

# JOINING PLASTICS



[www.joining-plastics.info](http://www.joining-plastics.info)

## Author Guidelines



# Author Guidelines

## The Most Important Information:

- We require your manuscript as a Word file (including tables and figures at the end of the document). This file will first be reviewed our permanent expert board for publication as a peer-reviewed paper.
- The length of the Word file (monolingual) should not exceed 20,000 characters (including spaces; from the title through the figure captions to the end of the references section). There should be no more than 6 to 8 figures or tables in total.
- Please also send the figures as separate files (resolution at least 300 dpi, file formats: eps, jpeg, png).
- We require a written short CV of 5 to 10 lines from each author for our website, as well as a digital portrait photo.
- Please send your manuscript to [nicole.stramka@dvs-media.info](mailto:nicole.stramka@dvs-media.info).

## 1. Files

Please submit the following files:

- a Word file (including tables and figures at the end of the document) for editorial processing and the peer review procedure
- all figures (including author photos) as separate files (jpeg, png, eps) with a resolution of 300 dpi (further information in section 4. Figures and Tables)
- a 5- to 10-line written short CV in a Word file from each author and a portrait photo

## 2. Formal Text Layout

- The length of the Word file (monolingual) should not exceed 20,000 characters (including spaces; from the title through the figure captions to the end of the references).
- Units of measurement must strictly comply with SI standards. Please do not use outdated units such as wt.-%, at.-% etc.
- Please avoid abbreviations throughout the manuscript (such as „diam.“ instead of „diameter“), especially in figure captions.
- Please also note that our journal design does not permit the use of trademark and copyright symbols or the use of capital letters for company and product names.

## 3. Structure of the Article

Your article consists of title, author box, abstract, main body, conclusion and outlook, and references.

### 3.1 Title

The title of the contribution should not exceed 100 characters (including spaces) and should be concise yet clear.

### 3.2 Authors of the Article

All authors of the article are listed under the title, with their first and last names.

### 3.3 Abstract

- The abstract should summarise the content of the article.
- It will also be published on our website.
- It should be no longer than 1,000 characters (including spaces).

### 3.4 Main body

- The main body is structured using decimal classification (up to a maximum of the third level).
- It begins with “1. Introduction” and ends with “Conclusion and Outlook”.

### 3.5 References

- Please do not use Word's automatic reference generation.
- Use the numerical citation style and assign numbers in sequential order in the running text: [1], [2], etc.
- List the references used at the end of the manuscript:  
[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] Bornemann, M.; Albrecht, M.; Schöppner, V.; Seefried, A.: Hot gas series welding of components made from different materials using the example of polyamide 6, 19 (2025) No. 2., pp. 96. <https://doi.org/10.53192/JP202500296>
- Please provide the DOI as a URL.

# Author Guidelines

## 4. Figures and Tables

Please observe the following instructions:

- Figures and tables must be distinguished and numbered consecutively (Fig. 1, Table 1, etc.) and cited at least once in the text.
- Drawings, diagrams and photos must be labelled “Fig.” in the caption.
- The captions should not be embedded in the image itself. They should describe the content of the figure so clearly that it is self-explanatory.
- Number figures consecutively; include figure numbers in the manuscript text.
- Names, terms, etc. should follow the latest ISO standards, DVS leaflets, etc.
- The font should be uniform across all figures.
- Avoid effects such as patterns, outline fonts, gradients, and shadows.
- Use colour images whenever possible; minimum resolution: 300 dpi.
- File formats: eps, jpeg, png.

## 5. Author Box

At the end of the article, the following details are provided for all authors:

- first and last name (no abbreviations, please),
- title or academic degree,
- current job/position including the name and location of the institute/employer,
- email address,
- a digital portrait photo, and
- a 5- to 10-line written short CV in our online database (<https://www.joining-plastics.info/en/authors>)

## 6. Contact Address

- Please send your manuscript to [nicole.stramka@dvs-media.info](mailto:nicole.stramka@dvs-media.info).

## Note on Gender-Inclusive Language

The scientific papers published in JOINING PLASTICS are primarily reviewed for their content quality through a peer review process. The generic masculine form used in the articles generally refers to all gender identities. We explicitly support the use of gender-inclusive language, but refrain from doing so in favour of readability.

## 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 Stresses Using a Fracture-Mechanics Approach

Maritz Buzcek, Karina Tows, Tobias Duffe, Gunter Küllmer, 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 komplexeren Belastungen ausgesetzt sind, beispielsweise mit variablen Mittelspannungen. Aufgrund unzureichender Kenntnisse fehlt eine validierte Methode zur Lebensdauerprognose. Ausgehend davon werden belastete Kleberverbindungen. Im vorgestellten Forschungsprojekt werden daher kontinuierliche und bruchmechanische Versuche zur Charakterisierung eines hyperelastischen Klebstoffs durchgeführt. Darauf aufbauend findet die Validierung des bruchmechanischen Belastungskonzepts anhand von einachsigen Schwingversuchen 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, continuous-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 Leichtbauansätzen stellt die klebtechnische Fertigung ein wichtiges Hilfsmittel 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]. Ines zusätzlich erforderlich, Bauteiloberflächen und verschiedene 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/10.53192/jpp20240150

50 JOINING PLASTICS 20 (2024) No. 1

Title  
max. 100 characters  
(including spaces)

Abstract  
max. 1,000 characters  
(including spaces)

Chapter heading

Main body

DOI

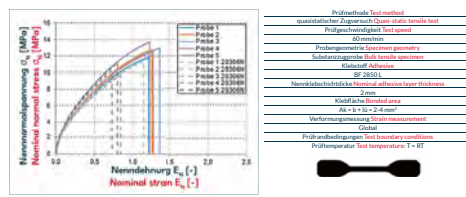


Bild 3. Gegenüberstellung der experimentellen Spannung-Dehnung-Daten der Substratversuche mit den Versuchsdaten aus [1] unter quasi-statischer Belastung.  
Fig. 3. Comparison of the experimental stress-strain data of the bulk tensile specimens with the test data from [1] under quasi-static loading.

in Glas- und Fassadenbau, der Schiffahrt 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, dem 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 Ermüdungsverhalten zum Einsatz. Im realen Bauteilbetrieb sind Kleberverbindungen 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 vorgestellten Arbeit, die Lebensdauerprognose einer hyperelastischen Kleberverbindung bei unterschiedlichen Mittelspannungen sowie die Weiterentwicklung des in [11] erarbeiteten und [12] bestätigten bruchmechanischen Berechnungskonzepts. Dafür werden sowohl bruchmechanische als auch kontinuumsmechanische Untersuchungen vorgenommen, um das Ermüdungsverhalten des herangezogenen Klebstoffs auf Polymerbasis zu charakterisieren.

#### 2. Kontinuumsmechanische Klebstoffcharakterisierung

Der für diese Arbeiten ausgewählte hyperelastische Klebstoff ist der Beforte 2850L der Firma DuPont Specialty Products GmbH & Co. KG. Im Rahmen des Forschungsprojekts [11] wurde für diese Klebstoffe ein Materialmodell anhand der Substanzdaten sowie der Kopfzugversuche (Simulationsprogramm Abaqus des Unternehmens Dassault Systèmes parametrisiert. Die Modellierung des

#### 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 parameterised 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 parameterised 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 (2024) No. 1 51

Figure  
min. 300 dpi

Caption

Chapter heading

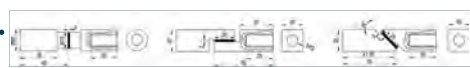


Bild 4. Kontinuumsmechanische Prüfkörper mit Abmessungen in mm (von links nach rechts: Kopfzugprobe, Zugshearprobe, Schrägzugprobe).  
Fig. 4. Continuum-mechanics specimens with dimensions in mm (from left to right: tensile butt joint specimen, lap-shear specimen, diagonal tensile specimen)

Zugsheerprobe, Schrägzugprobe 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  $R = 0$  kardansich, bei  $R < 0$  in einer festen Einspannung. Die Probengeometrien und Abmessungen der Klebschicht sind in Bild 4 dargestellt. Die angestrichelte Klebschichtdicke beträgt  $t = 2$  mm. Die Prüfung erfolgt bei Raumtemperatur, welche je nach Jahreszeit zwischen  $20^\circ\text{C}$  und  $26^\circ\text{C}$  variiert. Ein Einfluss durch die gemessene Temperaturschwankung kann anhand der Versuchsdaten nicht belegt werden. Die sinusförmige Belastung der Prüfkörper erfolgt kraftregelnd. Der angestrichelte Zielfestigkeitsbereich beträgt  $10.000$  bis  $2000.000$  Lastwechsel. Versuchsgeometrien, außerhalb dieses Bereichs fließen nicht in die statistische Versuchsauswertung ein, welche nach dem Perlerschurverfahren in Anlehnung an DIN 50100 [18] erfolgt. Zur Reduzierung des Versuchsaufwands wird abweichend zur DIN 50100 der Lastwechselbereich  $10.000$  bis  $2.000.000$  (= Grenzschwingungszahl) 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 Perlerschurverfahren herangezogen werden. Ebenso ist die resultierende Streubreite  $T_s$  angegeben. Der Eintrag „14 / 5 / 4,32“ bedeutet somit, dass insgesamt 14 Versuche geplant sind, von denen 5 Versuche für die statistische Auswertung herangezogen werden, welche in einer Streubreite von  $T_s = 4,32$  resultieren. Anhand von Tabelle 1 lässt sich erkennen, dass eine signifikant

$$\sigma_{\text{m}} = \frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}}{2} \quad (2)$$

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  $0.1, 0.3, 0.5$  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  $R = 0$  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  $20^\circ\text{C}$  and  $26^\circ\text{C}$  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 scope of testing, deviating from DIN 50100, the cycle range  $10.000$  to  $2.000.000$  (= limiting number of cycles) is investigated and only time to failure 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-

Tabelle 1. Gesamtanzahl der Versuche pro Versuchsreihe, davon für das Perlerschurverfahren genutzte Versuchsanzahl, daraus berechnete Streubreite  $T_s$ .  
Table 1. Total number of tests per test series, of which number of tests used for the bead-string method, and resulting scatter range  $T_s$ .

Prüfversuche Specimen form	Versuchsanzahl / Number of tests / Streubreite $T_s$ / Scatter range $T_s$		Perlerschurverfahren / Bead-string method / Streubreite $T_s$ / Scatter range $T_s$	
	R = 0,1	R = 0,3	R = 0,1	R = -1
Kopfzugprobe Tensile butt joint specimen	14 / 5 / 4,32	37 / 11 / 3,39	20 / 9 / 4,34	14 / 5 / 5,89
Zugsheerprobe Lap-shear specimen	5 / 1 / 1,00	14 / 11 / 1,42	17 / 12 / 3,72	14 / 11 / 5,36
Schrägzugprobe Diagonal tensile specimen	15 / 10 / 4,69	13 / 9 / 7,60	14 / 11 / 4,76	5 / 9 / 2,24

54 JOINING PLASTICS 20 (2024) No. 1

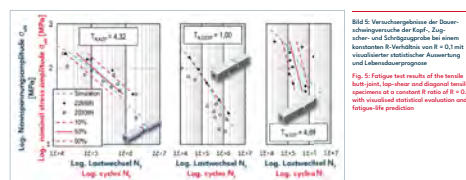


Bild 5. Versuchsergebnisse der Dauerzugsversuche der Kopf-, Zugsheer- und Schrägzugprobe bei einem konstanten R-Verhältnis von  $R = 0,1$  mit visueller statistischer Auswertung und Lebensdauerprognose.  
Fig. 5. Fatigue test results of the tensile butt joint, lap-shear and diagonal tensile specimens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

der Schwankungsbreite in der Anzahl der durchgeführten Versuche je nach Prüfkörper und R-Verhältnis existiert. Dies liegt in dem häufig adhäsiiven Klebschichtversagen begründet, welches bis auf wenige Ausnahmen zu einem vorzeitigen Versagen der Klebschicht führt. Aus diesem Grund fließen bei der Kopfzugprobe lediglich 5 von insgesamt 85 Versuchen in die statistische Auswertung ein. Insgesamt 46 der 50 nicht statistisch berücksichtigten Versuche befinden sich unterhalb des geplanten Zielfestigkeitsbereichs, die restlichen 4 Versuche erreichen eine Lastwechselzahl oberhalb des Zielfestigkeitsbereichs. Ebenso erwähnenswert ist die signifikant hohe Streubreite 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 Streubreite der Zugsheerprobe 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 der Kopfzugprobe 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 Kleberverbindung 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 2030/06 R [1] überwiegend kohäsive Brüche auftraten, wird davon ausgegangen, dass die KTG genügt 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 5 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 specimens 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 2030/06 R [1], it is assumed that the CDC is sufficient and that an additional surface pre-treatment in the form of prisms 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 specimens and the lap-shear specimens, the diagrams supplemented with data from IGF 2030/06 R [1]. In addition, the scatter band generated with the bead-string method (10% and 90% prob-

JOINING PLASTICS 20 (2024) No. 1 55

Figure  
min. 300 dpi

Caption

Table heading

Table

Die Visualisierung der Auswertung mittels des Perlerschurverfahrens ist in Bild 5 dargestellt. Exemplarisch sind hier die Versuchsergebnisse der drei Prüfproben für ein R-Verhältnis von R = 0,1 abgebildet. Bei der Kopfgabe [11] ergänzt. Zusätzlich ist das Streuband, welches mit dem Perlerschurverfahren erstellt wird (10% 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 Risikofortschrittsmaß 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 Kopfgabe eine sehr gute Reproduzierbarkeit aufweisen. Die Abweichung zwischen Simulation und Experiment bei der Schrägprobe ist insbesondere in den Neigungen der Linien zu erkennen. Der Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass sich bei einer Lastwechselzahl von  $N = 1e+5$  eine vertikale Verteilung der experimentellen Daten ausbildet. Dies zeigt, dass 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 Abschätzung bei Einsatz des Perlerschurverfahrens 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, um die Ergebnisse der Schrägprobe zu erkennen ist.

Eine umfassendere 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 die Mittelwertbildung aller Streubänder gebildet wird. Da sich das mittlere Streuband der Zugprobe ( $T_{0,50,mean} = 4,82$ ) nur marginal unterscheiden, werden vereinfachend lediglich die Streubänder der Zugprobe und der Kopfgabe ( $T_{0,50,mean} = 19,62$ ) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass insgesamt eine große Streuung der Ergebnisse existiert. Einige Datenpunkte befinden sich im Randbereich des Streubands, während einige 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

ability of occurrence) and the S-N curve simulated with the fracture-mechanics calculation concept are shown. The parameters for the fracture-mechanics fatigue life prediction correspond to those in [9]. A crack-growth law parameterised according to [19] for an R-ratio of R = 0.1 is used, as well as the Marlow material model from [11]. Fig. 5 shows that the simulated S-N curve lies, over wide ranges, within the scatter band of the tests shown. It is also evident that the tests from [11], particularly those with the tensile butt-joint specimen, exhibit very good reproducibility. The deviation between simulation and experiment for the diagonal tensile specimen is apparent particularly in the slopes of the lines. The difference can be explained by the fact that a vertical distribution of the experimental data develops at a number of cycles of  $N = 1E+5$ . This shows that tests can exhibit an identical number of cycles to fracture despite higher loading. This indicates a high scatter and suggests that a larger number of tests would lead to a flatter curve with better agreement with the simulation. In principle, according to DIN 50100, a usable number of tests of  $n = 12$  is considered to provide adequate statistical confidence when using the best-stringing method. An increase to  $n = 20$  tests can be useful in cases of high scatters and anomalies (tests at higher loading exhibiting a higher number of cycles to fracture than tests at lower loading), as can be seen in the results for the diagonal tensile specimen.

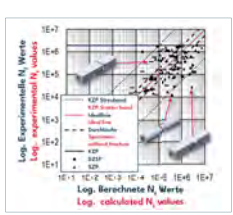


Bild 6: Vergleich der berechneten und der experimentell ermittelten Bruchlastwechselzahl  $N_f$  der durchgeführten Versuche unter Berücksichtigung der mittleren Streuung der Experimente.

Resultat des bereits thematisierten Fertigungsverfahrens ist, welches zu variierenden Klebstoffdicken führt. Dem Hinzufügen ist, dass Versuche mit elastischen Klebverbindungen in der Regel eine höhere Streuung aufweisen als beispielsweise Versuche mit metallischen Proben. Ursachen dafür können in Chargeeffekten, Auslagerungsbedingungen oder der Probenfertigung 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 Messdaten 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.

**Dankagung**  
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 OIF22558 N / DVS-Nr.: 08.3570.



of the diagonal tensile specimen ( $T_{0,50,mean} = 4,82$ ) differ only marginally, for simplicity only the scatter bands of the lap-shear specimen and the tensile butt-joint specimen ( $T_{0,50,mean} = 19,62$ ) 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 stresses is possible using the fracture-mechanics calculation concept from [11] and [9]. Future investigations in the field of hyperelastic adhesives should focus on optimizing 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.

**Acknowledgement**  
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 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. OIF22558 N / DVS No.: 08.3570.



Conclusion and Outlook

Acknowledgement (optional)

Literatur References

[1] Sobek, W.: Ultra-lightweight construction. International Journal of Space Structures, 2016, Vol. 21, Issue 1, pp. 74-80. <https://doi.org/10.1177/0013131115615246>, 2016.

[2] Wabub, M. A.: Joining composites with adhesives - Theory and Applications, 2016. DeTech Publications, Incorporated, Pennsylvania, USA.

[3] Siebenpfeffer, W.: Leichtbau-Technologien im Automobilbau. Wiesbaden: 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, Unterlegung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003. <https://doi.org/10.31030/356086>

[5] Schmolke, T., Mescht, G., Meindler, 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: Wiesbaden, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-2181-2>

[7] Kallier, 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. 110. Shaker Verlag, 2015. ISBN: 978-3-8440-3421-8.

[8] Cwadar, S.: Spannungsbauteile 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: 978-3-8440-8088-1.

[9] Duff, T.: Bruchmechanisches Berechnungskonzept zur belastungs-gerechten Auslegung von statisch und schwingend belasteten, elastischen Klebverbindungen. Dissertation. Universität Paderborn, 2023. <https://doi.org/10.1177/013131112311775>

[10] Richard, H. A., Sander, M.: Fatigue Crack Growth, Detect-Assess-Avoid. Springer Verlag, 2016. ISBN: 978-3-319-32532-3. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32532-3>

[11] Teus, K., Aebel, T., Mescht, G., Duff, T., Kullmer, G.: Methodentwicklung zur numerischen Lebensdauerprognose von hyperelasti-

schen Klebverbindungen infolge zyklischer Beanspruchung mittels bruchmechanischer Ansätze. Projektabschlussbericht IGF-Nr. 2030 N / DVS-Forschungsvereinigung Bd. 509. DVS/Media, 2021. ISBN: 978-3-96870-509-5.

[12] Sikora, S. P.: Materialcharakterisierung und -modellierung zur Simulation von Klebverbindungen mit Polyurethan-Klebstoffen. Dissertation. In: Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik, Bd. 110. Shaker Verlag, 2015. ISBN: 978-3-8440-3421-8.

[13] La Spina, V.: Environmental and chemical degradation of carbon/epoxy and structural adhesive for aerospace applications: Fickian and anomalous diffusion, Arrhenius kinetics. Composite Structures, 2013, Vol. 93, No. 9, pp. 2180-95.

[14] R. S. Marlow, J. Busfield, and A. Mahr: A General First-Invariant Hyperelastic Constitutive Model. Constitutive Models for Rubber III, 2003, pp. 157-60.

[15] DIN EN ISO 527-2:2004-09 - Entwurf: Kunststoffe - Bestimmung der Zugigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2024. <https://doi.org/10.31030/356086>

[16] DIN 53504:2017-02: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017. <https://doi.org/10.31030/2607941>

[17] DIN EN 12670:2009-08: Klebstoffe - Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009. <https://doi.org/10.31030/1524436>

[18] DIN 50100:2022: 22-Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016. <https://doi.org/10.31030/3337109>

[19] Kullmer, G., Weir, D., Schramm, B.: An alternative and robust formulation of the fatigue crack growth rate curve for long cracks. Engineering Fracture Mechanics, 2024, Vol. 276. (Open Access) <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109958>.

References

Authors Box with all authors and their portrait photo, name, title or academic degree, Institute, current job position and email address

Autoren Authors

**Maritt Busch, M. Sc.**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Angewandte Mechanik (AM) Research assistant, Applied Mechanics (AM) Universität Paderborn busch@fhn.upb.de

**Karina Teus, M. Sc.**  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Fatigue Simulation, Laboratorien für Werkstoff- und Füge-technik (LWF) Research assistant, Simulation Group, Laboratory for Materials and Joining Technology (SJT) Universität Paderborn karina.teus@upb.de

**Dr.-Ing. Tobias Duff**  
Benannter Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Angewandte Mechanik (AM) Former Research assistant, Applied Mechanics (AM) Universität Paderborn tduff@fhn.upb.de

**Prof. Dr.-Ing. Gunter Kullmer**  
Leiter des Instituts für Angewandte Mechanik (AM) Head of the Applied Mechanics Institute (AMI) Universität Paderborn kullmer@fhn.upb.de

**Prof. Dr.-Ing. Gernot Mescht**  
Leiter des Laboratoriums für Werkstoff- und Füge-technik (LWF) Head of the Laboratory for Materials and Joining Technology (SJT) Universität Paderborn mescht@fhn.upb.de