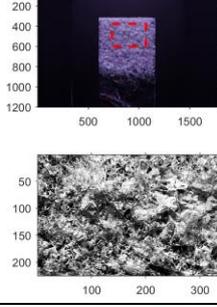
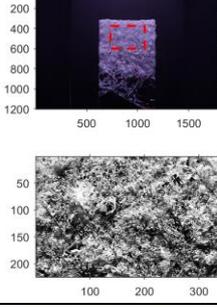
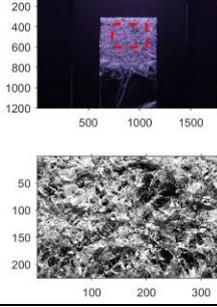
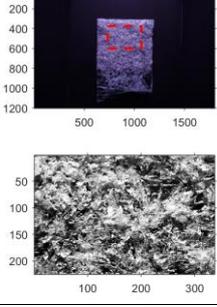
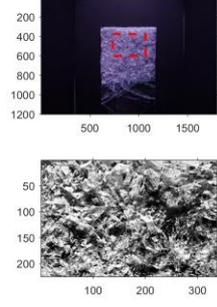
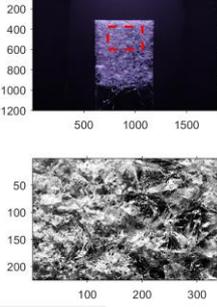
Um *graycopropsmod* zu erhalten, wurde *graycoprops* dahingehend modifiziert, dass das Normieren der GLCM („function *glcm = normalizeGLCM(glcm)*“) entfällt. Dies liegt daran, dass der Funktion bereits normierte GLCM übergeben werden.

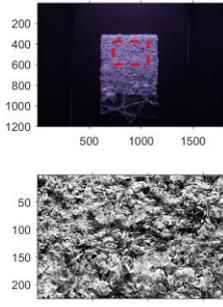
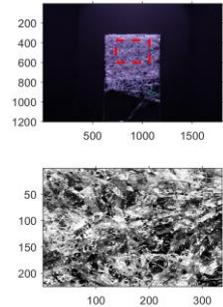
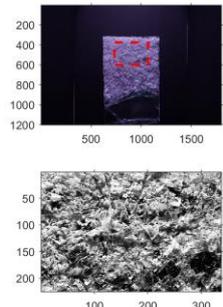
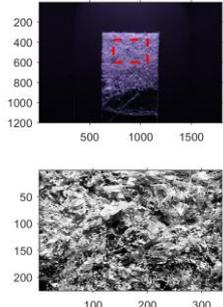
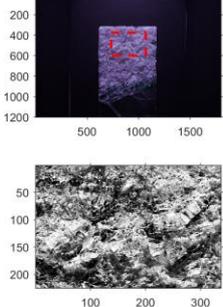
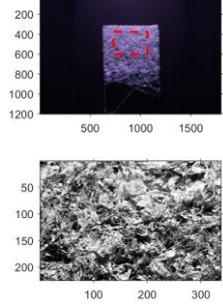
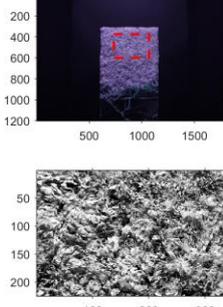
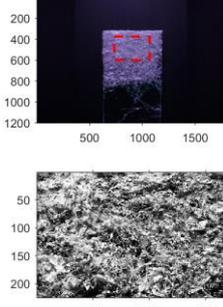
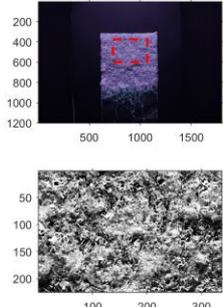
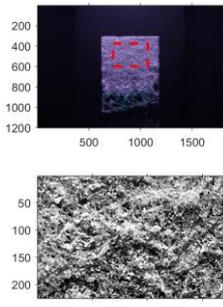
**9.6 Pummelauswertung – Darstellung des ausgewerteten Bereichs**

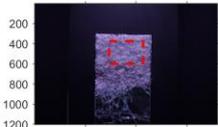
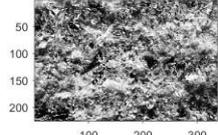
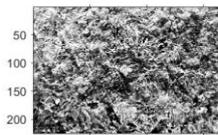
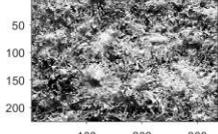
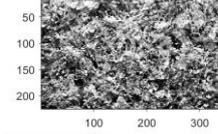
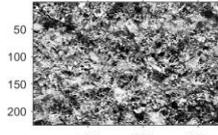
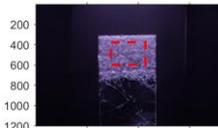
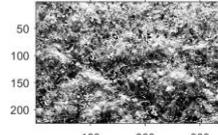
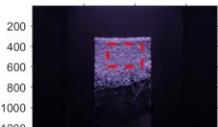
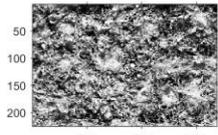
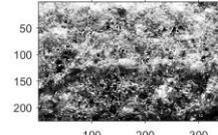
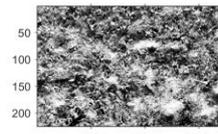
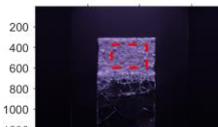
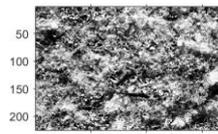
Anmerkung: Die Abbildungen wurden mit einem Bildmaßstab von 56 Pixel/cm erzeugt.

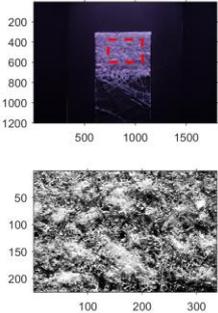
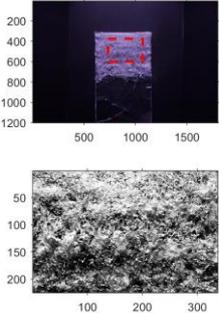
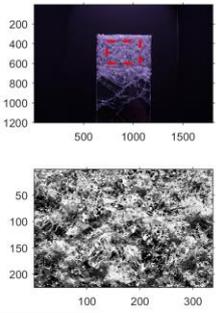
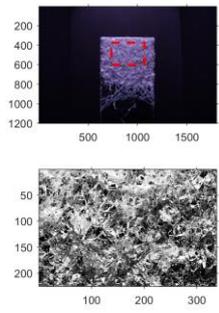
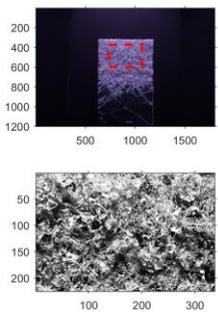
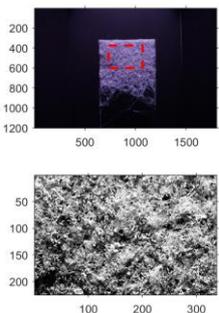
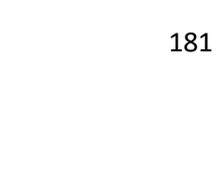
**Versuchsreihe 1**

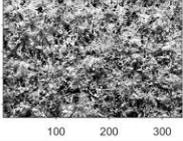
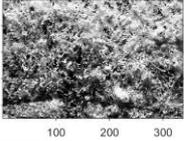
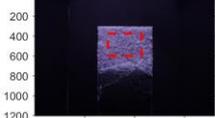
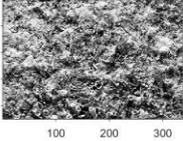
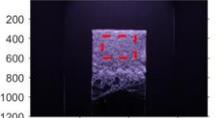
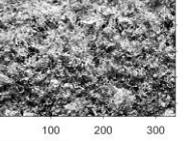
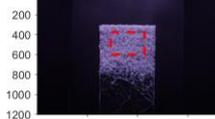
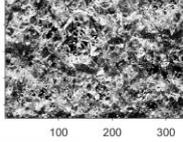
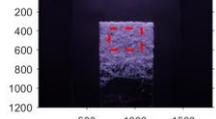
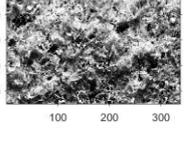
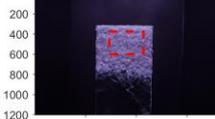
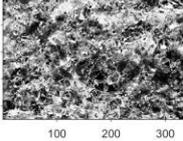
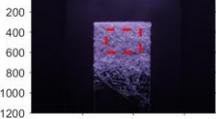
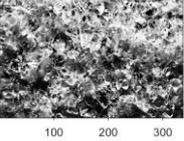
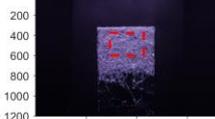
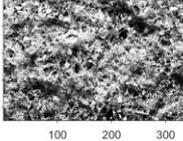
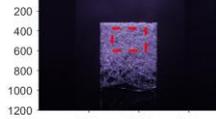
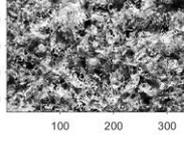
Manuell – Testperson 1	1.1_F		Sn	
	1.2_F		Sn	

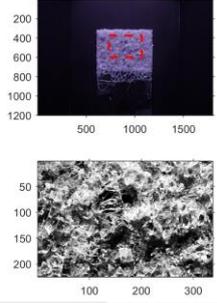
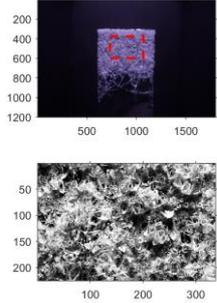
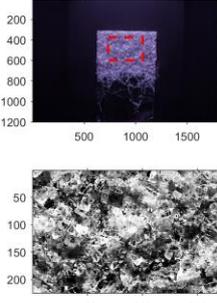
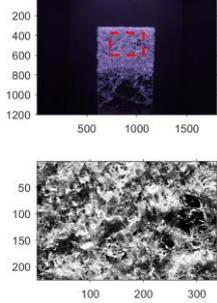
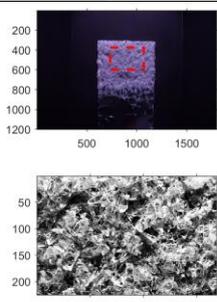
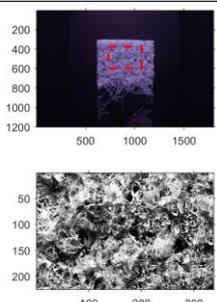
	1.3_F		Sn	
	1.4_F		Sn	
	1.5_F		Sn	
Manuell – Testperson 2	2.1_F		Sn	
	2.2_F		Sn	

	2.3_F		Sn	
	2.4_F		Sn	
	2.5_F		Sn	
Manuell – Testperson 3	3.1_F		Sn	
	3.2_F		Sn	

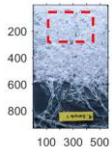
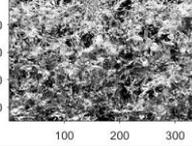
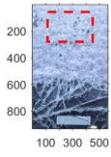
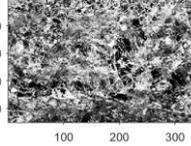
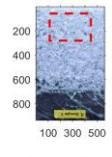
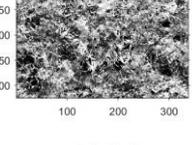
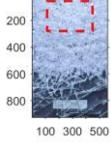
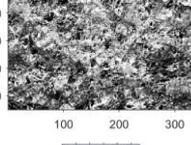
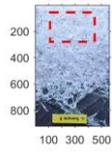
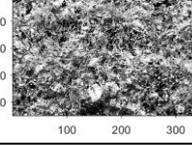
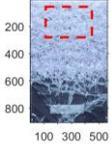
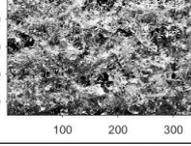
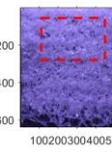
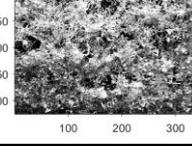
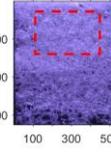
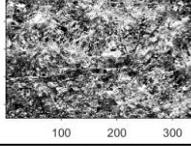
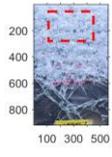
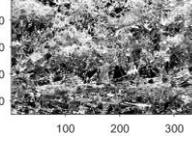
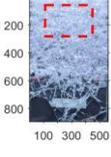
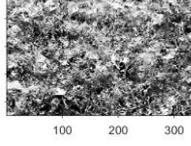
	3.4_F	 	Sn	 
	3.5_F	 	Sn	 
Pummelapparat (ohne Aufzeichnung der Kraft)	4.1_F	 	Sn	 
	4.2_F	 	Sn	 
	4.3_F	 	Sn	 

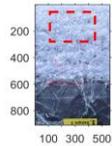
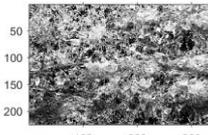
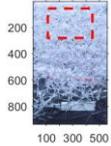
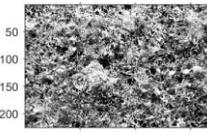
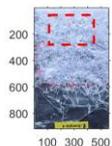
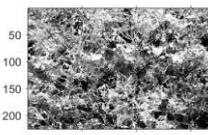
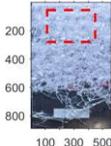
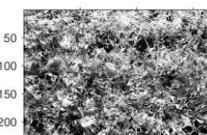
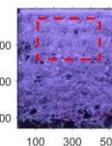
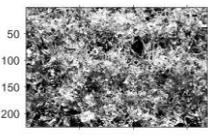
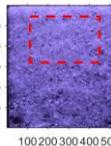
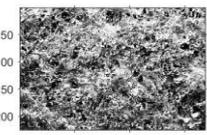
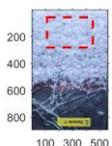
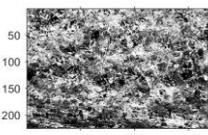
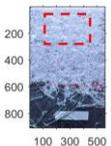
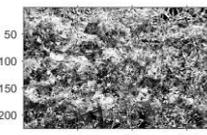
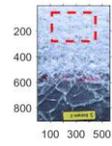
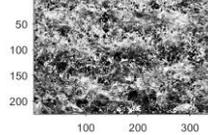
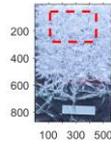
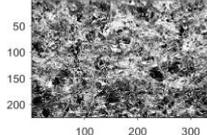
	<p>4.4_F</p>		<p>Sn</p>	
	<p>4.5_F</p>		<p>Sn</p>	
<p>Pummelapparat (mit Kraftmessung)</p>	<p>5.1_F</p>		<p>Sn</p>	
	<p>5.2_F</p>		<p>Sn</p>	
	<p>5.3_F</p>		<p>Sn</p>	

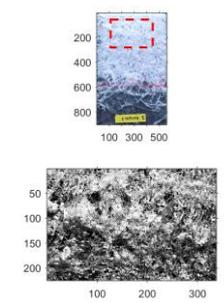
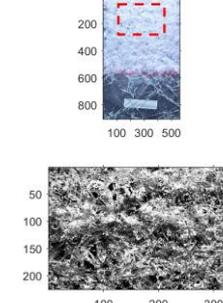
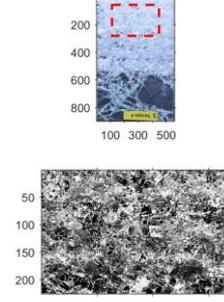
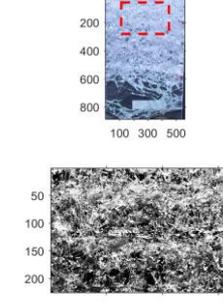
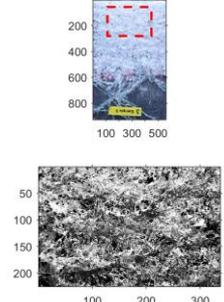
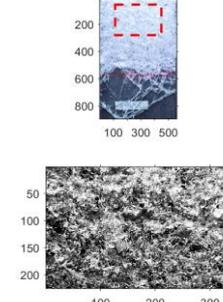
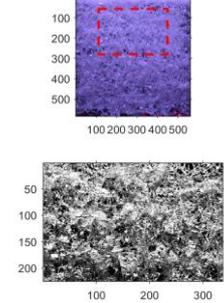
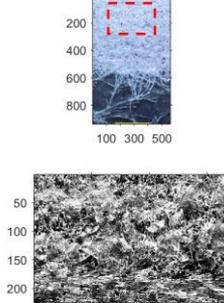
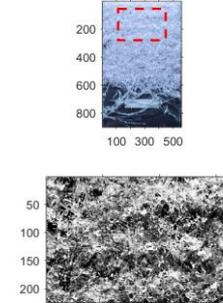
	5.4_F	 	Sn	 
	5.5_F	 	Sn	 
Lagerungstemp_ +20°C	6.1_F	 	Sn	 
	6.2_F	 	Sn	 
	6.3_F	 	Sn	 

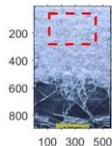
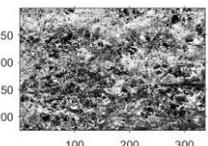
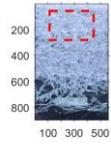
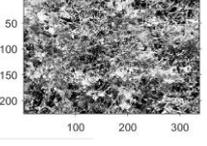
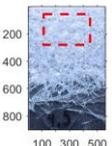
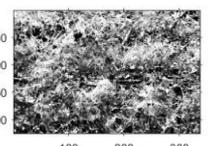
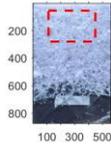
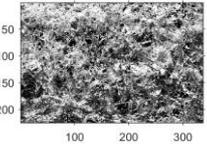
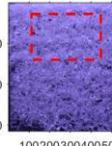
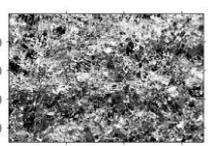
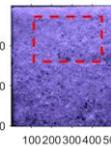
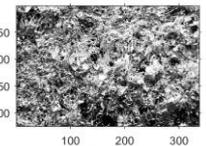
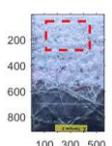
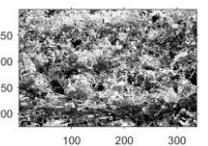
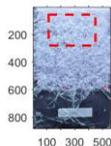
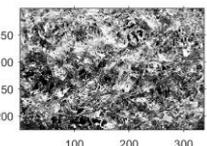
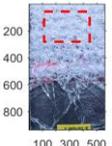
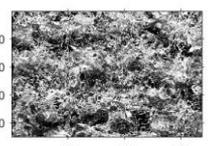
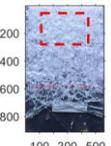
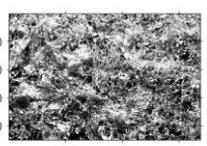
Lagerungstemp_ +60°C	7.1_F		Sn	
	7.2_F		Sn	
	7.3_F		Sn	

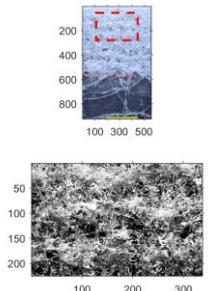
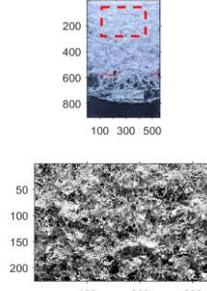
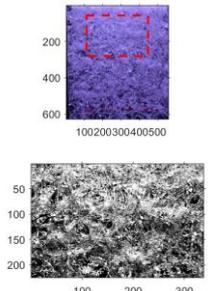
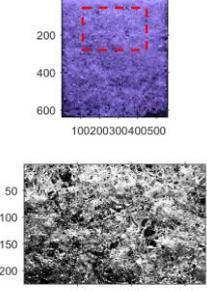
Versuchsreihe 2

RB41 STD	S1 F	 	Sn	 
	S3 F	 	Sn	 
	S5 F	 	Sn	 
	S5 Sn L2 APP	 	S4SnL2 MAN	 
RB41 High Moisture	S1 F	 	Sn	 

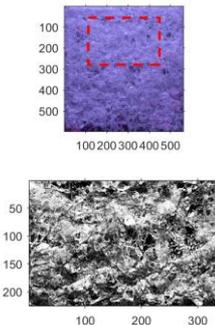
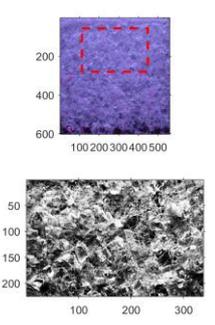
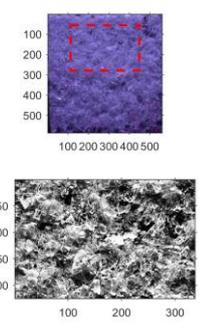
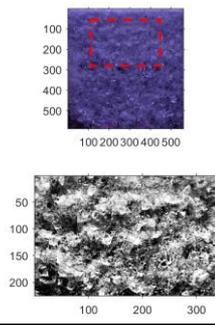
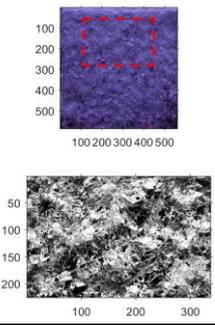
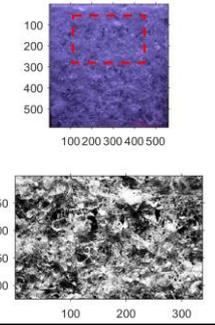
RB41 Low Moisture	S3 F	 	Sn	 
	S4 F	 	Sn	 
	S4Sn L2 APP	 	S5Sn L2 MAN	 
	S1 F	 	Sn	 
	S2 F	 	Sn	 

	<p>S3 F</p>		<p>Sn</p>	
	<p>S4 F</p>		<p>Sn</p>	
	<p>S5 F</p>		<p>Sn</p>	
	<p>S1 Sn L2 App</p>		<p>/</p>	
<p>RA41</p>	<p>S3 F</p>		<p>Sn</p>	

	S4 F	 	Sn	 
	S5 F	 	Sn	 
	S3 Sn L2 App	 	S4 Sn L2 Man	 
RC41	S2 F	 	Sn	 
	S3 F	 	Sn	 

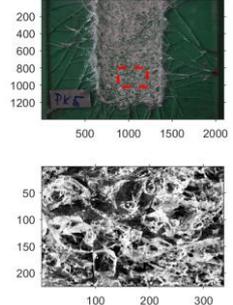
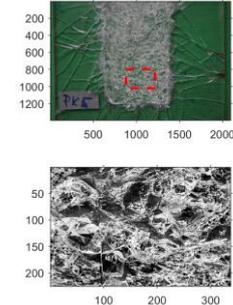
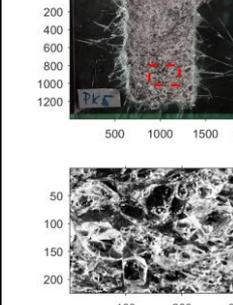
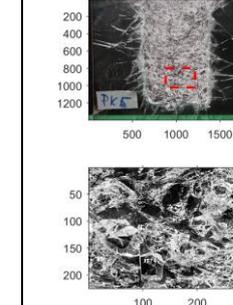
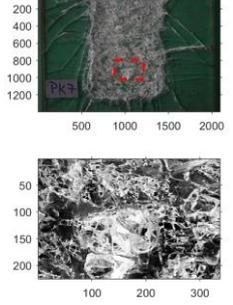
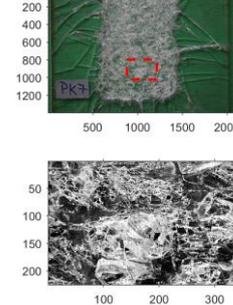
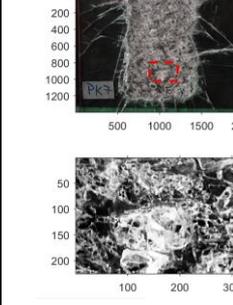
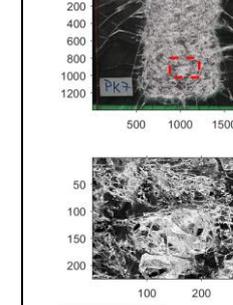
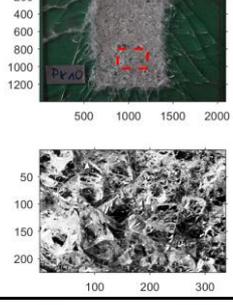
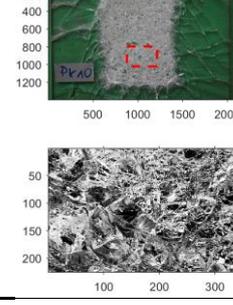
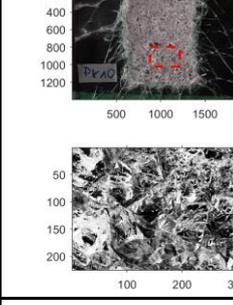
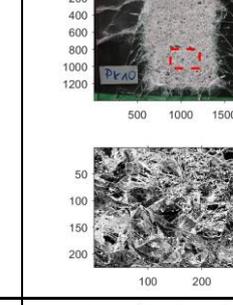
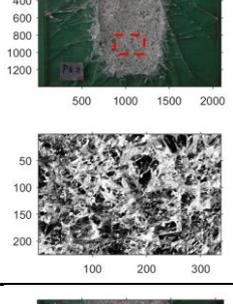
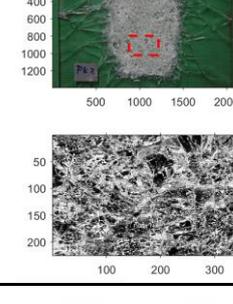
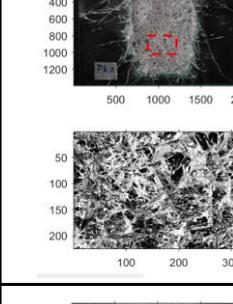
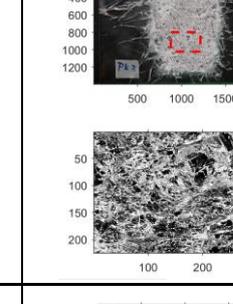
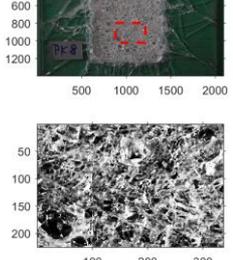
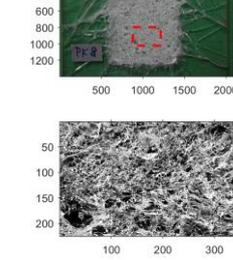
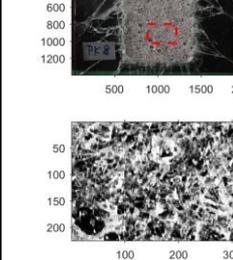
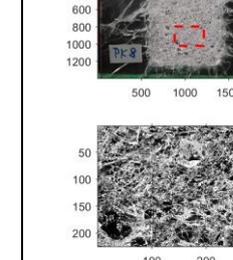
	<p>S4 F</p>		<p>Sn</p>	
	<p>S3 Sn L2 App</p>		<p>S1 Sn L2 Man</p>	

Versuchsserie 3

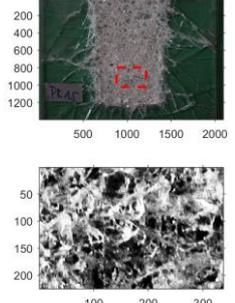
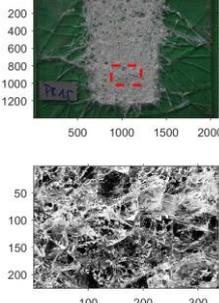
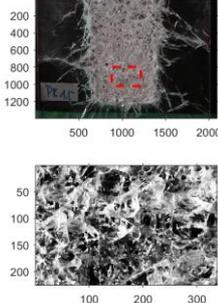
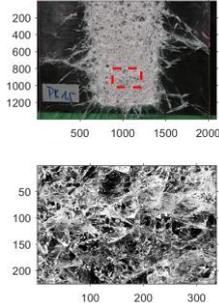
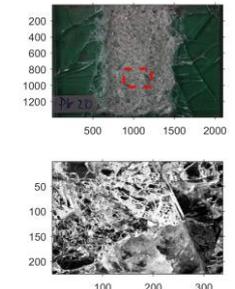
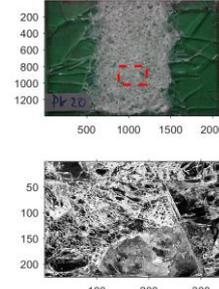
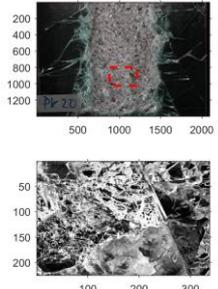
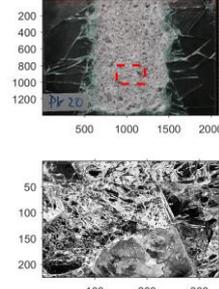
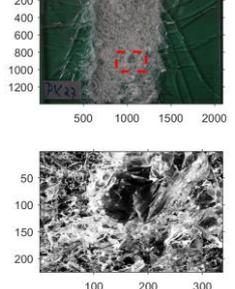
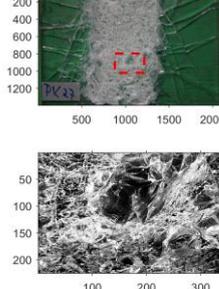
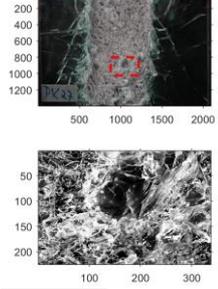
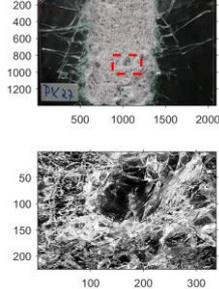
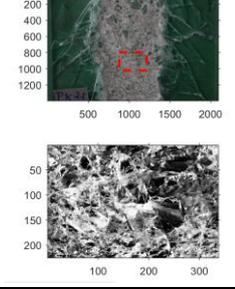
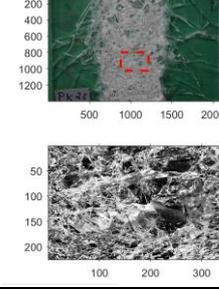
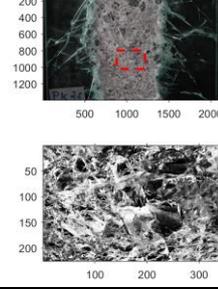
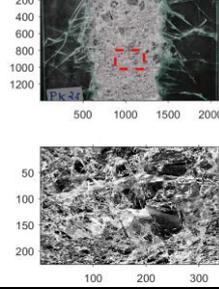
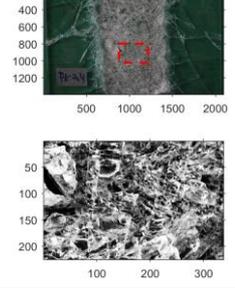
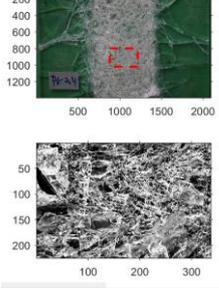
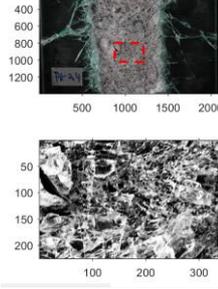
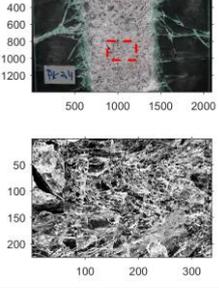
	Probe 1	Probe 2	Probe 3
<p>EVA -18°C</p>			
<p>EVA -50°C</p>			

Großproben

	grün_dunkel	grün_hell	schwarz_dunkel	schwarz_hell
2x4mm_23Grad_MR_PK1				
2x4mm_23Grad_MR_PK2				
2x4mm_23Grad_MR_k_PK1				
2x4mm_23Grad_MR_k_PK2				
2x6mm_23Grad_LR_PK1				

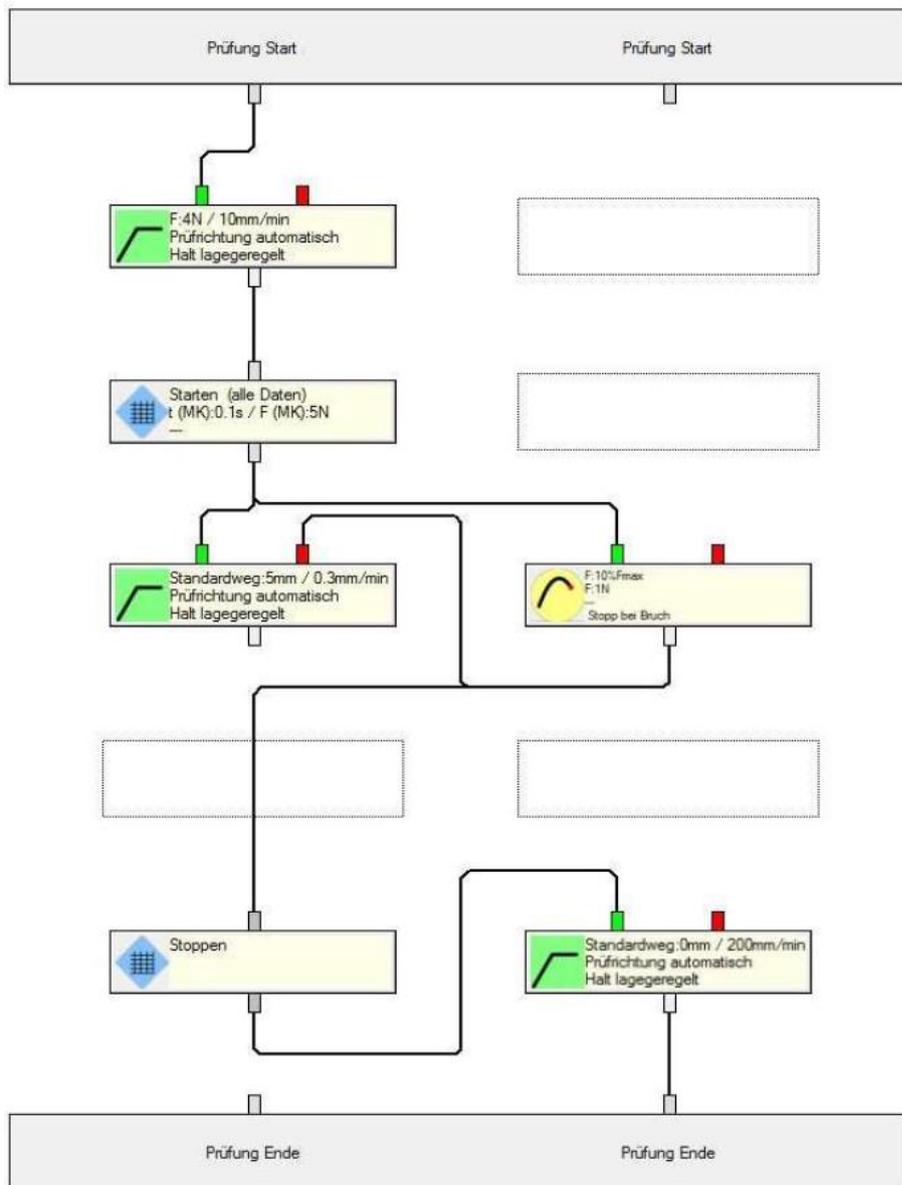
2x6mm_23Grad_LR_PK2				
2x6mm_23Grad_LR_PK3				
2x6mm_23Grad_MR_PK1				
2x6mm_23Grad_MR_PK2				
2x6mm_23Grad_MR_PK3				

<p>2x6mm_23Grad_MR_PK4</p>				
<p>2x6mm_23Grad_MR_PK5</p>				
<p>2x6mm_23Grad_NR_PK1</p>				
<p>2x6mm_23Grad_NR_PK2</p>				
<p>2x6mm_23Grad_NR_PK3</p>				

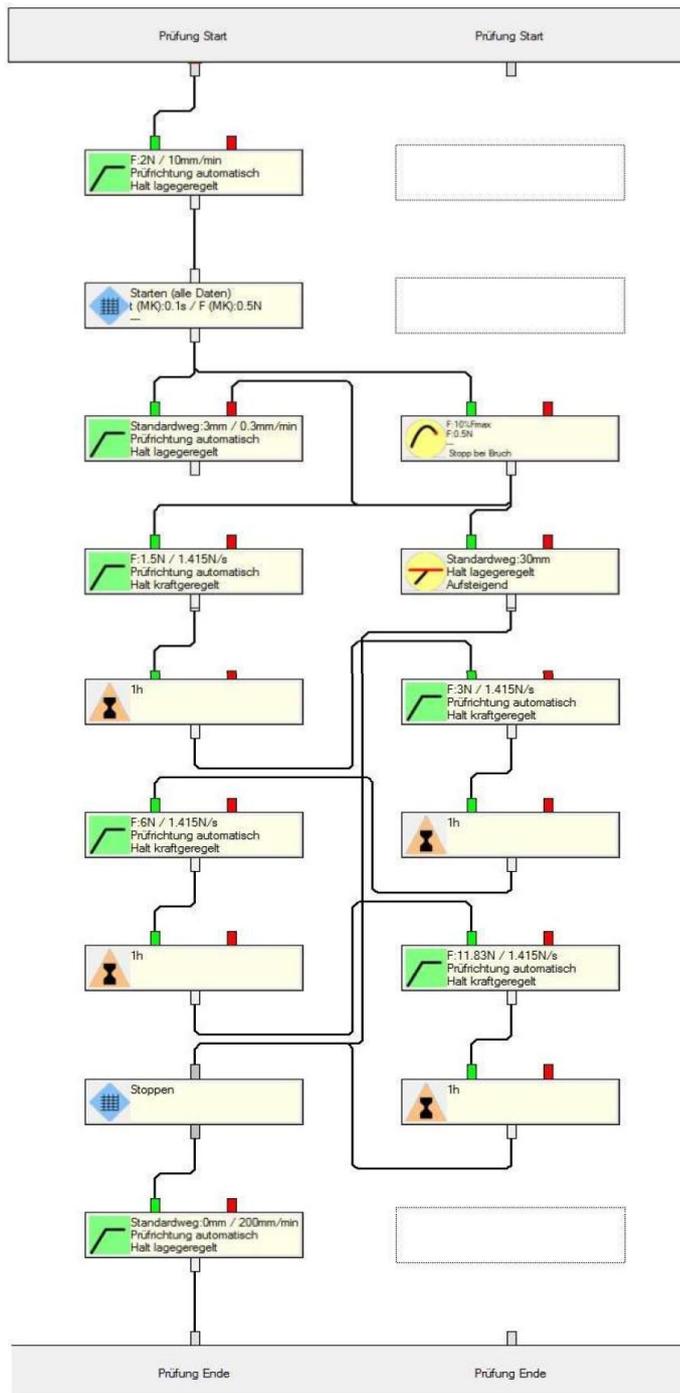
2x6mm_23Grad_NR_PK4				
2x8mm_23Grad_MR_PK1				
2x8mm_23Grad_MR_PK2				
2x8mm_23Grad_MR_k_PK1				
2x8mm_23Grad_MR_k_PK2				

9.7 Versuchsvorschrift Zwick TCB

**Erster Bruch**



**Zweiter Bruch und Versuchsvorschrift**



## 9.8 Zusätzliche Daten zu den kleinen TCB Proben

Serie	Probe	Breite [mm]	Dicke [mm]	Temperatur [°C]	rel. Luftfeuchte [%]	1. Bruchlast [N]	2. Bruchlast [N]
<b>2. Durchgang</b>							
RA41	S7	30,48	6,37	22,3	44,9	73,4	46,9
RC41	S7	29,6	6,39	23	43,5	74,2	34,8
RB41 Std	S7	30,51	6,42	23,5	43,6	71,4	50,8
RB41 High	S7	30,5	6,42	22,4	40,1	53,8	64,2
RB41 Low	S7	29,4	6,41	23,4	40,1	72,4	39,5
<b>3. Durchgang</b>							
RA41	S8	31,61	6,42	23,5	45,4	72,4	74,9
RC41	S8	30,4	6,39	22,5	43,4	48,7	62,4
RB41 Std	S8	30,55	6,39	22,7	44,5	71,1	64,1
RB41 High	S8	31,52	6,37	22	43	71,4	54,4
RB41 Low	S8	31,64	6,43	22,6	44,5	70,2	44,9

## 9.9 Matlab Code zur Bestimmung der delaminierten Fläche

```

%Bestimmung der delaminierten Fläche

close all;
clear all;

Bild= imread('RC41_S6bear.jpg'); % Bild einlesen
Bild1= imread('RC41_S6bear.jpg');

breite=30; % Bildbreite in mm angeben
massstab=breite/size(Bild,2); % Maßstabberechnung
hohe=massstab*size(Bild,1); % Berechnung wie hoch der Bildausschnitt in mm ist
flaeche=30*hohe; % Berechnung wie hoch der Bildausschnitt in mm ist

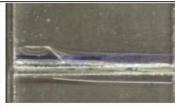
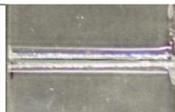
figure, imshow(Bild); % Bild anzeigen, fÃ¼r Maskenzeichnung, zu Ermittlung Delamination einer Glashälfte
h = imfreehand; % Maskenzeichnung mit Freihandzeichnung
position = wait(h);
mask = poly2mask(position(:,1),position(:,2),size(Bild,1),size(Bild,2));
Bild(mask==0) = 0;
M = mean(Bild(Bild~=0));
imshow(mask) % Maske im Bildausschnitt anzeigen
f=bwarea(mask) % Ermittlung Anzahl der binären Bildpixel einer Glashälfte (weiß)
g=size(Bild,1)*size(Bild,2) % Maximale Anzahl der Pixel des Bildausschnitts

figure, imshow(Bild1); % Bild anzeigen, fÃ¼r Maskenzeichnung, zu Ermittlung Delamination der zweiten Glashälfte
j = imfreehand;
position1 = wait(j);
mask1 = poly2mask(position1(:,1),position1(:,2),size(Bild,1),size(Bild,2));
Bild1(mask1==0) = 0;
M1 = mean(Bild1(Bild1~=0));
imshow(mask1) % Maske im Bildausschnitt anzeigen
f1=bwarea(mask1) % Ermittlung Anzahl der binären Bildpixel zweiter Glashälfte (weiß)

summe=f+f1 % Addieren der Anzahl der weißen Pixel beider Glashälften
ver=summe/g % Verhältnisberechnung der Anzahl der weißen Pixel beider Glashälften zur Gesamtanzahl der Pixel im
Bildausschnitt
delaminiert=flaeche*ver % Berechnung der Delamination

```

9.10 Bilder zur delaminierten Fläche

	RB STD	RB High M	RB Low M
Durchgang			
ausgewertet			
Durchgang			
ausgewertet			

	RA	RC
Durchgang		
ausgewertet		
Durchgang		
ausgewertet		