

JOINING PLASTICS



www.joining-plastics.info

Autorenrichtlinie



Richtlinie für Autoren

Das Wichtigste auf einen Blick:

- Wir benötigen Ihr Manuskript als Word-Datei (inklusive Tabellen und Abbildungen am Ende des Dokuments). Diese Datei wird für die Veröffentlichung als Peer-reviewed-Paper zunächst zur Prüfung an die Gutachter gesendet.
- Der Umfang der Word-Datei (einsprachig) sollte maximal 20.000 Zeichen betragen (inklusive Leerzeichen; von der Überschrift über die Bildunterschriften bis zum Ende des Literaturverzeichnisses). Es sollten nicht mehr als insgesamt 6 bis 8 Bilder oder Tabellen dazu kommen.
- Senden Sie die Bilder bitte zusätzlich jeweils als separate Dateien (Auflösung mindestens 300 dpi, Dateiformate: eps, jpeg, png).
- Von allen Autoren benötigen wir einen 5- bis 10-zeiligen ausformulierten Kurz-Werdegang für unsere Webseite und ein digitales Porträtfoto.
- Senden Sie Ihr Manuskript an nicole.stramka@dvs-media.info, eine Veröffentlichung zu einem abgeschlossenen IGF-Vorhaben, das beantragt wurde über die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, zusätzlich an anna.linz@dvs-home.de.

1. Dateien

Bitte reichen Sie folgende Dateien ein:

- eine Word-Datei (inklusive Tabellen und Abbildungen am Ende des Dokuments) für die redaktionelle Bearbeitung und das Peer-Review-Verfahren
- Beitragsbilder (inklusive Fotos von Autoren) als separate Dateien (jpeg, png, eps) mit einer Auflösung von 300 dpi (weitere Hinweise im Abschnitt 4. Bilder und Tabellen)
- von jedem Autor einen 5- bis 10-zeiligen ausformulierten Kurzwerdegang in einer Word-Datei und ein Porträtfoto

2. Formale Textgestaltung

- Der Umfang der Word-Datei (einsprachig) sollte maximal 20.000 Zeichen betragen (inklusive Leerzeichen; von der Überschrift über die Bildunterschriften bis zum Ende des Literaturverzeichnisses).
- Maßeinheiten müssen zwingend SI-konform sein. Bitte verwenden Sie keine veralteten Maßeinheiten wie At.-%, Gew.-% usw.
- Vermeiden Sie im gesamten Manuskript bitte Abkürzungen (wie Durchm. anstatt Durchmesser), besonders bei der Bildbeschriftung.
- Beachten Sie bitte auch, dass unser Zeitschriften-Design keine Platzierung von Trademark- und Copyright-Symbolen sowie keine Schreibweise in Versalien von Firmen- und Produktnamen vorsieht.

3. Gliederung des Beitrags

Ihr Beitrag besteht aus Überschrift, Autorenkasten, Kurzfassung, Hauptteil, Fazit und Ausblick sowie Referenzen.

3.1 Überschrift

Der Beitragstitel sollte max. 100 Zeichen (inklusive Leerzeichen) nicht überschreiten und knapp, aber unmissverständlich formuliert sein.

3.2 Autoren des Beitrags

Unter der Überschrift werden alle Autoren des Beitrags mit Vor- und Nachnamen genannt.

3.3 Kurzfassung

Die Kurzfassung (englisch: Abstract) sollte den Inhalt des Beitrags wiedergeben.

- Sie wird auf unserer Webseite veröffentlicht.
- Sie sollte max. 1000 Zeichen (inklusive Leerzeichen) lang sein.

3.4 Hauptteil

- Der Hauptteil ist gegliedert nach der Dezimalklassifikation (bis max. dritte Ebene).
- Er beginnt mit „1. Einleitung“ und endet mit „Fazit und Ausblick“.

3.5 Referenzen

- Bitte verzichten Sie auf die automatische Referenzerstellung von Word.
- Verwenden Sie beim Zitieren bitte den numerischen Stil und vergeben Sie im Fließtext Nummern in der fortlaufenden Reihenfolge: [1], [2] usw.
- Geben Sie bitte die verwendete Literatur gesammelt am Ende des Manuskripts an:
[1] Devrient, M.; Da, X.; Frick, T.; Schmidt, M.: Experimental and simulative investigation of laser transmission welding under consideration of scattering. Physics Procedia 5 (2012) 39, pp. 117/27.
[2] Gehde, M.; Albrecht, M.: Neue Möglichkeiten zum Schweißen inkompatibler Thermoplaste. Joining Plastics – Fügen von Kunststoffen 10 (2016) Nr. 3–4, S. 202/7.
- Schreiben Sie ggf. den DOI als URL dazu, beispielsweise <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1678>.
- Bitte zitieren Sie (auch bei Online-Quellen) nach DIN ISO 690:2021-06.

Richtlinie für Autoren

4. Bilder und Tabellen

Wir bitten Sie, die folgenden Hinweise zu beachten:

- Bilder und Tabellen werden unterschieden und jeweils fortlaufend nummeriert (Bild 1, Tabelle 1 usw.) und mindestens einmal im Text zitiert.
- Zeichnungen, Diagramme und Fotos werden in der Bildunterschrift als Bild (nicht „Abb.“ oder „Fig.“) gekennzeichnet.
- Die Bildunterschrift darf nicht in der Grafik stehen. Sie sollte den Inhalt des Bildes so wiedergeben, dass dieses selbsterklärend ist.
- Bilder fortlaufend nummerieren, Bildnummern im Manuskripttext einfügen.
- Benennungen, Bezeichnungen usw. nach den neuesten DIN-Normen, DVS-Merkblättern usw.
- Die Schriftart in allen Bildern sollte gleich sein.
- Effekte wie Füllmuster, Outline Fonts, Verläufe und Schatten bitte vermeiden
- Bilder möglichst in Farbe; Mindestauflösung 300 dpi
- Dateiformate: eps, jpeg, png

5. Autorenkasten

Am Ende des Beitrags werden für alle Autoren des Beitrags jeweils folgende Daten angegeben:

- Vor- und Nachname (bitte ohne Abkürzungen),
- Titel oder akademischer Grad,
- aktuelle Berufs-/Tätigkeitsbezeichnung mit Angabe des Instituts/Arbeitgebers, inklusive Ort,
- (optional) die E-Mail-Adresse,
- ein digitales Porträtfoto und
- ein 5- bis 10-zeiliger ausformulierter Kurz-Werdegang in unserer Online-Datenbank (<https://www.joining-plastics.info/autoren>).

6. Kontaktadressen

- Senden Sie Ihr Manuskript bitte an nicole.stramka@dvs-media.info.
- Wenn es sich um eine Veröffentlichung zu einem abgeschlossenen IGF-Vorhaben handelt, das beantragt wurde über die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, senden Sie Ihr Manuskript bitte zusätzlich an anna.linz@dvs-home.de.

Hinweis zur geschlechtergerechten Sprache

Die in JOINING PLASTICS veröffentlichten wissenschaftlichen Fachbeiträge werden im Peer-Review-Verfahren vorrangig hinsichtlich ihrer inhaltlichen Qualität geprüft. Das in den Artikeln zumeist gewählte generische Maskulinum bezieht sich dabei zugleich auf alle Geschlechteridentitäten. Wir unterstützen ausdrücklich die Verwendung einer geschlechtergerechten Sprache, verzichten aber zu Gunsten der Lesbarkeit darauf.

Überschrift
max. 100
Zeichen inkl.
Leerzeichen

Kurzfassung
max. 1.000
Zeichen inkl.
Leerzeichen

Zwischen-
überschrift

Hauptteil

DOI

Fachbeiträge

Peer-reviewed Papers

Numerische Lebensdauerprognose von hyperelastischen Polyurethan-Kleberverbindungen für unterschiedliche Mittelspannungen mit einem bruchmechanischen Ansatz

Numerical Fatigue-Life Prediction of Hyperelastic Polyurethane Adhesive Joints for Different Mean Stress-ess Using a Fracture-Mechanics Approach

Maritz Buczak, Karina Tows, Tobias Duffe, Gunter Kullmer, Gerson Meschut

Kurzfassung

Aufgrund der Vorteile von Polyurethan-Klebstoffen werden diese zunehmend im Leichtbau eingesetzt, wo sie zyklischen Belastungen ausgesetzt sind. Trotz des steigenden Einsatzes von hyperelastischen Klebstoffen werden diese bislang vor allem unter einfachen zyklischen Bedingungen untersucht, obwohl sie in der Praxis komplexen Belastungen ausgesetzt sind, beispielsweise mit variablen Mittelspannungen. Aufgrund unzureichender Kenntnisse fehlt eine validierte Methode zur Lebensdauerprognose der klebverleimten Klebverbindungen. Im vorgestellten Forschungsprojekt werden daher kontinuums- und bruchmechanische Versuche zur Charakterisierung eines hyperelastischen Klebstoffs durchgeführt. Darauf aufbauend findet die Validierung des bruchmechanischen Berechnungskonzepts anhand von einachsigen Schweißversuchen mit variabler Mittelspannung statt, um die Lebensdauerprognose unter komplexeren Belastungsbedingungen zu ermöglichen.

Abstract

Owing to the advantages of polyurethane adhesives, they are increasingly used in lightweight structures, where they are subjected to cyclic loading. Despite the growing use of hyperelastic adhesives, to date they have mainly been investigated under simple cyclic conditions, even though in practice they are subjected to more complex loadings such as variable mean stresses. Because of insufficient knowledge, there is no validated method for fatigue-life-oriented design of adhesive joints under this type of loading. In the research project presented here, continuum-mechanics and fracture-mechanics tests are therefore carried out to characterise a hyperelastic adhesive. On this basis, the fracture-mechanics calculation method is validated using uniaxial cyclic tests with variable mean stresses in order to enable fatigue-life prediction under more complex loading scenarios.

1. Einleitung

Für die Umsetzung von innovativen und nachhaltigen Leichtbaukonzepten stellt das Klebtechnik-Feld ein wichtiges Bindeglied dar, weshalb die Klebtechnik in zahlreichen Branchen wie dem Bauwesen, der Luft- und Raumfahrt sowie dem Automobilbau eingesetzt wird [1–3]. Dies ist darauf begründet, dass das nach DIN 8593-8 [4] definierte Fügeverfahren hohe Lastübertragungskapazitäten aufweist und zugleich stoffschlüssige und medienfreie Verbindungen ermöglicht, was beispielsweise beim Bau von Batteriegehäusen erforderlich ist [5]. Ist zusätzlich erforderlich, Bauteile in verschiedenen Wärmeausdehnungen der Fügepartner auszugleichen, werden elastische Klebstoffsysteme auf Polyurethan- oder Silikonbasis, die zunehmend

1. Introduction

Adhesive bonding is an important enabler for implementing innovative and sustainable lightweight design concepts; consequently, adhesive technology is used in numerous sectors such as construction, aerospace and automotive engineering [1–3]. This is because the joining process defined in DIN 8593-8 [4] offers high load transfer capacities while at the same time enabling cohesive, media-tight joints, as required, for example, in the manufacture of battery housings [5]. If it is additionally necessary to compensate for component tolerances and different thermal expansions of the joining partners, elastic adhesive systems based on polyurethane or silicone are selected, these are increasingly used in glass and facade construction, shipbuilding and the automotive

<https://doi.org/10.5319/jp20260150>

50 JOINING PLASTICS 20 (2026) No. 1

Fachbeiträge

Peer-reviewed Papers

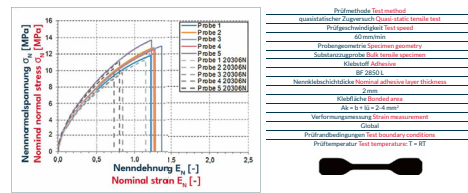


Bild 3: Gegenüberstellung der experimentellen Spannungs-Dehnungs-Daten der Substanzproben mit den Versuchsdaten aus [1] unter quasi-statischen Belastung.
Fig. 3: Comparison of the experimental stress-strain data of the bulk tensile specimen with the test data from [1] under quasi-static loading.

Im Glas- und Fassadenbau, der Schiffbau- und Automobilindustrie sowie im Stahl- und Anlagenbau ihre Anwendung finden, gewählt [6]. Durch ihre elastomeren, hyperelastischen Werkstoffeigenschaften bieten diese Klebstoffe auch bei hohen Verzerrungen die Möglichkeit, den Stoffschluss zwischen den Fügepartnern aufrecht zu erhalten.

Erste Ansätze zur Lebensdauerprognose von hyperelastischen Klebstoffen sind [7–9] zu finden. Dabei kommen sowohl kontinuumsmechanische als auch bruchmechanische Betrachtungsweisen bei der Prognose der einachsigen belasteten Ermüdungsversuche zum Einsatz. Im realen Bauteilbetrieb sind Klebverbindungen jedoch komplexeren Belastungssituationen, wie zum Beispiel variierenden Mittelspannungen, ausgesetzt, welche bei der Gestaltung von Klebschichten und Bauteilen im Allgemeinen berücksichtigt werden müssen [10]. Aus diesem Grund ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Lebensdauerprognose einer hyperelastischen Klebverbindung bei unterschiedlichen Mittelspannungen sowie die Weiterentwicklung des in [11] erarbeiteten und [12] weiter ausgearbeiteten bruchmechanischen Berechnungskonzepts. Dafür werden sowohl bruchmechanische als auch kontinuumsmechanische Untersuchungen vorgenommen, um das Ermüdungsverhalten des heterogenen Klebstoffs auf Polyurethanbasis zu charakterisieren.

2. Kontinuumsmechanische Klebstoffcharakterisierung

Der für diese Arbeit ausgewählte hyperelastische Klebstoff ist der Beforte 2850L der Firma DuPont Specialty Products GmbH & Co. KG. Im Rahmen des Forschungsprojekts [11] wurde für die Simulation ein Materialmodell anhand der Substanzzugversuche der Kopfgugprobe im Simulationsprogramm Abaqus des Unternehmens Dassault Systèmes parametrisiert. Die Modellierung des

industry, as well as in network and plant engineering [6]. Owing to their elastomeric, hyperelastic material properties, these adhesives have to maintain material continuity between the joining partners even at high strains.

Initial approaches to fatigue-life prediction for hyperelastic adhesives can be found in [7–9]. Both continuum-mechanics and fracture-mechanics viewpoints are used to predict uniaxially loaded fatigue tests. In real component service, however, adhesive joints are subjected to more complex loading situations, such as varying mean stresses, which in general must be taken into account when designing adhesive layers and components [10]. For this reason, the objective of the work presented is to predict the fatigue life of a hyperelastic adhesive joint for different mean stresses, and to further develop the fracture-mechanics calculation concept developed in [11] and further elaborated in [9]. To this end, both fracture-mechanics and continuum-mechanics investigations are carried out in order to characterise the fatigue behaviour of the polyurethane-based adhesive used.

2. Continuum-Mechanics Characterisation of the Adhesive

The hyperelastic adhesive selected for this work is Beforte 2850L from DuPont Specialty Products GmbH & Co. KG. Within the research project [11], a material model for this adhesive was parametrised in the Abaqus simulation program (Dassault Systèmes) on the basis of the bulk tensile specimen and the tensile butt joint specimens. The modelling of the adhesive behaviour followed [12] and [13], neglecting failure behaviour, using the Marlow material model [14]. As the parametrised material model is used for the calculation concept to be extended in the present research project, reproducibility tests are required to check possible batch effects on the bulk tensile specimens to investigate the

JOINING PLASTICS 20 (2026) No. 1 51

Bild
min. 300 dpi

Bildunterschrift

Zwischen-
überschrift

Fachbeiträge

Peer-reviewed Papers

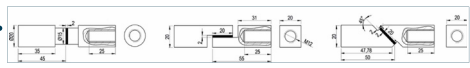


Fig. 4: Continuum-mechanics specimen with dimensions in mm (from left to right: tensile butt joint specimen, lap-shear specimen, diagonal tensile specimen).

Zugscherrprobe, Schrägzugsprobe mit den R-Verhältnissen $R = 0.1, 0.3, 0.5$ und -1 sowie einer konstanten Prüffrequenz von $f = 8$ Hz durchgeführt. Die Durchführung geschieht an einer elektrischen Zugprüfmaschine des Herstellers Instron mit einem 2 kN Kraftaufnehmer. Die Einspannung der Prüfkörper erfolgt bei $R \geq 0$ kardisch, bei $R < 0$ in einer festen Einspannung. Die Probengeometrien und Abmessungen der Klebschicht sind in Bild 4 dargestellt. Die angestrebte Klebschichtdicke beträgt $t = 2$ mm. Die Prüfung erfolgt bei Raumtemperatur, welche je nach Jahreszeit zwischen 20°C und 26°C variiert. Ein Einfluss durch die gemessene Temperaturschwankung kann anhand der Versuchsdaten nicht belegt werden. Die sinusförmige Belastung der Prüfkörper erfolgt kraftregelmäßig. Der angestrebte Zieffestigkeitsbereich beträgt 10.000 bis $2.000.000$ Lastwechsel. Versuchsergebnisse außerhalb dieses Bereichs fließen nicht in die statistische Versuchsdatabewertung ein, welche nach dem Perleschurverfahren in Anlehnung an DIN 50100 [18] erfolgt. Zur Reduzierung des Versuchsaufwands wird abweichend zur DIN 50100 der Lastwechselbereich $10.000 < N \leq 2.000.000$ (= Grenzwertspielzahl) untersucht und lediglich die Zeitfestigkeit betrachtet. Die Versuchsplanung kann Tabelle 1 entnommen werden. Darin sind zum einen die Anzahl der durchgeführten Versuche dargestellt sowie die Anzahl der Versuche, die für die Auswertung nach dem Perleschurverfahren herangezogen werden. Ebenso ist die resultierende Streuung T_s angegeben. Der Eintrag „14 / 5 / 4,32“ bedeutet somit, dass insgesamt 14 Versuchsergebnisse vorliegen, von 5 Versuchen für die statistische Auswertung herangezogen werden, welche in einer Streuung von $T_s = 4,32$ resultieren. Anhand von Tabelle 1 lässt sich erkennen, dass eine signifikante

$$\sigma_m = \frac{\sigma_n \cdot R}{1 + R} \quad (2)$$

The tests compared with the fatigue-life prediction of the fracture-mechanics calculation concept are carried out on three different specimen geometries (tensile butt joint specimen, lap-shear specimen, and diagonal tensile specimen) with R ratios of $R = 0.1, 0.3, 0.5$ and -1 , and a constant test frequency of $f = 8$ Hz. Testing is performed on an electric tension-compression testing machine (Instron) with a 2 kN load cell. The specimens are mounted with a cantilever joint for $R \geq 0$ and with a rigid clamping for $R < 0$. The specimen geometries and the dimensions of the adhesive layer are shown in Fig. 4. The pursued adhesive layer thickness is $t = 2$ mm. Testing is conducted at room temperature, which varies between 20°C and 26°C depending on the season. An influence of the measured temperature fluctuation cannot be demonstrated from the test data. The sinusoidal loading of the specimens is force-controlled. The pursued target life range is 10.000 to $2.000.000$ cycles. Test results outside this range are not included in the statistical evaluation of the test data, which is performed using the bead-string method in accordance with DIN 50100 [18]. To reduce the cost of testing, deviating from DIN 50100, the cycle range $10.000 < N \leq 2.000.000$ (= limiting number of cycles) is investigated and only life time is considered. The test plan is given in Table 1. It shows, first, the number of tests carried out and, second, the number of tests used for evaluation with the bead-string method. The resulting scatter range T_s is also given. The entry „14 / 5 / 4,32“ therefore means that 14 test results are available in total, of which 5 tests are used for the statistical evaluation, resulting in a scatter range of $T_s = 4,32$. From Table 1 it can be seen that there is a significant fluctuation range in the number of tests per-

Fachbeiträge

Peer-reviewed Papers

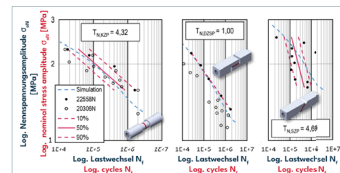


Bild 5: Versuchsergebnisse der Zugscherrprobe der Kopf-, Zug-scher- und Schrägzugsprobe bei einem konstanten R-Verhältnis von $R = 0,1$ mit visueller statistischer Auswertung und Lebensdauerprognose.
Fig. 5: Fatigue test results of the tensile butt joint, lap-shear and diagonal tensile specimens at a constant R ratio of $R = 0,1$, with visualised statistical evaluation and fatigue life prediction.

te Schwankungsbreite in der Anzahl der durchgeführten Versuche je nach Prüfkörper und R-Verhältnis existiert. Dies liegt in dem häufig adhäsiösen Klebschichtversagen begründet, welches bis auf wenige Ausnahmen zu einem verfrühten Versagen der Klebschicht führt. Aus diesem Grund fließen bei der Kopfzugprobe lediglich 35 von insgesamt 85 Versuchen in die statistische Auswertung ein. Insgesamt 46 der 50 nicht statistisch berücksichtigten Versuche befinden sich unterhalb des geplanten Zieffestigkeitsbereichs, die restlichen 4 Versuche erreichen eine Lastwechselzahl oberhalb des Zieffestigkeitsbereichs. Ebenso erwähnenswert ist die signifikante hohe Streuung der Kopfzugprobe bei $R = -1$ von $T_s = 58,93$. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Kopfzugprobe eine hohe Sensitivität in Bezug auf eine koaxiale Einspannung hat. Sobald die Prüfkörper in der festen Einspannung eine Abweichung ihrer Koaxialität aufweisen, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit zur Einbringung von unerwünschten und nicht berücksichtigten Belastungen der Klebschicht. Als gegensätzliches Beispiel ist dahingegen die Streuung der Zugscherrprobe bei einem R-Verhältnis von $R = 0,1$ anzumerken, welche sich auf einen Wert von $T_s = 1,004$ beläuft. Bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse muss ebenfalls berücksichtigt werden, dass Schwankungen in der Klebschichtdicke der Prüfkörper vorhanden sind. Bei den Kopfzugproben beträgt die mittlere Klebschichtdicke $t_{\text{mean}} = 2,183$ mm mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,187$ mm. Der Median beträgt $t_{\text{median}} = 2,2$ mm und die geringste sowie höchste Klebschichtdicke betragen $t_{\text{min}} = 1,67$ mm und $t_{\text{max}} = 2,7$ mm. Es ist also eine Tendenz hin zu höheren Klebschichtdicken erkennbar. Die Klebschichtdicke hat einen Einfluss auf die Lebensdauer der Klebverbindung und wird im Rahmen der numerischen Lebensdauerberechnung konstant mit $t = 2$ mm berücksichtigt, wodurch sich Abweichungen zu den tatsächlichen Versuchen ergeben können. Da bei dem Vorgängerprojekt IGF 20306N [11] überwiegend kohäsive Brüche auftraten, wird davon ausgegangen, dass die KTG geringst und keine zusätzliche Oberflächenbehandlung in Form von Prismen durchgeführt werden muss.

formed depending on specimen and R ratio. This is due to the frequent adhesive failure of the bondline, which, with few exceptions, leads to premature failure of the adhesive layer. For this reason, only 35 of a total of 85 tests for the tensile butt joint specimen are included in the statistical evaluation. Of the 50 tests not considered statistically, a total of 46 are below the planned target life range, and the remaining 4 tests reach a number of cycles above the target life range. Also noteworthy is the significantly high scatter range of the tensile butt joint specimen at $R = -1$, with $T_s = 58,93$. One possible explanation is that the tensile butt joint specimen is highly sensitive with regard to coaxial clamping. As soon as the two specimen halves exhibit a deviation from coaxiality in the rigid clamping, the probability increases that unwanted and unaccounted-for loading of the adhesive layer will be introduced. As an opposite example, the scatter range of the lap-shear specimen at an R ratio of $R = 0,1$ should be noted and amounts to a value of $T_s = 1,004$. When assessing the test results, it must also be considered that fluctuations in adhesive layer thickness are present in the specimens. For the tensile butt joint specimens, the mean adhesive layer thickness is $t_{\text{mean}} = 2,183$ mm with a standard deviation of $\sigma = 0,187$ mm. The median is $t_{\text{median}} = 2,2$ mm and the minimum and maximum adhesive layer thicknesses are $t_{\text{min}} = 1,67$ mm and $t_{\text{max}} = 2,7$ mm. There is therefore a tendency towards higher adhesive layer thicknesses. The adhesive layer thickness influences the fatigue life of the adhesive joint, is considered as constant at $t = 2$ mm within the numerical fatigue life calculation and may thus lead to deviations from the actual tests. Since predominantly cohesive fractures occurred in the predecessor project IGF 20306N [11], it is assumed that the CDC is sufficient and that no additional surface pre-treatment in the form of primers is required.

The visualisation of the evaluation using the bead-string method is shown in Fig. 5. As an example, the test results for the three specimen types are shown for an R ratio of $R = 0,1$. For the tensile butt joint specimen and the lap-shear specimen, the diagram is supplemented with data from IGF 20306N [11]. In addition, the scatter band generated with the bead-string method (10% and 90% prob-

54 JOINING PLASTICS 20 (2026) No. 1

JOINING PLASTICS 20 (2026) No. 1 55

Fachbeiträge	Peer-reviewed Papers
Die Visualisierung der Auswertung mittels des Perlenkurvenverfahrens ist in Bild 5 dargestellt. Exemplarisch sind hier die Versuchsergebnisse der drei Prüfverfahren typischer R-Verhältnisse mit $R = 0,1$ abgebildet. Bei der Kopfzugprobe und der Zugschersprobe ist das Diagramm um die Daten aus IGF 2030A [11] ergänzt. Zusätzlich ist das Streuband, welches mit dem Perlenkurvenverfahren erstellt wird (100% und 90% Eintrittswahrscheinlichkeit), sowie die mit dem bruchmechanischen Berechnungskonzept simulierte Wöhlerlinie abgebildet. Die Parameter für die bruchmechanische Lebensdauerprognose entsprechen denen aus [9]. Es wird ein nach [19] parametrisiertes Risikofrakturgesetz für ein R-Verhältnis von $R = 0,1$ verwendet, sowie das Marlow-Materialmodell aus [11]. In Bild 5 wird deutlich, dass die simulierte Wöhlerkurve in weiten Bereichen innerhalb des Streubands der dargestellten Versuche liegt. Ebenso ist ersichtlich, dass die Versuche aus [11] insbesondere bei den Versuchen mit der Kopfzugprobe eine sehr gute Reproduzierbarkeit aufweisen. Die Abweichung zwischen Simulation und Experiment bei der Schrägzugprobe ist insbesondere in den Neigungen der Linien zu erkennen. Der Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass sich bei einer Lastwechselzahl von $N = 1E+4$ eine vertikale Verteilung der experimentellen Daten ausbildet, die durch Versuche trotz höherer Belastung eine identische Bruchlastwechselzahl aufweisen. Dies deutet auf eine hohe Streuung hin und legt nahe, dass eine größere Versuchszahl zu einer flacheren Kurve führen würde, die eine bessere Übereinstimmung mit der Simulation aufweisen würde. Grundsätzlich ist nach DIN 50100 bei einer verwertbaren Versuchszahl von $n = 12$ von einer adäquaten statistischen Absicherung bei Einsatz des Perlenkurvenverfahrens auszugehen. Eine Erhöhung auf $n = 20$ Versuche kann bei hohen Streuungen und Anomalien (Versuche mit höherer Belastung weisen eine höhere Bruchlastwechselzahl als Versuche mit geringerer Belastung auf) sinnvoll sein, wie an den Ergebnissen der Schrägzugprobe zu erkennen ist. Eine umfassende Darstellung unter Einbeziehung aller Versuche ist in Bild 6 gegeben. Hier können die Abweichungen der Versuchsergebnisse von der Lebensdauerprognose anhand der Abweichung zur 45°-Linie eingeschätzt werden. Zusätzlich ist das durchschnittliche Streuband aller Versuche angegeben, welches durch eine Mittelwertbildung aller Streubänder gebildet wird. Da sich das mittlere Streuband der Zugschersprobe ($T_{0,45,avg,exp} = 4,90$) und das der Schrägzugprobe ($T_{0,45,avg,exp} = 4,82$) nur marginal unterscheiden, werden vereinfachend lediglich die Streubänder der Zugschersprobe und der Kopfzugprobe ($T_{0,45,avg,exp} = 19,42$) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass insgesamt eine große Streuung der Ergebnisse existiert. Einige Datenpunkte befinden sich im Randbereich des Streubands, während andere Versuche eine sehr gute Übereinstimmung mit der Prognose zeigen. Die überwiegende Mehrheit der Datenpunkte befindet sich im Streuband der Versuchsauswertung und zeigt somit, dass das bruchmechanische Berechnungskonzept in der Lage ist, die Lebensdauer für unterschiedliche Mittelspannungen zu prognostizieren. Es wird davon ausgegangen, dass die hohe Streuung ein	Resultat des bereits thematisierten Fertigungsverfahrens ist, welches zu variierenden Klebstichtstücken führt. Dem Hinzufügen ist, dass Versuche mit elastischen Klebverbindungen in der Regel eine höhere Streuung aufweisen als belastete Versuche mit metallischen Proben. Ursachen dafür können in Chargeneinflüssen, Auslagerungsbedingungen oder der Probenherstellung liegen. 4. Schlussbemerkung Im Zeitalter der automatisierten Leichtbauherstellung wird aufgrund ihrer vielseitigen Eigenschaften vermehrt auf hyperelastische Polyurethan-Klebstoffe zurückgegriffen. In der vorliegenden Veröffentlichung wird gezeigt, dass die Lebensdauerprognose von zyklisch belasteten, hyperelastischen Klebverbindungen bei unterschiedlichen Mittelspannungen mit dem bruchmechanischen Berechnungskonzept aus [11] und [9] möglich ist. Zukünftige Untersuchungen im Bereich der hyperelastischen Klebstoffe sollten sich auf die Optimierung der Versuchsdurchführung fokussieren, um die Reproduzierbarkeit der Resultate weiter zu verbessern und somit eine noch verlässlichere Datenbasis für die Validierung von Lebensdauerkonzepten bereitzustellen. Ebenso sollte die Untersuchung komplexer und überlagerter Belastungssituationen mit dem bruchmechanischen Berechnungskonzept oder vergleichbaren Berechnungsmethoden angestrebt werden. Diese Teilziele ermöglichen die Entwicklung verlässlicher und effizienter Auslegungsmethoden für elastische Klebverbindungen. Dadurch können zukünftig besonders verlässliche und materialsparende Klebverbindungen konstruiert und bereits im digitalen Entwicklungsprozess validiert werden. Danksagung Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Projekt wurde durchgeführt durch die Forschungsvereinigung Schweiß- und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachen Straße 172, 40223 Düsseldorf. Für die finanzielle Förderung und die organisatorische Betreuung der Forschungsvereinigung sei an dieser Stelle gedankt. Weiterer Dank gilt allen kooperierenden Industriepartnern für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Projekts. Der Fachbeitrag basiert auf dem IGF-Forschungsvorhaben GfF22558 N / DVS-Nr.: 08.3570.   Fazit und Ausblick of the diagonal tensile specimen ($T_{0,45,avg,exp} = 4,82$) differ only marginally, for simplicity only the scatter bands of the lap-shear specimen and the tensile butt joint specimen ($T_{0,45,avg,exp} = 19,42$) are shown. It is clear that overall there is a large scatter in the results. Some data points lie at the edge of the scatter band, while some tests show very good agreement with the prediction. The vast majority of the data points lie within the scatter band of the test evaluation and therefore show that the fracture-mechanics calculation concept is able to predict fatigue life for different mean stresses. It is assumed that the high scatter is a result of the manufacturing process already discussed, which leads to varying adhesive layer thicknesses. It should also be added that tests with elastic adhesive joints generally exhibit a higher scatter than, for example, tests with metallic specimens. Possible causes include batch effects, conditioning conditions or specimen manufacture. 4. Concluding Remarks In the age of automated lightweight manufacturing, hyperelastic polyurethane adhesives are increasingly used because of their versatile properties. This publication shows that fatigue-life prediction of cyclically loaded, hyperelastic adhesive joints for different mean stress is possible using the fracture-mechanics calculation concept from [11] and [9]. Future investigations in the field of hyperelastic adhesives should focus on optimising the test procedure in order to further improve the reproducibility of the measured data and thus provide an even more reliable data basis for validating fatigue-life concepts. Likewise, the investigation of complex and superimposed loading situations using the fracture-mechanics calculation concept or comparable calculation methods should be pursued. These sub goals enable the development of reliable and efficient design methods for elastic adhesive joints. As a result, particularly reliable and material-saving adhesive joints can be designed in future and validated already within the digital development process. Danksagung The project was promoted by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWE) on the basis of a resolution of the German Bundestag. The project was carried out by the research association "Forschungsvereinigung Schweiß- und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachen Straße 172, 40223 Düsseldorf." The authors would like to take this opportunity to thank the Research Association for its financial support and organisational assistance. They would also like to thank all the cooperating industry partners for their excellent collaboration on this project. This peer-reviewed paper is based on the IGF research project No. GfF22558 N / DVS-Nr.: 08.3570. 
56 JOINING PLASTICS 20 (2026) No. 1	JOINING PLASTICS 20 (2026) No. 1 57

Fachbeiträge	Peer-reviewed Papers
Literatur References [1] Sobek, W.: Ultra-lightweight construction. International Journal of Space Structures. 2016, Vol. 31, Issue 1, pp. 74-80. https://doi.org/10.1177/0044134315564246, 2016. [2] Wubuh, M. A.: Joining composites with adhesives - Theory and Applications. 2016, Deutscher Publications, Incorporated, Pennsylvania, USA. [3] Siebenpfeiffer, W.: Leichtbau-Technologien in der Automobil- und Luftfahrt. Springer Vieweg, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-658-04025-3 [4] DIN 8593-8:2003-09, Fertigungsverfahren Fügen, Teil 8: Kleben, Einordnung, Unterstellung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003. https://doi.org/10.31030/3560869 [5] Schmolke, T.; Meschut, G.; Meindert, D.; Rieker, F.; Grundmeier, G.: Untersuchung von Klebverbindungen für Batteriegehäuse. adhesion Kleben und Dichten, 2022, Nr. 6, S. 40-5. [6] Pröbster, M.: Elastisch Kleben - aus der Praxis für die Praxis. Springer Vieweg, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-658-2181-2 [7] Kallmer, M.: Entwicklung einer Methode zur Simulation der Lebensdauer von Klebverbindungen mit Polyurethan-Klebstoffen. Dissertation. In: Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik, Bd. 116, Shaker Verlag, 2016. ISBN: 978-3-8440-4210-8. [8] Cavar, S.: Spannungsabhängige Lebensdauerberechnung von zyklisch beanspruchten Klebverbindungen mit hyperelastischen Deformationsverhalten. Dissertation. In: Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik, Bd. 152, Shaker Verlag, 2021. ISBN: 978-3-8440-8084-1. [9] Duff, T.: Bruchmechanisches Berechnungskonzept zur belastungs-gerechten Auslegung von statisch und schwingend belasteten, elastischen Klebverbindungen. Dissertation. Universität Paderborn, 2022. https://doi.org/10.1177/014914012211775 [10] Richard, H. A.; Sander, M.: Fatigue Crack Growth Detect-Assess-Audit. Springer Verlag, 2016. ISBN: 978-3-319-32532-3. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32532-3 [11] Tees, K.; Aulert, T.; Meschut, G.; Duff, T.; Kallmer, G.: Methodene-entwicklung zur numerischen Lebensdauerprognose von hyperelasti- Autoren Authors  Moritz Buzack, M. Sc. Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Angewandte Mechanik (FAM) Research assistant, Applied Mechanics (FAM) Universität Paderborn buzack@fam.upb.de  Karina Tees, M. Sc. Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Festigkeits Simulation, Laboratorien für Werkstoff- und Füge-technik (SWF) Research assistant, Simulation Group, Laboratory for Materials and Joining Technology (SWF) Universität Paderborn tees@swf.upb.de  Dr.-Ing. Tobias Duff Ehemaliger Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Angewandte Mechanik (FAM) Former Research assistant, Applied Mechanics (FAM), Universität Paderborn duff@fam.upb.de  Prof. Dr.-Ing. Gert-Dirk Kallmer Leiter des Instituts für Angewandte Mechanik (FAM) Head of the Applied Mechanics Division (FAM) Universität Paderborn kallmer@fam.upb.de  Prof. Dr.-Ing. Gert-Dirk Meschut Leiter des Laboratoriums für Werkstoff- und Füge-technik (SWF) Head of the Laboratory for Materials and Joining Technology (SWF) Universität Paderborn meschut@fam.upb.de	Literaturkassen Autorenkassen mit allen Autoren des Beitrags und ihrem Porträt, Namen, Titel, Institut, ihrer Tätigkeit und E-Mail-Adresse
58 JOINING PLASTICS 20 (2026) No. 1	