

# **Einfluss fertigungsbedingter Inhomogenitäten auf das Werkstoffverhalten von Silikonklebstoffen für die Anwendung im Bereich des Structural Sealant Glazings**

*Elisabeth Stammen<sup>1</sup>, Klaus Dilger<sup>1</sup>, Benjamin Schaaß<sup>2</sup>, Markus Feldmann<sup>2</sup>*

1 Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig, Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig, Deutschland; e.stammen@tu-braunschweig.de; k.dilger@tu-braunschweig.de

2 Institut für Stahlbau, RWTH Aachen University, Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen, Deutschland; b.schaaß@stb.rwth-aachen.de; feldmann@stb.rwth-aachen.de

## **Abstract**

Das globale Sicherheitskonzept der ETAG 002 sieht vor, verschiedene auf die Bemessung Einfluss nehmende Faktoren pauschalisiert durch einen globalen Sicherheitsfaktor zu berücksichtigen. Hierunter fallen auch fertigungsbedingte Inhomogenitäten. In diesem Beitrag wird der Einfluss verschiedener fertigungsbedingter Inhomogenitäten (unzureichende Durchmischung, Lufteinschlüsse, u.a.) auf das Materialverhalten von zugelassenen Silikonklebstoffen untersucht. Volumen, Anzahl und Position der in das Klebstoffgefüge eingebrachten Inhomogenitäten werden mit Hilfe bildgebender Mikro-CT-Aufnahmen vorab genau bestimmt, um so den tatsächlichen Einfluss der Inhomogenitäten auf das Werkstoffverhalten bei zerstörender Prüfung beurteilen zu können. Auf Basis der erhobenen Daten erfolgt abschließend eine Bewertung der gängigen, den Fertigungsprozess begleitenden QS-Maßnahmen sowie eine Einschätzung des derzeitigen Sicherheitsniveaus in Bezug auf fertigungsbedingte Inhomogenitäten.

**Influence of production-related inhomogeneities on the material behaviour of silicone adhesives for use in structural sealant glazing.** The global safety concept of ETAG 002 provides for the consideration of various factors influencing the design in a generalised manner by means of a global safety factor. This also includes production-related inhomogeneities. In this paper, the influence of various production-related inhomogeneities (insufficient mixing, air inclusions, etc.) on the material behaviour of approved silicone adhesives is studied. Volume, quantity and position of the inhomogeneities inserted in the adhesive structure are precisely determined in advance with the aid of imaging micro-CT scans in order to assess the actual influence of the inhomogeneities on the material behaviour during destructive testing. Based on the data collected, an evaluation of the current QA procedures during the manufacturing process as well as an assessment of the current safety level with regard to production-related inhomogeneities will be carried out.

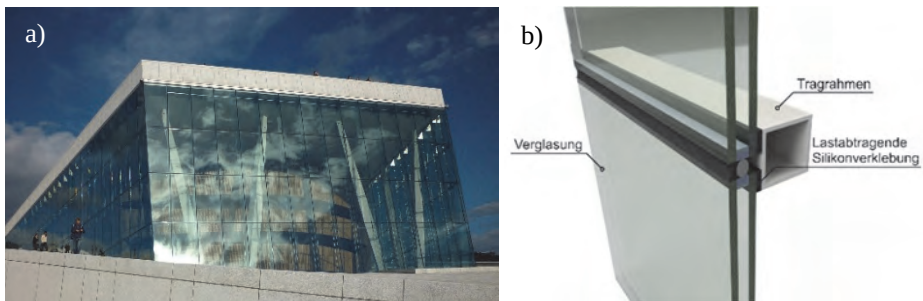
**Schlagwörter:** Silikonklebstoff, Inhomogenitäten, Structural Sealant Glazing

**Keywords:** silicone adhesive, inhomogeneities, structural sealant glazing

## 1 Einführung

### 1.1 Structural Sealant Glazing

Als *Structural Sealant Glazing* (SSG, oftmals auch nur *Structural Glazing*) wird das Kleben von Verglasungselementen mit einer aus Edelstahl oder Aluminium bestehenden Rahmenkonstruktion durch eine allseitig umlaufende Silikonfuge bezeichnet [1]. Einwirkende Lasten auf die Verglasung, wie z.B. Windlasten, werden über die Klebung abgetragen. Auch der Lastabtrag des Eigengewichts der Verglasung über die Klebung ist problemlos möglich, zumeist aber durch behördliche Vorgaben eingeschränkt bzw. teilweise nicht gestattet. Das Kleben erfolgt in der Regel werksseitig. In SSG-Systemen dürfen ausschließlich Silikonklebstoffe, die über eine entsprechende Zulassung nach ETAG 002 [2] verfügen, verwendet werden. Aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügepartner handelt es sich bei einer SSG-Klebung um eine Dick-schichtklebung mit einer Mindestdicke von 4 mm, i.d.R. jedoch deutlich dicker. SSG-Fassaden weisen einen hohen Grad an Transparenz auf, da auf zusätzliche Unterkonstruktionen, wie bspw. Haltesysteme bei punktgehaltenen Verglasungen, verzichtet werden kann. Die Fassade wirkt als ganzheitliche, homogene Gebäudeumhüllende, die lediglich durch dünne Trennfugen unterteilt wird, Bild 1a. Der schematische Aufbau einer typischen SSG-Fuge ist in Bild 1b dargestellt.



**Bild 1** a) Opernhaus Oslo, Norwegen, b) Schematische Darstellung einer SSG-Fassade  
(© B. Schaaf, [3])

### 1.2 Bemessungskonzept nach ETAG 002

Bei der ETAG 002 – *Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen* [2] handelt es sich um ein durch die Europäische Organisation für Technische Zulassungen (EOTA, European Organisation for Technical Approvals) im Jahr 1998 veröffentlichtes Leitliniendokument, welches bei der Erlangung einer Europäischen Technischen Bewertung (ETA, European Technical Assessment) als Grundlagendokument für die Spezifikation der wesentlichen Leistungsmerkmale eines Bauproduktes

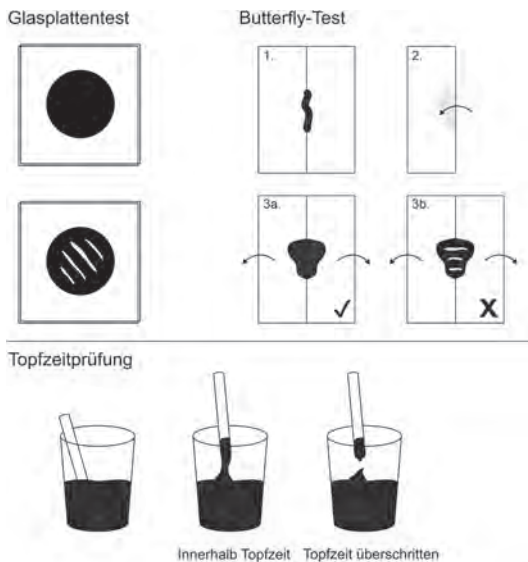
herangezogen wird. Neben den produkttechnischen Anforderungen an die zu verwendenden Klebstoffe beinhaltet die ETAG 002 [2] außerdem ein Konzept zur Gestaltung und Auslegung von Klebfugen in SSG-Systemen. Auch wenn es sich bei der ETAG 002 [2] nicht um eine baurechtlich eingeführte Norm handelt, so wird das Auslegungskonzept in der Regel durch die Baubehörden übernommen. Damit einher geht die Bemessung der Klebfuge mit einem globalen Sicherheitskonzept anstelle des Teilsicherheitskonzepts nach Eurocode 0 / DIN EN 1990 [4]. Das globale Sicherheitskonzept sieht vor, die Widerstandsseite mit einem pauschalen Sicherheitsfaktor (in Bezug auf die ETAG 002 [2] auch als *Methodenfaktor* bezeichnet) von  $\gamma_{\text{tot}} = 6$  für Kurzzeitbelastungen abzumindern; auf der Einwirkungsseite werden charakteristische Lasten angesetzt. Dieser Faktor beinhaltet sämtliche die Festigkeit mindernde Einflüsse sowie bei der Berechnung der Klebfugenspannungen vereinfachende Annahmen. Eine Differenzierung nach Anteil der verschiedenen Einflussgrößen am Gesamtfaktor ist nicht möglich und auch nicht bekannt. Um den Anteil fertigungsbedingter Inhomogenitäten am derzeitigen Gesamtsicherheitsniveau zu erfassen, werden im AiF-Projekt *NewMechsiko* [5] u.a. Einflüsse aus fertigungsbedingten Inhomogenitäten auf das Werkstoffverhalten untersucht und erste Ergebnisse im Rahmen dieses Beitrages veröffentlicht.

### 1.3 Klebprozess und begleitende QS-Maßnahmen

Maßgebend für die Qualität einer Klebung ist das Zusammenwirken aller am Klebprozess beteiligten Arbeitsschritte, beginnend bei der Oberflächenbehandlung, über den Klebstoffauftrag und das Fügen bis zur Qualitätssicherung. Außerdem ist die Schaffung einer klebgerechten Umgebung von Relevanz, insbesondere bei Ausführung baustellenseitiger Klebarbeiten. Vorgaben zur Überwachung des Klebprozesses finden sich innerhalb der ETAG 002 [2]. Weiterführende Hinweise zur Prozesskette Kleben, von der Fertigung bis zur Instandhaltung, finden sich auch in DIN 2304-1 [6]. Die Anwendung dieser Norm im konstruktiven Glasbau ist jedoch nicht verpflichtend.

Die Qualitätssicherung (QS) spielt beim Klebprozess eine wichtige Rolle und dient der Sicherstellung reproduzierbarer, qualitativ hochwertiger Klebungen. Durch geeignete begleitende Tests lässt sich bspw. die Klebstoffqualität überprüfen sowie die Verarbeitungszeit bzw. der Aushärtefortschritt erfassen. Darüber hinaus dient sie der Dokumentation des Klebprozesses im Rahmen von Fremdüberwachungen [3]. Da die gängigen QS-Maßnahmen im Rahmen dieses Beitrages bewertet werden, werden die wichtigsten drei Testverfahren nachfolgend kurz vorgestellt. Zur Sicherstellung einer homogenen Durchmischung der beiden Komponenten von 2K-Systemem können zwei verschiedene Tests durchgeführt werden [8]: der Glasplattentest und/oder der Butterfly-Test. Diese Tests zielen darauf ab, bei unterschiedlich farbigen Komponenten eine schlechte bzw. nicht ausreichende Durchmischung durch vorhandene Schlieren zu erkennen. Beim Glasplattentest wird ein Klebstoffstrang auf eine Glasplatte (10 cm x 10 cm) aufgetragen und mit einer weiteren Glasplatte verpresst. Der so verpresste Klebstoff ist visuell auf unzureichende Durchmischung, Schlieren oder Bläschen zu untersuchen. Der Butterfly-Test

kann alternativ zum Glasplattentest durchgeführt werden und dient ebenfalls zur Beurteilung der Mischqualität. In die Mitte eines geknickten DIN A4-Papiers wird eine kleine Menge Klebstoff aufgetragen. Das Papier wird in der Mitte erneut geknickt, der Klebstoff zusammengedrückt und das Blatt wieder aufgefaltet. Der Klebstoffflecks ist dann ebenfalls visuell zu untersuchen [3]. Zur einfachen Kontrolle des zeit- und temperaturabhängigen Viskositätsanstieges der Mischung während der Topfzeit und zur Identifikation einer Topfzeitüberschreitung kann die sogenannte „snap-time“ bestimmt werden. Dazu wird etwas Klebstoff in ein Gefäß gegeben und in regelmäßigen Zeitintervallen ein im Klebstoff befindlicher Stab herausgezogen. Kommt es beim Herausziehen zu einem Abriss des Klebstoffes, ist die Topfzeit überschritten. Eine zu langsam oder zu schnell erreichte Topfzeit deutet auf Abweichungen der Mischgüte, des Mischungsverhältnisses oder auch umgebungsbedingter Einflüsse hin [3]. Die beschriebenen Tests sind in Bild 2 schematisch dargestellt.



**Bild 2** Fertigungsbegleitende Testverfahren zur Qualitätssicherung: Glasplattentest, Butterfly-Test, Topfzeitprüfung (© B. Schaaf, [3])

## 2 Untersuchungen fertigungsbedingter Inhomogenitäten an H-Proben

Da es sich beim Kleben um einen speziellen Prozess handelt, ist eine qualitätsgesicherte Durchführung und die Kontrolle aller klebtechnischen Prozessschritte uneingeschränkt notwendig. Fertigungsbedingte Inhomogenitäten sollten damit an sich auszuschließen sein; die fortlaufende Entwicklung im Bereich der zerstörungsfreien Prüftechnik zeigt jedoch, dass eine nachträgliche Validierung ausgeführter Klebungen vielfach notwendig

ist. Grundlegend sind hierzu Untersuchungen an definiert mit Fehlern hergestellten und analysierten Proben. Systematische wissenschaftliche Untersuchungen von fertigungsbedingten Inhomogenitäten an SSG-Silikon finden sich in der Literatur allerdings nur vereinzelt. Hagl [9] untersuchte den Einfluss verschiedener Mischverhältnisse auf das Steifigkeitsverhalten und die zu erwartenden Bruchspannungen des Silikonklebstoffes DC993 [6]. Ein variiertes Mischungsverhältnis zwischen 11:1 bis 7:1 zeigte nur einen untergeordneten Einfluss auf die Dauerhaftigkeit, eine ungenügende Mischung und vor allem fertigungsbedingte Fehlstellen wie Luftblasen zeigten hingegen einen deutlichen Einfluss.

Aufgrund der aktuell noch begrenzt verfügbaren Datenlage ist es ein Ziel der hier vorgestellten Arbeiten, dass Inhomogenitäten durch den Klebprozess analog der DIN EN ISO 5817 [10] für das Schweißen beschriebenen Kategorien klassifiziert werden können. Daher wurden in den bisherigen Untersuchungen als mögliche Einflussgrößen neben dem Mischungsverhältnis und der Mischqualität (eingestellt über die Variation des Mischverhältnisses bzw. die definierte Manipulation des Mischrohres) Einschlüsse durch Glaskugeln als einzelne Kugel, Kugelzeilen und Kugelnester (entsprechend der Ordnungsnummer für „Poren“ 2011, 2013, 2014 bzw. 300 „fester Einschluss“ nach ISO 6520-1 [11]) bzw. Styroporpartikel als Lufteinschlüsse sowie eingelegte Teflonfäden als Kerben (Ordnungsnummer 5011, 5012 bzw. 5013 nach ISO 6520-1 [11]) untersucht. Einflüsse durch Alterungsprozesse auf die unterschiedlichen Inhomogenitäten werden derzeit noch untersucht. Hierbei werden sowohl Feucht-/ Warmlagerungen und Klimawechselbelastungen, der Einfluss von Tensiden, als auch dynamisch-mechanische Einflüsse betrachtet. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse des Projektes [5] anhand von quasistatischen Zug- und Schubversuchen dargestellt.

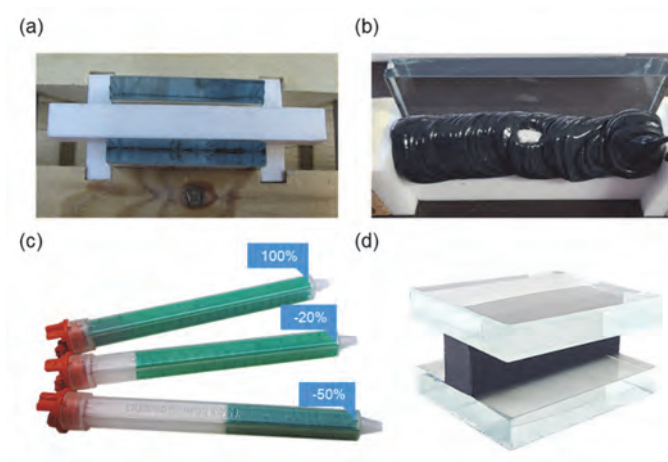
## 2.1 Fertigung

Der Einfluss fertigungsbedingter Inhomogenitäten auf das Werkstoffverhalten wurde zunächst an Schulterproben nach DIN EN ISO 527-2 [7] untersucht. Diese Vorversuche dienten einer ersten Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Inhomogenitäten / Störstellen auf den polymeren Werkstoff. Zu den untersuchten Inhomogenitäten gehören u.a. falsche Mischverhältnisse, unzureichende Durchmischung, eingebrachte Fremdkörper etc. Der Vorteil dieses Probentyps liegt zum einen in der hohen Reproduzierbarkeit aufgrund gefräster PTFE-Schalungen, die eine sehr exakte Probenfertigung ermöglichen, die Beeinflussung der Messgrößen durch geometrische Abweichungen bzw. Unstetigkeiten ist somit sehr gering. Zum anderen liegt im Messbereich dieser Probe ein klar definierter uniaxialer Spannungszustand vor, was die Auswertung der Ergebnisse im Gegensatz zu gefügten Proben mit mehrachsialem Spannungszustand stark vereinfacht. Somit ist der uniaxiale Zugversuch an der Schulterprobe jedoch nicht direkt mit einem geklebten Bauteil vergleichbar. Daher wurden für alle weiteren Untersuchungen H-Proben nach ETAG 002 [2] gewählt. Die H-Proben wurden in geeigneten, mit PTFE ausgekleideten Schalungen hergestellt, die so konstruiert sind, dass über die lange Kante der Probe Inhomogenitäten in den Klebstoff eingebracht werden können, Bild 3. Die Durchmischung

der 2K-Klebstoffe erfolgte je nach System entweder mit geeigneten Kartuschensystemen mit Statikmischer, Zentrifugalmixer oder durch Anrühren von Hand mit geeignetem Rührwerkzeug. Die lange Kante der Probe wurde nach Einbringen der Inhomogenität mit einem Distanzstück so verschlossen, dass überschüssiger Klebstoff aus der Kavität entweichen konnte, um eine saubere Klebfugengeometrie zu erzeugen. Insgesamt wurden drei exemplarische SSG-Silikone mit ETA von unterschiedlichen Herstellern untersucht. Aufgrund des großen zeitlichen Aufwands der vor der quasistatischen Prüfung durchzuführenden CT-Aufnahmen ist es nicht möglich, alle Proben nach exakt gleicher Aushärtezeit (in Tagen) zu prüfen. Sämtliche Prüfungen einer Charge wurden jedoch in einem Zeitraum von 2–3 Tagen durchgeführt. Durch eine Aushärtezeit von mindestens vier Wochen konnte sichergestellt werden, dass die Proben vollständig ausgehärtet waren. Die Ausschaltung der Proben erfolgte zügig nach dem Klebprozess, sodass ausreichend Zeit zur Verfügung stand, dass die bei der Aushärtereaktion anfallenden Nebenprodukte über die freien Oberflächen der Klebfuge ablüften. Kleben, Aushärtung und Prüfung erfolgten bei Raumklima. Folgende Inhomogenitäten wurden in Abhängigkeit des Klebstoffsystems untersucht:

- verschiedene Mischgüten (manipulierte Längen der Statikmischrohre oder reduzierte Mischdauer),
- Fertigungsverfahren (Statikmischer, Handmischung, Werksfertigung),
- Lufteinschlüsse / Fremdkörper, simuliert durch Styroporflocken,
- Kerbwirkung durch eingebrachte PTFE-Fäden.

Als Referenz dienen jeweils optimal hergestellte Proben. Die Ergebnisse der Untersuchung werden in anonymisierter Form dargestellt. Auszüge der Fertigung sind in Bild 3 dargestellt.



**Bild 3** a) Schaltung mit PTFE-Distanzstücken, b) Styroporkugel vor finaler Positionierung, c) manipulierten Statikmischer, d) optimal gefertigte H-Probe

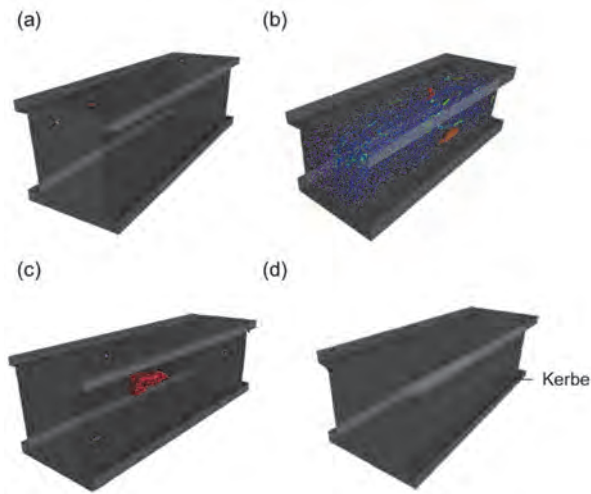
## 2.2 CT-Untersuchungen

Während der Fertigung geeigneter Proben mit und ohne Inhomogenitäten zeigte sich, dass es teilweise nur sehr schwierig ist, Aussagen zur tatsächlichen Fertigungsqualität zu treffen und Inhomogenitäten exakt an einer gewünschten Stelle innerhalb der Klebung zu platzieren bzw. deren Größe zu bestimmen. Insbesondere durch das Einbringen der Abstandshalter und das Verpressen der H-Proben kommt es zu Bewegungen z.B. der Styroporflocken durch den Volumenstrom des Klebstoffs. Um Größe und Lage sowie sonstige mögliche, nicht vorgesehene Inhomogenitäten innerhalb der Probe genau zu erfassen, wurden vor Durchführung quasistatischer Versuche von jedem Prüfkörper Mikro-CT-Aufnahmen erstellt. Die CT-Messungen wurden mit einem phoenix „v|tome|x s 240“ microCT System der Firma GE Sensing & Inspection GmbH (Wunstorf, Deutschland) durchgeführt. Die 240 kV und 320 W leistungsstarke Mikrofokus der Röntgenröhre mit Wolframkathode ermöglicht eine theoretische Auflösung von  $<1 \mu\text{m}$ . Das CT-System wird mittels der Software „xs control“ und „phoenix datos|x acquisition 2.0“ (beide GE Sensing & Inspection Technologies GmbH) betrieben. Zur Rekonstruktion des CT-Scans kommt die GE Software phoenix „datos|x reconstruction“ zum Einsatz. Die Analyse der CT-Scans erfolgt mittels der Auswertungssoftware „VGStudio MAX 3.2“, entwickelt von der Volume Graphics GmbH (Heidelberg, Deutschland). Tabelle 1 zeigt die für die Untersuchung von H-Proben entwickelten Einstellungsparameter.

**Tabelle 1** Parameter der CT-Messungen für H-Proben

Probe	$U_B$ [kV]	$I_R$ [ $\mu\text{A}$ ]	Leistung [W]	Timing [ms]	Average [-]	Skip [-]	Bilder [-]	Voxel [ $\mu\text{m}$ ]	Dauer [min]
Glas/Silikon/Glas	70	220	15,4	100	8	2	1.441	45,5	184
Glas/Silikon/Stahl	180	130	23,4	100	8	2	1.441	45,5	184

Durch die exakte Analyse der Probe in Bezug auf das Klebstoffvolumen, die Größe und die Lage der eingebrachten Defekte sollte eine Korrelation ermöglicht werden, welchen Einfluss die Inhomogenität auf das Versagen des Prüfkörpers genommen hat. Aus den Volumen der Inhomogenität(en) sowie der Klebfuge lässt sich ein *Defektvolumenverhältnis* (DVV, Defektvolumen / Gesamtvolumen) ableiten, anhand dessen im Zuge der Serienauswertung ein kritischer Wert abgeleitet werden kann. Es wurde postuliert, dass die untersuchte Inhomogenität bzw. daraus resultierende Lufteinschlüsse bei Prüfkörpern mit einem DVV oberhalb des kritischen Wertes die zu erreichende Festigkeit beeinflussen. Bei DVVs unterhalb des kritischen Wertes ist hingegen kein Zusammenhang zwischen erreichter Bruchfestigkeit und Defektvolumen festzustellen. Nachfolgend sind Auszüge der CT-Untersuchungen für unterschiedliche Inhomogenitäten dargestellt, Bild 4.



**Bild 4** Exemplarische CT-Aufnahmen a) Optimale Probe, b) Vielzahl an Luftporen  
c) Styroporflocke in Probenmitte, d) Probe mit längsseitiger Kerbe auf mittlerer Höhe der Klebschicht

### 2.3 Quasistatische Prüfung

Nachdem von allen Proben CT-Aufnahmen erstellt und ausgewertet wurden, wurden an diesen quasistatische Zug- und Schubversuche durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit wurde dabei in Anlehnung an die ETAG 002 [2] auf 5 mm/min festgelegt, die Lagerung der Proben bei Versuchsdurchführung erfolgte kardanisch. Jede Serie (Inhomogenität) beinhaltet mindestens sechs Proben. Zur Auswertung wird der Mittelwert herangezogen, die Fehlerbalken geben hier den Streubereich in Form von Minimal- und Maximalwerten der Serie an.

Zusätzlich wurden die Quantilwerte  $R_{u,5}$  nach ETAG 002 [2] bestimmt:

$$R_{u,5} = \bar{x} - \tau_{\alpha\beta} \cdot s \quad (1)$$

mit

$R_{u,5}$	charakteristische Bruchspannung
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert der Bruchspannung (Zug bzw. Schub)
$\tau_{\alpha\beta}$	Exzentrizität von 5 % mit 75 %-iger Wahrscheinlichkeit
$s$	Standardabweichung

Der Quantilwert stellt nach ETAG 002 [2] die charakteristische Materialfestigkeit dar. Als relatives Streumaß wurde außerdem der Variationskoeffizient  $V$  für jede Serie berechnet:

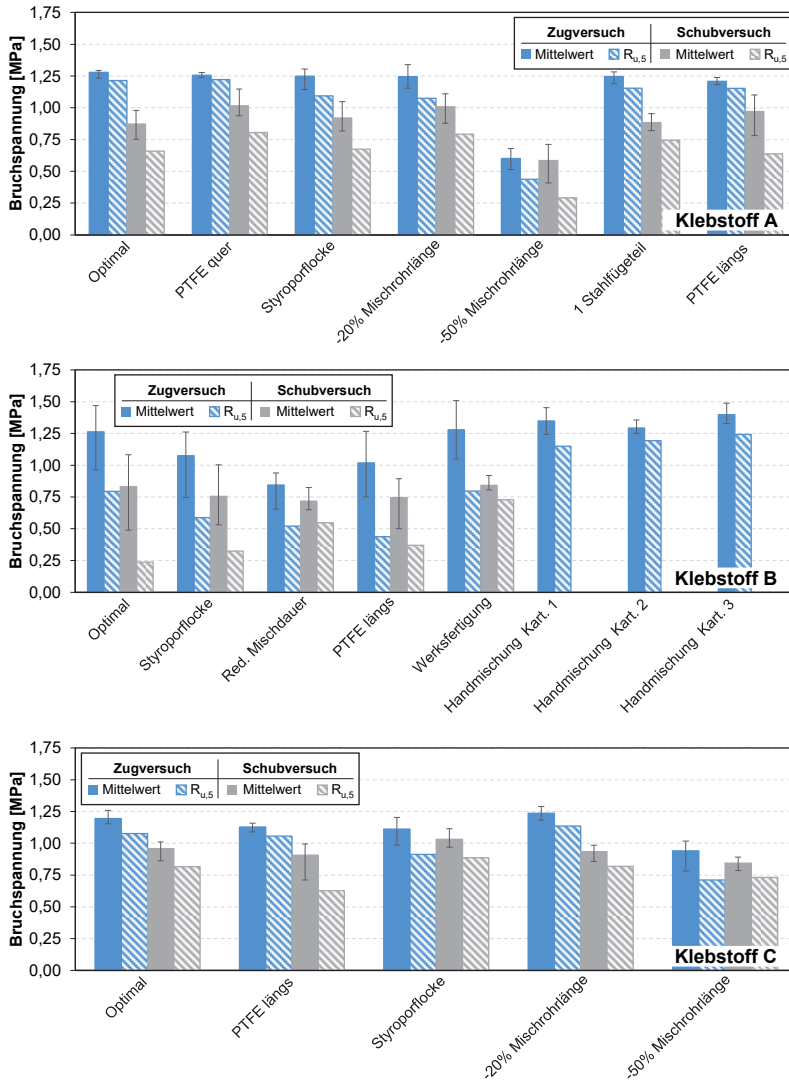


$$V = \frac{s}{\bar{x}} \quad (2)$$

mit

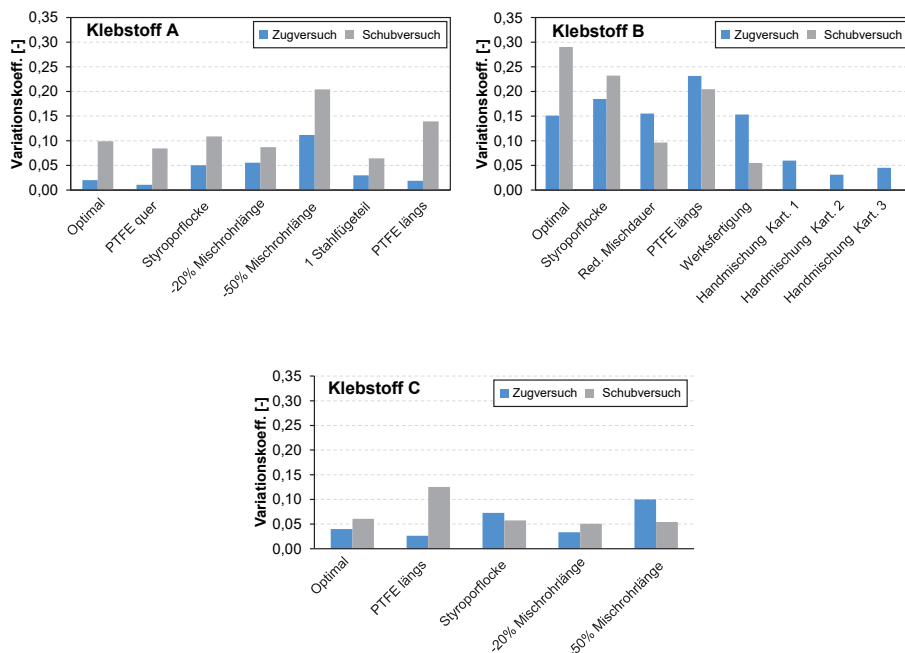
$V$	Variationskoeffizient
$\bar{x}$	Mittelwert der Bruchspannung (Zug bzw. Schub)
$s$	Standardabweichung

Insgesamt zeigt sich beim Vergleich der drei Klebstoffsysteme ein relativ ähnliches Bild, vgl. Bild 5. Das mittlere Niveau der Bruchspannungen der Zugversuche der Referenzproben liegt für alle Klebstoffe bei ca. 1,25 MPa. Die Schubfestigkeit liegt stets unterhalb der Zugfestigkeit, im Mittel bei ca. 0,80–0,90 MPa. Neben dem Einfluss auf die Festigkeit fällt auch die Streuung bei den Schubversuchen i.d.R. größer aus als bei den Zugversuchen. Die Streuung der Ergebnisse hängt in erster Linie von der betrachteten Inhomogenität ab. Hier zeigt sich Klebstoff B auf den ersten Blick empfindlicher als die übrigen beiden Systeme, da auch bei den optimal gefertigten Proben teilweise hohe Streuungen auftreten. In der CT zeigt sich jedoch, dass durch die Mischung mittels Zentrifugalmischer bei allen gefertigten Proben viele Bläschen eingearbeitet wurden. Die Streuung nimmt einen direkten Einfluss auf die sich ergebenden Quantilwerte nach ETAG 002 [2]. Daher fallen diese für Klebstoff B im Vergleich zum Mittelwert relativ niedrig aus. Klebstoffe A und C zeigen sich hier robuster, die Quantilwerte liegen lediglich etwas unterhalb der Mittelwerte. Auch in Bezug auf die eingebrachten Inhomogenitäten sind beide Systeme kaum anfällig. Erst ab einer Reduktion der Statikmischrohrlänge um 50 % zeigt sich eine signifikante Reduktion der Festigkeit. Auch die eingebrachten Styroporflocken, die teilweise eine erhebliche Fehlstelle im Klebstoffgefüge darstellen, haben quasi keinen Einfluss auf die Festigkeit, da diese nicht zum Versagensbeginn beitragen. Nach Rissinitiierung verläuft dieser jedoch in den meisten Fällen durch den durch die Styroporflocken geschwächten Querschnittsbereich. In weiteren Untersuchungen ist geplant, den Einfluss der Lage (Mitte, Rand, Ecke) von definierten Styroporkügelchen auf die Festigkeit zu untersuchen.



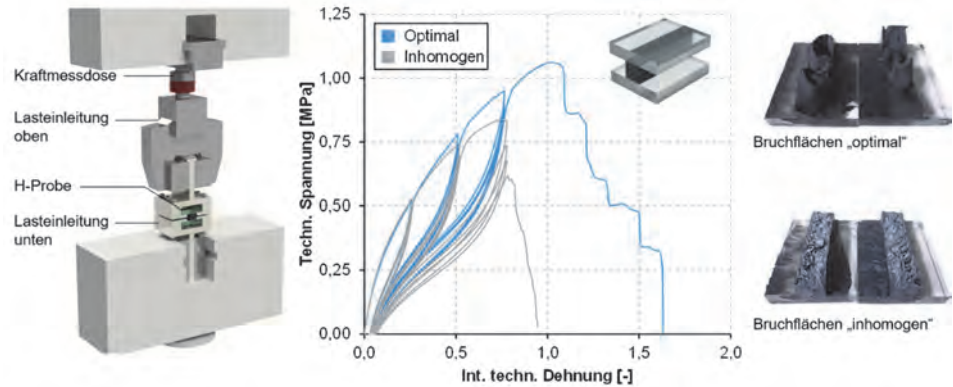
**Bild 5** Mittelwerte und Quantilwerte der Bruchspannungen für verschiedene untersuchte Inhomogenitäten:  
 -20 % / -50 % Mischrohrlänge: Reduktion der Mischwendeln bzw. der Mischrohrlänge um 20 % / 50 %; Red. Mischdauer: 30 s bei 1600 U/min; Styroporflocke: simulierte Luftblase im Klebstoff; PTFE quer/längs: durch PTFE-Fäden längs- bzw. querseitig oberflächlich eingebrachte Kerbe; Werkstofffertigung: Vom Hersteller im Werk gefertigte Proben, Prüfung bei den Forschungseinrichtungen; Handmischung Kart. X: Anmischen des Klebstoffes von Hand mit baustellentauglichem Rührwerkzeug, drei verschiedene Kartuschen; 1 Stahlfügeteil: Glas-Stahl-Probe

Bei Betrachtung der ermittelten Variationskoeffizienten zeigt sich erneut die serienabhängige, teilweise sehr geringe Streuung in Abhängigkeit des Klebstoffsystems, Bild 6. Für viele Serien liegen diese trotz z.T. starker Inhomogenität unterhalb von 5 %, was in Bezug auf Klebstofffestigkeiten eine relativ geringe Streuung darstellt.



**Bild 6** Variationskoeffizienten der Bruchspannungen für verschiedene untersuchte Inhomogenitäten

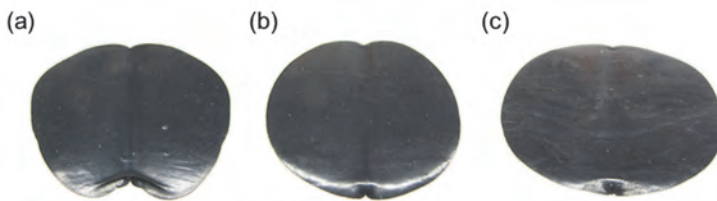
In Bild 7 ist beispielhaft der Vergleich des repräsentativen Last-Deformationsverhaltens für eine optimal gefertigte Probe und eine Probe mit 50 % reduzierter Mischrohlänge dargestellt (Klebstoff C). Die dargestellten Versuche wurden zyklisch mit steigenden Dehnungsniveaus bei Raumklima und einer Geschwindigkeit von 5 mm/min nach ETAG 02 [2] gefahren. Obwohl die inhomogene Probe eine optisch erkennbare, stark reduzierte Durchmischung aufweist, lässt sich eine signifikante Änderung des Last-Deformationsverhaltens erst bei einem technischen Spannungsniveau von ca. 0,6 MPa erkennen. Die entsprechende integrale technische Dehnung (relative Längenänderung bezogen auf die Klebfugendicke) liegt bei ca. 40 %. Damit tritt die erkennbare Abweichung erst weit oberhalb des derzeitigen bautechnisch relevanten Bereichs auf. Eine derart unzureichende Durchmischung wäre jedoch durch die QS-Maßnahmen bzw. einer einfachen optischen Begutachtung der Fuge sofort aufgefallen. Effekte auf das Langzeitverhalten sind hier jedoch gesondert zu prüfen.



**Bild 7** Vergleich zyklischer Zugversuche an optimaler und inhomogener (um 50 % reduzierte Mischrohrlänge) H-Probe (Klebstoff C), Prüfung bei Raumklima mit 5 mm/min

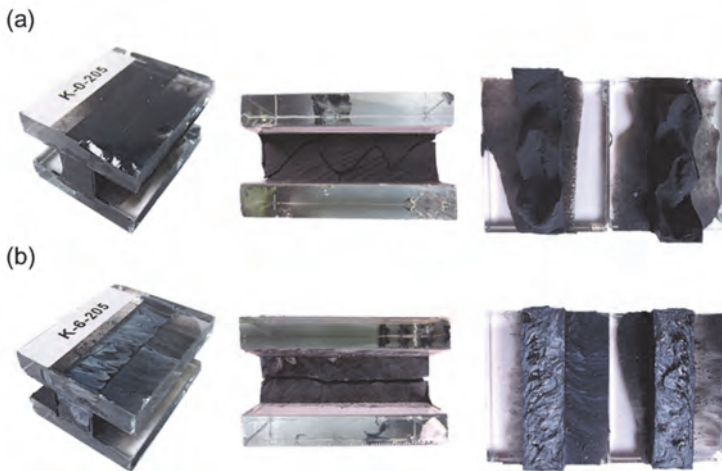
### 3 Ergebnisse und QS-Konzept bzgl. fertigungsbedingter Inhomogenitäten

Auf Grundlage der erhobenen experimentellen Daten lässt sich das fertigungsbegleitende QS-Konzept bewerten sowie eine vorläufige Abschätzung des Anteils fertigungsbedingter Inhomogenitäten auf das derzeitige Sicherheitsniveau ableiten. Bei Einhaltung der in den Datenblättern gegebenen Anforderungen an den Klebprozess sowie den allgemeinen Hinweisen zur Verarbeitung und Qualitätssicherung [8] lassen sich Klebungen hoher Qualität und geringer Streubreite herstellen. Als maßgebender die Festigkeit mindernder Einfluss hat sich nach bisherigem Erkenntnisstand die Mischgüte herausgestellt. Die fertigungsbegleitenden Butterfly- bzw. Glasplattentests sind grundsätzlich zur Beurteilung einer homogenen Durchmischung gut geeignet. Der Glasplattentest ist dabei sensibler; eine unzureichende Durchmischung oder ein falsches Mischverhältnis ist bei beiden Tests erst ab einem bestimmten Fehlerniveau erkennbar.



**Bild 8** Ergebnisse des Butterflytests für a) optimale Durchmischung, b) um 20 % bzw. c) um 50 % reduzierte Mischrohrlänge des Statikmischers

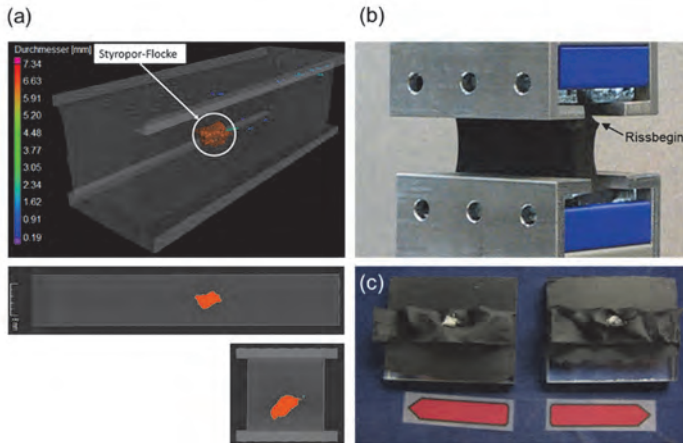
Die in Bild 8 dargestellten Butterflytests zeigen drei unterschiedliche Mischqualitäten. Lediglich bei einer Reduktion der Mischrohrlänge des Statikmischers um 50 % lassen sich Schlieren im Testverfahren gut erkennen. Für eine Reduktion um 20 % sind hingegen kaum Schlieren zu erkennen. Die zerstörenden Prüfungen konnten jedoch zeigen, dass der Einfluss durch eine derartige Reduktion nur äußerst gering ausfällt. Deutliche Abweichungen zeigen sich hingegen bei der Reduktion um 50 %, die jedoch im Zuge der fertigungsbegleitenden Prüfung deutlich auffällt. Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass inhomogene Durchmischungen bzw. eine Abweichung des Mischverhältnisses, die durch den Glasplatten- oder Butterflytest nicht zu erkennen sind, für alle drei untersuchten Klebstoffe keinen signifikanten Einfluss auf Steifigkeit und Festigkeit haben. Eine erhebliche Reduktion dieser beiden Werkstoffgrößen erfolgt erst bei sehr schlechter Durchmischung bzw. stark abweichendem Mischverhältnis. Diese starken Abweichungen sind durch die gängigen QS-Verfahren jedoch durch starke Schlierenbildung eindeutig identifizierbar. Auch anhand der Klebfuge lässt sich die entsprechend unzureichende Durchmischung sofort erkennen, welche außerdem einen erheblichen Einfluss auf das Bruchverhalten aufweist, Bild 9.



**Bild 9** Probenbild und Bruchbilder für a) optimale Proben, b) Probe mit um 50 % reduzierter Mischrohrlänge des Statikmischers

Durch die Auswertung von Versuchsvideos konnte der Versagensbeginn lokalisiert und mit den CT-Aufnahmen verglichen werden. Bei einer Vielzahl der Versuche haben die eingebrachten Inhomogenitäten keinen Einfluss auf den Versagensbeginn, auch wenn es sich um eine relativ große Inhomogenität handelt. Daher lässt sich in Bezug auf Fehlstellen innerhalb des Klebstoffgefüges zum jetzigen Zeitpunkt der Untersuchungen noch kein allgemein gültiges DVV ableiten. Zwar lassen sich Tendenzen erkennen sowie serienabhängige DVVs ermitteln, eine Abhängigkeit von der Lage ist jedoch – neben dem Volumen – noch zu überprüfen. Nach Versagensbeginn nimmt die Inhomogenität jedoch

Einfluss auf den Rissverlauf, da sie eine Querschnittsschwächung darstellt, Bild 10. Daher finden sich in den Bruchflächen i.d.R. die eingebrachten Inhomogenitäten oder vorab detektierte große Luftblasen.



**Bild 10** H-Probe mit eingetragener Styroporflocke unter Zugbelastung: a) CT-Aufnahme, b) Versagensbeginn während Versuch, c) Bruchbild mit Kennzeichnung des Rissverlaufs

Liegen Fehlstellen im Inneren der Klebfuge vor, haben diese nach bisherigem Erkenntnisstand keine signifikante Minderung der Festigkeit zur Folge. Liegen diese jedoch in Eckbereichen oder in unmittelbarer Nähe zu den Füge­teilen im Randbereich, ist von einer Reduktion der Festigkeit auszugehen. Dies ist allerdings noch in anstehenden Untersuchungen zu prüfen. Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand ist eine Reduktion der Materialfestigkeit zur Berücksichtigung fertigungsbedingter Inhomogenitäten nicht notwendig. Unter der Annahme, dass der derzeit verwendete Methodenfaktor fertigungsbedingte Inhomogenitäten berücksichtigt, wäre eine anteilige Reduktion des Faktors denkbar unter der Voraussetzung, dass die vorgesehenen QS-Maßnahmen korrekt umgesetzt werden und eine ordnungsgemäße, vollständige und blasenfreie Mischung bzw. Applikation sichergestellt ist. Da die Zusammensetzung des Methodenfaktors jedoch unklar ist, ist eine entsprechende Reduktion schwierig. Eine Differenzierung zwischen Werksfertigung und baustellenseitiger Fertigung ist noch gesondert zu untersuchen.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das derzeitige für die Bemessung von Silikon­klebungen im konstruktiven Glasbau ange­setzte Sicherheitsniveau ist hoch. Der globale Sicherheitsfaktor deckt pauschal eine Vielzahl von Einflussgrößen auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite ab, die Wichtigung verschiedener Einflussgrößen ist jedoch nicht bekannt. Die in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten befassen sich mit dem Einfluss fertigungsbedingter Inhomogenitäten auf das

Klebstoffverhalten und stellen einen ersten Ansatz zur Aufschlüsselung des Methodenfaktors nach ETAG 002 [2] dar. Es konnte gezeigt werden, dass die die Fertigung begleitenden Testverfahren im Hinblick auf die Mischqualität gut zur Qualitätssicherung geeignet sind. Inhomogenitäten, die durch die Verfahren (noch) nicht auffallen, haben keinen signifikanten Einfluss auf die zu erwartende Festigkeit. Moderate Fehlstellen oder Fremdkörper im Klebstoffgefüge haben nach jetzigem Erkenntnisstand ebenfalls nur einen sehr geringen Einfluss, sofern sie sich im Inneren der Fuge befinden. Sie sind auf Basis der durchgeführten Untersuchungen relevant für den Rissverlauf, nicht aber für die Rissinitiation. In weiterführenden Arbeiten wird der Einfluss der Lage von eingebrachten Inhomogenitäten in der Klebfuge, Änderungen des Werkstoffverhaltens aufgrund dynamischer Belastung sowie deren Überlagerung mit fertigungsbedingten Inhomogenitäten untersucht.

## 5 Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojektes *NewMechisko*, IGF-Nr. 20602 N [5], erarbeitet. Das Projekt wird über die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) auf der Grundlage eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Allen Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses sei an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung herzlich gedankt.

## 6 Literatur

- [1] Hilliard, J.; Parise, C.; Peterson, C. (1977) *Structural Sealant Glazing. Sealant Technology in Glazing Systems* in: Peterson, C. [ed.] ASTM International, 1977:67–99. <https://doi.org/10.1520/STP49667S>
- [2] ETAG 002 (2012) *Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Kits*, European Organisation for Technical Approvals.
- [3] Schaaf, B. (2022) *Zur Bemessung von Silikonklebungen im Bauwesen*. Dissertation, Schriftenreihe Stahlbau, Shaker, Aachen [Arbeitstitel, Veröffentlichung vrs. 2022].
- [4] DIN EN 1990 (2010) *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung (EN 1990:2010)*. Beuth, Berlin.
- [5] Dilger, K.; Feldmann, M. (2021) *Mechanisches Verhalten von Silikonklebstoffen in Abhängigkeit der Belastungsdauer (Kurzzeit-, Langzeit- und Schwingbelastung) – NewMechisko*. DVS-Nr. 08.3040, AiF-Projekt: IGF-Nr. 20602 N, [Abschluss vrs. 12/2021].

- [6] DIN 2304-1 (2022) *Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse – Teil 1: Prozesskette Kleben (DIN 2304-1:2020-04)*. Beuth, Berlin.
- [7] DIN EN ISO 572-2 (2012) *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 572-2:2012)*.
- [8] Dow Europe GmbH (2018) *Dow Performance Silicones – Structural Glazing Handbuch (Dowsil)*.
- [9] Hagl, A. (2012) *Mechanical Characteristics of Degraded Silicone Bonded Point Supports*. J. ASTM Intl., Vol. 9, No. 2. doi:10.1520/JAI104061
- [10] DIN EN ISO 5817 (2014) *Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (EN ISO 5817:2014)*. Beuth, Berlin.
- [11] DIN EN ISO 6520-1 (2007) *Schweißen und verwandte Prozesse - Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen – Teil 1: Schmelzschweißen (ISO 6520-1:2007)*. Beuth, Berlin.