

Zur statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen
im Stahlbau

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR-INGENIEURS
von der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Matthias Friedrich Albiez

aus Freiburg im Breisgau

Tag der mündlichen

Prüfung: 31.05.2016

Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Bernd Mayer

Karlsruhe (2016)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Personen beigetragen, denen ich meinen Dank aussprechen möchte.

Zuerst möchte ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer, ganz herzlich für die Betreuung der Arbeit, das Vertrauen und die stetige Unterstützung und Förderung sowie das motivierende Arbeitsumfeld danken. Von ihm stammt auch die Idee zum Thema meiner Dissertation.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Bernd Mayer (Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung, Bremen) danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferates sowie die anregenden Diskussionen und das Interesse an meiner Arbeit. Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß für die Übernahme des Vorsitzes sowie bei Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski und Prof. Dr.-Ing. Peter Knödel für die Mitwirkung bei meiner Doktorprüfung bedanken.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Till Vallée und Herrn Dr. Holger Fricke vom Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung in Bremen. In vielen konstruktiven Diskussionen durfte ich an ihrem Fachwissen im Bereich der Klebtechnik teilhaben und habe wertvolle Anregungen für meine Arbeit erhalten. Vielen Dank für die motivierende und freundschaftliche Zusammenarbeit.

Des Weiteren danke ich Herrn Dr. Wolfgang Wittwer (Kömmerling Chemische Fabrik GmbH) sowie Herrn Dipl.-Ing. Rudolf Neumayer (Henkel AG & Co. KGaA) für ihre Unterstützung und Beratung aus Sicht der Praxis und der Klebstoffindustrie.

Allen Kollegen und Hiwis der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine danke ich für die schöne gemeinsame Zeit sowie die konstruktive Arbeitsatmosphäre. Besonders danke ich Herrn Dr.-Ing. Andreas Lipp für seine stetige Bereitschaft zur fachlichen Diskussion und die kritische Durchsicht der Arbeit, Herrn Gerhard Rabeneck und Herrn Werner Lennart für die wertvolle Hilfe bei der Herstellung und Prüfung der Proben sowie den Hiwis Normann Schulze, Timo Ströhle und Jan Heintz für ihre vielfältige Unterstützung.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Zunächst danke ich meinen Eltern Maria und Friedrich für ihre stetige Unterstützung und ihren Rückhalt sowie dafür, dass sie mir diesen Ausbildungsweg ermöglicht haben. Besonders danke ich meiner Frau Sabina und unserem Sohn Paul für die liebevolle Unterstützung und Motivation sowie für ihre Geduld.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt experimentelle und numerische Untersuchungen zur statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen und Anforderungen des Bauwesens. Die geklebte Verbindung zwischen den Kreishohlprofilen wird als Überlappungsstoß ausgeführt. Aufgrund der normativ zulässigen Maßabweichungen von Kreishohlprofilen sind Dickschichtklebungen in der Größenordnung von mehreren Millimetern erforderlich.

Kern dieser Arbeit ist die Entwicklung und Validierung einer Methodik zur Prognose der statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen. Auf Basis der ermittelten Anforderungen an geklebte Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau werden zunächst geeignete Klebstoffe ausgewählt und deren mechanische Eigenschaften und Kennwerte anhand von experimentellen Untersuchungen an Substanz- und Verbundproben charakterisiert.

Grundlage für die Entwicklung eines spannungsbasierenden Versagenskriteriums geklebter Stahlverbindungen sind experimentelle und numerische Untersuchungen an klebtechnisch gefügten, kleinformatischen Stahlfügeteilen mit Schäftungswinkeln von 0° bis 90° . Die Ergebnisse dieser Untersuchungen ermöglichen die Beschreibung der Festigkeit der geklebten Verbindung unter Berücksichtigung der Interaktion von Schub- und Normalspannungen orthogonal zur Klebfuge.

In umfangreichen experimentellen Untersuchungen wird die statische Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen bei Variation der geometrischen Parameter Überlappungslänge, Klebschichtdicke, Kreishohlprofilgeometrie sowie bei definiert eingebrachten Imperfektionen (Ausmitte der Profilschwerelinien und Schiefstellung) bestimmt. Diese Ergebnisse zeigen das Potential des Fügeverfahrens Kleben für Anwendungen im Stahlbau auf. Nichtlineare numerische Berechnungen dienen der Analyse des Spannungszustandes in der Klebfuge beim Bruch der Verbindung.

Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Klebstoffe sowie die Beschreibung der Festigkeit der geklebten Stahlverbindung durch spannungsbasierende Versagenskriterien stellen die Grundlage für die Prognose der Tragfähigkeit der in dieser Arbeit untersuchten, komplexen Kreishohlprofilverbindungen dar. Hierzu werden zwei unterschiedliche Konzepte vorgestellt und diskutiert. Zum einen stellt das Konzept lokaler Spannungen einen deterministischen Bemessungsansatz dar. Des Weiteren wird die Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen mit einem probabilistischen Bemessungsmodell auf Basis der Weibull-Theorie bestimmt. Beide Konzepte zur Prognose der Tragfähigkeit basieren auf nichtlinearen numerischen Berechnungen. Die entwickelte Me-

thodik wird durch die Gegenüberstellung von berechneten und im Rahmen dieser Arbeit experimentell bestimmten Tragfähigkeiten der geklebten Kreishohlprofilanschlüsse validiert. Dabei zeigt sich, dass sowohl mit dem Konzept lokaler Spannungen als auch mit dem probabilistischen Bemessungsansatz für alle in dieser Arbeit untersuchten geometrischen Parameter die Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen zutreffend prognostiziert wird.

Abstract

Experimental and numerical investigations on the bearing capacity of adhesively bonded circular hollow section joints specifically considering the boundary conditions and requirements prevalent in civil engineering are described within the scope of this thesis. The bonded joint of the coaxial hollow sections is realized as an overlap joint. Due to normative allowable dimensional deviations of hollow sections, thick-film adhesive bonding in the scale of several millimeters is required.

The main part of this thesis is the development and validation of a methodology to predict the static load bearing capacity of adhesively bonded circular hollow sections. Based on the requirements of bonded hollow sections in steel construction adequate adhesives are selected; subsequently material properties are characterized in experimental investigations on the bulk and on bonded samples.

Experimental investigations on adhesively bonded steel specimens with scarf angles (ranging from 0° to 90°), complemented by numerical modelling, are the basis for the determination of a stress-based failure criterion. Considering the interaction between shear and normal stresses orthogonal to the adhesive joint, this criterion enables the determination of the strength of adhesively bonded joints.

An extensive test program allowed experimentally determining the influence of a variety of parameters on the static load bearing capacity of bonded hollow sections; the geometrical parameters overlap length, adhesive layer thickness, dimensions of hollow sections as well as defined manufactured imperfections (eccentricity of centerlines and canting) are varied. Besides showing the potential of adhesive bonding for applications in steel construction, the data allows to validate the method for design.

The characterization of the mechanical properties of the adhesives and the description of the strength of the adhesively bonded steel joints using stress-based failure criteria are the basis for the prediction of the load bearing capacity of the investigated complex hollow section joints. Two different concepts are presented and discussed for this purpose. Firstly, the concept of local stresses is a deterministic approach for dimensioning. Secondly, the load bearing capacity of adhesively bonded hollow section joints is determined using a probabilistic dimensioning method based on the Weibull theory. Both concepts are based on non-linear numerical calculations. The developed methodology is validated by the comparison of predicted and, within the scope of this thesis, experimentally gathered load bearing capacities. It is shown that using both developed concepts, i.e. local stresses and probabilistic dimensioning method, load bearing capacity is accurately predicted for all geometrical parameters investigated.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 1.1 | Ausgangssituation und Zielsetzung..... | 1 |
| 1.2 | Konstruktionskonzept für geklebte Kreishohlprofilverbindungen | 3 |
| 1.3 | Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit | 5 |
| 2 | Kenntnisstand | 7 |
| 2.1 | Hohlprofile | 7 |
| 2.2 | Fügen von Kreishohlprofilen..... | 10 |
| 2.2.1 | Allgemeines..... | 10 |
| 2.2.2 | Geschweißte Kreishohlprofilverbindungen | 10 |
| 2.2.3 | Geschraubte Kreishohlprofilverbindungen..... | 11 |
| 2.2.4 | Kleben zylindrischer Bauteile | 12 |
| 2.3 | Das Fügeverfahren Kleben..... | 17 |
| 2.3.1 | Bindungskräfte in einer Klebung | 17 |
| 2.3.2 | Einteilung der Klebstoffe..... | 19 |
| 2.3.3 | Epoxidharze und Polyurethane..... | 21 |
| 2.3.4 | Versagensarten geklebter Verbindungen..... | 25 |
| 2.4 | Versagenkriterien für geklebte Verbindungen..... | 27 |
| 2.5 | Spannungsverteilung in Klebverbindungen | 30 |
| 2.5.1 | Ebene Überlappungsklebung..... | 30 |
| 2.5.2 | Rohrförmige Überlappungsklebung | 32 |
| 2.6 | Kleben im Bauwesen..... | 34 |
| 3 | Randbedingungen und Anforderungen | 39 |
| 3.1 | Allgemeines..... | 39 |
| 3.2 | Geometrische Toleranzen der Fügeteile..... | 39 |
| 3.3 | Anforderungen an die geklebte Verbindung | 43 |
| 4 | Auswahl und Charakterisierung der Klebstoffe..... | 45 |
| 4.1 | Auswahl der Klebstoffe | 45 |
| 4.2 | Experimentelle Untersuchung von Substanzproben..... | 47 |
| 4.2.1 | Spannungs-Dehnungs-Verhalten..... | 47 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2.2 | Glasübergangstemperatur..... | 49 |
| 4.3 | Experimentelle Untersuchung von Dauerstandsproben..... | 54 |
| 4.4 | Zusammenfassung..... | 57 |
| 5 | Entwicklung eines Versagenskriteriums..... | 59 |
| 5.1 | Zielsetzung und prinzipielle Vorgehensweise..... | 59 |
| 5.2 | Probengeometrie und Füge­teilwerkstoff..... | 60 |
| 5.3 | Fertigung und experimentelle Untersuchungen..... | 63 |
| 5.3.1 | Probekörperbezeichnung und Versuchsprogramm..... | 63 |
| 5.3.2 | Klebtechnische Fertigung der geschäftet geklebten Stahlproben..... | 64 |
| 5.3.3 | Experimentelle Prüfung der geschäftet geklebten Stahlproben..... | 65 |
| 5.4 | Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen..... | 67 |
| 5.4.1 | Einfluss der Prüfgeschwindigkeit..... | 67 |
| 5.4.2 | Experimentelle Ergebnisse Klebstoff PUR..... | 68 |
| 5.4.3 | Experimentelle Ergebnisse Klebstoff EP..... | 75 |
| 5.5 | Numerische Untersuchungen..... | 83 |
| 5.5.1 | Ansatz und Zielsetzung..... | 83 |
| 5.5.2 | Numerisches Modell..... | 83 |
| 5.5.3 | Werkstoffgesetze..... | 85 |
| 5.5.4 | Ergebnisse der numerischen Untersuchungen..... | 88 |
| 5.6 | Versagenskriterium..... | 97 |
| 6 | Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen..... | 103 |
| 6.1 | Ansatz und Zielsetzung..... | 103 |
| 6.2 | Probengeometrie und Füge­teilwerkstoffe..... | 104 |
| 6.2.1 | Geometrie der geklebten Kreishohlprofilproben..... | 104 |
| 6.2.2 | Füge­teilwerkstoffe..... | 108 |
| 6.3 | Fertigung und experimentelle Prüfung der Proben..... | 112 |
| 6.3.1 | Probekörperbezeichnung und Versuchsprogramm..... | 112 |
| 6.3.2 | Klebtechnische Fertigung der Rohrproben..... | 114 |
| 6.3.3 | Vermessung der Klebschichtgeometrie..... | 118 |
| 6.4 | Experimentelle Prüfung der Kreishohlprofilproben..... | 120 |
| 6.5 | Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen..... | 125 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.5.1 | Ergebnisse Klebstoff PUR..... | 125 |
| 6.5.2 | Ergebnisse Klebstoff EP | 130 |
| 6.6 | Numerische Untersuchungen..... | 134 |
| 6.6.1 | Ansatz und Zielsetzung..... | 134 |
| 6.6.2 | Numerisches Modell und Werkstoffgesetze | 134 |
| 6.6.3 | Ergebnisse der numerischen Untersuchungen | 138 |
| 6.7 | Diskussion der experimentellen und numerischen Ergebnisse..... | 148 |
| 6.7.1 | Allgemeines..... | 148 |
| 6.7.2 | Einfluss der Klebschichtdicke..... | 149 |
| 6.7.3 | Einfluss der Überlappungslänge..... | 151 |
| 6.7.4 | Einfluss von geometrischen Imperfektionen..... | 154 |
| 6.7.5 | Einfluss eines zusätzlichen Temperprozesses | 156 |
| 6.8 | Zusammenfassung | 158 |
| 7 | Prognose der Tragfähigkeit..... | 161 |
| 7.1 | Ansatz und Zielsetzung..... | 161 |
| 7.2 | Tragfähigkeitsprognose auf Basis von Nennspannungen..... | 162 |
| 7.3 | Tragfähigkeitsprognose nach dem Konzept lokaler Spannungen | 163 |
| 7.3.1 | Prinzipielle Vorgehensweise..... | 163 |
| 7.3.2 | Klebstoff PUR..... | 163 |
| 7.3.3 | Klebstoff EP | 168 |
| 7.4 | Probabilistische Tragfähigkeitsprognose | 171 |
| 7.4.1 | Probabilistische Verfahren und statistischer Größeneinfluss | 171 |
| 7.4.2 | Anwendung bei geklebten Kreishohlprofilverbindungen | 175 |
| 7.5 | Diskussion der Konzepte zur Prognose der Tragfähigkeit | 181 |
| 7.6 | Zusammenfassung der Tragfähigkeitsprognose | 184 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 185 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 185 |
| 8.2 | Ausblick | 189 |
| | Literaturverzeichnis | 191 |
| | Anhang | |

Abkürzungen und Formelzeichen

| Bezeichnung | Einheit | Erläuterung |
|----------------------------------|---------|---|
| Lateinische Formelzeichen | | |
| B | [mm] | Nennwert der Breite von quadratischen Hohlprofilen; |
| | [mm] | Nennwert der kürzeren Seite bei rechteckigen Hohlprofilen |
| D | [mm] | Nennwert des Außendurchmesser von Kreishohlprofilen |
| D _a | [mm] | Nennwert des Außendurchmesser des außenliegenden Kreishohlprofils bei überlappenden Steckverbindungen |
| D _i | [mm] | Nennwert des Innendurchmesser des innenliegenden Kreishohlprofils bei überlappenden Steckverbindungen |
| D _{k,m} | [mm] | Durchmesser in Klebspaltmitte bei überlappenden Kreishohlprofilverbindungen |
| E | [mm] | Ausmitte der Schwerelinien von zwei überlappenden Kreishohlprofilen |
| F(θ) | [-] | Weibull-Verteilungsfunktion in Bezug auf das Versagenskriterium θ |
| F _{exp} | [kN] | experimentell bestimmte Bruchkraft |
| F _{max} | [kN] | Bruchlast einer geklebten Probe im Zugversuch |
| F _{max, MW} | [kN] | Mittelwert der maximalen Bruchkräfte einer Prüfreihe |
| F _{pred} | [kN] | prognostizierter Wert der Bruchkraft |
| F _{pred,k} | [kN] | vorgesagter charakteristischer Wert der Bruchkraft |
| G' | [MPa] | Speichermodul |
| G'' | [MPa] | Verlustmodul |
| H | [mm] | Nennwert der längeren Seite bei rechteckigen Hohlprofilen |

| | | |
|-----------------|--------------------|--|
| h_i | [mm] | Summe der Abmessungen Wanddicke des außenliegenden Kreishohlprofils und Klebspaltdicke |
| k | [-] | Formparameter der Weibull-Verteilung |
| $L_{\ddot{u}}$ | [mm] | Überlappungslänge zweier geklebter Bauteile |
| P_s | [%] | Überlebenswahrscheinlichkeit (engl. probability of survival) |
| S | [°] | Schiefstellung zwischen zwei überlappenden Kreishohlprofilen |
| s_k | [mm] | Klebschichtdicke |
| t | [mm] | Nennwanddicke eines Hohlprofils |
| $\tan \delta$ | [-] | Verlustfaktor: Quotient aus Verlustmodul G'' und Speichermodul G' |
| T_g | [°C] | Glasübergangstemperatur |
| u_x, u_y, u_z | [mm] | Verschiebungen in x-, y-, z-Richtung |
| V | [mm ³] | Volumen |
| x, y, z | | Achsen des Koordinatensystems |

Griechische Formelzeichen

| | | |
|-----------------------------------|-----|---|
| π | [-] | Kreiszahl, die das Verhältnis von Umfang zu Durchmesser eines Kreises beschreibt; $\pi = 3,1415926\dots$ |
| ε | [-] | Dehnung |
| $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ | [°] | Verdrehungen um die x-, y-, z-Achse |
| θ_E | [-] | Versagenskriterium für geklebte Stahlverbindungen, basierend auf allen Einzelergebnissen der zu Grunde liegenden Versuchsreihen |
| θ_K | [-] | Versagenskriterium für geklebte Stahlverbindungen, basierend auf den 5 %-Quantilen der zu Grunde liegenden Versuchsreihen |
| σ | [-] | Skalenparameter nach der Weibull-Verteilung |
| $\sigma_{0,\theta}$ | [-] | Skalenparameter der Weibull-Verteilung in Bezug auf |

| | | |
|-------------|-------|--|
| | | das Versagenskriterium θ_E |
| σ_0 | [-] | Charakteristischer Wert, dem nach der Weibull-Theorie eine Versagenswahrscheinlichkeit von 63,2 % zugehörig ist. |
| σ_L | [-] | Schwellenwert, unter dem nach der Weibull-Theorie kein Versagen auftritt. |
| σ_z | [MPa] | Normalspannung orthogonal zur Ebene der Klebfuge |
| τ_N | [MPa] | Nennschubspannung |
| τ_{xz} | [MPa] | Schubspannung in der Ebene der Klebfuge |

Abkürzungen und Bezeichnungen

| | |
|-----|--|
| CFK | Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff |
| EP | Epoxidharzklebstoff |
| exp | Exponentialfunktion |
| i | Laufparameter |
| KHP | Kreishohlprofil |
| ln | Logarithmus naturalis |
| MEK | Methylethylketon |
| MW | Mittelwert |
| n | Anzahl einer Grundgesamtheit |
| PUR | Polyurethanklebstoff |
| QHP | Quadratisches Hohlprofil |
| RHP | Rechteckiges Hohlprofil |
| RT | Raumtemperatur |
| SD | Schätzwert der Standardabweichung bei Annahme einer Normalverteilung |

Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Kreishohlprofile (KHP) weisen eine Vielzahl an konstruktiven und gestalterischen Vorteilen auf. Im Vergleich mit den im Stahlbau üblichen I-Profilen sind insbesondere die aus den Querschnittswerten resultierenden sehr guten Beanspruchbarkeiten bei Druck, mehrachsiger Biegung sowie Torsion zu nennen. Der geringe Strömungswiderstand kreisförmiger Hohlprofile ist bei Beanspruchung durch Wind und Wellen als weiterer Vorteil zu nennen. Aufgrund der im Vergleich zu offenen Profilen geringeren Oberfläche zeichnen sich Kreishohlprofile darüber hinaus durch einen einfacheren Korrosionsschutz aus. Eine Vielzahl repräsentativer Bauwerke aus dem Bereich des Brückenbaus sowie weitgespannte Dachtragwerke von Messehallen, Flughäfen oder Stadien zeigen die architektonischen und ästhetischen Vorteile von Kreishohlprofilkonstruktionen eindrucksvoll auf.

Als Beispiel aus dem deutschen Raum seien die in Abbildung 1.1 dargestellte Terminalhalle des Flughafens Stuttgart sowie die im Rahmen des Neubaus des Berliner Hauptbahnhofs errichtete Brücke über den Humboldthafen genannt (Abbildung 1.2). Aber auch bei Hohlprofilfachwerktragstrukturen von Windenergieanlagen oder Kranen werden Kreishohlprofile häufig eingesetzt.

Bisher werden Kreishohlprofile in der Regel durch das Fügeverfahren Schweißen angeschlossen. Zur Herstellung eines Hohlprofillängsstoßes werden die Bauteile üblicherweise stumpf miteinander verschweißt (Abbildung 1.3 links). Aufgrund der räumlichen Verschneidung der Bauteile ist die bei aufgelösten Tragstrukturen übliche Verbindung mehrerer Kreishohlprofile im Knotenpunkt anspruchsvoller und erfordert eine aufwändige Profilierung der Bauteilenden (Abbildung 1.3 Mitte). Diese direkten

Schweißanschlüsse weisen aufgrund der ungleichförmigen lokalen Steifigkeitsverteilung in Umfangsrichtung der Kreishohlprofile nichtlineare Spannungsverteilungen und damit hohe lokale Spannungskonzentrationen auf. Bei nicht ruhender Beanspruchung kann dies zu Ermüdungsrissen am geschweißten Knotenanschluss führen. Der Einsatz von Stahlgussbauteilen als Verbindungselement im Knotenpunkt weist sowohl konstruktive als auch fertigungstechnische Vorteile auf (Abbildung 1.3 rechts). So können Spannungsspitzen durch die freie, der Beanspruchung angepassten Formgebung des Gussbauteils effektiv reduziert werden. Im Vergleich zu den direkt verschweißten Knotenanschlüssen kann die Anbindung der Kreishohlprofile an den Gussknoten mit durchgeschweißten Stumpfnahten und somit deutlich reduziertem Fertigungsaufwand erfolgen (DUTTA 1999; WARDENIER 2010).



Abbildung 1.1 Hohlprofilkonstruktion im Hochbau: Flughafen Stuttgart



Abbildung 1.2 Hohlprofilkonstruktion im Brückenbau: Humboldthafenbrücke, Berlin

Ermüdungsversuche an geschweißten Stumpfstoßen zwischen Stahlkreishohlprofilen und rohrförmigen Stahlgussbauteilen zeigen jedoch, dass der Ausgangsort der Ermüdungsriss stets die Schweißnahtwurzel ist (PUTHLI ET AL. 2010). Eine Detektion des Schadens an der Hohlprofiloberfläche ist somit erst möglich, wenn der Riss die Bauteilwandung durchdrungen hat. Aus diesem Versagensbild resultieren höhere Anforderungen an das Sicherheitsniveau bei der rechnerischen Auslegung der Konstruktionen und damit letztlich eine Einstufung in niedrige Kerbklassen. Als weitere Nachteile sind Schweißspannungen sowie die gerade bei dickwandigen Bauteilen aus dem mehrlagigen Aufbau der Naht resultierenden hohen Fertigungskosten zu nennen.

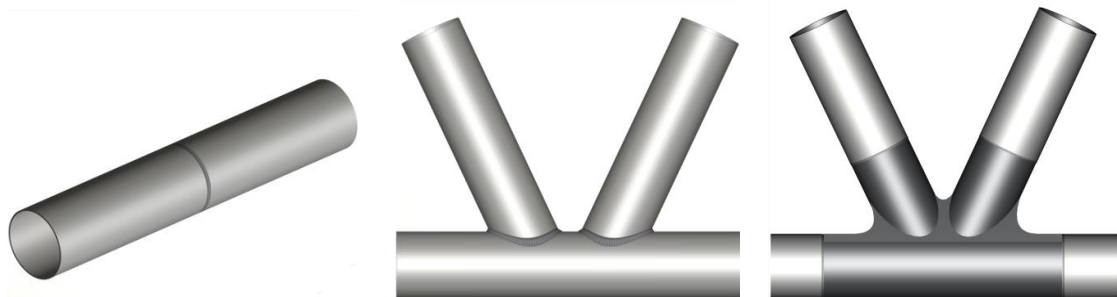


Abbildung 1.3 Geschweißte Kreishohlverbindungen. Links: geschweißter Längsstoß. Mitte: direkte Verschweißung im Knotenpunkt. Rechts: Gussknoten mit angeschlossenen Kreishohlprofilen (ALBIEZ ET AL. 2013)

Vor dem Hintergrund der dargelegten Ausgangssituation und den bei geschweißten Anschlüssen auftretenden Problemen stellt sich die Frage, ob geklebte Verbindungen von Kreishohlprofilen in Anwendungsgebieten des Stahlbaus eine Alternative zu den heute üblicherweise geschweißt ausgeführten Hohlprofilanschlüssen darstellen. Dabei sind die spezifischen Anforderungen sowie die im Bauwesen üblichen geometrischen Dimensionen zu beachten. Grundlegende Voraussetzung für eine Umsetzung geklebter Anschlüsse in der Baupraxis ist weiterhin eine Methodik zur rechnerischen Ermittlung der Tragfähigkeit der geklebten Verbindung.

Ziele der vorliegenden Arbeit sind daher:

- I) **Entwicklung einer geklebten Verbindung** von Kreishohlprofilen für Anwendungsgebiete im Stahlbau unter Berücksichtigung der baupraktischen Randbedingungen
- II) Kenntnis der **statischen Tragfähigkeit** der geklebten Verbindung bei Variation unterschiedlicher geometrischer Parameter
- III) Entwicklung einer Methodik zur **rechnerischen Prognose der Tragfähigkeit** geklebter Kreishohlprofilverbindungen basierend auf numerischen Untersuchungen

1.2 Konstruktionskonzept für geklebte Kreishohlprofilverbindungen

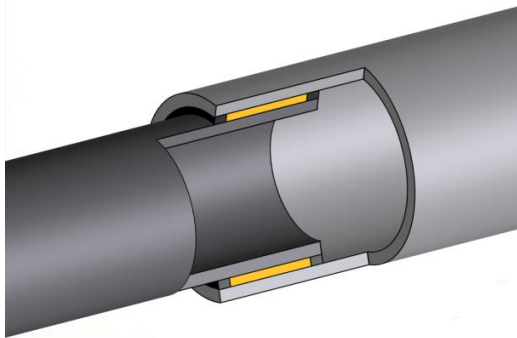
Von wesentlicher Bedeutung für die Tragfähigkeit einer geklebten Verbindung ist die klebgerechte Gestaltung der Konstruktion, denn zunächst steht der Festigkeit der Fügepartner aus Stahl die deutlich geringere Festigkeit der Klebstoffe gegenüber. Zur Übertragung der in den Fügepartnern vorhandenen Schnittgrößen sind aufgrund des Festigkeitsunterschiedes große überlappende Fügeflächen erforderlich. Diese geometrische Ausbildung führt zu einer Schubbeanspruchung der lastabtragenden Klebschicht (HABENICHT 2009). Im Umkehrschluss resultiert hieraus jedoch auch, dass die bisher ausgeführten geschweißten Verbindungsgeometrien im Hinblick auf eine klebgerechte Gestaltung modifiziert werden müssen. Das dieser Arbeit zu Grunde liegende Konstruktionskonzept sieht folglich eine rohrförmige Überlappungsverbindung der Kreishohlprofile vor.

Eine Überlappung zwischen Kreishohlprofilen kann durch verschiedene konstruktive Detaillösungen hergestellt werden. Die einfachste Möglichkeit ist die Verwendung von Kreishohlprofilen mit unterschiedlichem Außen- bzw. Innendurchmesser (Abbildung 1.4-A). Dies führt jedoch zu einem aus architektonischer Sicht unerwünschten Sprung in der Außenabmessung der Tragstruktur. Soll ein Längsstoß zwischen Kreishohlprofilen mit identischem Querschnitt durch eine Überlappungsklebung ausgeführt werden, dient eine außen- oder innenliegende Muffe zur Herstellung der Überlappung (Abbildung 1.4-B bzw. C). Außenliegende Muffen werden dabei bevorzugt für medienführende Rohrverbindungen beispielsweise für Anwendungen im Pipelinebau verwendet. Innenliegende

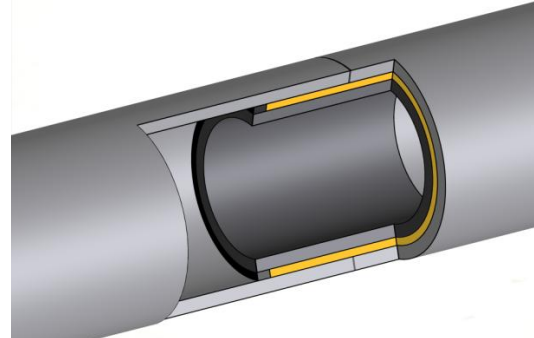
Muffen stellen aufgrund des konstanten Außendurchmessers im Verbindungsbereich eine ästhetische Lösung für architektonisch anspruchsvolle Tragstrukturen dar.

Ein konstruktives Detail zum klebtechnischen Anschluss von Kreishohlprofilen in einem Knotenpunkt resultiert aus der Verwendung von Gussbauteilen. Die Möglichkeit der freien Formgebung des in der Regel dickwandigen Gussknotens erlaubt eine abgestufte Ausbildung der Knotenwandung (Abbildung 1.4-D). Auf den abgestuften Knotenbereich kann das anzuschließende Kreishohlprofil, das den gleichen Außendurchmesser, jedoch eine geringere Wanddicke aufweist, aufgesteckt werden. Durch die Differenz zwischen dem Innendurchmesser des Außenbauteils und dem Außendurchmesser des Innenbauteils entsteht bei allen beschriebenen Konstruktionen ein zylindrischer Spalt. Aus dieser Verbindungsgeometrie resultiert die Frage nach einem geeigneten Fertigungsverfahren.

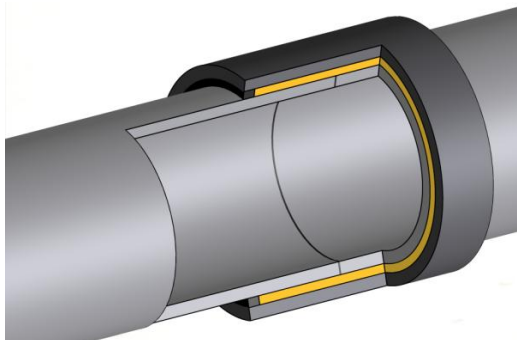
A) KHP-Steckverbindung



B) Innenliegende Muffe



C) Außenliegende Muffe



D) Abgestuftes Gussbauteil

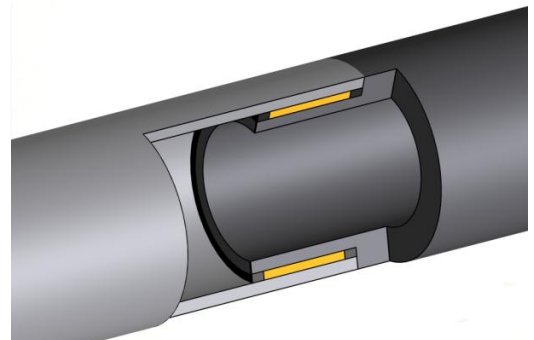


Abbildung 1.4 Konstruktionsvarianten geklebter Kreishohlprofilverbindungen

In der Regel werden die einzelnen Kreishohlprofile bei aufgelösten Tragstrukturen des Stahlbaus in den Knotenpunkten miteinander verbunden. Aus diesem Grund stellt Konstruktionsdetail A) sowie das vergleichbare, aus Fertigungssicht jedoch aufwändigere Detail D) nach Abbildung 1.4 im Fokus der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit. Aufgrund der vergleichbaren Klebfugenbeanspruchung können die Ergebnisse bei Beachtung der abweichenden Fertigungsrandbedingungen auf die Konstruktionsdetails B) und C) übertragen werden.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zur Erläuterung des Aufbaus der Arbeit werden die einzelnen Kapitel sowie die Zusammenhänge zwischen diesen nachfolgend kurz erläutert:

Kapitel 2 fasst den Kenntnisstand zusammen. Dabei wird zunächst auf Hohlprofile für den Stahlbau sowie deren Eigenschaften und Herstellverfahren eingegangen. Weiterhin werden verschiedene Fügeverfahren zur Verbindung von Kreishohlprofilen vorgestellt. Das Fügeverfahren Kleben stellt einen weiteren Schwerpunkt des Kapitels 2 dar. Hierbei werden sowohl wichtige spezifische Eigenschaften der für die vorliegende Arbeit relevanten Klebstoffe als auch das Trag- und Versagensverhalten geklebter Verbindungen beschrieben. Den Abschluss von Kapitel 2 bildet ein Überblick über Anwendungen des Fügeverfahrens Kleben im Bauwesen.

Kapitel 3 umfasst die Analyse der baupraktischen Randbedingungen und der daraus abzuleitenden Anforderungen an geklebte Kreishohlprofilverbindungen. Dabei wird sowohl auf die geometrischen Eigenschaften der Füge Teile als auch auf die Fertigungs- und Montagebedingungen eingegangen. Des Weiteren werden auf Basis normativer Vorgaben mechanische und thermische Anforderungen an die geklebte Verbindung definiert.

Auf Grundlage des erarbeiteten Anforderungsprofils werden in **Kapitel 4** aus 24 betrachteten Klebstoffen zwei geeignete ausgewählt. Diese erfüllen die zuvor ermittelten Anforderungen des Bauwesens. Die ausgewählten Klebstoffe werden in experimentellen Untersuchungen hinsichtlich ihres Spannungs-Dehnungsverhaltens, der Glasübergangstemperatur sowie ihres Kriechverhaltens bei Dauerbeanspruchung charakterisiert.

Die Entwicklung eines spannungsbasierenden Versagenskriteriums für Stahlklebungen ist Gegenstand von **Kapitel 5**. Die Basis hierfür stellen experimentelle Untersuchungen an unter verschiedenen Schäftungswinkeln geklebten kleinteiligen Stahlflachproben dar. Nichtlineare numerische Analysen unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften der Klebstoffe, dokumentiert in Kapitel 4, liefern Auskunft über die lokale Spannungsverteilung in der Klebfuge bei Bruch der Proben. Die Auswertung des Spannungszustandes führt für jeden der untersuchten Klebstoffe zu einem mechanischen, die Interaktion von Schub- und Normalspannung berücksichtigenden Versagenskriterium.

Kapitel 6 beschreibt die experimentellen und numerischen Untersuchungen zur statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen mit bauüblichen Abmessungen. Nach der Beschreibung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Füge Teile wird auf den klebtechnischen Fertigungsprozess eingegangen. Der Dokumentation der Versuchsdurchführung und Auswertung folgt die Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse der Zugversuche an geklebten Kreishohlprofilproben. Numerische Un-

tersuchungen dienen zum einen der Quantifizierung des Einflusses geometrischer Parameter auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht. Darüber hinaus wird in Analogie zur Vorgehensweise in Kapitel 5 der Spannungszustand bei Bruch jeder experimentell geprüften geklebten Kreishohlprofilprobe berechnet und ausgewertet. Die experimentellen und numerischen Untersuchungen werden abschließend diskutiert und der Einfluss verschiedenster Parameter auf die Tragfähigkeit beschrieben.

Auf Basis der Charakterisierung der Klebstoffe (Kapitel 4) sowie des in Kapitel 5 entwickelten spannungsbasierenden Versagenskriteriums wird in **Kapitel 7** die Tragfähigkeit der in Kapitel 6 experimentell untersuchten geklebten Kreishohlprofilverbindungen rechnerisch prognostiziert und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Hierzu werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Die Tragfähigkeit wird zum einen auf Basis nichtlinearer numerischer Berechnungen nach dem Konzept lokaler Maximalspannungen bestimmt. Zusätzlich wird die Tragfähigkeit unter Verwendung eines probabilistischen Bemessungsmodelles ermittelt. Die Validierung der Konzepte erfolgt durch den Vergleich der rechnerisch prognostizierten mit den im Rahmen dieser Arbeit experimentell bestimmten Bruchlasten. Den Abschluss von Kapitel 7 bildet die Diskussion der verschiedenen Verfahren.

Kapitel 8 fasst abschließend die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und regt zukünftige Arbeiten an.

Der beschriebene Aufbau sowie die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kapiteln sind in Abbildung 1.5 schematisch in grafischer Form dargestellt.

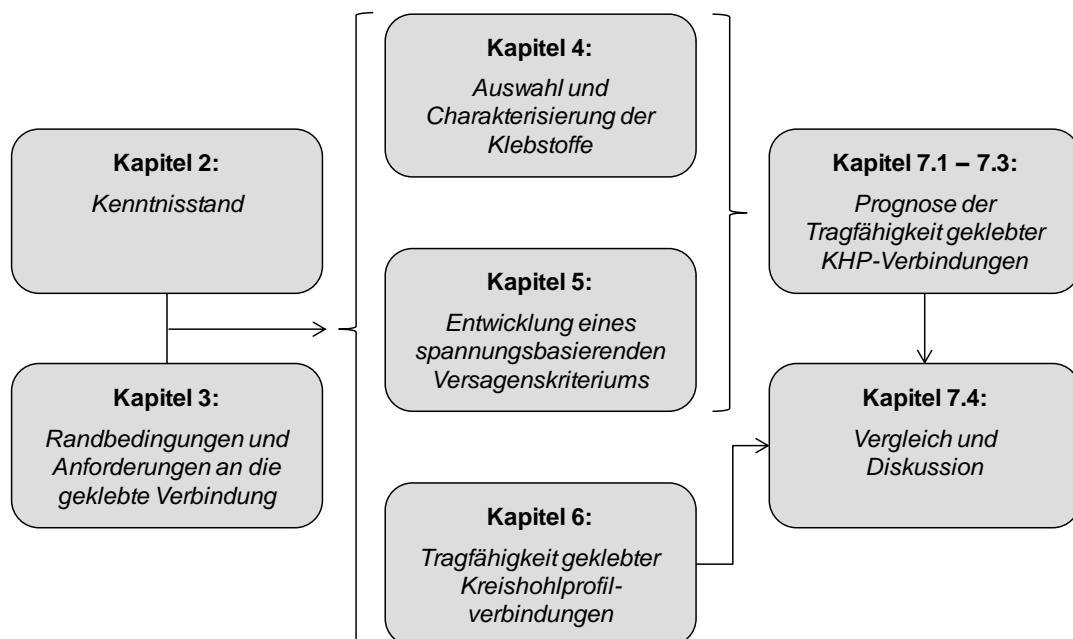


Abbildung 1.5 Schematischer Aufbau der Arbeit

Kennntnisstand

2.1 Hohlprofile

Hohlprofile für den konstruktiven Stahlbau kommen in den verschiedensten Anwendungsgebieten zum Einsatz. Häufige Verwendung finden sie in weitgespannten Dachtragwerken, bei Fachwerkkonstruktionen des Brücken- und Kranbaus aber auch bei Tragstrukturen für On- und Offshore-Windenergieanlagen. Zunächst sind Hohlprofile im Vergleich zu herkömmlichen offenen Stahlprofilen (z.B. I- oder U-Profile) auf das Stahlgewicht bezogen teurer, sie weisen aufgrund ihres geschlossenen Querschnittes jedoch verschiedene Vorteile auf. Zunächst sind die aus den statischen Werten der Querschnitte resultierenden vorteilhaften Beanspruchbarkeiten zu nennen. Sowohl bei Druckbeanspruchung als auch bei schiefer oder zweiachsiger Biegung weisen marktübliche Hohlprofile aufgrund der ausgewogeneren Trägheitsmomente um die Hauptachsen höhere Tragfähigkeiten als beispielsweise die im Stahlbau üblichen I-Profile auf. Auch die deutlich höhere Beanspruchbarkeit bei Torsion ist ein Vorteil in mechanischer Hinsicht.

Des Weiteren können der geringere Strömungswiderstand bei angreifenden gasförmigen oder flüssigen Medien sowie der einfachere Korrosionsschutz genannt werden. Letzterer erklärt sich dadurch, dass zunächst im Vergleich mit offenen Profilen weniger Fläche zu beschichten ist. Außerdem weisen Hohlprofile keine scharfen Kanten auf, die zu einer Schwächung der Beschichtung beitragen können. Zudem ist aufgrund nicht vorhandener einspringender Ecken im Vergleich zu offenen Hohlprofilen keine Schmutzablagerung oder Feuchteansammlung möglich.

Die Hohlräume der Profile können gegebenenfalls funktionell genutzt werden. Eine Betonfüllung beispielsweise steigert nicht nur die Tragfähigkeit sondern auch die Feuerwi-

derstandsdauer des Hohlprofils. Nicht zuletzt können mit Hohlprofilen architektonisch sehr ansprechende, ästhetische Tragkonstruktionen realisiert werden. Dies zeigt die Vielzahl an repräsentativen Bauwerken, bei denen Hohlprofile zum Einsatz kamen. Beispielfhaft sei an dieser Stelle auf die bereits vorgestellte Abflughalle des Flughafens Stuttgart (Abbildung 1.1) sowie die Brücke über den Humboldthafen in Berlin (Abbildung 1.2) verwiesen. Als Besonderheit bei beiden Tragkonstruktionen kann die Verwendung von Gussbauteilen als Verbindungselement in den Knotenpunkten genannt werden (DUTTA 1999; WARDENIER 2010; PUTHLI 1998).

Hohlprofile werden sowohl in ihrer Querschnittsform als auch hinsichtlich des Herstellungsverfahrens unterschieden. Für Anwendungen im konstruktiven Stahlbau kommen überwiegend kreisförmige, quadratische und rechteckige Hohlprofilquerschnitte zum Einsatz (Abbildung 2.1).

Lediglich in Sonderfällen werden Hohlprofile mit drei, sechs oder mehr Ecken oder elliptischem Querschnitt verwendet. Zur Unterscheidung von Hohlprofilen für den Transport von Medien (= Rohre) wurde in den 1960er Jahren im konstruktiven Stahlbau der Begriff des Kreishohlprofils oder Konstruktionsrohres für zylindrische Hohlprofile eingeführt (DUTTA 1999).

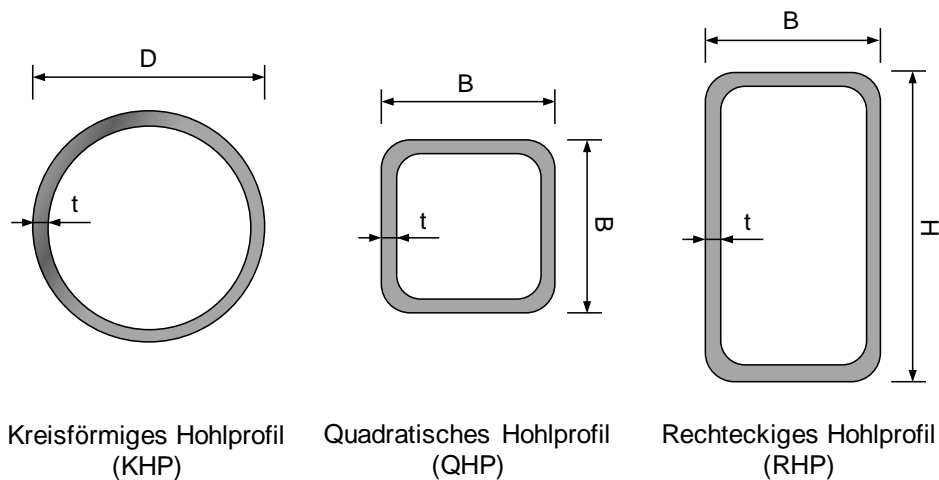


Abbildung 2.1 Übersicht üblicher Hohlprofilquerschnitte

Im Hinblick auf den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit wird bei der Beschreibung der Herstellungsverfahren nur auf Hohlprofile mit kreisförmigem Querschnitt eingegangen.

Prinzipiell kann zwischen warmgefertigten nahtlosen und kaltgefertigten geschweißten Stahlhohlprofilen unterschieden werden. Die Herstellung von warmgefertigten nahtlosen Hohlprofilen erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird aus einem zylindrischen Vollquerschnitt unter Verwendung eines Dorns ein Hohlkörper geformt. Dieser wird anschließend

durch Streckung auf die vorgesehenen Endabmessungen modifiziert (DUTTA 1999; WARDENIER 2010). Es existieren verschiedene auf diesem Prinzip basierende Herstellverfahren, von denen das Schrägwalz-Pilgerschritt und das Stopfenwalzverfahren als die wichtigsten zu nennen sind. Eine detaillierte Beschreibung dieser und weiterer Verfahren zur Herstellung warmgefertigter nahtloser Hohlprofile gibt (DUTTA 1999). Die technischen Lieferbedingungen für diese Bauelemente sind in (DIN EN 10210-1), geometrische und statische Kennwerte in (DIN EN 10210-2) festgelegt. Im Vergleich mit den kaltgefertigten zeichnen sich warmgefertigte Hohlprofile im Allgemeinen durch die bessere Schweißeignung der Eckbereiche rechteckiger Hohlprofile, eine höhere Tragfähigkeit druckbeanspruchter stabilitätsgefährdeter Bauteile sowie eine gleichmäßigere Eigenspannungsverteilung über den Umfang aus.

Kaltgefertigte geschweißte Kreishohlprofile werden aus Flacherzeugnissen hergestellt. Die Herstellung kann grob in zwei Schritte unterteilt werden. In einem ersten Schritt wird aus den Flacherzeugnissen ein geschlitztes zylindrisches Bauteil geformt. Dieses wird anschließend durch Schweißen zu einem Kreishohlprofil verbunden. Dabei wird zwischen längsnahtgeschweißten und spiralnahtgeschweißten Konstruktionsrohren unterschieden. Längsnahtgeschweißte Kreishohlprofile werden in der Regel mit elektrischen Widerstandsschweißverfahren oder Induktionsschweißverfahren hergestellt. Insbesondere große Rohrdurchmesser werden durch Unterpulver geschweißte Spiralnähte gefertigt (WARDENIER 2010; DUTTA 1999). Die Werkstoffprüfungen von kaltgefertigten geschweißten Kreishohlprofilen für den Stahlbau sind in (DIN EN 10219-1) geregelt. Informationen zu Maßtoleranzen, Abmessungen und statischen Werten gibt (DIN EN 10219-2; DIN EN 10219-2 Berichtigung 1). Die normativ zulässigen Maßtoleranzen von Kreishohlprofilen sind für die in dieser Arbeit untersuchten Hohlprofilsteckverbindungen von besonderer Bedeutung; denn Abweichungen von den nominellen Querschnittswerten der Fügeiteile verändern auch die resultierende Klebspaltdicke der Überlappungsverbindung. Details hierzu können Kapitel 3 entnommen werden.

Die Bemessung von Bauteilen aus Hohlprofilen erfolgt nach der bauaufsichtlich eingeführten Norm (DIN EN 1993-1-1; DIN EN 1993-1-1/A1). In Deutschland sind weiterhin die spezifischen Angaben des Nationalen Anhangs (DIN EN 1993-1-1/NA; DIN EN 1993-1-1/NA/A1) zu berücksichtigen. Die Ausführung von Stahltragwerken regelt (DIN EN 1090-2).

2.2 Fügen von Kreishohlprofilen

2.2.1 Allgemeines

Verbindungen bei Kreishohlprofilkonstruktionen werden in der Regel mit den im Bauwesen verbreiteten Fügeverfahren Schweißen und Schrauben hergestellt. Die Mehrzahl der Verbindungen wird dabei schweißtechnisch hergestellt (DUTTA 1999). Im Vergleich zu offenen Profilen weisen kleine und mittelgroße Hohlprofile die Besonderheit auf, nur von einer Seite zugänglich zu sein. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die Anschlussausbildung. Nach (DUTTA 1999) können Hohlprofilverbindungen prinzipiell in mittelbare und unmittelbare Anschlüsse eingeteilt werden. Bei mittelbaren Verbindungen erfolgt der Anschluss direkt, unmittelbare Verbindungen werden durch zusätzliche ebene Stahlbauteile wie Schlitzbleche oder Stirnplatten hergestellt. Auf die im Stahlbau am häufigsten eingesetzten geschweißten und geschraubten Anschlussdetails sowie auf Anwendungen der Klebtechnik beim Fügen zylindrischer Bauteile wird nachfolgend eingegangen.

2.2.2 Geschweißte Kreishohlprofilverbindungen

Geschweißte Kreishohlprofilverbindungen finden sowohl zur Realisierung von Längsstößen als auch zum Anschluss von Diagonalen an das durchlaufende Gurtbauteil, beispielsweise in den Knotenpunkten von Fachwerkkonstruktionen, Einsatz. Geschweißte Längsstöße werden hauptsächlich durch Stumpfnähte hergestellt. Dabei werden in Abhängigkeit der Blechdicke sowie der Höhe der Beanspruchung V- bzw. Y-förmige Stumpfnahtvorbereitungen ausgeführt. Seltener kommen Muffen zur unmittelbaren Verschweißung zum Einsatz. Mittelbare Schweißverbindungen von Kreishohlprofilen in Knotenpunkten beispielsweise von Fachwerkkonstruktionen erfordern aufgrund der räumlichen Rohrverschneidung eine aufwändige mechanische Bearbeitung der Bauteilenden. Diese wird heute in der Regel mit Hilfe von automatischen Profiliermaschinen durchgeführt (DUTTA ET AL. 1998). Direkte Schweißanschlüsse weisen jedoch aufgrund nichtlinearer Steifigkeitsverläufe in Kreishohlprofilumfangsrichtung eine komplexe Lastabtragung auf. Des Weiteren sind in geschweißten Fachwerkknoten hohe Spannungskonzentrationsfaktoren infolge der Überlagerung von Spannungskomponenten aus der primären Fachwerktragwirkung mit Spannungen, die aus der Gurtovalisierung, aus der lokalen Schweißgeometrie sowie aus Sekundärbiegung resultieren, vorhanden.

Deutliche Vorteile sowohl in Hinblick auf den Fertigungsaufwand als auch in Bezug auf das Ziel der Spannungsreduktion im Knotenpunkt werden durch den Einsatz von Gussknoten erreicht. Die Kreishohlprofile können an das Gussbauteil bei deutlich geringerem Fertigungsaufwand mit gegebenenfalls automatisiert geschweißten Stumpfnähten ange-

bunden werden. Detaillierte Informationen zum Einsatz von Gussbauteilen in Tragwerken des Stahlbaus können (HERION 2007; KUHLMANN 2007) oder (STEIDL 2006) entnommen werden. Zur Veranschaulichung der unterschiedlichen geschweißten Knotenanschlüsse wird auf Abbildung 1.3 verwiesen. In der Mitte der Abbildung ist ein direkt verschweißter Fachwerkknotenpunkt, auf der rechten Seite sind ein Gussbauteil sowie die daran stumpf angeschweißten Kreishohlprofile dargestellt.

Neben der beschriebenen unmittelbaren schweißtechnischen Verbindung können Kreishohlprofile auch durch eingeschlitzte oder angeschweißte Stahlbleche oder Kopfplatten angebunden werden (WARDENIER 2010). Komplexe Raumfachwerke können mit sogenannten Kugelknotensystemen, in die die einzelnen Rohrenden angeschraubt werden, realisiert werden. Ein verbreitetes System sowie einige damit ausgeführte Bauwerke werden in (KNEBEL ET AL. 2008) dargestellt.

Geschweißte Kreishohlprofilverbindungen unter statischer Beanspruchung sind weitgehend erforscht und werden nach den Regelungen in (DIN EN 1993-1-8; DIN EN 1993-1-8/NA) bemessen. Detaillierte Hintergrundinformationen und Erläuterungen sind in Band 1 der vom Weltverband der Hohlprofilhersteller (CIDECT) herausgegebenen Design Guides zusammengestellt (WARDENIER ET AL. 2011).

2.2.3 Geschraubte Kreishohlprofilverbindungen

Geschraubte Verbindungen von Kreishohlprofilen stellen eine Alternative zum geschweißten Anschluss dar, werden jedoch deutlich seltener ausgeführt. Im Kontext der Längsstöße sind zunächst geschraubte Flanschverbindungen zu nennen. Bei dieser in Abbildung 2.2 dargestellten Konstruktion werden an die Enden der zu verbindenden Kreishohlprofile kreis- oder ringförmige Kopfplatten angeschweißt. Die formschlüssige Verbindung wird durch Verschraubung der beiden Kopfplatten hergestellt. WARDENIER ET AL. (2011) geben einen Überblick über grundlegende Forschungsarbeiten zu dieser Verbindungsart. Als alternative Lösungen werden - beispielsweise in (WARDENIER 2010) - geschraubte End-Verbindungen unter Verwendung von L-, U- oder T-förmigen Bauteilen aus Stahl skizziert (Abbildung 2.3). Diese Verbindungen bringen jedoch einen hohen Fertigungsaufwand mit sich.

Geschraubte Anschlüsse von Kreishohlprofilen in Fachwerkkonstruktionen werden in der Regel mit eingeschlitzten Flachblechen, die während der Montage mit dem Knotenblech verschraubt werden, realisiert. Ein Sonderfall stellt das Flachdrücken der Kreishohlprofilenden dar (DUTTA ET AL. 1998). Die Abflachung kann sowohl nach Erwärmung als auch im kalten Zustand durchgeführt werden. Sie führt dazu, dass aufwendige Profilierungsarbeiten infolge räumlicher Verschneidung umgangen werden können. Die ebenen Bau-

teilenden können schließlich beispielsweise durch Schweißen angebunden werden. Es sei jedoch erwähnt, dass keine normativen Regelungen für diese Konstruktionsvarianten vorhanden sind (DUTTA ET AL. 1998). Die rechnerische Auslegung der geschraubten Verbindung kann nach (DIN EN 1993-1-8; DIN EN 1993-1-8/NA) bei Berücksichtigung des spezifischen Trag- und Verformungsverhaltens von Hohlprofilen durchgeführt werden (DUTTA 1999; WARDENIER 2010). Spreizdübel aus Stahl, deren Flügel sich während des Anziehvorgangs der Schraube an die Innenwand des Hohlprofils anlegen, stellen eine Sonderlösung für geschraubte Anschlüsse an Hohlprofile dar, deren Innenseite während des Montagevorgangs nicht oder nur schwer zugänglich ist (z.B. Hollo-Bolt-Dübel).

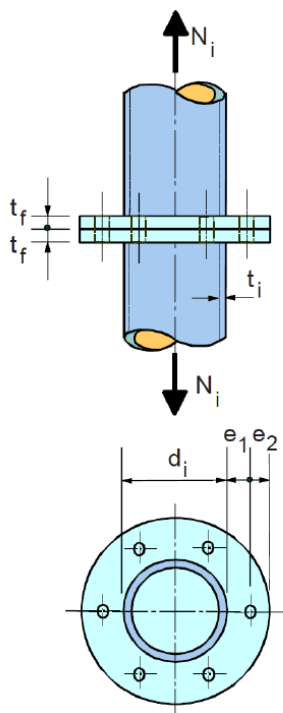


Abbildung 2.2 Geschraubte Flanschverbindung
(WARDENIER 2010)

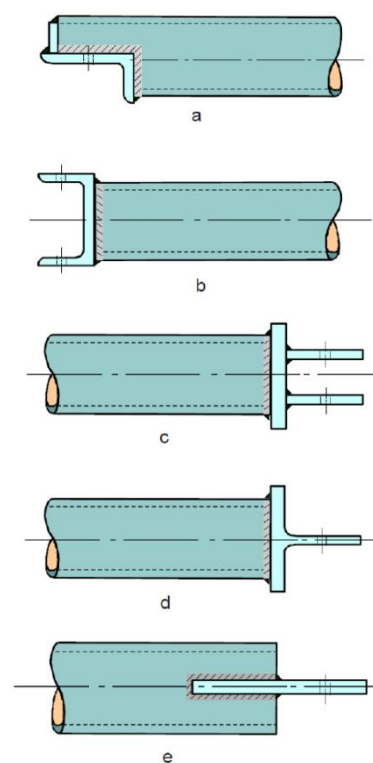


Abbildung 2.3 Geschraubte Endverbindung
(WARDENIER 2010)

Wie bereits bei den geschweißten Kreishohlprofilverbindungen können auch Bemessung und Ausführung ruhend beanspruchter geschraubter Kreishohlprofilverbindungen als weitgehend erforscht bezeichnet werden.

2.2.4 Kleben zylindrischer Bauteile

Das Kleben von Stahlhohlprofilen in lastabtragenden Baukonstruktionen wird bisher noch nicht in der Praxis angewendet, ist jedoch Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten

(UMMENHOFER ET AL. 2015). Eine Fokussierung auf den konstruktiven Stahlbau (wie in den Abschnitten 2.2.2 und 2.2.3) ist somit bei der Zusammenstellung des Kenntnisstandes zu geklebten zylindrischen Verbindungen nicht möglich. Deshalb wird nachfolgend ein Überblick über das Kleben zylindrischer Bauteile gegeben, der sowohl technische Anwendungen aus dem Maschinenbau, dem Geländerbau aber auch aus der Pipelineindustrie aufgreift.

Zunächst sind aus dem Maschinen- und Automobilbau geklebte Welle-Nabe-Verbindungen bekannt. Diese überwiegend auf Torsion beanspruchte Verbindung ist Gegenstand vielfältiger Forschungsarbeiten. Eine Übersicht sowie Vorgaben zur Berechnung der Verbindung gibt (HABENICHT 2009). Exemplarisch seien Untersuchungen zur Spannungsanalyse (ADAMS UND PEPIATT 2006) sowie zur konstruktiven Gestaltung der Welle-Nabe-Verbindung (ROMANOS 1997) genannt. Dabei sind auch klebtechnische Verbindungen von rohrförmigen Bauteilen unterschiedlicher Werkstoffe untersucht worden. In (EL-HADY UND KANDIL 2002) werden beispielsweise geklebte Verbindungen von Rohren aus Stahl oder leichten Verbundwerkstoffen im Fahrzeugbau analysiert. In den genannten Anwendungsgebieten werden jedoch in der Regel Klebschichtdicken um 0,1 mm ausgeführt. Deshalb lassen sich die dabei gewonnenen Erkenntnisse nicht direkt auf die im Bauwesen aufgrund der infolge von Maßtoleranzen erforderlichen Dickschichtklebungen in der Größenordnung von mehreren Millimetern übertragen.

Bei Welle-Nabe-Verbindungen ist die Welle in der Regel als Vollquerschnitt ausgeführt. Rohr-Rohr-Verbindungen weisen aufgrund ihrer abweichenden Geometrie weitere Möglichkeiten der konstruktiven Ausgestaltung auf. (FRITZ UND SCHULZE 2012) skizzieren hierzu Rohrverbindungen, bei denen durch Schäftung der Rohrwandungen die Klebfläche vergrößert und die Verbindung somit „klebgerechter“ gestaltet wird. Zudem werden Rohrsteckverbindungen sowie geklebte Lösungen unter Verwendung einer innen oder außen liegenden Muffe vorgestellt. Alle Konstruktionsvarianten verfolgen das Ziel der Klebflächenvergrößerung im Vergleich zum Stumpfstoß (Abbildung 2.4).

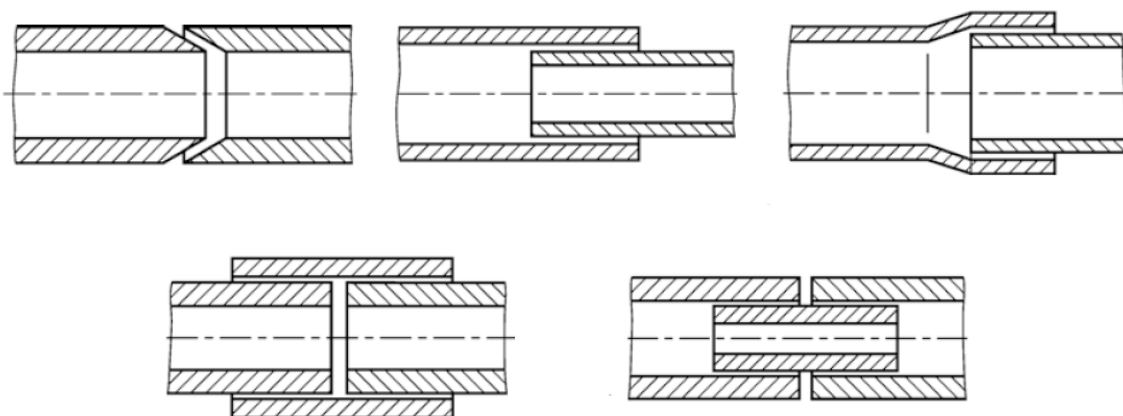


Abbildung 2.4 Zweckmäßige Gestaltung geklebter Rohrverbindungen nach (FRITZ UND SCHULZE 2012)

Informationen zur Beanspruchbarkeit geklebter Rohrsteckverbindungen in Abhängigkeit von geometrischen Parametern finden sich in (HABENICHT 2009). Dieser Zusammenstellung liegen experimentelle Untersuchungen an Aluminiumrohren aus den 1960er Jahren zugrunde (ALTHOF 1966). ALTHOF untersuchte jedoch lediglich Kleinbauteile (Durchmesser von 41,5 mm bis 50,5 mm) mit Dünnschichtklebungen in der im Bauwesen praktisch nicht realisierbaren Größenordnung von 0,05 bis 0,25 mm. Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Klebschichtdicken liegen aufgrund der im Stahlbau zu berücksichtigenden Maßtoleranzen (siehe Abschnitt 3) zwischen 2,5 mm und 5,8 mm bei Kreishohlprofildurchmessern von bis zu 298,5 mm.

Des Weiteren kann nach (HABENICHT 2009) die Spannungsverteilung von einschnittigen Überlappklebungen auf die Rohrverbindung übertragen werden. Berücksichtigt werden müsse jedoch, dass bei der Rohrsteckverbindung unter axialer Beanspruchung planmäßig keine Normalspannungen aus Exzentrizitätsmomenten auftreten. Ebenso sind gegebenenfalls Zugbeanspruchungen in Radialrichtung zu beachten. Am Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik der Universität Paderborn wurde in einem Forschungsprojekt eine Datenbank aufgebaut, die für verschiedene Anwendungsfälle in kompakter Form Kenntnisse zur Ausbildung geklebter Rohrverbindungen bereit stellt (HAHN UND KLEMENS 1997).

Aus Sicht der Fertigung sind für die vorliegende Arbeit Untersuchungen zur klebtechnischen Herstellung von Rundsteckverbindungen für Anwendungen im Geländerbau von Bedeutung (SIEBERT 2006). Infolge der unterschiedlichen Geometrie der beiden Füge-teile ergibt sich im Überlappungsbereich ein zylindrischer Fügespalt, der an den Enden durch O-Ringe abgedichtet ist. Der Klebstoff wird unter Zuhilfenahme einer Applikationsvorrichtung durch Injektion in diesen Spalt eingebracht. Dieses Fertigungsverfahren ist schematisch in Abbildung 2.5 dargestellt. Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der mechanischen Beanspruchbarkeit injektionsgefügter Rohrproben zeigen im Vergleich zu den üblicherweise durch Klebstoffaufstrich gefertigten Bauteilen eine um einen Faktor 2 bis 4 höhere Tragfähigkeit bei Zug- bzw. Torsionsbeanspruchung (SIEBERT 2006). Sowohl das Injektionsverfahren als auch die Vorrichtung zur Herstellung der beschriebenen Verbindung sind patentrechtlich geschützt (SCHLIMMER UND SIEBERT 2005a, 2005b). Allerdings liegen die in (SIEBERT 2006) untersuchten, im Geländerbau üblichen Bauteilabmessungen bei Rohrdurchmessern um 50 mm und Klebspaltmaßen von 0,2 bis 0,6 mm. Geklebte Kreishohlprofilverbindungen für praktische Anwendungen im Stahlbau erfordern jedoch, wie bereits erwähnt, Klebschichtdicken von mehreren Millimetern. Auch wurde keine Methodik zur Bemessung der Verbindungstragfähigkeit entwickelt. Diese ist jedoch eine unverzichtbare Grundlage für die Anwendung geklebter Verbindungen im Bauwesen.

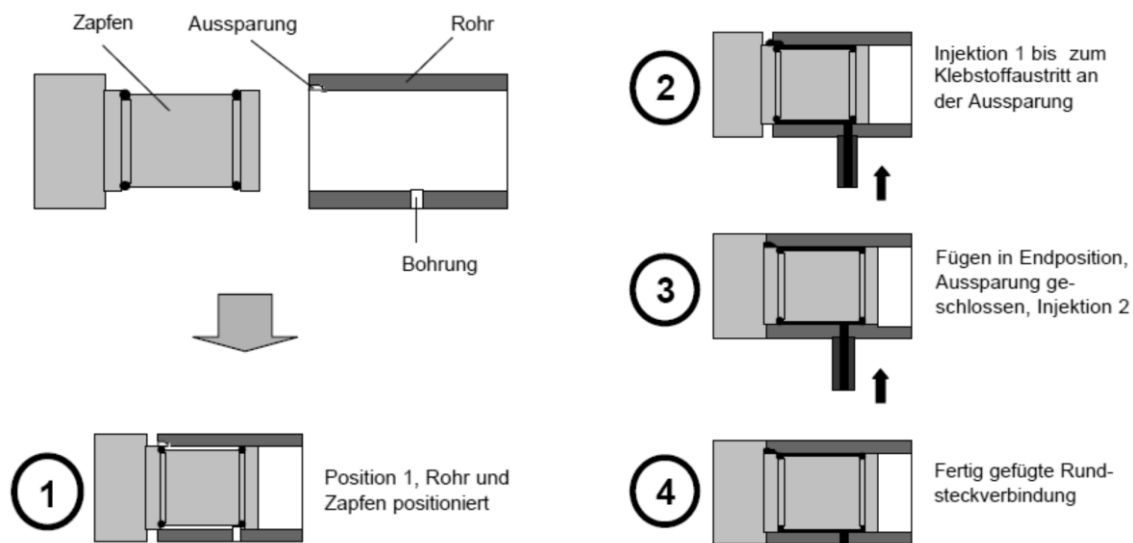


Abbildung 2.5 Injektionsverfahren zur klebtechnischen Verbindungen von Rundsteckverbindungen nach (SIEBERT 2006)

Forschungsergebnisse zum klebtechnischen Fügen von Stahlrohren im Pipelinebau sowie zur experimentellen Bestimmung der Tragfähigkeit dieser Verbindung werden in (BÖDDEKER UND HAHN 2011a) vorgestellt. Hierzu werden zwei Rohre mit Hilfe einer überlappenden Muffe verbunden. Nach der Zentrierung der Pipelinerohre mit Hilfe einer hydraulischen Innenzentrierung sowie der Ausrichtung der Muffe mit Stahlkeilen werden die Fügeteile durch Injektion eines Zweikomponenten-Polyurethanklebstoffs in den Fugespalt verbunden. Als Außenabdichtungen der Rohrmuffe werden Schrumpfschläuche appliziert (Abbildung 2.6).

Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit ergeben eine ausreichende Verbindungsfestigkeit für die bei Pipelines auftretenden mechanischen Beanspruchungen aus Verlegung und Betrieb. In Beständigkeitsuntersuchungen zeigt sich, dass aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen im Pipelinebau eine Oberflächenbehandlung zum Korrosionsschutz der Rohre erforderlich ist. Ausgewählt und untersucht wird eine Pulverbeschichtung auf Epoxidharzbasis. Zugversuche liefern den Nachweis, dass die geklebte Verbindung eine für die Beanspruchungen im Pipelinebau ausreichende strukturelle Festigkeit aufweist (HAHN ET AL. 2010). Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes JoinTec (BÖDDEKER ET AL. 2013) wird das vorgestellte Fügekonzept zur klebtechnischen Verbindung von Großbauteilen ($D = 168,3 \text{ mm}$) eingesetzt. Die Beanspruchungen von Verbindungen im Stahlbau weichen jedoch vom Pipelinebau ab. Zunächst sind in jeder Tragstruktur des Stahlbaus ständige Lasten aus Eigengewicht über die Verbindungen abzutragen. Dies führt zu einer Kriechbeanspruchung der Klebverbindung und stellt deutlich abweichende Anforderungen an die Auswahl geeigneter Klebstoffe. Ebenso ist festzuhalten, dass in (BÖDDEKER UND HAHN 2011a) Präzisionsstahlrohre als

Fügeteile verwendet wurden. Diese zeichnen sich durch eine hohe Maßgenauigkeit aus, was zu einer sehr geringen Variation der nominellen Klebschichtdicke führt. Im Stahlbau werden aus wirtschaftlichen Gründen jedoch keine Präzisionsrohre verwendet. Außerdem stellen BÖDDEKER UND HAHN (2011a) kein Modell zur Bemessung der Klebverbindung vor. Dies ist jedoch eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung geklebter Kreishohlprofilanschlüsse im Stahlbau.

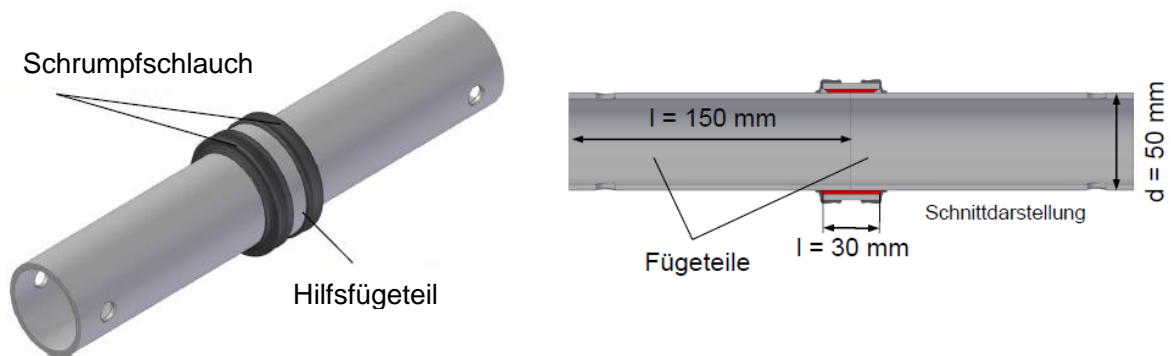


Abbildung 2.6 Rohrprobe zur Untersuchung geklebter Pipelineverbindungen nach (BÖDDEKER UND HAHN 2011b)

Darüber hinaus sind im Bereich des klebtechnischen Fügens metallischer Rohre insbesondere für den Transport von Medien bereits mehrere Patente erteilt worden. In diesen werden Konzepte zum Kleben der Bauteile unter Verwendung profilierter Rohrenden oder dem Einsatz einer Muffe oder Hülse beschrieben. Exemplarisch sei an dieser Stelle (PESCHKA UND WOLF 2009) genannt. Dieses Verfahren sieht geschäftete Rohrenden vor, die so profiliert sind, dass die Fügeteilpartner zentrierende und abdichtende Funktionen aufweisen (siehe Abbildung 2.7). Zur Übertragung der in Stahlhohlprofilen im Bauwesen vorhandenen Schnittkräfte sind geschäftete Rohrenden aufgrund der zu geringen Überlappungsfläche jedoch nicht geeignet.

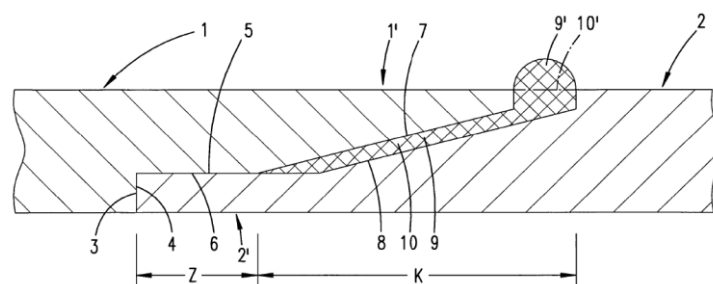


Abbildung 2.7 Klebtechnisches Fügen von Rohren mit profilierten Stirnenden (PESCHKA UND WOLF 2009)

Somit lässt sich festhalten, dass geklebte Kreishohlprofilanschlüsse im Stahlbau bisher in der Praxis noch nicht ausgeführt werden. Anwendung findet die klebtechnische Verbindung zylindrischer Bauteile jedoch bereits in anderen Einsatzbereichen (Maschinen-, Au-

tomobil-, Geländer- und Pipelinebau). Die daraus gewonnen Erkenntnisse können jedoch aufgrund der Dimensionen von Fügeteilen und Klebspalt, der zu berücksichtigenden Maßtoleranzen, der betrachteten Beanspruchungen sowie der Fügepartner nicht direkt auf geklebte Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau übertragen werden. Des Weiteren wird in den genannten Arbeiten kein Konzept zur rechnerischen Prognose der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen vorgestellt.

2.3 Das Fügeverfahren Kleben

2.3.1 Bindungskräfte in einer Klebung

Das Fügen gleicher oder verschiedenartiger Werkstoffe durch die Verwendung eines Klebstoffes wird nach (DIN 8593-8) als Kleben bezeichnet. Das Kleben wird wie das Schweißen und das Löten den stoffschlüssigen Fügeverfahren zugeordnet, bei denen die Herstellung der Verbindung durch die Zugabe eines gesonderten Werkstoffes, hier dem Klebstoff, erfolgt.

Klebstoffe sind in (DIN EN 923) als nichtmetallische Werkstoffe definiert, die Fügeteilpartner durch Haftung an der Oberfläche (Adhäsion) sowie durch die innere Festigkeit des Klebstoffes (Kohäsion) verbinden. Eine Klebung ist somit als Verbundsystem zu betrachten, dessen Gesamtfestigkeit sich aus den Festigkeiten der Fügeteile, der Klebschicht und den Grenzschichten zusammensetzt.

Die Festigkeit der in dieser Arbeit verwendeten Fügeteile aus Baustahl ist durch die Kennwerte Streckgrenze und Zugfestigkeit beschrieben und beispielsweise in (DIN EN 1993-1-1) definiert. Des Weiteren setzt sich die Festigkeit einer geklebten Verbindung aus der Festigkeit der Adhäsionsverbindungen zwischen Klebstoffmolekülen und den Molekülen der Fügeteilpartner sowie der Festigkeit der Kohäsionsbindungen zwischen den einzelnen Klebstoffmolekülen zusammen. Dies ist schematisch in Abbildung 2.8 dargestellt (MB 382 2012; HABENICHT 2009).

Die *Adhäsion* eines Klebstoffs auf einem metallischen Substrat setzt sich aus verschiedenen Mechanismen zusammen:

- Die spezifische Adhäsion beschreibt die Haftung von Klebstoffmolekülen an Substratoberflächen durch chemische, physikalische und thermodynamische Kräfte.
- Die formschlüssige Verklammerung zwischen Fügeteiloberfläche und Klebstoff wird als mechanische Adhäsion bezeichnet.

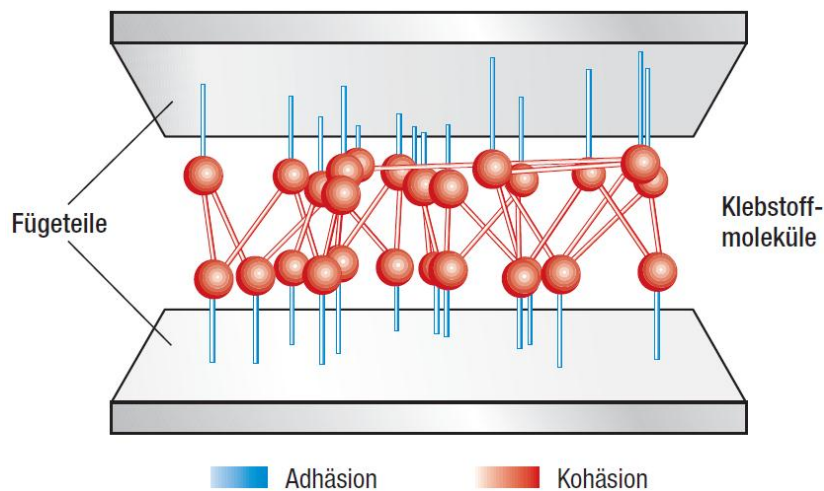


Abbildung 2.8 Schematische Darstellung von Adhäsion und Kohäsion (MB 382 2012)

In den vergangenen Jahrzehnten wurden verschiedene Theorien zum Verständnis der spezifischen Adhäsion entwickelt. Eine Übersicht der klassischen Adhäsionstheorien gibt beispielsweise (BROCKMANN 2005). Verschiedene Wechselwirkungskräfte zwischen Klebstoff und Substrat tragen zur Adhäsion bei. Diese werden in chemische Hauptvalenzbindungen und zwischenmolekulare Nebervalenzbindungen unterteilt. Zunächst können durch chemische Reaktionen kovalente Bindungen zwischen Klebstoff und Substrat entstehen. Zwischenmolekulare Wasserstoffbrücken sowie Van der Waals-Kräfte, die zu einer gegenseitigen Anziehung zwischen Klebstoff und Fügeile führen, sind als weitere Bindungsarten zu nennen. Sie entstehen aufgrund elektrischer Felder, die eine energetisch vorteilhaftere Ausrichtung der Moleküle bewirken. Van der Waals-Kräfte können weiter in Orientierungs-, Dispersions- sowie Induktionskräfte unterteilt werden. Details hierzu können zum Beispiel (WISTUBA 1980) entnommen werden. Die mit Abstand höchsten Bindungsenergien weisen die chemischen Bindungen auf. Diesen folgen Wasserstoffbrücken sowie Van der Waals-Kräfte.

In raue oder poröse Substratoberflächen kann der noch flüssige Klebstoff bei ausreichender Benetzungsfähigkeit eintreten. Nach der Aushärtung entsteht eine formschlüssige Verbindung, die als mechanische Adhäsion bekannt ist. Sie spielt jedoch auf Metalloberflächen eine untergeordnete Rolle und liefert alleine auch keine Erklärung für die Haftung auf sehr glatten Oberflächen.

Bei der Verbindung von polymeren Fügeile kann darüber hinaus eine zur Haftung beitragende gegenseitige Durchdringung der Polymermoleküle auftreten. Diese wird als Autohäsion bezeichnet und ist bei undurchdringlichen Metalloberflächen nicht möglich.

Die beschriebenen Wechselwirkungskräfte zwischen Klebstoff und Substrat wirken lediglich in unmittelbarer molekularer Nähe (0,1 - 1,0 nm). Dies erfordert eine gute Benetzung

der Füge­teiloberfläche mit Klebstoff. Insbesondere aufgrund der bei metallischen Füge­teilpartnern üblichen Oberflächenvorbehandlung durch einen Strahlprozess und die daraus resultierenden größeren Rauhtiefen ist speziell bei hochviskosen Klebstoffen eine ausreichende Benetzung der Oberfläche zu überprüfen und zu gewährleisten. Die Adhäsion beruht also nicht nur auf der chemischen Zusammensetzung der Klebstoffe und Füge­teile sondern auch auf der Oberflächenbeschaffenheit der Substrate (HABENICHT 2009; EHRENSTEIN 2004; RASCHE 2012; WISTUBA 1980).

Die Kohäsion bezeichnet die innere Festigkeit des Klebstoffes. Diese basiert zum einen auf Bindungskräften zwischen den Klebstoffmolekülen, die sich wie oben beschrieben aus Hauptvalenz- und Nebervalenzbindungen zusammensetzen. Der wesentliche Unterschied zur Adhäsion ist jedoch, dass die Bindungskräfte zwischen gleichartigen Molekülen auftreten. Des Weiteren trägt die mechanische Verknäulung oder Verklammerung einzelner fadenförmiger Klebstoffmoleküle und ihrer Seitengruppen wesentlich zur Kohäsionsfestigkeit bei. Neben der Festigkeit des ausgehärteten Klebstoffes beschreibt die Kohäsion auch die Zähigkeit bzw. Fließfähigkeit eines Klebstoffes vor der Aushärtung. Als wesentliche Einflussparameter der Kohäsionsfestigkeit sind die molekulare Masse, die Polarität sowie die Anzahl und Größe der Seitengruppen zu nennen.

Von zentraler Bedeutung für die Festigkeit einer geklebten Verbindung ist ein ausgewogenes Verhältnis von Adhäsions- und Kohäsionsfestigkeit eines Klebstoffes unter Berücksichtigung der jeweiligen Füge­teiloberflächen. Dieses kann durch spezifische Oberflächenvorbehandlung, Klebstoffformulierung sowie die Verarbeitung des Klebstoffes optimiert werden (HABENICHT 2009; WISTUBA 1980).

2.3.2 Einteilung der Klebstoffe

In der Literatur werden Klebstoffe in der Regel nach zwei unterschiedlichen Kriterien gruppiert. Die Einteilung nach der chemischen Basis unterscheidet zwischen organischen und anorganischen Verbindungen (Abbildung 2.9). Die Mehrzahl der organischen Klebstoffe basiert auf synthetisch hergestellten Ausgangssubstanzen, es gibt jedoch auch Klebstoffe auf natürlicher Basis (z.B. Eiweiß, Harze).

Anorganische Klebstoffe (z.B. Silicate, Borate etc.) werden industriell nur in Spezialanwendungsgebieten eingesetzt und sind aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung auch für den Einsatz bei hohen thermischen Beanspruchungen geeignet. Silikone beinhalten organische und anorganische Verbindungen und sind somit nicht eindeutig zuzuordnen (HABENICHT 2008).

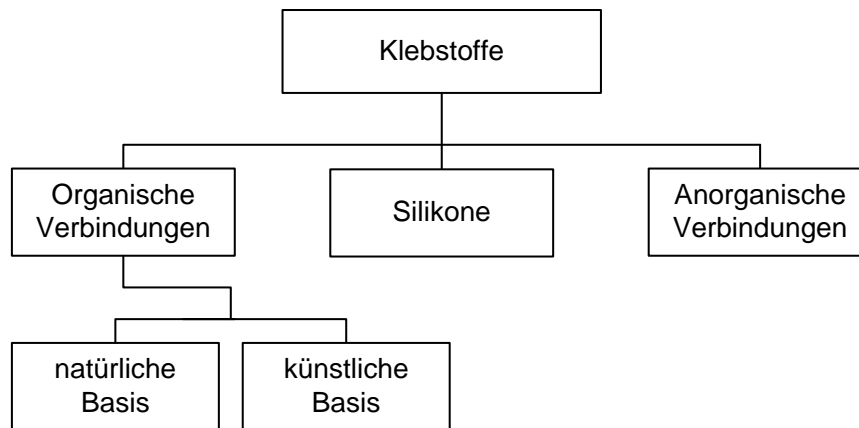


Abbildung 2.9 Einteilung von Klebstoffen nach der chemischen Basis nach (HABENICHT 2008)

Zusätzlich können Klebstoffe nach ihrem Aushärtemechanismus klassifiziert werden (siehe Abbildung 2.10). Dabei wird zwischen chemisch und physikalisch härtenden Klebstoffen sowie reaktiven Schmelzklebstoffen unterschieden. Die nur aus einer Komponente bestehenden physikalisch aushärtenden Klebstoffe ändern ihren Aggregatzustand von niedrigviskos zu fest nicht durch chemische Veränderung. Die Aushärtung des Polymers erfolgt durch Erstarrung aus Schmelzen, Verdampfung oder Diffusion. So härten beispielsweise Dispersionsklebstoffe durch das Verdunsten von Wasser aus. Kontaktklebstoffe wiederum haften nach beidseitigem Auftrag und Verdunsten eines Lösemittels sowie Aufbringung eines ausreichenden Anpressdruckes.

Die Gruppe der chemisch härtenden Klebstoffe (Reaktionsklebstoffe) härtet durch chemische Reaktion zwischen den Klebstoffkomponenten aus. Bei diesem zeitabhängigen Vorgang entstehen aus fließfähigen Monomeren feste Polymere, die über eine hohe Molekularmasse sowie eine hohe mechanische Widerstandsfähigkeit verfügen. Die möglichen Reaktionsarten werden unterteilt in Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition. Bei der Polymerisationsreaktion erfolgt die Verbindung der Monomere durch das Aufbrechen der Kohlenstoffdoppelbindung und dadurch frei werdende Valenzen, die eine Vernetzung mit anderen Ketten ermöglichen. Um die Reaktion auszulösen, bedarf es der Zufuhr eines Starters.

Die Polykondensation wird durch eine chemische Reaktion der Partner bei Abtrennung eines Spaltproduktes (z.B. Wasser, Säure oder Alkohol) charakterisiert. Die Verbindung der beiden verschiedenen reaktiven Monomere zu Polymeren läuft bei der Polyadditionsreaktion durch Wanderung eines aktiven Wasserstoffatoms zur funktionalen Gruppe des zu vernetzenden Monomers ab. Die in technischen Anwendungen weit verbreiteten Epoxidharz- und Polyurethanklebstoffe härten in der Regel durch die Polyadditionsreaktion aus. In der Anwendung von Klebstoffen spielt diese Unterscheidung des chemischen Aushärtevorgangs eine eher geringere Rolle. Große Bedeutung kommt jedoch der Unterscheidung der chemisch härtenden Klebstoffe in Einkomponenten- und Zweikomponenten-

tensysteme zu. Das Abbinden von Zweikomponenten-Klebstoffen wird durch Mischung der beiden in einem stöchiometrischen Verhältnis vorhandenen Grundsubstanzen initiiert. Bei chemisch härtenden Einkomponentensystemen führen physikalische Effekte (z. B. Temperaturerhöhung, Bestrahlung mit UV-Licht etc.) zum Beginn der Aushärtungsreaktion (HABENICHT 2009, 2008; BROCKMANN 2005; MB 382 2012).

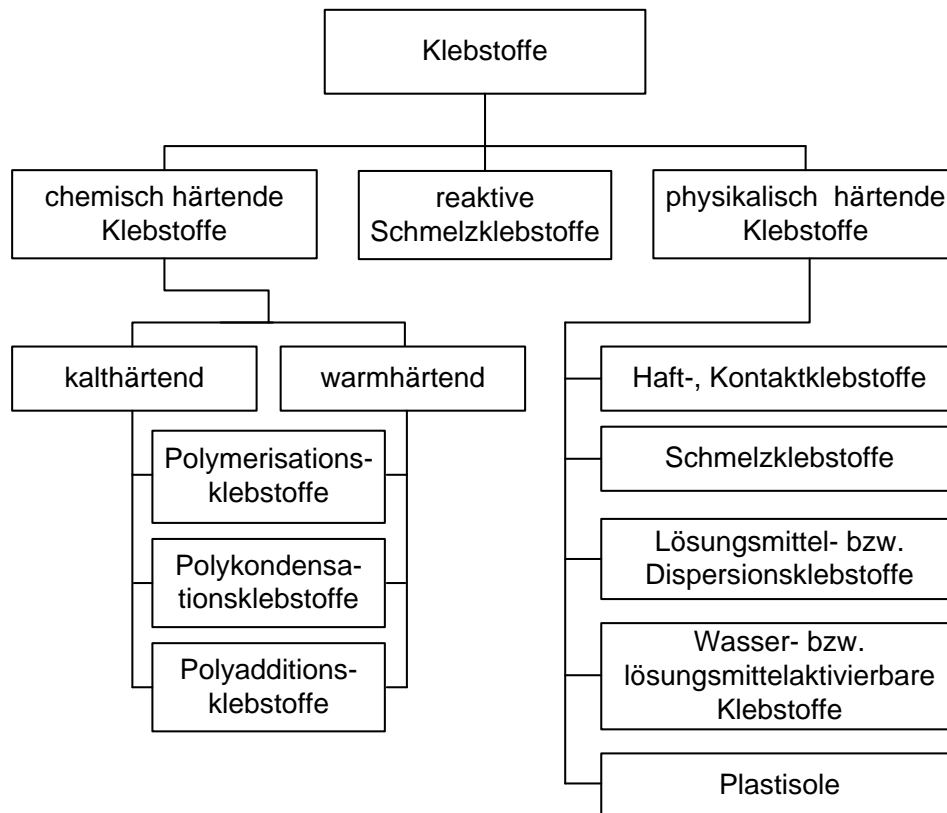


Abbildung 2.10 Einteilung von Klebstoffen nach dem Abbindemechanismus nach (HABENICHT 2009)

2.3.3 Epoxidharze und Polyurethane

Aufgrund der weiten Verbreitung in strukturellen Anwendungen sowie der Verwendung in der vorliegenden Arbeit soll nachfolgend kurz auf die chemisch härtenden Klebstoffe Epoxidharze und Polyurethane eingegangen werden.

Epoxidharzklebstoffe

Epoxidharzklebstoffe sind in technischen Anwendungen aufgrund ihrer vorteilhaften mechanischen Eigenschaften weit verbreitet. Ihr Name ist auf die reaktionsfreudige Epoxidgruppe an den Enden der Monomere zurückzuführen. Epoxidgruppen enthalten einen

dreigliedrigen Oxiran-Ring, bestehend aus einem Sauerstoffatom sowie zwei Kohlenstoffatomen (siehe Abbildung 2.11).

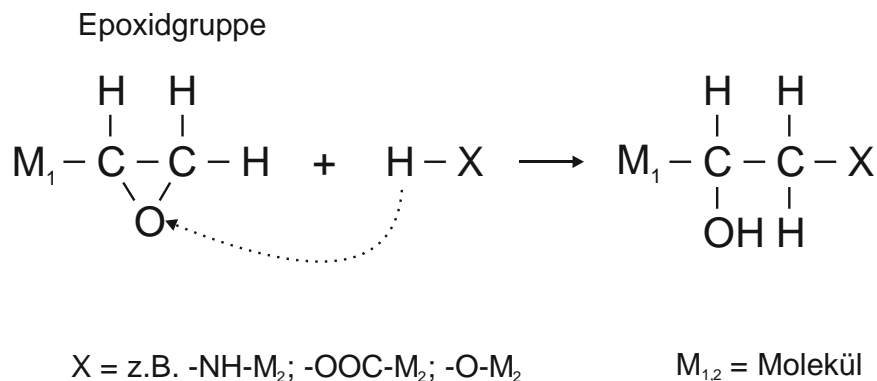


Abbildung 2.11 Reaktionsschema Polyaddition bei Epoxidharzen nach (Habenicht 2009)

Die Vernetzung wird durch Reaktion der beiden Komponenten „Harz“ und „Härter“ in der Regel als Polyadditionsreaktion eingeleitet. Die Harzkomponente der meisten Epoxidharze basiert auf Bisphenol A. Als Härter kommen in der Regel Amine zum Einsatz. Das Reaktionsschema der Polyaddition bei Epoxidharzen ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Nach der Aufspaltung des Epoxidrings und dadurch frei werdender Valenzen vernetzen sich die Monomere unter Verschiebung eines Wasserstoffatoms an die Epoxidgruppe zu räumlich verknüpften Duromeren. Eine vollständige Aushärtung wird nur bei genauer Einhaltung des stöchiometrischen Verhältnisses der beiden Komponenten und guter Durchmischung erreicht.

Einkomponentige Epoxidharzklebstoffe bestehen aus zwei bereits gemischten Grundstoffen. Der Abbindevorgang erfolgt jedoch erst bei erhöhter Temperatur, weshalb diese Klebstoffe auch als warmhärtend bezeichnet werden. Für den Einsatz im konstruktiven Stahlbau erscheinen zweikomponentige Klebstoffe, die bereits bei Raumtemperatur reagieren, geeigneter. Für Anwendungen im Bauwesen ist jedoch interessant, dass der Aushärteprozess durch gezielte Temperaturerhöhung beschleunigt und die Festigkeit bzw. Beständigkeit aufgrund der höheren Polymernetzung gesteigert werden können. Details zu den während der Aushärtung stattfindenden chemischen Prozessen können beispielsweise (HABENICHT 2009) oder (WISTUBA 1980) entnommen werden.

Epoxidharzklebstoffe zeichnen sich durch sehr gute adhäsive Eigenschaften auch auf unterschiedlichen Substraten sowie hohe Verbundfestigkeiten aus. In Kombination mit ihrer ebenfalls guten Alterungsbeständigkeit erklärt dies auch den häufigen Einsatz von Epoxidharzklebstoffen bei strukturellen Anwendungen im Automobil- und Luftfahrzeugbau (HABENICHT 2008, 2009; RASCHE 2012; BROCKMANN 2005).

Polyurethanklebstoffe

Ebenfalls sehr gute mechanische Kennwerte weisen Polyurethanklebstoffe (kurz: PU oder PUR) auf. Polyurethanklebstoffe härten typischerweise über das Prinzip der Polyaddition aus. Diese wird bei Zweikomponenten-PUR-Klebstoffen durch Mischen der beiden Substanzen initiiert. Die Härterkomponente weist eine reaktive Isocyanatgruppe auf, die Monomere mit aktivem Wasserstoffatom i. d. R. aus einer Hydroxygruppe anbindet. Diese OH-Gruppen sind bei Polyolen (bevorzugt Polyesterpolyole oder Polyether) mehrfach vorhanden. Polyole stellen damit die Harzkomponente des PUR-Klebstoffes dar. Das Reaktionsschema zur Urethanbildung ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

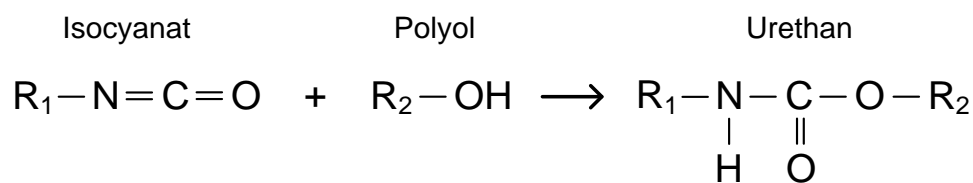


Abbildung 2.12 Reaktionsschema Polyaddition bei Polyurethanen nach (Habenicht 2009)

In der Polyadditionsreaktion wird die Stickstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung der Isocyanatgruppe aufgelöst und das Wasserstoffatom der Hydroxygruppe an den Stickstoff angebunden. Weiterhin vernetzt die R₂-O-Gruppe des Polyols mit dem Kohlenstoffatom der Isocyanatgruppe. Aufgrund des von den chemischen Grundstoffen abhängigen Vernetzungsgrades härten PUR-Klebstoffe zu Elastomeren oder Duromeren aus.

Die Vielzahl von verbundenen chemischen Ausgangssubstanzen mit den beschriebenen reaktiven Gruppen erfordert eine weitere Einteilung der Polyurethanklebstoffe. Diese zeigt die (HABENICHT 2008) entnommene Abbildung 2.13. Zunächst werden lösungsmittelfreie und lösungsmittelhaltige Klebstoffsysteme unterschieden. In beiden Untergruppen wird zudem zwischen Einkomponenten- und Zweikomponenten-Klebstoffen differenziert. Wie bei den Epoxidharzen findet die Aushärtung bei Zweikomponenten-Klebstoffen in der Regel schon bei Raumtemperatur statt, die chemische Reaktion bei Einkomponentensystemen erfolgt erst bei erhöhter Temperatur oder unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit. Details zu den einzelnen Klebstoffen können der Literatur (HABENICHT 2009) entnommen werden.

Hervorzuheben bei Polyurethanen sind die sehr guten adhäsiven Eigenschaften auf verschiedenen Substraten. Verbundfestigkeit und chemische Beständigkeit hängen vom Vernetzungsgrad der Polymere ab und erreichen auch in Hinblick auf die Anforderungen an strukturelle Klebungen sehr gute Werte. Im Vergleich zu den Epoxidharzen zeigen sich PUR-Klebstoffe zwar weniger wärmebeständig, weisen aber eine höhere Klebschichtverformbarkeit auch bei tiefen Temperaturen auf. Eingesetzt werden PUR-Klebstoffe in viel-

fältigen Bereichen von der Schuh- bis zur Automobilindustrie. So werden beispielsweise Glasscheiben im Fahrzeugbau mit PUR-Klebstoffen mit der Karosserie verbunden (BROCKMANN 2005; HABENICHT 2008, 2009; RASCHE 2012).

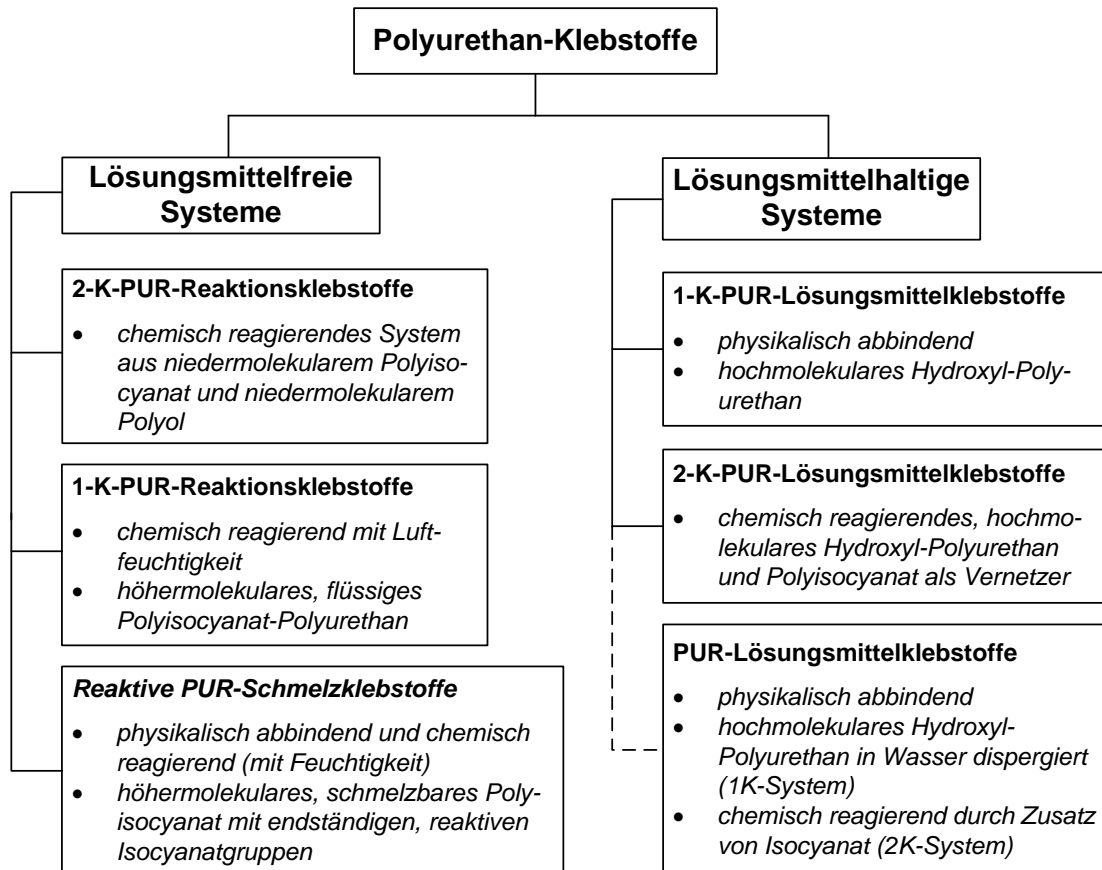


Abbildung 2.13 Einteilung der Polyurethanklebstoffe nach (HABENICHT 2008)

Die beschriebenen vorteilhaften Eigenschaften hinsichtlich Adhäsion, Verbundfestigkeit und Alterungsbeständigkeit weisen darauf hin, dass Epoxidharze und Polyurethane auch für hochbeanspruchte Klebverbindungen im Bauwesen geeignet sind. Im Rahmen dieser Arbeit werden ein Epoxidharz- sowie ein Polyurethanklebstoff untersucht. Diese Klebstoffe sind in Abschnitt 4 detailliert beschrieben.

2.3.4 Versagensarten geklebter Verbindungen

Das Versagen einer geklebten Verbindung kann bei mechanischer Beanspruchung sowohl im Fügeteilwerkstoff als auch im Klebstoff auftreten. Zur Analyse und Beschreibung des Bruchverhaltens geklebter Verbindungen können die in (DIN EN ISO 10365) enthaltenen Bezeichnungen der Bruchbilder herangezogen werden. Diese sind in Abbildung 2.14 zusammengestellt und auf die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Probekörper angepasst.



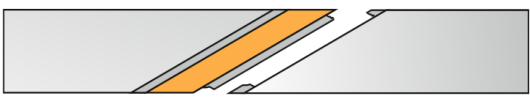
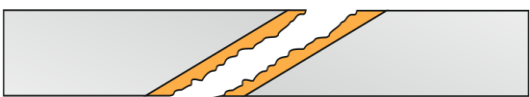
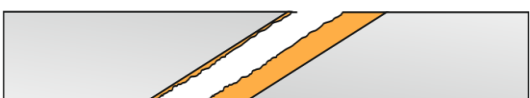
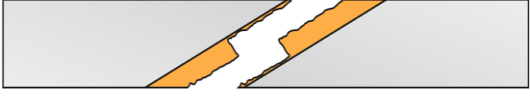



| Bruchbilder nach DIN EN ISO 10365 | | Beschreibung und Kurzbezeichnung |
|-----------------------------------|---|--|
| Fügeteilwerkstoff |  | Fügeteilbruch (SF) |
| |  | Kohäsiver Fügeteilbruch (CSF) |
| |  | Delaminierbruch einer aufgetragenen Schicht (DF) |
| Klebstoff |  | Kohäsionsbruch (CF) |
| |  | Substratnaher spezieller Kohäsionsbruch (SCF) |
| |  | Adhäsionsbruch (AF) |
| |  | Adhäsionsbruch (AF) |
| |  | Adhäsions- und Kohäsionsbruch mit Schädlung (ACFP) |
| |  | Adhäsions- und Kohäsionsbruch mit Schädlung (ACFP) |

Abbildung 2.14 Bruchbilder geklebter Verbindungen in Anlehnung an (DIN EN ISO 10365)

Häufig setzen sich reale Bruchbilder aus mehr als einer Versagensart zusammen. In diesen Fällen ist nach (DIN EN ISO 10365) der ungefähre prozentuale Anteil der jeweiligen Versagensart zu dokumentieren. Bei der Beschreibung eines Delaminierungsbruches (DL) ist die vom Füge teil abgelöste Schicht (z.B. Primer, Lack etc.) anzugeben.

Da bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Stahlklebungen aufgrund der im Vergleich mit Klebstoffen deutlich höheren Festigkeit von Baustählen kein Versagen der Füge teile zu erwarten ist, wird der Fokus nachfolgend auf die Beschreibung von Adhäsions- und Kohäsionsbrüchen gesetzt.

Ein Adhäsionsbruch liegt vor, wenn sich der Klebstoff vollständig von der Substratoberfläche ablöst und keine Klebstoffreste mehr detektierbar sind. Insbesondere bei strukturierten Oberflächen kann dies jedoch nur mit Hilfe von mikroskopischen Verfahren überprüft werden. Adhäsionsbrüche können sowohl vollständig an einer Füge teilfläche auftreten, es können aber auch Klebstoffreste an beiden Füge teilen haften bleiben. Bei reinen Adhäsionsbrüchen kann die Verbindungsfestigkeit unter Umständen durch eine spezifische Oberflächenvorbehandlung erhöht werden. Ein Adhäsionsbruch im strengen Sinne liegt jedoch sehr selten vor. Häufig tritt das Versagen im Klebstoff in unmittelbarer Nähe der Substratoberfläche auf. Dies wird als substratnaher spezieller Kohäsionsbruch bezeichnet und kann mit der Theorie der „weak boundary layers“ erklärt werden. Vereinfachend zusammengefasst besagt diese, dass direkt an der klebstoffseitigen Phasengrenze eine äußerst dünne Klebstoffschicht mit geringeren Festigkeitseigenschaften als im ungestörten Kernbereich vorliegt. Folglich versagt die Verbindung in diesem Bereich. Detailliertere Informationen zu diesem Sachverhalt können (HABENICHT 2009) entnommen werden. Das beschriebene Versagensbild stellt einen Sonderfall des Kohäsionsbruches dar, der durch ein Versagen im Klebstoff und damit an beiden Füge teilpartnern verbleibende Klebstoffreste charakterisiert ist. Bei Kohäsionsbrüchen kann die Tragfähigkeit der Klebverbindung durch Verwendung eines Klebstoffes mit höherer Festigkeit erhöht werden (HABENICHT 2009; DIN EN ISO 10365; RASCHE 2012; BROCKMANN 2005).

2.4 Versagenskriterien für geklebte Verbindungen

In der Literatur sind unterschiedliche Ansätze zur Definition von Versagenskriterien zu finden. Prinzipiell kann zwischen kontinuumsmechanischen, bruchmechanischen und schädigungsmechanischen Ansätzen zur Beschreibung des Versagens von Klebverbindungen unterschieden werden. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Ansätze ist in (DA SILVA UND CAMPILHO 2012) enthalten.

In nahezu allen Bereichen des konstruktiven Ingenieurbaus finden bei der Auslegung von Bauteilen und Verbindungen spannungsbasierte Nachweiskonzepte Anwendung. So werden bei der Bauteilbemessung im Stahlbau in der Regel die aus den Belastungen resultierenden einwirkenden Spannungen einem Festigkeitsgrenzwert gegenübergestellt. Die Nachweisführung auf der Ebene von Schnittgrößen (Kräfte / Momente) nach (DIN EN 1993-1-1; DIN EN 1993-1-8) basiert ebenso auf Spannungen, die mit Querschnittswerten multipliziert sind. Auch bei den Nachweiskonzepten des Stahlbeton-, Holz- und Grundbaus stellt die mechanische Spannung den zentralen Kennwert dar. Deshalb ist auch für die Auslegung von geklebten Verbindungen in bautechnischen Anwendungen die Entwicklung eines spannungsbasierten Nachweisverfahrens anzustreben (Kapitel 5).

Vor diesem Hintergrund wird der Schwerpunkt im Folgenden auf wesentliche kontinuumsmechanische Versagenskriterien - basierend auf Spannungen oder Dehnungen - für geklebte Verbindungen gelegt. Eine detaillierte Zusammenfassung zu Versagenskriterien geklebter Verbindungen ist in (QUISPE RODRÍGUEZ ET AL. 2012) sowie (DA SILVA UND CAMPILHO 2012) zu finden. Einwirkende Spannungen oder Dehnungen können beispielsweise unter Verwendung analytischer Lösungsansätze ermittelt werden. Darüber hinaus ermöglicht die Methode der Finiten Elemente die Bestimmung einwirkender Spannungen und Dehnungen auch für beliebige Geometrien und komplexes Werkstoffverhalten, wo keine analytischen Lösungen vorliegen. Auf die Spannungsverteilung in geklebten Verbindungen wird detailliert in Abschnitt 2.5 eingegangen.

Zur Beschreibung des Versagens der Klebverbindung wird in der Literatur vielfach eine einwirkende maximale Spannungs- oder Dehnungskomponente herangezogen. Häufige Verwendung findet die analytisch oder numerisch berechnete maximale Schubspannung, der die Schubfestigkeit des Klebstoffs als einzuhaltender Grenzwert gegenübergestellt wird (DA SILVA UND CAMPILHO 2012). Begründet werden kann diese Wahl häufig durch die spezifische Geometrie der untersuchten Klebverbindung und die daraus resultierende Dominanz einer Spannungskomponente. So verwendet beispielsweise GREENWOOD (1969) für ebene zweischnittige Überlappverbindungen die maximale Schubspannung als Versagenskriterium. LEE UND LEE (2006) wenden das Kriterium auf torsionsbeanspruchte rohrförmige Überlappungsklebung an. Diese Vorgehensweise erlaubt jedoch in der Regel keine geometrieunabhängige Aussage über die Festigkeit geklebter Verbindungen.

Des Weiteren wird in der Literatur die maximale Hauptspannung bzw. Hauptdehnung als Kriterium zur Beschreibung der Tragfähigkeit einer geklebten Verbindung herangezogen. So verwenden CROCOMBE ET AL. (1990) die durch nichtlineare numerische Berechnungen bestimmte maximale Hauptspannung zur Prognose der Tragfähigkeit von ebenen Aluminiumklebungen unter Spaltzug- sowie Druckscherbeanspruchung. (HARRIS UND ADAMS 1984) wiederum berechnen mit Hilfe numerischer Analysen die Tragfähigkeit einschnittiger Überlappklebungen durch ein auf der maximalen uniaxialen Zugspannung bzw. Zugdehnung basierendes Versagenskriterium (QUISPE RODRÍGUEZ ET AL. 2012).

Das Festigkeitskriterium nach von Mises wird von IKEGAMI ET AL. (1990) zur Untersuchung der Tragfähigkeit geschäfteter Klebverbindungen zwischen Füge­teilen aus Metall sowie glasfaserverstärkten Kunststoffen herangezogen. Die Verwendung dieses Kriteriums zur Festigkeitsprognose wird jedoch in mehreren Veröffentlichungen kritisch gesehen (QUISPE RODRÍGUEZ ET AL. 2012; DA SILVA UND CAMPILHO 2012). Eine gegenüber dem von Mises-Kriterium erweiterte Hypothese, die eine Abhängigkeit vom hydrostatischen Spannungsanteil berücksichtigt, stellen (RAGHAVA ET AL. 1973) vor. Außerdem kann die ebenso den hydrostatischen Spannungszustand berücksichtigende Fließbedingung nach SCHLIMMER genannt werden (SCHLIMMER 1982, 2003).

In den vorgenannten Arbeiten werden Maximalwerte der Spannung bzw. Dehnung als versagensmaßgebend betrachtet. Aufgrund der Singularitäten, insbesondere an den scharfen Kanten der Klebfugenenden, ist der Maximalwert der berechneten Spannung bzw. Dehnung jedoch abhängig von der im numerischen Modell verwendeten Netzgröße. Bei einer zu groben Diskretisierung etwa kann dies bei der Auswertung von Spannungen im Bereich der Singularitäten zu einer Überschätzung der Verbindungstragfähigkeit führen. Zur Lösung dieser Problematik finden sich in der Literatur unterschiedliche Ansätze (DA SILVA UND CAMPILHO 2012).

So zeigen ADAMS UND HARRIS (1987), dass eine Ausrundung der Füge­teilkanten an den Klebfugenenden im numerischem Modell zu einer Begrenzung der maximalen Spannungen und Dehnungen und somit zu einer gleichförmigeren Spannungs- und Dehnungsverteilung führt. Dieser Effekt wird auch durch die festgestellte Steigerung der experimentell bestimmten Tragfähigkeit geklebter Überlappverbindungen mit geometrisch modifizierten Füge­teilkanten bestätigt (ADAMS UND HARRIS 1987). Die numerische Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Ausrundungsradien an den Füge­teilenden einschnittiger Überlappverbindungen auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht ist außerdem Gegenstand von (ZHAO ET AL. 2011b).

Komplexere Lösungsansätze stellen Versagenskriterien dar, bei denen Spannungen oder Dehnungen in einer finiten Zone um die Spannungskonzentration oder in einem definierten Abstand von der Singularität ausgewertet werden (QUISPE RODRÍGUEZ ET AL. 2012). So

veröffentlichen CLARK UND MCGREGOR (1993) ein Kriterium, das das Versagen der Klebung dann definiert, wenn die maximale Hauptspannung in einer finiten Zone orthogonal zur Richtung dieser Spannung die Bruchzugspannung des Klebstoffs überschreitet. Die Größe dieser Zone ist ein für jeden Klebstoff durch analytische und experimentelle Untersuchungen zu bestimmender Parameter. Für spröde versagende Klebstoffe entwickeln ZHAO ET AL. (2011c) ein Versagenskriterium, bei dem die maximalen Hauptspannungen, gemittelt über eine definierte Länge (z.B. Klebschichtdicke), der uniaxialen Zugfestigkeit des Klebstoffs gegenübergestellt werden. Für duktile Klebstoffe wird ein auf der Energiedichte in den Bereichen der Klebfugenenden basierendes Versagenskriterium vorgeschlagen.

Die Schälfestigkeit geklebter Aluminiumproben untersuchen CROCOMBE UND ADAMS (1981, 1982). Zur Festigkeitsprognose werden in einem definierten Abstand von der Singularität ausgewertete kritische Dehnungen herangezogen. Des Weiteren verwenden beispielsweise TOWSE ET AL. (1997) kritische Dehnungen in einem definierten Abstand von der Singularität als Grundlage für die Berechnung des Versagens doppelter Überlappungsklebung. CROCOMBE (1989) schlägt ein als „global yielding“ bezeichnetes Versagenskriterium für geklebte Verbindungen vor. Dies tritt ein, wenn Fließen auf der Gesamtlänge eines Pfades einer ebenen Überlappungsklebung auftritt.

Wie bereits erwähnt können neben den beschriebenen auf der Kontinuumsmechanik basierenden Kriterien bruch- sowie schädigungsmechanische Konzepte zur Definition des Versagens verwendet werden. Wie bereits verdeutlicht stellen spannungsbasierte Nachweisverfahren die Grundlage der Bemessung in nahezu allen Bereichen des konstruktiven Ingenieurbaus dar. Bruch- und schädigungsmechanische Ansätze sind deshalb kurzfristig nicht in die Bemessungspraxis des Bauwesens einzuführen. Deshalb wird auf diese Ansätze nicht weiter eingegangen und auf die Zusammenfassung in (DA SILVA UND CAMPILHO 2012) verwiesen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass kein Konsens über ein geeignetes Versagenskriterium zur Beschreibung der Festigkeit geklebter Verbindungen vorliegt. Zudem basieren die Versagenskriterien in der Regel auf nur einer Spannungs- oder Dehnungskomponente. In quasi allen Klebverbindungen ist jedoch ein mehrachsiger Spannungszustand vorhanden. Aus diesen Gründen wird in Kapitel 5 dieser Arbeit ein spannungsbasierendes, die Interaktion verschiedener Spannungskomponenten berücksichtigendes Versagenskriterium erarbeitet.

2.5 Spannungsverteilung in Klebverbindungen

2.5.1 Ebene Überlappungsklebung

Voraussetzung für die Anwendung spannungsbasierender Versagenskriterien (Abschnitte 2.4 und 5) ist die Kenntnis des aus der Verbindungsbeanspruchung resultierenden Spannungszustandes in der Klebung. Zur Bestimmung der Spannungsverteilung in Klebfugen sind in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl analytischer Ansätze entwickelt worden. Prinzipiell kann zwischen Modellen, die den Spannungszustand in ebenen Überlappungsklebung beschreiben, sowie Lösungen für zylindrische Klebgeometrien unterschieden werden. In der Literatur kann die Implementierung des Werkstoffverhaltens von Fügeteilen und Klebstoff im Wesentlichen in drei Kategorien eingeteilt werden (DA SILVA ET AL. 2009b). Zunächst wird sowohl dem Klebstoff als auch den Fügeteilen ein linear-elastisches Materialgesetz zugewiesen. Andere Lösungsansätze implementieren das nichtlineare Werkstoffverhalten des Klebstoffs oder berücksichtigen als dritte Variante Nichtlinearitäten sowohl bei den Fügeteilen als auch im Klebstoff. Nachfolgend wird eine Auswahl analytischer Modelle zur Quantifizierung der Spannungsverteilung in ebenen Klebverbindungen vorgestellt.

Der erste Berechnungsansatz geht auf das Jahr 1938 zurück. In (VOLKERSEN 1938) wird die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten genieteten Verbindungen beschrieben. Dieses Modell ist aufgrund der Vereinfachung der Nietgeometrie als homogene Fläche auch als Ansatz zur Berechnung der Spannungsverteilung in Klebverbindungen geeignet und wurde in (VOLKERSEN 1953) entsprechend angepasst. Der Rechenansatz erlaubt die Bestimmung des Schubspannungsverlaufs entlang der Klebfuge unter Berücksichtigung der Elastizität und damit der veränderlichen Normaldehnung der Fügeteile. Dies führt bei graphischer Auswertung des Volkersen-Ansatzes zu der charakteristischen Schubspannungsverteilung, die an den Überlappungsenden ihre Maxima hat. Nicht berücksichtigt in diesem Modell sind Biegemomente aus Exzentrizität, unterschiedliche Fügeteilabmessungen sowie nichtlineares Werkstoffverhalten. Zudem wird von einer ausschließlichen Schubbeanspruchung der Klebfuge ausgegangen (DA SILVA ET AL. 2009a; HABENICHT 2009).

Bei einschnittigen Überlappungsklebung mit axialer Beanspruchung wirkt ein Biegemoment, das auf die Exzentrizität und die damit verbundene gegenseitige Verdrehung der Fügeteile zurückgeführt werden kann. Dies führt zu einer exzentrischen Krafteinleitung und dazu, dass in der Klebfuge neben Schub- auch Normalspannungen rechtwinklig zur Fügefläche auftreten. Dieser geometrische Aspekt wurde erstmalig im Berechnungsansatz von GOLAND und REISSNER durch Einführung eines Exzentrizitätsfaktors berücksichtigt (GOLAND UND REISSNER 1944). Schematisch sind die Modelle, die den analytischen

Lösungen von VOLKERSEN bzw. GOLAND und REISSNER zu Grunde liegen, in Abbildung 2.15 dargestellt.

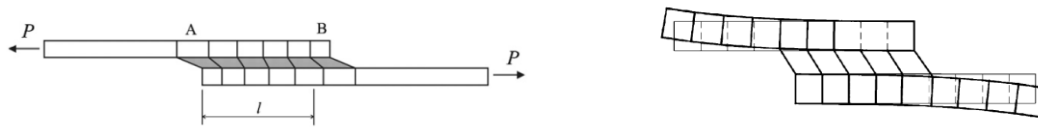


Abbildung 2.15 Modelle der Lösungsansätze nach Volkersen (links) bzw. Goland und Reissner (rechts); aus (DA SILVA ET AL. 2009a)

Als Beispiel für neuere Berechnungsmodelle mit linearem Werkstoffverhalten sowie numerischem Lösungsansatz seien nachfolgende Veröffentlichungen genannt. FROSTIG ET AL. (1999) stellen einen geschlossenen Lösungsansatz für einfache Überlappklebungen vor, der die Randbedingungen an den freien Klebfugenenden berücksichtigt und diskutieren die Eignung des Ansatzes in Hinblick auf unterschiedliche geometrische Ausführungen der Klebfugenenden. ZHAO ET AL. (2011a) entwickeln ein theoretisches Modell zur Spannungsanalyse in der Klebfuge einfacher Überlappverbindungen, das unterschiedliche Werkstoffeigenschaften sowie Bauteildicken der beiden Fügeteile berücksichtigt.

HART-SMITH entwickelte ein analytisches Modell, in dem das plastische Materialverhalten des Klebstoffs implementiert ist (HART-SMITH 1973). Hierzu wird die Klebschicht entlang der Überlappungslänge in drei Bereiche aufgeteilt. Zur Berechnung der Schubspannungsverteilung wird dem mittleren Bereich ein elastisches Werkstoffgesetz zugewiesen, für die Randbereiche der Überlappung wird ein bilineares, idealplastisches Materialverhalten angenommen (DA SILVA ET AL. 2009b). Als weiteres Beispiel eines Lösungsansatzes unter Berücksichtigung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens des Klebstoffs sei (BIGWOOD UND CROCOMBE 1990) genannt. Die Fließgrenze des Klebstoffs wird in diesem Modell vereinfachend unter Ansatz des von Mises-Kriteriums definiert.

Dieses Modell wird von CROCOMBE und BIGWOOD um ein elastisch-plastisches Werkstoffgesetz der Fügeteile erweitert (CROCOMBE UND BIGWOOD 1992) und erlaubt damit die Berücksichtigung von Werkstoffnichtlinearitäten in der gesamten Klebverbindung. (WANG ET AL. 2003) ergänzen diese Lösung durch die Implementierung der Schubverformung der Fügeteilpartner. Eine umfangreiche Übersicht über analytische Lösungsansätze zur Beschreibung des Spannungszustandes in ebenen einfachen und doppelten Überlappklebungen ist Gegenstand von (DA SILVA ET AL. 2009a). Einige der in zuvor genannter Quelle zusammengestellten Ansätze werden in (DA SILVA ET AL. 2009b) hinsichtlich des Zeitaufwandes zur Umsetzung der Rechenmodelle sowie der Genauigkeit im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen untersucht und bewertet.

2.5.2 Rohrförmige Überlappungsklebungen

Die analytische Bestimmung der Spannungen in zylindrischen Klebungen zwischen rohrförmigen Fügeteilen ist Gegenstand verschiedener Veröffentlichungen. Im Vergleich zu den ebenen Überlappungsverbindungen sind jedoch deutlich weniger Lösungsansätze für Rohrklebungen publiziert (DRAGONI UND GOGLIO 2013).

LUBKIN und REISSNER erweitern in den 1950er Jahren den bereits vorgestellten Lösungsansatz für ebene Überlappungsverbindungen (GOLAND UND REISSNER 1944) auf zylindrische Klebungen (LUBKIN UND REISSNER 1956). In diesem Modell werden die rohrförmigen Fügeteile als dünnwandige Schalen, die über eine Klebschicht mit elastischen Werkstoffeigenschaften verbunden sind, abgebildet. Unter Verwendung des vorgestellten Ansatzes erfolgt die Berechnung der Schub- und radialen Normalspannungsverteilung von 48 Rohrverbindungen unter Zugbeanspruchung. SHI und CHENG stellen einen Lösungsansatz zur Spannungsberechnung in geklebten Rohrverbindungen unter Zugbeanspruchung vor. Dieser Ansatz berücksichtigt unterschiedliche Wanddicken und Werkstoffeigenschaften der Fügeteile (SHI UND CHENG 1993). Sowohl für dick- als auch für dünnwandige Rohre werden die Spannungsverteilungen in geklebten Steckverbindungen in drei Beispielen numerisch berechnet und die Auswirkungen einzelner Parameter diskutiert. Für geklebte Rohrverbindungen unter kombinierter Beanspruchung aus axialem Zug und Torsion wird in (NAYEB-HASHEMI ET AL. 1997) unter Verwendung eines shearlag Modells die Spannungsverteilung berechnet. Annahmen hierfür sind, dass die Fügeteile bei globaler Zugbeanspruchung ausschließlich axial beansprucht werden und in der Klebung lediglich Schubspannungen auftreten.

Umfangreiche analytische Untersuchungen zu geklebten Rohrverbindungen unter Axialbeanspruchung stellen PUGNO UND CARPINTERI (2003) vor. Die Analyse von Schub- und Normalspannungsverteilung in der Klebschicht hat das Ziel, die Verbindungsgeometrie zu optimieren. In (NEMEŞ ET AL. 2006) werden Spannungsanalysen in der Klebschicht von Rohrsteckverbindungen bei Variation geometrischer Randbedingungen sowie der Werkstoffeigenschaften vorgestellt. Grundlage der Analysen ist ein analytisches Modell, das auf einer Minimierung der Potentialenergie des Spannungsfeldes unter Verwendung der Variationsmethode basiert. Dieses Modell wird in (NEMEŞ UND LACHAUD 2009) durch die zusätzliche Berücksichtigung von Radialspannungen erweitert und verfeinert.

Die vorgestellten analytischen Lösungsansätze zur Beschreibung des Spannungszustandes in zylindrischen Klebungen werden in (DRAGONI UND GOGLIO 2013) überprüft und diskutiert. Zum Vergleich dienen numerische Untersuchungen mit der Methode der finiten Elemente. Diese zeigen, dass mit den in (DRAGONI UND GOGLIO 2013) vorgestellten analytischen Lösungsansätzen die Schubspannungsverteilung in zylindrischen Klebverbindungen hinreichend genau bestimmt werden kann. Jedoch liefert lediglich der Ansatz

von LUBKIN UND REISSNER (1956) zutreffende Ergebnisse für die Normalspannungen in radialer Richtung. Beide Lösungsansätze gelten allerdings nur für linear elastische Werkstoffeigenschaften der Klebstoffe sowie imperfektionsfreie Rohrverbindungen. Deshalb können sie für die in dieser Arbeit untersuchten Klebverbindungen nicht verwendet werden.

Charakteristisch sowohl für ebene als auch für rotationssymmetrische Überlappklebungen sind die an den Enden der Klebung vorhandenen Spannungskonzentrationen. Aus diesem Grund zielen unterschiedliche Arbeiten auf die Reduktion dieser Spannungsspitzen ab. KUMAR und SCANLAN beispielsweise streben dies durch gestaffelte Klebstoffsteifigkeiten (Reduzierung des Elastizitätsmoduls) entlang der Fuge an und stellen analytische Modelle zur Quantifizierung von Spannungsintensität und Spannungsverteilung in der Klebung zwischen Rohr - Rohr (KUMAR 2009) bzw. Zylinder - Rohr (KUMAR UND SCANLAN 2010) vor. COGNARD ET AL. (2010) untersuchen mit der Methode der finiten Elemente die Spannungskonzentrationen sowohl von einfachen Überlappklebungen als auch von geklebten Rohrsteckverbindungen. Des Weiteren werden konstruktive Maßnahmen, die zu einer Modifikation der Geometrie im Überlappungsbereich und dadurch zu einer Reduktion der Spannungskonzentrationen führen, vorgestellt. Die Ergebnisse numerischer Untersuchungen zum Einfluss modifizierter Geometrien auf die axiale Tragfähigkeit zylindrischer Klebverbindungen sind in (COGNARD ET AL. 2012) veröffentlicht.

Neben den vorgenannten sind in der Literatur verschiedene weitere numerische Untersuchungen zur Spannungsverteilung in Klebungen unter Berücksichtigung verschiedenster Parameter zu finden. So werden beispielsweise in (HOSSEINI UND ÖCHSNER 2009) Unterschiede zwischen den Spannungszuständen in ebenen Überlappungsklebungen sowie geklebten Rohrsteckverbindungen analysiert und beschrieben. Als Beispiel für die numerische Bestimmung der Klebschichtspannungen infolge thermischer Beanspruchung sei (APALAK ET AL. 2003) genannt. Analytische und numerische Untersuchungen zur Spannungsanalyse von geklebten Rohren aus Verbundwerkstoffen sind außerdem Gegenstand mehrerer Veröffentlichungen. Als Beispiele seien (FROSTIG ET AL. 1999; THOMSEN 1992) genannt. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch ausschließlich metallische Füge­teile verwendet werden, wird auf die genannten und weitere Arbeiten nicht näher eingegangen.

Es zeigt sich, dass trotz einer Vielzahl an geschlossenen Lösungsansätzen vermehrt die Finite-Elemente-Methode zur Analyse des Spannungszustandes in Klebverbindungen herangezogen wird. (DA SILVA ET AL. 2009b) begründen dies mit der aufwändigen und zeitintensiven Implementierung der komplexen Lösungsansätze in ein mathematisches Berechnungsprogramm. Aufgrund dieses Aufwandes erscheinen die geschlossenen Lösungen im Vergleich mit der Finite-Elemente-Methode nicht vorteilhaft. Nicht zuletzt existiert kein Lösungsansatz, der alle geometrischen Randbedingungen abdeckt (DA SILVA

ET AL. 2009b). Dies ist im Hinblick auf die vorliegende Arbeit besonders relevant, da auch Kreishohlprofilverbindungen mit planmäßig eingebrachten Imperfektionen Untersuchungsgegenstand sind (Kapitel 6). Aus diesen Gründen wird im Rahmen dieser Arbeit für die Ermittlung des Spannungszustandes in den geklebten Verbindungen die Methode der finiten Elemente gewählt (Kapitel 5 und 6).

2.6 Kleben im Bauwesen

Im Automobil- und Luftfahrzeugbau wird die Klebtechnik schon seit Jahrzehnten im sicherheitsrelevanten Bereich erfolgreich angewendet. Dahingegen machen strukturelle Klebverbindungen im Bauwesen im Vergleich zu den herkömmlichen Fügeverfahren Schweißen und Schrauben bzw. Nieten immer noch die Minderheit aus. Einige Anwendungsgebiete der Klebtechnik im bauaufsichtlich geregelten Bereich werden im Folgenden vorgestellt. Weitergehende Informationen sind in (BUCAK UND HAGL 2006; ALBIEZ UND UMMENHOFER 2013) enthalten.

Bauteile aus Beton werden seit etwa zwanzig Jahren durch aufgeklebte Laschen oder Matten aus Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) verstärkt und saniert. Diese Maßnahme weist im Vergleich zu Verstärkungsmaßnahmen aus zusätzlicher Stahlbewehrung in Kombination mit Ort- oder Spritzbeton verschiedene Vorteile auf. Insbesondere führt das Aufkleben von CFK-Elementen nur zu einer geringen Steigerung von Eigengewicht bzw. Bauhöhe und trägt keine Feuchtigkeit in die Konstruktion ein. In Deutschland sind verschiedene Systeme bauaufsichtlich zugelassen. Dabei werden CFK-Lamellen, die auf die zu verstärkende Konstruktion aufgeklebt werden, sowie in Schlitze eingeklebte Lamellen unterschieden. Die Tragfähigkeit druckbeanspruchter Stahlbetonbauteile kann durch die Umwicklung und Verklebung mit CFK-Lamellen ebenfalls erhöht werden. Eine Übersicht über Anwendungen sowie Bemessungsmodelle für CFK-verstärkte Biegeträger und Stützen kann (BERGMEISTER 2005a, 2005b) entnommen werden.

Ebenfalls dem Bereich des Betonbaus sind chemische Dübel zuzuordnen. Diese ermöglichen eine nachträgliche Anbindung hoher Lasten mit Hilfe von in Bohrungen im Betonbauteil eingeklebten Ankern oder Gewindestangen. Auch im Bereich der Befestigungstechnik sind verschiedene bauaufsichtlich zugelassene Systeme auf dem Markt erhältlich.

Häufige Anwendung findet die Klebtechnik im Holzbau. Mit Bauteilen aus Brettschichtholz können große Spannweiten und anspruchsvolle Tragwerke realisiert werden. Als bekanntes Bauwerk kann das Expo-Dach in Hannover genannt werden. Brettschichtholz wird durch die Verklebung von faserparallelen, festigkeitssortierten Holzlamellen hergestellt. Üblicherweise kommen Nadelhölzer zum Einsatz. Für die klebtechnische Verbin-

dung der Holzlamellen kommen Melaminharz-, Polyurethan- oder Phenol-Resorcinharzklebstoffe zum Einsatz (VALLÉE ET AL. 2015). Aufgrund der sehr dünnen Klebfugen beträgt der Klebstoffanteil in Brettschichtholzbauteilen jedoch weniger als ein Prozent. Die Anwendung von Brettschichtholz ist in Deutschland in (DIN 1052) bzw. in (DIN EN 14080) bauaufsichtlich geregelt (MÜLLER UND WIEGAND 2014). Detaillierte Informationen zu geklebten Holzbauteilen wie Brettschichtholz, Balkenschichtholz, Brettsperrholz etc. können MÜLLER UND WIEGAND (2014) entnommen werden.

Untersuchungen an geklebten Holzbauanschlüssen sowie ein probabilistisches Bemessungsmodell stellen TANNERT ET AL. (2010) vor. Weiteren Einsatz findet die Klebtechnik im Holzbau bei der Querkzugverstärkung von Brettschichtholzbauteilen durch eingeklebte Gewindestangen. Dies ist auch Gegenstand aktueller Untersuchungen (GONZALES ET AL. 2016).

Im Fassadenbau werden Glasscheiben durch linienförmige Silikonklebungen mit der Unterkonstruktion aus Aluminium, Stahl oder Holz verbunden. Diese Konstruktionsweise wird als Structural Glazing bezeichnet. Sie hat im Vergleich zu gängigen mit Leisten oder Punkthaltern mechanisch befestigten Glasbauteilen den Vorteil, dass die homogene Gebäudehülle nur durch Kontaktstöße der einzelnen Bauteile oder Dichtfugen gestört wird (Abbildung 2.16). Dadurch können architektonisch sehr ansprechende Fassaden realisiert werden (HAGL 2002).



Abbildung 2.16 Structural-Glazing-Fassade, (Bild: Labor für Stahl- und Leichtmetallbau, Hochschule München), (ALBIEZ UND UMMENHOFER 2013)

Die zur Herstellung von Structural-Glazing-Fassaden eingesetzten Silikonklebstoffe müssen eine Europäische Zulassung (ETA) aufweisen. Zur Erlangung dieser Zulassung sind umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich mechanischer Festigkeit, Alterung und chemischer Beständigkeit der Silikone durchzuführen (HAGL 2007). Diese Prüfungen sind in

(ETAG 002) geregelt. Der Anwendungsbereich der ETAG ist in Deutschland jedoch stark eingeschränkt. So muss das Eigengewicht bei Structural-Glazing-Konstruktionen über mechanische Verbindungsmittel auf die Unterkonstruktion abgetragen werden. Für Einbauhöhen größer acht Meter müssen weiterhin zur Silikonklebung redundante mechanische Sicherungselemente in Windsogrichtung eingebaut werden (HAGL 2007). Über die in (ETAG 002) geregelten Konstruktionen hinaus gehen Forschungsarbeiten zu punktförmigen Silikonklebungen (HAGL 2008) oder zur klebtechnischen Verbindung von Glas und Metall unter der Verwendung von Acrylaten (WELLER UND TASCHE 2008).

Ein herausragendes Beispiel für die klebtechnische Anbindung metallischer Fassadenelemente ist das Guggenheimmuseum in Bilbao, bei dem geschuppt angeordnete Titanelemente mit einem Zweikomponenten-Silikonklebstoff auf der Unterkonstruktion befestigt sind (BUCAK UND HAGL 2006). Im Gegensatz zu dieser Einzelanwendung werden Sandwichelemente vielfach als gebäudeabschließende Bauteile eingesetzt. Sandwichelemente setzen sich aus dünnen metallischen Deckschichten sowie einer dazwischenliegenden dicken Kunststoffkernschicht zusammen. Bei der Herstellung von Sandwichelementen mit Polyurethanschaumkern wird dieser mit den Deckschichten durch die klebende Wirkung des PUR verbunden. Nicht klebende Kernmaterialien wie Polystyrol oder Mineralwolle werden mit den Deckschichten durch zusätzliche Aufbringung eines Klebstoffes verbunden. Bauaufsichtlich geregelt sind Sandwichelemente in (DIN EN 14509).

Tragende Klebverbindungen im schweren Stahlbau finden heute nur selten Anwendung, obwohl bereits in den 1950er und 1960er Jahren erste Projekte im Bereich des Brückenbaus unter Verwendung der Klebtechnik realisiert wurden. Bei diesen Bauwerken über den Lippe-Seitenkanal kamen die sogenannten vorgespannten Klebverbindungen (VK-Verbindungen) zum Einsatz. Diese Anschlüsse kombinieren Klebungen mit vorgespannten Schraubverbindungen (Abbildung 2.17).

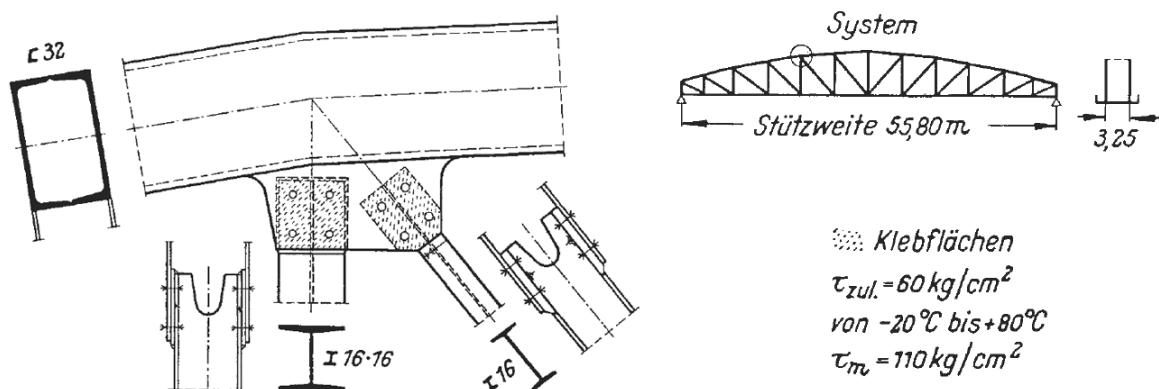


Abbildung 2.17 Anwendung der vorgespannten Klebverbindung im Brückenbau (DÖRNEN UND TRITTLER 1956)

Bei VK-Verbindungen wird auf die Kontaktflächen ein Klebstoff bzw. ein Klebstoff-Korund-Gemisch aufgebracht. Die einzelnen Bauteile werden anschließend durch Schrauben verspannt. Außerdem dienen die Schrauben der Aufnahme von Schälbeanspruchungen an den Klebfugenenden. Experimentelle Untersuchungen an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der TH Karlsruhe (heute Karlsruher Institut für Technologie) zeigten einen deutlichen Anstieg der Tragfähigkeit der hybrid gefügten Verbindung im Temperaturbereich von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$. (DÖRNEN UND TRITTLER 1956; TRITTLER UND DÖRNEN 1964). Aufgrund der rasanten Weiterentwicklung des Fügeverfahrens Schweißen verlor die Klebtechnik im Stahlbau jedoch schnell wieder an Bedeutung (BROCKMANN UND NEEB 2001).

Neuere Klebkonzepte finden in den letzten Jahren Anwendung bei der Sanierung und Verstärkung bestehender Stahlbrücken. So sind Verstärkungsmaßnahmen von Deckblechen sowie von Querträgern Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Die Verstärkung erfolgt mit aufgeklebten Stahlblechen oder CFK-Lamellen (FELDMANN ET AL. 2013). Das ursprünglich für Offshore-Anwendungen entwickelte Sandwich-Platten-System stellt einen neuartigen Ansatz dar, plattenförmige Stahlbleche zu verstärken (KENNEDY 2007). Über Abstandshalter wird auf einer bestehenden Stahlkonstruktion ein neues Stahlblech fixiert. Der Hohlraum zwischen den Stahlblechen wird mit einem Zweikomponenten-Polyurethan gefüllt. In mehreren Sanierungs- und Verstärkungsprojekten des Brückenbaus fand das Sandwich-Platten-System bereits Anwendung. Detailliertere Informationen zu diesem Konzept sowie zu Anwendungsbeispielen können (KENNEDY 2007; MINTEN ET AL. 2007; STIHL ET AL. 2013; FELDMANN ET AL. 2006) entnommen werden.

Weitere Forschungsarbeiten zum Kleben im Stahlbau beschäftigen sich z.B. mit geklebten Stahlbaudetails in Fassadenkonstruktionen sowie deren Nachweisführung (MEINZ 2010; MEINZ UND PASTERNAK 2011). Bemessungsansätze für geklebte Verbindungen im Bauwesen sind beispielsweise in (VAN STRAALEN ET AL. 1998; PASTERNAK UND CIUPACK 2014; CIUPACK ET AL. 2014) veröffentlicht.

Geklebte Kreishohlprofilverbindungen in Anwendungen des konstruktiven Stahlbaus wurden bisher nicht realisiert oder wissenschaftlich untersucht. Der klebtechnische Anschluss von Kreishohlprofilen an Stahlgussbauteile ist jedoch Inhalt eines Forschungsprojektes der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (UMMENHOFER ET AL. 2015). Erkenntnisse und eigene Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes dienen als Grundlage für die vorliegende Arbeit.

Eine Schnittstelle zwischen Bauwesen und Maschinenbau stellen Windenergieanlagen dar. Rotorblätter setzen sich in der Regel aus zwei Faserverbundkunststoffhalbschalen zusammen (Abbildung 2.18). Diese werden durch Dickschichtklebungen von 1 – 10 mm, die neben dem Lastabtrag auch zum Toleranzausgleich dienen, miteinander verbunden

(KNOPS 2011). Für den Bau von Rotorblättern werden sowohl Epoxidharz- als auch Polyurethankingebstoffe eingesetzt (GANSOW 2010). Zertifizierungsanforderungen an die Prüfung von Klebstoffen hinsichtlich Zugscherfestigkeit, Temperatur- und Alterungsbeständigkeit sowie Kriechverhalten definiert z. B. der Germanische Lloyd.

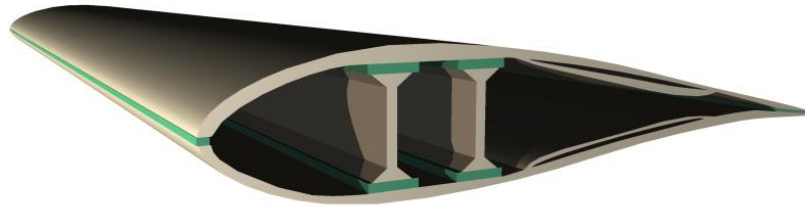


Abbildung 2.18 Querschnitt Rotorblatt mit Klebnähten (grün) (ALBIEZ UND UMMENHOFER 2013)

Randbedingungen und Anforderungen an die geklebte Verbindung

3.1 Allgemeines

Die lastabtragende klebtechnische Verbindung von Kreishohlprofilen in Tragkonstruktionen des Stahlbaus stellt hohe Anforderungen an die auszuwählenden Klebstoffe. Grundlage für die Klebstoffauswahl und für die Entwicklung des geklebten Anschlusses ist eine differenzierte Betrachtung der im konstruktiven Ingenieurbau vorzufindenden Randbedingungen hinsichtlich der Füge­teile, der Fertigungs- und Montagebedingungen sowie die Analyse der Anforderungen aus der mechanischen und thermischen Beanspruchung der Tragkonstruktion. Aufgrund ihres Einflusses auf die Klebschichtdicke wird hierbei insbesondere auf die Herstellungsimperfektionen und die daraus resultierenden Maßtoleranzen der Füge­teile eingegangen (Abschnitt 3.2).

3.2 Geometrische Toleranzen der Füge­teile

Wie in Abschnitt 1 beschrieben ist die geklebte Kreishohlprofilverbindung im Sinne einer klebgerechten, vorwiegend schubbeanspruchten Konstruktion als Überlappverbindung (siehe Abbildung 3.1) konzipiert. Bei dieser Verbindungsgestaltung wirken sich Maßtoleranzen der Füge­teile direkt auf die sich infolge der Differenz zwischen dem Außendurchmesser des Innenbauteils und dem Innendurchmesser der Außenbauteils rechnerisch ergebende Klebschichtdicke aus.

Die maximal zulässigen Maßabweichungen sind in den technischen Lieferbedingungen für Hohlprofile geregelt. Für nahtlose warmgefertigte Hohlprofile sind die Grenzwerte in (DIN EN 10210-2) und für kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile in (DIN EN 10219-2) festgelegt. Zulässige Maßtoleranzen von Gussbauteilen regelt (DIN EN ISO 8062-3).

Bei der Bestellung eines Kreishohlprofils sind die geometrischen Abmessungen Durchmesser, Wanddicke sowie Bauteillänge anzugeben. Aus diesen Kennwerten lassen sich die möglichen geometrischen Abweichungen der tatsächlichen Geometrie von den theoretischen Abmessungen ableiten. Zur Veranschaulichung sind die bei Kreishohlprofilen zu berücksichtigenden Herstellungsunperfektionen Abweichung des Außendurchmessers, Abweichung der Wanddicke sowie Unrundheit schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt.

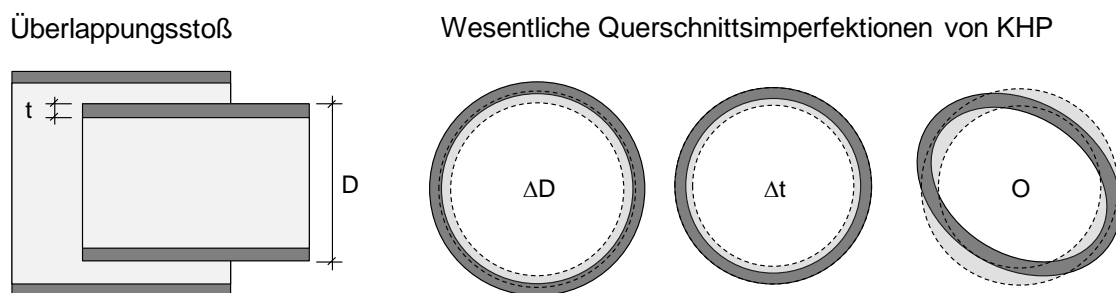


Abbildung 3.1 Links: KHP-Überlappungsverbindung. Rechts: wesentliche Querschnittimperfektionen von Kreishohlprofilen: Abweichung des Außendurchmessers (ΔD), der Wanddicke (Δt), der Rundheit (O); gestrichelte Darstellung der Soll-Geometrie

Tabelle 3.1 fasst die in den Liefernormen (DIN EN 10219-2) für kaltgefertigte sowie in (DIN EN 10210-2) für warmgefertigte Kreishohlprofile festgelegten maximal zulässigen Maßabweichungen zusammen. Zunächst ist ersichtlich, dass die Variation des Außendurchmessers sowohl für kalt- als auch für warmgefertigte Hohlprofile mit $\pm 1,0\%$ begrenzt wird. Bei einem bauüblichen Kreishohlprofil mit einem Außendurchmesser von beispielsweise 273 mm entspricht dies einer maximalen Durchmesservariation von $\pm 2,7$ mm. Diese Maßtoleranz wirkt sich bei Steckverbindungen direkt auf die resultierende Klebschichtdicke aus und ist bei der Festlegung des vorgesehenen Spaltmaßes zu berücksichtigen. Zur Vermeidung von unrealistischen Werten bei Kreishohlprofilen mit sehr kleinem oder sehr großem Durchmesser ist ein unterer Grenzwert von $\pm 0,5$ mm und eine obere Grenze von ± 10 mm vorgesehen.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen kalt- und warmgefertigten Kreishohlprofilen besteht in der Begrenzung der Abweichung der Wanddicke. Während diese bei kaltgefertigten Profilen für Blechdicken > 5 mm lediglich um $\pm 0,5\%$ variieren darf, sind bei warmgefertigten Hohlprofilen Abweichungen von bis zu -10% zulässig. Die positive Wanddickenabweichung wird durch die Begrenzung der Massenabweichung von maximal 6% festgelegt. Dieser Unterschied zwischen den beiden Kreishohlprofilarten ist dem Herstellungsprozess geschuldet. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben werden kaltgefertigte ge-

schweißte Hohlprofile aus Blech bzw. Band hergestellt, wobei die gewünschte Dicke durch den Walzprozess in der Regel relativ genau erreicht wird. Warmgefertigte Hohlprofile hingegen werden durch das Eindringen eines Dorns in den zylindrischen Vollquerschnitt gefertigt. Dieses Fertigungsverfahren kann aufgrund der möglichen exzentrischen Position des Dorns zu größeren Abweichungen der Wanddicke führen. Die zulässigen Toleranzen bei Unrundheit und Masse unterscheiden sich wiederum nicht für kalt- und warmgefertigte Kreishohlprofile. Die technischen Lieferbedingungen von Hohlprofilen sehen zudem eine Begrenzung der Abweichung von der Geradheit des Bauteils in Längsrichtung vor. Da diese Imperfektion für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu betrachtenden Querschnitte an den Enden der Hohlprofile keine Relevanz hat, soll sie an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden.

| Merkmale | Kaltgefertigte geschweißte Kreishohlprofile nach (DIN EN 10219-2) | Warmgefertigte nahtlose Kreishohlprofile nach (DIN EN 10210-2) |
|--------------------|--|--|
| Außendurchmesser D | $\pm 1 \%$, mit einem Mindestwert von $\pm 0,5 \text{ mm}$, höchstens aber $\pm 10 \text{ mm}$ | $\pm 1 \%$, mit einem Mindestwert von $\pm 0,5 \text{ mm}$, höchstens aber $\pm 10 \text{ mm}$ |
| Wanddicke t | Bei $D \leq 406,4 \text{ mm}$: $T \leq 5 \text{ mm}$: $\pm 10 \%$ $T > 5 \text{ mm}$: $\pm 0,5 \%$ Bei $D > 406,4 \text{ mm}$: $\pm 10 \%$, höchstens aber $\pm 2 \text{ mm}$ | -10% ^{b,c} |
| Unrundheit O | 2 % bei Hohlprofilen mit einem Verhältnis von Durchmesser zu Wanddicke ≤ 100 ^a | 2 % bei Hohlprofilen mit einem Verhältnis von Durchmesser zu Wanddicke ≤ 100 ^a |
| Geradheit e | 0,20 % über die Gesamtlänge und 3 mm je 1 m Länge | 0,20 % über die Gesamtlänge und 3 mm je 1 m Länge |
| Masse M | $\pm 6 \%$ für die einzelne gelieferte Länge | $\pm 6 \%$ für die einzelne gelieferte Länge ^d |
| a | Bei einem Verhältnis von Durchmesser zu Dicke > 100 sind die Grenzabmaße für die Unrundheit zu vereinbaren. | |
| b | Die positive Abweichung ist durch die Grenzabweichungen der Masse begrenzt (hier: vereinfachend $+10 \%$ der Wanddicke). | |
| c | Bei nahtlosen Profilen darf die Nennwanddicke in glatten Übergangsbereichen, deren Anteil nicht mehr als 25 % des Umfangs beträgt, um mehr als 10 %, höchstens aber um 12,5 % unterschritten werden. | |
| d | Als positive Grenzabweichung der Masse nahtloser Hohlprofile sind 8 % festgelegt | |

Tabelle 3.1 Zusammenstellung normativ zugelassener Maßtoleranzen und Massentoleranzen nach (DIN EN 10219-2; DIN EN 10210-2)

Die beschriebenen Maßtoleranzen haben einen direkten Einfluss auf die sich bei Überlappklebungen ergebende Klebspaltdicke (siehe Abbildung 3.1). Exemplarisch werden nachfolgend für fünf Kreishohlprofilkombinationen im Durchmesserbereich von 42,5 - 508,0 mm zunächst die sich aus den Nennabmessungen rechnerisch ergebenden Klebspaltdicken bestimmt. Dabei werden auch die in Abschnitt 6 untersuchten Kreishohlprofilquerschnitte mit betrachtet. Die Anwendung und Kombination der in Tabelle 3.1 dokumentierten normativ zulässigen Maßtoleranzen ergibt die in Tabelle 3.2 zusammengefassten maximalen Maßabweichungen der Klebspaltdicke für die ausgewählten Kreishohlprofilkombinationen. Beispielhaft sei dies an einer Hohlprofilsteckverbindung mit Innenbauteil 219,1 / 10 mm und Außenbauteil 244,5 / 8,0 mm diskutiert. Der sich aus den nominellen Werten ergebende Klebspalt von 4,7 mm kann aufgrund der normativ zulässigen Toleranzen zu einer maximalen Schichtdicke von 6,6 mm und einer minimalen Schichtdicke von 2,8 mm führen.

| Innenbauteil D / t [mm] | Außenbauteil D / t [mm] | aus den nominellen Werten resultierende Klebspaltdicke [mm] | maximale Abweichung von der nom. Klebspaltdicke [mm] | |
|-------------------------------|-------------------------------|--|--|-----------------------------|
| | | | nach (DIN EN 10210-2) | nach (DIN EN 10219-2) |
| 42,4 / 5,0 | 60,3 / 6,5 | 2,5 | 0,9 | 0,3 |
| 42,4 / 5,0 | 70,0 / 8,0 | 5,8 | 1,1 | 0,3 |
| 101,6 / 3,6 | 114,3 / 3,6 | 2,8 | 0,9 | 0,9 |
| 219,1 / 10 | 244,5 / 8,0 | 4,7 | 1,9 | 1,1 |
| 457,0 / 20,0 | 508,0 / 20,0 | 5,5 | 3,9 | 3,9 |

Tabelle 3.2 Maximale Abweichung der nominellen Klebspaltdicke infolge normativ zulässiger Maßtoleranzen von Kreishohlprofilen

Die in Tabelle 3.2 dargestellten möglichen Maßtoleranzen stellen einen oberen Grenzwert dar, da die Qualitätssicherung der Hohlprofilhersteller ein Überschreiten dieser Maximalwerte verhindert. Vorweggenommen sei an dieser Stelle das Ergebnis der Vermessung der im Rahmen dieser Arbeit quantifizierten Klebspaltgeometrien (siehe Kapitel 6). Dabei werden die Grenzwerte der normativ zulässigen Maßabweichungen nur in wenigen Ausnahmefällen erreicht. In der Regel weisen die verwendeten Kreishohlprofile eine deutlich bessere Maßhaltigkeit auf. Wesentlich für die vorliegende Arbeit ist jedoch die Erkenntnis, dass zum Ausgleich der Fertigungstoleranzen Dickschichtklebungen erforderlich sind. Dieser Anspruch wird durch montagebedingte Imperfektionen wie z. B. eine exzentrische Lage der KHP-Schwerelinien oder eine Schiefstellung der Bauteile noch verstärkt.

Strukturelle Dünnschichtklebungen mit Schichtdicken von deutlich unter einem Millimeter, wie sie im Automobil- oder Luftfahrzeugbau Einsatz finden, können somit bei geklebten Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau nicht realisiert werden. Dickschichtklebungen in der Größenordnung von mehreren Millimetern sind jedoch bislang bei steifen und mechanisch hochbeanspruchten Klebverbindungen ungebräuchlich. Aus baufremden Branchen vorliegende Forschungsarbeiten und Erkenntnisse zum Tragverhalten der Dünnschichtklebungen können damit auch nicht direkt auf die Dickschichtklebung von Kreishohlprofilen im Bauwesen angewendet werden (ALBIEZ ET AL. 2013; UMMENHOFER ET AL. 2015; ALBIEZ ET AL. 2012).

3.3 Anforderungen an die geklebte Verbindung

Wie in Abschnitt 3.2 dargelegt, erfordern die Maßtoleranzen bei Hohlprofilen einen Klebspalt in der Größenordnung von mehreren Millimetern. Dies erfordert einen Klebstoff, der den Verbund zwischen Stahlbauteilen auch für Dickschichtklebungen ermöglicht. Bezüglich der Fügeiteiloberflächen wird der Fokus im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf korundgestrahlte Stahloberflächen gelegt. Daraus resultiert die Anforderung einer ausreichend hohen Adhäsion der auszuwählenden Klebstoffe auf der definiert vorbehandelten Stahloberfläche. In der baupraktischen Umsetzung sind neben den gestrahlten Oberflächen aus Gründen des Korrosionsschutzes verzinkte oder mit organischen Beschichtungen versehene Bauteiloberflächen relevant. Dabei ist auf eine ausreichend hohe Adhäsion der Beschichtung auf dem Fügeiteil sowie des Klebstoffs auf der Beschichtung zu achten. Auf beide Oberflächen wird im Rahmen der weiteren Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen. Untersuchungen zur Haftung verschiedener Klebstoffe auf einem Epoxid-basierenden Pulverlacksystem sowie zu Tragfähigkeit von pulverbeschichteten geklebten KHP-Proben können dem Abschlussbericht des Forschungsprojektes FOSTA P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015) entnommen werden. Untersuchungen zum Kleben auf stückverzinkten Stahloberflächen sind beispielsweise in (STAHL UND GEIß 2015) dokumentiert.

Neben der Oberflächenbeschaffenheit und der geometrischen Eigenschaften der Fügeiteilpartner stellen thermische Beanspruchungen hohe Anforderungen an die geklebte Verbindung. Die in Deutschland für Temperatureinwirkungen auf Gebäude und Bauwerke anzuwendende Norm (DIN EN 1991-1-5; DIN EN 1991-1-5/NA) weist einen Temperatureinsatzbereich von -24 °C bis maximal 67 °C für helle farbige Oberflächen aus. Bei dunklen Oberflächen wird die Maximaltemperatur mit 79 °C angegeben. Klebstoffe haben wie alle Polymere temperaturabhängige mechanische Kennwerte. Diese Kennwerte fallen vereinfachend beschrieben bei Überschreitung der Glasübergangstemperatur T_g in der Regel deutlich ab (HABENICHT 2008). Anzustreben ist deshalb die Auswahl von Klebstoffen mit hoher Glasübergangstemperatur, die im Idealfall über 80 °C liegen sollte (ALBIEZ

ET AL. 2013; UMMENHOFER ET AL. 2015). Auf den Glasübergang von Polymeren sowie die experimentelle Bestimmung dieses Kennwertes wird in Abschnitt 4.2.2 näher eingegangen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015) durchgeführte statische Vorberechnungen liefern Erkenntnisse über die bei realen Hohlprofilfachwerktragwerken aus dem Hoch- und Windenergieanlagenbau zu erwartenden mechanischen Beanspruchungen der Klebverbindung. Hierzu wird die Axialkraft stark vereinfachend auf die sich für eine Überlappungslänge von 0,5 bis 2,0 x D (Innenrohrdurchmesser) ergebende Klebfläche bezogen und die sich daraus ergebende Nennschubspannung bestimmt. Es zeigt sich, dass Klebstoffe erforderlich sind, die Verbundschubfestigkeiten von mindestens 8 MPa aufweisen (ALBIEZ ET AL. 2013; UMMENHOFER ET AL. 2015). Eine weitere Anforderung lässt sich aus der Tatsache ableiten, dass in vielen Tragwerken des Stahlbaus ständig wirkende Lasten infolge Eigengewicht auftreten. Demzufolge sollten Klebstoffe verwendet werden, die eine geringe Kriechneigung aufweisen, um Kriechverformungen bei ständig wirkenden Beanspruchungen zu minimieren.

Die geplante Fertigung der Klebung durch Injektion des Klebstoffs in den zylindrischen Fügespalt stellt weitere Anforderungen an die auszuwählenden Klebstoffe. Zunächst sind für den Injektionsvorgang niedrigviskose Klebstoffe, die eine ausreichende Fließeigenschaft aufweisen, erforderlich. Die baupraktische Anforderung einer hohen Anfangsfestigkeit empfiehlt die Auswahl von Zweikomponenten-Klebstoffen. Schließlich sind insbesondere bei überlappenden Kreishohlprofilverbindungen Klebstoffe mit einem möglichst geringen Härtungsschrumpf erforderlich. Die sich infolge des Schrumpfens einstellenden Zugeigenspannungen in radialer und Umfangsrichtung sollten auf ein Minimum begrenzt werden (ALBIEZ ET AL. 2013; UMMENHOFER ET AL. 2015).

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Anforderungen stellen die Grundlage für die Auswahl von Klebstoffen, die für die Anwendung in geklebten Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau geeignet sind, dar.

Auswahl und Charakterisierung der Klebstoffe

4.1 Auswahl der Klebstoffe

Die in Kapitel 3 beschriebenen Randbedingungen im Bauwesen sowie die daraus resultierenden Anforderungen stellen die Grundlage für die Auswahl der für geklebte Kreishohlprofilverbindungen geeigneten Klebstoffe dar.

Ausgehend von einer Vorauswahl 24 kommerziell erhältlicher Klebstoffe werden im Rahmen des Forschungsprojektes P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015) nach einer differenzierten Analyse der technischen Daten zunächst sechs Klebstoffe einer umfangreichen experimentellen Prüfung durch Versuche an Substanz- und Verbundproben unterzogen. Auf Grund der Ergebnisse dieser Untersuchungen sowie der Verfügbarkeit der für bauübliche Abmessungen notwendigen großen Volumina werden zwei kommerzielle Zweikomponenten-Klebstoffe für die weiteren Untersuchungen priorisiert und hinsichtlich ihrer mechanischen und thermischen Eigenschaften charakterisiert.

Ausgewählt sind ein Polyurethanklebstoff (PUR) sowie ein Epoxidharzklebstoff (EP). Zur Charakterisierung des Klebstoffes dienen Versuche an Substanz- und Verbundproben. Die experimentellen Untersuchungen an Klebstoffsubstanzproben werden im Rahmen des Forschungsprojektes P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015) am Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen, durchgeführt. Diese Untersuchungen werden durch eigene Dauerstandversuche an Verbundproben zur Beurteilung des Kriechverhaltens der ausgewählten Klebstoffe ergänzt (ALBIEZ ET AL. 2013; UMMENHOFER ET AL. 2015).

Klebstoff PUR

Der Strukturklebstoff PUR ist ein kommerzieller Polyurethanklebstoff, der hauptsächlich für die Klebung von Faserverbundwerkstoffen vor allem im Windenergieanlagenbau oder Schiffbau eingesetzt wird. Der vollständige Produktname lautet „Henkel Macroplast UK1352/UK5401“. Die Aushärtung des lösemittelfreien Zweikomponenten-Klebstoffs erfolgt durch eine Polyadditionsreaktion. Die Harz-Komponente des PUR basiert auf hydroxygruppenhaltigen organischen Verbindungen, der Härter basiert auf Isocyanaten. Die technischen Daten aus der Produktbeschreibung des Klebstoffs PUR sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt (TD PUR 2011).

| Klebstoff PUR | |
|---|-----------------------------|
| Basis | <i>Polyurethan</i> |
| Härtungsmechanismus | <i>Polyaddition</i> |
| Konsistenz bei 20 °C | <i>flüssig</i> |
| Viskosität, Brookfield – RVT, 20°C | <i>5.000 – 15.000 mPa s</i> |
| Topfzeit (210 g, 20 °C) | <i>50 bis 90 min</i> |
| Zugscherfestigkeit bei 20 °C nach EN 1465 | <i>> 20 MPa</i> |

Tabelle 4.1 Technische Daten PUR (TD PUR 2011)

Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass der Klebstoff PUR den Anforderungen des Germanischen Lloyds (GL) an Klebstoffe zum Einsatz bei Windenergieanlagen oder Schiffsbauten entspricht (TD PUR 2011).

Klebstoff EP

Der kommerzielle Epoxidharzklebstoff mit dem Produktnamen „Kömmerling EP 40617 / EP 42089“ ist ein Konstruktionsklebstoff für Stahlsubstrate. Der im Weiteren als EP bezeichnete Klebstoff ist ein Zweikomponentensystem, dessen Vernetzung über eine Polyadditionsreaktion erfolgt. Dabei findet die Aushärtereaktion zwischen den beiden Komponenten Epoxidharz (Bisphenol-A / Epichlorhydrin) und dem Härter (einer Mischung aus verschiedenen Aminen) statt. Die technischen Daten aus der Produktinformation zum Klebstoff EP sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst (TD EP 2012).

Klebstoff EP

| | |
|--|--|
| Basis | <i>Epoxidharz</i> |
| Härtungsmechanismus | <i>Polyaddition</i> |
| Konsistenz | <i>zähflüssig</i> |
| Viskosität, Brookfield – RVT, 20 °C | <i>Harz: 80.000 mPa s</i> <i>Härter: 40.000 mPa s</i> |
| Topfzeit (100 g, 23 °C) | <i>120 min</i> |
| Zugscherfestigkeit bei 23 °C nach DIN 53283 | <i>13 MPa</i> |

Tabelle 4.2 Technische Daten EP (TD EP 2012)

4.2 Experimentelle Untersuchung von Substanzproben

4.2.1 Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Zur Bestimmung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens sowie der mechanischen Eigenschaften Elastizitätsmodul und Dehnvermögen der Klebstoffe werden zunächst uniaxiale Zugversuche an Substanzproben durchgeführt. Herstellung und Prüfung der Probekörper erfolgt in Anlehnung an (DIN EN ISO 527-2). Die geometrischen Abmessungen der verwendeten Schulterprobe Typ 1B nach (DIN EN ISO 527-2) sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Fließeigenschaften der Klebstoffe werden die Proben im Rahmen des Forschungsprojektes P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015) mit den Herstellverfahren Wasserstrahlschneiden (EP), Gießen (PUR) und Schleifen gefertigt.

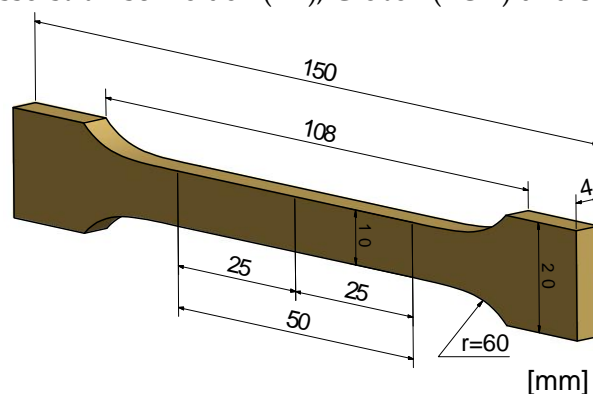


Abbildung 4.1 Abmessungen der Substanzproben Typ 1B nach (DIN EN ISO 527-2)

Die Zugversuche werden wegeregelt mit einer konstanten Traversengeschwindigkeit von 1 mm/min bis zum Bruch der Probe durchgeführt. Dies entspricht einer Dehnungsra-

te von etwa 1 \% min^{-1} (DIN EN ISO 527-2). Während der Versuche bei Raumtemperatur wird neben der Maschinenkraft die lokale Dehnung der Substanzprobe in Probenmitte mit Feindehnungsaufnehmern bei einer Anfangsmesslänge 50 mm gemessen. Aus den Messergebnissen lassen sich unter Verwendung der Querschnittsgeometrien die auch aus Zugversuchen an Stahlproben bekannten Spannungs-Dehnungsbeziehungen mit den darin u.a. enthaltenen mechanischen Klebstoffeigenschaften Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit sowie Dehnvermögen ermitteln.

Zunächst sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für die in Anlehnung an (DIN EN ISO 527-2) geprüften Substanzproben des Klebstoffs PUR in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Arbeitslinie steigt zunächst quasi linear an und flacht ab 0,75 % Dehnung zunehmend ab. Der Klebstoff PUR weist eine Zugfestigkeit von im Mittel 49,8 MPa bei einer Bruchdehnung von im Mittel 1,45 % auf. Die Substanzproben versagen spröde. Für den quasi-linearen Anfangsbereich kleiner Dehnungen kann der Elastizitätsmodul des Klebstoffs PUR bestimmt werden. Hierzu wird der Mittelwert der Spannungswerte aus den Einzelversuchen bei 0,5 % Dehnung gebildet. Der Elastizitätsmodul berechnet sich folglich aus dem Quotienten aus Spannung und Dehnung. Dabei wird der E-Modul auf zwei Stellen gerundet und ergibt sich für den Klebstoff PUR zu 4800 MPa.

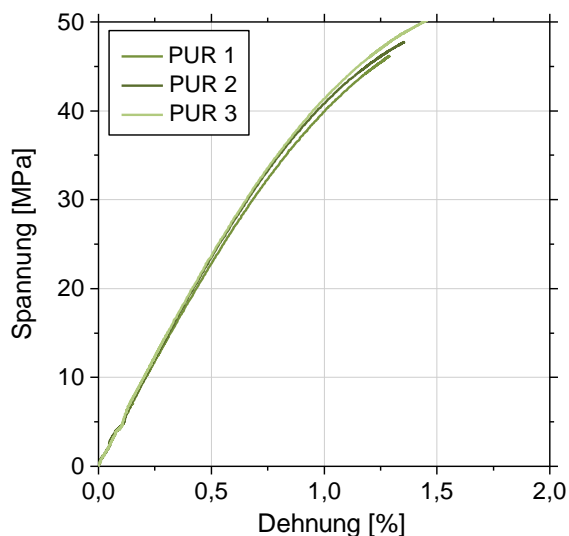


Abbildung 4.2 Spannungs-Dehnung-Verhalten aus uniaxialen Zugversuchen an Substanzproben; Klebstoff PUR

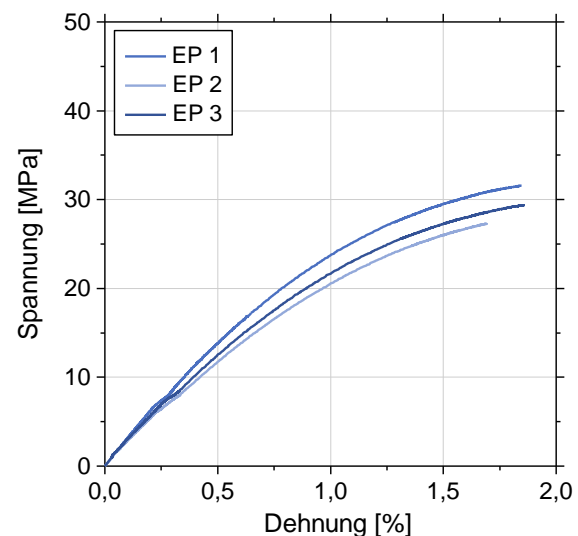


Abbildung 4.3 Spannungs-Dehnung-Verhalten aus uniaxialen Zugversuchen an Substanzproben; Klebstoff EP

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven resultierend aus der Prüfung der Substanzproben des Klebstoffs EP sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Diese weisen im uniaxialen Zugversuch ebenso einen zunächst annähernd linearen Verlauf auf. Ab 0,5 % Dehnung flacht die Arbeitslinie zunehmend ab. Die Proben versagen spröde bei Bruchdehnungen von im Mittel 1,77 %. Die Zugfestigkeit der Probe beträgt bei Bruch im Mittel 29,4 MPa. Der Elastizitätsmodul im quasi-linearen Anfangsbereich kleiner Dehnungen lässt sich in Analogie zu

obiger Vorgehensweise zu 2700 MPa bestimmen. Damit weisen sowohl Zugfestigkeit als auch Steifigkeit des Klebstoffs EP im Vergleich mit dem Klebstoff PUR geringere Werte auf. Im Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven der beiden Klebstoffe ist beim Klebstoff PUR der anfängliche linear-elastische Bereich deutlich ausgeprägter als beim Klebstoff EP.

In Tabelle 4.3 sind die in den Zugversuchen an Substanzproben bestimmten Werkstoffkennwerte der Klebstoffe PUR und EP zusammengefasst.

| Klebstoff | Elastizitätsmodul im Bereich kleiner Dehnungen [MPa] | Zugfestigkeit [MPa] | Bruchdehnung [%] |
|-----------|--|---------------------|------------------|
| PUR | 4800 | 49,8 | 1,45 |
| EP | 2700 | 29,4 | 1,77 |

Tabelle 4.3 Mechanische Kennwerte der Klebstoffe PUR und EP aus Zugversuchen an Substanzproben

Auf Basis der durchgeführten Versuche lässt sich festhalten, dass die Substanzproben von PUR und EP einen für Klebstoffe vergleichsweise hohen Elastizitätsmodul im Bereich kleiner Dehnungen sowie ein sprödes Materialversagen aufweisen. Der Klebstoff PUR zeigt im uniaxialen Zugversuch ein quasi lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten bis zu einer Spannung von etwa zwei Drittel der Zugfestigkeit und flacht danach ab. Im Vergleich dazu ist die aus den uniaxialen Zugversuchen der EP-Substanzprobe resultierende Spannungs-Dehnungs-Kurve deutlich stärker gekrümmt. Die Bruchdehnung ist bei beiden Klebstoffen als vergleichsweise gering einzustufen.

Im Hinblick auf geklebte Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau ist der vergleichsweise hohe Elastizitätsmodul aufgrund der daraus resultierenden geringen Relativverschiebungen zwischen den zu fügenden Bauteilen als vorteilhaft einzuordnen. Die geringe Bruchdehnung in Kombination mit sprödem Werkstoffversagen muss nicht zuletzt auch im Hinblick auf Dehnungsdifferenzen infolge Zwängungsbeanspruchung (z. B. thermische Einwirkungen) sowie das im Bauwesen angestrebte duktile Bauteilversagen beachtet werden.

4.2.2 Glasübergangstemperatur

Thermische Einwirkungen haben auf die mechanischen Eigenschaften organischer Klebstoffe im Vergleich zu metallischen Werkstoffen einen deutlich größeren Einfluss. Dieser wird daher im Folgenden zunächst näher beschrieben. Die Temperaturbeständigkeit der Kunststoffe ist begrenzt. Mit zunehmender Temperatur ändern sich die mechanischen

Eigenschaften, es beginnt eine thermische Spaltung der Moleküle (HABENICHT 2008). In diesem Kontext ist die sogenannte Glasübergangstemperatur T_g von wesentlicher Bedeutung. Die Glasübergangstemperatur bezeichnet einen Temperaturbereich, in dem sich ausgehend vom Glaszustand wichtige mechanische Eigenschaften von Kunststoffen signifikant ändern. So weisen viele Klebstoffe bei Temperaturen unterhalb der Glasübergangstemperatur höhere mechanische Kennwerte auf, die bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur in der Regel deutlich abfallen. Dies ist stark vereinfachend mit der Abnahme der intermolekularen Anziehungskräfte und damit einer höheren Beweglichkeit der Molekülketten bei zunehmenden Temperaturen zu erklären (HABENICHT 2008). Vor dem Hintergrund eines in Deutschland für Baukonstruktionen normativ vorgegebenen Temperaturbereiches von -23 bis mindestens $+67^\circ\text{C}$ (siehe Kapitel 3) ist die Kenntnis der Glasübergangstemperatur der anvisierten Klebstoffe für die Temperaturbeständigkeit der geklebten Verbindung von zentraler Bedeutung. Ziel ist die Auswahl von Klebstoffen, deren Glasübergangstemperatur über der maximalen Einsatztemperatur der geklebten Verbindung liegt.

Dynamisch-mechanische Analysen (DMA) an Substanzproben der Klebstoffe EP und PUR dienen im Rahmen des Forschungsprojektes P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015) zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur. Die DMA-Analyse zählt nicht zu den im Bauwesen üblicherweise verwendeten Prüfverfahren. Aus diesem Grund werden die wesentlichen Grundlagen des Verfahrens vor der Darstellung der Untersuchungsergebnisse kurz erläutert.

Während der DMA-Analyse wird bei Änderung der Temperatur eine sinusförmig veränderliche Beanspruchung auf die Klebstoffprobe aufgebracht. Aus der Aufzeichnung der aufgetragenen Kraft sowie der gemessenen Verformungsreaktion des Probekörpers kann die Phasenverschiebung zwischen beiden Signalen berechnet werden. Bei rein elastischen Probekörpern ist keine verzögerte Reaktion der Probe auf die einwirkende Beanspruchung feststellbar. Bei viskoelastischen Werkstoffen ist eine Verschiebung des Messsignals der Verformung in Bezug zum Messsignal der Kraft festzustellen. Zur Veranschaulichung ist die viskoelastische Antwort einer Probe auf eine sinusförmig aufgetragene Beanspruchung schematisch in Abbildung 4.4 dargestellt.

Aus den beschriebenen Messwerten lässt sich der komplexe Modul G^* ermitteln. Dieser setzt sich zusammen aus dem Speichermodul G' und dem Verlustmodul G'' :

$$G^* = G' + G'' \quad \text{Gl. 4.1}$$

Dabei beschreibt der Speichermodul die elastischen Eigenschaften eines Werkstoffes. Der Verlustmodul quantifiziert die viskose Komponente und damit die dissipierte, d.h. un-

umkehrbar in Wärme umgewandelte eingebrachte Energie (HABENICHT 2009; BROCKMANN 2005).

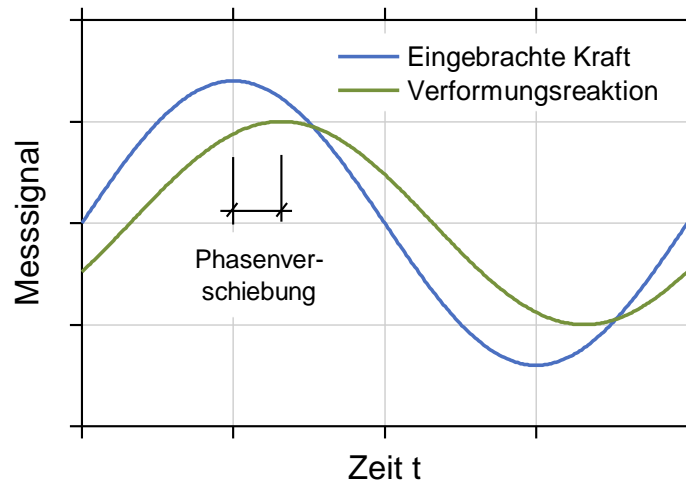


Abbildung 4.4 Schematisches Kraft-Verformungsverhalten eines viskoelastischen Werkstoffes bei sinusförmiger Beanspruchung

Aus dem Quotienten von Energieverlust (Verlustmodul) und Energiespeicherung (Speichermodul) ergibt sich der mechanische Verlustfaktor $\tan \delta$ (Gl. 4.2). Dieser beschreibt anschaulich die Phasenverschiebung zwischen aufgebrachter Last und Verformungsreaktion der Probe (siehe Abbildung 4.4).

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad \text{Gl. 4.2}$$

Bei Messungen über einen Temperaturbereich kann das Maximum des Verlustfaktors $\tan \delta$ als Anhaltspunkt für die dynamisch bestimmte Glasübergangstemperatur betrachtet werden. Dieses Maximum lässt sich durch die rasche Abnahme des Speichermoduls erklären.

Die DMA-Messungen an den Proben der Klebstoffe PUR und EP erfolgen während der dynamischen Prüfung über einen Temperaturbereich zwischen -50°C und 150°C . Die Analysen werden mit dem am Fraunhofer IFAM vorhandenen Gerät DMA 2000 Dynamic Mechanical Analyzer der Firma TA Instruments in Anlehnung an (DIN EN ISO 6721-1) durchgeführt. Hierzu werden die einseitig eingespannten Biegeproben (single cantilever) mit den Nennabmessungen $18,0 \times 10,0 \times 3,0$ [mm] in die Vorrichtung der Prüfmaschine eingebaut und die Beanspruchung mit einer Prüffrequenz von 1 Hz aufgebracht. Die Aufheizrate beträgt zwei Kelvin/Minute.

Die Ergebnisse der durchgeführten dynamisch-mechanischen Analyse der Substanzprobe des Klebstoffs PUR sind in Abbildung 4.5 dargestellt (Probekörper 1). Die Auswertung des Maximums des Verlustfaktors $\tan \delta$ weist für den Klebstoff PUR auf eine Glasüber-

gangstemperatur von 79,6 °C hin. Dieses Ergebnis wird auch in einer zweiten DMA bestätigt (vgl. Anhang). Des Weiteren kann den Ergebnissen der dynamisch-mechanischen Analyse der dynamisch bestimmte elastische Modul bei Raumtemperatur (hier 23°C) entnommen werden. Dieser beträgt im Mittelwert der beiden Versuche ca. 4000 MPa und liegt damit etwas unter dem im quasi-statischen Zugversuch an Schulterproben zuvor bestimmten Elastizitätsmodul (ca. 4800 MPa).

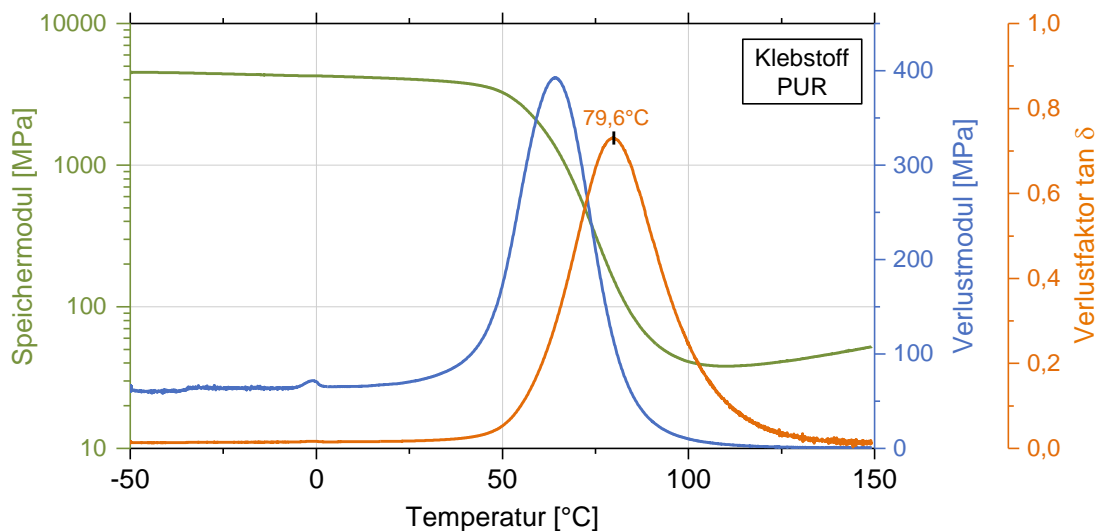


Abbildung 4.5 Ergebnis der dynamisch-mechanischen Analyse des Klebstoffs PUR (Probe 1)

Die Ergebnisse einer dynamisch-mechanischen Analyse des Klebstoffs EP zeigt Abbildung 4.6. Die Auswertung des Verlustfaktors der an Substanzproben durchgeführten DMA-Untersuchungen weist auf eine Glasübergangstemperatur von 76,0 °C hin. Des Weiteren ergibt die Messung einen elastischen Modul bei Raumtemperatur von im Mittelwert 2800 MPa. Dieser liegt damit nur geringfügig über dem im uniaxialen Zugversuch für kleine Dehnungen bis 0,5 % gemessenen Zugelastizitätsmodul (2700 MPa).

Einen erwähnenswerten Verlauf weist der Verlustmodul über dem Temperaturbereich von -50°C bis 150°C auf. Es zeigen sich in der DMA-Messung zwei relative Maxima. Zunächst erreicht der Verlustmodul bei 26 °C das absolute Maximum und fällt danach deutlich ab. Ab 48 °C steigt G'' nochmals an und erreicht sein zweites relatives Maximum bei 59 °C.

Im Rahmen des Forschungsprojektes P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015) werden die Klebstoffsubstanzproben einen Tag nach der Herstellung für 30 Minuten bei 80°C getempert. Die dynamisch-mechanische Prüfung erfolgt nach weiteren sechs Tagen Härtung bei Raumtemperatur. Der Temperprozess kann im Vergleich zu ausschließlich bei Raumtemperatur gehärteten Proben zu einem Anstieg der Glasübergangstemperatur führen. Dies zeigen unter anderem Untersuchungen von COOK UND TOD (1993). Bei zunehmender Aushärtedauer bei erhöhter Temperatur ist ein Anstieg des mechanischen Verlustfaktors

und damit auch des Bereiches der Glasübergangstemperatur des untersuchten Epoxidharzklebstoffes zu beobachten. Dieses Verhalten kann auch für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Klebstoffe bestätigt werden (ALBIEZ ET AL. 2013).

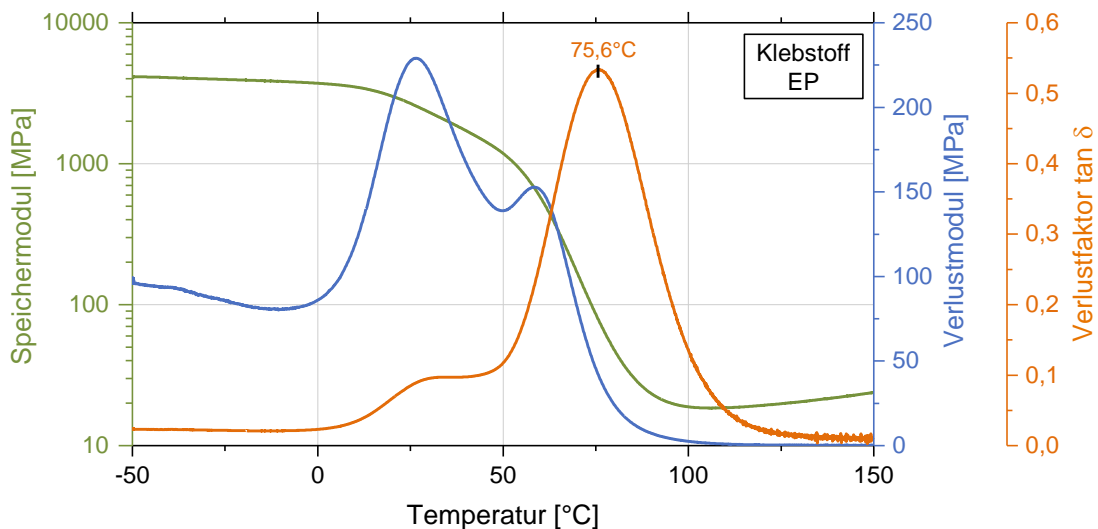


Abbildung 4.6 Ergebnis der dynamisch-mechanischen Analyse des Klebstoffs EP (Probe 1)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beide untersuchten Klebstoffe bei Auswertung des Verlustfaktors $\tan \delta$ eine Glasübergangstemperatur T_g aufweisen, die oberhalb der in (DIN EN 1991-1-5; DIN EN 1991-1-5/NA) für Bauwerke mindestens geforderten 67°C liegt. Im Vergleich mit bei Raumtemperatur ausgehärteten Klebstoffproben führt ein zusätzlicher Tempervorgang (z.B. 30 min bei 80°C) zu einer Anhebung der Glasübergangstemperatur (ALBIEZ ET AL. 2013; UMMENHOFER ET AL. 2015).

In Tabelle 4.4 sind die auf Basis von mechanischen und thermischen Untersuchungen bestimmten Kennwerte der ausgewählten Klebstoffe zusammengefasst.

| Kennwert | PUR | EP |
|---|------|------|
| Elastizitätsmodul aus Zugversuch im Bereich kleiner Dehnungen [MPa] | 4800 | 2700 |
| Elastizitätsmodul aus DMA [MPa] | 4000 | 2800 |
| Bruchdehnung aus Zugversuch [%] | 1,77 | 1,45 |
| Glasübergangstemperatur aus max. $\tan \delta$ [$^\circ\text{C}$] | 79,5 | 76,0 |

Tabelle 4.4 Zusammenstellung der gemessenen Klebstoffkennwerte

4.3 Experimentelle Untersuchung von Dauerstandsproben

In allen Tragwerken des konstruktiven Stahlbaus wirken infolge Eigengewicht ständige Beanspruchungen auf Bauteile und deren Verbindungen. Geklebte Verbindungen können jedoch bei Dauerbelastung Deformationen durch Kriechvorgänge aufweisen. Kriechen bezeichnet die zeitabhängige Verformung bei statischer Dauerbeanspruchung. Die Erklärung der Kriechvorgänge bei polymeren Werkstoffen ist im zeitabhängigen Versagen einzelner Polymerbindungen infolge der aufgetragenen Belastung zu finden. Diese führen zu Verschiebungen zwischen den Molekülen und damit zu Verformungen der Klebschicht (HABENICHT 2009). Vereinfacht ausgedrückt kann bei ausreichendem Relaxationsvermögen des Klebstoffs eine Verformung der Klebschicht auftreten, die zum Abtrag der Spannungsspitzen an den Überlappungsenden beiträgt. Damit einher geht ein gleichmäßigerer Spannungsverlauf infolge stärkerer Beanspruchung des Mittelbereichs der Klebschichten (HABENICHT 2009). Der beschriebene Sachverhalt und der Anspruch, bei Kreishohlprofilverbindungen auch ständige Lasten über die Klebfuge abtragen zu können, begründen experimentelle Untersuchungen des Kriechverhaltens der ausgewählten Klebstoffe unter definierten Beanspruchungen.

Zur Untersuchung des Kriechverhaltens geklebter Verbunde werden doppelt-symmetrische Zugscherproben bestehend aus vier Fügelementen gefertigt (Abbildung 4.7).

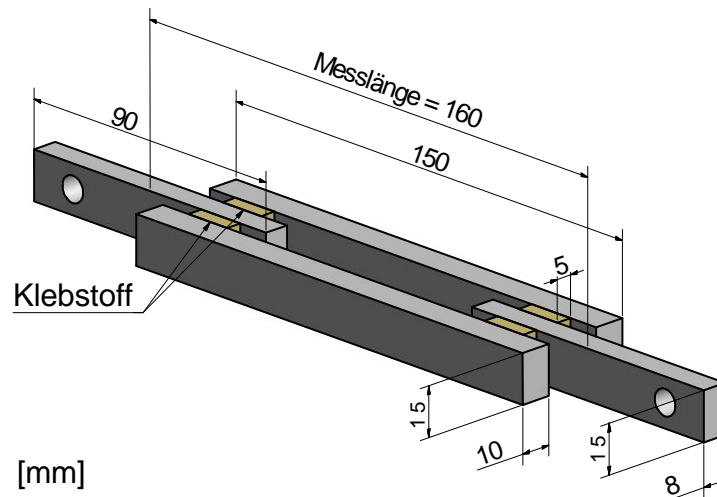


Abbildung 4.7 Probekörper der Dauerstandsuntersuchungen

Hierzu werden stabförmige Stahlbleche aus dem Werkstoff S235JR an vier Fügestellen klebtechnisch verbunden. Die Fügebereiche weisen eine Klebschichtdicke von 5,0 mm sowie eine Klebefläche von $15 \times 15 \text{ mm}^2$ auf. Vor der Klebung werden die Substrate nachfolgender Oberflächenvorbehandlung unterzogen: Reinigen mit Methyläthylketon (MEK) – Strahlen mit Edelkorund der Siebung F100 ($106 - 150 \mu\text{m}$) auf die Oberflächengüte Sa 3 nach (DIN EN ISO 8501-1) – Reinigen mit MEK. Die Probekörper für die experimentelle

Bestimmung des Kriechverhaltens sind in Abbildung 4.7 unter Angabe aller relevanten Abmessungen dargestellt.

Zur Sicherstellung einer definierten Klebfugegeometrie erfolgt die Fertigung der Verbundproben auf einem Fertigungstisch mit geprüfter Ebenheit sowie unter Verwendung CNC-gefräster rechteckiger Abstandshalter aus Polyethylen. Die Klebgeometrie wird nach der Lagesicherung der Fügeteile mit Schraubzwingen durch Schwerkraftguss verfüllt. Es werden fünf Proben mit dem Klebstoff PUR sowie fünf Proben mit dem Klebstoff EP hergestellt. Einen Einblick in die Fertigung der geklebten Verbundproben für die Dauerstandsuntersuchungen gibt Abbildung 4.8.

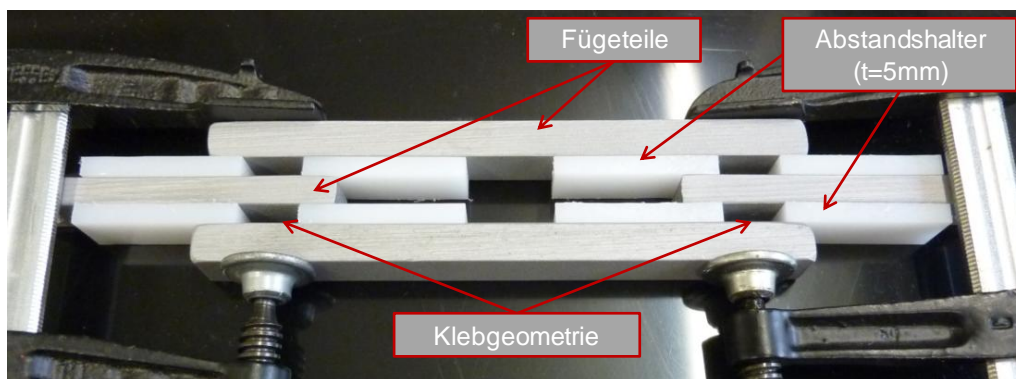


Abbildung 4.8 Fertigung der Dauerstandsproben

Die Beanspruchungen der Dauerstandsproben werden auf Basis der im Rahmen von Forschungsprojekt P884 an realen Hohlprofilfachwerktragwerken durchgeführten statischen Berechnungen festgelegt (UMMENHOFER ET AL. 2015). Demnach liegen die bestimmten Verbundschubspannungen infolge ständiger Einwirkungen für definierte Überlappungslängen zwischen $0,5$ und $2,0 \times D$ (D – KHP-Durchmesser) im Bereich von $0,5$ – $3,0$ MPa. Ausgehend von diesen Vorberechnungen werden drei verschiedene Lastniveaus untersucht. Ein Überblick über Probenanzahl, aufgebrauchte Dauerlasten und die sich daraus jeweils ergebenden Verbundschubspannungen in den Klebfugen ist in Tabelle 4.5 zusammengestellt.

| Klebstoff | mittlere Verbundschubspannung in der Klebfuge | | |
|-----------|---|----------|---------|
| | 0,5 MPa | 1,0 MPa | 2,0 MPa |
| PUR | 1 Probe | 3 Proben | 1 Probe |
| EP | 1 Probe | 3 Proben | 1 Probe |

Tabelle 4.5 Übersicht Probekörper und Beanspruchungen der Dauerstandsuntersuchungen

Der Versuchsaufbau der Dauerstandsuntersuchungen besteht aus einer tragenden Rahmenkonstruktion sowie Probekörpern und daran angebrachten Gewichten. Er ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Die Proben werden über einen Zeitraum von ca. 26.000 Stunden (entspricht etwa drei Jahren) bei definierten Umgebungsbedingungen in einem Klimaraum (23 °C, 50 % rH) geprüft.

Die Kriechverformungen in Abhängigkeit der Zeit werden mit kalibrierten Messuhren dokumentiert. Die Messlänge zur Bestimmung der Relativverformung zwischen den Fügepartnerpartnern kann Abbildung 4.7 entnommen werden. Nach Belastungsbeginn erfolgt die Aufzeichnung zunächst im Stundentakt danach in Abhängigkeit des dokumentierten Zeit-Verformungsverhaltens in größer werdenden Abständen.



Abbildung 4.9 Versuchsaufbau Dauerstandsuntersuchungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zur höchsten statischen Dauerlasteinwirkung, die einem mittleren Schubspannungsniveau von 2,0 MPa entspricht, vorgestellt. Abbildung 4.10 zeigt die gemessenen Relativverschiebungen der mit dem Klebstoff EP und PUR gefügten Verbundproben in Abhängigkeit der Prüfdauer. Die Ergebnisse der bei einem Spannungsniveau von 0,5 MPa sowie 1,0 MPa geprüften Proben können dem Anhang entnommen werden (Abbildungen A.5 und A.6).

Die dokumentierten Gesamtverformungen liegen nach einer Prüfdauer von drei Jahren bei allen Spannungsniveaus und für beide Klebstoffe in einer Größenordnung von weniger als 0,2 mm. Darin sind bereits die elastischen Verformungen enthalten. Diese betragen am Beispiel der Proben mit einem Spannungsniveau von 2,0 MPa Verbundschubspannung für den Klebstoff PUR 0,08 mm. Die Gesamtverformung nach drei Jahren beträgt

0,12 mm. Daraus errechnet sich eine Kriechverformung von 0,05 mm. Für den Klebstoff EP errechnet sich bei analoger Vorgehensweise eine elastische Anfangsverformung von 0,04 mm. Bei einer Gesamtverformung von 0,16 mm ergibt sich der Anteil der Kriechverformung zu 0,12 mm. Das Kriechverhalten des Klebstoffs EP lässt sich mit der beispielsweise in (BROCKMANN UND KOLLEK 1980) als für Epoxidharze typisch beschriebenen stufenweisen Zunahme der Kriechverformung in Abhängigkeit der Zeit (Kurve B) charakterisieren. Der Klebstoff PUR zeigt ein überwiegend kontinuierliches, langsames Kriechen, das einer horizontalen Tangente entgegen strebt.

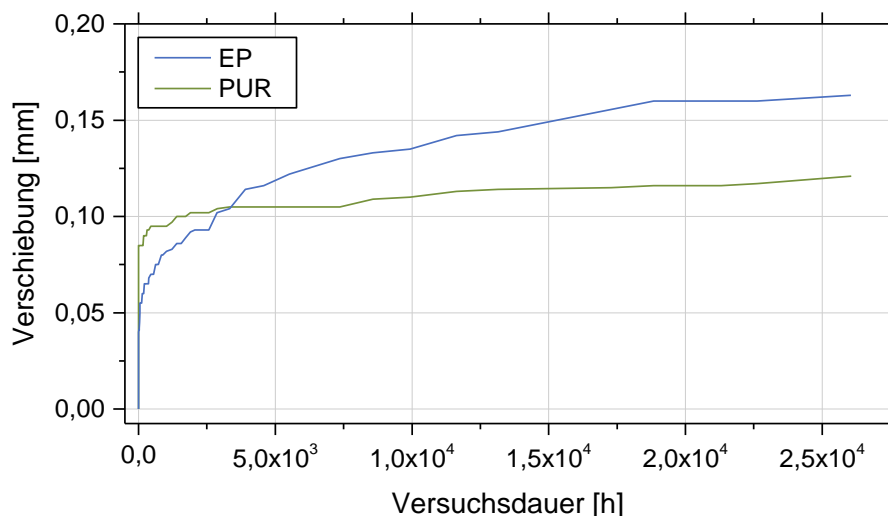


Abbildung 4.10 Dauerstandsuntersuchungen: Verformungszunahme in Abhängigkeit der Versuchsdauer bei einem Spannungsniveau von 2,0 MPa mittlere Verbundschubspannung

Auf Basis der dargestellten Versuchsergebnisse können beide Klebstoffsysteme als kriecharm eingestuft werden. Die dokumentierten Kriechverformungen liegen in einer für den Stahlbau nicht relevanten, d.h. akzeptablen Größenordnung.

4.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beide Klebstoffe die in Kapitel 3 definierten Anforderungen an Steifigkeit, Festigkeit sowie Kriechverhalten unter statischer Dauerlasteinwirkung erfüllen. Das spröde Bruchverhalten bei geringen Bruchdehnungen ist bei beiden Klebstoffen kritisch zu sehen. In Hinblick auf die klebtechnische Fertigung von Kreishohlprofilverbindungen durch Injektion weist der Klebstoff PUR aufgrund der geringen Viskosität Vorteile gegenüber dem zähflüssigen Klebstoff EP auf (Albiez et al. 2013; Ummerhofer et al. 2015). Die Untersuchung der Verbundeigenschaften der Klebstoffe mit Füge­teilen aus Stahl ist Gegenstand von Kapitel 5.

Entwicklung eines spannungsbasierenden Versagenskriteriums

5.1 Zielsetzung und prinzipielle Vorgehensweise

Die Tragfähigkeit geklebter Verbindungen hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Neben Geometrie, Temperatur, Feuchtigkeit, Fertigung und Zeit hat der Spannungszustand in der Klebschicht maßgeblichen Einfluss auf das mechanische Verhalten der Verbindung (BIEKER UND SCHLIMMER 2004). Trotz dieser Kenntnis existieren bisher keine allgemeinen Vorgaben zur Bemessung von strukturellen Klebverbindungen im Stahlbau (siehe Abschnitt 2).

Laut allgemeiner Aussage werden die Verbindungen bei klebgerechter Konstruktion im Wesentlichen durch Schub in der Ebene der Klebfuge beansprucht (HABENICHT 2009). Als weitere bedeutende Komponente sind jedoch Normalspannungen orthogonal zur Klebfläche (Querzug) zu nennen. Diese sind bei quasi allen Klebverbindungen vorhanden.

Ziel dieses Abschnittes ist die Entwicklung eines auf experimentellen und numerischen Untersuchungen basierenden mechanischen Versagenskriteriums für kombiniert durch Schub und Querzug beanspruchte Stahlklebungen. Hierzu ist die Kenntnis der Tragfähigkeit der geklebten Verbindung bei verschiedenen Interaktionsverhältnissen von Schub- und Querzugspannung in der Klebfuge erforderlich.

Als Grundlage für die Entwicklung des Versagenskriteriums dienen experimentelle Untersuchungen an geschäftet geklebten Stahlflachproben. Bei axialer Beanspruchung der Proben resultieren aus unterschiedlichen Schäftungswinkeln α verschiedene Kombinat-

nen der Komponenten Schubspannung parallel zur Ebene der Klebfuge τ_{xz} und Normalspannung orthogonal zur Ebene der Klebfuge σ_z (Abbildung 5.1).

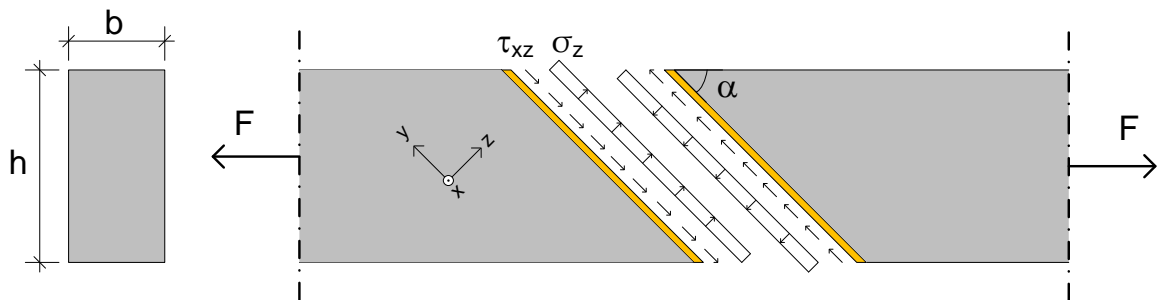


Abbildung 5.1 Normalnennspannungs- und Schubnennspannungskomponenten in geschäftet geklebten Stahlproben unter Zugbeanspruchung

Diese Spannungskomponenten lassen sich zunächst vereinfachend auf dem Niveau von Nennspannungen (d. h. Kraft / Fläche) berechnen. Hierzu werden die trigonometrischen Funktionen angewendet und die Bruchlasten durch die Querschnittsfläche des Stahlfügeteils ($A = b \cdot h$) dividiert. Unter der vereinfachenden Annahme konstanter Spannungen entlang der Klebfuge lassen sich die Spannungskomponenten folglich nach Gl. 5.1 und Gl. 5.2 ermitteln.

$$\sigma_z = \frac{F (\sin \alpha)^2}{b h} \quad \text{Gl. 5.1}$$

$$\tau_{xz} = \frac{F \sin \alpha \cos \alpha}{b h} \quad \text{Gl. 5.2}$$

Numerische Analysen der geschäftet geklebten Stahlproben erlauben im weiteren Verlauf die Bestimmung des Spannungszustandes in der Klebfuge bei den jeweiligen experimentell bestimmten Bruchlasten sowie die Auswertung zugehöriger lokaler Spannungskonzentrationen.

Die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen sind Grundlage für die Erarbeitung des Versagenskriteriums, das die Interaktion von Schub- und Normalspannungen berücksichtigt.

5.2 Probengeometrie und Fügebauteilwerkstoff

Als Grundlage zur Entwicklung des Versagenskriteriums werden geschäftet geklebte Stahlflachproben in Anlehnung an (DIN EN 12188) experimentell untersucht. Die Proben setzen sich aus je zwei Stahlbauteilen mit rechteckigem Querschnitt zusammen. Beide

Stahlbauteile weisen an einem Ende einen definierten Schäftungswinkel der gleichen Größe auf und lassen sich somit mit konstanter Schichtdicke von 2,5 mm klebtechnisch verbinden.

Die Proben unterscheiden sich durch sechs unterschiedliche Schäftungswinkel $\alpha = \{90^\circ, 70^\circ, 50^\circ, 30^\circ, 10^\circ, 0^\circ\}$, die namensgebend für die jeweilige Probenform sind. Die Proben mit dem Schäftungswinkel 0° werden mit zwei unterschiedlichen Überlappungslängen gefertigt. Zur Unterscheidung wird die Probe mit kurzem Überlapp mit 0°k bezeichnet. Schematisch sind in Abbildung 5.2 die Geometrien der Stahlbauteile sowie der Klebschichten dargestellt.

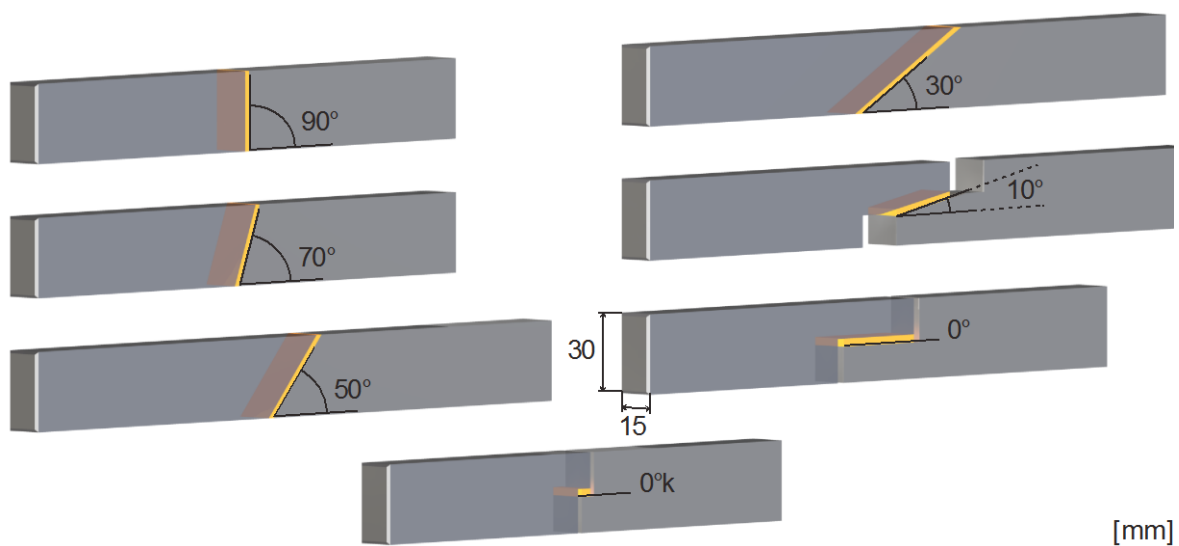


Abbildung 5.2 Schematische Darstellung der unter verschiedenen Schäftungswinkeln klebtechnisch verbundenen Stahlproben

Die geschäftete Klebung der Stahlfügeteile führt bei axialer Zugbeanspruchung der Probe zu einem definierten Interaktionsspannungszustand in der Klebfuge, bestehend aus Schub und Querkzug.

Zur Lasteinleitung sind an den Enden der Probekörper Bohrungen angebracht, die mit Hilfe eines Bolzens eine Anbindung an die Prüfmaschine erlauben. Neben dem Schäftungswinkel unterscheiden sich die Proben in ihrer Gesamtlänge. Dies resultiert aus einem festgelegten Mindestabstand von 60 mm zwischen Klebung und Lasteinleitungsbohrung, der eine homogene Spannungsverteilung im Stahlbauteil im Bereich der Klebfuge gewährleistet. Die Geometrie der Probenform 0° sowie 0°k ist an die Vorgaben für dicke Zugscherproben nach (DIN EN 14869-2) angelehnt. Die Probekörper der Reihe 10° weisen aus Gründen der Praktikabilität sowie zur Reduzierung des Einflusses großer Fügeteildehnungen auf die Tragfähigkeit der Klebung eine abgestufte Schäftung auf. Die detaillierten Abmessungen aller geklebten Flachproben sind im Anhang (Abbildung A.8) zusammengefasst.

Für die geschäfteten Flachproben wird der Stahl S355J2C nach (DIN EN 10277-1; DIN EN 10277-2) verwendet. Dabei handelt es sich um einen unlegierten Baustahl mit der Werkstoffnummer 1.0579. In den Technischen Lieferbedingungen nach (DIN EN 10277-2) sind Mindestanforderungen an die mechanischen Eigenschaften des Stahls festgelegt. Für Blechdicken zwischen 10 und 16 mm muss die 0,2 % - Dehngrenze $R_{p0,2}$ einen Mindestwert von 450 MPa aufweisen. Die Zugfestigkeit R_m muss im Bereich zwischen 580 und 880 MPa liegen. Eigene Zugversuche dienen der Überprüfung der Einhaltung der normativ vorgegebenen Werte. Hierfür werden aus den Flachstäben vier proportionale Zugproben der Form E 5 x 16 x 50 nach (DIN 50125) ausgearbeitet. Die Prüfung der Zugproben nach (DIN EN ISO 6892-1) erfolgt auf einer elektro-mechanischen Zwick Materialprüfmaschine. Die in Abbildung 5.3 dargestellten Ergebnisse der Zugversuche zeigen, dass die normativen Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Baustahls eingehalten werden.

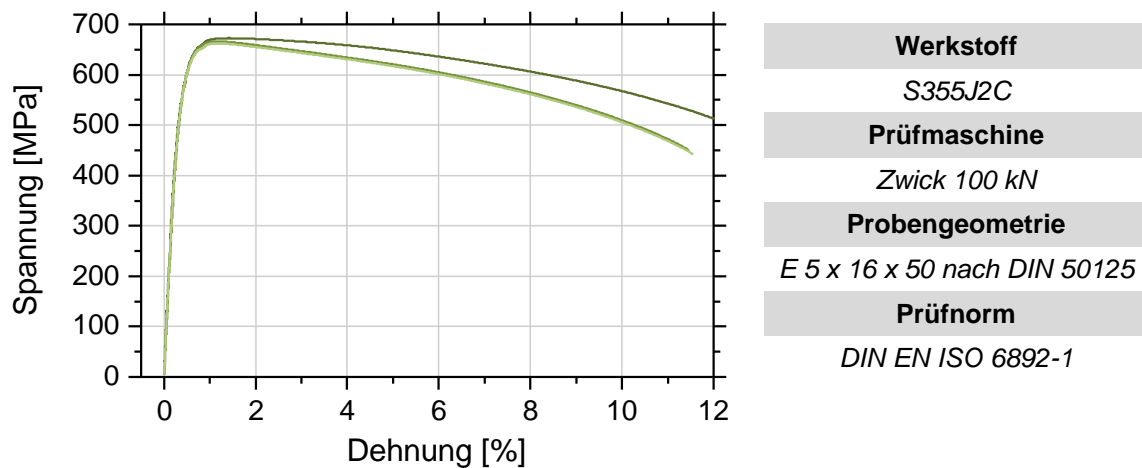


Abbildung 5.3 Spannungs-Dehnungsverhalten von Zugproben des Werkstoffes S355J2C

Die experimentell bestimmte 0,2 % - Dehngrenze $R_{p0,2}$ liegt im Mittelwert aller Zugversuche bei 606 MPa, die Zugfestigkeit R_m beträgt im Mittel 664 MPa. Wesentlich für die vorliegende Arbeit ist, dass unter den aufgebrachtten Zugbeanspruchungen der Stahlfügeteile keine Plastizierungen auftreten. Ein Vergleich mit den in Abschnitt 5.3.3 bestimmten maximalen Traglasten der geklebten Verbindungen zeigt, dass diese Randbedingung deutlich eingehalten ist.

Des Weiteren definiert (DIN EN 10277-2) Anforderungen an die chemische Zusammensetzung der Stahlwerkstoffe. Für den verwendeten S355J2C dürfen die in Tabelle 5.1 angegebenen Maximalwerte nicht überschritten werden. Der Vergleich mit der ebenfalls in Tabelle 5.1 dargestellten chemischen Zusammensetzung der verwendeten Stahlbauteile bestätigt die Einhaltung der normativen Vorgaben. Quelle dieser Schmelzenanalyse ist das mitgelieferte Werkszeugnis 2.2 nach (DIN EN 10204).

| Stahlsorte S355J2C | Massenanteile in % | | | | | |
|--------------------|--------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cu |
| DIN EN 10277-2 | ≤ 0,20 | ≤ 0,55 | ≤ 1,60 | ≤ 0,03 | ≤ 0,030 | ≤ 0,550 |
| Schmelzenanalyse | 0,14 | 0,22 | 1,30 | 0,01 | 0,006 | 0,278 |

Tabelle 5.1 Chemische Zusammensetzung der Stahlsorte S355J2C nach (DIN EN 10277-2) sowie aus der Schmelzenanalyse

5.3 Fertigung und experimentelle Untersuchungen

5.3.1 Probekörperbezeichnung und Versuchsprogramm

Die Tragfähigkeit der unter verschiedenen Schäftungswinkeln gefertigten Stahlklebung wird für die beiden Klebstoffe PUR und EP bestimmt. Die Bezeichnung der Probekörper gibt den verwendeten Klebstoff sowie den jeweiligen Schäftungswinkel der einzelnen Probe wieder. Damit ergibt sich für eine unter 50° mit EP geklebte Probe die Bezeichnung „E/50“. Analog wird für den Klebstoff PUR der Anfangsbuchstabe „P“ verwendet.

In Tabelle 5.2 ist eine Übersicht der experimentellen Untersuchungen an geschäftet geklebten Stahlzugproben zusammengestellt. Es werden für beide Klebstoffe jeweils sechs Zugversuche pro Schäftungswinkel durchgeführt. Davon abweichend setzt sich die Versuchsreihe P/00 aus 15 Proben zusammen, da Voruntersuchungen zur Überprüfung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit auf die Tragfähigkeit unter Verwendung dieser Probenform durchgeführt werden.

Insgesamt werden 93 Verbundproben geprüft, die als experimentell bestimmte Grundlage zur Erarbeitung eines spannungsbasierenden Versagenskriteriums bei Interaktion von Schub- und Querkzugspannung dienen.

| Klebstoff PUR | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Schäftungswinkel | 90° | 70° | 50° | 30° | 10° | 0° | 0° |
| Versuchsreihe | P/90 | P/70 | P/50 | P/30 | P/10 | P/00 | P/00k |
| Anzahl Versuche | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 15 | 6 |
| Klebstoff EP | | | | | | | |
| Versuchsreihe | E/90 | E/70 | E/50 | E/30 | E/10 | E/00 | E/00k |
| Anzahl Versuche | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |

Tabelle 5.2 Versuchsprogramm geschäftet geklebter Stahlproben, Klebstoffe PUR und EP

5.3.2 Klebtechnische Fertigung der geschäftet geklebten Stahlproben

Die Stahlbauteile werden nach der spanenden Bearbeitung zur Herstellung der Schäftung bzw. Abstufung klebtechnisch gefügt. Vor der Klebung erfolgt eine definierte Vorbehandlung der Klebflächen:

- Diese Vorbehandlung sieht zunächst die Reinigung der Kontaktflächen mit Methylethylketon (MEK) vor. Hiermit werden Oberflächenkontaminationen durch während des anschließenden Strahlprozesses eingetragene Verunreinigungen reduziert (HABENICHT 2009).
- Anschließend werden die Oberflächen der Fügeteile mit Edelkorund der Siebung F100 (106 – 150 μm) einem Strahlprozess unterzogen. Dabei wird die Oberflächengüte Sa3 nach (DIN EN ISO 8501-1) erreicht.
- Abschließend erfolgt eine nochmalige Reinigung der Klebflächen durch Wischen mit Methylethylketon.

Von zentraler Bedeutung bei der klebtechnischen Fertigung der geschäfteten Proben ist die möglichst genaue Positionierung der Stahlbauteile zur Minimierung von Schiefstellungen oder Versätzen. Derartige Imperfektionen führen zu unplanmäßigen, die Versuchsergebnisse verfälschenden Biegemomenten während der Prüfung. Die erforderliche hohe geometrische Fertigungsgenauigkeit wird durch die in Abbildung 5.4 dargestellte Anordnung von Fügeteilen und Fertigungshilfsmitteln erreicht.

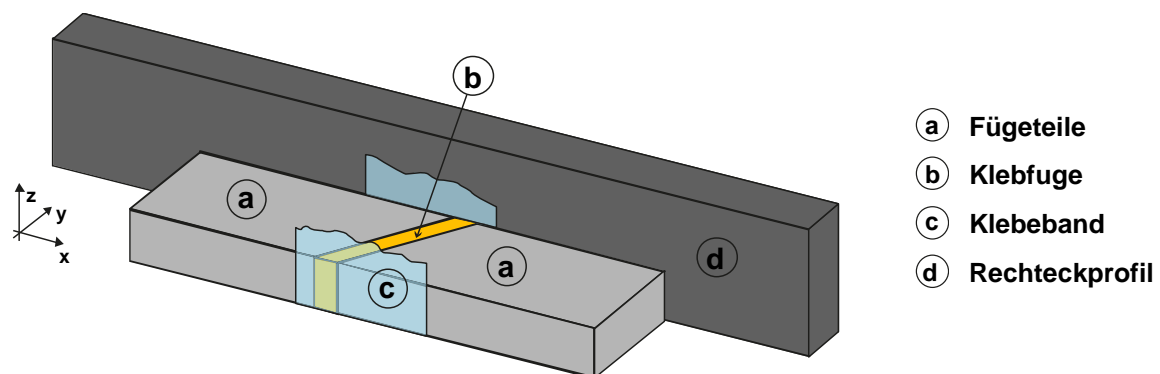


Abbildung 5.4 Anordnung von Fügeteilen und Hilfselementen zur Klebung der Flachproben

Zur Sicherstellung der hohen Fertigungsgenauigkeit in z-Richtung (siehe Abbildung 5.4) dient eine massive Granitplatte mit geprüfter Ebenheit als Lagerung für die Stahlbauteile. Die exakte Ausrichtung der Fügeteile in y-Richtung gewährleisten planparallel geschliffene Rechteckstahlprofile. Mit Hilfe von Schraubzwingen werden die Fügeteile daran fixiert. Dies garantiert nicht nur die parallele Ausrichtung der Stahlbauteile, sondern verhindert außerdem eine Verschiebung während des Klebprozesses. Die bei allen Proben konstant gehaltene Klebschichtdicke von 2,5 mm wird durch ein metallisches Präzisions-

bauteil dieser Stärke eingestellt, das während der Positionierung und Ausrichtung als Abstandshalter zwischen den Fügeteilen dient. Vor jeder Verwendung werden die Abstandshalter mit MEK gereinigt. Die Applikation des nach dem Mischen fließfähigen Klebstoffes erfolgt mit Hilfe einer Spritze durch Injektion in den Klebspalt. Einseitig selbstklebendes Polyethylenband dichtet den Spalt dabei auf drei Seiten ab. Abbildung 5.5 zeigt den Fertigungsaufbau von Fügeteilen und Hilfselementen während der klebtechnischen Fertigung.

Aufgrund der geometrischen Besonderheiten der Proben mit einem Winkel von 10° bzw. 0° ist eine alternative Abdichtung der Klebspaltenden erforderlich. Hierzu kommen mit Polyethylenband ummantelte Holzelemente mit einer Dicke von 2,5 mm zum Einsatz. Die Aushärtedauer aller geklebten Flachproben beträgt nach Rücksprache mit den Klebstoffherstellern mindestens 28 Tage.



Abbildung 5.5 Klebstoffapplikation durch Injektion in den Spalt der Flachproben

5.3.3 Experimentelle Prüfung der geschäftet geklebten Stahlproben

Die Zugversuche zur Bestimmung der quasi-statischen Tragfähigkeit unter verschiedenen Schäftungswinkeln klebtechnisch verbundener Flachstahlproben werden auf der elektro-mechanischen Zwick-Materialprüfmaschine der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine durchgeführt. Diese Prüfmaschine verfügt über eine maximale Prüfkraft von 100 kN. Sowohl für die Steuerung als auch für die Aufzeichnung der Messdaten kommt die zur Prüfmaschine gehörende Software *testXpert II V3.4* der Firma Zwick zum Einsatz. Die Zugversuche werden in Anlehnung an (DIN EN 14869-2) weggesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0,50 mm/min durchgeführt. Zur Quantifizierung des Einflusses der Dehn-/Gleitraten dienen weitere Zugversuche bei 0,05 bzw. 5,00 mm/min Prüfgeschwindigkeit. Während der Versuchsdurchführung werden neben der Maschi-

nenkraft der Traversenweg sowie die lokale Längenänderung in unmittelbarer Nähe der Klebung aufgezeichnet. Für die Lokalmessung werden Dehnungsaufnehmer verwendet. Die Anfangsmesslänge beträgt 20 mm. Bei den Probekörpern der Reihe P/00 und E/00 muss die Anfangsmesslänge aus geometrischen Gründen zu 60 mm gewählt werden. Materialprüfmaschine und Tastdehnungsaufnehmer erfüllen die Anforderungen an die Genauigkeitsklasse 1 nach (DIN EN ISO 7500-1).

Zur Vermeidung von unplanmäßigen Biegemomenten in der Klebfuge werden die geklebten Flachproben mit Hilfe einer Doppelgelenk-Prüfvorrichtung an die hydraulisch schließenden Klemmbacken der Prüfmaschine angebunden. Diese Vorrichtung weist zwei um 90° gegeneinander verdrehte Gabelöffnungen auf. Über einen Gelenkbolzen mit Durchmesser 12 mm wird die Beanspruchung in die Probe eingeleitet. Die zentrische Anbindung an die Klemmbacken der Prüfmaschine erfolgt über ein zylindrisches Drehbauteil, das ebenfalls durch einen Gelenkbolzen mit der Prüfvorrichtung verbunden ist und somit Einspanneffekte um die zweite Hauptachse wirkungsvoll vermeidet. Die Prüfvorrichtung zur Vermeidung von Einspannmomenten sowie eine unter dem Winkel 0° geklebte Stahlprobe während der Prüfung zeigen die nachfolgend dargestellte Abbildung 5.6 bzw. Abbildung 5.7.



Abbildung 5.6 Prüfvorrichtung zur doppelgelenkigen Anbindung der Probekörper an die Prüfmaschine



Abbildung 5.7 Prüfung einer Probe der Reihe E/00 mit dem Winkel 0°

5.4 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

5.4.1 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit

Die Festigkeit geklebter Verbindungen kann von der Prüfgeschwindigkeit, d. h. der Dehnrate abhängig sein. So zeigen viele Klebstoffe bei zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit größere Festigkeiten bei gleichzeitiger Reduktion des Verformungsvermögens (MB 382 2012). Zur Untersuchung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit auf die Festigkeit geklebter Stahlverbindungen werden Probekörper der Serie P/00 bei unterschiedlichen Traversengeschwindigkeiten geprüft. Der Schäftungswinkel 0° wird aufgrund der der geklebten Kreishohlprofilverbindung ähnlichen Klebfugenbeanspruchung gewählt (Winkel zwischen einwirkender Prüfkraft und Bauteilachse: 0°). Im Vergleich zum Klebstoff EP weist der Klebstoff PUR eine deutlich höhere Steifigkeit (Elastizitätsmodul) auf. Die Spannungskonzentrationen in geklebten Verbindungen steigen mit zunehmender Steifigkeit des Klebstoffs an. Da diese Spannungskonzentrationen bei spröden Werkstoffen in der Regel versagensrelevant sind, wird der steifere Klebstoff PUR für die Untersuchung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit gewählt.

Die Referenzprüfgeschwindigkeit wird in Anlehnung an (DIN EN 14869-2) zu $0,5 \text{ mm/min}$ gewählt. Zusätzlich werden geklebte Stahlproben mit Prüfgeschwindigkeiten von einem Zehntel ($0,05 \text{ mm/min}$) bzw. der zehnfachen Referenzgeschwindigkeit (5 mm/min) bis zum Bruch beansprucht. In Kombination mit der Klebschichtdicke ($2,5 \text{ mm}$) ergeben sich somit Gleitraten von $0,02$, $0,2$ und $2 \text{ [min}^{-1}\text{]}$.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Festigkeit geklebter Stahlproben sind in Tabelle 5.3 zusammengestellt. Für jede Probe sind die vor der Prüfung vermessene Klebfläche, die jeweilige Prüfgeschwindigkeit und Gleitrate sowie die Bruchkraft und die daraus berechnete Nennschubspannung (Kraft dividiert durch Klebfläche) im Überlappungsbereich der Klebung angegeben. Zudem werden für die Bruchlasten und Nennschubspannungen der Prüfserien mit jeweils gleicher Prüfgeschwindigkeit Mittelwerte (MW) sowie Schätzwerte der Standardabweichung (SD) basierend auf einer Normalverteilung berechnet.

Bei Betrachtung der Ergebnisse wird deutlich, dass die Nennschubspannungen für die drei untersuchten Beanspruchungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von $20,5 \text{ MPa}$ bis $22,2 \text{ MPa}$ liegen. Die Differenz zwischen den Mittelwerten der Nennschubspannungen liegt in der Größenordnung der jeweiligen Standardabweichungen ($0,4$ bis $1,3 \text{ MPa}$), sodass diese Unterschiede auch auf die bei experimentellen Untersuchungen schwer vermeidbare Streuung zurückgeführt werden können.

Wesentlich im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Erkenntnis, dass die untersuchten Beanspruchungsgeschwindigkeiten keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit der geklebten Verbindung aufweisen.

| Probekörper | Klebläche [mm ²] | Traversen- geschwindigkeit [mm/min] | Gleitrage [min ⁻¹] | Bruchkraft F [kN] | Nennschub- spannung τ_N [MPa] | |
|---------------|---------------------------------|---|-----------------------------------|----------------------|--|---------|
| P/00/v0,05/01 | 567 | 0,05 | 0,02 | 11,7 | 20,7 | MW 22,2 |
| P/00/v0,05/02 | 575 | | | 13,2 | 23,0 | SD 1,3 |
| P/00/v0,05/03 | 573 | | | 13,1 | 22,8 | |
| P/00/v0,5/01 | 570 | 0,50 | 0,20 | 11,9 | 20,9 | MW 20,5 |
| P/00/v0,5/02 | 570 | | | 11,5 | 20,2 | SD 0,4 |
| P/00/v0,5/03 | 572 | | | 11,7 | 20,4 | |
| P/00/v5/01 | 569 | 5,00 | 2,00 | 12,2 | 21,5 | MW 21,1 |
| P/00/v5/02 | 570 | | | 11,2 | 19,7 | SD 1,2 |
| P/00/v5/03 | 569 | | | 12,5 | 22,1 | |

Tabelle 5.3 Ergebnisse der experimentellen Prüfung geschäftet geklebter Stahlproben bei variierender Beanspruchungsgeschwindigkeit; Klebstoff PUR

5.4.2 Experimentelle Ergebnisse Klebstoff PUR

Während der Versuchsdurchführung wird neben der Maschinenkraft die Lokalverformung zwischen den beiden Fügeteilen mit Hilfe eines Dehnungsaufnehmers aufgezeichnet (Details siehe Abschnitt 5.3.3). Bei allen Probengeometrien steigt die Kraft mit zunehmender axialer Verformung nach geringen Setzungen der Tastdehnungsaufnehmer zu Versuchsbeginn mit konstanter Steifigkeit quasi-linear an. Das Versagen aller Proben tritt schlagartig und spröde auf. Hervorzuheben ist, dass dieses Tragverhalten bei allen Versuchen festzustellen ist. Ein Abfall der Steifigkeit kann bis zum Bruch nicht beobachtet werden. Jeweils ein exemplarischer Kraft-Lokalverformungsverlauf je Versuchsreihe ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Aufgrund der Vergleichbarkeit der Kraft-Verformungsverläufe einer Reihe wird auf die Darstellung aller Versuche an dieser Stelle verzichtet.

Deutlich unterschiedlich sind die Steifigkeiten der einzelnen Prüfkörperreihen. Mit geringer werdendem Schäftungswinkel ist eine Abnahme der Verbindungssteifigkeit feststellbar. Dies kann mit der zunehmenden Gleitung der Klebfuge erklärt werden. Aufgrund des Ziels, ein Bruchkriterium für geklebte Stahlverbindungen zu erarbeiten, werden die Last-Verformungsbeziehungen im weiteren Verlauf für alle Versuche hinsichtlich der jeweiligen Bruchlast ausgewertet.

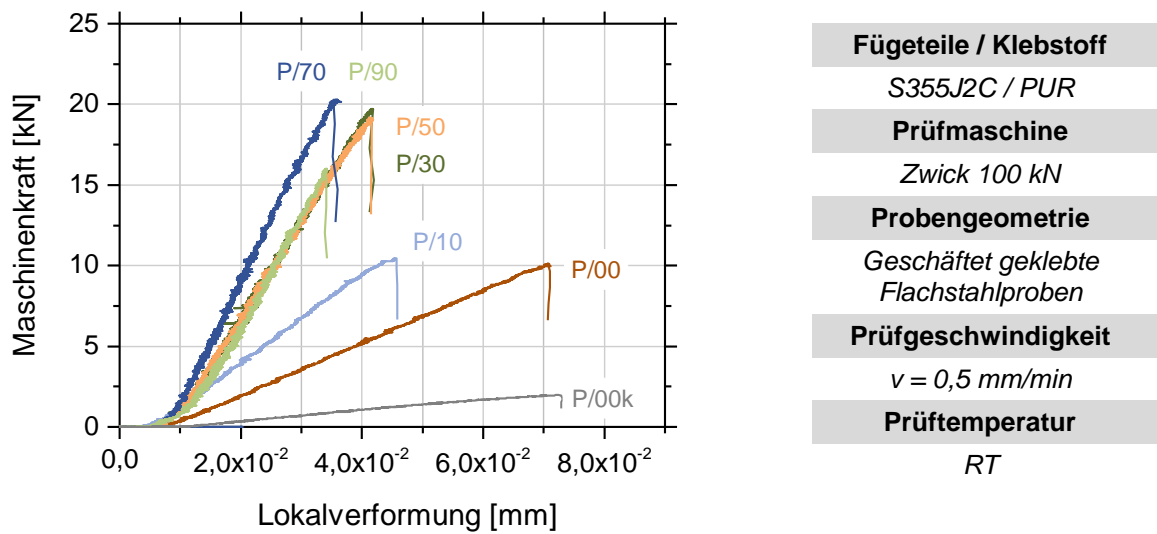


Abbildung 5.8 Kraft-Lokalverformungen der quasi-statischen Prüfung geschäftet geklebter Stahlproben; Klebstoff PUR

Charakteristisch für jede Versuchsserie ist die anhand der Bruchbilder festgestellte Versagensart der Klebverbindung. Die Bruchbilder in Drauf- und Seitenansicht je eines exemplarischen Probekörpers pro Versuchsreihe sind in Tabelle 5.4 zusammengestellt.

| Versuchsreihe | Bruchbilder | Bezeichnung Bruchbild |
|---------------|-------------|-----------------------|
| P/90 | | Kohäsionsbruch |
| P/70 | | Mischbruch |
| P/50 | | Mischbruch |

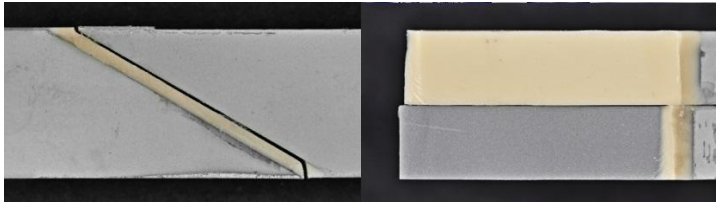
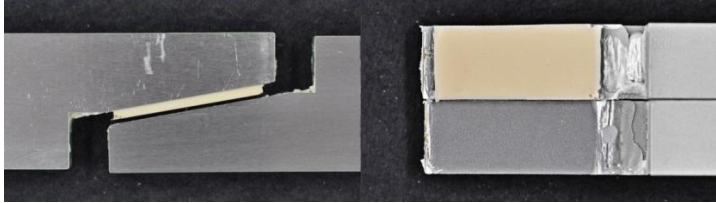
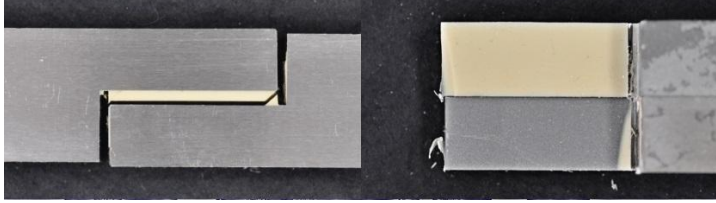

| Versuchsreihe | Bruchbilder | Bezeichnung Bruchbild |
|---------------|--|-----------------------|
| P/30 |  | Adhäsionsbruch |
| P/10 |  | Adhäsionsbruch |
| P/00 |  | Adhäsionsbruch |
| P/00k |  | Adhäsionsbruch |

Tabelle 5.4 Exemplarische Bruchbilder der Versuchsreihen mit geschäftet geklebten Stahlproben; Klebstoff PUR

In Anlehnung an (DIN EN ISO 10365) können diese in Kohäsionsbrüche, Adhäsionsbrüchen sowie Mischformen zwischen den beiden Vorgenannten unterschieden werden. Alle Probekörper einer Serie weisen vergleichbare Bruchbilder auf.

Zunächst ist aus den Bruchbildern ersichtlich, dass ein Zusammenhang zwischen dem Spannungszustand in der Klebung und der festgestellten Versagensart herstellbar ist. Die Probekörper, deren Klebfugen bei globaler Zugbeanspruchung vorwiegend durch Normalspannungen beansprucht werden (Reihe P/90), versagen kohäsiv im Klebstoffbulk. Der Bruch geht bei dieser Prüfserie in der Regel von kleinen porenartigen Lufteinschlüssen in der Klebschicht aus.

Ein vollständig anderes Bruchbild weisen die Probekörper der Serie P/00 und P/00k auf. Bei dieser Probengeometrie kann von einer überwiegend durch Schub beanspruchten Klebfuge ausgegangen werden. Diese Beanspruchung führt zu einem adhäsiven Versagen der Proben der Klebung an einem Füge teil. Lediglich bei einer Probe ist ein Adhäsions-

bruch, der sich in etwa gleichen Verhältnissen auf beide Fügepartner aufteilt, zu beobachten. Eine detailliertere Untersuchung der Bruchfläche ist mit Hilfe eines Mikroskops möglich. In Abbildung 5.9 ist ein Ausschnitt der Fügepartneroberfläche der Probe P/00/02 bei 100-facher (links) sowie 500-facher (rechts) Vergrößerung dargestellt. Gut erkennbar sind auf dem Stahlsubstrat haftende Klebstoffreste. Nach (DIN EN ISO 10365) kann diese Bruchform auch als substratnaher, spezieller Kohäsionsbruch bezeichnet werden, da der Bruch nicht exakt zwischen Substratoberfläche und Klebschicht verläuft. Aufgrund der vergleichsweise geringen Anzahl der Klebstoffpartikel wird im Folgenden jedoch der Begriff Adhäsionsbruch verwendet.

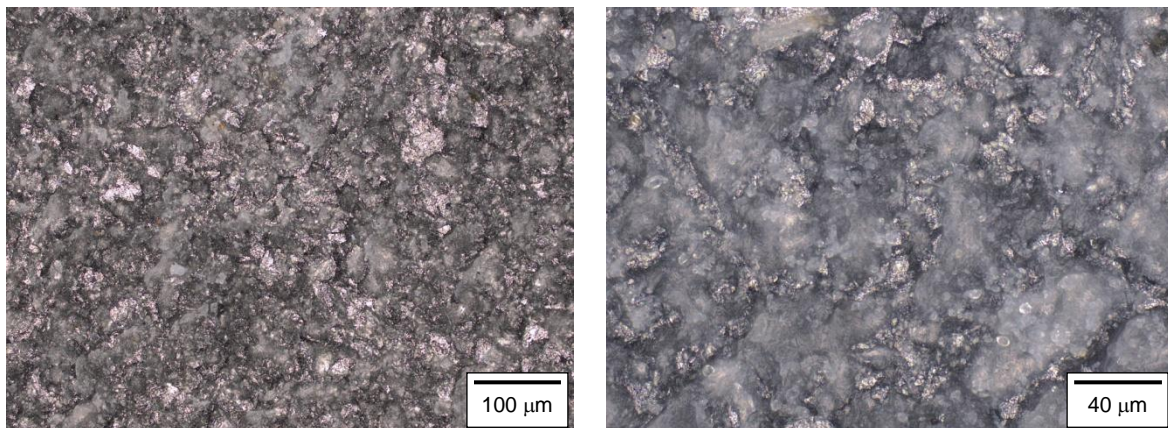


Abbildung 5.9 Substratoberfläche der Probe P/00/02 nach der Prüfung; links: 200-fache Vergrößerung, rechts: 500-fache Vergrößerung

Vergleichbare Bruchbilder zeigen sich bei allen Proben der Prüfserien P/10 und P/30. Auch die Klebfugen dieser Prüfreiheiten werden überwiegend durch Schub beansprucht. Aufgrund des zunehmenden Schäftungswinkels sind die Schubspannungen jedoch von Normalspannungen orthogonal zur Klebung überlagert. Als charakteristische Bruchform kann für diese beiden Serien ebenso wie für die Proben der Reihe P/50 der Adhäsionsbruch genannt werden. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass bei den Proben der Reihe P/50 die beiden Spannungskomponenten bei einer Betrachtung auf der Basis von Nennspannungen in einer ähnlichen Größenordnung vorliegen. Eine Mischform zwischen Adhäsions- und Kohäsionsbruch ist bei den Proben der Prüfreiheiten P/70 und P/50 feststellbar. Eine Auswertung der Bruchflächen zeigt bei der Serie P/50 ein vorwiegend adhäsives Versagen mit geringen Kohäsionsbruchanteilen. Die Klebfugen der Probereihe P/70 werden überwiegend durch Normalspannungen beansprucht. Dies führt zu Bruchbildern, die ein überwiegend kohäsives Versagen mit geringeren adhäsiven Anteilen zeigen. Wie bereits erwähnt führt die ausschließliche Beanspruchung der Klebung durch Normalspannungen zu einem reinen Kohäsionsbruch des Klebstoffs (Reihe P/90).

Somit kann zusammengefasst werden, dass in Abhängigkeit des Beanspruchungszustandes unterschiedliche Versagensmodi der geschäftet geklebten Stahlverbindung auftreten.

Bei dominierender Normalbeanspruchung tritt ein reiner Kohäsionsbruch auf. Mit zunehmender Überlagerung von Schubspannungen kann ein Mischbruch zwischen Kohäsion und Adhäsion beobachtet werden. Ab einem Schäftungswinkel von 50° und damit dominierendem Schubspannungsanteil in der Klebung versagen alle Proben adhäsiv.

Im weiteren Verlauf werden die durch Auswertung der Last-Verformungskurven ermittelten Bruchlasten der mit dem Klebstoff PUR geschäftet verbundenen Stahlproben vorgestellt.

Hierzu sind in Tabelle 5.5 neben der Probekörperbezeichnung die vermessene Klebfläche sowie die Bruchlast der Verbindung zusammengefasst. Wie in Abschnitt 5 erläutert, lassen sich aus der experimentell bestimmten Bruchlast infolge des Schäftungswinkels die beiden Nennspannungskomponenten Normalspannung orthogonal zur Klebfläche σ_z sowie Schubspannung in der Ebene der Klebfuge τ_{xz} bestimmen (Abbildung 5.1). Dazu werden Gl. 5.1 und Gl. 5.2 verwendet.

Zudem sind in Tabelle 5.5 für jede Versuchsreihe der Mittelwert sowie der Schätzwert der Standardabweichung unter Annahme einer Normalverteilung angegeben.

| Probekörper | Schäftungswinkel α [°] | Klebfläche [mm ²] | Bruchkraft F [kN] | | Normalspannung σ_z [MPa] | | Schubspannung τ_{xz} [MPa] | |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|
| | | | | | | | | |
| P/90/01 | 90 | 450 | 15,91 | <i>MW</i> | 35,4 | <i>MW</i> | 0,0 | <i>MW</i> |
| P/90/02 | | 450 | 16,10 | 16,00 | 35,8 | 35,6 | 0,0 | 0,0 |
| P/90/02 | | 450 | 15,91 | | 35,4 | | 0,0 | |
| P/90/04 | | 450 | 17,69 | <i>SD</i> | 39,3 | <i>SD</i> | 0,0 | <i>SD</i> |
| P/90/05 | | 450 | 15,99 | 1,05 | 35,5 | 2,3 | 0,0 | 0,0 |
| P/90/06 | | 450 | 14,39 | | 32,0 | | 0,0 | |
| P/70/01 | 70 | 479 | 19,08 | <i>MW</i> | 37,4 | <i>MW</i> | 13,6 | <i>MW</i> |
| P/70/02 | | 479 | 19,23 | 19,13 | 37,7 | 37,5 | 13,7 | 13,7 |
| P/70/02 | | 479 | 20,28 | | 39,8 | | 14,5 | |
| P/70/04 | | 479 | 20,11 | <i>SD</i> | 39,5 | <i>SD</i> | 14,4 | <i>SD</i> |
| P/70/05 | | 479 | 19,13 | 1,18 | 37,5 | 2,3 | 13,7 | 0,8 |
| P/70/06 | | 479 | 16,97 | | 33,3 | | 12,1 | |
| P/50/01 | 50 | 587 | 21,35 | <i>MW</i> | 27,8 | <i>MW</i> | 23,4 | <i>MW</i> |
| P/50/02 | | 587 | 19,39 | 19,80 | 25,3 | 25,8 | 21,2 | 21,7 |
| P/50/02 | | 587 | 19,17 | | 25,0 | | 21,0 | |
| P/50/04 | | 587 | 20,67 | <i>SD</i> | 27,0 | <i>SD</i> | 22,6 | <i>SD</i> |
| P/50/05 | | 587 | 21,63 | 1,86 | 28,2 | 2,4 | 23,7 | 2,0 |
| P/50/06 | | 587 | 16,60 | | 21,6 | | 18,2 | |

| Probekörper | Schäftungswinkel α [°] | Klebfläche [mm ²] | Bruchkraft | | Normalspannung | | Schubspannung | |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|--------------|------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | | F [kN] | | σ_z [MPa] | | τ_{xz} [MPa] | |
| P/30/01 | 30 | 900 | 22,07 | <i>MW</i> | 12,3 | <i>MW</i> | 21,2 | <i>MW</i> |
| P/30/02 | | 900 | 17,89 | 19,89 | 9,9 | 11,0 | 17,2 | 19,1 |
| P/30/02 | | 900 | 17,25 | | 9,6 | | 16,6 | |
| P/30/04 | | 900 | 20,58 | <i>SD</i> | 11,4 | <i>SD</i> | 19,8 | <i>SD</i> |
| P/30/05 | | 900 | 21,83 | 2,00 | 12,1 | 1,1 | 21,0 | 1,9 |
| P/30/06 | | 900 | 19,71 | | 11,0 | | 19,0 | |
| P/10/01 | 10 | 516 | 11,23 | <i>MW</i> | 3,8 | <i>MW</i> | 21,4 | <i>MW</i> |
| P/10/02 | | 480 | 10,35 | 10,28 | 3,7 | 3,6 | 21,2 | 20,2 |
| P/10/02 | | 513 | 9,91 | | 3,4 | | 19,0 | |
| P/10/04 | | 485 | 9,06 | <i>SD</i> | 3,2 | <i>SD</i> | 18,4 | <i>SD</i> |
| P/10/05 | | 507 | 10,67 | 0,74 | 3,7 | 0,2 | 20,7 | 1,2 |
| P/10/06 | | 513 | 10,46 | | 3,5 | | 20,1 | |
| P/00/01 | 0 | 570 | 10,90 | <i>MW</i> | 0,0 | <i>MW</i> | 19,1 | <i>MW</i> |
| P/00/02 | | 570 | 11,54 | 10,71 | 0,0 | 0,0 | 20,2 | 18,8 |
| P/00/03 | | 570 | 11,18 | | 0,0 | | 19,6 | |
| P/00/04 | | 570 | 10,63 | <i>SD</i> | 0,0 | <i>SD</i> | 18,6 | <i>SD</i> |
| P/00/05 | | 570 | 10,12 | 0,63 | 0,0 | 0,0 | 17,8 | 1,1 |
| P/00/06 | | 570 | 9,90 | | 0,0 | | 17,4 | |
| P/00k/01 | 0 | 73 | 1,87 | <i>MW</i> | 0,0 | <i>MW</i> | 25,5 | <i>MW</i> |
| P/00k/02 | | 73 | 1,83 | 1,92 | 0,0 | 0,0 | 25,2 | 26,2 |
| P/00k/03 | | 73 | 1,96 | | 0,0 | | 26,7 | |
| P/00k/04 | | 74 | 1,98 | <i>SD</i> | 0,0 | <i>SD</i> | 26,8 | <i>SD</i> |
| P/00k/05 | | 74 | 1,90 | 0,07 | 0,0 | 0,0 | 25,6 | 0,8 |
| P/00k/06 | | 73 | 1,99 | | 0,0 | | 27,2 | |

Tabelle 5.5 Ergebnisse der experimentellen Prüfung geschäftet geklebter Stahlproben; Klebstoff PUR

Die berechneten Standardabweichungen je Versuchsreihe (Tabelle 5.5) zeigen, dass die Bruchlasten und die daraus berechneten Spannungskomponenten für alle untersuchten Schäftungswinkel eine geringe Streuung aufweisen. Als weiteres Maß für die Quantifizierung der Streuung wird der empirische Variationskoeffizient V verwendet. Dieser ist definiert als der Quotient aus Standardabweichung und arithmetischem Mittel einer Versuchsreihe und eignet sich als dimensionsloses Maß zum Vergleich der Streuung verschiedener Reihen (TOUTENBURG UND HEUMANN 2009). In Tabelle 5.6 sind die Variationskoeffizienten für die sieben Versuchsreihen der mit dem Klebstoff PUR gefügten Stahlproben zusammengestellt. Es ist ersichtlich, dass der Variationskoeffizient für alle Versuchsreihen in der Größenordnung zwischen 6 % und 10 % liegt. Dabei sind für die Versuchsreihen mit mittleren Schäftungswinkeln die höchsten Variationskoeffizienten feststellbar. Diese Beobachtung kann durch den statistischen Größeneinfluss erklärt werden. So weisen die genannten Proben die größten Klebstoffvolumina auf.

| Versuchsreihe | P/90 | P/70 | P/50 | P/30 | P/10 | P/00 | P/00k |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Variationskoeffizient V [%] | 7 % | 6 % | 9 % | 10 % | 7 % | 6 % | 3 % |

Tabelle 5.6 Variationskoeffizienten der Versuchsreihen an mit PUR geschäftet geklebten Flachstahlproben

In diesem Kapitel wird ein spannungsbasierendes Versagenskriterium, das die Interaktion von Schub- und Normalspannung berücksichtigt, erarbeitet. Grundlage für dieses Versagenskriterium sind die aus den experimentell bestimmten Tragfähigkeiten berechneten Werte der Spannungskomponenten. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse sind in Abbildung 5.10 die Schubspannungskomponenten über den Normalspannungskomponenten zunächst auf dem Niveau von Nennspannungen aufgetragen. Dabei werden sowohl die einzelnen Versuchsergebnisse (Dreiecke) als auch die aus den Einzelergebnissen berechneten Mittelwerte der jeweiligen Versuchsreihe (Andreaskreuze) dargestellt.

Beim Vergleich der Mittelwerte der einzelnen Spannungskomponenten auf dem Niveau von Nennspannungen ist zunächst festzustellen, dass die Bruchnormalspannungen der Reihe P/90 etwas geringer als die Normalspannungskomponenten der zusätzlich schubbeanspruchten Probenreihe P/70 sind. Dies bedeutet, dass im Vergleich der beiden Proben die Überlagerung der Normalspannung mit einer Schubspannungskomponente unerwarteterweise nicht zu einer Reduktion des aus der Bruchlast berechenbaren Bruchnormalspannungsanteils führt. Die Differenz zwischen beiden Mittelwerten liegt jedoch im Bereich der Standardabweichung.

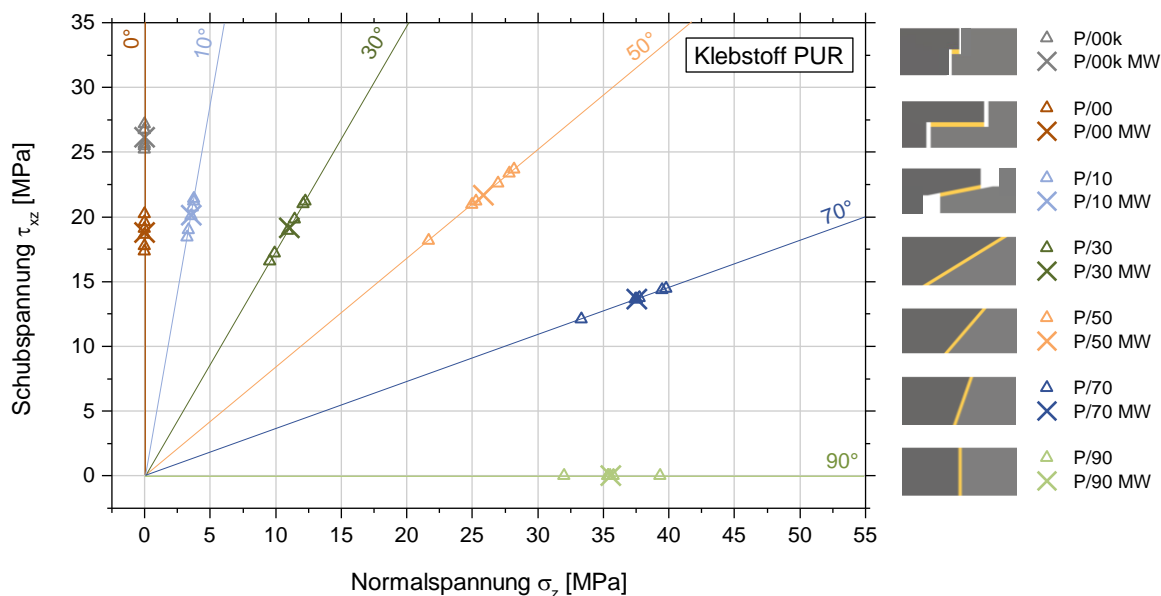


Abbildung 5.10 Auf der Basis von Nennspannungen berechnete Normalspannungs- und Schubspannungskomponenten in der Klebfuge geschäftet geklebten Stahlproben; Klebstoff PUR

Außerdem fällt auf, dass die rechnerischen Nennschubspannungen bei den Probenreihen P/00, P/10, P/30 und P/50 trotz mit zunehmendem Schäftungswinkel größer werdender überlagerter Normalspannungskomponente in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Auch dies ist nicht zu erwarten.

Die Probereihen P/00 (38 mm) und P/00k (5 mm) unterscheiden sich lediglich in der Länge der Überlappungsklebung. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt jedoch, dass die aus den Bruchlasten berechenbaren Nennschubspannungen in deutlich unterschiedlichen Größenordnungen liegen. Der Mittelwert der Nennschubspannung der Probenreihe P/00k liegt etwa 40 % über dem Mittelwert der Nennschubspannung der Probenreihe P/00. Diese nicht ausschließlich auf den statistischen Größeneffekt zurückführbare Feststellung zeigt, dass eine Bemessung der untersuchten Klebverbindungen auf der Basis von Nennspannungen nicht möglich ist. Verstärkt wird dies durch die bereits beschriebene Beobachtung, dass eine Interaktion von Schub- und Querkraft nicht zu einer Reduktion der Bruchspannungen in Bezug zu der singulären Beanspruchung durch nur eine Komponente führt.

Somit kann festgehalten werden, dass die im Bauwesen übliche Vorgehensweise, Bauteile und deren Verbindungen auf der Basis von Nennspannungen zu bemessen, bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Klebverbindungen nicht zielführend ist. Deshalb wird in Abschnitt 5.5 ein Konzept zur numerischen Berechnung der lokalen Maximalspannungen in der Klebung vorgestellt.

5.4.3 Experimentelle Ergebnisse Klebstoff EP

In Analogie zur Vorgehensweise beim Klebstoff PUR werden nachfolgend die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der mit EP klebtechnisch verbundenen Stahlproben dargestellt.

Wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben werden während der Durchführung aller Versuche Maschinenkraft sowie Lokalverformung zwischen den beiden Stahlfügeteilen aufgezeichnet. Bei allen Versuchen kann nach geringen Setzungen, die auf ein Anlegen der Dehnungsaufnehmer zurückgeführt werden können, ein linearer Anstieg der Kraft bei zunehmender Axialverformung beobachtet werden. Die geklebten Proben weisen eine konstante Steifigkeit über den gesamten Prüfbereich auf und versagen bei Erreichen der Bruchlast spröde; bei allen Versuchen tritt das Versagen schlagartig und ohne ausgeprägte plastische Verformung oder Steifigkeitsreduktion ein.

Hervorzuheben ist auch für den Klebstoff EP die Vergleichbarkeit des Last-Verformungsverhaltens aller untersuchter Proben einer Versuchsreihe. Aufgrund dieser

Ähnlichkeit ist in Abbildung 5.11 jeweils ein exemplarischer Kraft-Verformungsverlauf je Versuchsreihe dargestellt.

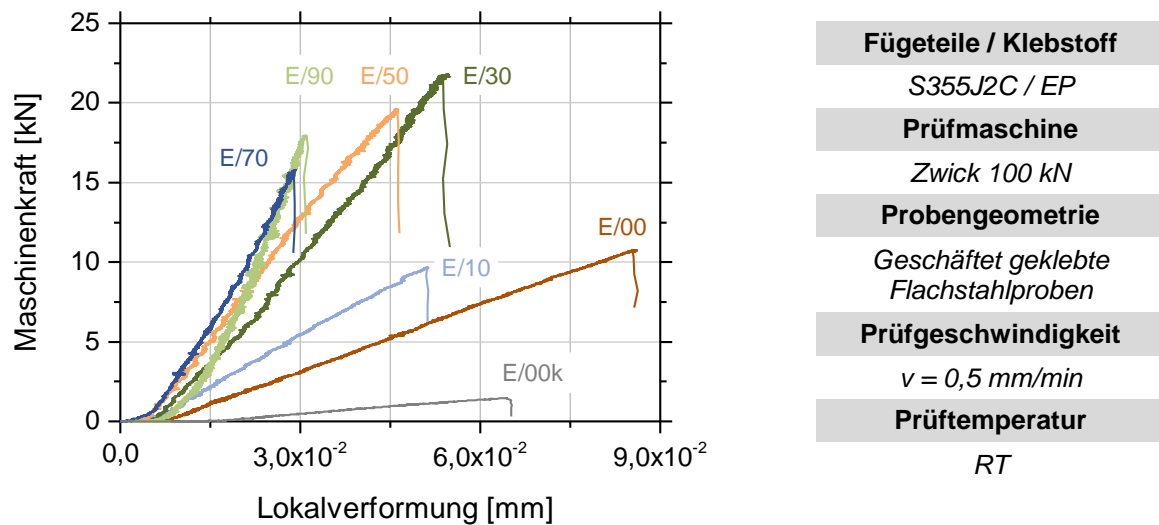


Abbildung 5.11 Kraft-Lokalverformungen der quasi-statische Prüfung geschäftet geklebter Flachstahlproben; Klebstoff EP

Wie auch bei den mit dem Klebstoff PUR gefügten Stahlproben weisen die einzelnen EP-Prüfserien unterschiedliche Verbindungssteifigkeiten auf. Die größte Verbindungssteifigkeit ist für die Serie E/90 dokumentiert. Mit kleiner werdendem Schäftungswinkel nimmt die Verbindungssteifigkeit ab. Der Bruch der vorwiegend schubbeanspruchten Proben der Reihe E/00 tritt im Vergleich mit der Probenreihe E/90 in der Regel bei etwa der 2,5-fachen Lokalverformung zwischen den beiden Fügeteilen auf. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Differenz auf die sich unterscheidenden Dehnungszustände (Dehnung bzw. Gleitung) in den Klebstoffvolumina zurückzuführen ist.

Die Auswertung der Last-Verformungskurven der Zugversuche hinsichtlich der Bruchlasten führt zu den in Tabelle 5.7 zusammengefassten experimentellen Ergebnissen der EP-Proben. Zudem sind die Klebflächen, die jeweiligen Schäftungswinkel sowie die mit Gl. 5.1 und Gl. 5.2 berechneten Nennnormal- und Nennschubspannungskomponenten in der Klebfuge in Tabelle 5.7 enthalten.

Bruchlasten sowie Spannungskomponenten jeder Versuchsreihe sind hinsichtlich ihrer arithmetischen Mittel (MW) sowie der Schätzwerte der Standardabweichung (SD) basierend auf der Annahme einer Normalverteilung statistisch ausgewertet.

| | Schäftungs- winkel α [°] | Klebfläche | Bruchkraft F [kN] | | Normalspannung σ_z [MPa] | | Schubspannung τ_{xz} [MPa] | |
|----------|------------------------------------|------------|----------------------|--------------|------------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|
| E/90/01 | 90 | 450 | 13,32 | <i>MW</i> | 29,6 | <i>MW</i> | 0,0 | <i>MW</i> |
| E/90/02 | | 450 | 17,94 | 14,96 | 39,9 | 33,3 | 0,0 | 0,0 |
| E/90/02 | | 450 | 17,21 | | 38,2 | | 0,0 | |
| E/90/04 | | 450 | 17,33 | <i>SD</i> | 38,5 | <i>SD</i> | 0,0 | <i>SD</i> |
| E/90/05 | | 450 | 10,90 | 2,91 | 24,2 | 6,5 | 0,0 | 0,0 |
| E/90/06 | | 450 | 13,08 | | 29,1 | | 0,0 | |
| E/70/01 | 70 | 479 | 18,95 | <i>MW</i> | 37,2 | <i>MW</i> | 13,5 | <i>MW</i> |
| E/70/02 | | 479 | 18,87 | 16,38 | 37,0 | 32,1 | 13,5 | 11,7 |
| E/70/02 | | 479 | 17,89 | | 35,1 | | 12,8 | |
| E/70/04 | | 479 | 12,26 | <i>SD</i> | 24,1 | <i>SD</i> | 8,8 | <i>SD</i> |
| E/70/05 | | 479 | 14,47 | 2,68 | 28,4 | 5,3 | 10,3 | 1,9 |
| E/70/06 | | 479 | 15,81 | | 31,0 | | 11,3 | |
| E/50/01 | 50 | 587 | 19,60 | <i>MW</i> | 25,6 | <i>MW</i> | 21,4 | <i>MW</i> |
| E/50/02 | | 587 | 20,78 | 19,70 | 27,1 | 25,7 | 22,7 | 21,6 |
| E/50/02 | | 587 | 20,26 | | 26,4 | | 22,2 | |
| E/50/04 | | 587 | 20,53 | <i>SD</i> | 26,8 | <i>SD</i> | 22,5 | <i>SD</i> |
| E/50/05 | | 587 | 18,29 | 1,01 | 23,9 | 1,3 | 20,0 | 1,1 |
| E/50/06 | | 587 | 18,75 | | 24,5 | | 20,5 | |
| E/30/01 | 30 | 900 | 20,92 | <i>MW</i> | 11,6 | <i>MW</i> | 20,1 | <i>MW</i> |
| E/30/02 | | 900 | 21,78 | 20,99 | 12,1 | 11,7 | 21,0 | 20,2 |
| E/30/02 | | 900 | 19,23 | | 10,7 | | 18,5 | |
| E/30/04 | | 900 | 20,38 | <i>SD</i> | 11,3 | <i>SD</i> | 19,6 | <i>SD</i> |
| E/30/05 | | 900 | 23,78 | 1,62 | 13,2 | 0,9 | 22,9 | 1,6 |
| E/30/06 | | 900 | 19,85 | | 11,0 | | 19,1 | |
| E/10/01 | 10 | 536 | 9,53 | <i>MW</i> | 3,1 | <i>MW</i> | 17,5 | <i>MW</i> |
| E/10/02 | | 513 | 10,85 | 10,07 | 3,7 | 3,4 | 20,8 | 19,0 |
| E/10/02 | | 500 | 9,66 | | 3,4 | | 19,0 | |
| E/10/04 | | 521 | 10,30 | <i>SD</i> | 3,4 | <i>SD</i> | 19,5 | <i>SD</i> |
| P/10/05 | | 524 | 9,52 | 0,58 | 3,2 | 0,2 | 17,9 | 1,2 |
| P/10/06 | | 536 | 10,57 | | 3,4 | | 19,4 | |
| E/00/01 | 0 | 570 | 9,26 | <i>MW</i> | 0,0 | <i>MW</i> | 16,2 | <i>MW</i> |
| E/00/02 | | 570 | 10,25 | 10,13 | 0,0 | 0,0 | 18,0 | 17,8 |
| E/00/03 | | 570 | 10,74 | | 0,0 | | 18,8 | |
| E/00/04 | | 570 | 10,69 | <i>SD</i> | 0,0 | <i>SD</i> | 18,8 | <i>SD</i> |
| E/00/05 | | 570 | 10,44 | 0,64 | 0,0 | 0,0 | 18,3 | 1,1 |
| E/00/06 | | 570 | 9,42 | | 0,0 | | 16,5 | |
| E/00k/01 | 0 | 72 | 1,41 | <i>MW</i> | 0,0 | <i>MW</i> | 19,7 | <i>MW</i> |
| E/00k/02 | | 71 | 1,31 | 1,49 | 0,0 | 0,0 | 18,4 | 20,8 |
| E/00k/03 | | 73 | 1,43 | | 0,0 | | 19,6 | |
| E/00k/04 | | 72 | 1,83 | <i>SD</i> | 0,0 | <i>SD</i> | 25,3 | <i>SD</i> |
| E/00k/05 | | 71 | 1,47 | 0,18 | 0,0 | 0,0 | 20,6 | 2,4 |
| E/00k/06 | | 71 | 1,52 | | 0,0 | | 21,3 | |

Tabelle 5.7 Ergebnisse der experimentellen Prüfung geschäftet geklebter Stahlproben; Klebstoff EP

In Analogie zur Ergebnisdarstellung der mit PUR geklebten Stahlproben werden - wiederum zunächst auf Nennspannungsniveau - die Schubspannungskomponenten aus den Bruchlasten jedes Bauteilversuches der mit EP geklebten Stahlproben über den entsprechenden Normalspannungsanteilen aufgetragen. In Abbildung 5.12 sind neben den als Dreiecke markierten Einzelversuchen die Mittelwerte jeder Versuchsreihe (Andreaskreuze) dargestellt.

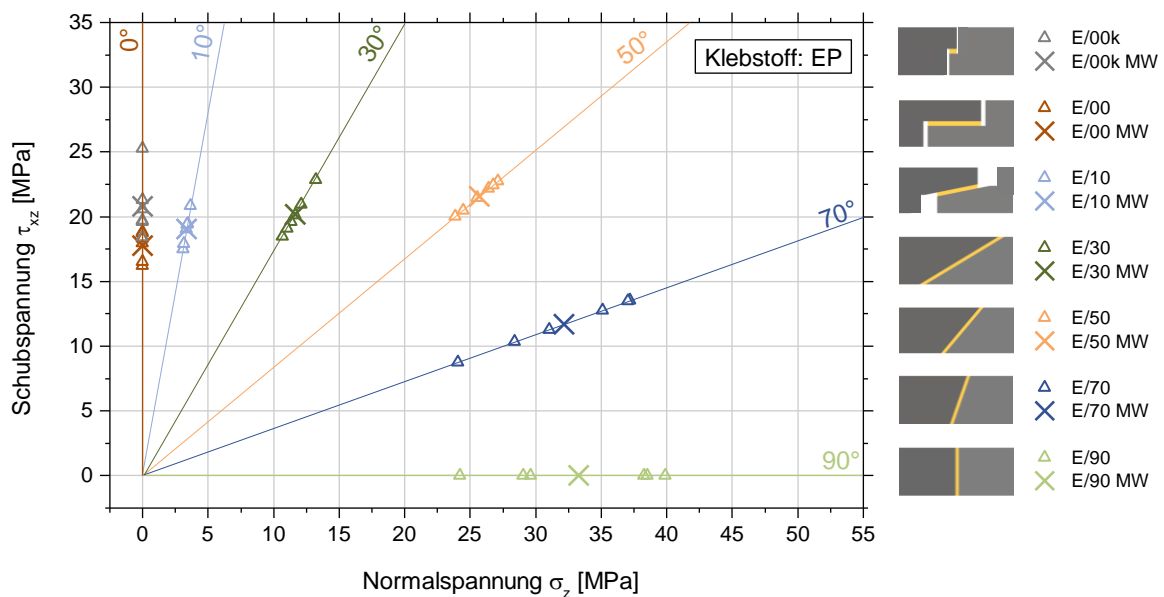


Abbildung 5.12 Auf der Basis von Nennspannungen berechnete Normalspannungs- und Schubspannungskomponenten in der Klebfuge geschäftet geklebter Stahlproben; Klebstoff EP

Wie in Abschnitt 5.4.2 beschrieben erscheint ein Versagenskriterium auf der Basis von Nennspannungen für den Klebstoff PUR nicht zielführend. Dies ist vor allem mit der dokumentierten Mittelwertabweichung (40 %) der aus den Bruchlasten berechneten Nennschubspannungen Probenreihen P/00 und P/00k zu begründen. Diese unterscheiden sich nur in der Länge der Überlappung. Die Eignung der Nennspannung soll für den im Vergleich deutlich weniger steifen Klebstoff EP nachfolgend diskutiert werden.

Zunächst zeigen sich im qualitativen Vergleich für die beiden Klebstoffe PUR (Abbildung 5.10) und EP (Abbildung 5.12) ähnliche Interaktionsbeziehungen von Schub und Querzug bei Bruch der geklebten Verbindung. Ausgehend von der Probeform mit überwiegender Normalspannungsbeanspruchung (E/90) ist feststellbar, dass eine Überlagerung von Schubspannungsanteilen quasi keine Reduktion der rechnerischen Normalspannungskomponente mit sich bringt (E/70). Erwähnt sei aber an dieser Stelle, dass die Differenz der rechnerischen Nennschubspannungen im Bereich der Standardabweichungen der einzelnen Versuchsreihen liegt. Der Vergleich der sich lediglich in der Überlapplänge unterscheidenden Proben E/00 (38 mm) und E/00k (5 mm) zeigt eine Mittelwertabweichung von ca. 15 %. Im Vergleich zum Klebstoff PUR (Mittelwertabweichung 40 %) ist dieser

Unterschied weniger stark ausgeprägt. Somit stellt sich die Beschreibung des Versagenskriteriums auf der Basis von Nennspannungen auch für den Klebstoff EP als nicht zielführend heraus. Dies wird ferner durch einen Vergleich der Probenreihen E/10, E/30 und E/50 unterstrichen. Demnach ergäbe eine Überlagerung von Normalspannungen keine Reduktion der Schubbeanspruchbarkeit der Verbindung. Somit erfolgt auch für den Klebstoff EP eine lokale Analyse der Spannungsverteilung in der Klebfuge (Abschnitt 5.5).

Die Bruchbilder je eines exemplarischen Probekörpers jeder Versuchsreihe sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst. In Anlehnung an (DIN EN ISO 10365) können diese in Kohäsions-, Adhäsions- bzw. Mischbrüche zwischen den beiden Versagensarten unterteilt werden.

Ebenso wie bei den mit PUR geklebten Stahlproben zeigt sich bei überwiegender Normalspannungsbeanspruchung der EP-Klebfuge ein kohäsives Versagen (Probenreihe E/90). Alle vorwiegend schubbeanspruchten Proben der Reihe E/00 und E/00k versagen bei globaler Zugbeanspruchung hingegen adhäsiv an einem der Stahlfügeteile. Zusätzlich zur optischen Analyse mit bloßem Auge werden die Fügeteiloberflächen mit Hilfe eines Mikroskops bei 100-facher sowie 200-facher Vergrößerung betrachtet. In Abbildung 5.13 ist exemplarisch die vergrößerte Klebfläche der Probe E/00/06 nach der Prüfung dargestellt. Durch die Vergrößerung sichtbar sind auf der Substratfläche vereinzelt haftende Klebstoffreste. Somit kann das Versagen der Klebung in Anlehnung an (DIN EN ISO 10365) auch als spezieller substratnaher Kohäsionsbruch bezeichnet werden. Wie beim Klebstoff PUR wird aufgrund der geringen Klebstoffanteile das Versagen als adhäsiv bezeichnet.

Ebenfalls adhäsiv versagen die Probekörper der Versuchsreihen E/10 und E/30, deren Klebung aufgrund der Schäftung durch Schub- und Querkraft beansprucht ist. Eine Mischung aus Adhäsions- und Kohäsionsversagen ist Ursache für den Bruch der Probekörper der Versuchsreihen E/50 und E/70 (siehe Tabelle 5.8). Beim Vergleich der Bruchflächen der Reihen E/50 und E/70 kann mit zunehmendem Schäftungswinkel und damit steigendem Normalspannungsanteil auch ein größerer kohäsiver Anteil im Versagensbild festgestellt werden. Die Probekörper der Versuchsreihe E/90 mit überwiegend durch Normalspannungen beanspruchten Klebungen versagen rein kohäsiv. Somit kann auch für die experimentellen Untersuchungen der mit dem Klebstoff EP gefügten Stahlbauteile zusammengefasst werden, dass das Versagen der Verbindung von der jeweiligen Interaktion Schub-Querkraft abhängt. Bei einer Beanspruchung der Klebung überwiegend durch Normalspannungen zeigt sich analog zum Klebstoff PUR ein kohäsives Versagen. Mit zunehmender Schubbeanspruchung der Klebfuge ist eine Mischform zwischen Adhäsions- und Kohäsionsbruch zu beobachten. Bei dominierender Schubbeanspruchung versagen die Proben adhäsiv.

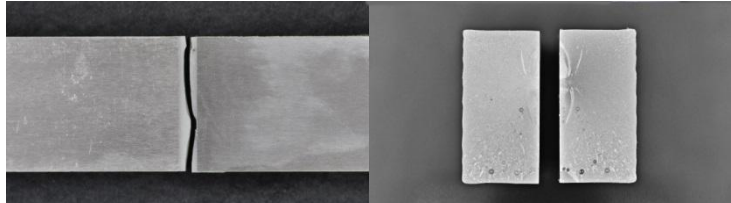
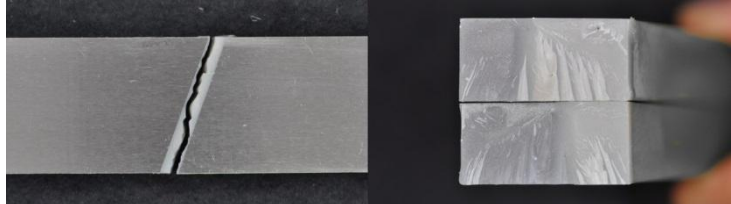

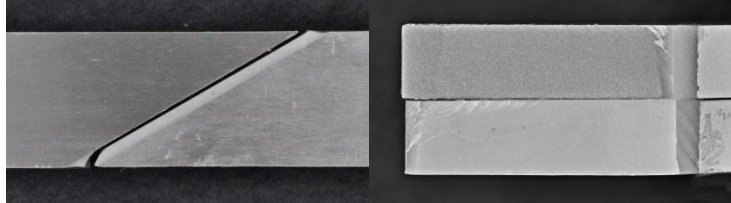
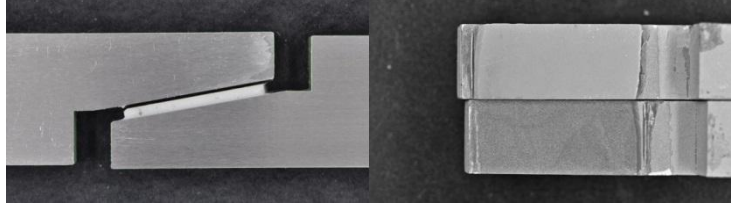
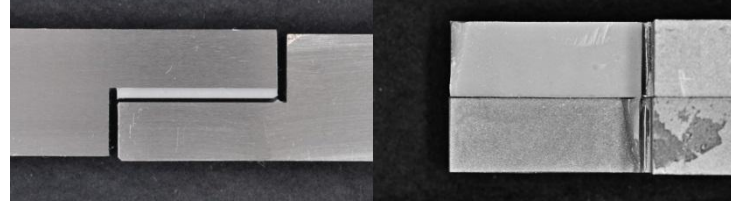

| Versuchsreihe | Bruchbilder | Bezeichnung Bruchbild |
|---------------|--|-----------------------|
| E/90 |  | Kohäsionsbruch |
| E/70 |  | Mischbruch |
| E/50 |  | Mischbruch |
| E/30 |  | Adhäsionsbruch |
| E/10 |  | Adhäsionsbruch |
| E/00 |  | Adhäsionsbruch |
| E/00k |  | Adhäsionsbruch |

Tabelle 5.8 Exmpl. Bruchbilder der Versuchsreihen mit geschäftet geklebten Stahlproben; Klebstoff EP

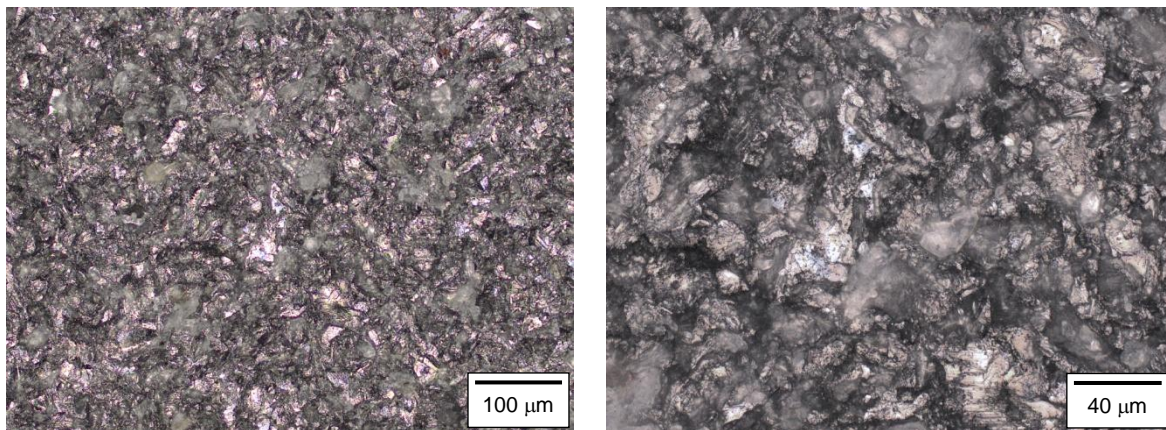


Abbildung 5.13 Substratoberfläche der Probe E/00/06 nach der Prüfung; links: 200-fache Vergrößerung, rechts: 500-fache Vergrößerung

Die unterschiedlichen Versagensarten können auch einen Beitrag zur Erläuterung der variierenden Streuungen in den einzelnen Versuchsreihen leisten. Denn im Gegensatz zum Klebstoff PUR muss bei der Betrachtung der Streubänder der Versuchsergebnisse der mit EP geklebten Proben zwischen den einzelnen Versuchsreihen differenziert werden. Als dimensionsloses Maß zum Vergleich der verschiedenen Versuchsserien wird nachfolgend wiederum der als Quotient aus geschätzter Standardabweichung und arithmetischem Mittel definierte Variationskoeffizient K berechnet und diskutiert. In Tabelle 5.9 sind die Variationskoeffizienten für die mit dem Klebstoff EP gefügten Proben zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die Versuchsreihen E/90 und E/70 um den Faktor zwei bis drei höhere Variationskoeffizienten als die übrigen Serien aufweisen. Diese im Vergleich zum Klebstoff PUR stark differierenden Variationskoeffizienten können mit den zuvor beschriebenen unterschiedlichen Bruchbildern und Versagensarten der Klebverbindung in Zusammenhang gebracht werden.

| Versuchsreihe | E/90 | E/70 | E/50 | E/30 | E/10 | E/00 | E/00k |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Variationskoeffizient V [%] | 19 % | 16 % | 5 % | 8 % | 6 % | 6 % | 12 % |

Tabelle 5.9 Variationskoeffizienten der Versuchsreihen an mit EP geschäftet geklebten Flachstahlproben

Während die Probekörper der Reihen E/90 und E/70 ausschließlich bzw. dominant kohäsiv versagen, zeigt sich bei den übrigen Versuchsreihen ein adhäsives Versagen der Klebung. Obwohl diese Differenzierung der Versagensarten auch für den Klebstoff PUR zutrifft, kann bei den PUR-gefügten Proben keine deutliche Abweichung zwischen den Variationskoeffizienten der einzelnen Versuchsreihen dokumentiert werden (Tabelle 5.6). Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung kann die Viskosität des unausgehärteten Klebstoffs liefern. Der Klebstoff EP neigt bei Handmischung der Komponenten aufgrund

seiner im Vergleich zum Klebstoff PUR deutlich höheren Viskosität eher zum Einschluss von Luftporen. Diese können als mögliche Ausgangspunkte für das spröde Versagen der Klebung die größere Streuung der Probenreihen E/90 und E/70 verursacht haben. Eine detaillierte Auswertung der Bruchflächen der zuvor genannten Probenreihen zeigt, dass der Kohäsionsbruch der Klebung in der Regel von einer Pore ausgeht. Nicht einzuordnen in diese Argumentationsstruktur ist die dominant adhäsiv versagende Probenreihe E/00k mit einem Variationskoeffizienten von 12 %. Auffallend ist jedoch, dass eine Probe dieser Reihe eine deutlich überdurchschnittliche Bruchlast aufweist und somit zu einer deutlichen Erhöhung der Standardabweichung führt. Wird diese Serie ohne den nach oben abweichenden Versuch ausgewertet, ergibt sich ein Variationskoeffizient von lediglich 5 %. Dieser liegt somit in der Größenordnung der Variationskoeffizienten der anderen ebenfalls dominant adhäsiv versagten Probenreihen.

5.5 Numerische Untersuchungen

5.5.1 Ansatz und Zielsetzung

Die Spannungsverteilung in geklebten Verbindungen ist in der Regel nicht gleichförmig. Dies führt dazu, dass der im konstruktiven Ingenieurbau weit verbreitete Ansatz, die Tragfähigkeit von Verbindungen auf Basis von Nennspannungen zu ermitteln, bei den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten geklebten Anschlüssen nicht zielführend ist. Wie in Abschnitt 5.4.2 und 5.4.3 beschrieben, trifft dies auch für Stahlklebungen unter Verwendung der Klebstoffe PUR und EP zu. Die Methode der Finiten Elemente (FEM) erlaubt eine detaillierte Untersuchung des lokalen Spannungszustandes in Klebfugen der geschäfteten Stahlproben bei den zuvor experimentell bestimmten Bruchlasten. Ziel der nachfolgenden numerischen Untersuchungen ist die Bestimmung des Schub- und Normalspannungszustandes in den Klebschichten der in Abschnitt 5.2 beschriebenen geschäfteten Proben.

5.5.2 Numerisches Modell

Die numerischen Berechnungen werden mit dem Finite-Elemente-Programm Ansys Workbench 15.0 durchgeführt. Hierzu werden 3D Modelle der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Probekörper erstellt. Im Vergleich zu ebenen Modellen weisen 3D Volumenmodelle den Vorteil auf, auch Querdehnungseffekte in Dickenrichtung zu erfassen, erfordern aber eine im Vergleich längere Rechenzeit (DA SILVA UND ÖCHSNER 2008). Die Geometrie der Volumenmodelle entspricht den im Anhang (Abbildung A.8) dokumentierten Abmessungen der realen Bauteilproben. Sowohl die Klebschicht als auch die Fügebauteile werden unter Verwendung des Elementtyps SOLID186 diskretisiert. Dieses dreidimensionale Volumenelement mit quadratischem Verschiebungsansatz weist 20 Knoten (acht Eck- und 12 Mittelknoten auf den Kanten) mit jeweils drei translatorischen Freiheitsgraden auf (siehe Abbildung 5.14) (ANSYS 2013).

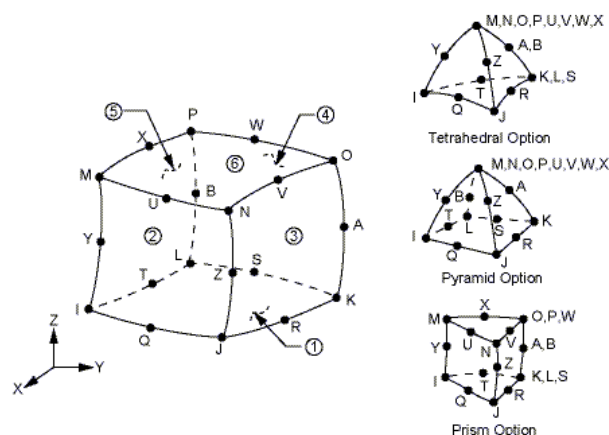


Abbildung 5.14 Finite Element Typ SOLID186 (ANSYS 2013)

Fortführend wird das numerische Modell der geschäftet geklebten Stahlproben zur Entwicklung eines spannungsabhängigen Versagenskriteriums am Beispiel der Probe 90° erklärt. Alle folgenden Erläuterungen treffen ebenso für die numerischen Modelle der restlichen Zugprobengeometrien zu.

Der Lasteinleitung im Versuchsaufbau entsprechend wird die Kraft im numerischen Modell weggeregelt ($u_z \neq 0$ mm) in der Innenfläche der Lasteinleitungsbohrung aufgebracht. Dabei werden die Verschiebungen in x - und y - Richtung sowie die Verdrehungen um die y - und z -Achse blockiert (siehe Abbildung 5.15). Die der Lasteinleitung gegenüber liegende Stirnseite der Probe wird mit einer fixierten Lagerung unter Behinderung aller Translations- und Rotationsfreiheitsgrade versehen.

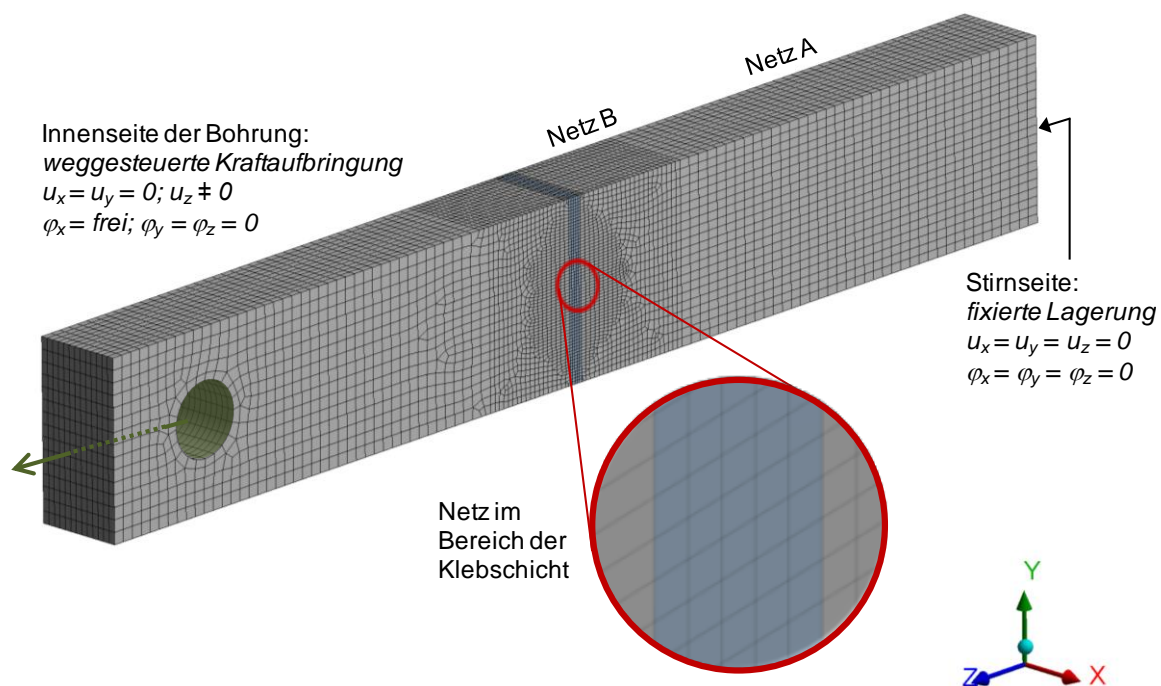


Abbildung 5.15 FE-Modell der Probe 90° ; vergrößerter Bereich: FE-Netz im Bereich der Klebfuge

Zur Optimierung der Rechenzeiten wird die Feinheit des Netzes in drei Bereiche unterteilt. Im Fokus der Auswertung steht die Klebfuge. In diesem Bereich wird durch die strikte Vorgabe der Anzahl der Elemente entlang der Kanten in der y - z -Ebene ein Netz mit quadratischen Elementen der Kantenlänge 0,5 mm erstellt. Im Bereich der Auswertungspfade bei $x/2$ beträgt das Verhältnis der Elementkanten in Richtung der x -Achse ebenfalls 1:1. Zentral für die Vergleichbarkeit der Auswertungsergebnisse der numerischen Modelle mit unterschiedlichem Schäftungswinkel ist eine einheitliche Generierung des Netzes im Bereich der zu betrachtenden Klebfuge. Dies wird durch die beschriebene Definition der Elementanzahl entlang der Kanten sichergestellt. Der Netzbereich B (siehe Abbildung 5.15) ist durch die flexible Vorgabe der Elementgröße 1 mm bei freier Vernetzung definiert. Die flexible Vorgabe der Elementgröße im Netzbereich A beträgt 2 mm.

Zur Überprüfung des Netzfeinheitsgrades im Bereich der Klebfuge dient eine Netzkonvergenzanalyse. Hierzu werden die Spannungsverläufe in der Klebung bei Anordnung von drei, fünf oder zehn Volumenelementen in Dickenrichtung ausgewertet. Die Klebschichtdicke beträgt bei allen geschäftet geklebten Proben 2,5 mm. Hieraus resultiert eine Elementkantenlänge von 0,83, 0,50 sowie 0,25 mm. Die Auswertung der Spannungsverläufe erfolgt am Beispiel der Probe P/00 bei einer aufgetragenen Zugkraft in Längsrichtung von 10,71 kN (Mittelwert der Versuchsergebnisse der Serie). Diese Probe weist deutlich ausgeprägte Spannungskonzentrationen auf und ermöglicht damit im Bereich der Spannungsmaxima eine aussagekräftige Beurteilung des Einflusses der Netzfeinheit. Abbildung 5.16 zeigt die Auswertung der Schubspannungsverteilung im Randbereich der Fuge für die drei beschriebenen Elementgrößen. Des Weiteren quantifiziert die rechte Seite der Abbildung die prozentuale Veränderung der maximalen Schubspannung am Fugenrand sowie in Fugenmitte bezogen auf den Wert aus der Simulation mit der nächstgrößeren Elementgröße.

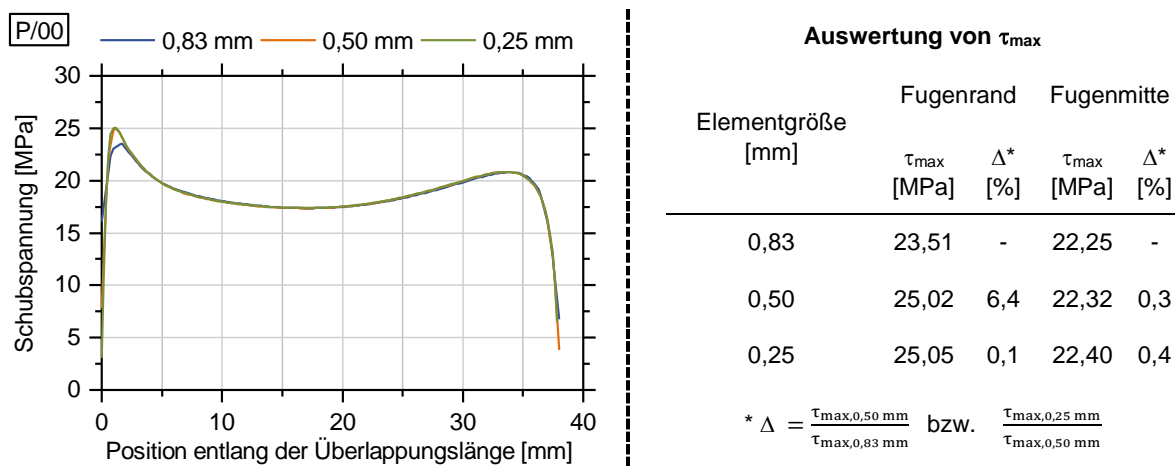


Abbildung 5.16 Ergebnisse der Netzkonvergenzstudie. Links: Schubspannungsverläufe im Randbereich der Klebschicht der Geometrie P/00. Rechts: Vergleich der maximalen Schubspannungen am Fugenrand sowie in Fugenmitte bei unterschiedlichen Elementgrößen

Abbildung 5.16 zeigt, dass bereits bei einer Elementgröße von 0,5 mm ein quasi konvergentes Ergebnis erzielt wird. Die Abweichung der bei einer Elementgröße von 0,25 mm ausgewerteten Maximalspannungen von den Ergebnissen bei Elementgrößen von 0,5 mm liegt sowohl in Fugenmitte als auch im Randbereich bei weniger als einem Prozent. Folglich wird die Elementgröße für alle numerischen Berechnungen dieses Abschnittes zu 0,5 mm festgelegt. Dies entspricht fünf finiten Elementen über die Fugendicke.

5.5.3 Werkstoffgesetze

Von zentraler Bedeutung für die realitätsnahe numerische Berechnung des Spannungszustandes in der Klebung ist die Definition des mechanischen Werkstoffverhaltens. In allen numerischen Modellen sind Werkstoffgesetze für Baustahl sowie für die Klebstoffe im-

plementiert. Grundlage für die Werkstoffgesetze der Klebstoffe PUR und EP sind die experimentellen Untersuchungen an Substanzproben nach (DIN EN ISO 527-2) (siehe Abschnitt 4.2). Diese Versuche liefern Auskunft über das nichtlineare Normalspannungs-Dehnungsverhalten des ausgehärteten Klebstoffs. Im numerischen Modell wird das nichtlineare Werkstoffverhalten der Klebstoffe durch einen mehrteiligen Polygonzug approximiert. Abbildung 5.17 zeigt für die untersuchten Klebstoffe PUR (links) und EP (rechts) sowohl die experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen (Mittelwertkurven) als auch die für die Simulation approximierten Werkstoffgesetze in Form von Polygonzügen. Die experimentell bestimmten technischen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen werden hierfür mit Hilfe von Gl. 5.3 und Gl. 5.4 in wahre Spannungs-Dehnungsbeziehungen umgerechnet. Dies berücksichtigt die Querschnittsreduzierung infolge Einschnürung bei uniaxialen Zugversuchen und bezieht die Längenänderung auf die tatsächliche Länge $l + \Delta l$ (STOMMEL ET AL. 2011).

$$\varepsilon_{\text{wahr}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{tech}}) \quad \text{Gl. 5.3}$$

$$\sigma_{\text{wahr}} = \sigma_{\text{tech}}(1 + \varepsilon_{\text{tech}}) \quad \text{Gl. 5.4}$$

Die Implementierung des Werkstoffgesetzes in das FE-Programm ANSYS Workbench 15.0 erfolgt aufgrund programmspezifischer Vorgaben zweigeteilt. Zunächst wird die annähernd linear elastische Anfangssteifigkeit bis zu einer Dehnung von 0,1 % durch einen Elastizitätsmodul beschrieben. Die nichtlineare isotrope Verfestigung ist im numerischen Modell durch die tabellarische Eingabe der zu spezifischen plastischen Dehnungen gehörenden Spannungswerte definiert. Zur Abdeckung numerischer Singularitäten wird die Arbeitslinie des Werkstoffgesetzes auf der sicheren Seite liegend mit konstanter Tangentensteigung bei Bruch weitergeführt. Die Querdehnzahlen der Klebstoffe sind den technischen Angaben der Klebstoffhersteller entnommen (PUR: $\nu = 0,38$, EP $\nu = 0,35$) (TD PUR 2011; TD EP 2012).

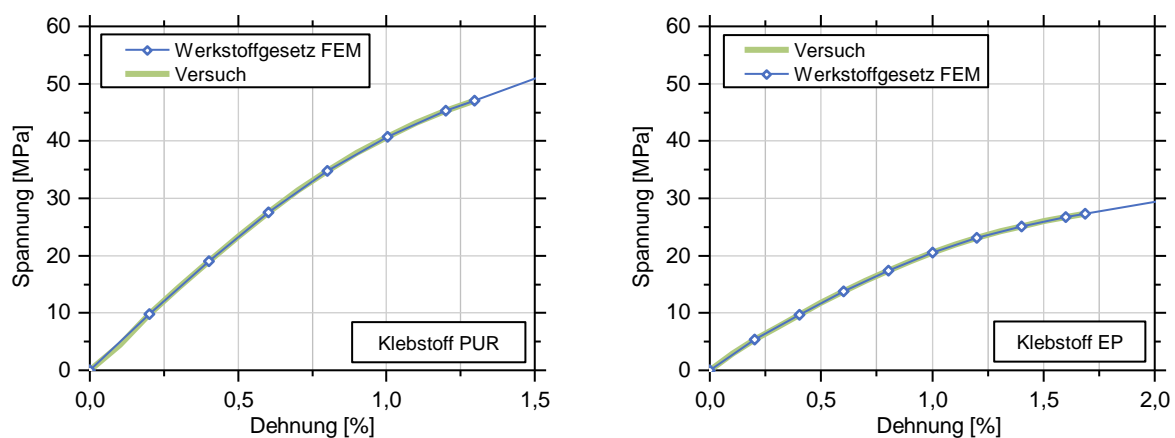


Abbildung 5.17 Werkstoffgesetz der Klebstoffe PUR (links) und EP (rechts) im numerischen Modell sowie die zugrunde liegenden experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungsbeziehungen der Klebstoffe

Die experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Klebstoffsubstanzproben unterliegen einer geringen Streuung (siehe Abschnitt 5.2). Zur Quantifizierung des Einflusses der Streuung werden in exemplarischen Simulationen neben der Mittelwertkurve weitere in der Streubreite der experimentellen Ergebnisse liegende Kurven untersucht. Dies erfolgt am Modell der Probe E/00, das aufgrund ausgeprägter Spannungskonzentrationen sinnvoll erscheint. Da die Spannungs-Dehnungsbeziehungen der EP-Substanzproben eine etwas größere Kurvenstreuung als die nahezu deckungsgleich verlaufenden Kurven der PUR-Proben aufweisen, ist der erstgenannte Klebstoff im Fokus der nachfolgend beschriebenen Untersuchung. Abbildung 5.18 zeigt die numerisch berechneten Verläufe der Schub- und Normalspannungen im Randbereich der Klebfuge. Den drei dargestellten Simulationsergebnissen liegen verschiedene Werkstoffgesetze zu Grunde. Neben dem auf der Mittelwertkurve basierenden Werkstoffgesetz wird die am höchsten und am niedrigsten verlaufende Kurve angenähert und in das numerische Modell implementiert. Die in Abbildung 5.22 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der experimentellen Kurvenstreuung vernachlässigbar ist. Somit wird für alle in dieser Arbeit beschriebenen numerischen Untersuchungen die Mittelwertkurve als Basis für die implementierten Werkstoffgesetze verwendet.

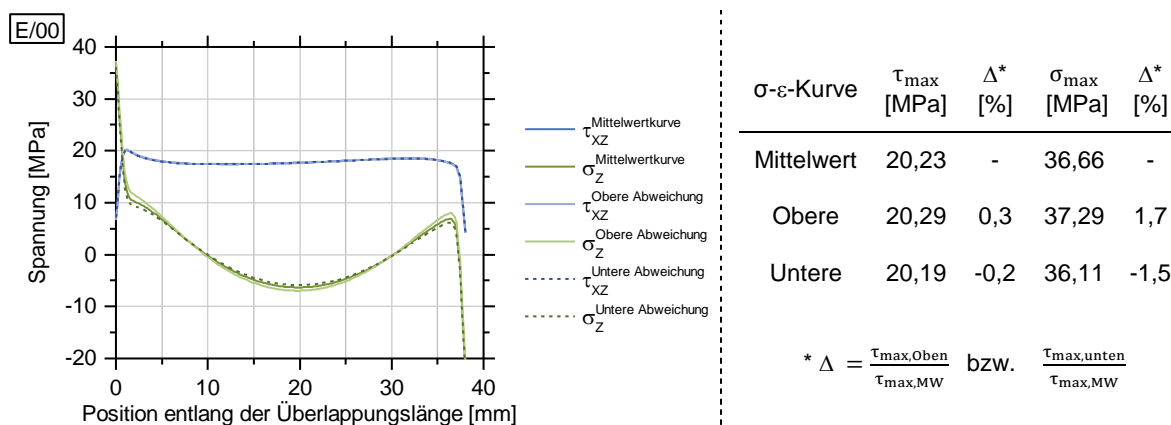


Abbildung 5.18 Einfluss der Kurvenstreuung der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus Versuchen an Substanzproben auf die numerisch berechnete Spannungsverteilung der Probe P/00

Aufgrund der großen Festigkeitsunterschiede zwischen Stahl und Klebstoff erfahren die Stahlfügeteile bei allen experimentellen Untersuchungen lediglich Dehnungen unterhalb der Fließdehnung. Aus diesem Grund wird für die Stahlbauteile ein isotropes, linear-elastisches Werkstoffgesetz mit dem Elastizitätsmodul $E_{\text{Stahl}} = 210 \text{ GPa}$ sowie einer Querdehnzahl $\nu = 0,3$ definiert.

5.5.4 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen numerischen Untersuchungen ist die Bestimmung des Spannungszustandes in der Klebfuge bei den experimentell bestimmten Bruchlasten. Hierzu werden sowohl die Schubspannungen τ_{xz} als auch die Normalspannungen orthogonal zur Klebfuge σ_z betrachtet. Die Auswertung erfolgt zur Veranschaulichung entlang von Pfaden. Der Pfad „Fugenmitte“ liegt bei allen numerischen Modellen im Schwerpunkt des Klebstoffvolumens und hat seinen Ursprung an dem der Lasteinleitung zugewandten Ende der Klebfuge. An dieser Stelle nicht näher dargelegte Auswertungen zeigen, dass die Spannungen entlang eines Pfades in x-Richtung in der Mitte der Klebfuge ihr Maximum erreichen. Aus diesem Grund liegen beide Pfade („Randbereich“ und „Fugenmitte“) in x-Richtung in der Mitte des Klebstoffvolumens (siehe Abbildung 5.19).

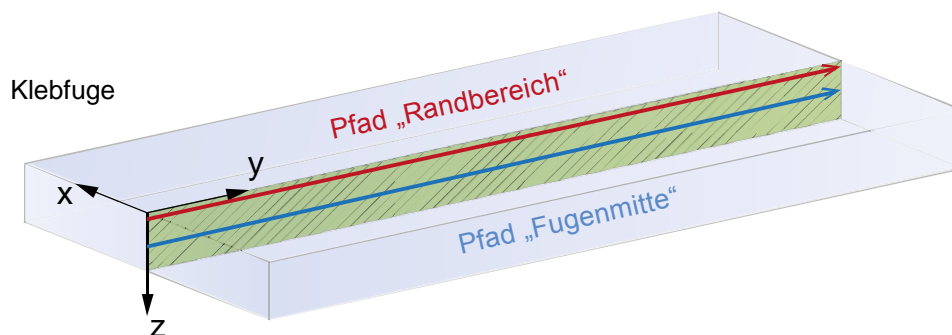


Abbildung 5.19 Auswertepfade zur Analyse der Schub- und Normalspannungsverteilung in der Klebfuge (schematische Darstellung)

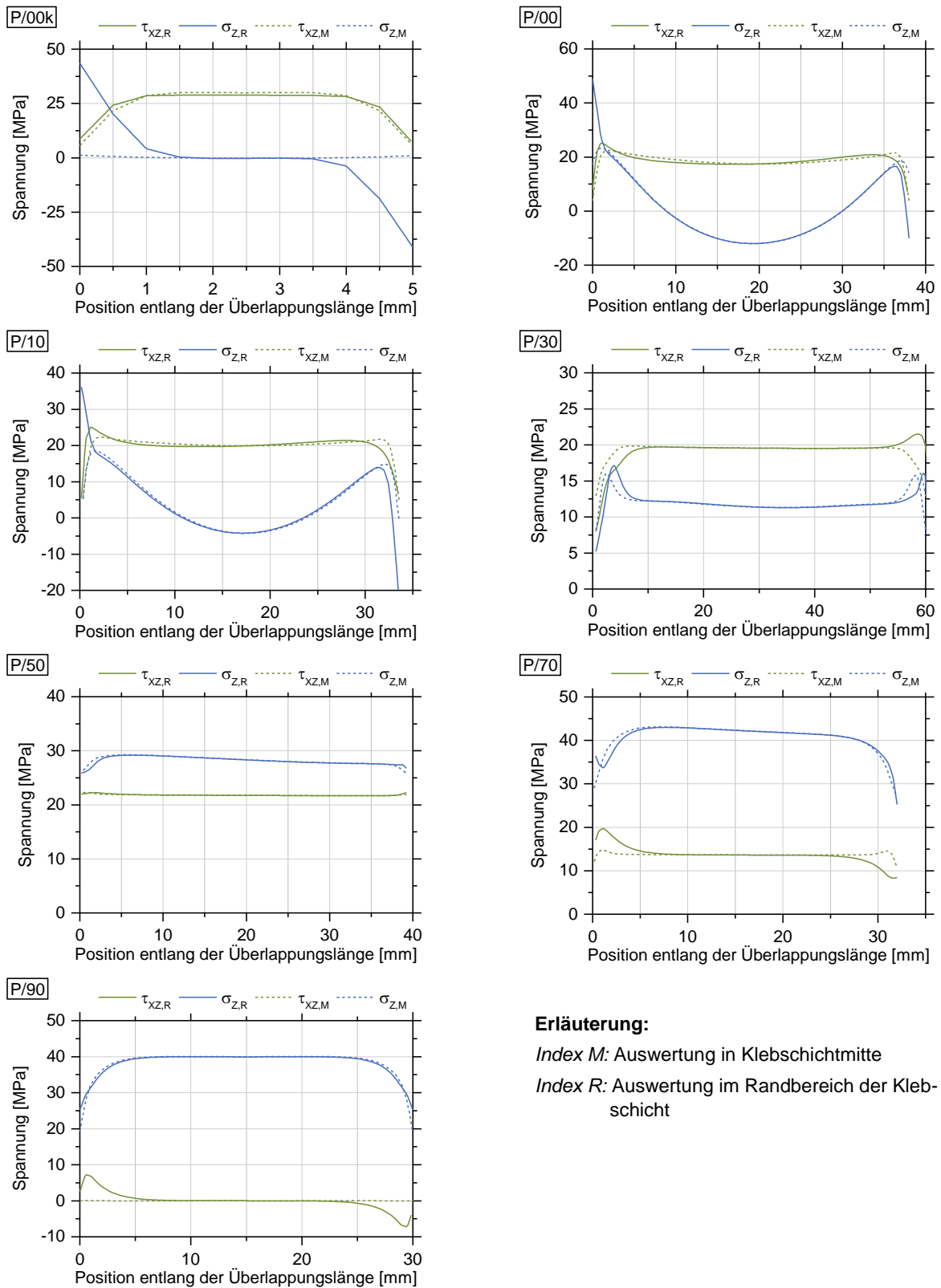
Aufgrund der bei den experimentellen Untersuchungen dokumentierten Mischformen zwischen adhäsiven und substratnah kohäsiven Brüchen an der Grenzschicht auf der Seite der Lasteinleitung ist eine Auswertung des Spannungszustandes an der Bruchfläche in Randnähe erforderlich. Hierzu wird ein Abstand in z-Richtung von 0,5 mm von der Kontaktfläche zum Stahlfügeteil gewählt. Dies entspricht einem Abstand äquivalent einer Elementkantenlänge in Klebfugendickenrichtung. Dieses in der englischsprachigen Literatur als „analysis at a distance“ bezeichnete Vorgehen trägt der Tatsache Rechnung, dass an scharfen Kanten bzw. Steifigkeitssprüngen (Rand der Klebung) hohe Spannungskonzentrationen auftreten. An diesen Singularitäten wird auch bei starker Verfeinerung des FE-Netzes keine Konvergenz erreicht. Zur Beurteilung der Tragfähigkeit einer Klebverbindung erscheint die Auswertung an der singulären Stelle somit ungeeignet (DA SILVA UND ÖCHSNER 2008; DA SILVA UND CAMPILHO 2012). Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung in unmittelbarer Randnähe. Etwaige netzabhängige Auswirkungen der Singularität werden dadurch berücksichtigt, dass die Elementgröße in den Bereichen der Auswertung in allen numerischen Modellen gleich groß gewählt wird und ein möglicher Einfluss somit auch in quantitativ gleichem Maße enthalten ist. Dieses Vorgehen findet sowohl in der numerischen Simulation von geschweißten als auch von geklebten Bauteilen

verbreitet Anwendung. Als Beispiele aus dem Bereich geschweißter Verbindung seien die Richtlinien des International Institute of Welding (NIEMI 1995; HOBACHER 2009), für geklebte Verbindungen die bereits in Abschnitt 2 beschriebenen Veröffentlichungen (CROCOMBE UND ADAMS 1981, 1982; TOWSE ET AL. 1997), genannt.

5.5.4.1 Klebstoff PUR

Die numerisch berechneten Verläufe der Schubspannung τ_{xz} bzw. der Normalspannung σ_z in der Klebschichtmitte (Index M) sowie im Randbereich der Klebschicht (Index R) der mit dem Klebstoff PUR geschäftet geklebten Stahlproben sind auf der nachfolgenden Seite in Abbildung 5.20 zusammengefasst. Die Spannungszustände sind für den Mittelwert der experimentellen Bruchlasten bestimmt.

Zunächst zeigt sich für die Probe P/90 in Fugenmitte eine ausschließliche Normalspannungsbeanspruchung. Aufgrund der zu den Enden der Klebfuge hin abfallenden Spannung liegt der in der Mitte numerisch berechnete Wert etwas über dem Nennspannungsniveau. Die Spannungsverteilungen im Randbereich unterscheiden sich lediglich durch Schubspannungsanteile an den Enden des Auswertepfades. Diese können mit der behinderten Querkontraktion der Klebschicht erklärt werden. Die Auswertung der Simulationen der Proben P/70 und P/50 liefert qualitativ vergleichbare Normalspannungsverläufe. Wie bei Probe P/90 liegen die numerisch bestimmten Normalspannungen aufgrund der zu den Enden abfallenden Verläufe über dem rechnerisch bestimmten Wert der Nennspannung. Des Weiteren weisen die Proben erwartungsgemäß aufgrund des geringeren Schäftungswinkels eine zunehmende Schubbeanspruchung auf. Während bei Probe P/70 an den Enden der Klebung Spannungskonzentrationen auftreten, kann der Schubspannungsverlauf der Probe P50 als annähernd konstant bezeichnet werden. Die Schub- und insbesondere die Normalspannungsverteilung der Probe P30 weist Spannungskonzentrationen an den Enden der Klebung auf. Die Werte der Spannungsspitzen liegen erwartungsgemäß deutlich über den sich aus einer Nennspannungsbetrachtung ergebenden Größe. Stark nichtlineare Normalspannungsverläufe weisen die vorwiegend schubbeanspruchten Proben P/10, P/00 sowie P/00k auf. Dabei sind die Schubspannungsverläufe der Proben P/10 und P/00 qualitativ vergleichbar und zeichnen sich durch eine Spannungsspitze an dem der Lasteinleitung zugewandten Ende der Klebschicht aus. Die Normalspannungsverläufe dieser Proben weisen aufgrund der Exzentrizität beider Fügeteile im Überlappungsbereich starke Nichtlinearitäten mit Spannungsspitzen an den Enden der Überlappung auf. Die maximale Zugnormalspannung tritt am Klebfugenende auf der Seite der Lasteinleitung auf. Dem Auswertepfad folgend nimmt die Normalspannung im Randbereich zunächst ab und erreicht im mittleren Bereich des Auswertepfades negative Werte (Drucknormalspannungen).



Erläuterung:

Index M: Auswertung in Klebschichtmitte

Index R: Auswertung im Randbereich der Klebschicht

Abbildung 5.20 Numerisch berechnete Verläufe der Schubspannungsverteilung τ_{xz} bzw. der Normalspannungsverteilung σ_z in der Klebschichtmitte (Index M) bzw. im Randbereich der Klebschicht (Index R) geschäfteter geklebter Stahlproben; Klebstoff PUR

Die maximale Drucknormalspannung wird am Ende des Auswertepfades und damit an dem der Lasteinleitung abgewandten Klebfugenende erreicht. Erwähnenswert ist an dieser Stelle, dass die Klebungen der beiden Proben an den Stellen der Spannungsspitzen quantitativ höhere Beanspruchungen durch Normal- als durch Schubspannungen erfahren. Dieses Erkenntnis zeigt, dass eine Beurteilung des Spannungszustandes auf der Basis von Nennschubspannungen nicht zielführend ist. Interessant ist zudem der Vergleich der Spannungsverteilung der Proben P/00 und P/00k. Diese unterscheiden sich lediglich in der Überlappungslänge (38 mm bzw. 5 mm). Der auf die Fügeteildehnung zurückführbare Schubspannungsanstieg am Ende der Überlappung der Probe P/00 ist aufgrund der deutlich kürzeren Kleblänge bei Probe P/00k nicht vorhanden. Während in der Klebschichtmitte dieser Probe keine Normalspannung wirkt, ist der Verlauf dieser Spannungskomponente im Randbereich wiederum durch Spannungsspitzen an den Fugenenenden gekennzeichnet. Dies zeigt, dass auch bei sehr kurzen Zugscherproben aufgrund der Exzentrizität in Verbindung mit der geringen Überlappungslänge hohe Zug- bzw. Drucknormalspannungen in der Nähe der Grenzschicht auftreten.

Die Vorgehensweise zur Auswertung und Interpretation der numerisch berechneten Spannungen entlang der oben beschriebenen Pfade sei nachfolgend am Beispiel der Ergebnisse der Probe P/00k vorgestellt. Aufgrund der Bruchbilder der Proben dieser Reihe erfolgt die Spannungsanalyse entlang des Pfades „Randbereich“. In Abbildung 5.21 ist der Schub- und Normalspannungsverlauf nochmals dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Maxima der beiden Spannungskomponenten an unterschiedlichen Stellen auftreten. Während die maximale Schubspannung im Bereich der Mitte des Auswertepfades wirkt, ist die Zugnormalspannung am Rand der Klebung maximal.

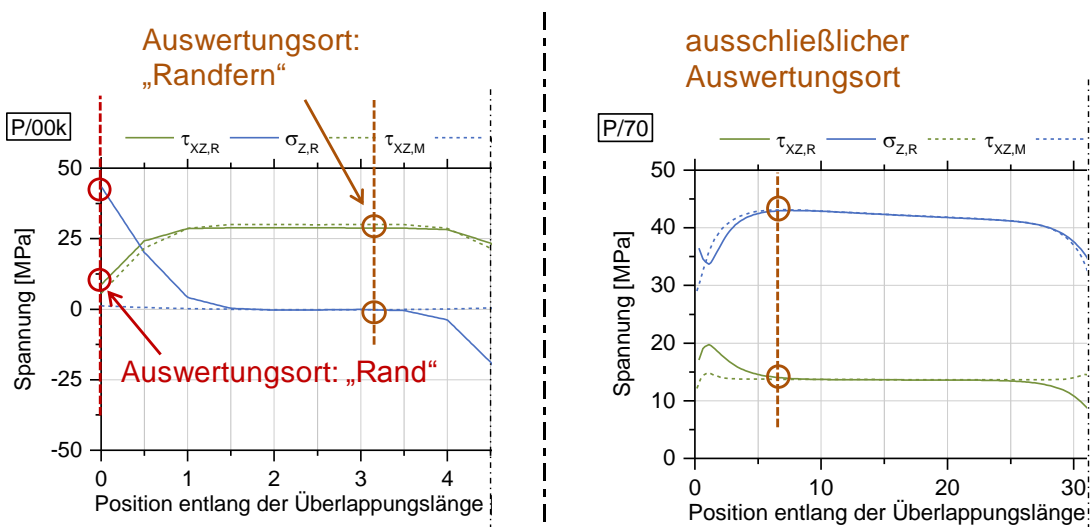


Abbildung 5.21 Vorgehensweise zur Auswertung der Spannungen entlang des Pfades „Randbereich“ am Beispiel der Probe P/00k bzw. P/70

Diese Erkenntnis führt zu zwei verschiedenen Auswertungsorten. Am Auswertungsort „Randfern“ wird die maximale Schubspannung und die dazugehörige Normalspannung bei den Proben P/00k, P/00 und P/10 ermittelt. Dahingegen ergibt die Auswertung an der Stelle „Rand“ am Anfang des Auswertepfades die maximale Normalspannung sowie die an der gleichen Stelle zugehörige Schubspannungskomponente. Nicht erforderlich ist diese Differenzierung bei der Analyse der Spannungszustände in der Klebschicht der Proben P/90 – P/50. Diese Proben weisen über die gesamte Klebfugenlänge eine dominierende Normalspannungskomponente auf. Deshalb wird beispielsweise bei Probe P/70 lediglich die maximale Normalspannung und die zugehörige Schubspannung ausgewertet (siehe Abbildung 5.21). Die sich aus den experimentellen Bruchlasten ergebenden Spannungszustände werden für alle Bauteilproben numerisch berechnet und hinsichtlich ihrer lokalen Maxima gemäß der oben beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet. Dies führt für jedes Versuchsergebnis zu einem spezifischen σ - τ -Paar. Auf Basis der bei den experimentellen Untersuchungen festgestellten Versagensart werden die Spannungen entlang des Auswertepfades „Fugenmitte“ oder „Randbereich“ ausgewertet. Aufgrund des dominant adhäsiven bzw. substratnah kohäsiven Versagens wird bei den Probenreihen P/70 – P/00k entlang des Pfades „Randbereich“ ausgewertet. Lediglich für die kohäsiv versagenden Proben der Reihe P/90 werden die Ergebnisse der Auswertung in Fugenmitte herangezogen. Für das Auswertungskonzept „Randfern“ sind in Abbildung 5.22 die numerisch berechneten Schubspannungen infolge der experimentell bestimmten Bruchlast über der zugehörigen Normalspannung aufgetragen. Dabei stellt jedes Dreieck das Ergebnis der Auswertung der numerischen Berechnung für ein Versuchsergebnis dar; diese werden durch die Mittelwerte der jeweiligen Reihe (Andreaskreuze) ergänzt.

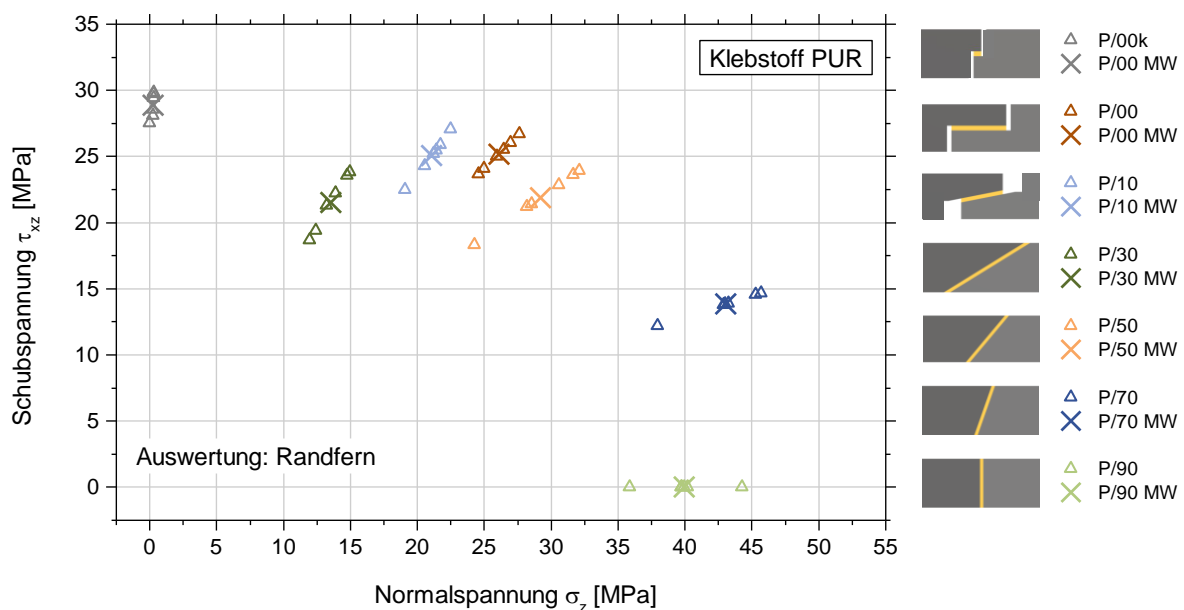


Abbildung 5.22 Numerische Simulation der Versuche an geschäftet geklebten Stahlproben; Auswertung lokaler Maximalspannungen; Auswertungsort: Randfern; Klebstoff PUR

Zunächst zeigt sich, dass auch bei Auswertung der lokalen Maximalwerte die Mittelwerte der Normalspannungen der Probe P/90 etwas unter den Mittelwerten der Normalspannungskomponente der zusätzlich schubbeanspruchten Probe P/70 liegen. Wie bereits in Abschnitt 5.4.2 beschrieben kann dies bei Betrachtung des Streubandes jedoch auf statistische Effekte zurückgeführt werden. Bei abnehmendem Schäftungswinkel und zunehmender Schubbeanspruchung der Probe folgen die Interaktionsspannungen bei zunehmender Schubbeanspruchung einem elliptischen Verlauf. Dieser, die Tragfähigkeit der geklebten Stahlverbindung charakterisierende Verlauf, wird durch die bei Auswertung an der Stelle „Randfern“ ausschließlich schubbeanspruchten Probe P/00k vervollständigt. Hervorgehoben sei an dieser Stelle, dass die Probe P/00 bei Auswertung der lokalen Spannungsmaxima ein ähnliches Normalspannungs-Schubspannungs-Verhältnis aufweist, wie die Proben der Reihen P/10 oder P/50. Dies bestätigt wiederum, dass der tatsächliche Spannungszustand in der untersuchten Klebverbindung durch das Konzept der Nennspannungen nur ungenügend beschrieben werden kann. Auffallend ist, dass die Ergebnisse der Messreihe P/30 deutlich von dem durch eine Ellipse beschreibbaren Interaktionsspannungsverlauf abweichen. Da das Streuband dieser Reihe in der Größenordnung der übrigen Probereihen liegt, kann die Abweichung auch nicht durch etwaige statistische Ausreißer begründet werden. Eine Erklärung für die Abweichung dieser Messreihe können Fertigungsfehler (z. B. Mischungsverhältnis, Oberflächenvorbehandlung) liefern.

Der sich am Auswertungsort „Rand“ ergebende Spannungszustand in den Klebfugen geschäftet gefügter Stahlproben ist in Abbildung 5.23 grafisch dargestellt.

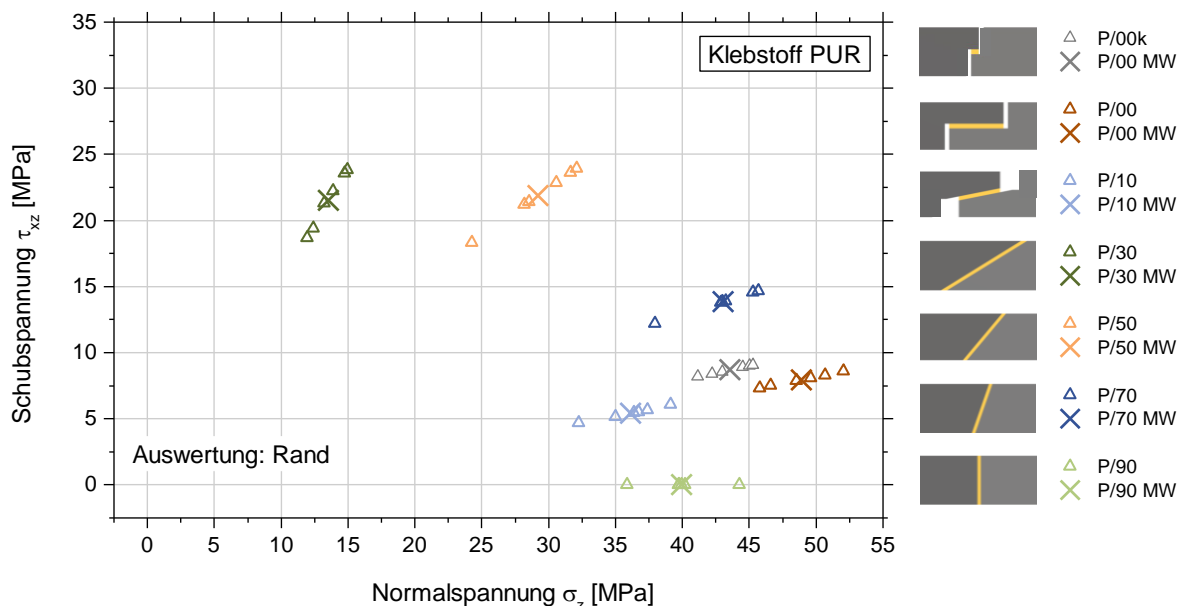


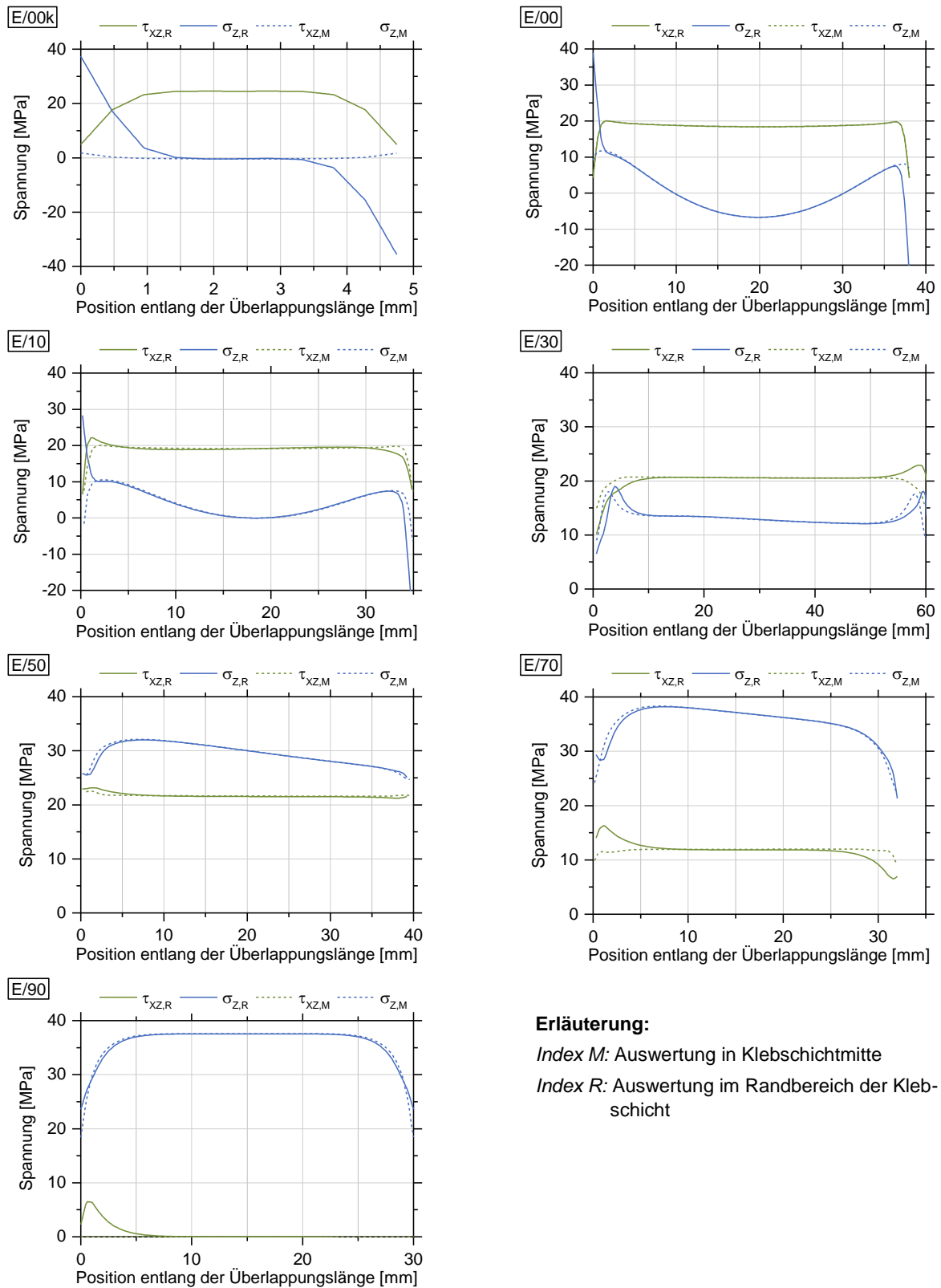
Abbildung 5.23 Numerische Simulation der Versuche an geschäftet geklebten Stahlproben; Auswertung lokaler Maximalspannungen: Auswertungsort: Rand; Klebstoff PUR

Verglichen mit dem Auswertungsort „Randfern“ führt die Auswertung der maximalen Normalspannung am Klebfugenrand der Proben P/10, P/00 und P/00k dazu, dass diese Interaktionsspannungen im Bereich der überwiegend durch Normalspannungen beanspruchten Bauteilproben liegen. Hervorzuheben ist, dass die Ergebnisse bei Berücksichtigung der Streuung der zugrunde liegenden Versuchsergebnisse eine vergleichbare Größenordnung aufweisen. Lediglich die Normalspannungskomponenten der Reihe P/10 liegen etwas unter den mit vergleichbaren Schubspannungen beanspruchten Probereihen P/00 und P/00k. Hinzuzufügen ist jedoch auch, dass die alleinige Anwendung des Auswertekonzeptes „Rand“ bei vorliegender Probekörpergeometrie keine Auskunft über die Tragfähigkeit der Verbindung bei vorwiegender Schubbeanspruchung liefern würde.

5.5.4.2 Klebstoff EP

Analog zur Vorgehensweise beim Klebstoff PUR dienen auch bei den mit EP unter verschiedenen Schäftungswinkeln geklebten Stahlproben die experimentell bestimmten Bruchlasten als Grundlage für die Beanspruchung im numerischen Modell. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse nach der in Abschnitt 5.5.4.1 beschriebenen Methodik ergibt qualitativ sehr ähnliche Spannungszustände in den EP-Klebfugen. Diese sind zusammenfassend in Abbildung 5.24 dargestellt. Quantitativ liegen sowohl die Werte der Normal- als auch der Schubspannungen in der Regel etwas unter denen der PUR geklebten Proben. Charakteristisch für die Probengeometrien E/10, E/00 sowie E/00k sind wiederum die Spannungsspitzen infolge Normalbeanspruchung der Fuge. Diese sind auf Basis von Nennspannungen praktisch nicht quantifizierbar. Ebenfalls ist festzuhalten, dass auch beim Klebstoff EP die maximalen Schub- bzw. Normalspannungen an unterschiedlichen Stellen entlang des Verlaufes der Auswertungspfade auftreten. Dies begründet auch für den Klebstoff EP eine differenzierte Betrachtung durch die Auswertekonzepte „Randfern“ und „Rand“. Die Details dieser Konzepte sind bereits im Abschnitt 5.5.4.1 beschrieben. Aufgrund des dominant adhäsiven bzw. substratnah kohäsiven Versagens der Probereihen E/70 – E00k wird für die Auswertung der Pfad „Randbereich“ gewählt. Das Kohäsionsversagen der Probenreihe E/90 begründet die Wahl des Pfades „Fugenmitte“ für diese Serie.

Die Auswertung der Spannungsverläufe nach dem Konzept „Randfern“ ist nach Auftragung der Schubspannungskomponente über dem Wert der zugehörigen Normalspannung in Abbildung 5.25 zu sehen. Die die Tragfähigkeit beschreibende Spannungsinteraktion folgt einem elliptischen Verlauf. Auch für den Klebstoff EP zeigt sich, dass die Proben der Reihe E/00 zusätzlich zum Schub auch durch Normalspannungen beansprucht sind. Der Spannungszustand in der Klebfuge der Probe E/00k bei der experimentell bestimmten Bruchlast liefert Auskunft über die Schubbeanspruchbarkeit der zu charakterisierenden Stahlklebung.



Erläuterung:
 Index M: Auswertung in Klebschichtmitte
 Index R: Auswertung im Randbereich der Klebschicht

Abbildung 5.24 Numerisch berechnete Verläufe der Schubspannungsverteilung τ_{xz} bzw. der Normalspannungsverteilung σ_z in der Klebschichtmitte (Index M) bzw. im Randbereich der Klebschicht (Index R) der geschäftet geklebten Stahlproben; Klebstoff EP

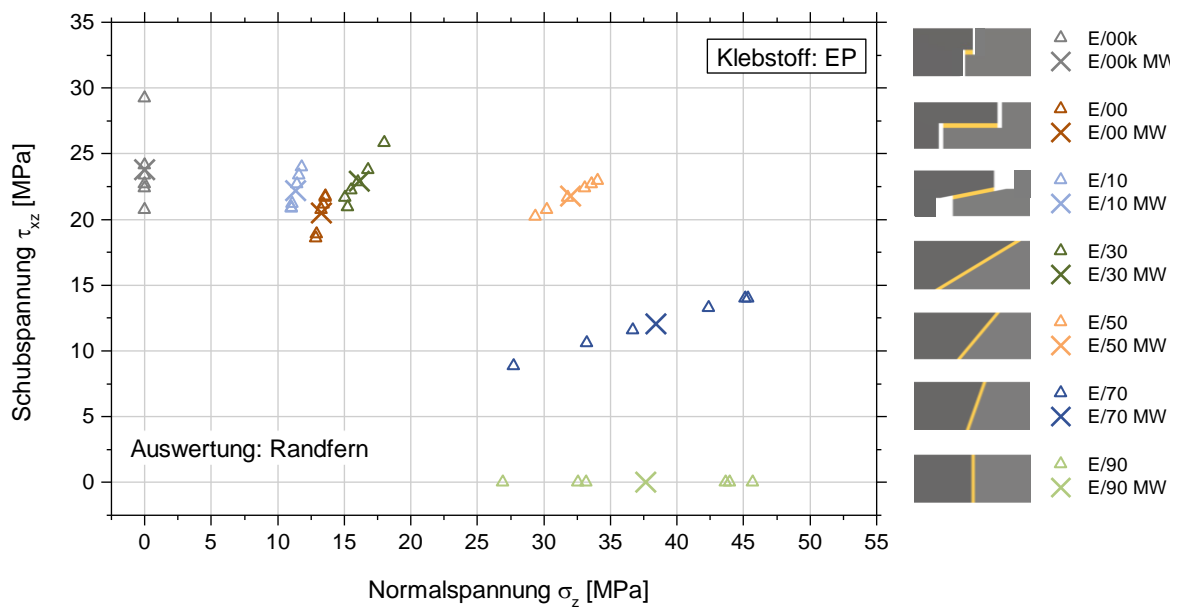


Abbildung 5.25 Numerische Simulation der Versuche an geschäftet geklebten Stahlproben; Auswertung lokaler Maximalspannungen; Auswertungsort: Randfern; Klebstoff EP

Zusätzlich werden auch die numerischen Berechnungen der mit EP geklebten Bauteile an der Stelle „Rand“ ausgewertet. Diese führt bei den Probenreihen E/00k, E/00 sowie E/10 wiederum dazu, dass die maximale Normalspannung als Versagenskriterium der Probe herangezogen wird. Die am Auswertungsort „Rand“ ermittelte Interaktion der maximalen Normalspannung und der zugehörigen Schubspannung ist in Abbildung 5.26 dargestellt. Es zeigt sich wie auch schon bei den PUR geklebten Proben, dass eine Konzentration der Ergebnisse im Bereich der vorwiegenden Normalspannungsbeanspruchung liegt. Sämtliche Ergebnisse liegen hierbei im Bereich der Streuung der Probe E/90.

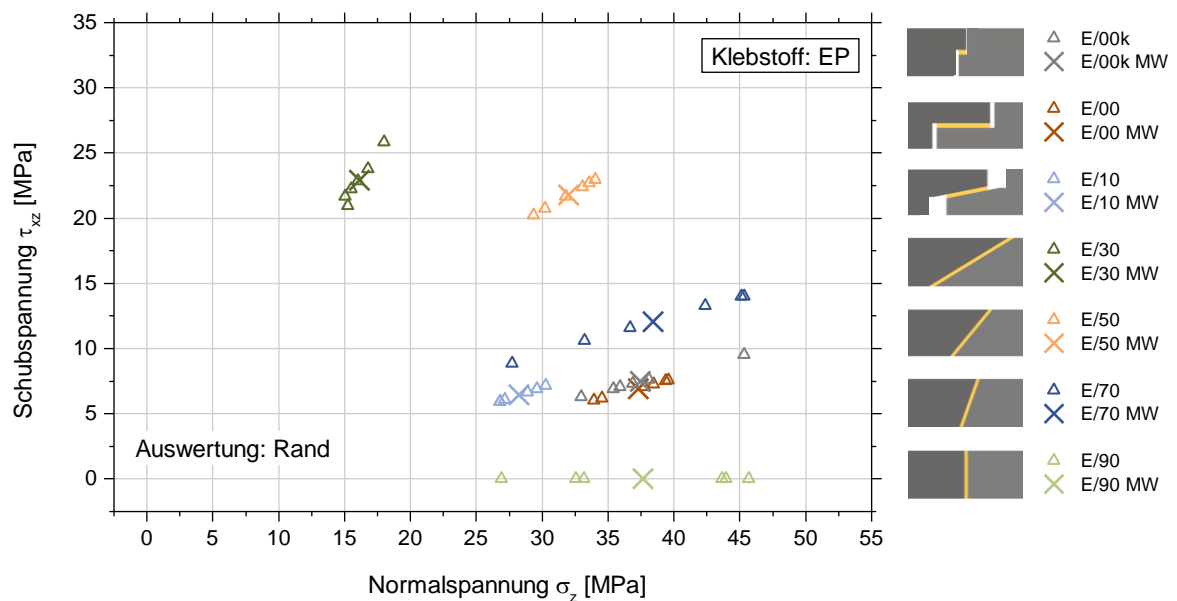


Abbildung 5.26 Numerische Simulation der Versuche an geschäftet geklebten Stahlproben; Auswertung lokaler Maximalspannungen; Auswertungsort: Rand; Klebstoff EP

5.6 Versagenskriterium

Als Grundlage für die Erarbeitung eines spannungsbasierenden Versagenskriteriums für geklebte Stahl-Verbindungen dienen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten 93 Versuche an geschäftet geklebten Stahlproben. Mit Hilfe numerischer Berechnungen wird der Spannungszustand in der Klebfuge bei jeder der experimentell bestimmten Bruchlasten (Sprödbruch) bestimmt. Ziel ist die Beschreibung der Tragfähigkeit der Klebverbindung durch ein mit den experimentellen Festigkeiten abgesichertes Versagenskriterium. Dabei soll zum einen ein Kriterium auf der Basis aller Einzelergebnisse erarbeitet werden (Index E). Der im Bauwesen üblichen Vorgehensweise entsprechend dienen die unteren 5 %-Quantile der einzelnen Versuchsreihen als Grundlage für die Definition eines charakteristischen Versagenskriteriums, das als Bemessungsfunktion für die Festigkeit der geklebten Verbindung herangezogen wird (Index K).

Zunächst wird auf das Versagenskriterium basierend auf allen Einzelergebnissen eingegangen. Dabei werden sowohl die spezifischen Spannungspaare $\tau_{\max}; \sigma_{\text{lokal}}$ (Auswertungsort „Randfern“) als auch $\sigma_{\max}; \tau_{\text{lokal}}$ (Auswertungsort „Rand“) als Grundlage herangezogen (siehe Abschnitt 5.5.4). Zur Beschreibung der Spannungsinteraktion beim Bruch werden unterschiedliche mathematische Funktionen betrachtet. Eine gute Annäherung an die experimentell bestimmten Festigkeitswerte ergibt sich bei quadratischer Interaktion von Schub- und Normalspannungen (siehe Gl. 5.5). Grafisch entspricht diese der Ursprungsgleichung einer Ellipse. Die quadratische Interaktion von Spannungskomponenten zur Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten ist bereits Bestandteil der von *Alfred Puck* entwickelten Bruchtheorie (PUCK 1996).

$$\theta_i(\sigma_z; \tau_{xz}) = \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z,R,i}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{\tau_{xz,R,i}} \right)^2 = 1 \quad ; \quad i = E, K \quad \text{Gl. 5.5}$$

Zur Bestimmung der Zahlenwerte für $\sigma_{z,R,E}$ und $\tau_{xz,R,E}$ werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Zunächst werden die Mittelwerte der Prüfreihe mit einem Winkel von 90° für $\sigma_{z,R,i}$ und die Mittelwerte der Ergebnisse der Reihe 00k für die Schubbeanspruchbarkeit $\tau_{xz,R,i}$ gewählt (Kriterium 1).

Zusätzlich wird mit Hilfe des Datenanalyseprogrammes Origin Pro 9.1 eine nichtlineare implizite Kurvenanpassung an die in Abbildung 5.27 für den Klebstoff PUR bzw. in Abbildung 5.28 für den Klebstoff EP dargestellten Einzelergebnisse durchgeführt. Dabei dient Gl. 5.5 als Eingangsfunktion. Unter Verwendung der orthogonalen Distanzregression (ODR) als Iterationsalgorithmus werden die Zahlenwerte für $\sigma_{z,R,E}$ und $\tau_{xz,R,E}$ berechnet. Ziel dieses Algorithmus ist die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate durch iterative Variation der unabhängigen Variablen (hier $\sigma_{z,R,E}$ und $\tau_{xz,R,E}$). Dabei ist die orthogonale Distanz zwischen Datenpunkt und Ausgleichsfunktion als Residuum festge-

legt (ZWOLAK ET AL. 2007; Origin o. J.). Die sich hieraus ergebende Anpassungsfunktion wird fortlaufend als Versagenskriterium 2 bezeichnet.

Eine weitere Anpassungskurve zur Beschreibung des Versagenskriteriums geklebter Stahlverbindungen wird unter Verwendung der Ellipsengleichung mit zusätzlichem Mischterm erarbeitet. Diese Funktion ist in Gl. 5.6 dargestellt.

$$\theta_i(\sigma_z; \tau_{xz}) = \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z,R,i}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz}}{\tau_{xz,R,i}} \right)^2 + \alpha \cdot \frac{\sigma_z \cdot \tau_{xz}}{\sigma_{z,R,i} \cdot \tau_{xz,R,i}} = 1 \quad ; \quad i = E, K \quad \text{Gl. 5.6}$$

Eine nichtlineare implizite Kurvenanpassung ergibt die Zahlenwerte für die Parameter $\sigma_{z,R,i}$, $\tau_{xz,R,i}$ und α . Diese Ansatzfunktion wird in ähnlicher Form auch für die Beschreibung des Versagens von faserverstärkten Kunststoffen verwendet und ist unter der Bezeichnung „Tsai-Hill Kriterium“ bekannt (TSAI UND WU 1971) (Kriterium 4). Die als Versagenskriterium 3 bezeichnete Funktion unterscheidet sich von Versagenskriterium 4 darin, dass bei letztgenannter Funktion die Zahlenwerte für $\sigma_{z,R,E}$ und $\tau_{xz,R,E}$ wiederum aus den experimentell bestimmten Mittelwerten der Versuchsreihen 00k und 90 stammen und lediglich der dem Mischterm vorangestellte Faktor α mit Hilfe der Kurvenanpassung bestimmt wird.

Für die ausgewählten vier Anpassungsfunktionen sind die Zahlenwerte der für die beiden Klebstoffe berechneten Variablen für das auf allen Einzelergebnissen basierende Versagenskriterium (Index E) in Tabelle 5.10 angegeben. Zur Beurteilung der Qualität der Anpassungsfunktionen ist zudem das sich aus dem orthogonalen Abstand der Einzelergebnisse zur jeweiligen Ausgleichsfunktion ergebende Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet. Da dieser Wert jedoch nicht nur von der Genauigkeit der Anpassung, sondern ebenfalls von der Anzahl der Freiheitsgrade abhängig ist, wird zusätzlich das mit Hilfe des Programms Origin Pro 9.1 berechnete korrigierte Bestimmtheitsmaß R_{kor}^2 angegeben. In diese statistische Kenngröße der Regressionsanalyse geht die Anzahl der berechneten Variablen ebenfalls ein.

Die Anpassungsfunktionen nach Gl. 5.6 werden aufgrund der nachfolgenden Erläuterung im Weiteren nicht detaillierter untersucht. Durch den Mischterm wird die Ellipse anschaulich gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Dies führt dazu, dass beispielsweise bei kombinierter Beanspruchung durch σ_z und τ_{xz} die aus Gl. 5.6 berechenbare Normalspannungskomponente über dem entsprechenden Wert bei reiner Normalspannungsbeanspruchung läge. In ähnlicher Form gilt dies auch bei vorwiegender Schubbeanspruchung. Gl. 5.6 ergäbe für kombinierte Schub-Normalspannungszustände eine höhere Beanspruchbarkeit als für reinen Schub. Zudem zeigen exemplarische Vergleichsberechnungen zur Prognose der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen (Kapitel

7) keine signifikant besseren Ergebnisse bei Anwendung des Kriteriums nach Gl. 5.6, das aus diesen Gründen im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet wird.

| Versagenskriterium | Anpassungsfunktion nach | $\sigma_{z,R,E}$ [MPa] | $\tau_{xz,R,E}$ [MPa] | α [-] | R^2 | R^2_{kor} | |
|--------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|--------------|-------|-------------|-------|
| PUR | 1 | Gl. 5.5 | 39,9 | 28,9 | - | - | - |
| | 2 | Gl. 5.5 | 43,7 | 29,8 | - | 0,962 | 0,961 |
| | 3 | Gl. 5.6 | 39,9 | 28,9 | 0,46 | 0,963 | 0,963 |
| | 4 | Gl. 5.6 | 40,2 | 23,9 | 0,76 | 0,972 | 0,971 |
| EP | 1 | Gl. 5.5 | 37,7 | 23,8 | - | - | - |
| | 2 | Gl. 5.5 | 39,6 | 24,7 | - | 0,911 | 0,910 |
| | 3 | Gl. 5.6 | 37,7 | 23,8 | 0,40 | 0,918 | 0,918 |
| | 4 | Gl. 5.6 | 33,6 | 20,3 | 1,00 | 0,958 | 0,957 |

Tabelle 5.10 Durch nichtlineare implizite Kurvenanpassung berechnete Zahlenwerte der Variablen der Versagenskriterien auf Basis aller Einzelergebnisse; Klebstoffe PUR und EP

Eine gute Annäherung des Versagens Stahlklebung bei kombinierter σ_z und τ_{xz} - Beanspruchung wird für beide Klebstoffe durch Gl. 5.5 erzielt. Dabei werden für die Variablen $\sigma_{z,R,E}$ sowie $\tau_{xz,R,E}$ die Mittelwerte der Prüfreihen 90 bzw. 00k eingesetzt (Kriterium 1). Der Verlauf dieses Versagenskriteriums unterscheidet sich nur unwesentlich von Kriterium 2, das aus der Kurvenanpassung an die Einzelergebnisse resultiert. Daraus kann gefolgert werden, dass zukünftig in konservativer Näherung das Versagenskriterium bereits bei Kenntnis der Tragfähigkeit der Probengeometrien 90 und 00k definiert werden könnte. Dies geht mit einer beträchtlichen Reduktion des experimentellen und numerischen Aufwandes einher. Zur Veranschaulichung ist das beschriebene auf allen Einzelergebnissen basierende Versagenskriterium 1 zunächst für die EP geklebten Proben in Abbildung 5.27 dargestellt. Ebenso sind die dem Versagenskriterium zu Grunde liegenden Interaktionsspannungen abgebildet. Lediglich die Spannungswerte der Reihen 00k, 00 sowie 10 sind an den Auswertungsorten „Randfern“ und „Rand“ nicht deckungsgleich und daher in Abbildung 5.27 separat zu sehen.

Wie bereits beschrieben ist der untere 5 %-Quantilwert einer Messreihe in der Regel für die Bemessung der Festigkeit von Werkstoffen im Bauwesen ausschlaggebend. Dieser Wert wird von 95 % der Versuchsergebnisse der Grundgesamtheit übertroffen (ZILCH UND ZEHETMAIER 2006). Zur Entwicklung eines charakteristischen Versagenskriteriums für die geklebte Stahlverbindung werden zunächst die 5 %-Quantile der einzelnen Versuchsreihen unter der Annahme verschiedener mathematischer Verteilungsfunktionen berechnet. Dabei werden neben der Normalverteilung die für statistische Auswertungen in Anwendungen der Natur- und Ingenieurwissenschaften bedeutende Log-

Normalverteilung sowie die Student-t-Verteilung zugrunde gelegt. Für die genannten statistischen Verteilungen ergibt sich kein relevanter Unterschied bei der Berechnung der Zahlenwerte der 5 %-Quantile.

Zur Beschreibung des charakteristischen Versagenskriteriums auf Basis der 5 %-Quantilwerte dient die quadratische Interaktion von Schub- und Normalspannung nach Gl. 5.5. Die Parameter $\sigma_{z,R,K}$ und $\tau_{xz,R,K}$ werden dabei so gewählt, dass die 5 %-Quantilwerte aller Versuchsreihen gerade noch konservativ abgedeckt sind. Dies hat zur Folge, dass das elliptische Versagenskriterium zwei Quantilwerte schneidet. Damit ergibt sich für die gesamte Messreihe eine Überlebenswahrscheinlichkeit größer 95 %.

Bei Anwendung der beschriebenen Vorgehensweise zeigt sich für den Klebstoff EP eine sehr gute untere Abgrenzung der experimentellen Ergebnisse für die Parameter $\sigma_{z,R,K} = 27,3$ MPa sowie $\tau_{xz,R,K} = 21,1$ MPa. Die grafischen Verläufe sowohl des charakteristischen Versagenskriteriums basierend auf den 5 %-Quantilen als auch des auf allen Einzelergebnissen basierenden Versagenskriteriums sind in Abbildung 5.27 dargestellt. Es zeigt sich, dass das charakteristische Versagenskriterium lediglich von zwei Messergebnissen leicht unterschritten wird. Dies entspricht weniger als 5 % der Einzelergebnisse der EP-gefügten Stahlproben.

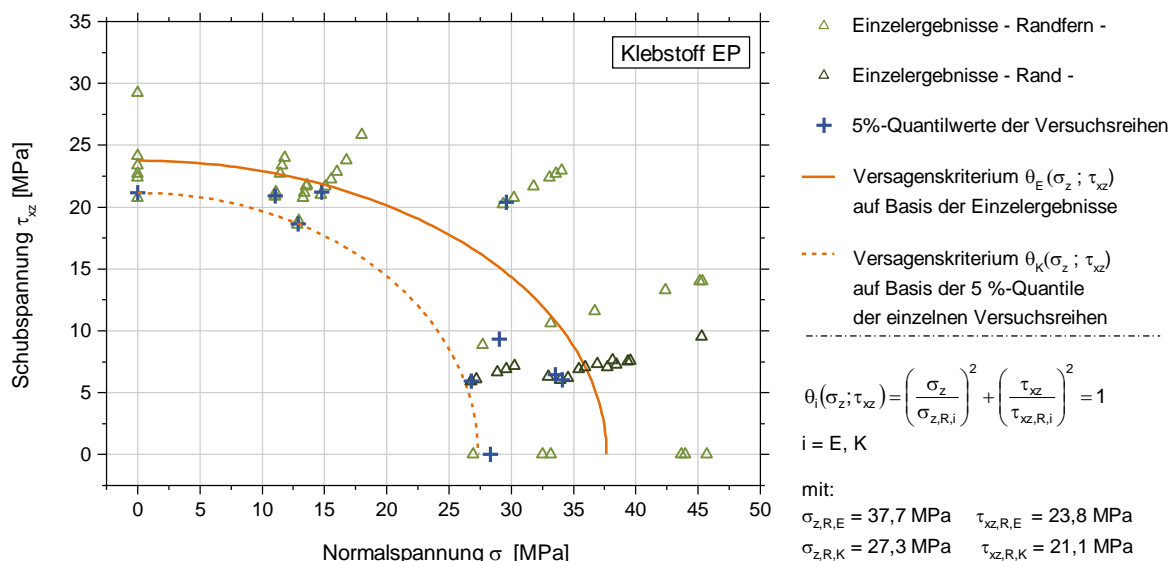


Abbildung 5.27 Versagenskriterien auf der Basis der experimentellen Einzelergebnisse sowie auf Basis der 5 %-Quantile für mit dem Klebstoff EP gefügte Stahlverbindungen

In Analogie zu der beschriebenen Vorgehensweise sind das auf den Einzelergebnissen basierende sowie das auf den 5 %-Quantilen der einzelnen Versuchsreihen basierende Versagenskriterium für PUR-Stahlklebungen in Abbildung 5.28 zusammengefasst. Beide Kriterien basieren auf der quadratischen Interaktion von Schub- und Normalspannung

nach Gl. 5.5. Zur Vermeidung eines überkonservativen und damit unwirtschaftlichen Versagenskriteriums wird die in Abbildung 5.28 ausgegraute Messreihe P/30 aus den in Abschnitt 5.5.4.1 erläuterten Gründen im Rahmen der Festlegung der Versagenskriterien nicht berücksichtigt.

Vergleichbar zum Klebstoff EP zeigt sich auch für den Klebstoff PUR, dass bei Verwendung der Mittelwerte der Versuchsreihen P/90 bzw. P/00k für die Variablen $\sigma_{z,R,E}$ sowie $\tau_{xz,R,E}$ eine gute Annäherung aller Einzelergebnisse erzielt wird (Kriterium 1). Das auf den 5 %-Quantilen basierende Kriterium stellt eine konservative untere Abgrenzung der Versuchsergebnisse dar. Dabei werden die Variablen in Gl. 5.5 so gewählt, dass das Versagenskriterium mindestens die beiden 5 %-Quantile durchläuft, die den geringsten Abstand zum Ursprung aufweisen. Dies ergibt sich für den Klebstoff PUR für die Zahlenwerte $\sigma_{z,R,K} = 33,5$ MPa sowie $\tau_{xz,R,K} = 27,7$ MPa.

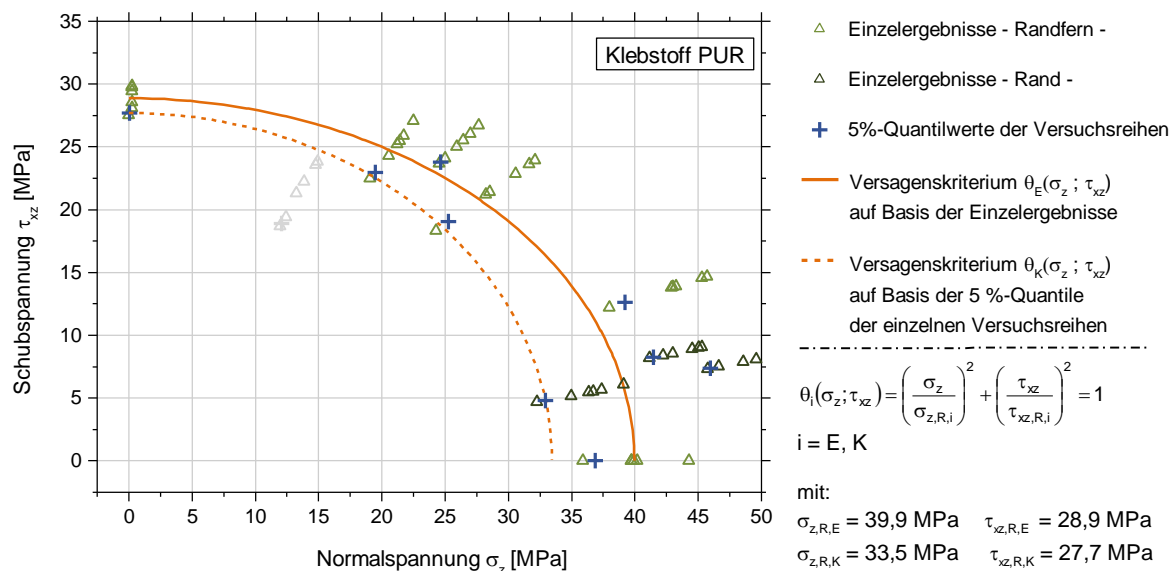


Abbildung 5.28 Versagenskriterium auf der Basis der experimentellen Einzelergebnisse sowie auf Basis der 5 %-Quantile für mit dem Klebstoff PUR gefügte Stahlverbindungen

Die auf Basis der in diesem Kapitel dokumentierten experimentellen und numerischen Untersuchungen stellen die Basis für die erarbeiteten spannungsbasierenden Versagenskriterien für geklebte Stahlverbindungen dar. Diese Versagenskriterien dienen im Weiteren zur rechnerischen Prognose der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen (Kapitel 7).

Quasi-statische Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen

6.1 Ansatz und Zielsetzung

Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung des Fügeverfahrens Kleben zum Anschluss von Kreishohlprofilen (KHP) bei Tragwerken des Stahlbaus ist die Kenntnis der Tragfähigkeit der Verbindungen. Die experimentelle Bestimmung dieser stellt einen weiteren Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar und ist Grundlage für die Validierung der rechnerischen Prognose der Tragfähigkeit (Abschnitt 7). Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wird zunächst die quasi-statische Tragfähigkeit geklebter Überlappungsstöße bei Raumtemperatur und Variation wesentlicher Parameter ermittelt:

- Zur Quantifizierung und Beurteilung des Einflusses des nichtlinearen Spannungsverlaufes entlang der Überlappungslänge werden KHP-Verbindungen mit unterschiedlicher Einstecklänge geprüft.
- Versuche an KHP-Proben mit unterschiedlichen Klebschichtdicken liefern Erkenntnisse über den Einfluss der Schichtdicke auf die Tragfähigkeit der geklebten Verbindung.
- Die experimentelle Untersuchung von Proben mit unterschiedlichen KHP-Durchmessern bei vergleichbarer Klebschichtdicke hat das Ziel, einen etwaigen Größeneinfluss zu bestimmen.
- Aufgrund der im Bauwesen unvermeidbaren Fertigungsimperfectionen stellt die experimentelle Prüfung von Probekörpern mit definierter Schiefstellung oder Ausmitte der Schwerelinien einen weiteren Untersuchungsgegenstand dar.

- Des Weiteren wird der Einfluss eines zusätzlichen Temperprozesses auf die Festigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung untersucht.

Numerische Berechnungen haben das Ziel, Kenntnis über den Spannungszustand in der Klebung zu gewinnen. Dabei muss zunächst zwischen geometrisch und physikalisch linearen und nichtlinearen Analysen unterschieden werden. Nichtlineare numerische Berechnungen weisen eine größere Komplexität auf und erfordern längere Rechenzeiten. Da sie den tatsächlichen Spannungszustand in der Klebverbindung aber in der Regel realitätsnaher abbilden, werden bei allen numerischen Simulationen dieser Arbeit geometrische und physikalische Nichtlinearitäten berücksichtigt. Hierzu werden alle untersuchten Kreishohlprofilproben in numerischen Modellen simuliert. Dies ermöglicht, die aus den jeweiligen experimentell bestimmten Bruchlasten resultierenden, numerisch ermittelten Spannungsverteilungen zu beschreiben sowie hinsichtlich der lokalen Spannungsmaxima auszuwerten.

6.2 Probengeometrie und Fügeilwerkstoffe

6.2.1 Geometrie der geklebten Kreishohlprofilproben

Zur experimentellen Bestimmung der quasi-statischen Tragfähigkeit der geklebten KHP-Verbindung werden Steckverbindungen untersucht. Jede Probe besteht hierbei aus zwei Kreishohlprofilabschnitten mit unterschiedlichen Durchmessern D_a und D_i sowie den zugehörigen Wanddicken t_a sowie t_i . Aus der Differenz des Innendurchmessers des äußeren Fügeils und des Außendurchmessers des inneren Fügeils resultiert im Überlappungsbereich ein zylindrischer Spalt, der mit Klebstoff gefüllt wird. Schematisch ist die geklebte Hohlprofilsteckverbindung in Abbildung 6.1 dargestellt.

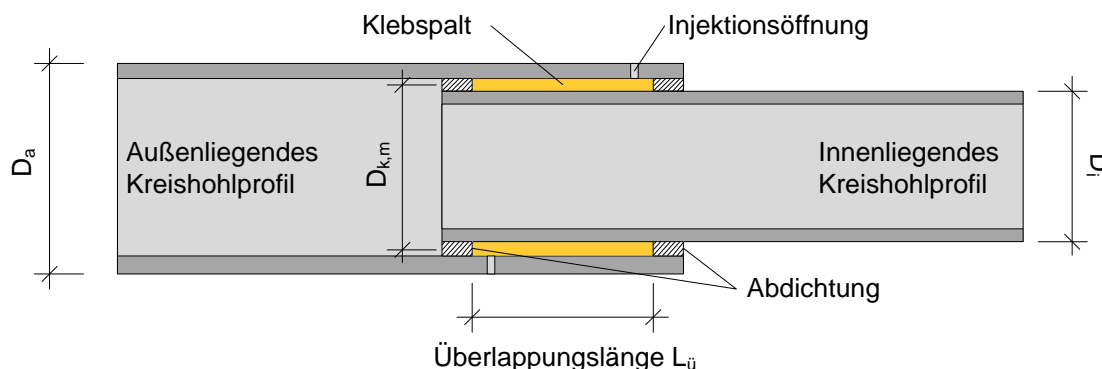


Abbildung 6.1 Schematische Darstellung der geklebten Hohlprofilsteckprobe, Längsschnitt in Probenmitte

In dieser Arbeit werden insgesamt 88 geklebte Kreishohlprofilproben untersucht. Dabei ist zwischen den vier betrachteten Kreishohlprofilkonfigurationen zu differenzieren. Die-

se unterscheiden sich zunächst in ihren Querschnitten. Daraus resultieren insbesondere variierende, sich aus der Geometrie der Fügeteile ergebende nominelle Klebspaltdicken. Bei der Festlegung der nominellen Klebschichtdicke werden die in Kapitel 3 beschriebenen Maßtoleranzen von Kreishohlprofilen aufgrund ihres Einflusses auf die tatsächliche Schichtdicke berücksichtigt. Zu beachten ist, dass aufgrund der in den Lieferprogrammen der Hohlprofilhersteller festgelegten Querschnitte bei unterschiedlichen KHP-Durchmessern teilweise nicht exakt gleich große Schichtdicken erzeugt werden können.

Die Geometrie der Querschnitte der KHP-Konfigurationen A bis C ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Konfigurationen A und B bei identischem Durchmesser des innenliegenden Kreishohlprofils aufgrund der variierenden Außendurchmesser unterschiedliche nominelle Klebschichtdicken von 2,5 mm und 5,8 mm aufweisen. Der Klebspalt der KHP-Konfiguration C liegt mit 2,8 mm etwa in der Größenordnung von A. Die Fügeteile der Konfiguration C besitzen jedoch einen etwa doppelt so großen Durchmesser. Für alle Fügeteile der Konfigurationen A, B und C (Abbildung 6.2) werden warmgefertigte nahtlose Stahlhohlprofile nach (DIN EN 10210-1) bzw. (DIN EN 10216-1) verwendet.

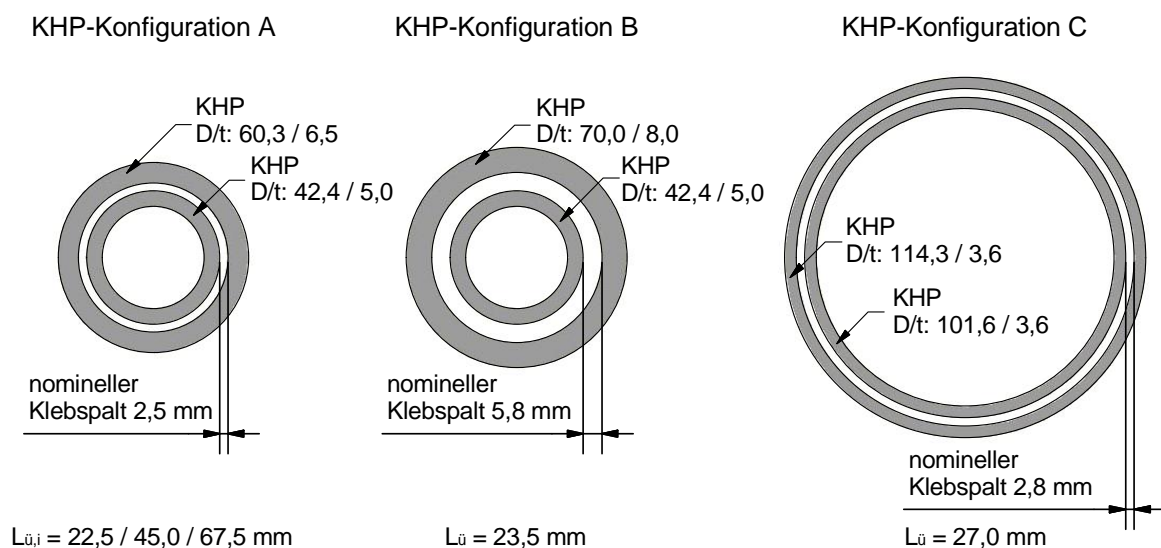


Abbildung 6.2 Übersicht KHP-Probenquerschnitte der Konfigurationen A, B und C [mm]

Kreishohlprofilkonfiguration A wird mit drei unterschiedlichen Überlappungslängen hergestellt. Dabei wird die Überlappungslänge in Abhängigkeit des Probendurchmessers in Klebspaltmitte $D_{k,m}$ (siehe Abbildung 6.1) festgelegt. Dieser Bezug erlaubt einen anschaulichen Vergleich von Überlappungslänge und Hohlprofil Durchmesser. Die Überlappungslängen betragen 22,5 mm, 45,0 mm sowie 67,5 mm; dies entspricht dem 0,5-, 1,0- bzw. 1,5-fachen Durchmesser des Probendurchmessers in der Klebspaltmitte. Diese Vorgehensweise führt bei KHP-Konfiguration B zu einer Überlappungslänge von 23,5 mm (entspricht $0,5 \cdot D_{k,m}$). Die realisierbaren Überlappungslängen werden bei KHP-

Konfiguration C durch die elastische Tragfähigkeit der Stahlquerschnitte begrenzt. Aus diesem Grund wird für die Proben dieser Konfiguration die Überlappungslänge mit 27,0 mm festgelegt. Bezogen auf den mittleren Klebspaltdurchmesser entspricht dies etwa $0,25 \cdot D_{k,m}$. Alle Überlappungslängen der Konfigurationen A bis C sind in Abbildung 6.2 angegeben.

Die Kreishohlprofilkonfiguration C dient des Weiteren zur Beurteilung des Einflusses eines zusätzlichen Temperprozesses (30 min bei 80 °C) sowie der Auswirkungen planmäßig eingebrachter Imperfektionen auf die Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung. Dabei wird zum einen die Fertigungsimperfektion Ausmitte der Kreishohlprofilschwerelinien untersucht (Abbildung 6.3). Geprüft werden Verbindungen mit einer Ausmitte von 20 % bzw. 50 % der nominellen Klebschichtdicke ($0,2 \cdot S_k$ bzw. $0,5 \cdot S_k$). Bei Konfiguration C (Schichtdicke 2,8 mm) führt dies zu minimalen Klebschichtdicken von 2,2 bzw. 1,4 mm sowie maximalen Schichtdicken von 3,4 bzw. 4,2 mm.

Die zweite im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Fertigungsimperfektion ist die Schiefstellung der Kreishohlprofile zueinander (Abbildung 6.4). Hierzu wird das innere Kreishohlprofil um $0,75^\circ$ bzw. $1,50^\circ$ gegen das äußere Bauteil verdreht. Der Drehpunkt liegt hierbei im Schwerpunkt der Profilüberlappung.

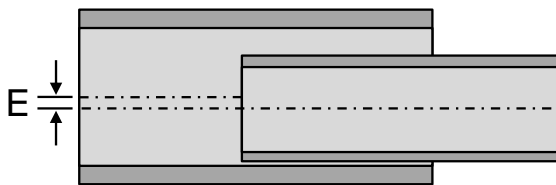


Abbildung 6.3 Schematische Darstellung der Fertigungsimperfektion Ausmitte der Schwerelinien

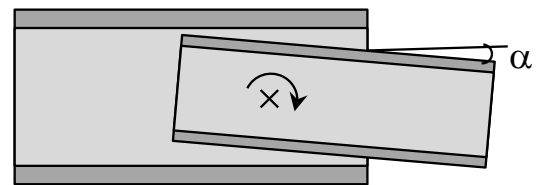


Abbildung 6.4 Schematische Darstellung der Fertigungsimperfektion Schiefstellung

Die Proben der Konfiguration D weisen große Abmessungen auf, die beispielsweise bei Tragwerkselementen des Brückenbaus oder bei Fachwerktragstrukturen des Windenergieanlagenbaus üblich sind. Diese Versuchsserie hat das Ziel zu überprüfen, ob die Ergebnisse der Versuche der kleineren Konfigurationen übertragen werden können sowie Maßstabeffekte zu beurteilen. Zur realitätsnahen Prüfung eines geklebten Anschlusses an ein Gussbauteil im Fachwerkknotenpunkt setzt sich die Kreishohlprofilkonfiguration D aus einem Stahlgussbauteil nach (DIN EN 10340) sowie einem warmgefertigten nahtlosen Stahlkreishohlprofil nach (DIN EN 10210-1) zusammen. Die Abmessungen der Konfiguration D können Abbildung 6.5 entnommen werden.

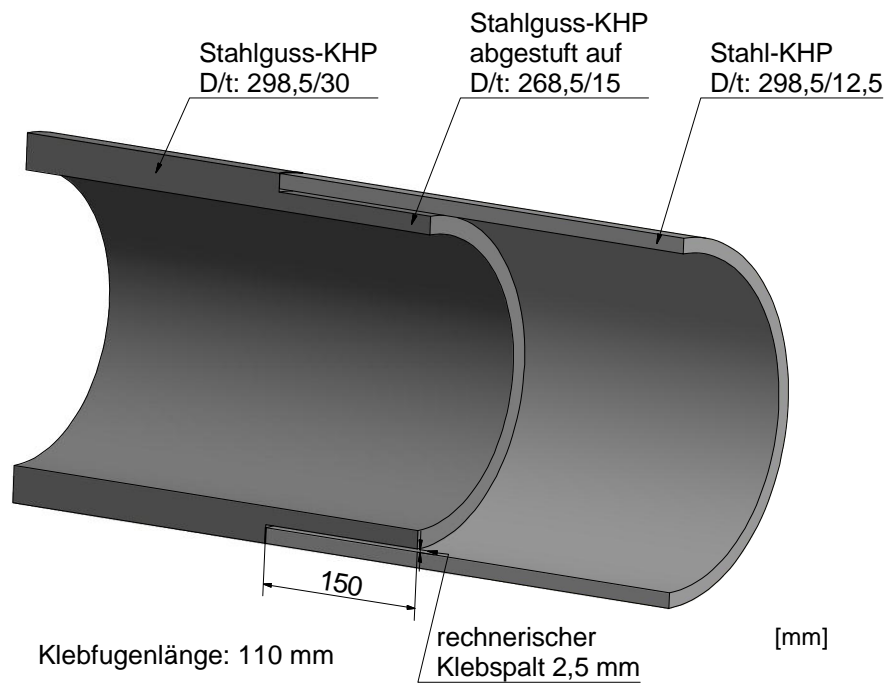


Abbildung 6.5 Geometrie des Überlappungsbereichs der Großbauteilproben Konfiguration D [mm]; (Darstellung der halben Hohlprofilprobe)

Aufgrund ästhetischer Anforderungen werden für beide Fügeteilpartner Außendurchmesser von 298,5 mm gewählt. Dies ermöglicht einen stufenlosen Übergang zwischen den beiden Hohlprofilen. Die Überlappung beider Bauteile wird durch eine Abstufung der Wandung des dickwandigeren Stahlgushohlprofils realisiert. Hierzu wird das Stahlgussbauteil mit einem zerspanenden Verfahren auf einen Nenndurchmesser von 268,5 mm reduziert. Durch das Aufschieben des Stahlkreishohlprofils mit den Abmessungen $D/t = 298,5/12,5$ mm entsteht ein nomineller Klebspalt von 2,5 mm. Dies ermöglicht den oben beschriebenen Vergleich der Tragfähigkeiten aus Klein- und Großbauteilversuchen mit ähnlicher Klebschichtdicke (Konfiguration A: 2,5 mm; Konfiguration C: 2,8 mm). Die Überlappungslänge der Konfiguration D beträgt bei allen Bauteilen 110 mm. Dies entspricht etwa dem 0,4-fachen Durchmesser des mittleren Klebschichtdurchmessers. Hervorgehoben sei das in diesen Spalt einzubringende Klebstoffvolumen von ca. 235 cm³.

6.2.2 Fügeteilwerkstoffe

S355J2H

Für die experimentellen Untersuchungen der Konfigurationen A, B und D werden warmgefertigte nahtlose Stahlhohlprofile aus dem Stahl S355J2H nach (DIN EN 10210-2) verwendet. Bei dem verwendeten Werkstoff handelt es sich um einen unlegierten Baustahl mit der Werkstoffnummer 1.0576. Die Technischen Lieferbedingungen (DIN EN 10210-2) fordern für Nennwanddicken ≤ 16 mm eine Streckgrenze R_{eH} von mindestens 355 MPa, für Nennwanddicken zwischen 16 und 40 mm muss die Streckgrenze mindestens 345 MPa betragen. Die Zugfestigkeit des Werkstoffes muss im Bereich von 470 bis 630 MPa liegen. Die Einhaltung dieser normativen Vorgaben wird durch eigene Zugversuche an Stahlproben überprüft. Hierzu werden aus den als Stangenware angelieferten Kreishohlprofilen Längsstreifen ausgefräst und pro KHP-Geometrie je zwei Zugproben nach (DIN 50125) angefertigt.

Die Zugversuche werden nach (DIN EN ISO 6892-1), Verfahren B an der elektro-mechanischen 100 kN Zwick Materialprüfmaschine der Versuchsanstalt durchgeführt. Aufgrund der sich ergebenden hohen Prüflasten wird für die Prüfung der dickwandigen Zugproben eine servohydraulische 250 kN Instron Prüfmaschine eingesetzt. Für jede KHP-Geometrie des Werkstoffes S355J2H ist jeweils eine exemplarische Spannungs-Dehnungs-Beziehung in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen, dass die normativen Anforderungen an die mechanischen Kennwerte von allen untersuchten Kreishohlprofilen eingehalten werden.

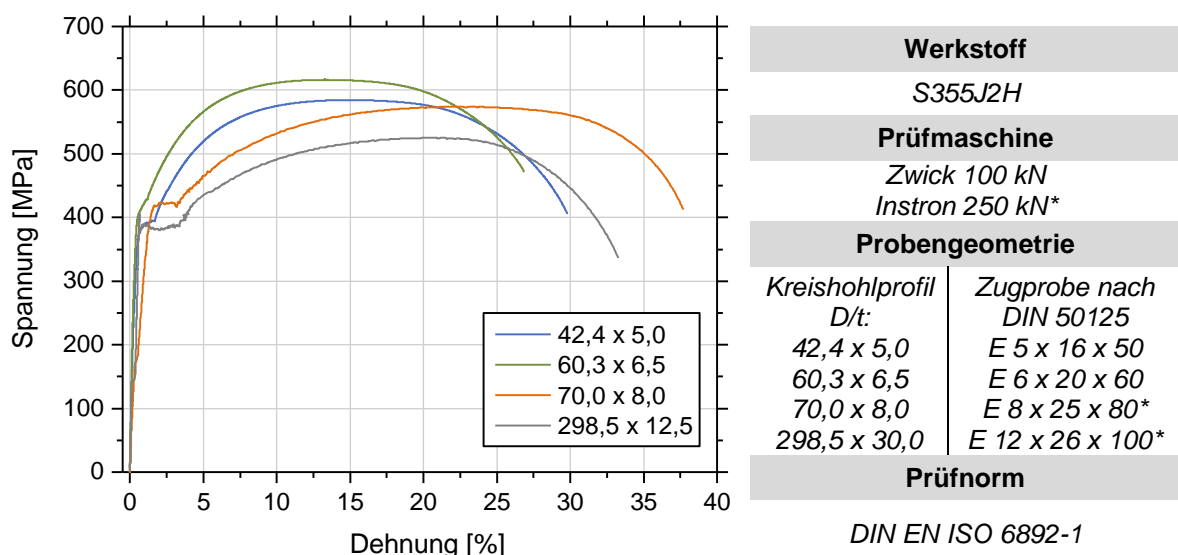


Abbildung 6.6 Spannungs-Dehnungsverhalten von Zugproben des verwendeten Werkstoffes S355 aus Zugversuchen

Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs S355J2H nach der Schmelzanalyse ist ebenfalls in (DIN EN 10210-2) festgelegt. Für Erzeugnisdicken ≤ 120 mm dürfen nachfolgende Massenanteile nicht überschritten werden.

| Stahlsorte | Massenanteile in %, max. | | | | | |
|------------|--------------------------|------|------|------|------|---|
| | C | Si | Mn | P | S | N |
| S355J2H | 0,22 | 0,55 | 1,60 | 0,03 | 0,03 | - |

Tabelle 6.1 Chemische Zusammensetzung der Stahlsorte S355J2H nach (DIN EN 10210-2, 2006)

Die vorliegenden Abnahmeprüfzeugnisse 3.1 nach (DIN EN 10204) zeigen, dass die Anforderungen an die chemische Zusammensetzung erfüllt sind (siehe Anhang Tabelle A.1).

P235TR2

Die Kreishohlprofile der Konfiguration C bestehen aus der Stahlsorte P235TR2 mit der Werkstoffnummer 1.0255 nach (DIN EN 10216-1). Dabei handelt es sich um Rohre für Innendruckbeanspruchungen aus einem unlegierten, warmgewalzten Stahl im normalisierten Zustand. Der Mindestwert für die obere Streckgrenze R_{eH} des P235TR2 beträgt für die verwendeten Wandstärken 235 MPa, die Zugfestigkeit muss im Bereich zwischen 360 und 500 MPa liegen. Damit ist diese Stahlsorte hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften mit dem verbreiteten Baustahl S235 vergleichbar und wird aus Gründen der Verfügbarkeit gewählt. Die Ergebnisse der Zugversuche zeigen, dass die tatsächlichen mechanischen Kennwerte die geforderten Mindestwerte übertreffen (Tabelle 6.4 / Abbildung 6.7).

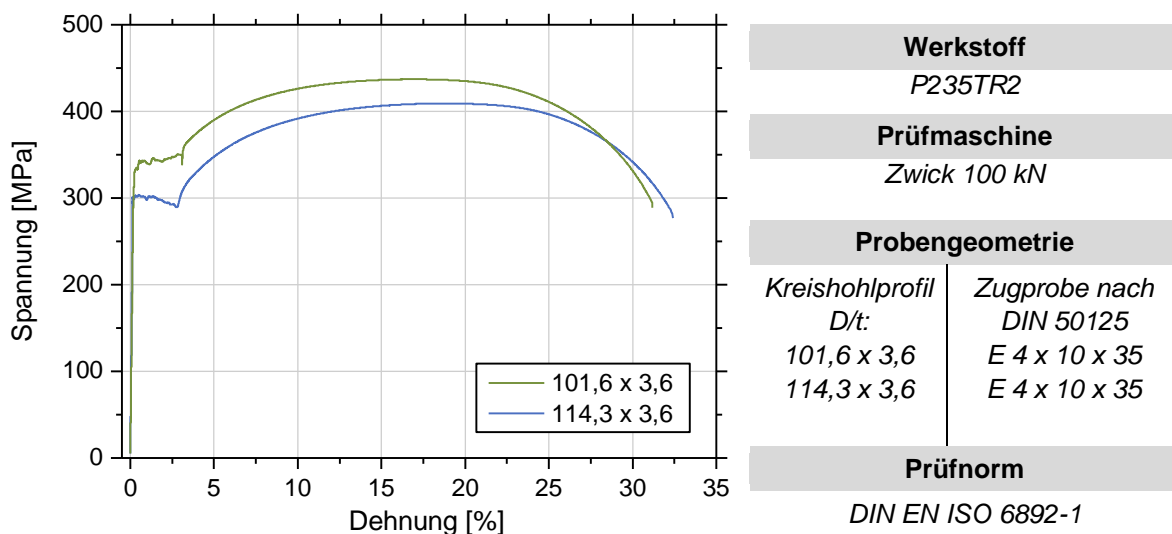


Abbildung 6.7 Spannungs-Dehnungsverhalten von Zugproben des Werkstoffs P235TR2 aus Zugversuchen

Die Anforderungen an die chemische Zusammensetzung des P235TR2 nach (DIN EN 10210-2, 2006) sind in nachfolgender Tabelle dargestellt. Diese Anforderungen sind gemäß den Abnahmeprüfzeugnissen eingehalten (siehe Anhang Tabelle A.2).

| Stahlsorte | Massenanteile in %, max. | | | | | |
|------------|--------------------------|------|------|-------|-------|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Al |
| P235TR2 | 0,16 | 0,35 | 1,20 | 0,025 | 0,015 | 0,02 |

Tabelle 6.2 Chemische Zusammensetzung der Stahlsorte P235TR2 nach (DIN EN 10216-1)

G20Mn5+QT

Die Proben der Konfiguration D setzen sich aufgrund der Zielsetzung des Forschungsprojektes P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015) aus einem warmgefertigten, nahtlosen Stahl-KHP sowie einem Kreishohlprofil aus Stahlguss zusammen. Der verwendete Stahlgusswerkstoff ist ein G20Mn5 mit der Werkstoffnummer 1.6220 nach (DIN EN 10340). Dieser vergütete Werkstoff ähnelt in seinen mechanischen Eigenschaften und seiner chemischen Zusammensetzung dem Baustahl S355 und wurde bereits in einer Vielzahl von Konstruktionen des Stahlhoch- und Brückenbaus eingesetzt. Die Anforderungen an die chemische Zusammensetzung des G20Mn5 sind in (DIN EN 10340) geregelt und in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Auf Basis des mitgelieferten Prüfzeugnisses 3.1 kann die Einhaltung der geforderten chemischen Zusammensetzung für die in Konfiguration D verwendeten Stahlgussbauteile bestätigt werden (siehe Anhang Tabelle A.3).

| Stahlgusswerkstoff | Massenanteile in % | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------|--------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Cu |
| G20Mn5 | 0,17 - 0,23 | ≤ 0,60 | 1,00 - 1,60 | ≤ 0,02 | ≤ 0,02 | ≤ 0,30 | ≤ 0,12 | ≤ 0,50 | ≤ 0,30 |

Tabelle 6.3 Chemische Zusammensetzung des Stahlgusswerkstoffes G20Mn5 nach (DIN EN 10340)

Nach dem Gießprozess wird das Gussbauteil über seine gesamte Länge auf den bestellten, abgestuften Durchmesser abgedreht. Die Untersuchung der Eignung der definiert vorbehandelten Stahlgussoberfläche für das Kleben ist Gegenstand der Arbeiten des Fraunhofer IFAM im Rahmen des Forschungsprojektes P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015). Hierzu wird u.a. die Röntgenphotoelektronenspektroskopie-Analyse (XPS) verwendet. Dieses Analyseverfahren zeigt auf Basis der bestimmten chemischen Zusammensetzung der Fügeflächen, dass diese nach einer Vorbehandlung (Korundstrahlen und Reinigung mit Methylethylketon) für das Kleben geeignet sind. Diese wird durch Zugscherversuche gemäß (DIN EN 1465) zur Bestimmung der Adhäsion auf der Stahlgussoberfläche bestätigt (ALBIEZ ET AL. 2013).

Die Mindestwerte der 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ des G20Mn5 beträgt nach (DIN EN 10340) 300 MPa, die Zugfestigkeit R_m muss zwischen 500 und 650 MPa liegen. Die durchgeführten Zugversuche bestätigen diese normativen Anforderungen (siehe Tabelle 6.4 sowie exemplarisch Abbildung 6.8).

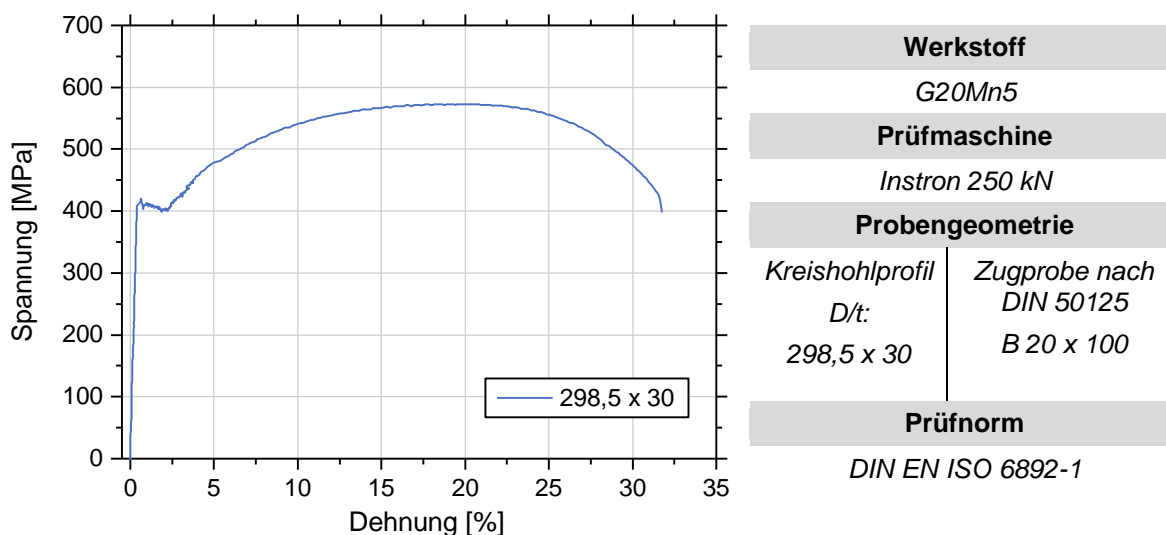


Abbildung 6.8 Spannungs-Dehnungsverhalten von Zugproben des verwendeten Werkstoffes G20Mn5 aus Zugversuchen

Tabelle 6.4 fasst die Ergebnisse der durchgeführten uniaxialen Zugversuche für alle verwendeten Stahlkreisohlprofile zusammen. Dabei wird jeweils der Mittelwert aus den beiden pro Kreisohlprofilgeometrie durchgeführten Stahlzugversuchen gebildet.

| KHP: D/t [mm] | 42,4/5,0 | 60,3/6,5 | 70,0/8,0 | 101,6/3,6 | 114,3/3,6 | 298,5/12,5 | 298,5/30 |
|------------------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|----------|
| Stahlsorte | S355 | S355 | S355 | P235 | P235 | S355 | G20Mn5 |
| Streckgrenze R_e [MPa] | 373 | 394 | 416 | 339 | 300 | 402 | 418 |
| Zugfestigkeit R_m [MPa] | 589 | 581 | 577 | 440 | 414 | 526 | 572 |

Tabelle 6.4 Zusammenfassung der mechanischen Kennwerte aus Zugversuchen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die normativ geforderten Werkstoffkennwerte für alle verwendeten Stahl- und Stahlgussbauteile eingehalten sind. Wesentlich für die vorliegende Arbeit ist die Erkenntnis, dass die Stahlfügeteile der geklebten Proben unter den zu erwartenden Beanspruchungen lediglich elastische Dehnungen erfahren und somit keine Plastizierung der Fügeteile bei der Beurteilung der Tragfähigkeit der geklebten Verbindung berücksichtigt werden muss.

6.3 Fertigung und experimentelle Prüfung der Proben

6.3.1 Probekörperbezeichnung und Versuchsprogramm

Zur leichteren Identifikation und Dokumentation der Probekörper wird ein Bezeichnungsschema verwendet, dem alle wesentlichen Informationen über Klebstoff, Probengeometrie sowie gegebenenfalls planmäßig eingebrachte Imperfektionen entnommen werden können. Dies wird nachfolgend am Beispiel der Probe $P / C / 0,25 / E0,2 / 01$ erläutert.

| | |
|----------|--|
| $P /$ | Klebstoff: P – PUR; E – EP |
| $C /$ | KHP-Konfiguration: A, B, C oder D |
| $0,25 /$ | Überlappungslänge bezogen auf den mittleren Klebschichtdurchmesser $D_{k,m}$ |
| $E0,2 /$ | Definiert eingebrachte Imperfektion: $E0,2$ - Ausmitte der KHP-Schwerelinien $E = 0,2 \cdot s_k$ $E0,5$ - Ausmitte der Rohrschwerelinien $E = 0,5 \cdot s_k$ $S0,75$ - Schiefstellung bezogen auf Klebfugenschwerpunkt $S = 0,75^\circ$ $S1,50$ - Schiefstellung bezogen auf Klebfugenschwerpunkt $S = 1,50^\circ$ |
| T | Thermisch nachgehärtete Proben |
| 1 | Laufende Probennummer 1 dieser Versuchsreihe |

Das Versuchsprogramm der geklebten Kreishohlprofilproben ist für den Klebstoff PUR in Tabelle 6.5 und für den Klebstoff EP in Tabelle 6.6 dargestellt und zeigt:

- Zunächst werden geklebte Kreishohlprofilproben mit unterschiedlicher Überlappungslänge hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit geprüft.
- Im Weiteren werden unterschiedliche Klebschichtdicken infolge verschiedener Profilkombinationen experimentell untersucht.
- Außerdem werden unterschiedliche Kreishohlprofil Durchmesser bei ähnlichen Klebschichtdicken betrachtet.
- Die experimentelle Bestimmung des Einflusses der definiert eingebrachten Imperfektionen Ausmitte der Schwerelinie oder Schiefstellung stellt einen weiteren Schwerpunkt der Untersuchungen dar.
- Thermisch nachgehärtete Kreishohlprofilproben sind Basis der Beurteilung des Einflusses eines zusätzlichen Temperprozesses.

| Klebstoff PUR | | Probengeometrie | | |
|----------------|-----------------|---|---------------------------------------|-----------------|
| Versuchsreihe | Anzahl Versuche | KHP-Geometrie | Überlappungslänge $L_{\ddot{u}}$ [mm] | Besonderheit |
| P/A/0,5 | 5 | Innenbauteil: 42,4 / 5,0 mm | 22,5 | - |
| P/A/1,0 | 5 | Außenbauteil: 60,3 / 6,5 mm | 45,0 | - |
| P/A/1,5 | 5 | | 67,5 | - |
| P/B/0,5 | 5 | Innenbauteil: 42,4 / 4,5 mm Außenbauteil: 70,0 / 8,0 mm | 23,5 | - |
| P/C/0,25 | 5 | | 27,0 | - |
| P/C/0,25/T | 5 | Innenbauteil: 101,6 / 3,6 mm | 27,0 | + Temperprozess |
| P/C/0,25/E0,2 | 3 | Außenbauteil: 114,3 / 3,6 mm | 27,0 | Exzentrizität |
| P/C/0,25/E0,5 | 3 | | 27,0 | Exzentrizität |
| P/C/0,25/S0,75 | 3 | | 27,0 | Schiefstellung |
| P/C/0,25/E1,50 | 3 | | 27,0 | Schiefstellung |
| P/D/0,4 | 4 | Innenbauteil: 298,5 / 12,5 mm Außenbauteil: 298,5 / 15 / 30 mm | 110,0 | - |

Tabelle 6.5 Versuchsprogramm KHP-Proben, Klebstoff PUR

| Klebstoff EP | | Probengeometrie | | |
|----------------|-----------------|--|---------------------------------------|-----------------|
| Versuchsreihe | Anzahl Versuche | KHP-Geometrie | Überlappungslänge $L_{\ddot{u}}$ [mm] | Besonderheit |
| E/A/0,5 | 5 | Innenbauteil: 42,4 / 5,0 mm | 22,5 | - |
| E/A/1,0 | 5 | Außenbauteil: 60,3 / 6,5 mm | 45,0 | - |
| E/A/1,5 | 5 | | 67,5 | - |
| E/B/0,5 | 5 | Innenbauteil: 42,4 / 4,5 mm Außenbauteil: 70,0 / 8,0 mm | 23,5 | - |
| E/C/0,25 | 5 | | 27,0 | - |
| E/C/0,25/T | 5 | Innenbauteil: 101,6 / 3,6 mm | 27,0 | + Temperprozess |
| E/C/0,25/E0,2 | 3 | Außenbauteil: 114,3 / 3,6 mm | 27,0 | Exzentrizität |
| E/C/0,25/E0,5 | 3 | | 27,0 | Exzentrizität |
| E/C/0,25/S0,75 | 3 | | 27,0 | Schiefstellung |
| E/C/0,25/E1,50 | 3 | | 27,0 | Schiefstellung |

Tabelle 6.6 Versuchsprogramm KHP-Proben, Klebstoff EP

Alle im Rahmen dieser Arbeit dokumentierten eigenen Versuche an geklebten Kreishohlprofilverbindungen werden an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsreihen mit den Kreishohlprofilkonfigurationen C und D stammen hierbei von eigenen Forschungsarbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes P884 (ALBIEZ ET AL. 2013; UMMENHOFER ET AL. 2015). Diese Untersuchungen werden in der vorliegenden Arbeit durch die Untersuchungen der Kreishohlprofilkonfigurationen A und B erweitert.

6.3.2 Klebtechnische Fertigung der Rohrproben

Von besonderer Bedeutung bei geklebten Verbindungen ist der Fertigungsprozess. Die klebtechnische Fertigung der in dieser Arbeit untersuchten Kreishohlprofilproben ist nachfolgend dargestellt.

Zunächst werden die zu klebenden Oberflächen der KHP-Abschnitte nach der Fertigung der Lasteinleitungsbohrungen (Konf. A, B und C) bzw. dem Anschweißen der Lasteinleitungskopffplatten (Konf. D) definiert vorbehandelt. Hierzu erfolgt zunächst eine Reinigung der Klebflächen mit Methylethylketon (MEK). Dieser Reinigungsvorgang vor dem Strahlprozess verhindert ein Eindringen von Verunreinigungen in die Stahloberfläche (HABENICHT 2009). Im zweiten Schritt werden die Kreishohlprofile mit Edelmetallpulver der Siebung F100 (106 – 150 μm) auf die Oberflächengüte Sa 3 nach (DIN EN ISO 8501-1) gestrahlt und anschließend nochmals mit Methylethylketon gereinigt.

Die klebtechnische Verbindung der überlappenden KHP-Abschnitte erfolgt durch Injektion des Klebstoffs in den zylindrischen Fügespalt. Dieses Fertigungsprinzip basiert auf den in (SIEBERT 2006) erarbeiteten Kenntnissen zur Injektionsklebung kleinteiliger Rohrelemente bei Geländern oder Treppenläufen. Im Rahmen des Forschungsprojektes P884 (UMMENHOFER ET AL. 2015) wird das Verfahren für Anwendungen und Bauteildimensionen des konstruktiven Stahlbaus mit Hilfe von Strömungssimulationen und Füllversuchen erweitert. Dabei erfolgt die Abdichtung der seitlichen Klebspaltenden über ein Fugendichtband. Dieses einseitig selbstklebende Band ist vorkomprimiert auf Rollen erhältlich und weist für die Abdichtung der Klebspaltenden drei wesentliche Vorteile auf. Zunächst kann das einseitig selbstklebende Fugenband leicht auf dem Innenbauteil zur Sicherstellung einer definierten Klebfugenlänge angebracht werden. Zum anderen ermöglicht die infolge der Komprimierung geringe Höhe des Fugenbandes ein leichtes Ineinanderstecken der Fügeteile. In kurzer Zeit dehnt sich das vorkomprimierte Band dann zu einem offenporösen Weichschaum aus, der die gesamte Klebspaltendicke abdichtet. Die Expansionsgeschwindigkeit des Fugenbandes hängt von der Temperatur ab und kann somit beispielsweise durch die lokale Verwendung eines Heißluftföhns beschleunigt

werden. Insbesondere weist das Weichschaumfugenband den Vorteil auf, dass es ein seitliches Austreten des Klebstoffs verhindert, Lufteinschlüsse jedoch aufgrund der Porosität des Fugenbandes austreten können. Umfangreiche Untersuchungen zeigen, dass der zylindrische Klebspalt somit quasi ohne Lufteinschlüsse gefüllt werden kann (UMMENHOFER ET AL. 2015).

Zur Vermeidung unplanmäßiger Ausmitten und Schiefstellungen wird eine aus Polyethylen-Halbschalen bestehende Fertigungsvorrichtung entwickelt (siehe Abbildung 6.9) (ALBIEZ ET AL. 2013). Die Verwendung von zwei Halbschalen pro Rohr ermöglicht eine Ausrichtung der Bauteile auf einer Höhenlinie und verhindert damit eine exzentrische Klebung. Darüber hinaus erlaubt die gezielte Erhöhung einzelner Halbschalen, Kreishohlprofilproben mit definiert eingebrachten Fertigungsimperfectionen herzustellen.

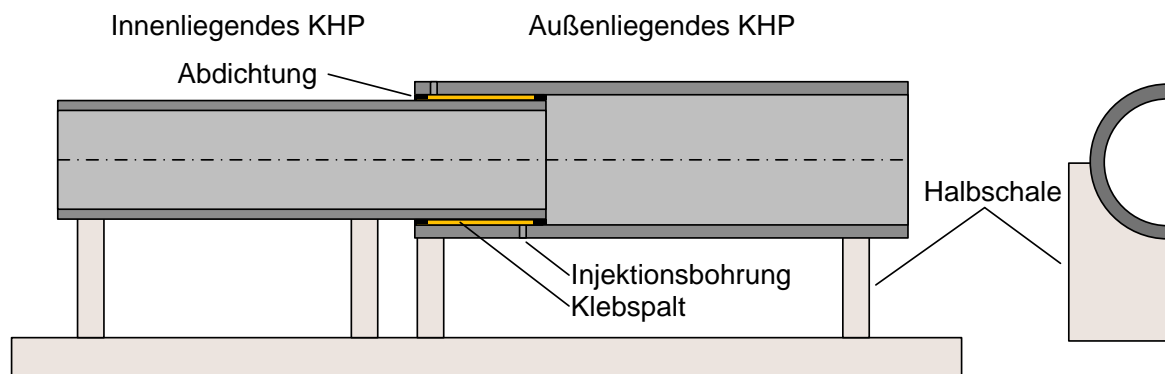
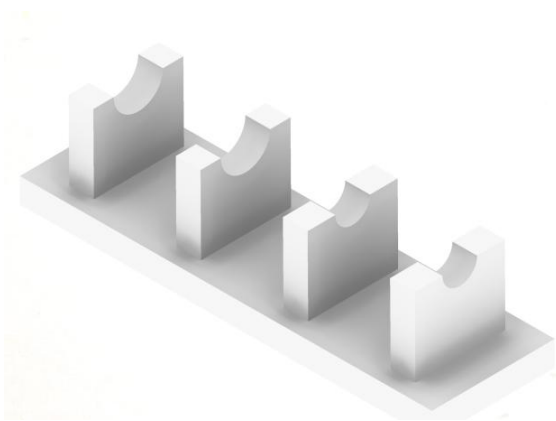


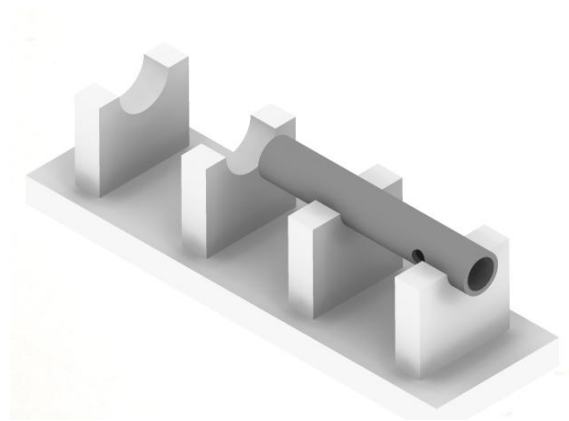
Abbildung 6.9 Vorrichtung zur Fertigung der Rohrproben nach (ALBIEZ ET AL. 2013)

Die einzelnen Arbeitsschritte der klebtechnischen Fertigung der Kreishohlprofilproben sind in Abbildung 6.10 zusammengefasst.

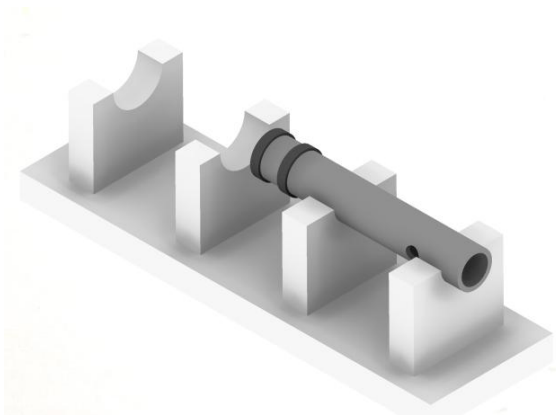
- Zunächst wird das Innenbauteil in die beschriebene Fertigungsvorrichtung eingelegt (*Schritte A und B*) sowie das einseitig selbstklebende Fugenband angebracht (*Schritt C*).
- Anschließend wird das außenliegende Kreishohlprofil in die Halbschalen eingelegt und kann aufgrund des noch komprimierten Fugendichtbandes auf das innenliegende Kreishohlprofil aufgeschoben werden (*Schritt D*).
- Nach der Expansion des Fugenbandes kann mit Hilfe einer manuell bedienbaren Kartuschenspritze der Klebstoff durch die an der Unterseite des äußeren Bauteils angebrachte Bohrung in den Klebspalt injiziert werden (*Schritt E*). Der Injektionsprozess ist bei Austritt des Klebstoffs an der Bohrung an der Oberseite des Außenrohres erkennbar abgeschlossen. Um Fehlstellen infolge nachlaufenden Klebstoffs zu vermeiden, erfolgt eine Überdosierung in den an der Rohroberseite angebrachten Steiger (*siehe Schritt F*). Die Einlassöffnung wird mit Klebeband dichtend verschlossen.



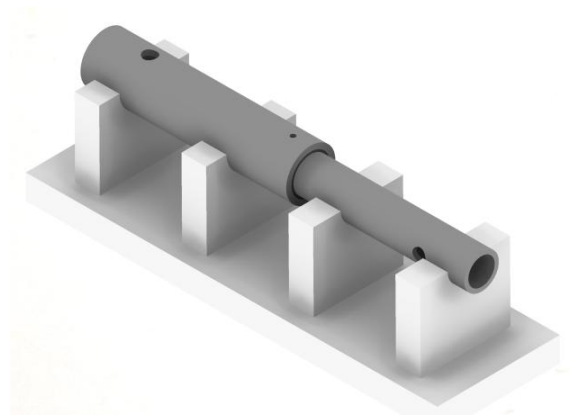
A) Bereitstellung der Fertigungsvorrichtung aus Halbschalen



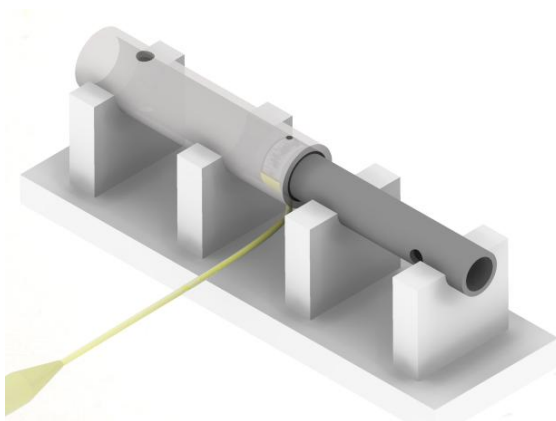
B) Einlegen des Innenrohres in die Fertigungsvorrichtung



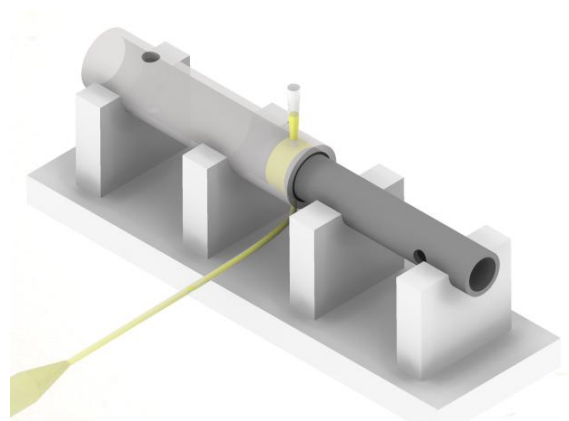
C) Anbringen des selbstklebenden, porösen Fugendichtbandes



D) Einlegen des Außenrohres in die Halbschalen und Aufschieben auf das Innenrohr



E) Applikation des Klebstoffs durch Injektion in den zylindrischen Fügespalt



F) Klebstoffinjektion abgeschlossen bei Austritt des Klebstoffs in einen Steiger

Abbildung 6.10 Klebtechnische Fertigung der Rohrproben; exemplarische Darstellung: KHP-Probe P/A/0,5

Die Fertigung der Kreishohlprofilkonfiguration D weicht aus verschiedenen Gründen von der dargestellten Methodik ab. Zunächst weisen beide Fügeteile identische Außendurchmesser auf. Dadurch ist die Verwendung von Halbschalen entbehrlich, lediglich eine Ausrichtung und Zentrierung der Fügeteilpartner muss sichergestellt werden. Dies wird durch U-Schienen, die beidseitig mit Schwerlast-Schraubzwingen an den Probekörpern befestigt werden, erreicht. Aufgrund der hohen Gesamtmasse von Hohlprofilen und Lasteinleitungsplatten stellt die Fixierung mit U-Schienen weiterhin einen versteifenden Schutz der geklebten Probe während des Transportvorgangs zwischen Fertigung und Prüfung dar. Die Klebstoffinjektion erfolgt aufgrund der erforderlichen größeren Volumina mit Hilfe eines pneumatischen Druckgefäßes, von dem der Klebstoff über einen Schlauch in den Klebspalt eingebracht wird. Während des Injektionsprozesses wird mit Hilfe einer endoskopischen Kamera die Dichtheit der aufgrund der aufgeschweißten Kopfplatten nicht mehr zugänglichen Klebspaltenden überwacht. Die Großbauteilproben der Konfiguration D nach Abschluss der Klebstoffinjektion zeigt Abbildung 6.11. Zu sehen sind die beiden Fügeteile mit an den Enden angeschweißten Kopfplatten sowie die ausrichtenden U-Schienen. An den Probenoberseiten sind Eurokartuschen als Überlaufgefäß eingeschraubt. Die Injektionsschläuche an der Hohlprofilunterseite sind zur Veranschaulichung des abgeschlossenen Fertigungsvorgangs mit einem Kabelbinder abgeklemmt. Nach Rücksprache mit den Klebstoffherstellern werden alle Proben frühestens nach einer Aushärtung von 28 Tagen bei Raumtemperatur geprüft.



Abbildung 6.11 Klebtechnische Fertigung der Großrohrproben Konfiguration D

6.3.3 Vermessung der Klebschichtgeometrie

Sowohl warmgefertigte Kreishohlprofile als auch Stahlgussbauteile weisen, wie in Kapitel 3 beschrieben, Herstellungsimperfektionen auf. Maßtoleranzen wie Ovalität, vom Sollmaß abweichende Außendurchmesser oder eine Variation der Wanddicke über den Kreishohlprofilumfang beeinflussen bei zylindrischen Überlappungsklebungen die resultierende Klebspaltdicke. Aus diesem Grund werden die Fügespaltdicken aller KHP-Proben vor der Prüfung vermessen. Dies geschieht durch Subtraktion der gemessenen Wanddicke t_a des Außenbauteils von der in Abbildung 6.12 erläuterten Messhöhe h_i . Diese Messungen werden in Umfangsrichtung an vier Positionen vorgenommen (siehe Abbildung 6.12).

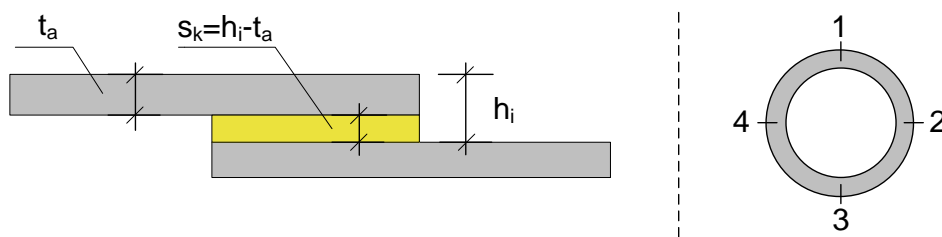


Abbildung 6.12 Vermessung der Klebschichtdicke (links); Messpositionen in Umfangsrichtung (rechts)

Die prozentuale Abweichung der gemessenen Klebschichtdicke im Verhältnis zu dem sich aus nominellen Profilabmessungen ergebenden nominellen Spaltmaß lässt sich durch Bildung des Quotienten beider Werte bestimmen. Die statistische Auswertung erfolgt nachfolgend separat für jede der untersuchten KHP-Konfigurationen A bis D und ist in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Dabei wird auf der Abszissenachse die prozentuale Abweichung des gemessenen Spaltmaßes, in fünf Prozent-Schritten unterteilt, aufgetragen. Auf der Ordinatenachse ist die relative Häufigkeit der im Bereich der jeweiligen prozentualen Abweichung bestimmten Messergebnisse dargestellt. Weiterhin werden die Messdaten der Konfigurationen A, B, C und D unter Verwendung einer Gaußschen Kurvenanpassung angenähert.

Zunächst veranschaulicht Abbildung 6.13-A, dass etwa 72 % der vermessenen Klebspalte der Konfiguration A (Sollwert 2,5 mm) weniger als $\pm 12,5$ % vom nominellen Spaltmaß abweichen. Die Gaußsche Kurvenanpassung weist einen leicht in den Bereich negativer Abweichungen verschobenen Mittelwert auf (MW = -3,1 %). Dies kann z. B. auf das Herstellverfahren warmgefertigter Kreishohlprofile und die daraus resultierenden, über den nominellen Werten liegenden tatsächlichen Wanddicken zurückgeführt werden. Die geschätzte Standardabweichung der Spaltmaßdeviation der Konfiguration A liegt bei 10,1 %. Gemäß den technischen Lieferbedingungen für warmgefertigte Kreishohlprofile (DIN EN 10210-2) sind Maßtoleranzen zulässig, die zu einer Abweichung des Klebspaltes

der Konfiguration A von maximal 36 % führen können (siehe Abschnitt 3). Kein Messergebnis überschreitet diesen Grenzwert.

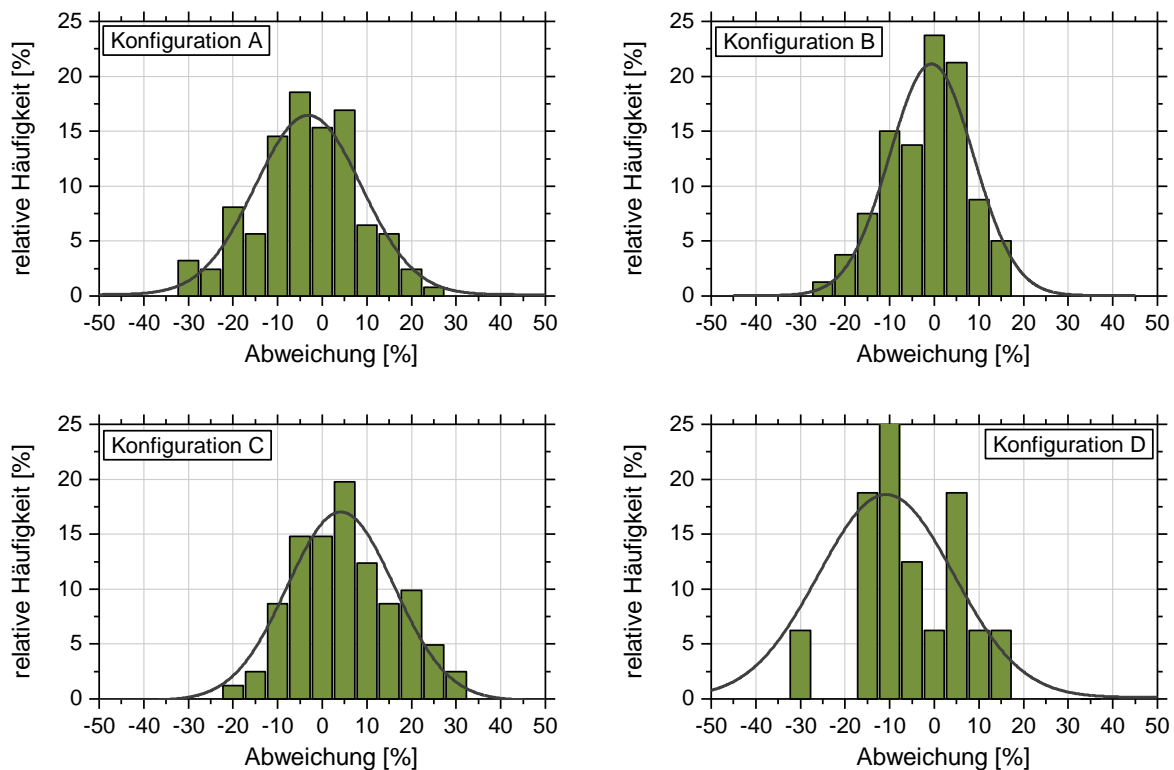


Abbildung 6.13 Konfigurationen A, B, C und D: Auswertung der Abweichung von gemessener Klebschichtdicke bezogen auf das nominelle Spaltmaß

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei Auswertung der Messergebnisse der Kreishohlprofilkonfiguration B (nominelles Spaltmaß 5,8 mm), dargestellt in Abbildung 6.13-B. Etwa 82 % der vermessenen Spaltmaße weichen weniger als $\pm 12,5$ % (entspricht bei Konfiguration B: max. 0,7 mm) von der nominellen Klebspaltdicke ab. Dieser im Vergleich mit Konfiguration A etwas größere prozentuale Anteil kann mit der auf die Klebspaltdicke bezogenen Auswertung erklärt werden (A: 2,5 mm, B: 5,8 mm). Ähnlich der Konfiguration A weist auch die Gaußsche Kurvenanpassung der Konfiguration B eine geringe Mittelwertverschiebung in den Bereich negativer Spaltabweichungen, d.h. dünnerer Klebschichten, auf (MW = -0,6 %). Die geschätzte Standardabweichung der Spaltmaßdeviation bei Konfiguration B beträgt 8,0 %. Ein Vergleich mit der auf Basis der normativen Grenzabmessungen maximal möglichen Abweichung der Klebspaltdicke (Konfiguration B: ca. 19 %) zeigt, dass dieses Grenzmaß durch drei von 80 Messergebnissen leicht überschritten wird.

Bei Kreishohlprofilkonfiguration C (Sollspaltdicke 2,8 mm) liegt der Mittelwert der Spaltabweichungen etwas im positiven Bereich (Abbildung 6.13-C). Im Mittel ist der Klebspalt der Konfiguration C 4,1 % größer als das sich aus den nominellen Kreishohlprofilabmessungen ergebende Spaltmaß. Zu beachten ist an dieser Stelle jedoch, dass diese Mittel-

wertdeviation in der Größenordnung eines Zehntel Millimeters liegt. Etwa 70 % der Messergebnisse weichen weniger als $\pm 12,5\%$ von der nominellen Schichtdicke ab. Die Standardabweichung der Spaltmaßdeviation unter Annahme normalverteilter Messergebnisse beträgt 10,2 %. Nicht überschritten wird die durch die normativ zulässigen Maßtoleranzen der Fügeteile (Abschnitt 3) maximal mögliche Spaltmaßabweichung (Konfiguration C: 32 %).

Die Klebschichtdicken der Großbauteilproben der Konfiguration D sind im Mittel geringer als die nominellen Spaltmaße (MW = -10,8 %) bei einer Standardabweichung von 12,9 %. Innerhalb einer prozentualen Abweichung von $\pm 12,5\%$ von der nominellen Schichtdicke liegen ca. 70 % der Messergebnisse (Abbildung 6.13-D).

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass bei allen in dieser Arbeit untersuchten Kreishohlprofilkonfigurationen mehr als 70 % der vermessenen Klebspalte weniger als $\pm 12,5\%$ von der nominellen Schichtdicke abweichen. In der Regel ist der Mittelwert der Maßabweichung negativ, d.h. die tatsächliche Klebschicht ist dünner als aus den tabellierten Profilwerten berechnet. Wesentlich ist zudem die Erkenntnis, dass die infolge normativ zulässiger Maßtoleranzen maximalen Spaltmaßdeviationen lediglich von 1 % aller Einzelmessergebnisse erreicht bzw. leicht überschritten werden.

6.4 Experimentelle Prüfung der Kreishohlprofilproben

Die quasi-statische Prüfung der axialen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilproben wird aufgrund der großen Spanne der Traglasten der verschiedenen Konfigurationen auf verschiedenen Prüfmaschinen der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des KIT durchgeführt. Die Versuche der Konfigurationen A, B und C finden auf einer servohydraulischen Instron Prüfmaschine statt. Diese Maschine verfügt über eine maximale statische Prüfkraft von 250 kN. Die Steuerung der Prüfmaschine erfolgt über die Maschinenregelsoftware *MessTek Dyn.Reg Vers. 10.0*, die Messdaten Maschinenkraft und Maschinenweg werden von der Datenerfassungssoftware *MessTek DAQ Vers. 10.0* aufgezeichnet. Die Prüfmaschine ist über den gesamten Kraftbereich für die Genauigkeitsklasse 1 nach (DIN EN ISO 7500-1) kalibriert.

Die Großbauteilproben der Konfiguration D werden auf der servohydraulischen MFL Prüfmaschine der Versuchsanstalt durchgeführt. Diese Prüfmaschine weist eine maximale statische Prüfkraft von 3000 kN auf. Die Steuerung der Prüfmaschine sowie die Datenerfassung erfolgen mit Hilfe der oben beschriebenen Software der Firma *MessTek*. Im Kraftbereich von 50 - 2000 kN ist die MFL-Prüfmaschine für die Genauigkeitsklasse 1 nach (DIN EN ISO 7500-1) kalibriert. Exemplarisch ist in Abbildung 6.14 die Prüfung einer

Probe der Kreishohlprofilkonfiguration C in der 250 kN INSTRON-Prüfmaschine dargestellt. Abbildung 6.15 zeigt die Prüfung einer Probe der Konfiguration D in der 3000 kN MFL-Prüfmaschine.



Abbildung 6.14 Prüfung KHP-Konfiguration C

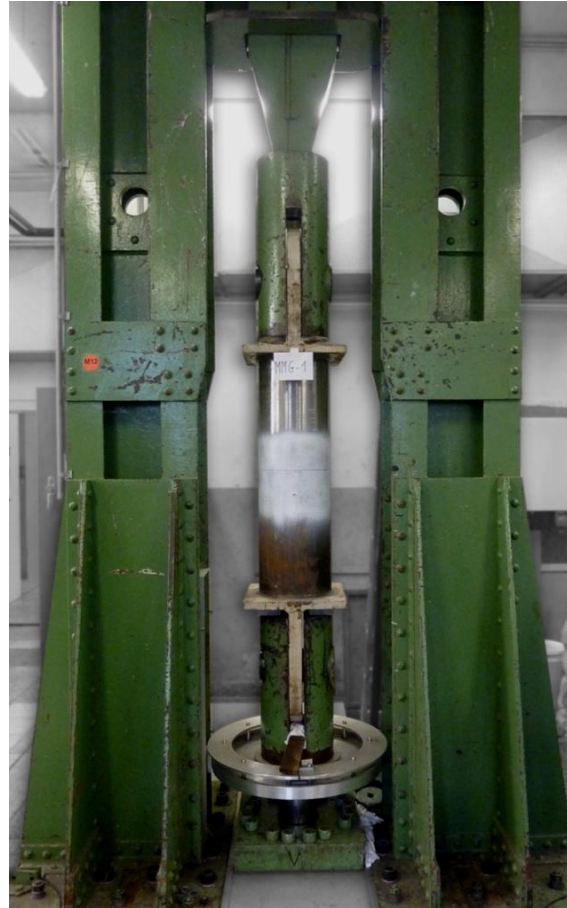


Abbildung 6.15 Prüfung KHP-Konfiguration D

Die Prüfkraft wird aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchbarkeiten der Stahlhohlprofilquerschnitte über verschiedene Lasteinleitungsstrukturen in die Probekörper eingebracht. Bei Konfiguration A und B erfolgt die Anbindung der Proben durch eine gabelförmige Lasteinleitungsanordnung mit einem Bolzen ($D = 20 \text{ mm}$) in der Durchgangsbohrung an den Probenenden. Die Lasteinleitungsanordnung schließlich wird mit den hydraulischen Spannköpfen der Prüfmaschine verbunden. Zur Vermeidung unplanmäßiger Einspannmomente wird die Position des Lasteinleitungsbolzens am außenliegenden Kreishohlprofil um 90° zur Bohrung am innenliegenden Bauteil versetzt. Hierdurch wird eine gelenkige Lagerung der Bauteile um zwei aufeinander rechtwinklig stehende Achsen erreicht (Abbildung 6.17). Die Rohrproben der Konfiguration C weisen aus Gründen der Handhabbarkeit (Transport ohne Kran) eine geringere Wanddicke und folglich auch eine geringere Lochleibungsbeanspruchbarkeit auf. Zur Vermeidung eines Versagens in den Lasteinleitungsbereichen werden vier versetzt angeordnete Bolzen

($D = 20 \text{ mm}$) je Lasteinleitung verwendet. Die zuvor beschriebene gelenkige Lagerung wird durch die Verwendung einer Lasteinleitungsmuffe mit eingeschweißtem Flachblech erreicht (Abbildung 6.17). Die Muffe weist die gleiche Bohrungsgeometrie wie die Hohlprofilproben auf und kann somit mit Hilfe der Bolzen leicht verbunden werden. Das in die Muffe eingeschweißte Flachblech wird in eine gabelartige Lasteinleitungsvorrichtung eingesteckt und mit einem Gelenkbolzen ($D = 36 \text{ mm}$) gelenkig verbunden (Abbildung 6.17). Die gabelartige Lasteinleitungsvorrichtung ist schließlich mit den hydraulischen Spannköpfen der Prüfmaschine verbunden. Sowohl für die Lasteinleitungs-konstruktion der Konfigurationen A und B als auch für die Konstruktion der Konfiguration C zeigen mit dem Programm ANSYS Workbench 15.0 durchgeführte numerische Berechnungen, dass in den geklebten Überlappungsbereichen der Stahlhohlprofile trotz der punktuellen Lasteinleitungen eine über den Hohlprofilumfang homogene Spannungsverteilung vorhanden ist. Für die numerischen Berechnungen wird eine bilineare Spannungs-Dehnungsbeziehung mit den Kennwerten der Baustähle S235 bzw. S355 nach (DIN EN 10210-1) verwendet. In Abbildung 6.16 ist exemplarisch die Normalspannung (z-Richtung) infolge einer axial aufgetragenen Kraft von 250 kN im Kreishohlprofil $D / t = 101,6 / 3,6 \text{ mm}$ der Konfiguration C dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Bereich der Lasteinleitungsbohrungen Spannungskonzentrationen vorliegen, die Spannungsverteilung im Bereich der Klebung jedoch homogen ist.

Typ: Normalspannung(Z-Achse)
 Einheit: MPa
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 1

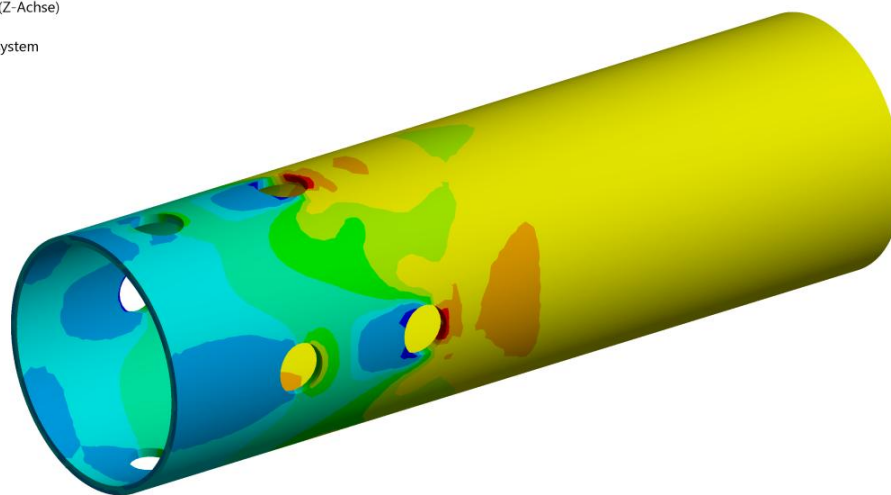
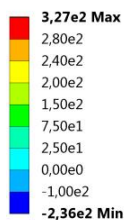
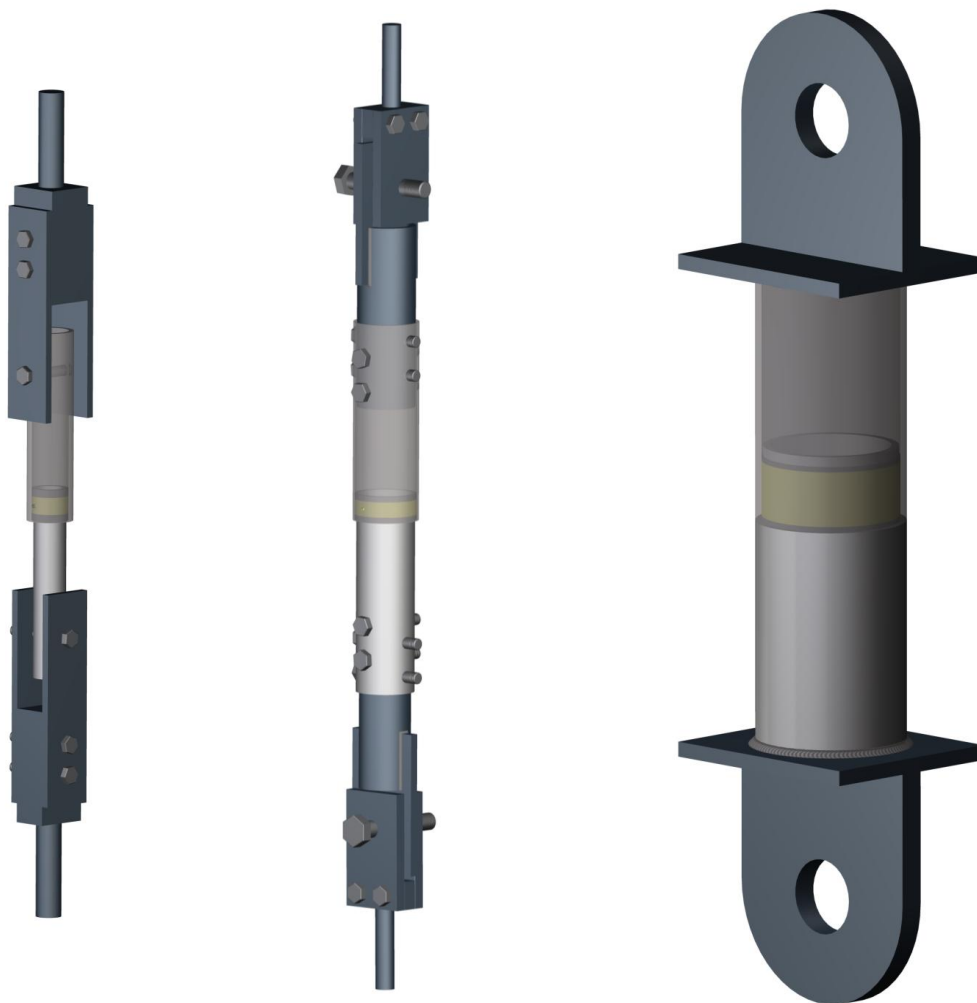


Abbildung 6.16 Normalspannungen (z-Achse) im Innenrohr der Konfiguration C

Aufgrund der großen Prüfkräfte kann bei KHP-Konfiguration D keine Anbindung der Proben über Scher-Lochleibungsverbindungen realisiert werden. Aus diesem Grund wird die Zugkraft über angeschweißte Kopfplatten eingeleitet (siehe auch Abbildung 6.15). Eine Übersicht über die drei verschiedenen Lasteinleitungs-konstruktionen ist in Abbildung 6.17 dargestellt.



Konfigurationen A/B

Konfiguration C

Konfiguration D

Abbildung 6.17 Übersicht Lasteinleitungsstrukturen bei den KHP-Konfigurationen A, B, C und D (Darstellung nicht maßstäblich)

Alle Proben werden weggeregelt mit konstanter Traversengeschwindigkeit geprüft. Für die Klebschichtdicke 2,5 mm der Konfigurationen A und D beträgt die Prüfgeschwindigkeit 0,50 mm/min. Das Ziel einer vergleichbaren Gleitrate bei unterschiedlichen Klebschichtdicken ergibt für die Schichtdicke 2,8 mm (Konfiguration C) eine Prüfgeschwindigkeit von 0,56 mm/min. Die Kreishohlprofilproben der Konfiguration B (Klebschichtdicke 5,8 mm) werden folglich mit einer Geschwindigkeit 1,16 mm/min Maschinenwegzunahme geprüft.

Zur Erfassung der Lokalverformung im Bereich der Klebung wird ein optisches 3D-Messsystem der Fa. LIMESS Messtechnik und Software GmbH eingesetzt. Die berührungslose Verformungsmessung erfolgt hierbei über das Verfahren der digitalen Bildkorrelation. Hierzu sind zwei Kameras stereoskopisch um einen Probekörper angeordnet. Der Probekörper ist im Überlappungsbereich mit einem Grauwertmuster versehen. Die

einzelnen Grauwerte werden von den digitalen Kameras erkannt und die Verformung dieser Messpunkte wird während der Versuchsdurchführung aufgezeichnet. Die Software ISTR4D der Fa. LIMESS wertet die stereoskopischen Bildsequenzen aus und errechnet die dreidimensionalen Verformungen der Probekörperoberfläche an jedem Pixel des Kamerabildes (SCHREIER UND LICHTENBERGER 2003). Die digitalen Kameras zeichnen in Abhängigkeit von der Größe des gewählten Bildausschnittes mit einer Frequenz von ein bis zwei Bildern pro Sekunde auf. Während der Versuchsdurchführung wird das Kraftsignal der Prüfmaschine in die Software des optischen Messsystems importiert, so dass eine direkte Korrelation zwischen Maschinenkraft und gemessener Verformung hergestellt werden kann.

Zur Berechnung der Lokalverformung wird mit Hilfe der Auswertungssoftware jeweils ein Messpunkt auf die beiden Kreishohlprofile im Abstand von 10 mm vom KHP-Übergang gesetzt. Die Lokalverformung ergibt sich aus der Differenz der lokalen x -Koordinaten der beiden Messpunkte für jedes aufgezeichnete Bild. Die Anfangsmesslänge beträgt folglich 20 mm.

6.5 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

6.5.1 Ergebnisse Klebstoff PUR

Während der Versuchsdurchführung werden Maschinenkraft, Maschinenweg sowie die Lokalverformung zwischen den Kreishohlprofilen mit Hilfe des oben beschriebenen optischen Messsystems bis zum Bruch der Probe aufgezeichnet. Für alle geklebten KHP-Proben zeigt sich bei zunehmender axialer Verformung ein nahezu linearer Anstieg der Traglast. Die geklebte KHP-Verbindung versagt stets spröde. Deutlich hervorgehoben sei die Reproduzierbarkeit des beschriebenen Last-Verformungsverhaltens, das für alle untersuchten Proben dokumentiert werden kann. Aufgrund der Vergleichbarkeit wird nachfolgend exemplarisch für jede KHP-Konfiguration jeweils ein Last-Verformungsverlauf in Abbildung 6.18 gezeigt und auf eine Darstellung aller gemessenen Verläufe verzichtet. Das Versagen der Klebverbindung ist mit einem Andreaskreuz gekennzeichnet. Im Zuge der Auswertung wird das Messrauschen durch eine Kurvenglättung mit quadratischem Ansatz reduziert.

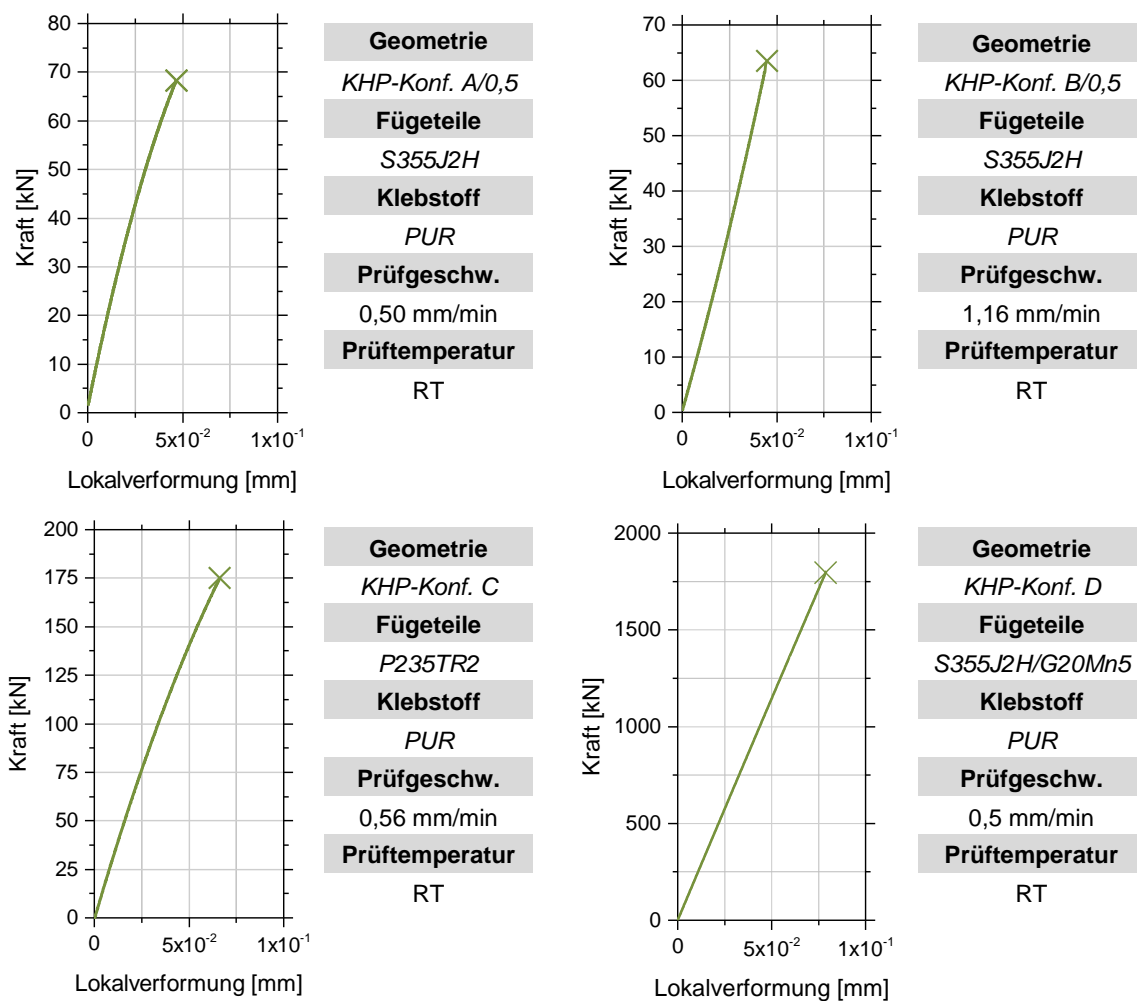


Abbildung 6.18 Exemplarische Last-Verformungs-Kurven der KHP-Konfigurationen A bis D; Klebstoff PUR

Aus den Last-Verformungskurven werden die Bruchlasten aller Versuche ausgewertet und nachfolgend in tabellarischer Form zusammengefasst. Die Tabellen enthalten neben der Bruchlast die Probekörperbezeichnung sowie die wesentlichen geometrischen Abmessungen von Füge­teilen und Klebschicht. Zudem wird zunächst zum Ergebnisvergleich auf dem Niveau von Nennspannungen die aus der Bruchlast berechenbare Schubspannung am Innenbauteil im Überlappungsbereich der Klebung nach Gl. 4.1 bestimmt.

$$\tau_{\text{Nenn}} = \frac{F_{\text{max}}}{\pi \cdot D_i \cdot L_{\text{ü}}} \quad \text{Gl. 6.1}$$

Für jede Versuchsserie sind Mittelwerte (MW) sowie die Schätzwerte der Standardabweichungen (SD) unter Annahme einer Normalverteilung der Bruchlasten sowie der daraus abgeleiteten Nennschubspannungen berechnet. Aufgrund der großen Anzahl an experimentellen Ergebnissen werden diese nach der KHP-Konfiguration gruppiert.

Zunächst sind in Tabelle 6.7 die Ergebnisse der KHP-Proben der Konfiguration A zusammengefasst. Die Überlappungslänge stellt den zu variierenden geometrischen Parameter dieser Konfiguration dar (0,5, 1,0, sowie 1,5·D_{k,m}). Die Versuchsergebnisse zeigen zunächst, dass die Tragfähigkeit mit zunehmendem Überlapp ansteigt. Es ist jedoch eine unterproportionale Steigerung der Bruchlast festzuhalten. Eine detaillierte Diskussion dieser Ergebnisse in Kombination mit den numerischen Analysen folgt in Abschnitt 6.7.

Versuchsreihen P / A

| Probekörper | Probekörpergeometrie | Klebschichtdicke [mm] | Überlappungslänge [mm] | Bruchlast [kN] | | Nennschubspannung [MPa] | |
|-------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|--------------|-------------------------|-------------|
| P/A/0,5/1 | | | 22,5 mm | 69,5 | <i>MW</i> | 23,2 | <i>MW</i> |
| P/A/0,5/2 | | | | 86,8 | 73,3 | 29,0 | 24,4 |
| P/A/0,5/3 | | | | 55,3 | | 18,5 | |
| P/A/0,5/4 | | | | 79,8 | <i>SD</i> | 26,3 | <i>SD</i> |
| P/A/0,5/5 | | | | 74,9 | 11,9 | 25,0 | 4,0 |
| P/A/1,0/1 | Innenbauteil: 42,4 / 5,0 mm | 2,5 mm | 45,0 mm | 106,1 | <i>MW</i> | 17,7 | <i>MW</i> |
| P/A/1,0/2 | | | | 129,4 | 127,6 | 21,6 | 21,3 |
| P/A/1,0/3 | | | | 136,3 | | 22,7 | |
| P/A/1,0/4 | Außenbauteil: 60,3 / 6,5 mm | | | 140,7 | <i>SD</i> | 23,5 | <i>SD</i> |
| P/A/1,0/5 | | | | 125,5 | 13,4 | 20,9 | 2,2 |
| P/A/1,5/1 | | | 67,5 mm | 188,9 | <i>MW</i> | 21,0 | <i>MW</i> |
| P/A/1,5/2 | | | | 187,7 | 185,9 | 20,9 | 20,7 |
| P/A/1,5/3 | | | | 180,7 | | 20,1 | |
| P/A/1,5/4 | | | | 188,9 | <i>SD</i> | 21,0 | <i>SD</i> |
| P/A/1,5/5 | | | | 183,3 | 3,7 | 20,4 | 0,4 |

Tabelle 6.7 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von KHP-Verbindungen der Konfiguration A; Klebstoff PUR

Versuchsreihe P / B

| Probekörper | Probekörpergeometrie | Klebschichtdicke [mm] | Überlappungslänge [mm] | Bruchlast [kN] | | Nennschubspannung [MPa] | |
|-------------|--|-----------------------|------------------------|----------------|------|-------------------------|------|
| | | | | | | | |
| P/B/0,5/1 | Innenbauteil: 42,4 / 5,0 mm Außenbauteil: 70,0 / 8,0 mm | 5,8 mm | 23,5 mm | 63,9 | MW | 20,0 | MW |
| P/B/0,5/2 | | | | 45,3 | 57,5 | 14,2 | 18,0 |
| P/B/0,5/3 | | | | 66,0 | | 20,6 | |
| P/B/0,5/4 | | | | 54,1 | SD | 16,9 | SD |
| P/B/0,5/5 | | | | 58,2 | 8,3 | 18,2 | 2,6 |

Tabelle 6.8 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von KHP-Verbindungen der Konfiguration P/B

Versuchsreihe P / C

| Probekörper | Probekörpergeometrie | Klebschichtdicke [mm] | Überlappungslänge [mm] | Bruchlast [kN] | | Nennschubspannung [MPa] | |
|------------------|---|-----------------------|------------------------|----------------|-------|-------------------------|------|
| | | | | | | | |
| P/C/0,25/1 | Innenbauteil: 101,6 / 3,6 mm | 2,8 mm | 27,0 mm | 175,0 | MW | 20,5 | MW |
| P/C/0,25/2 | | | | 174,7 | 185,4 | 20,4 | 21,7 |
| P/C/0,25/3 | | | | 173,1 | | 20,2 | |
| P/C/0,25/4 | | | | 187,1 | SD | 21,9 | SD |
| P/C/0,25/5 | | | | 216,9 | 18,5 | 25,4 | 2,2 |
| P/C/0,25/1/T | Außenbauteil: 114,3 / 3,6 mm | | | 156,7 | MW | 18,3 | MW |
| P/C/0,25/2/T | | | | 207,3 | 189,4 | 24,2 | 22,1 |
| P/C/0,25/3/T | | | | 172,9 | | 20,2 | |
| P/C/0,25/4/T | | | | 189,1 | SD | 22,1 | SD |
| P/C/0,25/5/T | | | | 221,1 | 25,8 | 25,8 | 3,0 |
| P/C/0,25/1/E0,2 | + Ausmitte der Schwerelinien $E = 0,2 \cdot s_k$ | 2,6 mm | 178,0 | MW | 20,8 | MW | |
| P/C/0,25/2/E0,2 | | - | 178,4 | 186,1 | 20,9 | 21,8 | |
| P/C/0,25/3/E0,2 | | 3,0 mm | 202,0 | SD | 23,6 | SD | |
| P/C/0,25/1/E0,5 | + Ausmitte der Schwerelinien $E = 0,5 \cdot s_k$ | 2,3 mm | 174,6 | MW | 20,4 | MW | |
| P/C/0,25/2/E0,5 | | - | 156,7 | 163,8 | 18,3 | 19,1 | |
| P/C/0,25/3/E0,5 | | 3,3 mm | 160,1 | SD | 18,7 | SD | |
| P/C/0,25/1/S0,75 | + Schiefstellung 0,75° | 2,6 mm | 181,5 | MW | 21,2 | MW | |
| P/C/0,25/2/S0,75 | | - | 187,5 | 182,2 | 21,9 | 21,3 | |
| P/C/0,25/3/S0,75 | | 3,0 mm | 177,6 | SD | 20,8 | SD | |
| P/C/0,25/1/S1,50 | + Schiefstellung 1,50° | 2,4 mm | 145,6 | MW | 17,0 | MW | |
| P/C/0,25/2/S1,50 | | - | 184,5 | 163,3 | 21,6 | 19,1 | |
| P/C/0,25/3/S1,50 | | 3,2 mm | 159,8 | SD | 18,7 | SD | |
| | | | | 19,7 | | 2,3 | |

Tabelle 6.9 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von KHP-Verbindungen der Konfiguration P/C

In Tabelle 6.8 sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der KHP-Konfiguration B zusammengefasst. Diese unterscheidet sich von der Serie A/0,5 im Wesentlichen durch die größere Klebspaltdicke (Faktor 2,3) bei vergleichbarer Überlappungslänge und Innenrohrquerschnitt. Es zeigt sich, dass die Tragfähigkeit bei der größeren Schichtdicke im Mittel auf 74 % abnimmt. Diskussion und Analyse der genannten sowie der folgenden Ergebnisse sind Inhalt von Abschnitt 6.7.

Die experimentellen Ergebnisse der Konfiguration C (Tabelle 6.9) quantifizieren den Einfluss der geometrischen Imperfektionen Ausmitte der Schwerelinie und Schiefstellung auf die Verbindungstragfähigkeit. Es wird deutlich, dass die geklebte Verbindung zunächst tolerant gegenüber den betrachteten Imperfektionen ist. Große geometrische Abweichungen reduzieren die Tragfähigkeit um maximal 12 %. Ein zusätzlicher Temperprozess führt zu größeren Streuungen der Tragfähigkeit.

Tabelle 6.10 fasst die Ergebnisse der Großbauteilversuche der Konfiguration D ($D = 298,5 \text{ mm}$) zusammen. Diese weisen bei einer Überlappungslänge von 110 mm ($0,4 \cdot D_{k,m}$) hohe Bruchlasten bei geringer Streuung auf ($1.836,0 \pm 95,6 \text{ kN}$).

Versuchsreihe P / D

| Probekörper | Probekörpergeometrie | Klebschichtdicke [mm] | Überlappungslänge [mm] | Bruchlast [kN] | | Nennschubspannung [MPa] | |
|-------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------|---------------|-------------------------|-------------|
| P/D/0,4/1 | Innenbauteil: | 2,5 mm | 27,0 mm | 1799,0 | <i>MW</i> | 19,4 | <i>MW</i> |
| P/D/0,4/2 | 298,5 / 12,5 mm | | | 1840,6 | 1836,0 | 19,8 | 19,8 |
| P/D/0,4/3 | Außenbauteil: | | | 1739,1 | <i>SD</i> | 18,7 | <i>SD</i> |
| P/D/0,4/4 | 298,5 / 15 / 30 mm | | | 1965,1 | 95,6 | 21,2 | 1,0 |

Tabelle 6.10 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von KHP-Verbindungen der Konfiguration D ; Klebstoff PUR

Für alle geprüften KHP-Proben kann eine Mischform zwischen adhäsivem und substratnah kohäsivem Versagen vorwiegend auf der Seite des innenliegenden Kreishohlprofils festgestellt werden. Aufgrund der Gleichartigkeit des Versagens ist aus jeder untersuchten KHP-Konfiguration je ein exemplarisches Bruchbild dargestellt (Abbildung 6.19). In großen Bereichen der versagten Fügefläche sind Klebstoffreste mit bloßem Auge erkennbar. Das Versagen am innenliegenden KHP ist aufgrund der dort maximalen Spannung infolge der geringeren Kontaktfläche zwischen Füge teil und Klebstoffvolumen im Vergleich zum außenliegenden KHP zu erklären. Die Bruchbilder unterscheiden sich nur durch die Größe der am Innenbauteil verbleibenden Klebstoffteilflächen. Diese sind stets an dem dem Innenbauteil zugewandten Ende der Überlappung zu lokalisieren. Die in Abbildung 6.19 teilweise auf der Klebschicht sichtbaren schwarzen Spuren sind Rückstände des zur Fugenabdichtung eingesetzten Weichschaumdichtbandes, die während des Auseinanderziehens der Proben auf den Füge teilen bzw. der Klebschicht verbleiben.



Abbildung 6.19 Exemplarische Bruchbilder der KHP-Konfigurationen A – D ; Klebstoff PUR

6.5.2 Ergebnisse Klebstoff EP

In Analogie zur Vorgehensweise bei den PUR geklebten Kreishohlprofilproben werden die Last-Verformungskurven der mit dem Klebstoff EP verbundenen Probekörper unter Verwendung des beschriebenen optischen Messsystems bis zur Bruchlast aufgezeichnet und ausgewertet. Auch für die EP-Proben ist die Reproduzierbarkeit des Last-Verformungsverhaltens hervorzuheben. In allen Versuchen steigt die Traglast bei zunehmender Verformung nahezu linear an. Ebenso ist für alle Proben sprödes Versagen festzuhalten. Deshalb wird nachfolgend wiederum lediglich ein exemplarischer Last-Verformungsverlauf für jede der untersuchten KHP-Konfigurationen in Abbildung 6.20 dargestellt. Das Verbindungsversagen ist mit einem Andreaskreuz gekennzeichnet. Zur Reduzierung des Messrauschens sind die Last-Verformungskurven mit einer quadratischen Ausgleichsfunktion geglättet.

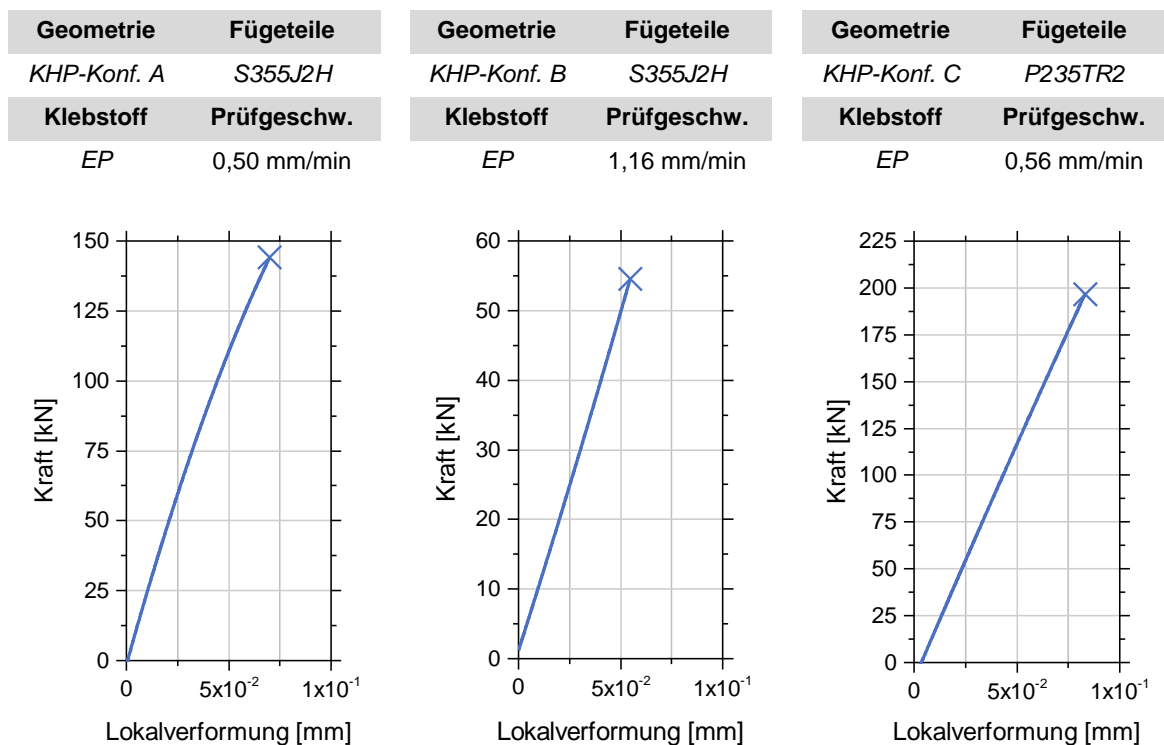


Abbildung 6.20 Exemplarische Last-Verformungs-Kurven der KHP-Konfigurationen A-C; Klebstoff EP

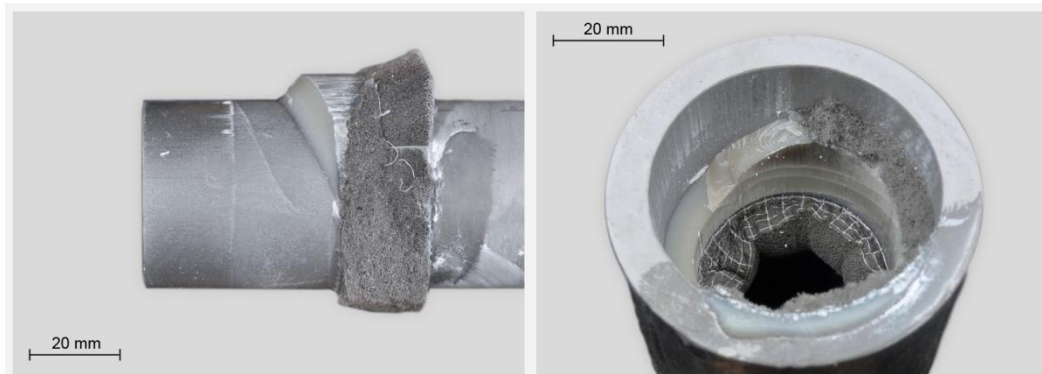
Die Analyse der Bruchbilder führt bei allen untersuchten Kreishohlprofilproben (Klebstoff EP) zu einem vergleichbaren Ergebnis. Das Verbindungsversagen kann als Mischform zwischen Adhäsionsbruch und substratnahe Kohäsionsbruch am Innenbauteil beschrieben werden. Dieser ist durch die mit bloßem Auge gut erkennbaren Klebstoffreste auf den Fügeteilerflächen deutlich identifizierbar. Aufgrund der Gleichartigkeit aller Bruchbilder zeigt Abbildung 6.21 jeweils die Klebfläche an Innen- und Außenbauteil einer exemplarischen Probe der geprüften KHP-Konfigurationen A, B und C. Auffällig sind wie bei den mit PUR geklebten Proben kleine am Innenbauteil haftende Klebstoffteile, die

auch bei den mit EP gefügten Proben stets an dem dem Innenbauteil zugewandten Ende des Überlappungsstoßes haften.

KHP-Konfiguration A



KHP-Konfiguration B



KHP-Konfiguration C

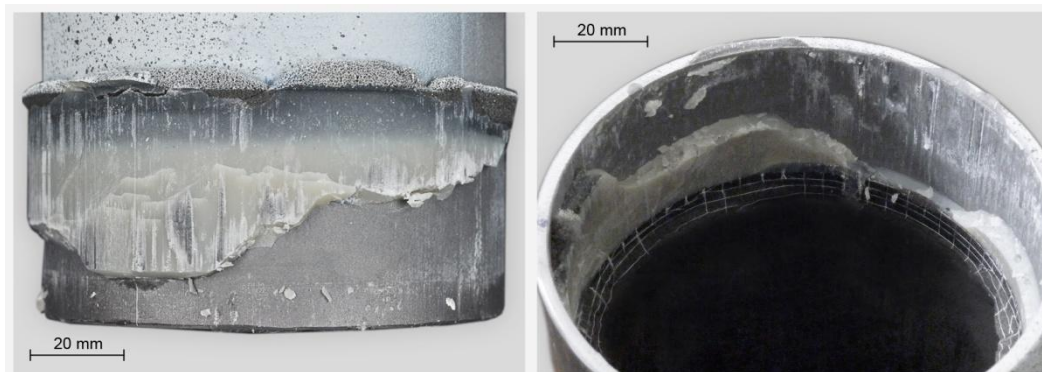


Abbildung 6.21 Exemplarische Bruchbilder der KHP-Konfigurationen A – C; Klebstoff EP

Die Last-Verformungskurven aller Versuche werden hinsichtlich der maximalen Tragfähigkeit der Klebverbindung ausgewertet und in tabellarischer Form dokumentiert. Dabei werden in Analogie zur Auswertung der mit PUR gefügten Proben die Mittelwerte (MW) und Schätzwerte der Standardabweichungen (SD) der Bruchlasten berechnet. Zum Er-

gebnisvergleich auf dem Niveau der Nennschubspannungen dienen die nach Gl. 4.1 berechneten Nennschubspannungen im Überlappungsbereich der Klebung sowie die zugehörigen Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Prüfreiheiten.

Zunächst sind in Tabelle 6.11 und Tabelle 6.12 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der KHP-Konfigurationen A und B dargestellt. Diese beiden Konfigurationen dienen der Untersuchung des Einflusses der geometrischen Parameter Überlappungslänge und Klebschichtdicke auf die Tragfähigkeit der geklebten Verbindung. Auch für den Klebstoff EP zeigt sich ein unterproportionaler Zusammenhang zwischen Überlappungslänge und Tragfähigkeit. Bei 2,3-facher Klebschichtdicke ist eine Reduktion der Verbindungstragfähigkeit um im Mittel 31 % festzustellen. Diese Ergebnisse werden in Kombination mit den Ergebnissen der numerischen Analyse in Abschnitt 6.7 diskutiert.

Versuchsreihen E / A

| Probekörper | Probekörpergeometrie | Klebschichtdicke [mm] | Überlappungslänge [mm] | Bruchlast [kN] | | Nennschubspannung [MPa] | |
|-------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|--------------|-------------------------|-------------|
| | | | | | | | |
| E/A/0,5/1 | | | 22,5 mm | 76,8 | <i>MW</i> | 25,6 | <i>MW</i> |
| E/A/0,5/2 | | | | 67,8 | 72,7 | 22,6 | 24,3 |
| E/A/0,5/3 | | | | 73,8 | | 24,6 | |
| E/A/0,5/4 | | | | 58,5 | <i>SD</i> | 19,5 | <i>SD</i> |
| E/A/0,5/5 | | | | 86,7 | 10,5 | 28,9 | 3,5 |
| E/A/1,0/1 | Innenbauteil: 42,4 / 5,0 mm | 2,5 mm | 45,0 mm | 141,9 | <i>MW</i> | 23,7 | <i>MW</i> |
| E/A/1,0/2 | | | | 131,8 | 142,0 | 22,0 | 23,7 |
| E/A/1,0/3 | 144,2 | | | 24,1 | | | |
| E/A/1,0/4 | Außenbauteil: 60,3 / 6,5 mm | | 130,6 | <i>SD</i> | 21,8 | <i>SD</i> | |
| E/A/1,0/5 | | | 161,6 | 12,5 | 27,0 | 2,1 | |
| E/A/1,5/1 | | | 67,5 mm | 188,1 | <i>MW</i> | 20,9 | <i>MW</i> |
| E/A/1,5/2 | | | | 190,8 | 178,6 | 21,2 | 19,9 |
| E/A/1,5/3 | | | | 178,8 | | 19,9 | |
| E/A/1,5/4 | | | | 147,8 | <i>SD</i> | 16,4 | <i>SD</i> |
| E/A/1,5/5 | | | | 187,3 | 17,8 | 20,8 | 2,0 |

Tabelle 6.11 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von KHP-Verbindungen der Konfiguration A; Klebstoff EP

Tabelle 6.13 fasst die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen der KHP-Konfiguration C zusammen. Die mit EP gefügten KHP-Verbindungen zeigen sich gegenüber planmäßig eingebrachten geometrischen Imperfektionen zunächst tolerant; bei großen geometrischen Abweichungen nimmt die Tragfähigkeit im Mittel bis zu 8 % ab. Ein zusätzlicher Temperprozess nach der Klebung führt zu einer größeren Streuung der Tragfähigkeiten bei ähnlicher Festigkeit. Auch die Diskussion dieser Versuchsreihe ist Bestandteil von Abschnitt 6.7.

Versuchsreihe E / B

| Probekörper | Probekörpergeometrie | Klebschichtdicke [mm] | Überlappungslänge [mm] | Bruchlast [kN] | | Nennschubspannung [MPa] | |
|-------------|--|-----------------------|------------------------|----------------|------|-------------------------|------|
| | | | | | | | |
| E/B/0,5/1 | Innenbauteil: 42,4 / 5,0 mm Außenbauteil: 70,0 / 8,0 mm | 5,8 mm | 23,5 mm | 54,7 | MW | 17,1 | MW |
| E/B/0,5/2 | | | | 42,5 | 53,2 | 13,3 | 16,7 |
| E/B/0,5/3 | | | | 54,8 | | 17,1 | |
| E/B/0,5/4 | | | | 48,3 | SD | 15,1 | SD |
| E/B/0,5/5 | | | | 65,9 | 8,7 | 20,6 | 2,7 |

Tabelle 6.12 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von KHP-Verbindungen der Konfiguration E/B

Versuchsreihen E / C

| Probekörper | Probekörpergeometrie | Klebschichtdicke [mm] | Überlappungslänge [mm] | Bruchlast [kN] | | Nennschubspannung [MPa] | |
|------------------|---|-----------------------|------------------------|----------------|-------|-------------------------|------|
| | | | | | | | |
| E/C/0,25/1 | Innenbauteil: 101,6 / 3,6 mm | 2,8 mm | 27,0 mm | 167,4 | MW | 19,6 | MW |
| E/C/0,25/2 | | | | 199,7 | 187,5 | 23,3 | 21,9 |
| E/C/0,25/3 | | | | 191,5 | | 22,4 | |
| E/C/0,25/4 | | | | 201,3 | SD | 23,5 | SD |
| E/C/0,25/5 | | | | 177,8 | 14,6 | 20,8 | 1,7 |
| E/C/0,25/1/T | Außenbauteil: 114,3 / 3,6 mm | | | 223,5 | MW | 26,1 | MW |
| E/C/0,25/2/T | | | | 172,8 | 169,4 | 20,2 | 19,8 |
| E/C/0,25/3/T | | | | 153,1 | | 17,9 | |
| E/C/0,25/4/T | | | | 145,4 | SD | 17,0 | SD |
| E/C/0,25/5/T | | | | 152,3 | 31,9 | 17,8 | 3,7 |
| E/C/0,25/1/E0,2 | + Ausmitte der Schwerelinien $e = 0,2 \cdot s_k$ | 2,6 mm | 159,2 | MW | 18,6 | MW | |
| E/C/0,25/2/E0,2 | | - | 196,9 | 187,2 | 23,0 | 21,9 | |
| E/C/0,25/3/E0,2 | | 3,0 mm | 205,4 | SD | 24,0 | SD | |
| E/C/0,25/1/E0,5 | + Ausmitte der Schwerelinien $e = 0,5 \cdot s_k$ | 2,3 mm | 159,9 | MW | 18,7 | MW | |
| E/C/0,25/2/E0,5 | | - | 185,0 | 177,7 | 21,6 | 20,8 | |
| E/C/0,25/3/E0,5 | | 3,3 mm | 188,1 | SD | 22,0 | SD | |
| E/C/0,25/1/S0,75 | + Schiefstellung 0,75° | 2,6 mm | 209,8 | MW | 24,5 | MW | |
| E/C/0,25/2/S0,75 | | - | 216,9 | 214,8 | 25,4 | 25,1 | |
| E/C/0,25/3/S0,75 | | 3,0 mm | 217,8 | SD | 25,5 | SD | |
| E/C/0,25/1/S1,50 | + Schiefstellung 1,50° | 2,4 mm | 185,3 | MW | 21,7 | MW | |
| E/C/0,25/2/S1,50 | | - | 207,5 | 172,1 | 24,3 | 20,1 | |
| E/C/0,25/3/S1,50 | | 3,2 mm | 123,6 | SD | 14,4 | SD | |
| | | | | 43,5 | | 5,1 | |

Tabelle 6.13 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von KHP-Verbindungen der Konfiguration E/C

6.6 Numerische Untersuchungen

6.6.1 Ansatz und Zielsetzung

Im Bauwesen werden Verbindungen in der Regel auf der Basis von Nennspannungen ausgelegt. Die in Abschnitt 5.4 untersuchten geklebten Stahlfügeteile mit Schäftungswinkel 0° unterscheiden sich nur in der Überlappungslänge (5 mm bzw. 37 mm). Aus den experimentell bestimmten Tragfähigkeiten berechnen sich jedoch deutlich unterschiedliche Nennschubspannungen in der Klebfuge bei Bruch (Abweichung PUR: 40 %). Dies ist auf die größeren Spannungskonzentrationen bei längerem Überlapp zurückzuführen, die auf der Basis von Nennspannungen nicht erfasst werden (WOOLEY UND CARVER 1971). Der im Bauwesen übliche Nennspannungsansatz ist somit für die rechnerische Auslegung der in dieser Arbeit untersuchten Klebverbindungen nicht geeignet.

Aus diesem Grund wird der Spannungszustand in der Klebschicht der Kreishohlprofilverbindungen mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) untersucht. Dabei werden die Einflüsse aller in dieser Arbeit betrachteten geometrischen Parameter auf die Spannungsverteilung analysiert. Ziel der numerischen Untersuchungen ist die detaillierte Kenntnis der infolge der experimentell bestimmten Bruchlasten in der Klebfuge vorhandenen Schub- und Normalspannungen. Diese werden mit dem in Abschnitt 5 erarbeiteten spannungsbasierenden Versagenskriterium für geklebte Stahlverbindungen verglichen.

Des Weiteren dienen die numerischen Untersuchungen als Grundlage für die Tragfähigkeitsprognose nach dem Konzept lokaler Spannungen sowie für die probabilistische Prognose der Verbindungstragfähigkeit in Abschnitt 7.

6.6.2 Numerisches Modell und Werkstoffgesetze

Die Erstellung des numerischen Modells sowie die Festlegung von Werkstoffgesetzen für die numerische Berechnung orientieren sich in vielen Details an den numerischen Modellen der geschäftet geklebten Stahlproben. Die Modellierung dieser Proben ist in Abschnitt 5.5 beschrieben. Aus diesem Grund wird im Folgenden bei der Beschreibung der numerischen Modelle der KHP-Proben im Wesentlichen auf Unterschiede im Vergleich zu den Modellen der geschäfteten Proben eingegangen.

Alle numerischen Berechnungen werden auf einem handelsüblichen PC unter Verwendung des Finite-Element-Programmes Ansys Workbench 15.0 durchgeführt. Hierzu sind alle experimentell untersuchten Kreishohlprofilkonfigurationen als dreidimensionale Volumenmodelle unter Verwendung des Elementtyps SOLID 186 diskretisiert. Detailliertere Informationen zu diesem Elementtyp können Abschnitt 5.5 sowie (ANSYS 2013) ent-

nommen werden. Zur Beschreibung des Aufbaus des numerischen Modells wird im Weiteren die Geometrie der KHP-Probe A/1,0 herangezogen (siehe Abbildung 6.2). Für die Simulation der Serien ohne planmäßig eingebrachte Imperfektionen werden Achtel-Modelle in Umfangsrichtung abgebildet. Dabei sind die Schnittflächen mit Symmetriestandbedingungen versehen. Im Programm Ansys Workbench 15.0 kann dies durch die Modellierung einer reibungsfreien Lagerung erfolgen. Die Ausnutzung der Symmetrie führt zu einer deutlich verkürzten Rechenzeit. Die numerischen Berechnungen an KHP-Proben mit planmäßig eingebrachter Schiefstellung (Modell C/0,25/S0,75 und Modell C/0,25/S1,50) oder einer Ausmitte der Schwerelinie (Modell C/0,25/E0,2 und Modell C/0,25/E0,5) erfordert jedoch die Analyse von Halbmodellen zur korrekten Bestimmung der Spannungsverteilung in der Klebfuge. Die Schnittflächen der Rohrwandungen bzw. der Klebfuge sind mit Symmetriestandbedingungen versehen. Bei allen numerischen Modellen wird die Stirnseite des Außenbauteils mit einer fixierten Lagerung versehen. Dabei sind die Verschiebungen dem Versuchsaufbau entsprechend in x-Richtung blockiert. Verschiebungen in y- und z-Richtung sind möglich, um die Querkontraktion der Kreishohlprofile unter Last abbilden zu können. Die Kraftaufbringung in x-Richtung erfolgt weggesteuert auf der Stirnseite des innenliegenden Kreishohlprofils (siehe Abbildung 6.22). Lasteinleitungsbohrungen sind im numerischen Modell nicht abgebildet, da die Abstände zwischen Bohrung und Überlappungsbereich so gewählt sind, dass im Bereich der Klebung ein homogener Spannungszustand in der Kreishohlprofilwandung herrscht (siehe Abbildung 6.16).

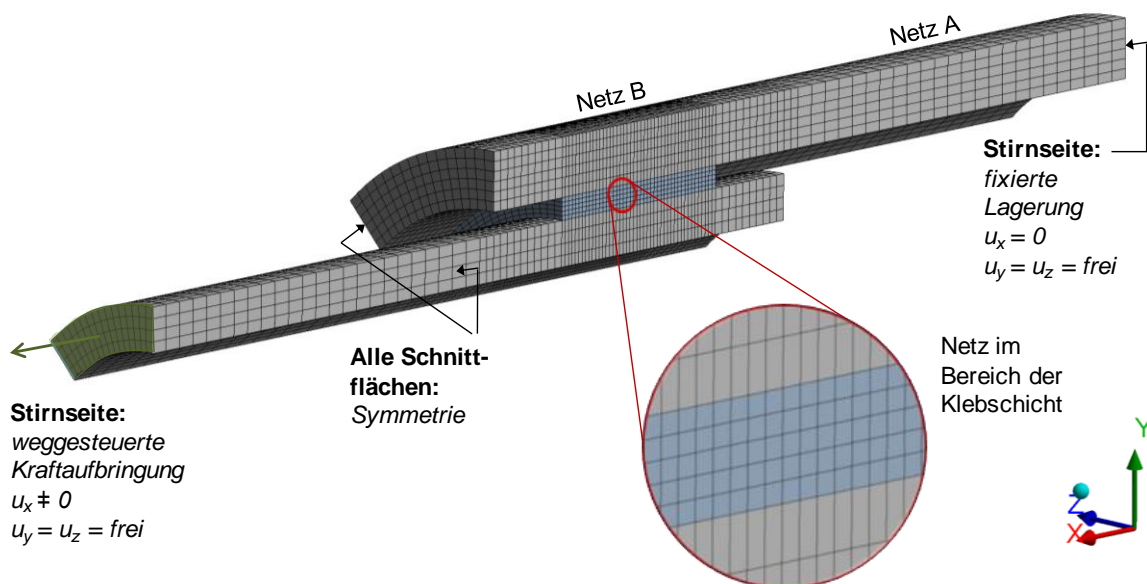


Abbildung 6.22 FE-Modell der KHP-Probe A/1,0 (Achtel-Modell) mit Lagerbedingungen; vergrößerter Bereich: FE-Netz im Bereich der Klebfuge

Die Erstellung des Finite-Element-Netzes orientiert sich aufgrund der angestrebten Vergleichbarkeit der Ergebnisse an der Netzmodellierung der geschäfteten Stahlproben ge-

mäß Abschnitt 5.5. Zur Optimierung der Rechenzeit ist das Netz in drei Bereiche mit unterschiedlicher Netzfeinheit unterteilt. Der Netzbereich A ist durch eine flexible Vorgabe der Elementgröße zwei Millimeter charakterisiert. Ein feineres Netz wird für die Stahlfügeteile im Bereich der Klebung erstellt (Netz B in Abbildung 6.22). Hier wird in Ansys für die Elementgröße ein flexibles Sollmaß von einem Millimeter vorgegeben.

Wesentlich für den direkten Vergleich der Ergebnisse ist die gleichartige Vernetzung in den Auswertungsbereichen der Klebfuge. Hierzu wird in Analogie zu den geschäftet geklebten Stahlproben durch die Vorgabe der Elementanzahl entlang der Kanten ein Netz mit quadratischen Elementen der Kantenlänge 0,5 mm angestrebt. Ist die Dicke der Klebfuge kein Teiler von 0,5 mm, wird hinsichtlich der Auswertung von Maximalspannungen auf der sicheren Seite liegend die nächstgrößere Elementanzahl modelliert. So sind beispielsweise zwölf Elemente in Dickenrichtung der Klebschicht der KHP-Reihe B (Klebschichtdicke 5,8 mm) abgebildet. Bei Modellen mit variabler Klebfugendicke ist eine weitere Differenzierung erforderlich. So weisen die Modelle mit planmäßig eingebrachter Schiefstellung beispielsweise eine sich in Längsrichtung stetig verändernde Klebfugendicke auf. In diesen Fällen wird im Bereich der maximalen Spannungskonzentration (lokale Auswertungsstelle) eine Elementgröße von 0,5 mm angestrebt (siehe Abbildung 6.23).

In Umfangsrichtung der Klebung beträgt die Kantenlänge der finiten Elemente maximal 1,5 mm. Hier nicht näher dargelegte Vergleichsberechnungen zeigen, dass die Elementlänge in Umfangsrichtung einen vernachlässigbaren Einfluss von deutlich unter 1 % auf die berechnete Spannungsverteilung aufweist. Dies kann durch den geringen Spannungsgradienten in Umfangsrichtung bei den imperfektionsbehafteten Modellen bzw. durch die in Umfangsrichtung konstanten Spannungsverteilungen bei den rotationssymmetrischen, imperfektionsfreien Modellen erklärt werden.

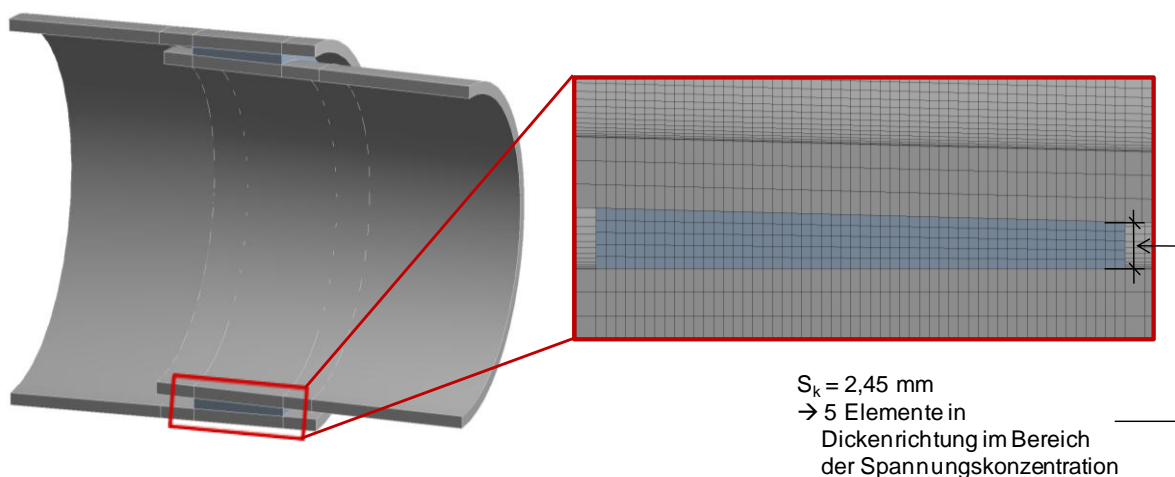


Abbildung 6.23 FE-Modell der KHP-Probe C/0,25/S1,5 (Halb-Modell); vergrößerter Bereich: FE-Netz im Bereich der Klebfuge

Die Netzkonvergenz im Bereich der auszuwertenden Klebfuge wird durch die Berechnung des Spannungszustandes mit unterschiedlichen Elementgrößen überprüft. Analog zur Vorgehensweise bei den numerischen Modellen der geschäftet geklebten Stahlproben unterscheiden sich die betrachteten Modelle in der Anzahl der Elemente in Klebfugendickenrichtung. Für die Konvergenzanalyse wird aufgrund der ausgeprägten Spannungskonzentrationen das Modell der KHP-Probe P/A/1,5 mit großer Überlappungslänge herangezogen. Die Klebschichtdicke der Konfiguration A beträgt 2,5 mm. Somit ergibt sich für die Modellierung von drei, fünf oder zehn Elementen in Dickenrichtung eine Elementkantenlänge von 0,83, 0,50 oder 0,25 mm. Ausgewertet wird der Schubspannungsverlauf in Fugenmitte und im Randbereich an der Innenseite der Klebung. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 6.24 dargestellt. Auf der linken Abbildungsseite sind die Spannungsverläufe im Randbereich bei unterschiedlichen Elementgrößen zu sehen. Diese werden durch den quantitativen Vergleich der maximalen Schubspannung der jeweiligen Berechnung mit dem Wert des nächst größer vernetzten Modells ergänzt.

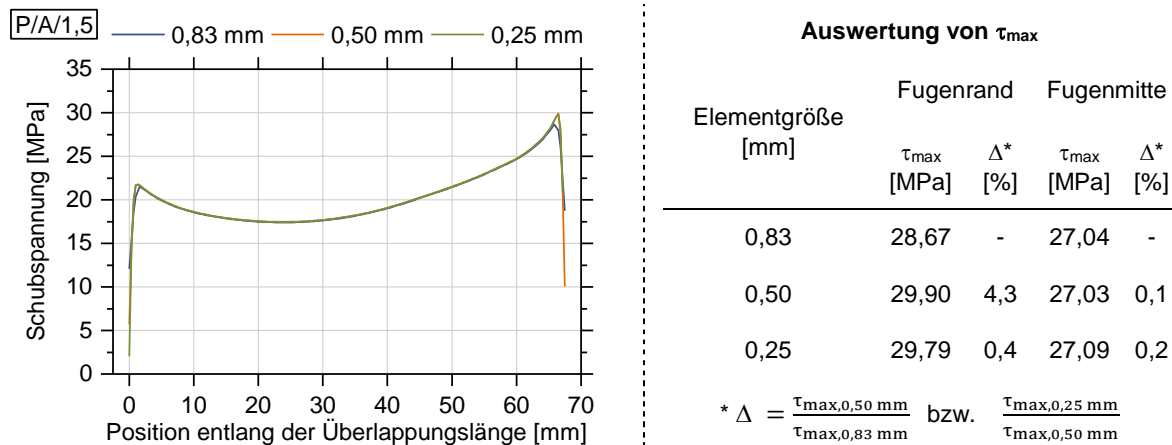


Abbildung 6.24 Ergebnisse der Netzkonvergenzstudie. Links: Schubspannungsverläufe im Randbereich der Klebschicht der KHP-Geometrie P/A/1,5. Rechts: Vergleich der maximalen Schubspannungen bei unterschiedlichen Elementgrößen

Die prozentuale Abweichung der berechneten Maximalspannungen bei Kantenlängen von 0,25 mm und 0,50 liegt unter einem Prozent. Als Ergebnis der Netzkonvergenzanalyse kann deshalb festgehalten werden, dass bei einer Elementkantenlänge von 0,5 mm ausreichend genaue Ergebnisse erzielt werden. Somit wird die bereits für die numerischen Untersuchungen der geschäftet geklebten Stahlproben gewählte Elementgröße von 0,5 mm im Auswertungsbereich auch für die numerischen Modelle der geklebten Kreishohlprofile festgelegt.

Für Klebstoffe und Stahl kommen die bereits für die numerischen Modelle der Schrägzugproben erarbeiteten Werkstoffgesetze zum Einsatz. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine erneute Beschreibung verzichtet und auf Abschnitt 6.5.3 verwiesen.

6.6.3 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

In Analogie zur Analyse des Spannungszustandes in der Klebfuge geschäfteter Stahlproben werden die für das Versagenskriterium (Abschnitt 5) relevanten Schubspannungen τ_{xz} sowie Normalspannungen orthogonal zur Klebfuge σ_z bei der Auswertung der numerischen Modelle der KHP-Verbindungen betrachtet. Die Bruchbilder der KHP-Proben zeigen, wie in Abschnitt 6.5 beschrieben, in der Regel eine Kombination aus substratnahe Kohäsionsbruch und adhäsivem Versagen überwiegend auf der Seite des innenliegenden Kreishohlprofils. Aus diesem Grund wird der Spannungszustand an der Klebfugeninnenseite ausgewertet. In Analogie zu der Vorgehensweise bei den geschäftet geklebten Stahlproben erfolgt die Spannungsanalyse entlang eines Pfades im Abstand von 0,5 mm vom Klebfugenrand am Innenbauteil. Dies entspricht in der Regel einem Abstand von einem Element in radialer Richtung (siehe Abbildung 6.25). Zur Erläuterung der Hintergründe wird auf Abschnitt 5.5.4 verwiesen.

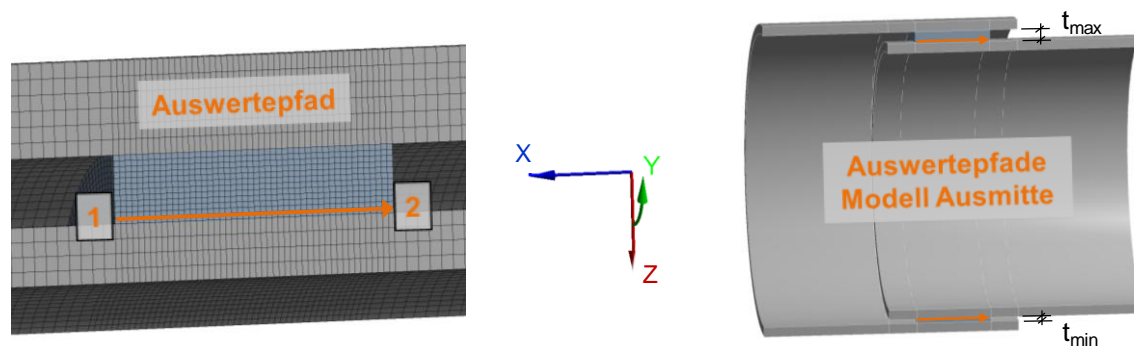


Abbildung 6.25 Links: Position des Auswertepfades im Randbereich der Klebfuge auf der Seite des Innenbauteils, Stelle 1: Pfadanfang, Stelle 2: Pfadende. Rechts: Position der beiden betrachteten Auswertepfade bei den Modellen mit einer Ausmitte der Schwerelinie

Die Spannungsverteilung bei rotationssymmetrischen, imperfektionsfreien Modellen ist in Umfangsrichtung konstant. Aus diesem Grund beschränkt sich die Auswertung dieser Modelle auf den in Abbildung 6.25 dargestellten Auswertepfad. Bei den Modellen mit Ausmitte der KHP-Schwerelinien ist aufgrund des Spannungsgradienten in Umfangsrichtung eine differenzierte Auswertung sowohl an der Stelle der dünnsten als auch an der Stelle der dicksten Klebschicht erforderlich (siehe Abbildung 6.25). Diese Grenzwertbetrachtung erfasst die Maxima der beiden betrachteten Spannungskomponenten τ_{xz} und σ_z . Ein weiterer Sonderfall stellt die Auswertung der Modelle mit einer Schiefstellung der Fügeteile dar. Die Schichtdicke dieser Proben variiert in Längsrichtung. Die Auswertung erfolgt entlang eines Pfades im konstanten Abstand von 0,5 mm zum Klebfugenrand am Innenbauteil. Ausgewertet werden die Spannungen ausgehend vom dickeren Ende der Klebfuge hin zum dünneren Ende.

Die numerischen Untersuchungen an geklebten KHP-Verbindungen verfolgen zwei Ziele. Zunächst soll der Einfluss der Geometrie auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht

mit Hilfe numerischer Berechnungen untersucht und beschrieben werden. Hierzu werden alle numerischen Modelle mit einer Kraft in KHP-Längsrichtung beansprucht, die zu einer rechnerischen Nennschubspannung von 20 MPa in der Klebfläche des innenliegenden Kreishohlprofils führt. Diese Vorgehensweise erlaubt es, den Einfluss von unterschiedlichen Überlappungslängen, Klebschichtdicken und Imperfektionen auf den resultierenden Spannungszustand in der Klebfuge zu beurteilen. In einem weiteren Arbeitsschritt werden die Spannungszustände bei den experimentell bestimmten Bruchlasten durch numerische Berechnungen ermittelt und hinsichtlich ihrer lokalen Maxima ausgewertet. Diese Untersuchungen dienen dem Vergleich der beim Bruch in der Klebung vorhandenen Spannungen mit dem an ebenen Proben erarbeiteten Versagenskriterium (Abschnitt 5).

Im Folgenden werden zunächst die Spannungsverteilungen an der Innenseite der KHP-Klebfuge am Innenbauteil bei einer Beanspruchung, die einer Nennschubspannung von 20 MPa entspricht, vorgestellt. Dabei wird zur Quantifizierung geometrischer Einflüsse jeweils nur ein Parameter verändert. So sind in Abbildung 6.26 die für die drei geprüften Überlappungslängen der KHP-Konfiguration A numerisch berechneten Verläufe der Schubspannung τ_{xz} (oben) sowie der Normalspannung σ_z (unten) dargestellt. Betrachtet sind die Klebstoffe PUR (links) sowie EP (rechts).

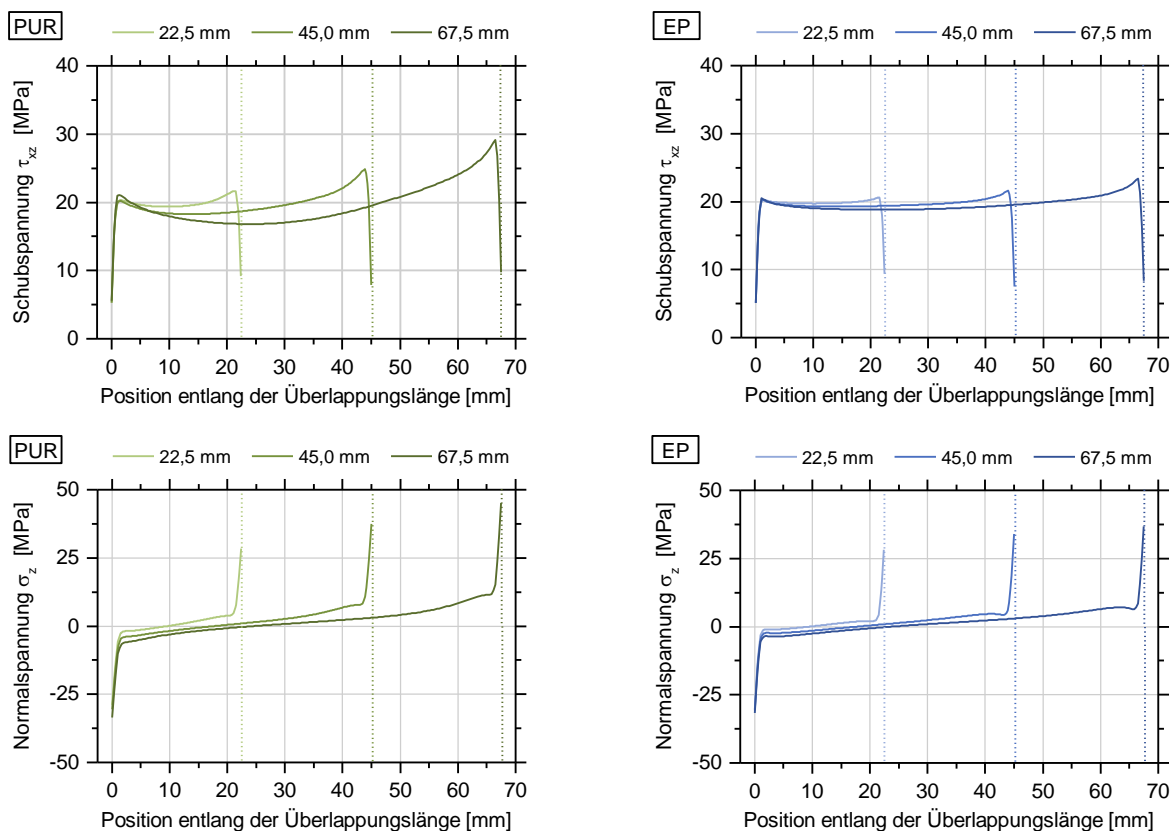


Abbildung 6.26 Spannungverteilung an der Innenseite der Klebfuge bei Variation der Überlappungslänge; links: Klebstoff PUR; rechts: Klebstoff EP; oben: Schubspannung τ_{xz} , unten: Normalspannung σ_z ; Modell A

Abbildung 6.26 zeigt, dass die Differenz zwischen maximaler und minimaler Schubspannung bei größer werdender Überlappungslänge ansteigt. Die Spannungsmaxima werden dabei stets am Ende der Überlappungsklebung erreicht und nehmen bei der größten Überlappungslänge die maximalen Werte ein. Deutlich wird auch der Einfluss der Steifigkeit der verwendeten Klebstoffe PUR und EP. So liegt beispielsweise das Maximum der Schubspannung der PUR-Probe bei einer Überlappungslänge von 67,5 mm ($1,5 \cdot D$) und gleicher Belastung 25 % über der maximalen Schubspannung in der EP-Klebfuge. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass der Klebstoff PUR einen etwa doppelt so großen Elastizitätsmodul wie der Klebstoff EP aufweist (siehe Abschnitt 4) und somit stärkere Spannungskonzentrationen auftreten.

Die Normalspannungen orthogonal zur Klebfuge σ_z wechseln entlang des Auswertepfades das Vorzeichen. Die maximale Zugspannung wird dabei in Längsrichtung der Überlappung an der Außenseite erreicht. Die maximale Drucknormalspannung tritt am gegenüberliegenden Anfang der Überlappungsklebung auf. Die Betrachtung eines um den Faktor 150 überhöhten Verformungsbildes des numerischen Modells trägt zur Veranschaulichung des beschriebenen Spannungsverlaufes bei. Wie in Abbildung 6.27 ersichtlich ist, führt die Längsbeanspruchung der geklebten Probe zu einer Aufweitung des Außenbauteils am in Längsrichtung außenliegenden Ende der Klebfuge. Dies steht in Zusammenhang mit der Querkzugbeanspruchung der Klebfuge in diesem Bereich. Am in Längsrichtung inneren Ende der Klebfuge ist eine Aufweitung des innenliegenden Füge-teiles festzustellen. Dies steht in Zusammenhang mit der Drucknormalspannung, die am innenliegenden Ende der Überlappungsklebung das Maximum erreicht. Zurückgeführt werden kann dies auf das rotationssymmetrische Exzentrizitätsmoment durch den Abstand der Kreishohlprofilwandungen (Krempelmoment).

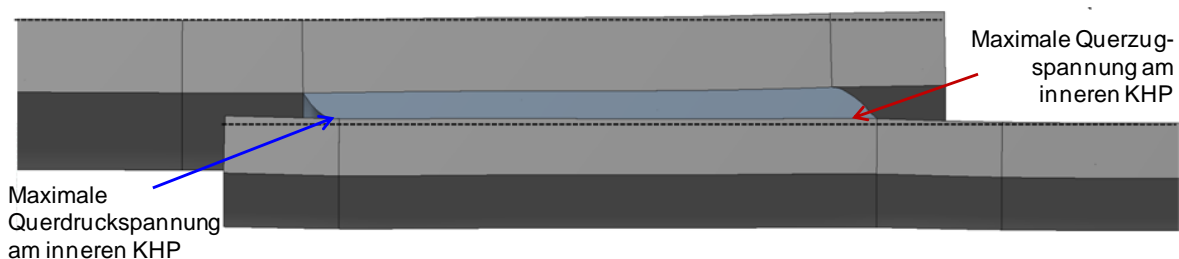


Abbildung 6.27 Gesamtverformung des Modells P/A/1,0 (150x überhöhte Darstellung); gestrichelte Linien: Hilfslinien zur Visualisierung der Formänderung der Kreishohlprofile

Weiterhin wird anhand eines Vergleichs der Modelle A/0,5 und B/0,5 der Einfluss der Klebschichtdicke auf den Spannungszustand an der Klebfugennenseite bestimmt und diskutiert. Die beiden Modelle unterscheiden sich durch abweichende Querschnitte des äußeren Kreishohlprofils. Hierdurch ergibt sich bei A/0,5 eine Klebschichtdicke von 2,5 mm, bei B/0,5 beträgt die Klebschichtdicke 5,8 mm. In Abbildung 6.28 sind die Schub- und Normalspannungsverteilungen entlang des Auswertepfades für die Klebstoffe EP

und PUR dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass die Schubspannung bei größerer Klebschichtdicke etwas homogener verteilt ist. Die Spannungskonzentrationen an den Enden der Überlappungslänge sind bei der mehr als doppelt so großen Schichtdicke nicht vorhanden. Nicht vergleichbar sind jedoch die Maxima der Normalspannungen orthogonal zur Klebfuge. Bei identischer Belastung der Bauteile zeigt sich für die dickere Klebschicht eine annähernd doppelt so große Querkzug- bzw. Querdrucknormalspannung. Dies kann auf den ebenfalls etwa doppelt so großen Abstand zwischen den Wandungen des außen- bzw. innenliegenden Kreishohlprofils zurückgeführt werden (Krempelmoment).

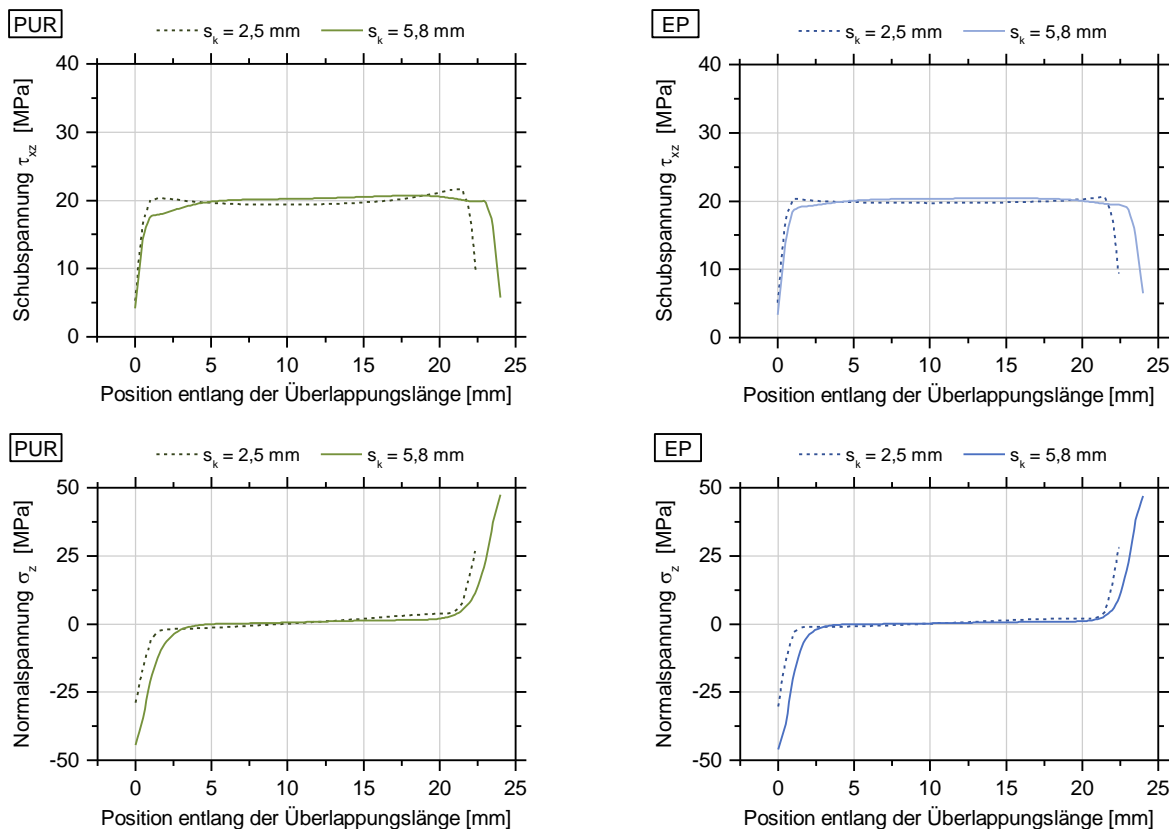


Abbildung 6.28 Spannungverteilung an der Innenseite der Klebfuge bei Variation der Klebschichtdicke; links: Klebstoff PUR; rechts: Klebstoff EP; oben: Schubspannung τ_{xz} ; unten: Normalspannung σ_z ; Modell B

Die numerischen Berechnungen an den Modellen der KHP-Geometrie C liefern Erkenntnisse über den Einfluss der definiert eingebrachten Imperfektionen auf die Spannungsverteilung in der Klebfuge. In Abbildung 6.29 werden hierzu zunächst die Spannungsverläufe in der Klebfuge der Proben C/0,25/E0,2 mit einer Ausmitte der Schwerlinien von 0,5 mm (entspricht 20 % der nominellen Klebschichtdicke) sowie C/0,25/E0,5 mit einer Exzentrizität von 1,4 mm (entspricht 50 % der nominellen Klebschichtdicke) dargestellt. Dabei wird der maßgebende Schubspannungsverlauf an der Stelle der dünnsten Klebschicht in Umfangsrichtung betrachtet. Zum Vergleich dient der Spannungsverlauf der „perfekten“ KHP-Probe C/0,25. Wiederum sind die Spannungsverläufe für die Klebstoffe

EP und PUR ausgewertet. Bei infolge der Ausmitte der KHP-Schwerelinien dünner werdender Klebschicht steigen die Schubspannungen in der Klebfuge an. So wird beispielsweise bei gleicher Belastung die Klebfuge der Geometrie P/C/E0,5 an der dünnsten Stelle im Maximum mit einer ca. 20 % höheren Schubspannung beansprucht. Das Modell weist im Bereich der dünneren Klebschicht eine höhere Steifigkeit als die Referenzschichtdicke auf. Dies kann zur Erklärung des Schubspannungsanstiegs herangezogen werden. Die Normalspannungsverteilung unterscheidet sich im Wesentlichen in der Größe der maximalen Druck- bzw. Zugnormalspannungen an den Enden der Klebfuge. Die maximale Zugnormalspannung wird hierbei an der Stelle der dicksten Klebschicht in Umfangsrichtung erreicht. Dies kann wiederum auf den größeren Abstand zwischen den Wandungen des außen- und innenliegenden Kreishohlprofils zurückgeführt werden.

Für den Klebstoff EP zeigen sich qualitativ vergleichbare Spannungsverläufe in der Klebschicht; bedingt durch die geringere Steifigkeit (Elastizitätsmodul) dieses Klebstoffs sind die Spannungskonzentrationen jedoch weniger stark ausgeprägt.

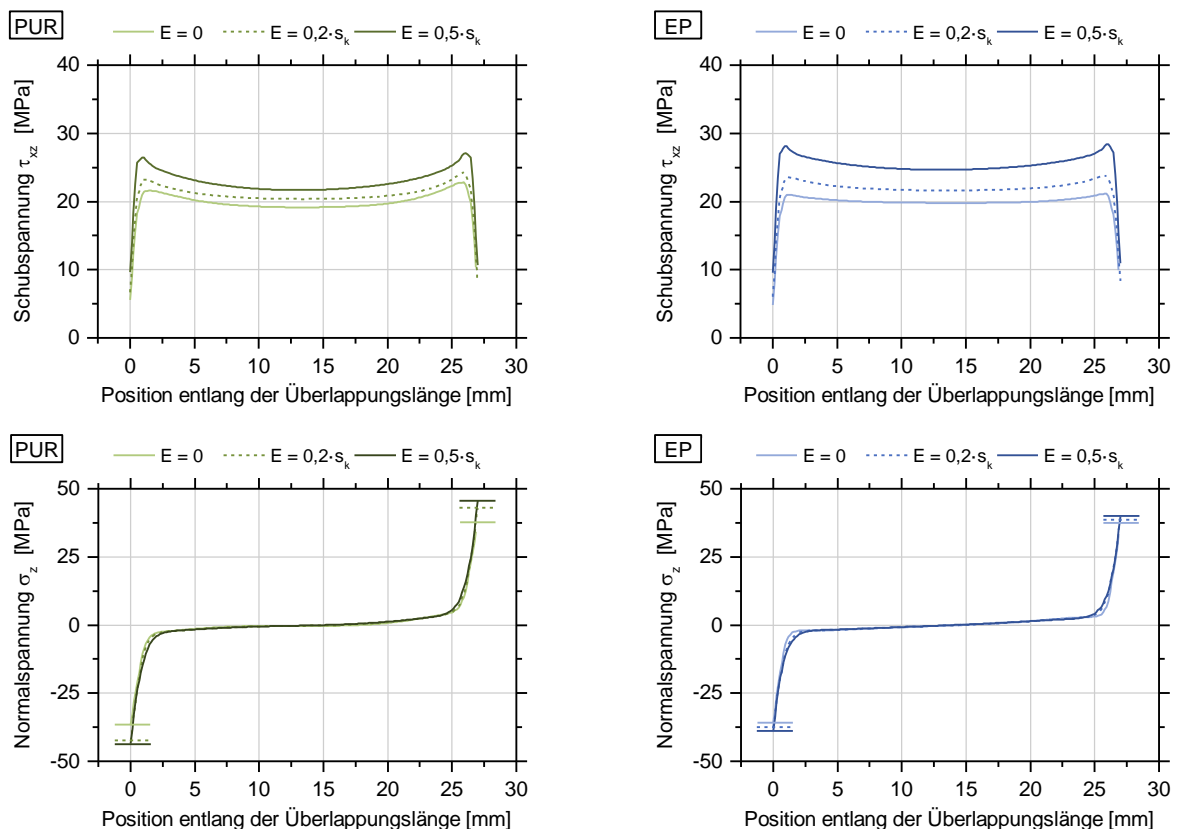


Abbildung 6.29 Spannungsverteilung an der Innenseite der Klebfuge bei imperfektionsfreier Geometrie sowie bei verschiedenen Exzentrizitäten der KHP-Schwerelinien; links: Klebstoff PUR; rechts: Klebstoff EP; oben: Schubspannung τ_{xz} bei $s_{k,min}$; unten: Normalspannung σ_z bei $s_{k,max}$; Modell C

Weiterhin wird der Spannungszustand bei einer Schiefstellung des inneren Kreishohlprofils zum äußeren Bauteil untersucht und mit der Spannungsverteilung der imperfek-

tionsfreien Geometrie C verglichen. Wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben, werden im Rahmen dieser Arbeit Schiefstellungen von $0,75^\circ$ sowie $1,50^\circ$ bezogen auf den Schwerpunkt der Klebung untersucht. Durch diese Schiefstellung nimmt die Schichtdicke der Klebfuge in Längsrichtung ab, d.h. am Anfang des Auswertepfades weist die Klebfuge ihre größte Dicke auf, am Ende des Auswertepfades ist die Fugenhöhe minimal.

Die sich aus der Auswertung entlang des Pfades an der Klebfugeninnenseite ergebenden Spannungsverläufe sind in Abbildung 6.30 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Schubspannungsverlauf in der Klebfuge bei imperfekten Bauteilen das globale Maximum an der Stelle der dünnsten Klebschicht aufweist (Abbildung 6.30). Beim Vergleich der imperfekten Probe P/C/0,25/S1,50 mit der imperfektionsfreien Probe P/C/0,25 ergibt sich beispielsweise ein ca. 10 % höherer Wert des Spannungsmaximums. Dies ist wiederum mit der zunehmenden Steifigkeit und der daraus resultierenden Spannungskonzentration im Bereich dünner Schichtdicken zu erklären. Kein erwähnenswerter Unterschied ist dahingegen bei der Auswertung der Normalspannungsverläufe feststellbar. Sowohl in den Randbereichen als auch in der Mitte des Auswertepfades sind die Normalspannungsverläufe annähernd deckungsgleich und unterscheiden sich geringfügig in den Extrema (siehe Abbildung 6.30).

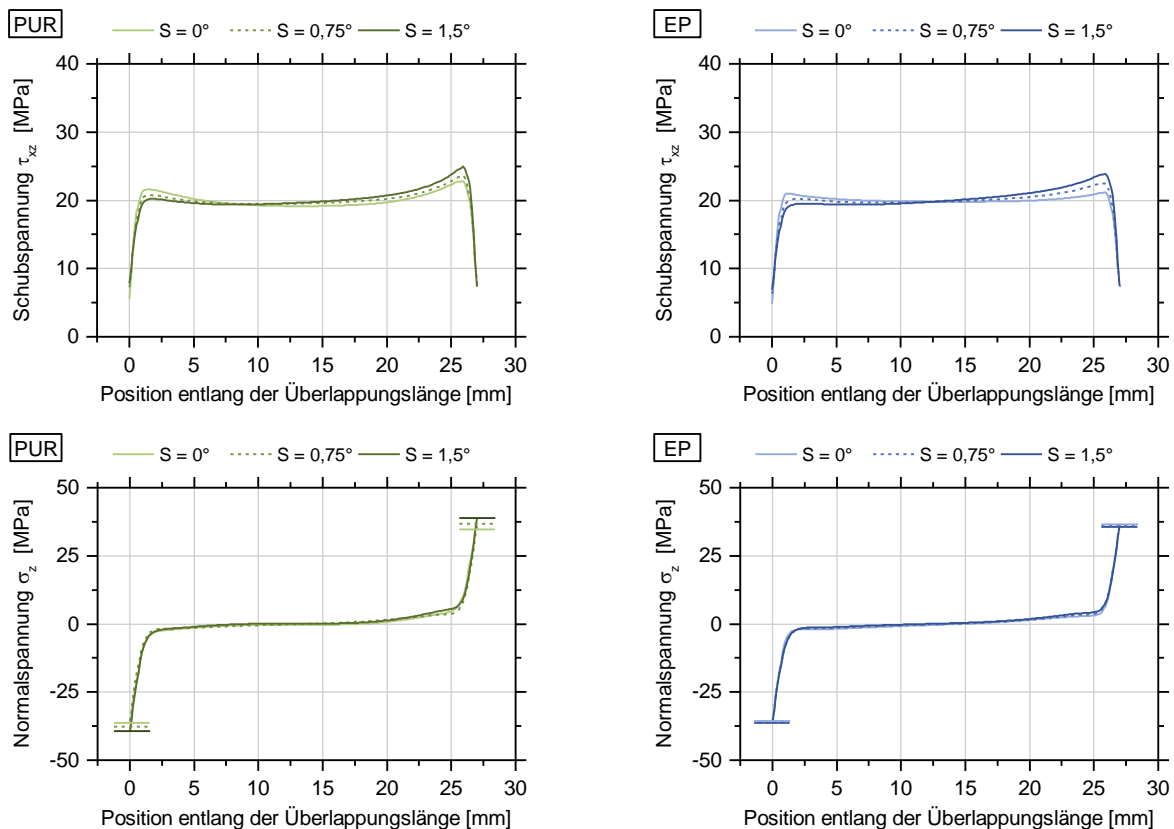


Abbildung 6.30 Spannungsverteilung an der Innenseite der Klebfuge bei imperfektionsfreier Geometrie sowie bei verschiedenen Schiefstellungen des innenliegenden KHP; links: Klebstoff PUR; rechts: Klebstoff EP; oben: Schubspannung τ_{xz} ; unten: Normalspannung σ_z ; Modell C

Im Weiteren wird der Spannungszustand in der Klebfuge infolge einer Beanspruchung in Höhe des Mittelwertes der experimentell bestimmten Bruchlasten durch nichtlineare numerische Berechnungen ermittelt. Es zeigt sich, dass diese Spannungsverteilungen den zuvor beschriebenen qualitativ ähnlich sind; sie unterscheiden sich insbesondere in den quantitativen Werten der Spannungsmaxima. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine erneute Darstellung der aus den experimentellen Bruchlasten resultierenden Spannungsläufe verzichtet und auf den Anhang verwiesen (Abbildungen A.16 bis A.19).

Ausgewertet werden die Spannungszustände hinsichtlich ihrer lokalen Maxima. Dabei wird wie schon bei der Auswertung der geschäftet geklebten Stahlproben (Kapitel 5) wieder zwischen der Auswertung der maximalen Schubspannung und der zugehörigen Normalspannung (Auswertestelle „Randfern“: τ_{\max} ; $\sigma_{\text{zugeh.}}$) sowie der Auswertung der maximalen Normalspannung in Kombination mit der zugehörigen Schubspannung (Auswertestelle „Rand“: σ_{\max} ; $\tau_{\text{zugeh.}}$) unterschieden. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 6.31 Schub- und Normalspannungsverteilung an der Klebfugeninnenseite infolge einer Beanspruchung in Höhe des Mittelwertes der Bruchlasten der Probenreihe P/A/0,5 dargestellt.

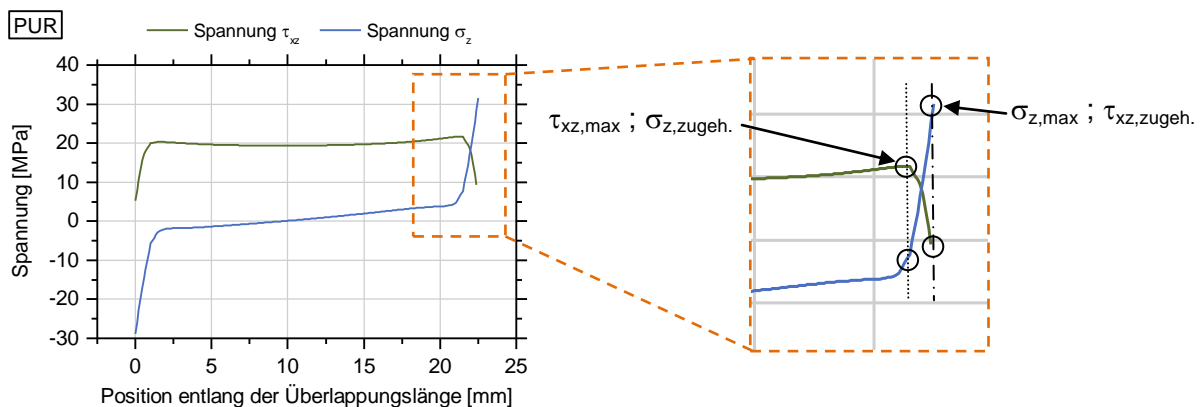


Abbildung 6.31 Auswertung der maximalen Schubspannung (Auswertestelle „Randfern“) sowie der maximalen Normalspannung am Klebfugenrand am Beispiel der Probe P/A/0,5

Mit dieser differenzierenden Auswertung wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die maximalen Spannungskomponenten an unterschiedlichen Positionen entlang des Auswertepfades auftreten. Die Auswertestellen, die im Folgenden bei der Nachrechnung aller durchgeführten KHP-Versuche betrachtet werden, sind in obiger Abbildung 6.31 hervorgehoben.

Nach der beschriebenen Vorgehensweise werden die Spannungszustände infolge jeder einzelnen der experimentell bestimmten Bruchlasten numerisch berechnet und hinsichtlich der zugehörigen lokalen Spannungsmaxima ausgewertet. Dies ergibt für jeden durchgeführten Kreishohlprofilversuch die beiden spezifischen Spannungspaare σ_{\max} ;

$\tau_{\text{zugeh.}}$ sowie τ_{max} ; $\sigma_{\text{zugeh.}}$. Dabei kennzeichnet der Index „max“ die maximale Spannungskomponente, der Index „zugeh.“ weist auf die zugehörigen lokalen Spannungskomponenten hin.

Zur grafischen Darstellung der so berechneten Spannungspaare wird das aus Kapitel 5 bekannte Interaktions-Diagramm verwendet, in dem die Schubspannungen τ_{xz} über den Normalspannungen σ_z aufgetragen sind. Diese Darstellungsform stellt auch die Grundlage für den Vergleich des auf experimentellen und numerischen Untersuchungen an geschäftet geklebten Stahlproben basierenden Bruchkriteriums mit den in diesem Kapitel beschriebenen KHP-Verbindungen dar.

Die numerisch berechneten Interaktionsspannungen sind für alle experimentell bestimmten Bruchlasten der mit PUR gefertigten KHP-Proben in Abbildung 6.32 dargestellt. Jedes Symbol stellt dabei ein Einzelergebnis dar. Es werden sowohl σ_{max} ; $\tau_{\text{zugeh.}}$ als auch τ_{max} ; $\sigma_{\text{zugeh.}}$ ausgewertet. Zur Differenzierung zwischen den einzelnen Prüfreiheiten werden diese durch unterschiedliche Symbole und deren Farbgebung unterschieden.

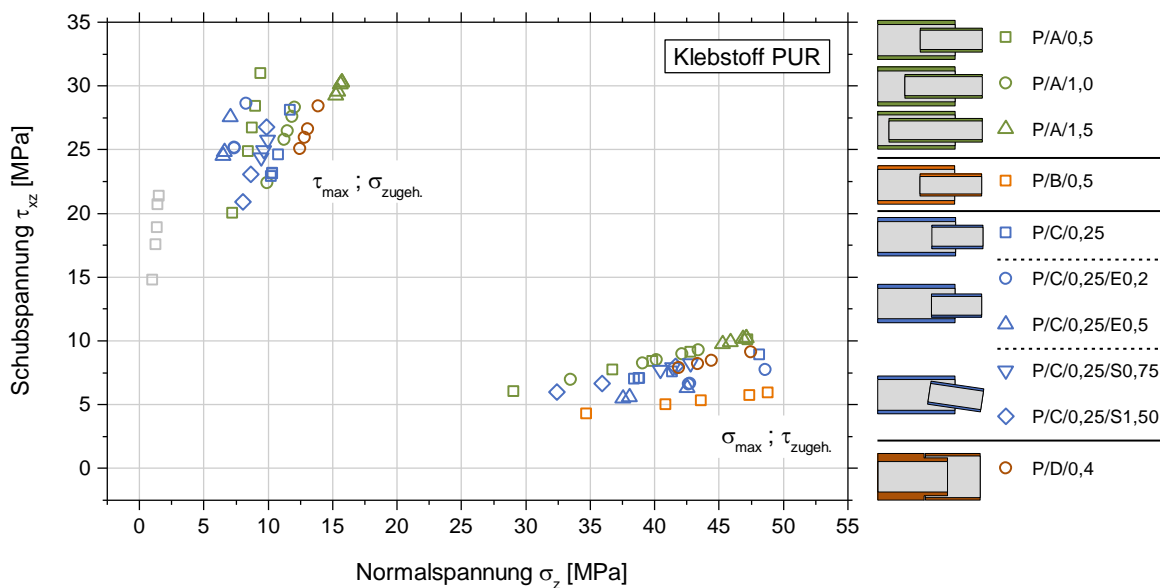


Abbildung 6.32 Auswertung der maximalen Schubspannung ($\tau_{\text{max}} - \sigma_{\text{lokal}}$) sowie der maximalen Normalspannung am Klebfugenrand ($\sigma_{\text{max}} - \tau_{\text{lokal}}$); Klebstoff PUR

Zunächst ist ersichtlich, dass für alle untersuchten geometrischen Variationen der geklebten Kreishohlprofilverbindung sowohl die Auswertung der maximalen Schubspannungen als auch der maximalen Normalspannungen in Kombination mit den jeweils zugehörigen Spannungskomponenten zu je einer Ergebniswolke führt, die im Weiteren quantifiziert wird. Aufgrund der gewählten Vorgehensweise, die sich aus den experimentell bestimmten Traglasten resultierenden Spannungsspitzen numerisch zu bestimmen, zeigt sich die Streuung der Versuchsergebnisse natürlich auch in den numerischen Ergebnissen. Für

den Klebstoff PUR liegen die Schubspannungsmaxima aller KHP-Versuche bei Bruch im Bereich zwischen 20,4 und 31,0 MPa. Die zu den maximalen Schubspannungen gehörenden lokalen Normalspannungen liegen im Bereich von 6,5 bis 15,7 MPa. Ausgenommen von dieser Betrachtung sind die maximalen Schubspannungen der Kreishohlprofilreihe B. Die maximalen Normalspannungen dieser Versuche liegen im Streuband der übrigen Proben, wie in Abbildung 6.32 ersichtlich ist. Die bei Bruch vorhandenen maximalen Schubspannungen liegen jedoch deutlich unter den für die restlichen Proben berechneten Werten, werden damit als nicht versagensinitiierend angesehen und in Abbildung 6.32 ausgegraut. Das Streuband der bei Bruch in der Klebung vorhandenen maximalen Normalspannungen liegt zwischen 29,1 und 47,9 MPa, die zugehörigen Schubspannungen liegen im Bereich von 4,3 bis 10,9 MPa. Außerdem ist in Abbildung 6.32 zu sehen, dass alle ausgewerteten Interaktionsspannungen einer Prüfserie auf einer Ursprungsgeraden liegen.

In Analogie zur Vorgehensweise beim Klebstoff PUR sind in Abbildung 6.33 die numerisch berechneten Spannungsmaxima für die mit EP geklebten KHP-Proben dargestellt. Wiederum wird zwischen den Interaktionsspannungen σ_{\max} ; $\tau_{\text{zugeh.}}$ sowie τ_{\max} ; $\sigma_{\text{zugeh.}}$ unterschieden.

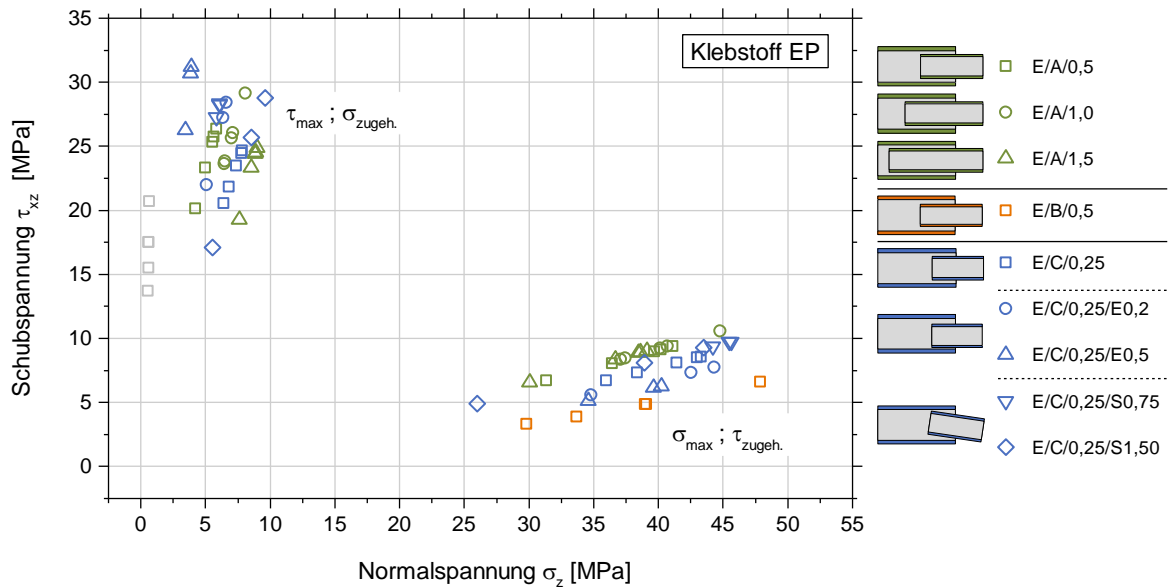


Abbildung 6.33 Auswertung der maximalen Schubspannung ($\tau_{\max} - \sigma_{\text{lok}}$) sowie der maximalen Normalspannung am Klebfugenrand ($\sigma_{\max} - \tau_{\text{lok}}$); Klebstoff EP

Qualitativ zeigt die Auswertung Spannungszustände in den Klebfugen der EP-Proben ein ähnliches Bild wie bei den PUR gefügten Bauteilen. Sowohl die Einzelergebnisse der maximalen Schubspannungen als auch die der maximalen Normalspannungen bilden in Kombination mit den zugehörigen lokalen Spannungskomponenten entsprechende, nachfolgend quantifizierte Punktwolken. Dabei nehmen die maximalen Schubspannungen

Werte von 17,1 bis 31,2 MPa ein, die zugehörigen Normalspannungen liegen in der Größenordnung von etwa 3,4 bis 9,6 MPa. Aufgrund der bereits bei den PUR-Proben beschriebenen Versagensanalyse der Probenserie B wird diese Reihe bei der Betrachtung der maximalen Schubspannungen ausgeklammert. Die maximalen Normalspannungen bei Bruch liegen bei Vernachlässigung des Ausreißers der Reihe E/C/0,25/1,50 zwischen 29,8 und 47,9 MPa. Dabei wirken an der Stelle der maximalen Normalspannung Schubspannungen in der Größenordnung zwischen 3,3 und 10,6 MPa. Tendenziell liegen die Bruchspannungsmaxima der EP geklebten Proben damit etwas unter den berechneten Bruchspannungen der PUR Proben. Hervorgehoben sei bereits an dieser Stelle, dass für beide Klebstoffe die versagensrelevanten Bruchspannungen bei Variation von Überlappungslänge, Klebschichtdicke, Hohlprofilquerschnitt sowie bei definiert eingebrachten Imperfektionen in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 6.7.

Zusätzlich zu den beschriebenen Auswertungen entlang von Pfaden werden für Beanspruchungen in Höhe der Mittelwerte der Bruchlasten aller Probenreihen die gemittelten Elementschub- und Elementnormalspannungen (τ_{xz} und σ_z) sowie das zugehörige Elementvolumen in tabellarischer Form ausgegeben. Diese Daten dienen als Grundlage für die probabilistische Bestimmung der Tragfähigkeit geklebter KHP-Verbindungen. Details hierzu können Abschnitt 7 entnommen werden.

6.7 Diskussion der experimentellen und numerischen Ergebnisse

6.7.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen zur Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen zusammengefasst und diskutiert. Grundlage der Diskussion sind 88 im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Zugversuche an geklebten Kreishohlprofilverbindungen. Die einzelnen Versuchsreihen unterscheiden sich dabei in Überlappungslänge $L_{\bar{u}}$, Klebschichtdicke s_k und Kreishohlprofilquerschnitt sowie durch die verwendeten Klebstoffe PUR und EP. Darüber hinaus ist der Einfluss der planmäßig eingebrachten Imperfektionen Ausmitte der KHP-Schwerelinien und Schiefstellung sowie eines zusätzlichen Temperprozesses der Klebung auf die Tragfähigkeit des Anschlusses untersucht.

Wie anhand der in den Tabellen 6.7 bis 6.13 dokumentierten Versuchsergebnisse deutlich wird, liegen die aus den experimentellen Bruchlasten berechneten Mittelwerte der Nennschubspannungen für alle untersuchten Parameter über 16,7 MPa und erfüllen somit die in Abschnitt 3 dokumentierten Anforderungen im Stahlbau (Mindestwert: 8 MPa). Ein signifikant tragfähigkeitsreduzierender Einfluss infolge größerer Probenabmessungen aber ähnlicher Klebschichtdicke kann nicht festgestellt werden. Hervorgehoben sei die bei der Mehrzahl der Versuchsreihen festgestellte geringe Streuung der Bruchlasten der Kreishohlprofilverbindung. Der über alle Versuchsreihen gemittelte Variationskoeffizient der PUR-geklebten Proben beträgt 9,0 %, für den Klebstoff EP ergibt sich ein Variationskoeffizient von 12,4 %. Vor einer differenzierten Betrachtung des Einflusses der genannten Untersuchungsparameter kann deshalb bereits an dieser Stelle festgehalten werden, dass die nach dem in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Fertigungsprozess hergestellten Kreishohlprofilverbindungen eine reproduzierbar hohe Festigkeit aufweisen.

Insbesondere sei auf die hohen Traglasten der Großbauteilproben der Konfiguration D hingewiesen (Tabelle 6.10). Die Bruchlast der in dieser Arbeit untersuchten Kreishohlprofilverbindung der Prüfreihe P/D/0,4 beträgt bei einer Überlappungslänge von lediglich 110 mm (37 % des Kreishohlprofildurchmessers) im Mittel $1.836,0 \pm 95,6$ kN. Dies entspricht einer Nennschubspannung im Überlappungsbereich von $19,8 \pm 1,0$ MPa. Der Außendurchmesser der Fügeiteile von 298,5 mm (Klebspaltdicke 2,5 mm) liegt in einer Größenordnung, die auch Anwendung im Brückenbau oder als Streben bei Tragstrukturen von Windenergieanlagen findet. Interessant ist die Bestimmung des Ausnutzungsgrades eines angeschlossenen Kreishohlprofils 298,5/12,5 mm aus dem in der Baupraxis in der Regel verwendeten Baustahl S235. Bei einer Beanspruchung in Höhe des Mittelwertes der Bruchlast beträgt der Ausnutzungsgrad des Kreishohlprofils 74 %. Eine höhere Ausnutzung kann leicht durch die Vergrößerung des Überlappungsbereichs erreicht werden.

Nicht zuletzt die Ergebnisse der Großbauteilversuche zeigen das Potential des Fügeverfahrens Kleben für Anwendungen im Stahlbau.

Zur Analyse des Einflusses der untersuchten Parameter auf die Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung sind nachfolgend die sich aus den experimentellen Traglasten ergebenden Nennschubspannungen sowie die numerisch berechneten Spannungszustände beim Versagen der Verbindung für ausgewählte Prüfreiheiten zusammengestellt. Im Detail werden drei Kenngrößen betrachtet. Zum Vergleich der experimentellen Tragfähigkeiten werden zunächst die aus den Bruchlasten und den jeweiligen Fügefläche am innenliegenden Kreishohlprofil berechneten Nennschubspannungen auf den Mittelwert der Nennschubspannung der Referenzprüfserie bezogen. Die Referenzprüfserie ist in den nachfolgenden Abbildungen jeweils am linken Abbildungsbereich dargestellt und entsprechend gekennzeichnet. Diese normierte Darstellung erlaubt einen Vergleich des Einflusses geometrischer Parameter auf die Traglast und gibt die resultierende Änderung anschaulich wieder.

Des Weiteren sind die beim spröden Bruch der Verbindung in der Klebfuge vorhandenen maximalen Interaktionsspannungen als Grundlage für die Versagensanalyse von Interesse. Die in Abbildung 6.33 (Klebstoff PUR) sowie Abbildung 6.34 (Klebstoff EP) dokumentierten Interaktionsspannungen bei Bruch der Klebverbindung werden nachfolgend zur anschaulichen Analyse als Skalare (maximale Schub- sowie maximale Normalspannung) dargestellt. Auch die Spannungsmaxima sind auf den Mittelwert der zugehörigen Spannungskomponente der Referenzprüfserie normiert. Für alle Kenngrößen sind sowohl die Einzelergebnisse als auch die Mittelwerte der jeweiligen Prüfreihe abgebildet.

6.7.2 Einfluss der Klebschichtdicke

Zur Diskussion des Einflusses der Klebschichtdicke auf die axiale Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen dienen die Prüfreiheiten A/0,5 und B/0,5. Hierzu sind die sich aus den experimentell bestimmten Tragfähigkeiten ergebenden normierten Nennspannungen (τ_{Nenn}) für die betrachteten Klebschichtdicken in Abbildung 6.34 (Klebstoff PUR) sowie Abbildung 6.35 (Klebstoff EP) dargestellt. Ergänzt werden die Abbildungen durch die aus der experimentellen Bruchlast numerisch bestimmten maximalen Schubspannungen (τ_{max}) und Normalspannungen (σ_{max}) ebenfalls in normierter Darstellung.

Die der Diskussion des Einflusses der Klebschichtdicke zu Grunde liegenden Probekörper setzen sich bei gleichem Querschnitt des Innenbauteils ($D/t = 42,5/5,0$ mm) aus unterschiedlichen außenliegenden Profilen zusammen (A: 60,3/6,5 mm; B: 70,0/8,0 mm). Dies führt zu nominellen Klebspaltdicken von 2,5 und 5,8 mm. Die Überlappungslängen beider Proben liegen in einer vergleichbaren Größenordnung (22,5 bzw. 23,5 mm).

Der Vergleich der auf den Mittelwert der Prüfreihe mit Klebschichtdicke 2,5 mm normierten Nennspannungen zeigt für beide Klebstoffe, dass die Tragfähigkeit mit größer werdender Klebschichtdicke abnimmt (PUR: Abbildung 6.34, EP: Abbildung 6.35).

Bei Gegenüberstellung der Mittelwerte der beiden Prüfreihe wird deutlich, dass die bezogene Tragfähigkeit der PUR-Proben infolge der um den Faktor 2,3 dickeren Klebschicht auf 74 % abnimmt (Abbildung 6.34). Für den Klebstoff EP ist im Mittel eine Reduktion der bezogenen Tragfähigkeit auf 69 % festzustellen (Abbildung 6.35). Dieser für Dickschichtklebungen festgestellte Zusammenhang deckt sich mit den Untersuchungen von (ALTHOF 1966), der jedoch Kreishohlprofilverbindungen mit im Bauwesen nicht realisierbaren Klebschichtdicken von 0,05 bis 0,25 mm untersuchte.

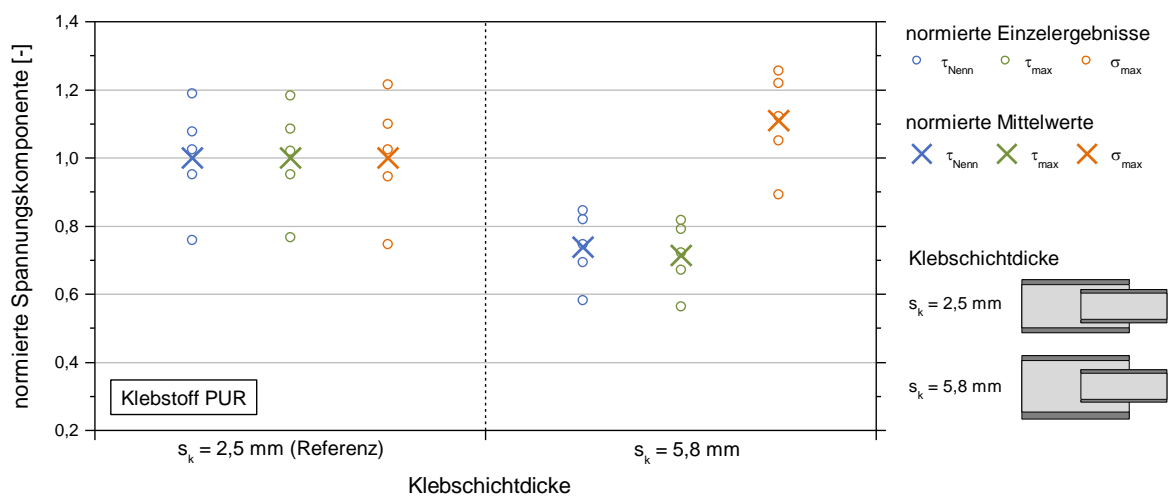


Abbildung 6.34 Auswertung der maximalen Nennspannungen (τ_{Nenn}) sowie der numerisch bestimmten maximalen Schubspannung (τ_{max}) und Normalspannung (σ_{max}) bei unterschiedlichen Klebschichtdicken; auf den Mittelwert der Spannungskomponente der Referenzreihe normierte Darstellung; Klebstoff PUR

Zur Analyse des Versagens der geklebten Verbindung werden im weiteren Verlauf die aus den experimentellen Bruchlasten numerisch berechneten maximalen Schubspannungen τ_{max} betrachtet. Die maximale Schubspannung der Proben mit Schichtdicke 5,8 mm für den Klebstoff PUR beträgt im Mittel 71 % der Schubspannung der Proben mit Schichtdicke 2,5 mm. Für die EP-Proben beträgt das Verhältnis 68 %. Die maximalen Schubspannungen bei Bruch der Probe sind bei größerer Schichtdicke folglich signifikant geringer. Die ausschließliche Auswertung der maximalen Schubspannung erklärt das Versagen der Proben mit unterschiedlicher Klebschichtdicke also zunächst nicht; die maximale Schubspannung kann daher als nicht für das Versagen maßgebend beurteilt werden.

Die Betrachtung der Mittelwerte der aus den experimentellen Bruchlasten resultierenden maximalen Normalspannungen zeigt beim Vergleich beider Klebstoffe, dass diese in der gleichen Größenordnung liegen. Die Mittelwerte der maximalen Normalspannung beider

Schichtdicken unterscheiden sich für den Klebstoff PUR um lediglich 10 %; beim Klebstoff EP beträgt die Abweichung infolge der um den Faktor zwei unterschiedlich dicken Klebspalte im Mittel nur 4 %.

Unter Berücksichtigung der Streuung der Einzelergebnisse kann die Interaktionsspannung, bestehend aus der maximalen Normalspannung orthogonal zur Klebfuge und der zugehörigen Schubspannung, auf Basis dieser Untersuchungen somit als für das Versagen der geklebten Verbindung maßgebend bezeichnet werden.

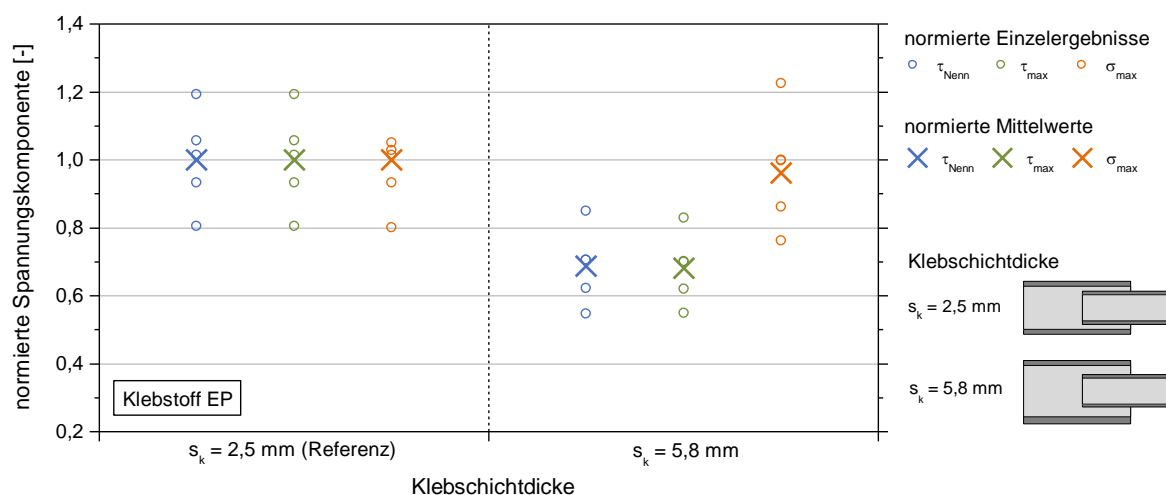


Abbildung 6.35 Auswertung der maximalen Nennspannungen (τ_{Nenn}) sowie der numerisch bestimmten maximalen Schubspannung (τ_{max}) und Normalspannung (σ_{max}) bei unterschiedlichen Klebschichtdicken; auf den Mittelwert der Spannungskomponente der Referenzreihe normierte Darstellung; Klebstoff EP

Nicht eingegangen wird an dieser Stelle auf in der Literatur diskutierte dickenabhängige Klebschichteigenschaften (z.B. Verformungsvermögen, Schwindspannungen, Fertigungsimperfectionen), die gemäß (HABENICHT 2009) die Verbindungsfestigkeit beeinflussen können.

6.7.3 Einfluss der Überlappungslänge

Der Einfluss der Überlappungslänge wird auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen der Kreishohlprofilkonfiguration A mit Überlappungslängen von 22,5, 45,0 und 67,5 mm diskutiert. Die nominelle Klebschichtdicke dieser Serie beträgt 2,5 mm.

Bei Betrachtung der normierten Nennspannungen der PUR-Ergebnisse zeigt sich zunächst, dass die auf die Referenzüberlappungslänge (22,5 mm) bezogene Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung mit zunehmendem Überlapp abnimmt (Abbildung 6.36). Der Vergleich der Mittelwerte der normierten Nennspannungen macht deutlich, dass die bezogene Tragfähigkeit bei einer Verdoppelung der Überlappungslän-

ge (45,0 mm) auf 87 %, bei dreifacher Überlappungslänge (67,5 mm) auf 85 % abfällt. In anderen Worten ausgedrückt bedeutet dies, dass die experimentelle Tragfähigkeit des geklebten Anschlusses bei doppelter Überlappung um den Faktor 1,74, bei dreifacher Überlappung um den Faktor 2,54 ansteigt (siehe auch Tabelle 6.7). Außerdem ist festzustellen, dass die Streuung der Tragfähigkeit mit zunehmender Überlappungslänge geringer wird. Die Schätzwerte der bezogenen Standardabweichung betragen beim Klebstoff PUR für die drei betrachteten Überlappungslängen 16 %, 9 % und 2 %, für den Klebstoff EP 14 %, 9 % und 8 %. Dies ist insbesondere bei der Bestimmung der für die Bemessung relevanten 5 %-Quantile von Interesse, da die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit bei geringer Streuung höher liegen.

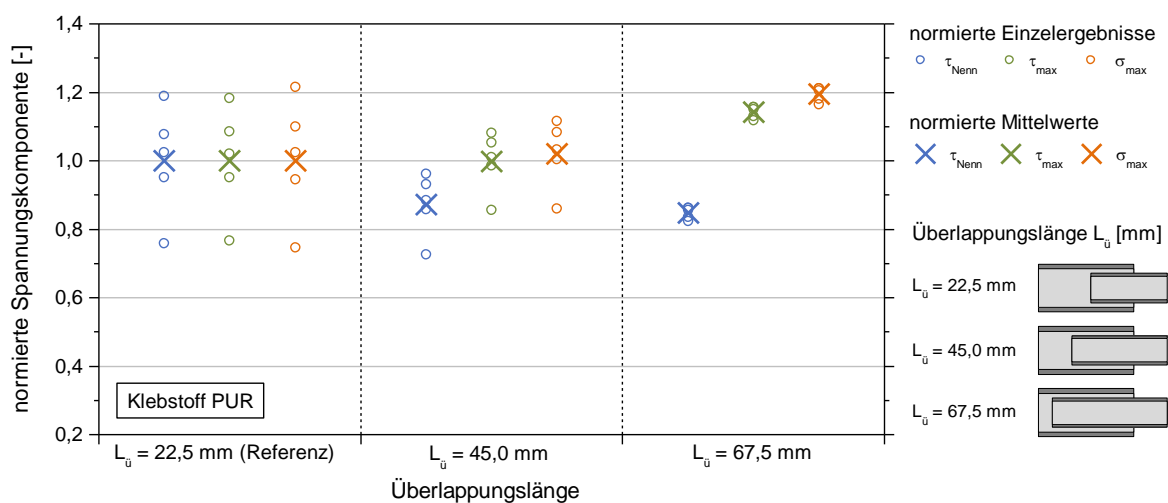


Abbildung 6.36 Auswertung der maximalen Nennspannungen (τ_{Nenn}) sowie der numerisch bestimmten maximalen Schubspannung (τ_{max}) und Normalspannung (σ_{max}) bei unterschiedlichen Überlappungslängen; auf den Mittelwert der Spannungskomponente der Referenzreihe normierte Darstellung; Klebstoff PUR

Die Auswertung der aus den experimentell bestimmten Bruchlasten resultierenden normierten Nennspannungen der EP-Kreishohlprofilproben zeigt einen vergleichbaren Zusammenhang (Abbildung 6.37). Die auf die den Mittelwert der Tragfähigkeit bei der Referenzüberlappungslänge (22,5 mm) bezogene Tragfähigkeit der EP-Proben beträgt bei einer Verdoppelung des Überlapps 98 %, bei dreifachem Überlapp 82 %. Der Mittelwert der Bruchlast steigt also bei doppelter Überlappungslänge um den Faktor 1,95, bei dreifacher Überlappungslänge um den Faktor 2,46 an. Für beide Klebstoffe lässt sich folglich festhalten, dass kein proportionaler Zusammenhang zwischen Überlappungslänge und Tragfähigkeit besteht. Die Verbindungstragfähigkeit steigt bei zunehmender Überlappungslänge unterproportional an.

Diese Feststellung deckt sich mit den Untersuchungen von (ALTHOF 1966), der allerdings im Bauwesen nicht ausführbare Dünnschichtklebungen in der Größenordnung von 0,05 bis 0,25 mm betrachtete. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Schichtdicken

liegen aufgrund der Maßtoleranzen und Randbedingungen des Bauwesens (Abschnitt 3) in der Größenordnung von 2,5 bis 5,8 mm.

Zur weiteren Analyse des Zusammenhangs zwischen Verbindungstragfähigkeit und Überlappungslänge werden die maximalen Spannungskomponenten τ_{\max} und σ_{\max} der einzelnen Prüfreiheiten verglichen. Für die EP-Proben zeigt sich, dass die bezogenen Mittelwerte der maximalen Schubspannungen für alle Überlappungslängen um höchstens 7 % vom Mittelwert der Referenzreihe abweichen (Abbildung 6.37). Bei Berücksichtigung der Streuung der Einzelergebnisse kann dieser Unterschied als vernachlässigbar bezeichnet werden (Schätzwerte der normierten Standardabweichungen der einzelnen Reihen: 9 – 10 %).

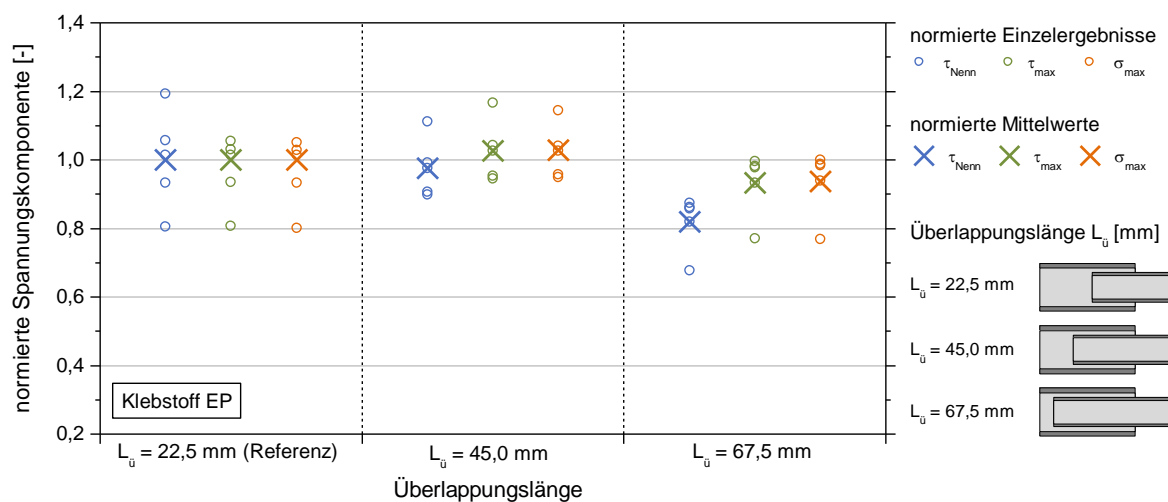


Abbildung 6.37 Auswertung der maximalen Nennspannungen (τ_{Nenn}) sowie der numerisch bestimmten maximalen Schubspannung (τ_{\max}) und Normalspannung (σ_{\max}) bei unterschiedlichen Überlappungslängen; auf den Mittelwert der Spannungskomponente der Referenzreihe normierte Darstellung; Klebstoff EP

Ein ähnliches Bild ist für die maximalen Normalspannungen festzuhalten. Die Mittelwertabweichung dieser normierten Spannungskomponente liegt für die EP-Proben bei maximal 6 % (normierte Standardabweichungen: 8 - 10 %). Für die Auswertung der Maximalspannungen bei den mit dem Klebstoff PUR gefügten Kreishohlprofilproben zeigt sich ein vergleichbarer Zusammenhang (Abbildung 6.36). Die Abweichungen der Mittelwerte der maximalen normierten Schubspannungen betragen für die untersuchten Überlappungslängen maximal 14 % (normierte Standardabweichungen: 2 – 16 %), die Mittelwerte der maximalen Normalspannungen variieren um höchstens 19 % (Standardabweichungen: 2 – 18 %).

Der festgestellte unterproportionale Zusammenhang zwischen Überlappungslänge und Tragfähigkeit kann somit mit der ungleichmäßigen Spannungsverteilung in der Klebfuge mit versagensinitiiierenden Spannungskonzentrationen an den Überlappungsenden erklärt werden (vgl. Abschnitt 6.6.3 sowie Abbildung 6.26).

6.7.4 Einfluss von geometrischen Imperfektionen

Bei der klebtechnischen Fertigung von Kreishohlprofilverbindungen müssen verschiedene Imperfektionen berücksichtigt werden. Zunächst weisen die Fügeteile normativ zulässige Maßtoleranzen auf (DIN EN 10210-2), die Dickschichtklebungen erfordern (siehe Abschnitt 3). Der quantitative Einfluss dieser Toleranzen auf die aus den Fügeteilquerschnitten resultierende Klebspaltdicke ist in Abschnitt 6.3.3 dokumentiert.

Neben den Maßtoleranzen sind weitere aus der Fertigung der Verbindung resultierende Imperfektionen zu betrachten. Diese sind die Ausmitte der Kreishohlprofilschwerelinien sowie eine Schiefstellung der zu verbindenden Bauteile zueinander. Zur Diskussion des Einflusses der genannten Imperfektionen werden die experimentellen und numerischen Untersuchungen der Kreishohlprofilgeometrie C herangezogen. Alle Proben dieser Konfiguration weisen Überlappungslängen von 27 mm ($0,25 \cdot D_{k,m}$) und Klebschichtdicken von 2,8 mm auf. Als Referenz dient hierbei die ohne planmäßige Imperfektionen gefertigte Prüfreihe C/0,25.

Zunächst wird der Einfluss der Imperfektion Ausmitte der Schwerelinien beschrieben. Für die mit dem Klebstoff PUR gefertigten Kreishohlprofilproben zeigt Abbildung 6.38, dass eine Ausmitte der Schwerelinien mit einem Betrag von 20 % der Klebschichtdicke nicht zu einer Reduktion der Tragfähigkeit der Kreishohlprofilverbindung führt. Die große, auch mit bloßem Auge sichtbare Ausmitte von 50 % der Klebschichtdicke reduziert die Tragfähigkeit bei Vergleich der Mittelwerte auf 88 %. Hervorgehoben sei an dieser Stelle jedoch das verhältnismäßig geringe Maß der Reduktion der Tragfähigkeit.

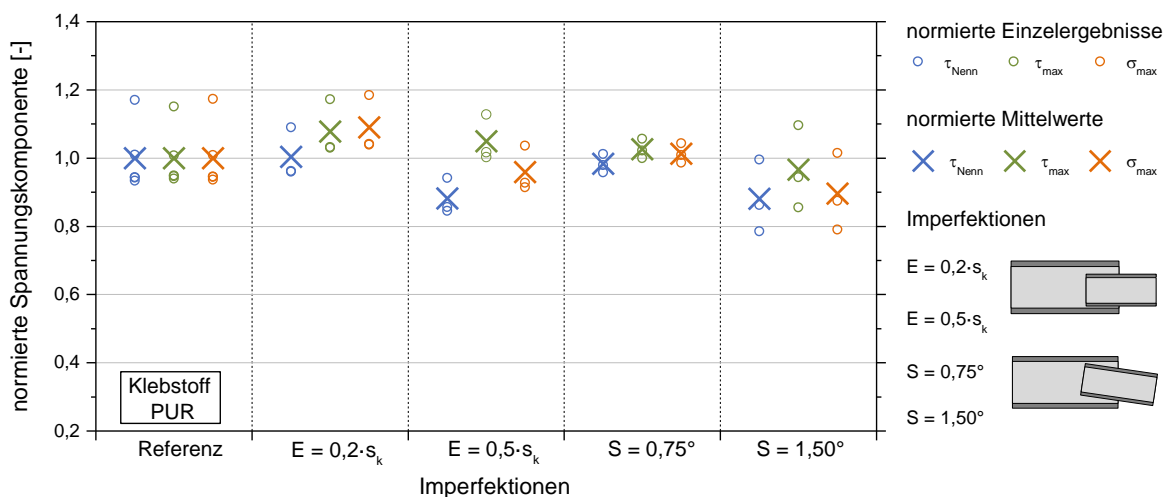


Abbildung 6.38 Auswertung der maximalen Nennspannungen (τ_{Nenn}) sowie der numerisch bestimmten maximalen Schubspannung (τ_{max}) und Normalspannung (σ_{max}) zur Bestimmung des Einflusses geometrischer Imperfektionen; auf den Mittelwert der Spannungskomponente der Referenzreihe normierte Darstellung; Klebstoff PUR

Weiterhin ist der Einfluss der Imperfektion Schiefstellung untersucht. Bei den Proben dieser Prüfreihe ist das Innenbauteil um $0,75^\circ$ bzw. $1,50^\circ$ schiefgestellt. Die Größe der letztgenannten Imperfektion liegt oberhalb der im Bauwesen üblicherweise zulässigen Abweichungen und ist mit bloßem Auge sichtbar.

Die Schiefstellung von $0,75^\circ$ führt für die PUR-Proben zu einer vor dem Hintergrund der Streuung der Einzelergebnisse vernachlässigbaren Abminderung der Tragfähigkeit auf 98 %. Bei einer Schiefstellung von $1,50^\circ$ ist bei Vergleich der Mittelwerte eine Abminderung der Tragfähigkeit auf 88 % feststellbar.

Ein entsprechender Zusammenhang ist für die Tragfähigkeit der imperfekten, mit dem Klebstoff EP gefügten Kreishohlprofilproben festzuhalten (Abbildung 6.39). Bei Betrachtung der Mittelwerte der Referenzprüfreihe sowie der Prüfreihe mit einer Ausmitte der Schwerelinien von 20 % der Klebschichtdicke zeigt sich kein Rückgang der Tragfähigkeit. Infolge der größeren Exzentrizität ($0,5 \cdot s_k$) nimmt die Tragfähigkeit im Mittel auf 95 % ab.

Durch eine Schiefstellung um $0,75^\circ$ ist im Vergleich zur Referenzprüfserie wiederum keine Reduktion der Tragfähigkeit zu beobachten, eine Schiefstellung von $1,50^\circ$ führt im Mittel zu einer Abnahme der Verbindungstragfähigkeit um 92 % (Abbildung 6.39).

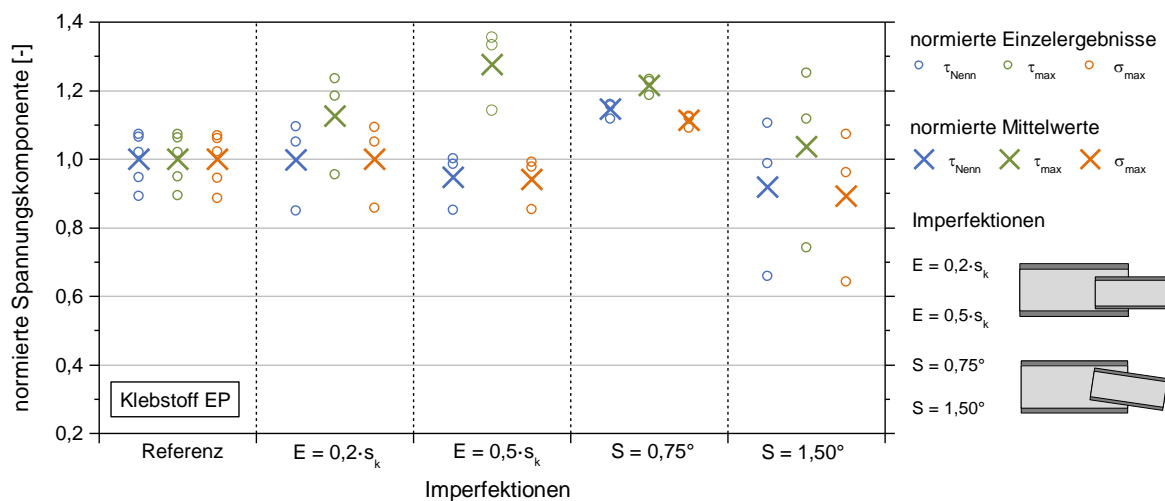


Abbildung 6.39 Auswertung der maximalen Nennspannungen (τ_{Nenn}) sowie der numerisch bestimmten maximalen Schubspannung (τ_{max}) und Normalspannung (σ_{max}) zur Bestimmung des Einflusses geometrischer Imperfektionen; auf den Mittelwert der Spannungs Komponente der Referenzreihe normierte Darstellung; Klebstoff EP

Auch für die Proben der Kreishohlprofilkonfiguration C sind die aus den experimentellen Bruchlasten resultierenden maximalen Spannungskomponenten ausgewertet und in Abbildung 6.38 (PUR) und Abbildung 6.39 (EP) zusammengefasst. Die Mittelwertvariation der maximalen bezogenen Schubspannungen liegt für die PUR-Proben bei 3 bis 8 %, die Variation der maximalen Normalspannungen beträgt 1 - 10 %. Unter Berücksichtigung

der Streuung der Einzelergebnisse zeigt sich auch für die Auswertung der mit planmäßigen Imperfektionen gefertigten Klebverbindungen, dass die Maximalspannungen in vergleichbaren Größenordnungen liegen. Entsprechendes gilt für die Ergebnisse der EP-Proben. Die Mittelwertvariation der normierten maximalen Schubspannungen betragen 4 bis 28 %, die der maximalen Normalspannungen 6 bis 11 %.

Somit lässt sich festhalten, dass sich sowohl die mit PUR als auch die mit EP geklebten Kreishohlprofilverbindungen gegenüber den Imperfektionen Ausmitte der Schwerelinie und Schiefstellung tolerant zeigen. Für die kleinere Imperfektion ist bei beiden Klebstoffen zunächst keine Reduktion der Tragfähigkeit feststellbar. Wird zur Überprüfung der Grenze der Toleranz die Imperfektion weiter bis zu einem auch für das Bauwesen unüblich hohen Maß vergrößert, ist eine Reduktion der Tragfähigkeit feststellbar. Die Tragfähigkeit der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten imperfekten Verbindungen wird jedoch in der Prüfserie mit der größten Abminderung um nur 12 % reduziert. Dieses gegenüber Fertigungsimperfektionen sehr tolerante Verbindungsverhalten ist im Hinblick auf die baupraktischen Fertigungsrandbedingungen als besonders vorteilhaft einzustufen.

6.7.5 Einfluss eines zusätzlichen Temperprozesses

Die Vernetzung von Klebstoffen kann durch eine Wärmebehandlung (Temperprozess) beschleunigt werden. Dies bringt auch für Anwendungen im Bauwesen Vorteile hinsichtlich der Bauzeiten mit sich. Zudem geht bei den verwendeten Klebstoffen eine Erhöhung der Glasübergangstemperatur mit einer zusätzlichen Wärmebehandlung einher (siehe Abschnitt 4).

Aus diesen Gründen wird nachfolgend der Einfluss eines Temperprozesses auf die Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung diskutiert. Basis hierfür sind die einen Tag nach der Klebung für 39 min bei 80 °C im Wärmeschrank getemperten Proben der Reihe C/0,25/T. Zum Vergleich dienen die bei Raumtemperatur gehärteten Proben der Reihe C/0,25.

Zunächst zeigt sich beim Vergleich der Mittelwerte der Tragfähigkeit der getemperten PUR-Verbindungen und der ungetemperten Versuchsreihe, dass bei Berücksichtigung der Streuung der Versuchsergebnisse keine signifikante Steigerung der Tragfähigkeit festzustellen ist (Abbildung 6.40). Deutlich wird jedoch die zunehmende Streuung der Versuchsergebnisse nach einem Temperprozess. Die Standardabweichung der Bruchlast ist bei den getemperten Proben um den Faktor 1,4 größer als bei den nicht getemperten Verbindungen (siehe Tabelle 6.9).

Die Tragfähigkeit der einem zusätzlichen Temperprozess unterzogenen EP-Kreishohlprofilverbindungen nimmt im Vergleich zu den bei Raumtemperatur gehärteten Referenzproben im Mittel um 10 % ab (Abbildung 6.40). Zusätzlich ist ähnlich den PUR-Proben eine größere Streuung der Versuchsergebnisse feststellbar. Die geschätzte Standardabweichung der experimentell bestimmten Bruchlasten der getemperten Proben ist um den Faktor 2,2 größer als die Standardabweichung der ungetemperten Klebverbindungen (siehe Tabelle 6.13). Die Abnahme der Tragfähigkeit kann vor allem auf den durch den Tempervorgang induzierten Eigenspannungszustand zurückgeführt werden (UMMENHOFER ET AL. 2015).

Vor diesem Hintergrund ist ein zusätzlicher Temperprozess hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Tragfähigkeit trotz der oben genannten Vorteile kritisch zu sehen.

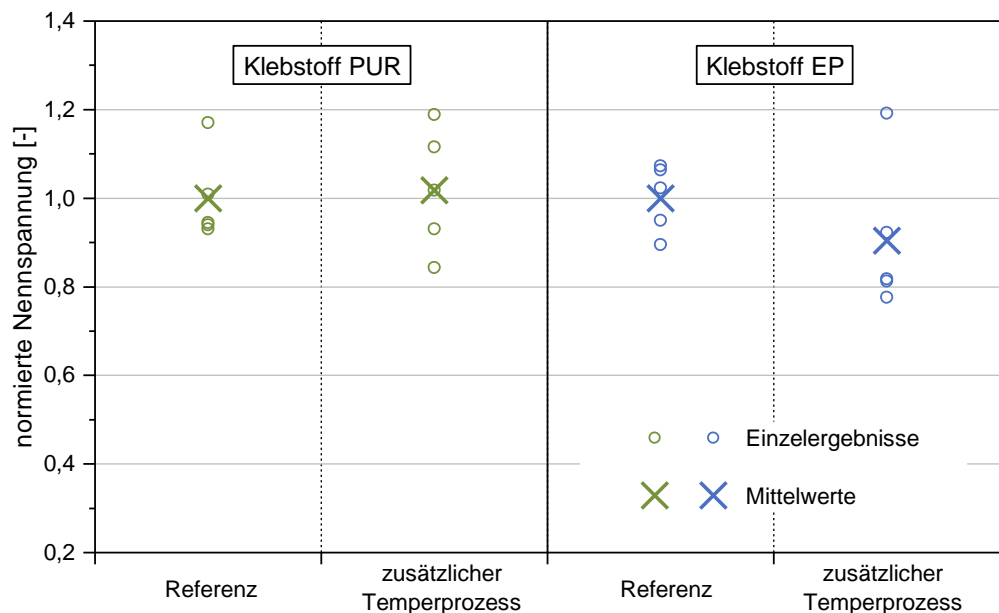


Abbildung 6.40 Einfluss eines zusätzlichen Temperprozesses auf die Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen; auf den Mittelwert der ungetemperten Probenreihe normierte Darstellung; Klebstoffe PUR (links) und EP (rechts)

6.8 Zusammenfassung

Auf Basis der in diesem Abschnitt dokumentierten experimentellen und numerischen Untersuchungen lässt sich zusammenfassen:

- Geklebte Kreishohlprofilverbindungen können bei Fertigung nach dem in dieser Arbeit beschriebenen Procedere mit reproduzierbarer Tragfähigkeit hergestellt werden (Variationskoeffizient über alle KHP-Prüfreihen gemittelt: 10,6 %).
- Die geklebten Kreishohlprofilverbindungen weisen bei Verwendung der Klebstoffe PUR und EP im axialen Zugversuch ein nahezu lineares Last-Verformungsverhalten auf und versagen bei Erreichen der Bruchlast spröde.
- Die Analyse der Bruchflächen zeigt eine Mischform aus Adhäsionsbruch und substratnahem Kohäsionsbruch deutlich überwiegend auf der Seite des innenliegenden Kreishohlprofils.
- Die aus den experimentell bestimmten Bruchlasten resultierenden Nennschubspannungen in den geklebten Kreishohlprofilverbindungen liegen für alle untersuchten Parameter über 16,7 MPa und damit über den in Abschnitt 3 dokumentierten mechanischen Anforderungen an Klebverbindungen im Stahlbau (Mindestwert 8 MPa).
- Hervorzuheben ist die Tragfähigkeit geklebter Großbauteile. Die Bruchlast der Kreishohlprofilverbindung mit einem Außendurchmesser von 298,5 mm beträgt bei einer Überlappungslänge von lediglich 110 mm ($0,4 \cdot D_{k,m}$) im Mittel $1.836,0 \pm 95,6$ kN. Bei einem angeschlossenen Kreishohlprofil $D/t = 298,5/12,5$ mm aus dem im Bauwesen üblichen Baustahl S235 beträgt der Ausnutzungsgrad infolge des Mittelwertes der Bruchlasten 74 %. Eine höhere Ausnutzung ist leicht durch die Vergrößerung des Überlappungsbereiches zu erreichen.
- Die Analyse der aus den experimentellen Bruchlasten mit Hilfe numerischer Berechnungen bestimmten Maximalspannungen zeigt, dass die Interaktionsspannung bestehend aus maximaler Normalspannung orthogonal zur Klebfuge und der zugehörigen Schubspannung für das spröde, schlagartige Versagen der geklebten Verbindung in der Regel maßgebend ist.
- Das Verhältnis von Überlappungslänge und Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung ist unterproportional. Dies ist auf die ungleichmäßige Spannungsverteilung in der Klebschicht mit Spannungskonzentrationen an den Klebfugenenden zurückzuführen.
- Bei der um den Faktor 2,3 größeren Klebschichtdicke (5,8 mm / 2,5 mm) nimmt die Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung um maximal 31 % ab. Dies kann auf den größeren Abstand zwischen den Wandungen des innen- und außenlie-

genden Kreishohlprofils und die daraus resultierenden größeren Normalspannungen orthogonal zur Klebfläche zurückgeführt werden.

- Die geklebten Kreishohlprofilverbindungen zeigen sich zunächst tolerant gegenüber der Herstellungsimperfektionen Ausmitte der Schwerelinie sowie Schiefstellung. Große geometrische Abweichungen führen zu einer Reduktion der Tragfähigkeit. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen wird die Tragfähigkeit jedoch um maximal 12 % abgemindert.

Ein zusätzlicher Temperprozess führt beim Klebstoff PUR zu keiner signifikanten Steigerung der Festigkeit der geklebten Verbindung. Die Tragfähigkeit der EP-Verbindung nimmt im Mittel ab. Festzustellen ist bei beiden Klebstoffen eine deutlich größere Streuung der Tragfähigkeit der einem zusätzlichen Temperprozess unterzogenen Kreishohlprofilverbindungen (Zunahme des Variationskoeffizienten um 83 %). Hinsichtlich der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen ist das thermische Nachhärten folglich kritisch zu sehen.

Prognose der Tragfähigkeit

7.1 Ansatz und Zielsetzung

Für die Realisierung geklebter Kreishohlprofilverbindungen im Stahlbau ist es von zentraler Bedeutung, die Tragfähigkeit des Anschlusses zuverlässig rechnerisch ermitteln zu können. Dies ermöglicht den Verzicht auf aufwändige und teure Bauteilversuche.

Ziel dieses Kapitels ist deshalb, die Tragfähigkeit der unterschiedlichen in Abschnitt 6 betrachteten Kreishohlprofilklebungen rechnerisch zu prognostizieren und anhand der experimentell bestimmten Tragfähigkeiten zu validieren. Grundlage der Tragfähigkeitsprognose sind die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Klebstoff (Abschnitt 4) sowie der Verbindung zwischen Stahl und Klebstoff (Versagenskriterien nach Abschnitt 5).

Zur Prognose der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilanschlüsse werden drei unterschiedliche Ansätze verfolgt.

- Zunächst wird die Eignung des im Bauwesen häufig angewendeten Nennspannungskonzeptes diskutiert.
- Nichtlineare numerische Berechnungen des Spannungszustandes in der Klebfuge stellen die Grundlage für eine Tragfähigkeitsprognose nach dem Konzept lokaler Maximalspannungen dar.
- Zusätzlich wird die Tragfähigkeit unter Anwendung eines probabilistischen Berechnungsmodells bestimmt.

Die Analyse des Versagens begründet die Wahl der gewählten Konzepte zur Prognose der Tragfähigkeit. Denn charakteristisch für alle in Abschnitt 6 dokumentierten Kreishohlprofilverbindungen ist das spröde, schlagartige Versagen. Die Verbindungen weisen einen nahezu linearen Anstieg der Traglast bei zunehmender Verformung bis zum Sprödbbruch auf (Abbildungen 6.18 und 6.20). Gleiches gilt für das Versagen der unter verschiedenen Schäftungswinkeln geklebten Stahlproben (Abbildungen 5.8 und 5.11) sowie die im uniaxialen Zugversuch geprüften Substanzproben der verwendeten Klebstoffe PUR und EP (Abbildung 4.2 und 4.3). Daher sind Konzepte zur Bemessung spröde versagender Verbindungen erforderlich.

7.2 Tragfähigkeitsprognose auf Basis von Nennspannungen

Die Bemessung von Verbindungen auf Basis von Nennspannungen stellt den Regelfall bei der rechnerischen Auslegung von Tragwerken im Stahlbau dar. So werden beispielsweise Schweißnähte nach (DIN EN 1993-1-8; DIN EN 1993-1-8/NA) auf Basis von Nennspannungen ausgelegt. Hierzu werden die einwirkenden Beanspruchungen durch die rechnerischen Schweißnahtquerschnittswerte dividiert und die daraus resultierenden einwirkenden Spannungen einer Grenzschnitzspannung gegenübergestellt. Lediglich bei Kehlnahtanschlüssen mit langen Schweißnähten erfolgt zur Berücksichtigung des nichtlinearen Spannungsverlaufs in der Schweißnaht eine Abminderung der rechnerischen Tragfähigkeit (UNGERMANN ET AL. 2015). Aufgrund dieser Vorgehensweise ist in vielen Bereichen des Stahlbaus die Dimensionierung von Bauteilen und Anschlüssen auf Basis von Nennspannungen durch vergleichsweise einfache Handrechnungen möglich. Es ist häufig keine numerische Simulation des Bauteils oder der Verbindung erforderlich. Ermöglicht wird dies aber nicht zuletzt durch die spezifischen mechanischen Eigenschaften von Baustählen und den verwendeten Schweißzusatzwerkstoffen. Diese weisen eine ausgeprägte Streckgrenze sowie eine hohe Duktilität auf und sind somit in der Lage, auftretende Spannungskonzentrationen durch Plastizierungen zu kompensieren (vgl. Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus durchgeführten Zugversuchen an Baustählen in Abschnitt 6) (UNGERMANN ET AL. 2015).

In Bezug auf die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Klebverbindungen stellt sich der nennspannungsbasierte Bemessungsansatz jedoch als nicht zielführend heraus. Dies zeigt nicht zuletzt die in Abschnitt 5.4 experimentell bestimmte Tragfähigkeit der unter dem Schäftungswinkel 0° geklebten Stahlproben (Prüfreihen 0°_k bzw. 0°) mit kurzer und langer Überlappungslänge (5 bzw. 37 mm). Aus der Tragfähigkeit der Proben mit langem Überlapp resultiert eine geringere rechnerische Nennschubspannung bei Bruch (PUR: 18,8 MPa) als bei den entsprechenden Proben mit kurzer Überlappungslänge (PUR: 26,2 MPa) (siehe Abschnitt 5.4). Dies ist auf die größeren, für das spröde Versagen maßgebenden

Spannungskonzentrationen bei längerer Überlappung zurückzuführen, die durch die Berechnung von Nennspannungen jedoch nicht erfasst werden (WOOLEY UND CARVER 1971). Zudem zeigt die numerische Analyse des Spannungszustandes in der Klebfuge Normalspannungsanteile orthogonal zur Klebfuge (siehe Abschnitt 5.5.4), die per Handrechnung nicht bestimmt werden können. Außerdem gehen Einflüsse aus Querdehnung, Fügeiteilverformung (z. B. Aufweitung der Kreishohlprofile unter axialer Belastung) nicht in die Berechnung des Spannungszustandes in der Klebfuge ein.

Aus den oben genannten Gründen wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit auf eine Prognose der Tragfähigkeit geklebter KHP-Verbindungen auf der Basis von Nennspannungen trotz der häufigen Anwendung im Bauwesen verzichtet.

7.3 Tragfähigkeitsprognose nach dem Konzept lokaler Spannungen

7.3.1 Prinzipielle Vorgehensweise

Die Grundlage der Prognose der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen nach dem Konzept lokaler Spannungen stellt der Vergleich von Einwirkung und Widerstand dar. Zur Bestimmung der einwirkenden Spannungen dienen nichtlineare numerische Berechnungen (siehe Abschnitt 5.5 und 6.6). Wesentlich dabei ist neben der realitätsnahen Abbildung der geometrischen Randbedingungen die Implementierung des nichtlinearen, auf den Ergebnissen der Zugversuche an Substanzproben basierenden Werkstoffverhaltens der Klebstoffe (Abschnitt 4.5.3). Aufgrund des spröden, schlagartigen Versagens der Klebverbindung wird das Erreichen einer lokalen Spannungsspitze als Auslöser des Bruchs angesehen. Zur Bestimmung der Traglast der geklebten Verbindung wird die Bauteilbeanspruchung im numerischen Modell schrittweise gesteigert. Dabei wird in jedem Lastschritt der aus der Beanspruchung resultierende Spannungszustand in der Klebfuge ausgewertet und die spezifischen Interaktionsspannungen (σ_{\max} ; $\tau_{\text{zugeh.}}$) sowie (τ_{\max} ; $\sigma_{\text{zugeh.}}$) mit dem Versagenskriterium nach Abschnitt 5.6 verglichen. Die zu prognostizierende Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung entspricht der Belastung im numerischen Modell, für die das Versagenskriterium infolge der ausgewerteten Interaktionsspannungen an einem Punkt erfüllt ist.

7.3.2 Klebstoff PUR

Zur Bewertung des Konzeptes lokaler Spannungen sollen zunächst die in Abschnitt 6.6 aus den Bruchlasten der einzelnen Kreishohlprofilproben numerisch berechneten Interaktionsspannungen (σ_{\max} ; $\tau_{\text{zugeh.}}$) sowie (τ_{\max} ; $\sigma_{\text{zugeh.}}$) den in Abschnitt 5.6 auf Basis von

Kleinbauteilversuchen entwickelten, mechanischen Versagenskriterien für Stahlklebungen gegenübergestellt werden. Hierzu wird das aus den Abschnitten 5 und 6 bekannte Interaktionsdiagramm, in dem die Schubspannungen τ_{xz} über den Normalspannungen σ_z aufgetragen sind, verwendet. Das Versagenskriterium nach Gl. 5.5 für den Klebstoff PUR sowie die aus den experimentell bestimmten Bruchlasten resultierenden Spannungsmaxima in den Klebfugen der mit PUR gefügten Kreishohlprofilproben sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Das Einsetzen der Interaktionsspannungen ($\sigma_{\max}; \tau_{\text{zugeh.}}$) sowie ($\tau_{\max}; \sigma_{\text{zugeh.}}$) in das Versagenskriterium nach Gl. 5.5 führt zu spezifischen Zahlenwerten. Nimmt $\theta(\sigma_{z,i}; \tau_{xz,i})$ dabei einen Wert größer eins ein, liegt die Interaktionsspannung folglich über dem Funktionsgraphen des Versagenskriteriums (siehe Abbildung 7.1). Der Vergleich der sich aus den beiden zu einer Beanspruchung gehörenden Interaktionsspannungen ergebenden Zahlenwerte $\theta(\sigma_{z,i}; \tau_{xz,i})$ gibt Auskunft über die für das Versagen maßgebende Spannungskombination.

Für den Klebstoff PUR zeigt sich, dass die maximale Normalspannung σ_{\max} in Kombination mit der zugehörigen lokalen Schubspannung für alle untersuchten Kreishohlprofilreihen zu größeren Werten $\theta(\sigma_{z,i}; \tau_{xz,i})$ nach Gl. 5.5 führt als die maximale Schubspannung τ_{\max} mit der zugehörigen lokalen Normalspannung. Dies bedeutet, dass auf Basis des in Abschnitt 5.6 erarbeiteten Versagenskriteriums von einem Versagen infolge der lokalen Normalspannungskonzentration am Klebfugenrand auszugehen ist. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes sind in Abbildung 7.1 die nicht für das Versagen maßgebenden, aber bei Bruch in der Klebung vorhandenen Interaktionsspannungen in Graustufen dargestellt. Die für das Versagen relevanten Spannungspaare der einzelnen Prüfreihen werden wie bereits in Kapitel 6 durch unterschiedliche Symbole und deren Farbgebung unterschieden. Es zeigt sich, dass das in Abschnitt 5 entwickelte, spannungsbasierende Versagenskriterium sehr gut für die Prognose der Tragfähigkeit der mit PUR geklebten Kreishohlprofilverbindungen nach dem Konzept lokaler Spannungen geeignet ist. Die Mehrzahl der numerisch berechneten Interaktionsspannungen liegt oberhalb des Funktionsgraphen des Versagenskriteriums und dieses somit auf der sicheren Seite. Lediglich einzelne Interaktionsspannungen unterschreiten das auf allen Einzelergebnissen der Versuche an geschäftet geklebten Stahlproben basierende Versagenskriterium $\theta_E(\sigma_z; \tau_{xz})$.

Außerdem zeigt Abbildung 7.1, dass das in Abschnitt 5 erarbeitete auf den 5 %-Quantil Werten der Versuchsergebnisse an geschäfteten Stahlklebungen basierende Versagenskriterium eine konservative Abschätzung der Versagensbeanspruchung der Kreishohlprofilverbindung darstellt. Das charakteristische Versagenskriterium wird lediglich von den Interaktionsspannungen, resultierend aus zwei Kreishohlprofilversuchen, unterschritten. Somit liegt das in dieser Arbeit für den Klebstoff PUR entwickelte, spannungsabhängige Versagenskriterium zwar auf der sichereren Seite, muss jedoch nicht als überkonservativ bezeichnet werden.

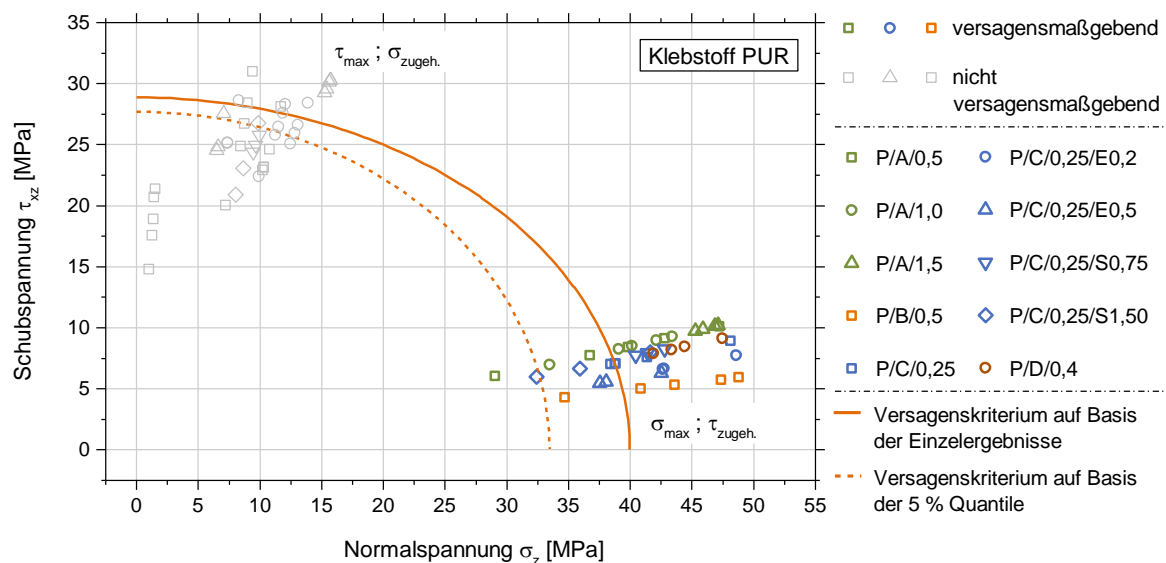


Abbildung 7.1 Vergleich der maximalen Interaktionsspannungen bei Bruch der geklebten KHP-Verbindung mit dem Versagenskriterium nach Abschnitt 5; Klebstoff PUR

Die beschriebene Vorgehensweise ermöglicht den Vergleich der maximalen Interaktionsspannungen bei Bruch der geklebten Kreishohlprofilverbindung mit dem in Abschnitt 5 entwickelten spannungsbasierenden Versagenskriterium für geklebte Stahlverbindungen. Ziel eines weiteren Arbeitsschrittes ist nun, die Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung zu prognostizieren. Basis hierfür ist das Versagenskriterium nach Abschnitt 5.6 sowie die numerischen Berechnungen an geklebten Kreishohlprofilanschlüssen nach Abschnitt 6.6. Die Bestimmung der Traglast nach dem Konzept der lokalen Spannungen erfolgt, wie bereits erwähnt, durch eine sukzessive Steigerung der Beanspruchung im numerischen Modell. Dabei wird für jeden Lastschritt der Spannungszustand in der Klebfuge hinsichtlich der zugehörigen Interaktionsspannungen (σ_{\max} ; $\tau_{\text{zugeh.}}$) und (τ_{\max} ; $\sigma_{\text{zugeh.}}$) unter Verwendung von Gl. 5.5 ausgewertet. Der Mittelwert der numerisch berechneten Tragfähigkeit der mit PUR geklebten Kreishohlprofilanschlüsse entspricht der Beanspruchung im numerischen Modell, für die Gl. 5.5 an einem Punkt erfüllt ist (siehe Gl. 7.1).

$$\theta_E(\sigma_{z,i}; \tau_{xz,i}) = \left(\frac{\sigma_{z,i}}{\sigma_{z,R,E}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz,i}}{\tau_{xz,R,E}} \right)^2 = 1 \quad \text{Gl. 7.1}$$

Analog lässt sich der charakteristische Wert der Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung durch Steigerung der Beanspruchung im numerischen Modell bestimmen. Der für die Bemessung nach dem Konzept lokaler Spannungen relevante Wert der Tragfähigkeit entspricht der Beanspruchung, deren resultierende Interaktionsspannungen bei Einsetzen in Gl. 7.2 den Zahlenwert eins ergeben.

$$\theta_k(\sigma_{z,i}; \tau_{xz,i}) = \left(\frac{\sigma_{z,i}}{\sigma_{z,R,K}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xz,i}}{\tau_{xz,R,K}} \right)^2 = 1 \quad \text{Gl. 7.2}$$

Mit der beschriebenen Methodik werden die Tragfähigkeiten aller in Kapitel 6 experimentell untersuchten Kreishohlprofilkonfigurationen bestimmt. Die resultierenden Ergebnisse der Tragfähigkeitsprognose werden nachfolgend vorgestellt. Hierzu sind in Tabelle 7.1 zum Vergleich zunächst die experimentell bestimmten Mittelwerte der Bruchlasten der einzelnen Versuchsreihen sowie die Schätzwerte der Standardabweichung unter Annahme einer Normalverteilung der Versuchsergebnisse zusammengefasst. Den experimentell bestimmten Mittelwerten werden die nach dem Konzept lokaler Spannungen numerisch bestimmten Mittelwerte der Tragfähigkeit gegenübergestellt. Der Quotient aus prognostiziertem und experimentellem Mittelwert liefert für jede Prüfreihe ein prozentuales Maß der Genauigkeit der Tragfähigkeitsprognose. Zudem ist der unter Verwendung des charakteristischen Versagenskriteriums nach Gl. 7.2 berechnete Bemessungswert der Tragfähigkeit angegeben.

| Prüfreihe | Experimentelle Ergebnisse | | Tragfähigkeitsprognose | | |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---|--|
| | Mittelwert F_{exp} [kN] | Standard- abweichung [kN] | Mittelwert F_{pred} [kN] | Vergleich $F_{\text{pred}} / F_{\text{exp}}$ | Charakteris- tischer Wert $F_{\text{pred,k}}$ [kN] |
| P/A/0,5 | 73,26 | 11,89 | 72,35 | 99 % | 61,73 |
| P/A/1,0 | 127,60 | 13,39 | 123,07 | 96 % | 102,76 |
| P/A/1,5 | 185,90 | 3,71 | 148,27 | 80 % | 122,46 |
| P/B/0,5 | 57,50 | 8,28 | 52,05 | 91 % | 43,09 |
| P/C/0,25 | 185,36 | 18,50 | 174,58 | 94 % | 146,34 |
| P/C/0,25/E0,2 | 186,13 | 13,74 | 164,67 | 88 % | 141,86 |
| P/C/0,25/E0,5 | 163,37 | 9,78 | 162,62 | 100 % | 133,98 |
| P/C/0,25/S0,75 | 182,20 | 4,99 | 169,86 | 93 % | 145,86 |
| P/C/0,25/S1,50 | 163,30 | 19,68 | 171,53 | 105 % | 146,63 |
| P/D/0,4 | 1835,95 | 95,65 | 1605,26 | 87 % | 1310,38 |

Tabelle 7.1 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse (Mittelwerte und Schätzwerte der Standardabweichung) sowie der nach dem Konzept lokaler Spannungen auf Basis numerischer Berechnungen prognostizierten Tragfähigkeiten (Mittelwerte und charakteristische Werte) geklebter Kreishohlprofilverbindungen; Klebstoff PUR

Zusätzlich zur tabellarischen Zusammenfassung sind die beschriebenen experimentellen sowie nach dem Konzept lokaler Spannungen prognostizierten Tragfähigkeiten geklebter Kreishohlprofilanschlüsse in Abbildung 7.2 in grafischer Form dargestellt. Dabei werden den experimentellen Einzelergebnissen und Mittelwerten der einzelnen Prüfreiheiten die nach dem Konzept der lokalen Spannungen numerisch berechneten Mittelwerte sowie

5 %-Quantile der Verbindungstragfähigkeit gegenübergestellt. Eine normierte Ergebnisdarstellung erlaubt den Vergleich der einzelnen Prüfreiheiten in einer Abbildung. Hierzu werden die experimentellen bzw. prognostizierten Maximalkräfte auf den Mittelwert der experimentellen Bruchlasten der jeweiligen Prüfreihe bezogen. Somit nimmt der in Abbildung 7.2 in Form von grünen Andreaskreuzen dargestellte experimentelle Mittelwert der Bruchlasten stets den Wert 1,0 ein. Die experimentellen Einzelergebnisse werden durch grüne Kreise abgebildet. Diesen Ergebnissen gegenübergestellt sind durch blaue Andreaskreuze die prognostizierten Mittelwerte sowie durch blaue Balken die numerisch berechneten 5 %-Quantile der Tragfähigkeit (Bemessungswerte).

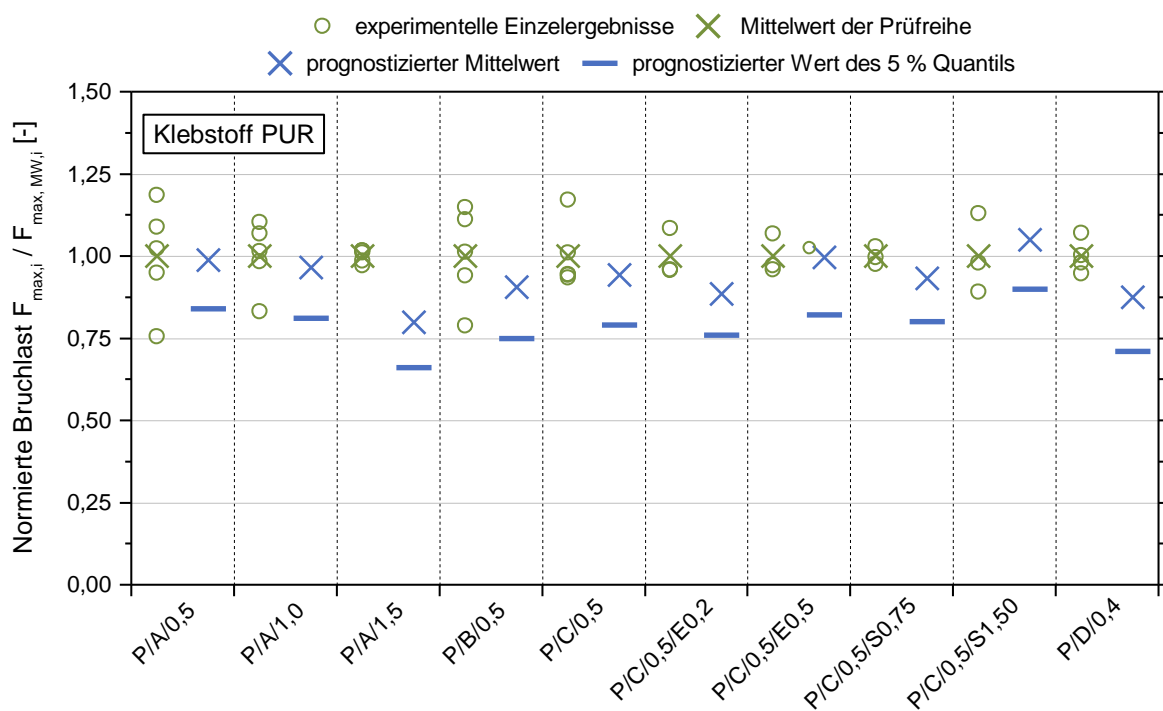


Abbildung 7.2 Vergleich der experimentell bestimmten Tragfähigkeit geklebter KHP-Verbindungen (Einzelergebnisse und Mittelwerte der jeweiligen Prüfreihe) mit den auf Basis des Konzeptes lokaler Spannungen numerisch bestimmten Tragfähigkeiten (Mittelwerte und 5 %-Quantile); auf den Mittelwert der experimentell bestimmten Bruchlast der jeweiligen Prüfreihe normierte Darstellung; Klebstoff PUR

Es zeigt sich für alle mit PUR geklebten KHP-Verbindungen eine sehr gute Prognose der Mittelwerte der Tragfähigkeit. Im Mittel beträgt die prognostizierte Tragfähigkeit 93 % der experimentell bestimmten. Die Bandbreite der Genauigkeit liegt zwischen 80 % (Prüfreihe P/A/1,5) und 105 % (Prüfreihe P/C/0,25/S1,50). Dabei liegen die prognostizierten Tragfähigkeiten mit der Ausnahme einer Prüfreihe stets auf der sicheren Seite. Lediglich bei Serie P/C/0,2/S1,50 wird die Tragfähigkeit um 5 % überschätzt. Dies muss jedoch auch vor dem Hintergrund der bei allen experimentellen Untersuchungen festgestellten Streuung der Bruchlasten gesehen werden. Die Auswertung der prognostizierten charakteristischen Tragfähigkeiten zeigt eine sehr gute untere Absicherung der experimentell bestimmten Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindungen. Wird, wie

in der vorliegenden Arbeit, für die charakteristische Tragfähigkeit der 5 %-Quantil Wert einer Prüfreihe herangezogen, sollte dieser Bemessungswert der Tragfähigkeit in weniger als fünf Prozent der experimentellen Ergebnisse unterschritten werden. Wie in Abbildung 7.2 ersichtlich ist, wird der prognostizierte charakteristische Wert der Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung lediglich von zwei experimentell bestimmten Bruchlasten unterschritten. Bei 41 für den Klebstoff PUR betrachteten experimentellen Einzelergebnissen entsprechen diese beiden Unterschreitungen weniger als 5 %.

7.3.3 Klebstoff EP

Entsprechend der Vorgehensweise bei den mit PUR gefügten Kreishohlprofilverbindungen werden nachfolgend die Ergebnisse der Tragfähigkeitsprognose der mit EP geklebten Kreishohlprofilanschlüsse vorgestellt. Hierzu sind in Abbildung 7.3 zunächst die aus der experimentellen Bruchlast resultierenden, numerisch berechneten Interaktionsspannungen (τ ; σ) in der Klebfuge der Kreishohlprofilproben dargestellt. Ergänzend zeigt die Abbildung die Funktionsgraphen der in Abschnitt 5 erarbeiteten Versagenskriterien für die EP-Stahl-Verbindung. Analog zur Vorgehensweise beim Klebstoff PUR sind die in Bezug auf das auf allen Einzelergebnissen basierende Versagenskriterium maßgebenden Interaktionsspannungen farbig, die bei Bruch in der Klebung vorhandenen, jedoch nicht für das Versagen maßgebenden Interaktionsspannungen in Graustufen abgebildet.

Abbildung 7.3 zeigt, dass das für den Klebstoff EP entwickelte spannungsbasierende Versagenskriterium für die Prognose der Tragfähigkeit geklebter KHP-Verbindungen sehr gut geeignet ist. Das auf allen Einzelergebnissen der Versuche an geschäftet geklebten Stahlproben nach Abschnitt 5 basierende Bruchkriterium wird von der Mehrzahl der KHP-Ergebnisse überschritten und liegt somit etwas auf der sicheren Seite. Das für die Bemessung nach dem Konzept lokaler Spannungen relevante charakteristische Versagenskriterium $\theta_k(\sigma_z; \tau_{xz})$ basiert auf den 5 %-Quantilen der Versuche an geschäftet geklebten Stahlproben. Dieses Kriterium wird nur in einem KHP-Versuch unterschritten und stellt somit eine konservative, jedoch nicht unwirtschaftliche untere Einhüllende der Verbindungstragfähigkeit dar.

Verglichen mit dem charakteristischen Versagenskriterium des Klebstoffes PUR ist das EP-Kriterium in Bezug auf die experimentell bestimmten Tragfähigkeiten geklebter Kreishohlprofilverbindungen als etwas konservativer einzustufen. Dies ist mit der größeren Streuung der Ergebnisse der geschäfteten Proben und der daraus resultierenden, im Verhältnis zu den Mittelwerten geringeren Quantile zu begründen.

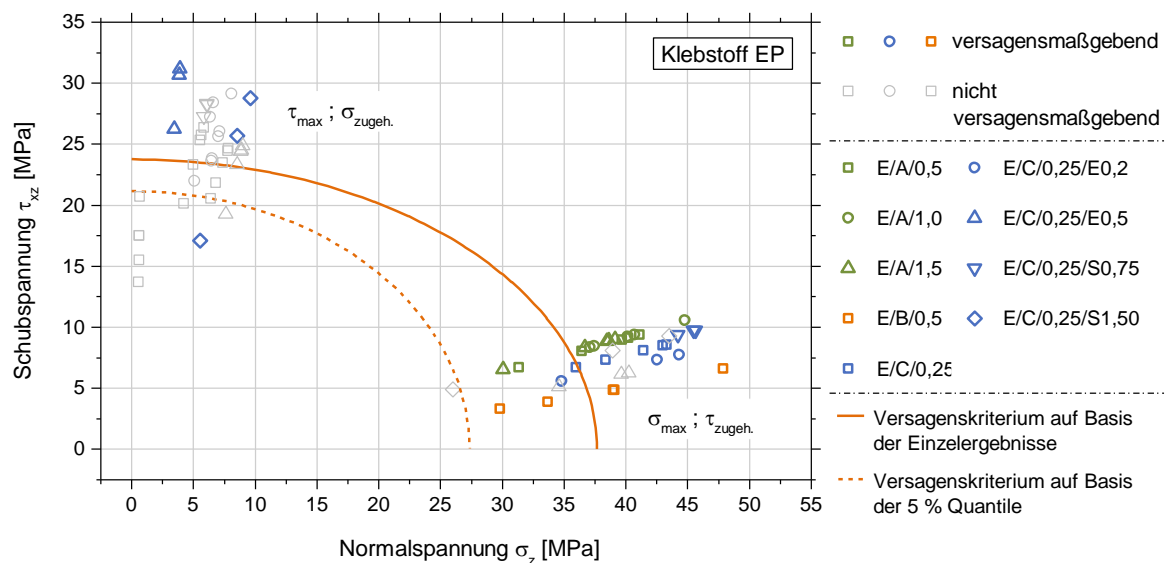


Abbildung 7.3 Vergleich der maximalen Interaktionsspannungen bei Bruch der geklebten Kreishohlprofilverbindungen mit den Versagenskriterien nach Abschnitt 5; Klebstoff EP

Entsprechend der in Abschnitt 7.3.2 (Klebstoff PUR) beschriebenen Vorgehensweise wird im Weiteren die Tragfähigkeit der EP-geklebten Kreishohlprofilverbindung nach dem Konzept lokaler Spannungen numerisch bestimmt. Die Ergebnisse dieser Tragfähigkeitsprognose sind in Tabelle 7.2 zusammengestellt. Dem experimentellen Mittelwert jeder Prüfreihe ist der prognostizierte Mittelwert der Tragfähigkeit gegenübergestellt. Das prozentuale Maß der Genauigkeit der Tragfähigkeitsprognose ergibt sich anhand des Quotienten aus dem numerisch berechneten und dem experimentellen Mittelwert. Zudem ist der unter Verwendung des charakteristischen Versagenskriteriums bestimmte Bemessungswert der Tragfähigkeit (5 %-Quantil) angegeben. Anhand der in Tabelle 7.2 zusammengefassten Ergebnisse wird zunächst deutlich, dass für den Klebstoff EP mit dem Konzept der lokalen Spannungen eine sehr gute Prognose der Mittelwerte der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen möglich ist. Im Mittel beträgt die prognostizierte Tragfähigkeit 90 % der experimentell bestimmten Bruchlasten (Bandbreite: 79 % - 97 %). Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass der prognostizierte Mittelwert der Tragfähigkeit stets etwas unter dem experimentellen Ergebnis liegt und somit leicht konservativ ist.

Zur Visualisierung sind die Ergebnisse in Abbildung 7.4 in zusammenfassender Form dargestellt. Dabei sind sowohl die Einzelergebnisse als auch die Mittelwerte der experimentellen Traglasten abgebildet. Diesen sind die prognostizierten Mittelwerte sowie die prognostizierten charakteristischen Werte der Verbindungstragfähigkeit gegenübergestellt. Zunächst ist eine gute Übereinstimmung der Mittelwerte der jeweiligen Prüfreihe in Abbildung 7.4 ersichtlich. Darüber hinaus ist festzustellen, dass der charakteristische Wert der Tragfähigkeitsprognose die experimentell bestimmten Bruchlasten aller Prüfreihe konservativ abdeckt. Lediglich ein Versuchsergebnis liegt unter dem nach dem Konzept lokaler Spannungen bestimmten Bemessungswert der Tragfähigkeit (5 %-Quantil).

| Prüfreihe | Experimentelle Ergebnisse | | Tragfähigkeitsprognose | | |
|----------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---|
| | Mittelwert F_{exp} [kN] | Standard- abweichung [kN] | Mittelwert F_{pred} [kN] | Vergleich F_{pred}/F_{exp} | Charakteris- tischer Wert $F_{pred,k}$ [kN] |
| E/A/0,5 | 72,72 | 10,48 | 66,14 | 91 % | 50,69 |
| E/A/1,0 | 142,02 | 12,48 | 125,04 | 88 % | 95,53 |
| E/A/1,5 | 178,56 | 17,77 | 173,01 | 97 % | 128,51 |
| E/B/0,5 | 53,24 | 8,73 | 52,48 | 99 % | 37,99 |
| E/C/0,25 | 187,54 | 14,61 | 168,01 | 90 % | 128,91 |
| E/C/0,25/E0,2 | 187,17 | 24,59 | 167,23 | 89 % | 121,42 |
| E/C/0,25/E0,5 | 177,67 | 15,46 | 145,14 | 82 % | 122,55 |
| E/C/0,25/S0,75 | 214,83 | 4,38 | 169,57 | 79 % | 125,04 |
| E/C/0,25/S1,50 | 172,13 | 43,47 | 167,80 | 97 % | 125,92 |

Tabelle 7.2 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse (Mittelwerte und Schätzwerte der Standardabweichung) sowie der nach dem Konzept lokaler Spannungen auf Basis numerischer Berechnungen prognostizierten Tragfähigkeiten (Mittelwerte und charakteristische Werte), Klebstoff EP

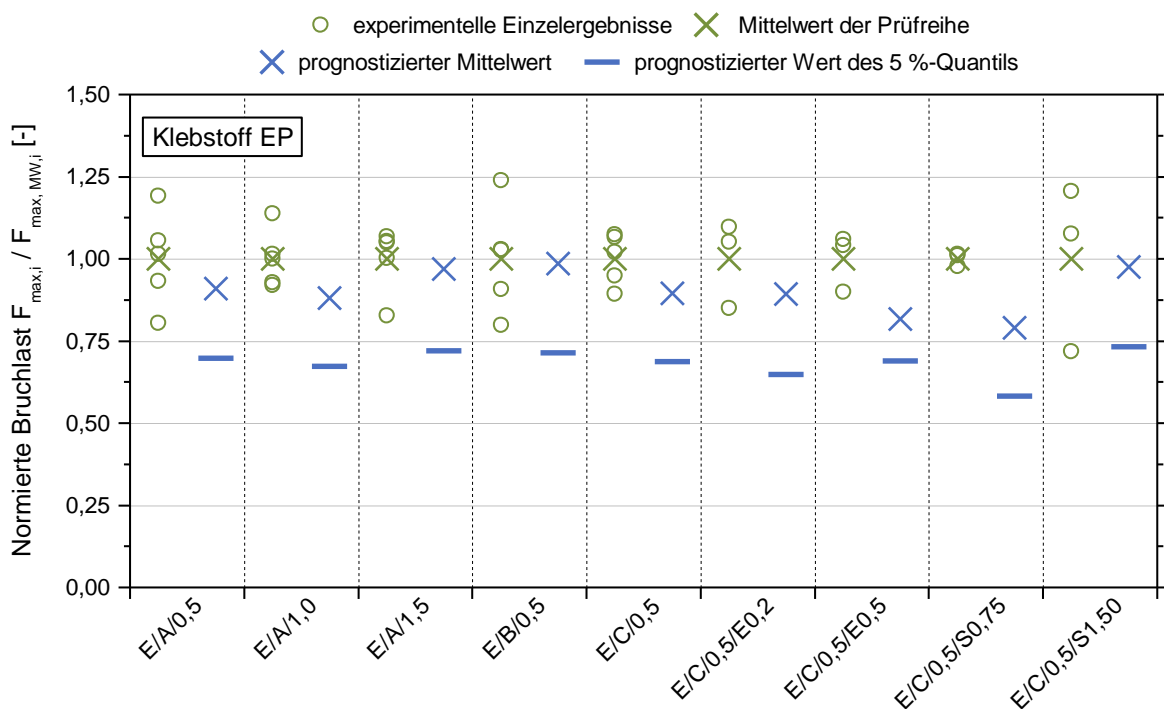


Abbildung 7.4 Vergleich der experimentell bestimmten Tragfähigkeit geklebter KHP-Verbindungen (Einzel-ergebnisse und Mittelwerte der jeweiligen Prüfreihe) mit den auf Basis des Konzeptes lokaler Spannungen numerisch bestimmten Bruchlasten (Mittelwerte und 5 % Quantile); Klebstoff EP; auf den Mittelwert der Bruchlast der jeweiligen Prüfreihe normierte Darstellung

Zusammenfassend kann sowohl für den Klebstoff PUR als auch für den Klebstoff EP festgehalten werden, dass die Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen nach dem erarbeiteten Konzept lokaler Spannungen für alle im Rahmen dieser Arbeit experimentell untersuchten Kreishohlprofilkonfigurationen zuverlässig prognostiziert wird. Hervorzuheben ist die zutreffende Bestimmung der Tragfähigkeit bei unterschiedlichen Klebschichtdicken, deren Einfluss nach dem Nennspannungsansatz nicht quantifizierbar ist. Dies gilt sowohl für Anschlüsse mit dem Klebstoff EP als auch mit dem Klebstoff PUR. Der charakteristische Wert der Tragfähigkeitsprognose (5 %-Quantil) stellt im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen für beide Klebstoffe eine sichere, jedoch nicht überkonservative untere Grenze dar.

7.4 Probabilistische Tragfähigkeitsprognose

7.4.1 Probabilistische Verfahren und statistischer Größeneinfluss

Die in Abschnitt 7.3 beschriebene deterministische Tragfähigkeitsprognose auf Basis numerisch berechneter lokaler Maximalspannungen erfordert eine hohe Genauigkeit und Sorgfalt bei der Modellierung und Vernetzung der zu untersuchenden Bauteile und Verbindungen sowie bei der Festlegung der Auswertestellen oder -bereiche. Grund hierfür ist die Abhängigkeit der an den Singularitäten auftretenden Spannungsspitzen von der Feinheit des Elementnetzes (Details siehe Abschnitt 2.4).

Eine Alternative zu deterministischen Berechnungsansätzen ist insbesondere für spröde versagende Werkstoffe die probabilistische Tragfähigkeitsprognose. Diese Methodik erlaubt die Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit eines Bauteils oder einer Verbindung bei einer vorgegebenen Beanspruchung. Das beispielsweise in (BAŽANT UND NOVÁK 2000) beschriebene nichtlokale Verfahren berücksichtigt alle in einem Volumen bzw. in einer Fläche vorhandenen Spannungen bei der Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit. Basis des im Rahmen dieser Arbeit angewendeten probabilistischen Verfahrens ist die 1939 veröffentlichte Weibull-Theorie (WEIBULL 1939). Sie erlaubt die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere von spröden Werkstoffen, und basiert auf der Theorie des „schwächsten Kettengliedes“ (PIERCE 1926). Diese geht davon aus, dass ein Werkstoff aus endlichen kettenförmig verbundenen Einzelelementen besteht. Das Versagen des Werkstoffes wird letztlich durch das Versagen des schwächsten Elementes in dieser Kette verursacht. Mit der im Vergleich zur Dichtefunktion der Normalverteilung linkssteilen Dichtefunktion der Weibull-Verteilung kann die Überlebenswahrscheinlichkeit P_s (engl.: probability of survival) unter Verwendung der Weibull-Parameter σ_0 und k nach Gl. 7.3 berechnet werden (zwei-parametrische Weibull-Verteilung) (VALLÉE ET AL. 2006).

$$P_s = \exp \left[- \int_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^k dV \right] \quad \text{Gl. 7.3}$$

Hierbei ist σ die auf einem spezifischen Volumen V einwirkende Spannung und σ_0 der charakteristische Wert der Spannung, dem unter der Voraussetzung einer Weibull-Verteilung eine Versagenswahrscheinlichkeit von $1 - P_s = 1 - 1/e = 63,2\%$ zugehörig ist. Dieser wird auch als Skalenparameter bezeichnet. Der Formparameter k beschreibt die Veränderlichkeit der Festigkeit der statistisch zu beschreibenden Werkstoffe, Bauteile oder Verbindungen. Alternativ kann die Überlebenswahrscheinlichkeit auch unter Verwendung einer drei-parametrischen Form nach Gl. 7.4 bestimmt werden. Diese berücksichtigt zusätzlich den Parameter σ_L , der den Schwellenwert der Spannung, unter dem kein Versagen auftritt, darstellt.

$$P_s = \exp \left[- \int_V \left(\frac{\sigma - \sigma_L}{\sigma_0} \right)^k dV \right] \quad \text{Gl. 7.4}$$

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur statistischen Beschreibung der in allen durchgeführten Versuchen spröde versagenden Stahlklebungen die zwei-parametrische Weibull-Verteilung verwendet. Untersuchungen zeigen, dass diese gut geeignet für die Beschreibung der Festigkeit ebenfalls spröde versagender Werkstoffe wie Faserverbunde (ALQAM ET AL. 2002) oder in Faserrichtung zugbeanspruchter Holzbauteile (TANNERT ET AL. 2010) ist.

Während Gl. 7.3 für uniaxiale Spannungszustände direkt zur Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit angewendet werden kann, erfordern mehraxiale Spannungszustände ein Interaktionskriterium, das für σ eingesetzt wird. Im Rahmen der probabilistischen Tragfähigkeitsprognose wird hierfür das in Abschnitt 5 erarbeitete Versagenskriterium θ_E , das die Interaktion von Schub- und Normalspannungen berücksichtigt, verwendet. Folglich lässt sich die Überlebenswahrscheinlichkeit der Stahlklebung unter der Voraussetzung einer zwei-parametrischen Weibull-Verteilung mit Gl. 7.5 berechnen.

$$P_s = \exp \left[- \int_V \left(\frac{\theta_E(\sigma_z; \tau_{xz})}{\sigma_{0,\theta}} \right)^k dV \right] \quad \text{Gl. 7.5}$$

Die in Abschnitt 5 dokumentierten Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen zur Entwicklung eines spannungsbasierenden Versagenskriteriums für Stahlklebungen dienen als Grundlage für die Schätzung der Weibull-Parameter $\sigma_{0,\theta}$ und k . Diese erfolgt sowohl für die Ergebnisse der Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der mit PUR als auch der mit EP geklebten Stahlverbindung.

Hierzu werden alle aus den experimentellen Bruchlasten der Proben bestimmten Interaktionsspannungen σ_z sowie τ_{xz} in der Klebfuge zunächst in das Versagenskriterium θ_E nach Gl. 5.5 eingesetzt. Liegt eine Interaktionsspannung dabei direkt unterhalb des Versagenskriteriums, errechnet sich der zugehörige Wert zu $\theta_{E,i} \leq 1$. Entsprechend gilt für die oberhalb des Kriteriums liegenden Interaktionsspannungen $\theta_{E,i} \geq 1$. Aus diesen Zahlenwerten $\theta_{E,i}$ werden im Weiteren die Weibull-Parameter zur Quantifizierung der Streuung der zu Grunde liegenden experimentellen Ergebnisse in Bezug auf das Versagenskriterium bestimmt.

Dabei werden die berechneten Zahlenwerte $\theta_{E,i}$ für alle Versuchsergebnisse in einem linearisierten Weibull-Diagramm aufgetragen und die zugehörige Regressionsgerade ermittelt. Die im Folgenden angewendete Vorgehensweise zur Schätzung der Weibull-Parameter ist u. a. in (LANGLOIS 1991) oder (SACHS UND HEDDERICH 2006) beschrieben:

Die zwei-parametrische Weibull-Verteilungsfunktion lautet unter Verwendung der im Rahmen dieser Arbeit gewählten Nomenklatur:

$$F(\theta_E) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\theta_E}{\sigma_{0,\theta}}\right)^k\right) \quad \text{Gl. 7.6}$$

Zur Linearisierung der Funktion wird der Logarithmus naturalis zweimal angewendet. Dies führt zu:

$$\ln[-\ln[1 - F(\theta_E)]] = k \cdot \ln(\theta_E) - k \cdot \ln(\sigma_{0,\theta}) \quad \text{Gl. 7.7}$$

Unter Verwendung der Geradengleichung

$$y = bx + a \quad \text{Gl. 7.8}$$

können im Weibull-Diagramm die Interaktionsspannungen in der transformierten Form

$$x = \ln(\theta_E) \quad \text{Gl. 7.9}$$

$$y = \ln[-\ln[1 - F(\theta_E)]] \quad \text{Gl. 7.10}$$

geschrieben werden. Hierzu werden die Interaktionsspannungen zunächst in aufsteigender Reihenfolge sortiert. Die zu jeder Interaktionsspannung zugehörige Versagenswahrscheinlichkeit kann mit der Näherungsformel für eine empirische Verteilung nach Gl. 7.11 bestimmt werden. Dabei ist n die Gesamtanzahl der Einzelergebnisse und i der Laufparameter mit der Eigenschaft $1 \leq i \leq n$.

$$F(\theta_E(i)) \cong \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad \text{Gl. 7.11}$$

Die so im Weibull-Diagramm dargestellten transformierten Interaktionsspannungen werden anschließend durch eine Gerade nach Gl. 7.8 mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate angenähert (Abbildung 7.5).

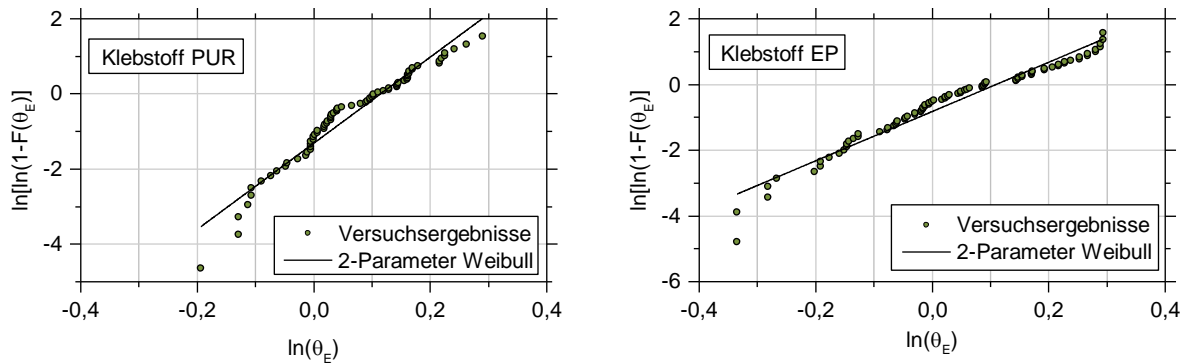


Abbildung 7.5 Bestimmung der Weibull-Parameter für PUR- sowie EP-Stahlklebungen nach Abschnitt 6

Die gesuchten Schätzwerte der Weibull-Parameter $\sigma_{0,\theta}$ und k lassen sich schließlich unter Verwendung von Gl. 7.7 und Gl. 7.8 wie in Gl. 7.12 und Gl. 7.13 beschrieben berechnen (SACHS UND HEDDERICH 2006; LANGLOIS 1991; VALLÉE ET AL. 2006).

$$k = b \quad \text{Gl. 7.12}$$

$$a = -k \cdot \ln(\sigma_{0,\theta}) \rightarrow \sigma_{0,\theta} = \exp\left(-\frac{a}{k}\right) \quad \text{Gl. 7.13}$$

Die nach dem beschriebenen Vorgehen sowie unter Verwendung der in Abbildung 7.5 dargestellten Weibull-Diagramme bestimmten Schätzwerte der Weibull-Parameter der den Versagenskriterien für PUR- bzw. EP-Stahlklebungen zugrunde liegenden Ergebnisse (Abschnitt 5) sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

| PUR-Stahl-Klebung | | EP-Stahl-Klebung | |
|-------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| k | $\sigma_{0,\theta}$ | k | $\sigma_{0,\theta}$ |
| 11,459 | 1,121 | 7,498 | 1,116 |

Tabelle 7.3 Schätzwerte der Weibull Parameter für die geklebte Verbindung PUR-Stahl bzw. EP-Stahl

Die Gegenüberstellung der Weibull-Parameter beider Klebstoffe zeigt, dass die Skalenparameter $\sigma_{0,\theta}$ in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Der Formparameter k des Klebstoffs PUR nimmt einen um 53 % größeren Wert als der Formparameter des EP ein.

Charakteristisch für spröde versagende Werkstoffe ist der statistische Größeneinfluss. Dieser besagt, dass unter gleichen Prüfbedingungen größere Proben eine geringere Festigkeit als kleinere Proben desselben Werkstoffes aufweisen. Begründen lässt sich dieser Effekt mit der höheren Wahrscheinlichkeit der Existenz von versagensinitiierenden Fehlstellen oder Imperfektionen bei großen Proben (BAŽANT 2005; BAŽANT 2004).

Die Weibull-Theorie erlaubt eine Beschreibung des statistischen Größeneffektes durch probabilistische Verfahren. Denn unter der Voraussetzung einer Weibull-verteilten Werkstofffestigkeit lässt sich zwischen den Volumina V_A und V_B zweier Proben und den Probenfestigkeiten σ_A und σ_B unter Verwendung des Formparameters k der Zusammenhang nach Gl. 7.14 herstellen (TANNERT ET AL. 2010).

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_B} = \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{Gl. 7.14}$$

Der für spröde versagende Werkstoffe charakteristische Zusammenhang zwischen Festigkeit und Größe einer Probe wurde ausgehend von der Weibull-Theorie (WEIBULL 1939) von Alfred Freudenthal (FREUDENTHAL 1968) und Zdeněk Bažant (BAŽANT UND XI 1991; BAŽANT ET AL. 1991; BAŽANT 2005) weiterentwickelt. Probabilistische Verfahren zur Berechnung der Festigkeit spröder Werkstoffe unter Berücksichtigung des statistischen Größeneffektes wurden unter anderem erfolgreich angewendet bei keramischen Werkstoffen (CALARD UND LAMON 2002), bei faserverstärkten Kunststoffen (VALLÉE ET AL. 2006), aber auch bei reibgeschweißten Holzverbindungen (HAHN ET AL. 2012) sowie geklebten, zugbeanspruchten Holzbauteilen (TANNERT ET AL. 2010). Das Versagen trat bei letzteren jedoch nicht in der Klebung sondern im Holzbauteil auf. Eine kurze Übersicht über Anwendungen probabilistischer Bemessungsverfahren gibt beispielsweise (HAHN ET AL. 2014).

7.4.2 Anwendung bei geklebten Kreishohlprofilverbindungen

7.4.2.1 Vorgehensweise

Die Basis der nachfolgend beschriebenen probabilistischen Prognose der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen stellt die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Klebstoffe (Abschnitt 4) sowie die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Verbindung Stahl-Klebstoff durch spannungsbasierende Versagenskriterien dar (Abschnitt 5). Ziel ist der Vergleich der in (Abschnitt 6) experimentell bestimmten Bruchlasten der geklebten Kreishohlprofilverbindungen mit den im Weiteren probabilistisch berechneten Tragfähigkeiten.

Auf Basis der genannten Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Klebstoff und Stahl-Klebstoff-Verbindung ist die Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{s,i}$ eines Volumenelementes i nach Gl. 7.3 bestimmbar. Eine geklebte Verbindung von Bauteilen kann in n Einzelvolumenelemente diskretisiert werden. Die Überlebenswahrscheinlichkeit der gesamten Verbindung lässt sich bei Implementierung des statistischen Größeneffektes nach Gl. 7.14 folglich aus den i Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_{s,i}$ bestimmen:

$$P_s = \prod_{i=1}^n \exp \left[-\frac{V_i}{V_0} \cdot \left(\frac{\theta_{E,i}(\sigma_{z,i}; \tau_{xz,i})}{\sigma_{0,\theta}} \right)^k \right] = \exp \sum_{i=1}^n \left[-\frac{V_i}{V_0} \cdot \left(\frac{\theta_{E,i}(\sigma_{z,i}; \tau_{xz,i})}{\sigma_{0,\theta}} \right)^k \right] \quad \text{Gl. 7.15}$$

Zunächst gehen in Gl. 7.15 die für die Verbindung Stahl-Klebstoff in Abschnitt 7.4.1 bestimmten Weibull-Parameter $\sigma_{0,\theta}$ und k ein. Weiterhin ist V_i das Volumen des i -ten Volumenelementes in der Klebschicht der zu betrachtenden Verbindung. V_0 bezeichnet den Mittelwert aus den Klebstoffvolumina der geschäftet geklebten Stahlverbindungen nach Abschnitt 5.

Die in Abschnitt 6 beschriebene numerische Berechnung des Spannungszustandes in der Klebung bei Bruch der Kreishohlprofilverbindung erlaubt die Ausgabe der gemittelten Schubspannungen $\tau_{xz,i}$ in der Ebene der Klebung sowie der Normalspannungen $\sigma_{z,i}$ orthogonal zur Klebung für jedes finite Volumenelement der modellierten Klebschicht. Unter Verwendung des in Abschnitt 5 erarbeiteten Interaktionskriteriums nach Gl. 5.5 ergibt sich durch Einsetzen von $\tau_{xz,i}$ sowie $\sigma_{z,i}$ für jedes der i Elemente ein quantitativer Wert $\theta_{E,i}$. Das Kriterium nach Gl. 5.5 basiert auf der Interaktion von Schub- und Zugnormalspannungen. Aufgrund des positiven Einflusses von überlagerten Drucknormalspannungen $\sigma_z < 0$ auf die Schubbeanspruchbarkeit geklebter Verbindungen werden diese im Rahmen der probabilistischen Tragfähigkeitsprognose in konservativer Näherung zu null gesetzt. Diese Vorgehensweise hat sich auch bei anderen Anwendungen probabilistischer Bemessungsansätze als zielführend erwiesen (HAHN ET AL. 2014). Die aus einer im numerischen Modell vorgegebenen Beanspruchung der Klebverbindung gehörende Überlebenswahrscheinlichkeit berechnet sich schließlich durch Anwendung von Gl. 7.15.

Zur Prognose der Tragfähigkeit der in Abschnitt 6 experimentell geprüften Kreishohlprofilverbindungen wird die Beanspruchung im numerischen Modell schrittweise gesteigert. Zu jeder Last lässt sich nach dem zuvor beschriebenen Vorgehen die zugehörige Überlebenswahrscheinlichkeit der entsprechenden Kreishohlprofilverbindung berechnen. Der prognostizierte Mittelwert der Tragfähigkeit der jeweiligen Kreishohlprofilprüfreihe entspricht der Kraft im numerischen Modell, die nach Gl. 7.15 eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % ergibt.

Wie in Abschnitt 5 dargelegt, stellt für die Bemessung im Bauwesen der Wert des 5 %-Quantils einer Prüfreihe, der auch als charakteristische Tragfähigkeit bezeichnet wird, die wesentliche Widerstandskenngröße dar. Diese entspricht einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 %. Zur Prognose des 5 %-Quantils der Tragfähigkeit nach dem probabilistischen Bemessungskonzept wird folglich die Kraft im numerischen Modell bestimmt, die nach Gl. 7.15 zu einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % führt.

Unter Verwendung der in Abschnitt 6.6 beschriebenen numerischen Modelle werden für alle untersuchten Kreishohlverbindungen mit Hilfe des probabilistischen Bemessungsansatzes der Mittelwert sowie das 5 %-Quantil der Verbindungstragfähigkeit prognostiziert. In die numerischen Modelle implementiert ist die in Abschnitt 4 bestimmte nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Klebstoffe. Basis der Prognose ist das in Abschnitt 5 entwickelte spannungsbasierende Versagenskriterium sowie das in diesem Kapitel vorgestellte probabilistische Verfahren unter Berücksichtigung des statistischen Größeneffektes.

7.4.2.2 Klebstoff PUR

In Tabelle 7.4 sind für die mit dem Klebstoff PUR gefügten Kreishohlprofilverbindungen zunächst die experimentell bestimmten Mittelwerte der Bruchlasten der einzelnen Prüfreiheiten sowie die zugehörigen Schätzwerte der Standardabweichung zusammengefasst. Diesen gegenübergestellt sind die nach dem probabilistischen Konzept auf Basis numerischer Berechnungen bestimmten Mittelwerte der Bruchlast (50 % Überlebenswahrscheinlichkeit). Zur Beurteilung der Genauigkeit der Tragfähigkeitsprognose wird der Quotient aus dem prognostizierten Mittelwert F_{pred} und dem Mittelwert der experimentellen Bruchlast F_{exp} gebildet. Zudem ist der dem experimentellen 5 %-Quantil gegenüber zu stellende, prognostizierte charakteristische Wert der Verbindungstragfähigkeit der jeweiligen Prüfreihe $F_{\text{pred},k}$ angegeben (95 % Überlebenswahrscheinlichkeit).

Die grafische Darstellung dieser Ergebnisse in Abbildung 7.6 ermöglicht einen anschaulichen Ergebnisvergleich. Dabei erlaubt, wie bereits in Abschnitt 7.3 beschrieben, die Normierung der jeweiligen experimentellen bzw. prognostizierten Maximalkraft auf den Mittelwert der experimentellen Bruchlasten der jeweiligen Prüfreihe den Vergleich der einzelnen Probenreihen in einer Abbildung.

Zunächst zeigt sich, dass basierend auf dem probabilistischen Konzept die Mittelwerte der Tragfähigkeit der einzelnen Prüfreiheiten mit guter Genauigkeit prognostiziert werden. Der prognostizierte Mittelwert der Tragfähigkeit beträgt im Durchschnitt aller Versuchsreihen 106 % der experimentellen Ergebnisse bei einer Bandbreite von 91 % (Prüfreihe P/A/1,5) bis 122 % (P/C/0,25/E0,5). In der Regel liegen die prognostizierten etwas über den experimentell bestimmten Mittelwerten.

| Prüfreihe | Experimentelle Ergebnisse | | Tragfähigkeitsprognose | | |
|----------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---|
| | Mittelwert F_{exp} [kN] | Standard- abweichung [kN] | Mittelwert F_{pred} [kN] | Vergleich F_{pred} / F_{exp} | Charakteris- tischer Wert $F_{pred,k}$ [kN] |
| P/A/0,5 | 73,3 | 11,9 | 78,4 | 107 % | 62,2 |
| P/A/1,0 | 127,6 | 13,4 | 137,9 | 108 % | 105,9 |
| P/A/1,5 | 185,9 | 3,7 | 169,3 | 91 % | 127,8 |
| P/B/0,5 | 57,5 | 8,3 | 65,0 | 113 % | 50,8 |
| P/C/0,25 | 185,4 | 18,5 | 185,4 | 100 % | 144,5 |
| P/C/0,25/E0,2 | 186,1 | 13,7 | 188,0 | 101 % | 150,8 |
| P/C/0,25/E0,5 | 163,4 | 9,8 | 198,9 | 122 % | 160,0 |
| P/C/0,25/S0,75 | 182,2 | 5,0 | 187,7 | 103 % | 151,0 |
| P/C/0,25/S1,50 | 163,3 | 19,7 | 187,8 | 115 % | 149,7 |
| P/D/0,4 | 1836,0 | 95,6 | 1817,6 | 99 % | 1400,3 |

Tabelle 7.4 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse (Mittelwerte und Schätzwerte der Standardabweichung) sowie der nach dem probabilistischen Konzept auf Basis numerischer Berechnungen prognostizierten Mittelwerte sowie 5 %-Quantile der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen; Klebstoff PUR

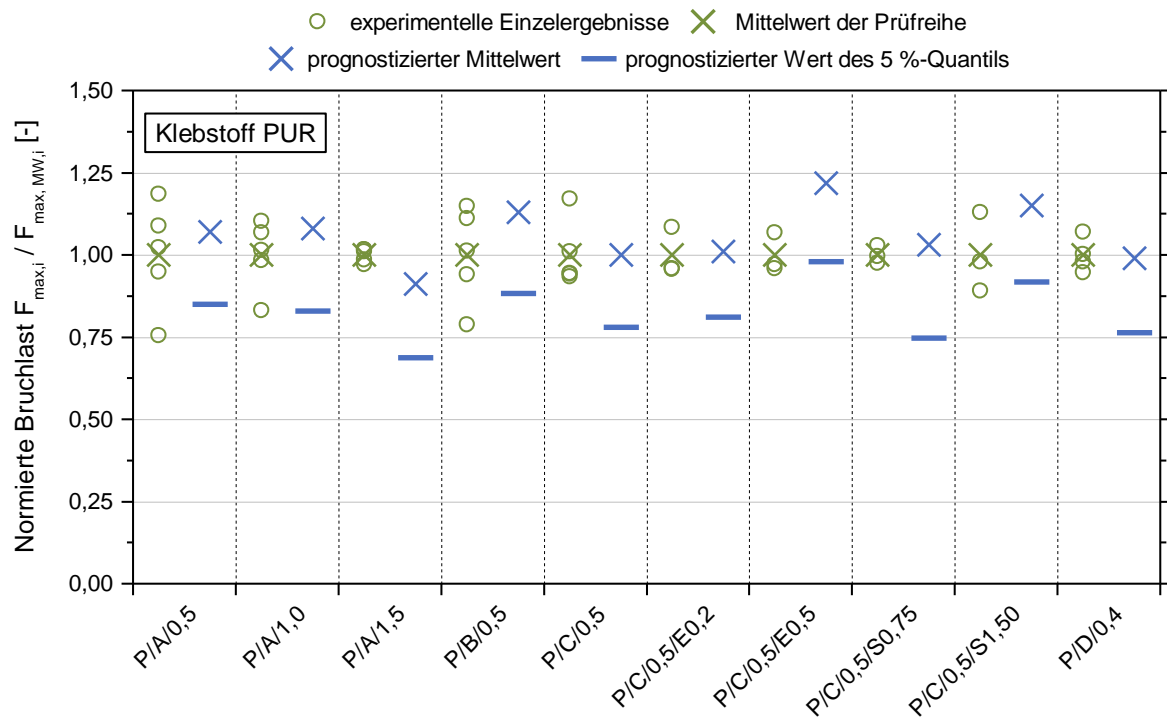


Abbildung 7.6 Vergleich der experimentell bestimmten Bruchlasten geklebter Kreishohlprofilverbindungen (Einzelresultate und Mittelwerte der jeweiligen Prüfreihe) mit den auf Basis des probabilistischen Konzeptes numerisch bestimmten Tragfähigkeiten (Mittelwerte und 5 % Quantile); auf den Mittelwert der Bruchlast der jeweiligen Prüfreihe normierte Darstellung; Klebstoff PUR

Die nach dem probabilistischen Konzept prognostizierten charakteristischen Bemessungswerte werden von vier Versuchsergebnissen unterschritten. Bei Betrachtung der statistischen Verteilung der experimentellen Einzelergebnisse der Prüfreihe P/A/0,5 sowie P/B/0,5 zeigt sich jedoch auch, dass die beiden unterhalb der 5 %-Quantile liegenden Versuchsergebnisse deutlich nach unten abweichen. Die probabilistische Prognose des unteren 5 %-Quantils stellt somit eine konservative Beschreibung der experimentellen Ergebnisse dar.

7.4.2.3 Klebstoff EP

In Analogie zur beschriebenen Vorgehensweise wird die Tragfähigkeit der EP-geklebten Kreishohlprofilverbindungen nach dem probabilistischen Konzept numerisch berechnet. Die zahlenmäßigen Ergebnisse der Versuche sowie der Tragfähigkeitsprognose sind zunächst in Tabelle 7.5 zusammengefasst. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 7.7 die Ergebnisse unter Verwendung einer auf den Mittelwert der experimentellen Bruchlasten der jeweiligen Prüfreihe normierten Darstellungsform.

Der Vergleich der experimentellen und der prognostizierten Mittelwerte der Tragfähigkeit der EP-geklebten Kreishohlprofilverbindungen zeigt auch für den Klebstoff EP eine gute Übereinstimmung. Der Mittelwert der Quotienten aus prognostizierten und experimentell bestimmten Mittelwerten der Bruchlast liegt bei 84 %. Dabei spannen die Quotienten von 68 % bei der Probenreihe E/C/0,25/S0,75 bis zu 108 % für die Prüfreihe E/B/0,5. Hervorgehoben sei an dieser Stelle, dass die experimentellen Bruchlasten der Prüfreihe E/C/0,25/S0,75 unerwartet hohe Werte einnehmen. Diese Probenreihe weist die Besonderheit einer Schiefstellung des Innenbauteils von $0,75^\circ$ zum Außenbauteil hin auf. Trotz dieser planmäßig eingebrachten Imperfektion liegen die Bruchlasten deutlich über denen der Prüfreihe ohne planmäßige Imperfektionen (siehe Tabelle 7.5 sowie Abschnitt 6). Dies trägt auch zur Erklärung der Unterschätzung der Tragfähigkeit nach dem probabilistischen Konzept bei.

Die prognostizierten unteren 5 %-Quantile der Tragfähigkeit werden von keiner experimentell bestimmten Bruchlast der EP-geklebten Kreishohlprofilverbindung unterschritten (siehe Abbildung 7.7).

Das vorgestellte probabilistische Bemessungskonzept erlaubt somit für beide im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Klebstoffe eine zutreffende Prognose der Tragfähigkeit aller experimentell untersuchten Kreishohlprofilverbindungen. Die für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % prognostizierten 5 %-Quantile der Verbindungstragfähigkeit stellen für beide Klebstoffe eine konservative Beschreibung der experimentell bestimmten Tragfähigkeiten dar.

| Prüfreihe | Experimentelle Ergebnisse | | Tragfähigkeitsprognose | | |
|----------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---|
| | Mittelwert F_{exp} [kN] | Standard- abweichung [kN] | Mittelwert F_{pred} [kN] | Vergleich F_{pred}/F_{exp} | Charakteris- tischer Wert $F_{pred,k}$ [kN] |
| E/A/0,5 | 72,7 | 10,5 | 61,1 | 84 % | 43,4 |
| E/A/1,0 | 142,0 | 12,5 | 112,2 | 79 % | 78,9 |
| E/A/1,5 | 178,6 | 17,8 | 158,9 | 89 % | 109,8 |
| E/B/0,5 | 53,2 | 8,7 | 57,5 | 108 % | 40,7 |
| E/C/0,25 | 187,5 | 14,6 | 146,3 | 78 % | 103,1 |
| E/C/0,25/E0,2 | 187,2 | 24,6 | 149,7 | 80 % | 106,7 |
| E/C/0,25/E0,5 | 177,7 | 15,5 | 145,3 | 82 % | 104,0 |
| E/C/0,25/S0,75 | 214,8 | 4,4 | 146,1 | 68 % | 103,6 |
| E/C/0,25/S1,50 | 172,1 | 43,5 | 146,3 | 85 % | 103,8 |

Tabelle 7.5 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse (Mittelwerte und Schätzwerte der Standardabweichung) sowie der nach dem probabilistischen Konzept auf Basis numerischer Berechnungen prognostizierten Mittelwerte sowie 5 %-Quantile der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen; Klebstoff EP

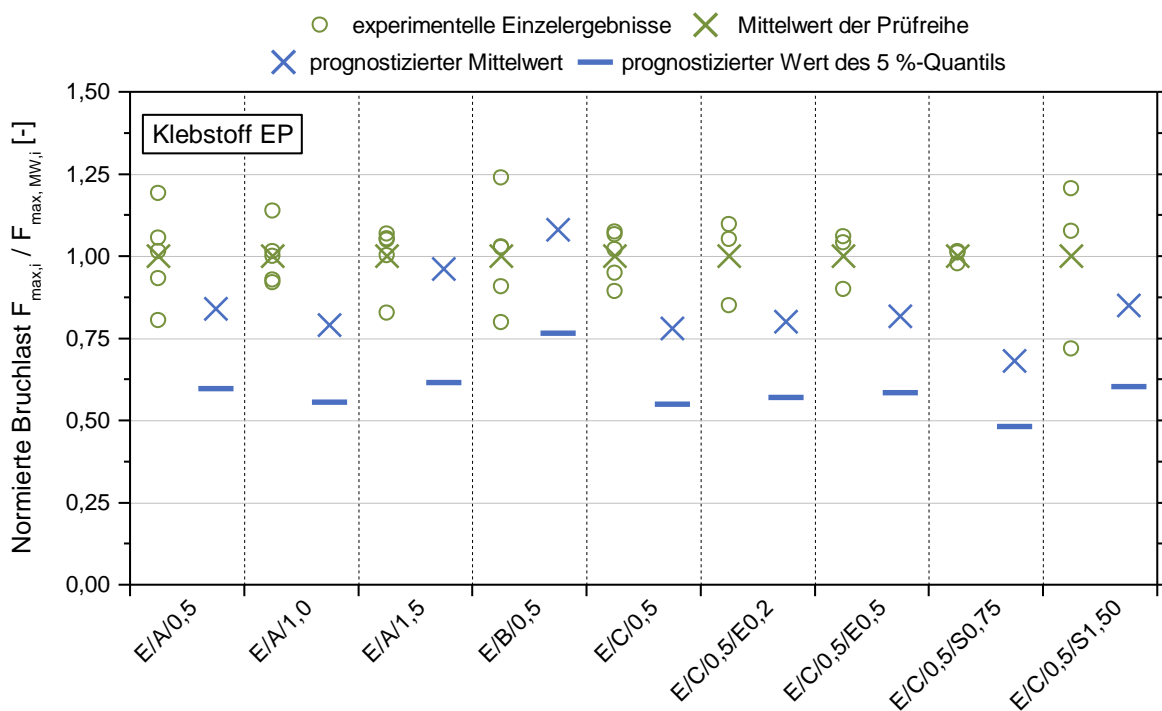


Abbildung 7.7 Vergleich der experimentell bestimmten Bruchlasten geklebter Kreishohlprofilverbindungen (Einzelresultate und Mittelwerte der jeweiligen Prüfreihe) mit den auf Basis des probabilistischen Konzeptes numerisch bestimmten Tragfähigkeiten (Mittelwerte und 5 % Quantile); auf den Mittelwert der Bruchlast der jeweiligen Prüfreihe normierte Darstellung; Klebstoff EP

7.5 Diskussion der Konzepte zur Prognose der Tragfähigkeit

Eines der Ziele dieser Arbeit ist die zuverlässige Prognose der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen. Als Basis hierfür dienen die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe (Abschnitt 4) sowie der Verbindung Klebstoff-Stahl. Die Tragfähigkeit der geklebten Stahlverbindung wird durch die in Abschnitt 5 an ebenen Kleinbauteilen abgeleiteten spannungsabhängigen Versagenskriterien beschrieben. Darauf aufbauend wird die Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen in bauüblichen Abmessungen und bei Variation verschiedener Parameter nach drei unterschiedlichen Konzepten prognostiziert. Diese Konzepte werden nachfolgend hinsichtlich ihrer Genauigkeit, ihrer Vor- und Nachteile sowie der Übertragbarkeit in die im Bauwesen bislang übliche Bemessungspraxis diskutiert.

Zunächst soll auf die Eignung der Tragfähigkeitsprognose geklebter Anschlüsse auf der Basis von Nennspannungen eingegangen werden. Obwohl diese Vorgehensweise in vielen Anwendungen des Bauwesens den Regelfall darstellt, zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, wie in Abschnitt 7.2 ausgeführt, dass Nennspannungen für die Prognose der Tragfähigkeit der untersuchten Klebverbindungen nicht geeignet sind. Dies ist vor allem mit der ungleichmäßigen Spannungsverteilung in der Überlappungsklebung zu erklären. Insbesondere die an den Enden der Klebung vorhandenen Spannungskonzentrationen werden durch den Nennspannungsansatz nicht erfasst. An den Enden aus Gleichgewichtsgründen vorhandene Normalspannungen orthogonal zur Klebfuge sind nicht ermittelbar.

Sowohl die Prognose der Tragfähigkeit nach dem Konzept lokaler Spannungen als auch der probabilistische Bemessungsansatz basieren auf nichtlinearen numerischen Berechnungen der Kreishohlprofilverbindung. Das Konzept lokaler Spannungen stellt einen deterministischen Bemessungsansatz dar, nach dem sich durch Gegenüberstellung von Einwirkung und Widerstand für eine spezifische Verbindungsgeometrie die zugehörige Tragfähigkeit ergibt.

Beim probabilistischen Ansatz hingegen wird die Überlebenswahrscheinlichkeit einer Verbindung bei einer definierten Beanspruchung berechnet. Basis dieses Verfahrens ist die Weibull-Theorie (WEIBULL 1939).

Zunächst kann sowohl für das Konzept lokaler Spannungen als auch für den probabilistischen Bemessungsansatz festgehalten werden, dass die Tragfähigkeit der in dieser Arbeit untersuchten spröde versagenden Klebverbindungen zutreffend prognostiziert wird. Zur Beurteilung der Genauigkeit dienen die Quotienten aus den prognostizierten Mittelwerten der Tragfähigkeit und den Mittelwerten der experimentellen Ergebnisse der einzelnen Prüfreihen.

Gemittelt über alle Versuchsreihen der mit dem Klebstoff PUR gefügten Kreishohlprofilverbindungen zeigt sich nach dem Konzept der lokalen Spannungen eine Prognosegenauigkeit von 93 % (Bandbreite: 87 % – 105 %). Aus der probabilistischen Prognose der Tragfähigkeit resultiert eine Genauigkeit von 106 % (Bandbreite 91 % bis 122 %). Der charakteristische Wert der Verbindungstragfähigkeit entspricht bei beiden Konzepten (lokale Spannungen; Probabilistik) dem 5 %-Quantil. Während beim Konzept lokaler Spannungen der prognostizierte Wert des 5 %-Quantils von zwei experimentell bestimmten Bruchlasten unterschritten wird, liegen vier Versuchsergebnisse unter der probabilistisch prognostizierten charakteristischen Tragfähigkeit. Im Mittel über alle Prüfreihe kann die Prognose der 5 %-Quantile nach Konzept lokaler Spannungen als geringfügig konservativer bezeichnet werden (Mittelwert der charakteristischen bezogenen Tragfähigkeit: 83 %; lokales Konzept: 78 %).

Entsprechend können die Ergebnisse der Tragfähigkeitsprognose der EP-geklebten Kreishohlprofilproben zusammengefasst werden. Die Prognosegenauigkeit der Mittelwerte nach dem Konzept lokaler Spannungen beträgt im Schnitt 90 % (Bandbreite 79 % bis 97 %). Für die probabilistische Prognose der Mittelwerte der Tragfähigkeit ist eine Prognosegenauigkeit von 84 % bei einer etwas größeren Bandbreite von 68 % bis 108 % in den einzelnen Versuchsreihen festzuhalten. Beim Konzept lokaler Spannungen liegt lediglich eine experimentell bestimmte Bruchlast unterhalb des prognostizierten 5 %-Quantils. Nach dem probabilistischen Ansatz unterschreitet kein Versuchsergebnis den prognostizierten Wert. Für den Klebstoff EP zeigt sich im Mittel über alle Prüfreihe eine etwas konservativere Berechnung der Bemessungswerte der Tragfähigkeit nach dem probabilistischen Ansatz (Mittelwert der charakteristischen bezogenen Tragfähigkeit: 59 %; lokales Konzept: 68 %).

Ein Vergleich der beiden Klebstoffe zeigt, dass die Prognosegenauigkeit der Mittelwerte der Traglasten bei Berücksichtigung der Bandbreiten vergleichbar ist. Die nach dem lokalen Konzept über alle Versuchsreihen gemittelte Genauigkeit für die PUR-Verbindungen beträgt 93 %, für die EP-Verbindungen 90 %. Für die probabilistisch bestimmten Tragfähigkeiten lässt sich festhalten, dass die Prognosegenauigkeit der PUR-Proben (Mittelwert 106 %) höher als für die EP gefügten Proben ist (Mittelwert 84 %). Dies kann damit erklärt werden, dass das auf der Weibull-Theorie aufbauende probabilistische Konzept insbesondere für spröde versagende Werkstoffe geeignet ist. Ein Vergleich der Spannungs-Dehnungsbeziehungen aus dem uniaxialen Zugversuch an Substanzproben beider Klebstoffe (siehe Abschnitt 4) zeigt, dass die Arbeitslinie des Klebstoffs PUR weniger gekrümmt als die des Klebstoffs EP ist. Beim Klebstoff PUR handelt es sich zudem um den steiferen Werkstoff.

Beide Konzepte basieren auf nichtlinearen numerischen Berechnungen. Dies erfordert die Diskretisierung der Verbindungsgeometrie im numerischen Modell sowie die Implemen-

tierung geeigneter Werkstoffmodelle von Fügeteilen und Klebstoff. Während die mechanischen Eigenschaften üblicher Baustähle in der Literatur detailliert dokumentiert sind, sind zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der vorgesehenen Klebstoffe in der Regel experimentelle Untersuchungen erforderlich. Die Analyse von Bauteilen und Verbindungen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente stellt im Bauwesen eine übliche und häufig angewendete Vorgehensweise bei der Bemessung dar.

Bei der numerischen Berechnung nach dem Konzept lokaler Spannungen ist eine hohe Genauigkeit und Sorgfalt bei der Vernetzung der Modelle sowie bei der Festlegung der Auswertebereiche erforderlich. Grund hierfür sind die an den Singularitäten (Klebfugenden) auftretenden Spannungsspitzen. Die Ergebnisse sind von der Feinheit des numerischen Netzes abhängig. Bei einer zu groben Diskretisierung kann dies bei der Auswertung von Spannungen im Bereich der Singularitäten zu einer Überschätzung der Verbindungstragfähigkeit führen. Diese Problematik wird beim nichtlokalen probabilistischen Bemessungsansatz durch die Berechnung der Überlebenswahrscheinlichkeit einer Verbindung unter Berücksichtigung aller im Klebvolumen vorhandenen Spannungskomponenten umgegangen. Die aus der numerischen Modellierung resultierende Fehleranfälligkeit kann deshalb beim probabilistischen Ansatz als deutlich geringer eingestuft werden.

Weitere zentrale Grundlage für die Prognose der Tragfähigkeit sowohl nach dem Konzept lokaler Spannungen als auch nach dem probabilistischen Ansatz sind die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten spannungsbasierenden Versagenskriterien für geklebte Stahlverbindungen. Diese Kriterien basieren auf Versuchen an geklebten Kleinbauteilen mit variierendem Schäftungswinkel. Um sowohl den Mittelwert der Tragfähigkeit als auch ein beliebiges Quantil (unterschiedliche Überlebenswahrscheinlichkeiten) prognostizieren zu können, ist beim probabilistischen Ansatz lediglich ein auf allen Einzelergebnissen basierendes Versagenskriterium erforderlich. Die Quantile der Tragfähigkeit resultieren aus den zugehörigen Überlebenswahrscheinlichkeiten. Das Konzept lokaler Spannungen dagegen erfordert für den zu prognostizierenden Mittelwert der Tragfähigkeit sowie für den charakteristischen Wert des 5 %-Quantils unterschiedliche Versagenskriterien. Hierzu ist eine differenzierte statistische Auswertung der den Versagenskriterien zu Grunde liegenden Versuchsergebnisse notwendig.

Des Weiteren zeigt sich für die in dieser Arbeit untersuchten Klebstoffe PUR und EP, dass zur Definition des auf allen Einzelergebnissen basierenden Versagenskriteriums für geklebte Stahlverbindungen bereits die Klebproben mit Schäftungswinkeln von 0° und 90° ausreichen (siehe Abschnitt 5). Die zusätzliche Verwendung der Einzelergebnisse der restlichen Probenreihen führen zu keiner relevanten Verbesserung des Kriteriums. Dies stellt eine erhebliche Reduktion des erforderlichen Aufwandes zur Entwicklung des Versagenskriteriums dar. Während die 5 %-Quantile der Kreishohlprofiltragfähigkeit nach dem

probabilistischen Ansatz auch auf Basis dieses Kriteriums berechnet werden können, ist für die Prognose des 5 %-Quantils nach dem Konzept lokaler Spannungen ein zusätzliches charakteristisches Versagenskriterium erforderlich. Zur konservativen Absicherung der Verbindungstragfähigkeit sind jedoch die Ergebnisse aus der Untersuchung aller geschäftet geklebten Stahlproben erforderlich. Dadurch wird jedoch auch eine differenzierte Betrachtung der Streuung bei unterschiedlichen Versuchsserien ermöglicht.

Hinsichtlich der Umsetzung in der Bemessungspraxis im Bauwesen erscheint das Konzept lokaler Spannungen zumindest im Hinblick auf eine kurzfristige Umsetzung geeigneter. Die beschriebene methodische Vorgehensweise ist Berechnungsingenieuren wohl eher bekannt, da diese mit einer deterministischen Bestimmung der Tragfähigkeit eher der üblichen Bemessungspraxis im Stahlbau entspricht.

7.6 Zusammenfassung der Tragfähigkeitsprognose

Die in diesem Kapitel dokumentierten Arbeiten zur Prognose der Tragfähigkeit zusammenfassend kann festgehalten werden:

- Auf Basis der an Kleinbauteilen durchgeführten Charakterisierung der Klebstoffe sowie der Charakterisierung der Festigkeit der geklebten Stahlverbindung ist mit Hilfe numerischer Berechnungen die zutreffende Prognose der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen (auch bei bauüblichen Bauteildimensionen, insbesondere bzgl. Fügeteildurchmesser und Dickschichtklebung) möglich.
- Die im Bauwesen übliche Vorgehensweise der Bemessung von Tragwerken auf der Basis von Nennspannungen ist aufgrund der ungleichmäßigen Spannungsverteilung für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Klebverbindungen nicht geeignet.
- Die Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindung wird für die untersuchten Parameter Überlappungslänge, Klebschichtdicke, Profilquerschnitt sowie bei den definiert eingebrachten Imperfektionen Ausmitte der Schwerelinien und Schiefstellung zutreffend prognostiziert. Dies gilt sowohl für die mit dem Klebstoff PUR als auch für die mit dem Klebstoff EP verbundenen Kreishohlprofile.
- Sowohl das Konzept lokaler Spannungen als auch der probabilistische Bemessungsansatz führen zu einer zutreffenden Prognose der Mittelwerte der experimentell bestimmten Verbindungstragfähigkeit.
- Die prognostizierten charakteristischen Werte der Verbindungstragfähigkeit (5 %-Quantile) stellen sowohl bei Berechnung nach dem Konzept lokaler Spannungen als auch nach dem probabilistischen Ansatz eine konservative untere Grenze der Verbindungstragfähigkeit dar. Diese Bemessungsgrenzwerte werden bei insgesamt 88 experimentellen Einzelergebnissen von maximal vier Versuchsergebnissen unterschritten.

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Inhalt der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle und numerische Untersuchung der statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen unter Berücksichtigung der Anforderungen und Randbedingungen des Bauwesens. Diese erfordern u. a. Dick-schichtklebungen in einer Größenordnung von mehreren Millimetern. Der geklebte Anschluss wird dabei als Überlappungsstoß ausgebildet, die Klebstoffapplikation erfolgt durch Injektion in den zylindrischen Fügespalt.

Der wesentliche originäre Beitrag dieser Arbeit ist die Entwicklung und Validierung einer Methodik zur Prognose der statischen Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen. Grundlage hierfür sind durchgeführte Untersuchungen an kleinteiligen Proben zur mechanischen Charakterisierung der verwendeten Klebstoffe sowie zur Beschreibung der Festigkeit der geklebten Stahlverbindung. Auf dieser Basis wird mit nichtlinearen numerischen Berechnungen die Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilverbindungen zutreffend prognostiziert. Die Validierung der entwickelten Methodik für sämtliche untersuchte Parameter erfolgt durch die Gegenüberstellung von prognostizierter und im Rahmen dieser Arbeit experimentell bestimmter Tragfähigkeit der geklebten Kreishohlprofilanschlüsse. Die entwickelte Methodik zur zutreffenden Prognose der Verbindungstragfähigkeit stellt eine der zentralen Voraussetzungen für die Realisierung geklebter Kreishohlprofilanschlüsse im Stahlbau dar.

Im Weiteren werden die wesentlichen Ergebnisse in einer dem chronologischen Aufbau der vorliegenden Arbeit entsprechenden Reihenfolge zusammengefasst:

Nach der Beschreibung der maßgebenden Eigenschaften von Hohlprofilen wird auf die bisher im Stahlbau verwendeten Fügeverfahren Schweißen und Schrauben zum Anschluss von Kreishohlprofilen eingegangen. Die Bemessung dieser Anschlusskonstruktionen ist weitgehend erforscht und normativ in (DIN EN 1993-1-8; DIN EN 1993-1-8/NA) geregelt. Ein Nachteil der geschweißten Anschlüsse ist die Kerbwirkung der Schweißnaht, die nicht zuletzt Ausgangspunkt der von der Kreishohlprofilinnenseite ausgehenden Ermüdungsrisse ist (PUTHLI ET AL. 2010). Geklebte Kreishohlprofilverbindungen werden gegenwärtig im Stahlbau nicht realisiert.

Ein Überblick über das Kleben zylindrischer Bauteile zeigt, dass die Erkenntnisse aus bereits untersuchten Anwendungsbeispielen des Maschinen-, Geländer- oder Pipelinebaus aufgrund der Dimensionen von Fügeteilen und Klebspalt, der zu berücksichtigenden Maßtoleranzen, der betrachteten Beanspruchungen sowie der Fügepartner nicht direkt auf geklebte Kreishohlprofilanschlüsse im Stahlbau übertragbar sind. Im Hinblick auf eine Bemessung geklebter Verbindungen ist festzuhalten, dass trotz unterschiedlicher bereits veröffentlichter Versagenskriterien kein Konsens hinsichtlich der korrekten Beschreibung der Festigkeit von Klebverbindungen herrscht. Publierte spannungsbasierende Versagenskriterien, die der üblichen Bemessungspraxis im Bauwesen entsprechen, berücksichtigen zudem in der Regel nicht die Mehrachsigkeit des Spannungszustandes. Dies ist vor dem Hintergrund der Interaktion verschiedener Spannungskomponenten in nahezu jeder geklebten Verbindung kritisch zu sehen.

Voraussetzung für die Auswahl geeigneter Klebstoffe ist die objektive Analyse der baupraktischen Randbedingungen sowie der mechanischen und thermischen Beanspruchungen. Daraus werden Anforderungen an geklebte Kreishohlprofilanschlüsse im Stahlbau abgeleitet. Zunächst zeigen diese Ergebnisse, dass aufgrund der normativ zulässigen Maßtoleranzen von Kreishohlprofilen Dickschichtklebungen in der Größenordnung von mehreren Millimetern erforderlich sind. Dies ist bei strukturellen, hochbeanspruchten Klebverbindungen bisher unüblich. Die Analyse der mechanischen und thermischen Beanspruchungen erfordert Klebverbindungen mit einer Verbundschubfestigkeit von mindestens 8 MPa in einem Temperatureinsatzbereich von -24 °C bis maximal 67 °C bei hellen Fügeteiloberflächen (DIN EN 1991-1-5; DIN EN 1991-1-5/NA). Ständige Beanspruchungen der Verbindung erfordern weiterhin Klebstoffe mit geringer Kriechneigung; aufgrund der überlappenden Klebung der Kreishohlprofile sollten die Klebstoffe einen geringen Härtungsschrumpf aufweisen, um Zwängungsspannungen auf ein Minimum zu begrenzen.

Die ermittelten Anforderungen an die geklebte Verbindung stellen die Basis für die Auswahl geeigneter Klebstoffe dar. Ausgehend von einer Vorauswahl 24 kommerziell erhältlicher Klebstoffe werden nach einer differenzierten Analyse der technischen Daten sowie der experimentellen Prüfung von Substanz- und Verbundproben die Klebstoffe PUR und

EP für die weiteren Untersuchungen priorisiert. Auf Basis der durchgeführten experimentellen Untersuchungen kann für die maßgebenden Eigenschaften der Klebstoffe festgehalten werden, dass sowohl der PUR als auch der EP die Anforderungen an Steifigkeit und Festigkeit erfüllen. Die Glasübergangstemperaturen der Klebstoffe liegen oberhalb des in (DIN EN 1991-1-5) geforderten Temperatureinsatzbereiches. Dauerstandversuche an Verbundproben zeigen über eine Prüfdauer von drei Jahren Kriechverformungen in einer für den Stahlbau nicht relevanten Größenordnung ($< 0,2$ mm).

Von zentraler Bedeutung bei der Auslegung von Klebverbindungen ist die Berücksichtigung der vorliegenden mehrachsigen Spannungszustände. Diese sind bei nahezu allen Klebverbindungen vorhanden. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit ein spannungsbasierendes Versagenskriterium entwickelt, das die Interaktion von Schub- und Normalspannungen orthogonal zur Klebfuge berücksichtigt. Grundlage dieses Kriteriums sind experimentelle Untersuchungen an unter Schäftungswinkeln zwischen 0° und 90° klebtechnisch verbundenen Stahlfügeteilen (Kleinbauteile). Die axiale Zugbeanspruchung dieser Proben führt zu spezifischen, jedem Schäftungswinkel zugehörigen Verhältnissen von Schub- und Normalspannung in der Klebfuge. Die lokalen Spannungsmaxima beim Bruch der Klebverbindung werden mit Hilfe nichtlinearer numerischer Berechnungen unter Berücksichtigung der zuvor bestimmten mechanischen Eigenschaften der Klebstoffe ermittelt. Diese Ergebnisse stellen die Grundlage für die Definition der die Interaktion von Schub- und Normalspannungen berücksichtigenden Versagenskriterien der geklebten Stahlverbindung dar. Für beide Klebstoffe zeigt sich, dass die Verbindungsfestigkeit durch eine quadratische Interaktion (Ursprungsgleichung der Ellipse) der Komponenten Schub- und Normalspannung orthogonal zur Klebfuge zutreffend beschrieben wird. Definiert ist dabei neben dem auf allen Einzelergebnissen basierenden Kriterium für beide Klebstoffe weiterhin ein charakteristisches, auf den 5 %-Quantilen der zu Grunde liegenden Ergebnisse basierendes Versagenskriterium. Die entwickelten Versagenskriterien stellen die zentrale Grundlage für die Prognose der Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen dar.

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen geben Auskunft über die statische Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen für Anwendungen im Stahlbau. Die mit den Klebstoffen PUR und EP gefügten Anschlüsse weisen im Zugversuch ein nahezu lineares Last-Verformungsverhalten auf und versagen spröde. Die Analyse der Bruchflächen zeigt eine Mischform aus adhäsivem und substratnah kohäsivem Versagen, das überwiegend an der Fügefläche des innenliegenden Kreishohlprofils auftritt.

Auf Basis der Tragfähigkeitsuntersuchungen an geklebten Kreishohlprofilverbindungen ist festzuhalten, dass die Verbindungsfestigkeit für alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Parameter deutlich über den zuvor festgelegten Anforderungen liegt. Die aus den Mittelwerten der experimentell bestimmten Bruchlasten resultierenden Nennschubspan-

nungen im Überlappungsbereich liegen für alle untersuchten Probenkonfigurationen über 16,5 MPa. Untersucht ist der Einfluss der Parameter Überlappungslänge (22,5 - 110 mm), Klebschichtdicke (2,5 - 5,8 mm) sowie Kreishohlprofildurchmesser (42,5 - 298,5 mm) auf die Tragfähigkeit. Es zeigt sich beispielsweise, dass die Tragfähigkeit mit zunehmender Überlappungslänge unterproportional zunimmt. Die durchgeführten numerischen Analysen erklären diese Feststellung mit dem ungleichmäßigen Spannungszustand in der Klebfuge, bei dem versagensmaßgebende Spannungskonzentrationen an den Enden der Überlappung vorliegen. Untersuchungen an geklebten Kreishohlprofilproben mit definiert eingebrachten Imperfektionen dienen der Quantifizierung der Auswirkung von Ausmitten der Kreishohlprofilschwerelinie (in Höhe von 20 % bzw. 50 % der Klebschichtdicke) sowie Schiefstellungen (in Höhe von $0,75^\circ$ und $1,50^\circ$) auf die Tragfähigkeit. Festzuhalten ist, dass sich die geklebte Verbindung gutmütig gegenüber den Fertigungsabweichungen zeigt; die Tragfähigkeit wird um maximal 12 % reduziert. Der Einfluss aller genannten Parameter auf die Verbindungsfestigkeit ist für die beiden Klebstoffe PUR und EP analysiert. Hervorzuheben sind die Bruchlasten geklebter Großbauteile (Mittelwert $1.836,0 \pm 95,6$ kN), die bei einem Außendurchmesser von 298,5 mm eine Überlappungslänge von nur 110 mm (37 % des Durchmessers) aufweisen. Bisher wurden keine geklebten Kreishohlprofilverbindungen in dieser Größenordnung untersucht. Nicht zuletzt die Ergebnisse der Großbauteilversuche zeigen das Potential des Fügeverfahrens Kleben im Stahlbau.

Die Analyse der aus den experimentellen Bruchlasten resultierenden Spannungszustände in der Klebfuge auf Basis nichtlinearer numerischer Berechnungen beschreibt zum einen die Einflüsse geometrischer Parameter auf die Spannungsverteilung. Darüber hinaus ist der jedem experimentellen Einzelergebnis zugehörige Spannungszustand hinsichtlich lokaler Spannungmaxima ausgewertet. Diese Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den auf der Basis geklebter Kleinbauteile erarbeiteten Versagenskriterien. Auf Grundlage der numerischen Analysen ist weiterhin festzuhalten, dass die Interaktionsspannung, bestehend aus der maximalen Normalspannung orthogonal zur Klebfuge sowie der zugehörigen Schubspannung, in der Regel für das spröde Versagen der Verbindung maßgebend ist. Dieser Zusammenhang zeigt, dass die übliche Vorgehensweise, die in dieser Arbeit untersuchten Überlappungsklebung ausschließlich auf Basis von Schubspannungen zu beurteilen, nicht zielführend ist.

Auf Grundlage der an Kleinbauteilen durchgeführten mechanischen Charakterisierung der Klebstoffe sowie der geklebten Stahlverbindung (spannungsbasierende Versagenskriterien) kann die Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen zutreffend prognostiziert werden. Dies gilt für alle im Rahmen dieser Arbeit experimentell untersuchten geometrischen Parameter (Überlappungslänge, Klebschichtdicke, Kreishohlprofilgeometrie, Imperfektionen) sowie für die Verwendung der betrachteten Klebstoffe PUR und EP.

Die Tragfähigkeitsprognose erfolgt nach unterschiedlichen Konzepten. Zunächst zeigt sich, dass die im Bauwesen übliche Bemessung auf Basis von Nennspannungen für die in dieser Arbeit untersuchten Klebverbindungen nicht zielführend ist. Nichtlineare numerische Berechnungen geklebter Kreishohlprofilverbindungen stellen die Basis der Tragfähigkeitsprognose nach dem Konzept lokaler Spannungen dar. Ein probabilistisches Bemessungsmodell auf Basis der Weibull-Theorie (WEIBULL 1939) dient zusätzlich zur Prognose der Verbindungstragfähigkeit. Im Durchschnitt aller Versuchsreihen zeigt sich nach dem Konzept lokaler Spannungen eine Prognosegenauigkeit von 92 % (Bandbreite: 79 % bis 105 %). Aus der probabilistischen Berechnung der Tragfähigkeit resultiert eine Prognosegenauigkeit von im Mittel 95 % (Bandbreite 68 % bis 122 %). Die für eine Bemessung in der Baupraxis relevanten charakteristischen Werte der Verbindungstragfähigkeit (5 %-Quantile) stellen sowohl nach dem Konzept lokaler Spannungen als auch nach dem probabilistischen Ansatz eine sichere, jedoch nicht überkonservative untere Abgrenzung der Verbindungsfestigkeit dar.

Auf Basis von Untersuchungen an Kleinbauteilen (Substanz- und Verbundproben) ermöglicht die in dieser Arbeit entwickelte Methodik die Prognose der statischen Tragfähigkeit von geklebten Anschlüssen. Dies stellt einen wichtigen Beitrag zur Auslegung von geklebten Stahltragwerken dar.

8.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit behandelt die statische Tragfähigkeit geklebter Kreishohlprofilverbindungen für Anwendungen im Stahlbau und stellt eine Methodik zur Prognose der Verbindungstragfähigkeit vor. Vor der Umsetzung geklebter Kreishohlprofilanschlüsse in realen Tragwerken des Stahlbaus ist die Untersuchung weiterer Fragestellungen erforderlich.

Untersuchungen an Substanzproben zeigen, dass die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Klebstoffe Glasübergangstemperaturen aufweisen, die oberhalb des in (DIN EN 1991-1-5; DIN EN 1991-1-5/NA) normativ definierten Temperatureinsatzbereiches für Bauwerke liegen. Bei rohrförmigen Überlappungsklebung muss zusätzlich beachtet werden, dass Temperaturänderungen aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl und Klebstoff zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Klebverbindung führen können. Diese Beanspruchungen können in einfacher Weise durch einwirkende Spannungen beschrieben werden. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik der spannungsbasierenden Prognose der Tragfähigkeit erlaubt deshalb auch die Berücksichtigung der mechanischen Einwirkungen aus Temperatur. Sinnvoll ist die experimentelle

Bestätigung der Werkstoffkennwerte der Klebstoffe sowie der Tragfähigkeit der geklebten Verbindung an den Grenzen des Temperatureinsatzbereiches.

Die Klebung der Probekörper erfolgt im Rahmen dieser Arbeit auf Korund-gestrahlten Fügeiteiloberflächen. In der baupraktischen Umsetzung sind aus Gründen des Korrosionsschutzes neben gestrahlten Oberflächen verzinkte oder mit organischen Beschichtungen versehene Substrate von Bedeutung. Die entwickelte Methodik zur Prognose der Tragfähigkeit kann leicht auf andere Fügeiteiloberflächen übertragen werden. Hierzu ist lediglich die Charakterisierung der Verbindungsfestigkeit (geschäftet geklebte Probekörper) unter Berücksichtigung der Haftung der Beschichtung als Grundlage für die Erarbeitung eines modifizierten Versagenskriteriums erforderlich. Gleiches gilt für andere Fügeiteilwerkstoffe wie beispielsweise Aluminium oder nichtrostende Stähle.

Hinsichtlich des Langzeitverhaltens der geklebten Verbindung sind zusätzlich Alterungsuntersuchungen von Interesse. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der üblicherweise geplanten Nutzungsdauer von 50 Jahren für Gebäude und 100 Jahren für Brücken und weitere Ingenieurbauwerke zu sehen (DIN EN 1990). Dabei sollte in zeitraffenden Alterungsversuchen unter anderem die Beständigkeit der Verbindung gegenüber Temperaturwechselbeanspruchung bestimmt werden. Weiterhin ist die Bestimmung der Tragfähigkeit nach Auslagerung der Proben in feuchter Umgebung sowie bei korrosiver Beanspruchung sinnvoll. Auch die Verbindungsfestigkeit nach Alterung kann auf Basis von Kleinprüfkörpern nach der in dieser Arbeit entwickelten Methodik bestimmt und auf geklebte Kreishohlprofilanschlüsse übertragen werden. Empfohlen wird für alle Alterungsuntersuchungen, die Enden der Klebspalte gegen angreifende Medien zu versiegeln.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Tragfähigkeitsprognose kann somit für alle genannten Fragestellungen angewendet werden.

Zur Realisierung geklebter Anschlüsse in vorwiegend nicht ruhend beanspruchten Tragwerken des Stahlbaus wie beispielsweise Brücken oder Tragstrukturen von Windenergieanlagen ist neben der Kenntnis der statischen Verbindungstragfähigkeit die Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit der geklebten Verbindungen erforderlich. Hierzu sind weitere experimentelle Untersuchungen an geklebten Kreishohlprofilproben durchzuführen. Ziel dieser Untersuchungen sollte die Quantifizierung der Ermüdungsfestigkeit der Verbindung, beispielsweise in Form von Wöhlerlinien, sein. Diese werden im Stahlbau in der Regel als Grundlage für den Ermüdungsnachweis konstruktiver Details verwendet. Die Übertragbarkeit der entwickelten Methodik zur Prognose der statischen Tragfähigkeit gilt es in Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit zu überprüfen.

Literaturverzeichnis

Fachveröffentlichungen

Adams, R. D.; Harris, J. A. (1987): The influence of local geometry on the strength of adhesive joints. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 7 (2), S. 69–80.

Adams, R. D.; Peppiatt, N. A. (2006): Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints. In: *The Journal of Adhesion* 9 (1), S. 1–18.

Albiez, M.; Fricke, H.; Vallée, T.; Bucak, Ö.; Ehard, H.; Ummenhofer, T. (2013): Geklebte Stahlrohr-Stahlgussverbindungen im konstruktiven Stahlbau. In: *Bauingenieur* 88 (10), S. 435–441.

Albiez, M.; Götz, F.; Puthli, R.; Ummenhofer, T. (2012): Numerical and analytical investigation of geometrical imperfections on adhesive bonded cast steel – steel joints. In: Leroy Gardner (Hg.): *Tubular Structures XIV*: CRC Press, S. 249–256.

Albiez, M.; Ummenhofer, T. (2013): Kleben im Bauwesen - Innovationen durch Technologietransfer? In: DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (Hg.): *DVS Congress 2013. Große Schweißtechnische Tagung - Vorträge der Veranstaltungen in Essen vom 16. bis 21. September 2013*. Düsseldorf: DVS Media GmbH (DVS-Berichte, Bd. 296), S. 235–296.

- Alqam, M.; Bennett, R. M.; Zureick, A.-H. (2002): Three-parameter vs. two-parameter Weibull distribution for pultruded composite material properties. In: *Composite Structures* 58 (4), S. 497–503.
- Althof, W. (1966): Festigkeitsuntersuchungen an geklebten Rohrverbindungen aus Aluminium. In: *Adhäsion* (10), S. 493–496.
- ANSYS (2013): Theory reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications Release 15.0.; ANSYS Inc.
- Apalak, M.; Güneş, R.; Fıdancı, L. (2003): Geometrically non-linear thermal stress analysis of an adhesively bonded tubular single lap joint. In: *Finite Elements in Analysis and Design* 39 (3), S. 155–174.
- Bažant, Z. P. (2004): Probability distribution of energetic-statistical size effect in quasibrittle fracture. In: *Probabilistic Engineering Mechanics* 19 (4), S. 307–319.
- Bažant, Z. P. (2005): *Scaling of structural strength*. 2nd ed: Elsevier/Butterworth-Heinemann. Oxford, Burlington, MA.
- Bažant, Z. P.; Novák, D. (2000): Probabilistic Nonlocal Theory for Quasibrittle Fracture Initiation and Size Effect. I: Theory. In: *Journal of Engineering Mechanics* 126 (2), S. 166–174.
- Bažant, Z. P.; Xi, Y. (1991): Statistical Size Effect in Quasi-Brittle Structures: II. Nonlocal Theory. In: *J. Eng. Mech.* 117 (11), S. 2623–2640.
- Bažant, Z. P.; Xi, Y.; Reid, S. G. (1991): Statistical Size Effect in Quasi-Brittle Structures: I. Is Weibull Theory Applicable? In: *J. Eng. Mech.* 117 (11), S. 2609–2622.
- Bergmeister, K. (2005a): Verstärkung mit Kohlenstofffasern - Teil 1: Verstärkung von Biegeträgern. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (S1), S. 62–68.
- Bergmeister, K. (2005b): Verstärkung mit Kohlenstofffasern - Teil 2: Verstärkung von Stützen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (S1), S. 69–73.
- Bieker, C.; Schlimmer, M. (2004): Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen (Teil 3). In: *Adhäsion* 48 (7-8), S. 38–42.
- Bigwood, D. A.; Crocombe, A. D. (1990): Non-linear adhesive bonded joint design analyses. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 10 (1), S. 31–41.

Böddeker, T.; Flügge, W.; Hilgert, O.; Kaack, M.; Andersen, K.; Bufalini, A. (2013): Innovative and competitive new joining technology for steel pipes using adhesive bonding (JoinTec): Publications Office of the European Union. Luxembourg (EUR, 25991).

Böddeker, T.; Hahn, O. (2011a): Entwicklung einer Methodik zum Kleben von Stahlrohren: Shaker Verlag. Aachen (Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik, Universität Paderborn, 94).

Böddeker, T.; Hahn, O. (2011b): JoinTec - innovative and competitive new joining technology for steel pipes using adhesive bonding. Hannover-Messe, Werkstoffforum. Hannover, 08.04.2011.

Brockmann, W. (2005): Klebtechnik. Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren: Wiley-VCH Verlag. Weinheim.

Brockmann, W.; Kollek, H. (1980): Ermittlung der Langzeitbeanspruchbarkeit von Metallklebungen mit im Maschinenbau gebräuchlichen und zukünftigen Bindemitteln. In: Forschungsheft des Forschungskuratoriums Maschinenbau (FKM) (81).

Brockmann, W.; Neeb, T. (2001): Stand der Klebtechnik im Stahlbau. In: Stahlbau 70 (2), S. 106–115.

Bucak, Ö.; Hagl, A. (2006): Kleben im Bauwesen – gestern, heute, morgen – Allgemeine Übersicht und Ausblick auf die Forschung im Konstruktiven Glasbau an der Fachhochschule München (FHM). In: Stahlbau 75 (6), S. 499–507.

Calard, V.; Lamon, J. (2002): A probabilistic statistical approach to the ultimate failure of ceramic-matrix composites—part II: macroscopic model. In: Composites Science and Technology 62 (3), S. 395–399.

Ciupack, Y.; Pasternak, H.; Schiel, M.; Ince, E. (2014): Adhesive bonded joints in steel structures. In: Steel Construction 7 (3), S. 178–182.

Clark, J. D.; McGregor, I. J. (1993): Ultimate Tensile Stress over a Zone: A New Failure Criterion for Adhesive Joints. In: The Journal of Adhesion 42 (4), S. 227–245.

Cognard, J. Y.; Devaux, H.; Sohier, L. (2010): Numerical analysis and optimisation of cylindrical adhesive joints under tensile loads. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 30 (8), S. 706–719.

Cognard, Y. J.; Sohier, L.; Créac'hcadec, R.; Lavelle, F.; Lidon, N. (2012): Influence of the geometry of coaxial adhesive joints on the transmitted load under tensile and compression loads. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 37, S. 37–49.

Cook, R. W.; Tod, D. A. (1993): A study of the cure of adhesives using dynamic mechanical analysis. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 13 (3), S. 157–162.

Crocombe, A. D. (1989): Global yielding as a failure criterion for bonded joints. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 9 (3), S. 145–153.

Crocombe, A. D.; Adams, R. D. (1981): Peel Analysis Using the Finite Element Method. In: *The Journal of Adhesion* 12 (2), S. 127–139.

Crocombe, A. D.; Adams, R. D. (1982): An Elasto-Plastic Investigation of the Peel Test. In: *The Journal of Adhesion* 13 (3-4), S. 241–267.

Crocombe, A. D.; Bigwood, D. A. (1992): Development of a full elasto-plastic adhesive joint design analysis. In: *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 27 (4), S. 211–218.

Crocombe, A. D.; Bigwood, D. A.; Richardson, G. (1990): Analysing structural adhesive joints for failure. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 10 (3), S. 167–178.

da Silva, L. F.; das Neves, P. J.; Adams, R. D.; Spelt, J. K. (2009a): Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29 (3), S. 319–330.

da Silva, L. F.; das Neves, P. J.; Adams, R. D.; Wang, A.; Spelt, J. K. (2009b): Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29 (3), S. 331–341.

da Silva, L. F. M.; Campilho, R. D. S. G. (2012): *Advances in numerical modelling of adhesive joints*: Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.

da Silva, L. F. M.; Öchsner, A. (2008): *Modeling of adhesively bonded joints*: Springer Verlag. Berlin, London.

Dörnen, A.; Trittler, G. (1956): Neue Verbindungstechnik im Stahlbau. In: *Der Stahlbau* 25 (8), S. 181–184.

Dragoni, E.; Goglio, L. (2013): Adhesive stresses in axially-loaded tubular bonded joints – Part I: Critical review and finite element assessment of published models. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 47, S. 35–45.

Dutta, D. (1999): *Hohlprofil-Konstruktionen*: Ernst Verlag. Berlin.

Dutta, D.; Wardenier, J.; Yeomans, N.; Sakae, K.; Bucak, Ö.; Packer, J. A. (1998): CIDECT Design Guide 7. Herstellung, Zusammenbau und Aufstellung von Hohlprofilkonstruktionen: TÜV-Verlag. Köln.

Ehrenstein, G. W. (2004): Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik: Hanser Verlag. München.

El-Hady, F. A.; Kandil, N. (2002): Optimization of tubular double lap-joint configuration. In: Polymer Composites 23 (5), S. 934–941.

Feldmann, M.; Abeln, B.; Geßler, A. (2013): Klebtechnik im Stahlbrückenbau. In: Dechema, DVS, FOSTA und ivTH (Hg.): Tagungsband zum 13. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik. Frankfurt. Dechema, S. 1–7.

Feldmann, M.; Völling, B.; Geßler, A.; Wellershoff, F.; Geiß, P.-L.; Wagner, A. (2006): Kleben im Stahlbau. In: Stahlbau 75 (10), S. 834–846.

Freudenthal, A. M. (1968): Statistical approach to brittle fracture. In: Harold Liebowitz (Hg.): Fracture - An Advanced Treatise. Vol. 2. New York, NY: Academic Press, S. 591–619.

Fritz, A. Herbert; Schulze, G. (2012): Fertigungstechnik. 10. Aufl.: Springer Verlag. Berlin.

Frostig, Y.; Thomsen, O. T.; Mortensen, F. (1999): Analysis of Adhesive-Bonded Joints, Square-End, and Spew-Fillet—High-Order Theory Approach. In: J. Eng. Mech. 125 (11), S. 1298–1307.

Gansow, M. (2010): Neue Einsatzgebiete für Polyurethan-Klebstoffe bei der Rotorblattverklebung. New Media Publisher GmbH. Online verfügbar unter <http://plasticker.de/fachwissen/showartikel.php?id=92&begriff=&backto=/fachwissen/fachartikel.php>, zuletzt aktualisiert am 15.06.2010.

Goland, M.; Reissner, E. (1944): The Stresses in Cemented Joints. In: Journal of Applied Mechanics, S. A17-A27.

Gonzales, E.; Tannert, T.; Vallée, T. (2016): The impact of defects on the capacity of timber joints with glued-in rods. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 65 (3), S. 33–40.

Greenwood, L. (1969): The strength of a lap joint. In: David John Alner (Hg.): Aspects of adhesion 5. Proceedings of the conference held at the City University, ECI on 5 and 6 April 1967 and 9 and 10 April 1968. London: University of London Press.

- Habenicht, G. (2008): Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie. 5. Aufl.: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage. Wiesbaden.
- Habenicht, G. (2009): Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6. Aufl.: Springer Verlag. Berlin.
- Hagl, A. (2002): Synthese aus Glas und Stahl: Die Herz-Jesu-Kirche München. In: Stahlbau 71 (7), S. 498–506.
- Hagl, A. (2007): Bemessung von strukturellen Silikon-Klebungen. In: Stahlbau 76 (8), S. 569–581.
- Hagl, A. (2008): Punktueller Kleben mit Silikonen. In: Stahlbau 77 (11), S. 791–801.
- Hahn, B.; Vallée, T.; Stamm, B.; Weinand, Y. (2012): Experimental investigations and probabilistic strength prediction of linear welded double lap joints composed of timber. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 39, S. 42–48.
- Hahn, B.; Vallée, T.; Stamm, B.; Weinand, Y. (2014): Moment resisting connections composed of friction-welded spruce boards: experimental investigations and numerical strength prediction. In: European Journal of Wood and Wood Products 72 (2), S. 229–241.
- Hahn, O.; Böddeker, T.; Flügger, W.; Hilger, O. (2010): Klebtechnisches Fügen von Pipelines. Konzeptentwicklung und Machbarkeitsstudien an Stahlrohren. In: Adhäsion (4), S. 44–49.
- Hahn, O.; Klemens, U. (1997): Aufbau eines wissensbasierten Systems für das Fügen von Rohrverbindungen mittels Kleben. In: Schweißen und Schneiden 49 (7), S. 431–437.
- Harris, J. A.; Adams, R. A. (1984): Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 4 (2), S. 65–78.
- Hart-Smith, L. J. (1973): Adhesive-Bonded Single-Lap Joints. NASA Contract Report 112236.
- Herion, S. (2007): Guss im Bauwesen. In: Ulrike Kuhlmann (Hg.): Stahlbau Kalender. Berlin: Ernst & Sohn (Stahlbau Kalender, Jahrgang 9), S. 415–454.
- Hobbacher, A. (2009): Recommendations for fatigue design of welded joints and components: Welding Research Council. New York, NY (IIW document, 1823-07).

Hosseini, S.; Öchsner, A. (2009): A Comparative Numerical Study of the Stress States in Flat and Cylindrical Lap Joints. In: *Journal of Adhesion Science and Technology* 23 (10-11), S. 1369–1382.

Ikegami, K.; Takeshita, T.; Matsuo, K.; Sugibayashi, T. (1990): Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metals. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 10 (3), S. 199–206.

Kennedy, S. (2007): Das Sandwich-Platten-System (SPS). In: *Stahlbau* 76 (7), S. 455–464.

Knebel, K.; Wahl, M.; Maloblocki, M. (2008): Raumfachwerke für große Spannweiten. In: Werner Wagner (Hg.): *Berichte der Fachtagung Baustatik-Baupraxis 10 am 17. und 18. März 2008 in Karlsruhe*. Dresden: Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke.

Knops, M. (2011): Klebtechnik in der Windenergie - Anwendungen und Herausforderungen. In: Dechema, DVS, FOSTA und iVTH (Hg.): *Tagungsband zum 11. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik*. Frankfurt. Dechema, S. 11–12.

Kuhlmann, U. (Hg.) (2007): *Stahlbau Kalender*. Berlin: Ernst & Sohn, Berlin (Stahlbau Kalender, Jahrgang 9).

Kumar, S. (2009): Analysis of tubular adhesive joints with a functionally modulus graded bondline subjected to axial loads. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29 (8), S. 785–795.

Kumar, S.; Scanlan, J. P. (2010): Stress Analysis of Shaft-Tube Bonded Joints Using a Variational Method. In: *The Journal of Adhesion* 86 (4), S. 369–394.

Langlois, R. (1991): Estimation of Weibull parameters. In: *Journal of Materials Science Letters* 10 (18), S. 1049–1051.

Lee, S. J.; Lee, D. G. (2006): Development of a Failure Model for the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint. In: *The Journal of Adhesion* 40 (1), S. 1–14.

Lubkin, J. L.; Reissner, E. (1956): Stress distribution and design data for adhesive lap joints between circular tubes. In: *Transactions of the ASME* 78, S. 1213–1221.

MB 382 (2012): *Kleben von Stahl- und Edelstahl Rostfrei*. Merkblatt 382. Düsseldorf.

Meinz, J. (2010): *Kleben im Stahlbau*. Betrachtungen zum Trag- und Verformungsverhalten und zum Nachweis geklebter Trapezprofilanschlüsse und verstärkter Hohlprofile in Pfosten-Riegel-Fassaden: Weißensee-Verlag. Berlin.

- Meinz, J.; Pasternak, H. (2011): Zum vereinfachten rechnerischen Nachweis von Klebverbindungen im Stahlbau. In: Bauingenieur 86 (6), S. 262–268.
- Minten, J.; Sedlacek, G.; Paschen, M.; Feldmann, M.; Geßler, A. (2007): SPS – ein neues Verfahren zur Instandsetzung und Ertüchtigung von stählernen orthotropen Fahrbahnplatten. In: Stahlbau 76 (7), S. 438–454.
- Müller, A.; Wiegand, T. (2014): Herstellung und Eigenschaften von geklebten Vollholzprodukten: Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. Wuppertal (Reihe 4, Teil 2, Folge 2).
- Nayeb-Hashemi, H.; Rossettos, J. N.; Melo, A. P. (1997): Multiaxial fatigue life evaluation of tubular adhesively bonded joints. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 17 (1), S. 55–63.
- Nemeş, O.; Lachaud, F. (2009): Modeling of Cylindrical Adhesively Bonded Joints. In: Journal of Adhesion Science and Technology 23 (10-11), S. 1383–1393.
- Nemeş, O.; Lachaud, F.; Mojtabi, A. (2006): Contribution to the study of cylindrical adhesive joining. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 26 (6), S. 474–480.
- Niemi, E. (Hg.) (1995): Stress determination for fatigue analysis of welded components. International Institute of Welding. Cambridge, England: Abington Publishing, Cambridge, England.
- Origin (o. J.): Nichtlineare implizite Kurvenanpassung. Iterationsalgorithmus - ODR-Algorithmus. Hg. v. OriginLab. Northampton, MA. Online verfügbar unter http://www.originlab.de/doc/Origin-Help/Fitting-Implicit#Iteration_Algorithm, zuletzt geprüft am 22.09.2015.
- Pasternak, H.; Ciupack, Y. (2014): Development of Eurocode-based design rules for adhesive bonded joints. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 53, S. 97–106.
- Peschka, M.; Wolf, M. (2009): Verfahren zum Verbinden von Rohren sowie Rohr mit profiliertem Stirnende. Anmeldenr: DE200710040452. Veröffentlichungsnr: DE102007040452 A1.
- Pierce, F. T. (1926): Tensile Tests for Cotton Yarns – “The Weakest Link”. Theorems on the Strength of Long and of Composite Specimens. In: Journal of the Textile Institute Transactions 17 (7), S. 355–368.
- Puck, A. (1996): Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. Modelle für die Praxis: Hanser Verlag. München.

Pugno, N.; Carpinteri, A. (2003): Tubular Adhesive Joints Under Axial Load. In: *Journal of Applied Mechanics* 70 (6), S. 832.

Puthli, R. (1998): Hohlprofilkonstruktionen aus Stahl nach DIN V ENV 1993 (EC 3) und DIN 18800 (11.90). Anwendung - Konstruktion und Bemessung - Knotenverbindungen - Ermüdung - Entwurfsbeispiele: Werner Verlag. Düsseldorf.

Puthli, R.; Herion, S.; Veselcic, M.; Hirt, M. A.; Nussbaumer Alain; Haldimann, S. et al. (2010): *Wirtschaftliches Bauen von Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahlhohlprofilen*. Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft (Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. im Stahl-Zentrum, FOSTA P591).

Quispe Rodríguez, R.; de Paiva, William Portilho; Sollero, P.; Bertoni Rodrigues, Marcelo Ricardo; de Albuquerque, Éder Lima (2012): Failure criteria for adhesively bonded joints. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 37, S. 26–36.

Raghava, R.; Caddell, R. M.; Yeh, Gregory S. Y. (1973): The macroscopic yield behaviour of polymers. In: *Journal of Materials Science* 8 (2), S. 225–232.

Rasche, M. (2012): *Handbuch Klebtechnik*: Hanser Verlag. München.

Romanos, G. (1997): Klebtechnologie konstruktiv ausnutzen. Beanspruchungsgerechte Gestaltung geklebter Welle-Nabe-Verbindungen. In: *Der Konstrukteur* 28 (10), S. 20–22.

Sachs, L.; Hedderich, J. (2006): *Angewandte Statistik*. 12. Aufl.: Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.

Schlimmer, M. (1982): Anstrengungshypothese für Metallklebverbindungen. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 13 (6), S. 215–221.

Schlimmer, M. (2003): Grundlagen zur Berechnung des mechanischen Verhaltens von strukturellen Klebverbindungen des Fahrzeugbaus. In: *Tagungsband zum 10. Paderborner Symposium Fügetechnik, Mechanisches Fügen und Kleben*, S. 107–133.

Schlimmer, M.; Siebert, M. (2005a): Verfahren zur Erstellung einer Steckverbindung mittels Klebstoffinjektion, sowie ein Einsteckelement und ein hohles Füge teil hierfür. Anmeldenr: DE200410001386. Veröffentlichungsnr: DE102004001386 B3.

Schlimmer, M.; Siebert, M. (2005b): Vorrichtung zur Erstellung einer Steckverbindung mittels Klebstoffinjektion. Anmeldenr: DE200410001388. Veröffentlichungsnr: DE102004001388 B4.

Schreier, H.; Lichtenberger, R. (2003): Kombination von Stereoskopie und digitalen Korrelationsverfahren zur Messung von Kontur, Verformung und Dehnung. In: T. Luhmann (Hg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der 2. Oldenburger 3D-Tage. Heidelberg: Wichmann-Verlag.

Shi, Y. P.; Cheng, S. (1993): Analysis of Adhesive-Bonded Cylindrical Lap Joints Subjected to Axial Load. In: Journal of Engineering Mechanics 119 (3), S. 584–602.

Siebert, M. (2006): Untersuchung der mechanischen Eigenschaften injektionsgefügter Rundsteckverbindungen: Shaker Verlag. Aachen (Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel).

Stahl, J.; Geiß, P. L. (2015): Kleben stückverzinkter Bauteile. In: DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (Hg.): Doktorandenseminar Klebtechnik 2015. Düsseldorf: DVS Media GmbH (DVS-Berichte, 1682).

Steidl, G. (2006): Guss im konstruktiven Ingenieurbau. Bauteile aus Eisen- und Aluminiumwerkstoffen in Tragwerken: DVS-Verlag. Düsseldorf (Die schweißtechnische Praxis, 33).

Stihl, T.; Chassard, C.; Feldmann, M.; Bild, S. (2013): Neue Technologie für die Hängebrücke über die Saar in Mettlach - Brückenfahrbahn aus Sandwich Plate System (SPS). In: Stahlbau 82 (3), S. 179–187.

Stommel, M.; Stojek, M.; Korte, W. (2011): FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. München.

Tannert, T.; Hehl, S.; Vallée, T. (2010): Probabilistische Bemessung von geklebten Anschlüssen im Holzbau. In: Bautechnik 87 (10), S. 623–629.

TD EP (2012): Technisches Datenblatt Klebstoff EP.

TD PUR (2011): Technisches Datenblatt Klebstoff PUR.

Thomsen, O. T. (1992): Elasto-static and elasto-plastic stress analysis of adhesive bonded tubular lap joints. In: Composite Structures 21 (4), S. 249–259.

Toutenburg, H.; Heumann, C. (2009): Deskriptive Statistik. 7. Aufl.: Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.

Towse, A.; Davies, R.; Clarke, A.; Wisnom, M.; Adams, R.; Potter, K. (1997): The design and analysis of high load intensity adhesively bonded double lap joints. In: Proceedings of the fourth international conference on deformation and fracture of composites, Manchester, S. 479–488.

Trittler, G.; Dörnen, K. (1964): Die vorgespannte Klebverbindung (VK-Verbindung), eine Weiterentwicklung der Verbindungstechnik im Stahlbau. In: Der Stahlbau 33 (9), S. 257–269.

Tsai, S. W.; Wu, E. M. (1971): A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. In: Journal of Composite Materials 5 (1), S. 58–80.

Ummenhofer, T.; Albiez, M.; Bucak, Ö.; Ehard, H.; Mayer, B.; Fricke, H. (2015): Geklebte Stahl-Stahlgussverbindungen am Beispiel von Fachwerkknoten von Rundhohlprofil-Konstruktionen: Verlag- und Vertriebsgesellschaft. Düsseldorf (Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. im Stahl-Zentrum, FOSTA P884).

Ungermann, D.; Ummenhofer, T.; Puthli, R.; Weynand, K. (2015): Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Band 2: Anschlüsse ; DIN EN 1993-1-8 mit Nationalem Anhang ; Kommentar und Beispiele. 1. Aufl.: Beuth Verlag GmbH. Berlin.

Vallée, T.; Correia, J. R.; Keller, T. (2006): Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles – Part II: Strength prediction. In: Composites Science and Technology 66 (13), S. 1915–1930.

Vallée, T.; Tannert, T.; Fecht, S. (2015): Adhesively Bonded Connections in the Context of Timber Engineering - A Review. In: The Journal of Adhesion.

van Straalen, I.; Wardenier, J.; Vogelesang, L. B.; Soetens, F. (1998): Structural adhesive bonded joints in engineering – drafting design rules. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 18 (1), S. 41–49.

Volkersen, O. (1938): Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. In: Luftfahrtforschung 15, S. 41–47.

Volkersen, O. (1953): Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen. In: Energie und Technik, S. 68-71, 103-108 u. 150-154.

Wang, R. X.; Cui, J.; Sinclair, A. N.; Speltz, J. K. (2003): Strength of adhesive joints with adherend yielding: I. Analytical model. In: The Journal of Adhesion 79 (1), S. 23–48.

Wardenier, J. (2010): Hollow sections in structural applications: CIDECT; Bouwen met Staal. Geneva, Zoetermeer, Netherlands.

- Wardenier, J.; Kurobane, Y.; Packer, J.A., Vegte van der, G.J.; Zhao, X.-L. (2011): CIDECT Design Guide 1. Berechnung + Bemessung von Verbindungen aus Rundhohlprofilen unter vorwiegend ruhender Beanspruchung. 2. Aufl.: LSS Verlag. Dortmund.
- Weibull, W. (1939): A statistical theory of the strength of materials. In: Ingeniørers Vetenskaps Akademien Handlingar (Nr. 151), S. 1–45.
- Weller, B.; Tasche, S. (2008): Strukturelles Kleben im Konstruktiven Glasbau. In: Stahlbau 77 (S1), S. 28–33.
- Wistuba, E. (1980): Kleben und Klebstoffe. In: Chemie in unserer Zeit 14 (4), S. 124–133.
- Wooley, G.; Carver, D. (1971): Stress concentration factors for bonded lap joints. In: Journal of Aircraft 8 (10), S. 817–820.
- WOOLEY, G. R.; CARVER, D. R. (1971): Stress concentration factors for bonded lap joints. In: Journal of Aircraft 8 (10), S. 817–820.
- Zhao, B.; Lu, Z.-H.; Lu, Y.-N. (2011a): Closed-form solutions for elastic stress–strain analysis in unbalanced adhesive single-lap joints considering adherend deformations and bond thickness. In: International Journal of Adhesion and Adhesives 31 (6), S. 434–445.
- Zhao, X.; Adams, R. D.; da Silva, L. (2011b): Single lap joints with rounded adherend corners: Stress and strain analysis. In: Journal of Adhesion Science & Technology 25 (8), S. 819–836.
- Zhao, X.; Adams, R. D.; da Silva, L. F. M (2011c): Single lap joints with rounded adherend corners: Experimental results and strength prediction. In: Journal of Adhesion Science & Technology 25 (8), S. 837–856.
- Zilch, K.; Zehetmaier, G. (2006): Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN 1045-1 und DIN EN 1992-1-1: Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.
- Zwolak, J. W.; Boggs, P. T.; Watson, L. T. (2007): Algorithm 869. In: ACM Transactions on Mathematical Software 33 (4), S. 27–39.

Verzeichnis technischer Regelwerke

DIN 1052, Dezember 2008: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 50125, Juli 2009: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN 8593-8, September 2003: Fertigungsverfahren Fügen Teil 8: Kleben - Einordnung, Unterteilung, Begriffe: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10204, Januar 2005: Metallische Erzeugnisse - Arten von Prüfbescheinigungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10210-1, Juli 2006: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 1: Technische Lieferbedingungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10210-2, Juli 2006: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 2: Grenzabmaße, Maße und statische Werte: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10216-1, August 2008: Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen – Technische Lieferbedingungen – Teil 1: Rohre aus unlegierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei Raumtemperatur: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10219-1, Juli 2006: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 1: Technische Lieferbedingungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10219-2, Juli 2006: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 2: Grenzabmaße, Maße und statische Werte: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10219-2 Berichtigung 1, Januar 2007: Berichtigung 1 zu DIN EN 10219-2: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10277-1, Juni 2008: Blankstahlerzeugnisse – Technische Lieferbedingungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10277-2, Juni 2008: Blankstahlerzeugnisse – Technische Lieferbedingungen – Teil 2: Stähle für allgemeine technische Verwendung: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 10340, Januar 2008: Stahlguss für das Bauwesen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1090-2, Juli 2015: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 12188, Juli 1999: Prüfverfahren – Bestimmung der Klebewirkung an Stahl für die Charakterisierung der Eigenschaften von Klebstoffen für konstruktive Zwecke: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 14080, September 2013: Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 14509, Dezember 2013: Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten – Werkmäßig hergestellte Produkte – Spezifikationen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1465, Juli 2009: Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 14869-2, Juli 2011: Strukturklebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen – Teil 2: Scherprüfung für dicke Füge­teile (ISO 11003-2:2001, modifiziert): Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1990, Dezember 2010: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1991-1-5, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1991-1-5/NA, Dezember 2010: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1993-1-1, Dezember 2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1993-1-1/A1, Juli 2014: Änderung 1 zu: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1993-1-1/NA, Dezember 2010: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.

DIN EN 1993-1-1/NA/A1, Oktober 2014: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Änderung 1: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1993-1-8, Dezember 2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 1993-1-8/NA, Dezember 2010: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 923, Juni 2008: Klebstoffe – Benennungen und Definitionen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 10365, August 1995: Klebstoffe: Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 527-2, Juni 2012: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 6721-1, August 2011: Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundlagen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 6892-1, Juni 2014: Metallische Werkstoffe - Zugveruch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 7500-1, Mai 2014: Metallische Werkstoffe – Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen – Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen – Prüfung und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 8062-3, September 2008: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Maß-, Form- und Lagetoleranzen für Formteile – Teil 3: Allgemeine Maß-, Form- und Lagetoleranzen und Bearbeitungszugaben für Gussstücke: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 8501-1, Dezember 2007: Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungstoffen – Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit – Teil 1: Rostgrade und Oberflächenvorbereitungsgrade von unbeschichteten Stahloberflächen

und Stahloberflächen nach ganzflächigem Entfernen vorhandener Beschichtungen: Beuth Verlag GmbH, Berlin.

ETAG 002, 1998: Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems: EOTA (European Organisation for Technical Approvals), Brüssel.

Anhang

Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analysen an Substanzproben des Klebstoffs PUR

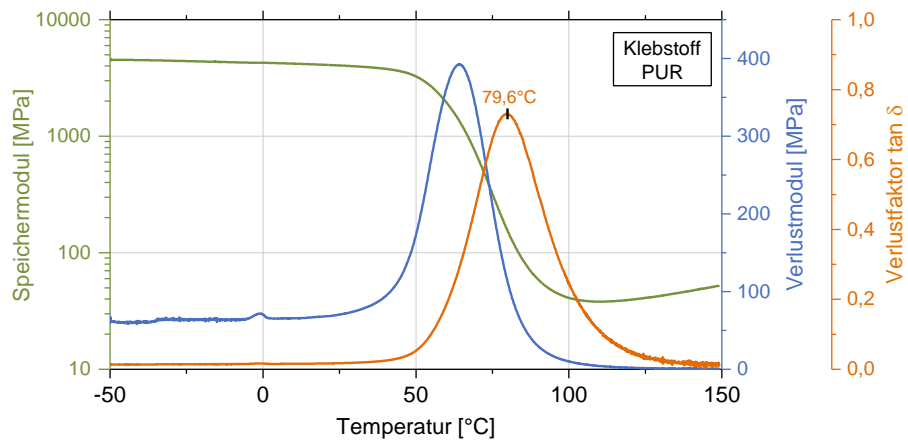


Abbildung A.1 Ergebnis der dynamisch-mechanischen Analyse Probe PUR_DMA_1

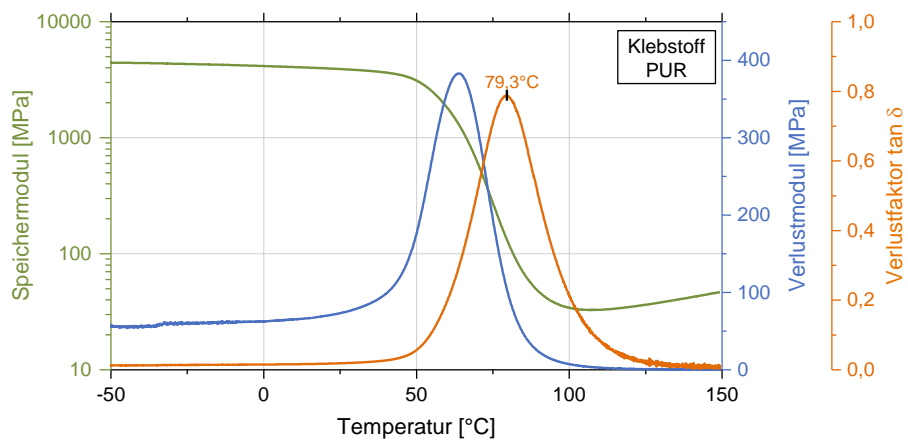


Abbildung A.2 Ergebnis der dynamisch-mechanischen Analyse Probe PUR_DMA_2

Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analysen an Substanzproben des Klebstoffs EP

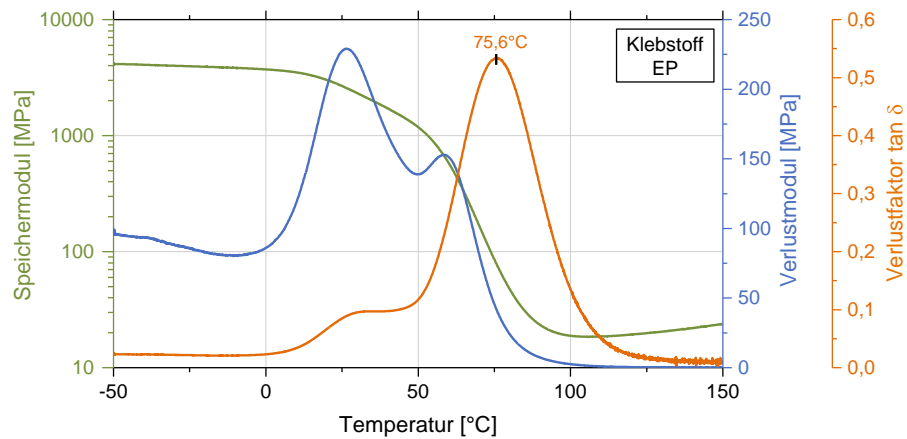


Abbildung A.3 Ergebnis der dynamisch-mechanischen Analyse Probe EP_DMA_1

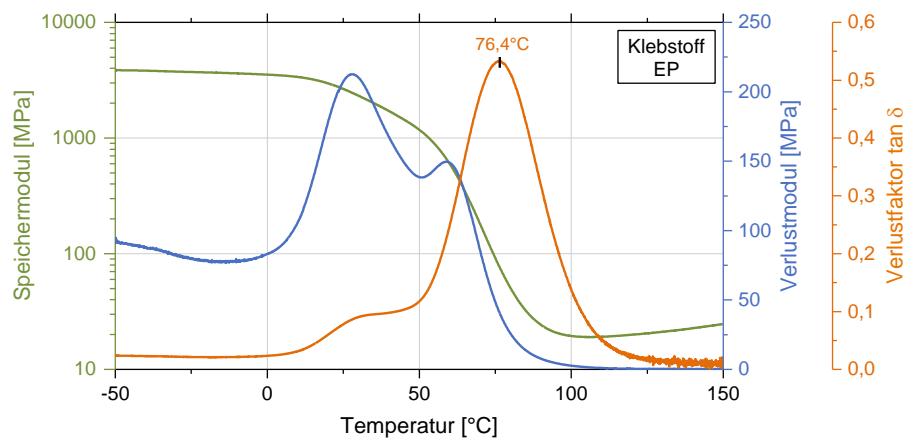


Abbildung A.4 Ergebnis der dynamisch-mechanischen Analyse EP_DMA_2

Ergebnisse der Dauerstandsuntersuchungen an geklebten Stahlproben

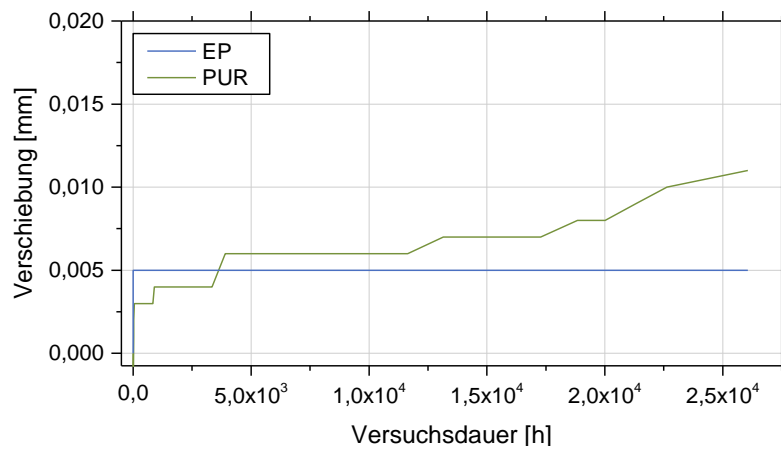


Abbildung A.5 Dauerstandsuntersuchungen: Verformungszunahme in Abhängigkeit der Versuchsdauer bei einem Spannungsniveau von 0,5 MPa Verbundschubspannung

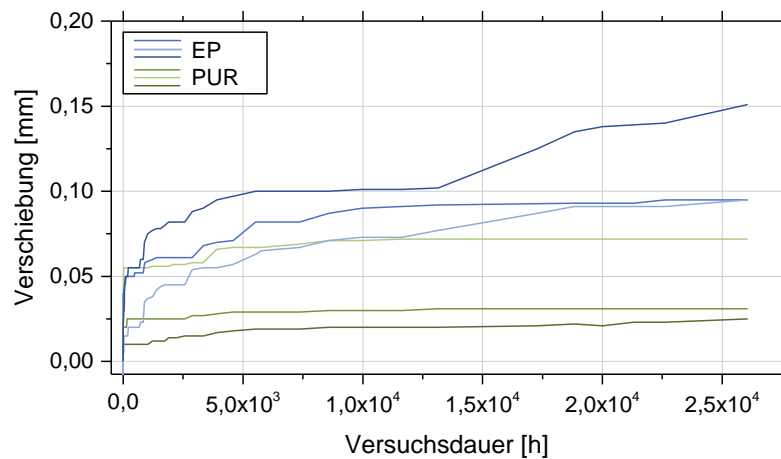


Abbildung A.6 Dauerstandsuntersuchungen: Verformungszunahme in Abhängigkeit der Versuchsdauer bei einem Spannungsniveau von 1,0 MPa Verbundschubspannung

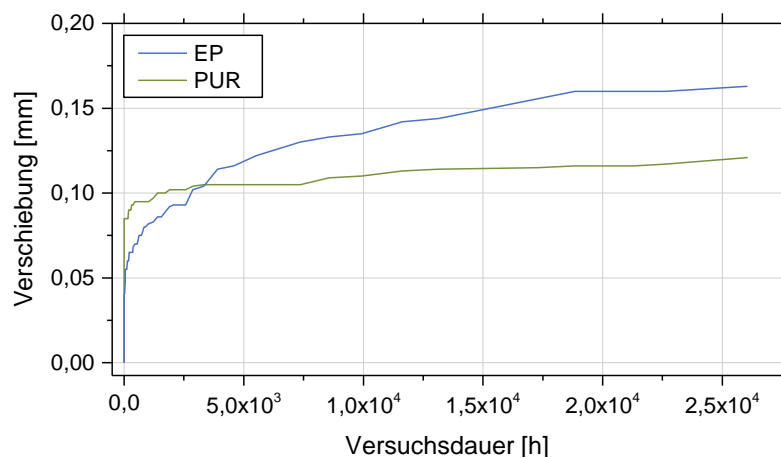
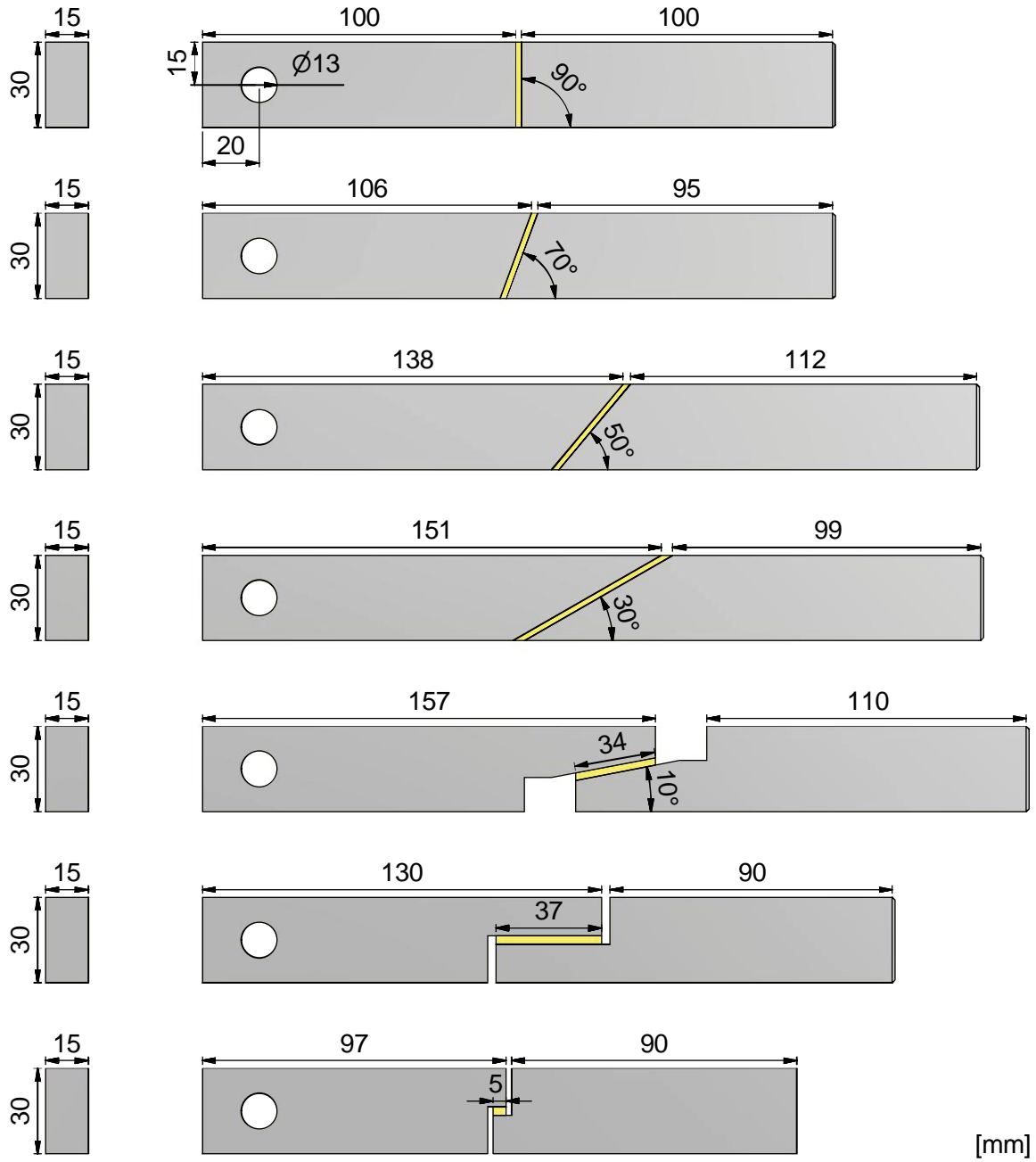


Abbildung A.7 Dauerstandsuntersuchungen: Verformungszunahme in Abhängigkeit der Versuchsdauer bei einem Spannungsniveau von 2,0 MPa Verbundschubspannung

Geometrie der geschäftet geklebten Stahlproben



Klebschichtdicke aller Proben: 2,5 mm

Abbildung A.8 Geometrie der geschäftet geklebten Stahlproben (Abschnitt 5)

Ergebnisse der Zugversuche an den Kreishohlprofilen entnommenen Stahlproben

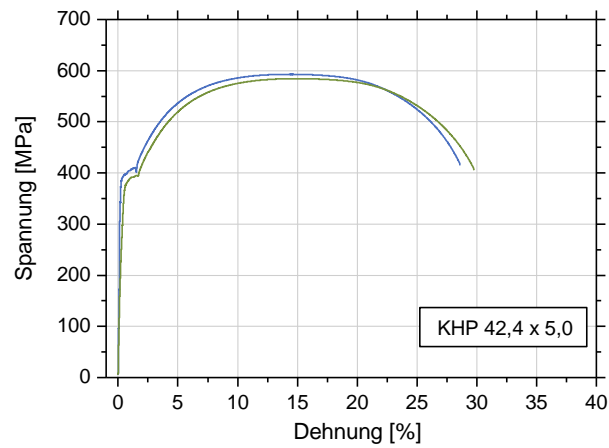


Abbildung A.9 Spannungs-Dehnungsverhalten der Stahlzugproben des Probekörpers: KHP 42,4 x 5,0; Werkstoff S355J2H; Probengeometrie E 5 x 16 x 50 nach (DIN 50125); Prüfnorm: (DIN EN ISO 6892-1)

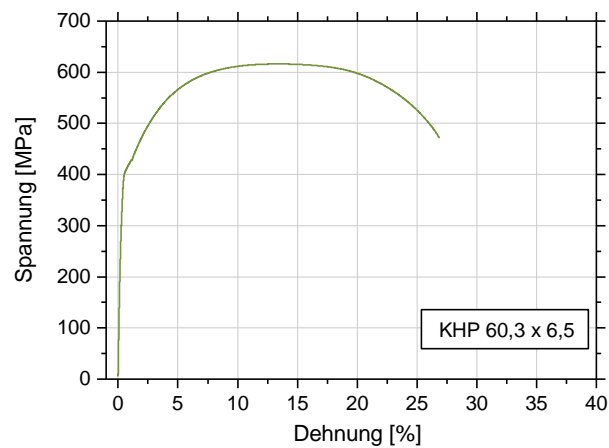


Abbildung A.10 Spannungs-Dehnungsverhalten der Stahlzugprobe des Probekörpers: KHP 60,3 x 6,5; Werkstoff S355J2H; Probengeometrie E 6 x 20 x 60 nach (DIN 50125); Prüfnorm: (DIN EN ISO 6892-1)

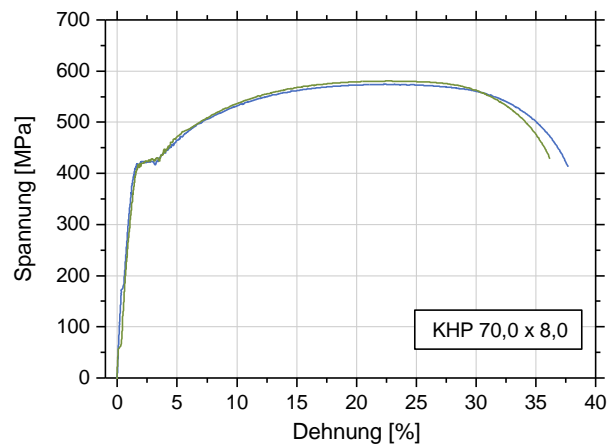


Abbildung A.11 Spannungs-Dehnungsverhalten der Stahlzugproben des Probekörpers: KHP 70,0 x 8,0; Werkstoff S355J2H; Probengeometrie E 8 x 25 x 80 nach (DIN 50125); Prüfnorm: (DIN EN ISO 6892-1)

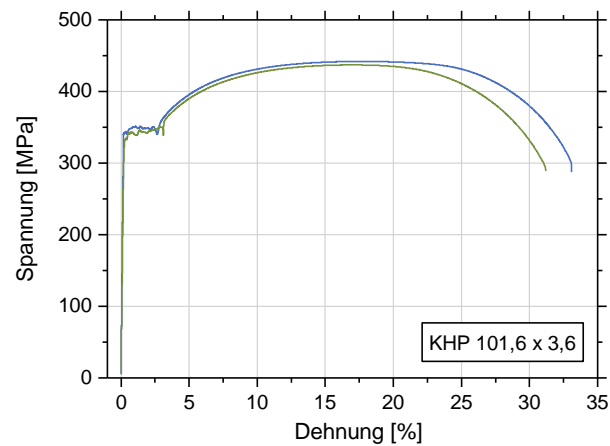


Abbildung A.12 Spannungs-Dehnungsverhalten der Stahlzugproben des Probekörpers: KHP 101,6 x 3,6; Werkstoff P235TR2; Probengeometrie E 4 x 10 x 35 nach (DIN 50125); Prüfnorm: (DIN EN ISO 6892-1)

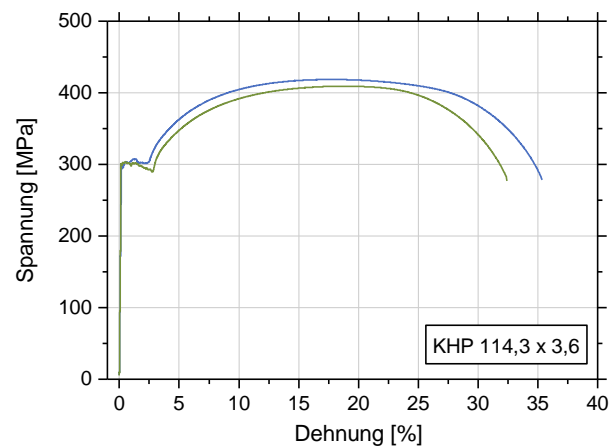


Abbildung A.13 Spannungs-Dehnungsverhalten der Stahlzugproben des Probekörpers: KHP 114,3 x 3,6; Werkstoff P235TR2; Probengeometrie E 4 x 10 x 35 nach (DIN 50125); Prüfnorm: (DIN EN ISO 6892-1)

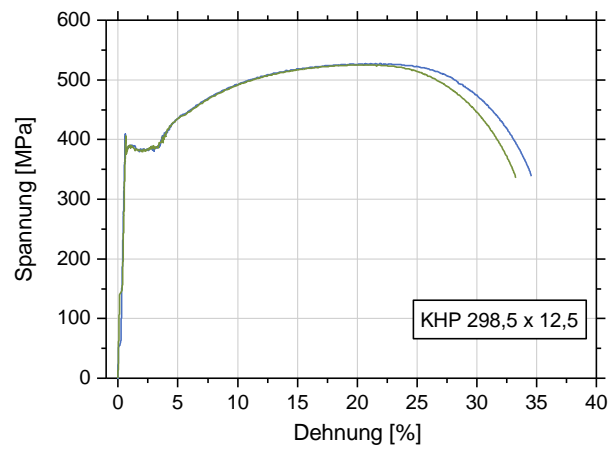


Abbildung A.14 Spannungs-Dehnungsverhalten der Stahlzugproben des Probekörpers: KHP 298,5 x 12,5; Werkstoff S355J2H; Probengeometrie E 12 x 26 x 100 nach (DIN 50125); Prüfnorm: (DIN EN ISO 6892-1)

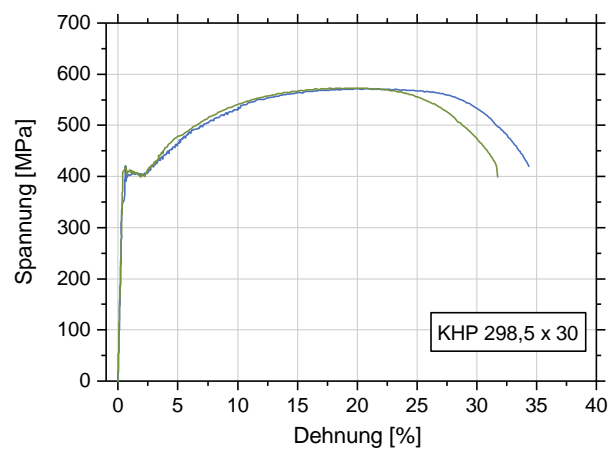


Abbildung A.15 Spannungs-Dehnungsverhalten der Stahlzugproben des Probekörpers: KHP 298,5 x 30,0; Werkstoff G20Mn5; Probengeometrie B 20 x 100 nach (DIN 50125); Prüfnorm: (DIN EN ISO 6892-1)

Chemische Zusammensetzung der Stahlsorten aus den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 - Ergebnisse der Schmelzenanalysen

| Stahlsorte | Massenanteile in %, max. | | | | | |
|----------------|--------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | N |
| S355J2H | | | | | | |
| DIN EN 10210-2 | 0,22 | 0,55 | 1,60 | 0,03 | 0,03 | - |
| KHP 42,4/5,0 | 0,16 | 0,29 | 1,25 | 0,007 | 0,009 | 0,008 |
| KHP 60,3,4/6,3 | 0,15 | 0,25 | 1,22 | 0,014 | 0,005 | 0,007 |
| KHP 70,0/8,0 | 0,15 | 0,25 | 1,22 | 0,014 | 0,005 | 0,007 |

Tabelle A.1 Chemische Zusammensetzung der Stahlsorte S355 J2H nach (DIN EN 10210-2) sowie aus den Schmelzenanalysen

| Stahlsorte | Massenanteile in %, max. | | | | | |
|----------------|--------------------------|------|------|-------|-------|----------|
| | C | Si | Mn | P | S | Al (min) |
| P235TR2 | | | | | | |
| DIN EN 10216-1 | 0,16 | 0,35 | 1,20 | 0,025 | 0,015 | 0,02 |
| KHP 101,6/3,6 | 0,08 | 0,24 | 0,58 | 0,023 | 0,010 | 0,032 |
| KHP 114,3/3,6 | 0,09 | 0,22 | 0,54 | 0,017 | 0,012 | 0,029 |

Tabelle A.2 Chemische Zusammensetzung der Stahlsorte P235TR2 nach (DIN EN 10216-1) sowie aus den Schmelzenanalysen

| Stahlgusswerkstoff | Massenanteile in % | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------|--------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | V |
| G20Mn5 | | | | | | | | | |
| DIN EN 10340 | 0,17 - 0,23 | ≤ 0,60 | 1,00 - 1,60 | ≤ 0,02 | ≤ 0,02 | ≤ 0,30 | ≤ 0,12 | ≤ 0,50 | ≤ 0,03 |
| KHP 298,5/30 | 0,22 | 0,46 | 1,23 | 0,012 | 0,002 | 0,149 | 0,06 | 0,12 | k. A. |

Tabelle A.3 Chemische Zusammensetzung der Stahlgussorte G20Mn5 nach (DIN EN 10340) sowie aus der Schmelzenanalysen

Spannungsverteilungen an der Innenseite der Klebfuge der Kreishohlprofilproben bei Variation verschiedener geometrischer Parameter

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Spannungsverteilungen an der Innenseite der in Kapitel 6 beschriebenen Kreishohlprofilverbindungen dargestellt. Die durch numerische Berechnungen ermittelten Spannungsverteilungen resultieren aus einer Beanspruchung im numerischen Modell in Höhe des Mittelwertes der experimentell bestimmten Bruchlasten der jeweils betrachteten Prüfreihe.

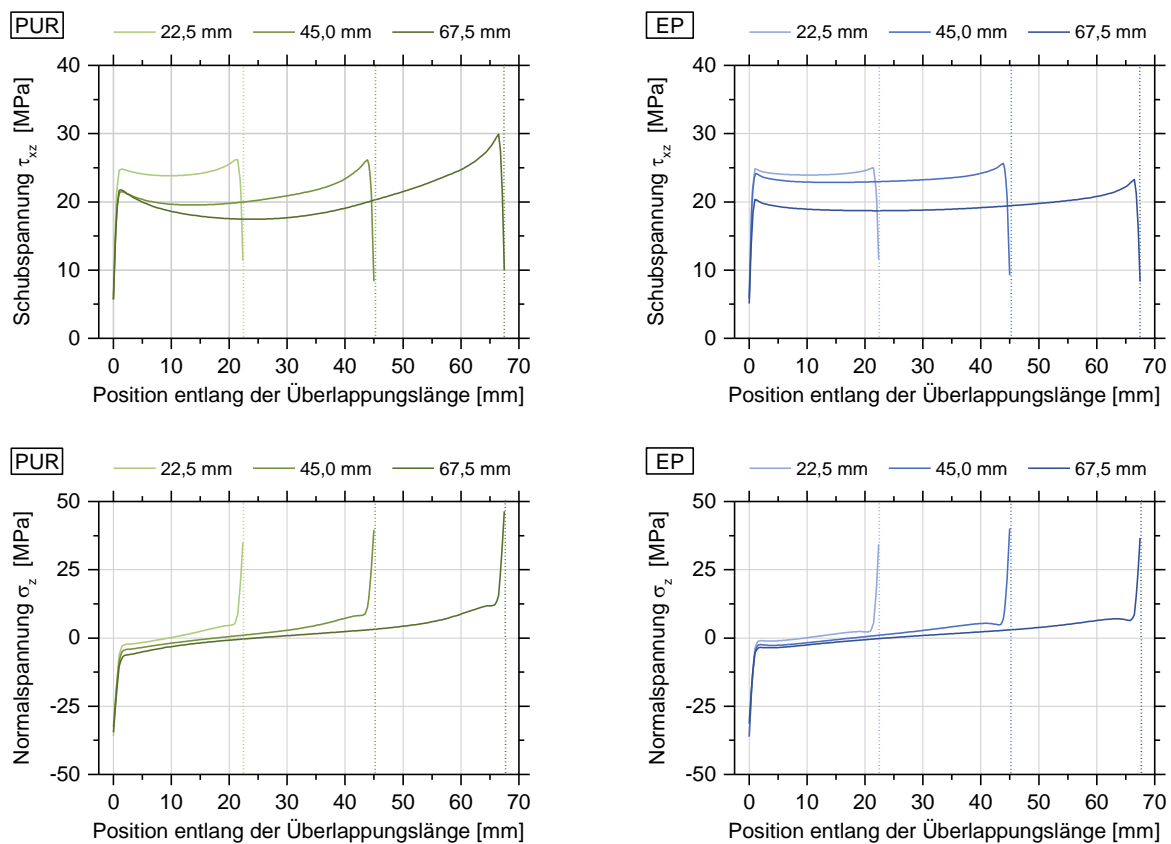


Abbildung A.16 Spannungsverteilung an der Innenseite der Klebfuge bei Variation der Überlappungslänge. Links: Klebstoff PUR; rechts: Klebstoff EP; oben: Schubspannung τ_{xz} ; unten: Normalspannung σ_z ;

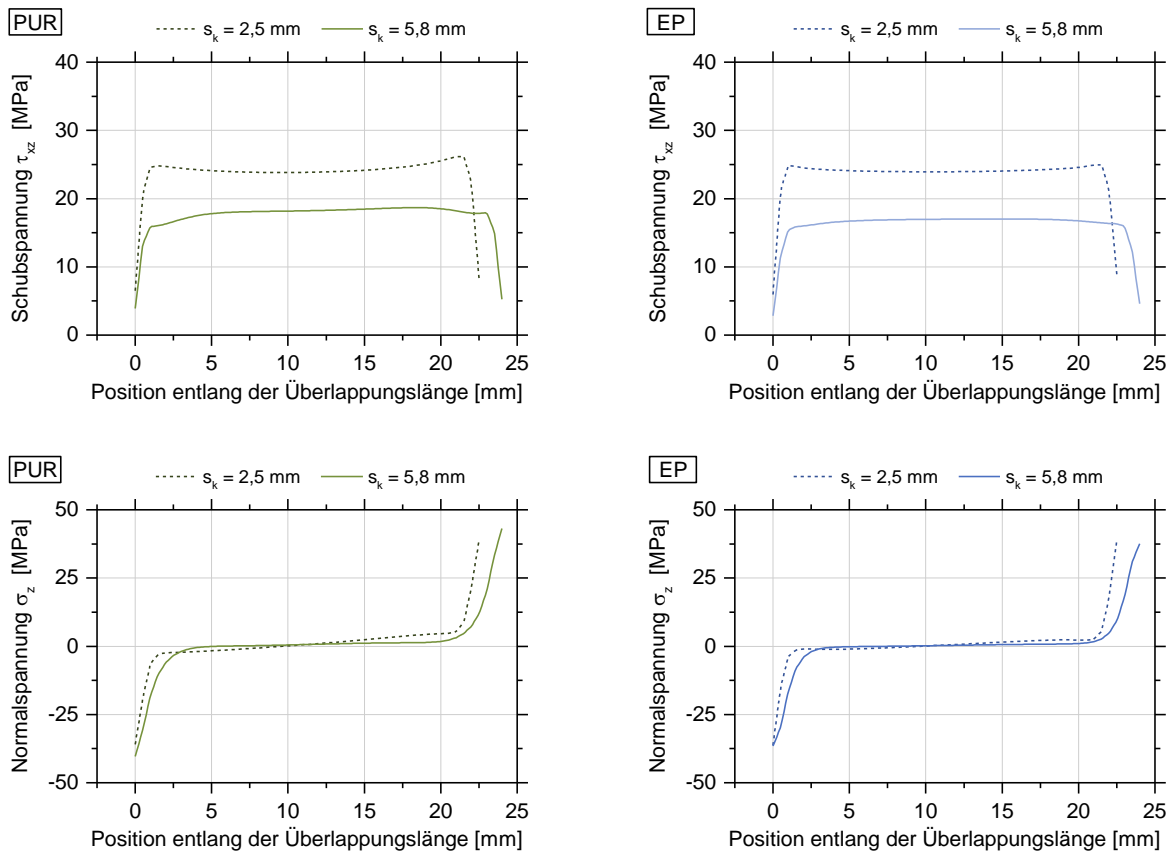


Abbildung A.17 Spannungsverteilung an der Innenseite der Klebfuge bei Variation der Klebschichtdicke; links: Klebstoff PUR; rechts: Klebstoff EP; oben: Schubspannung τ_{xz} ; unten: Normalspannung σ_z

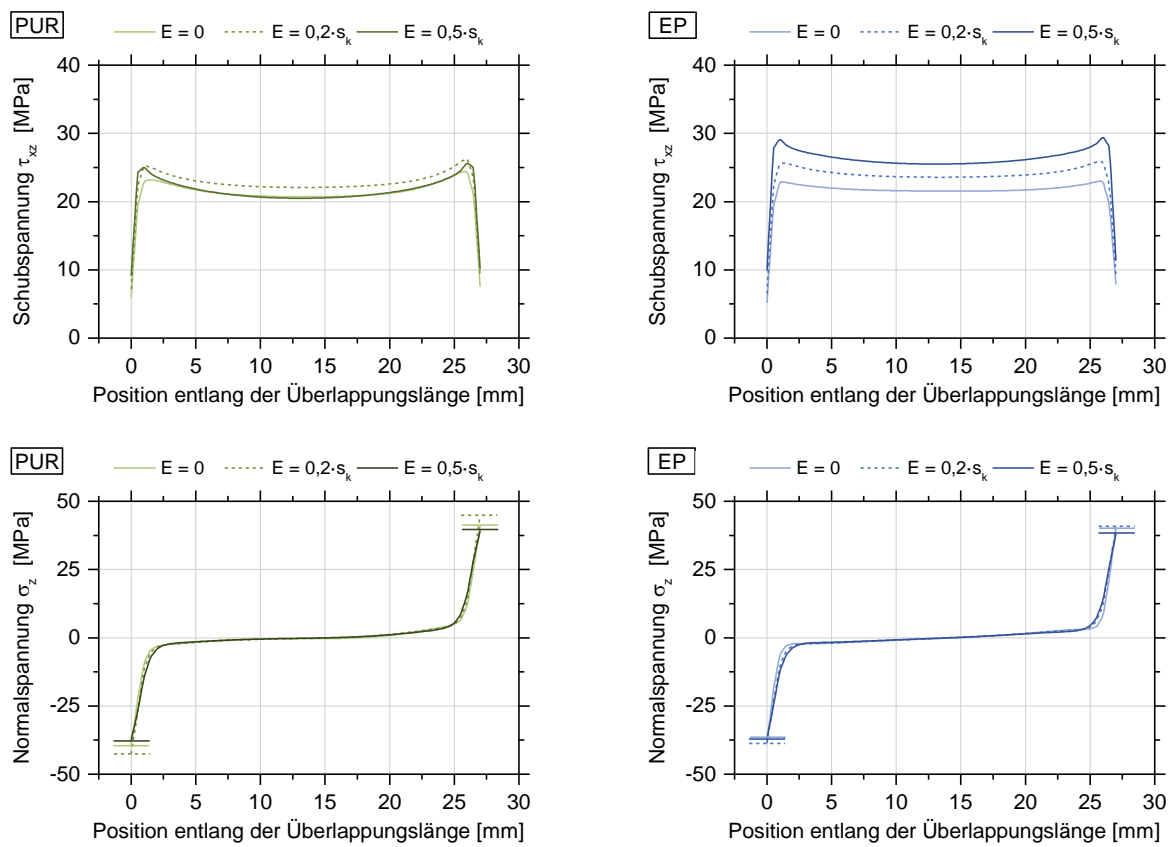


Abbildung A.18 Spannungsverteilung an der Innenseite der Klebfuge bei imperfektionsfreier Geometrie sowie bei verschiedenen Exzentrizitäten der KHP-Schwerelinien; links: Klebstoff PUR; rechts: Klebstoff EP; oben: Schubspannung τ_{xz} bei $s_{k,min}$; unten: Normalspannung σ_z bei $s_{k,max}$

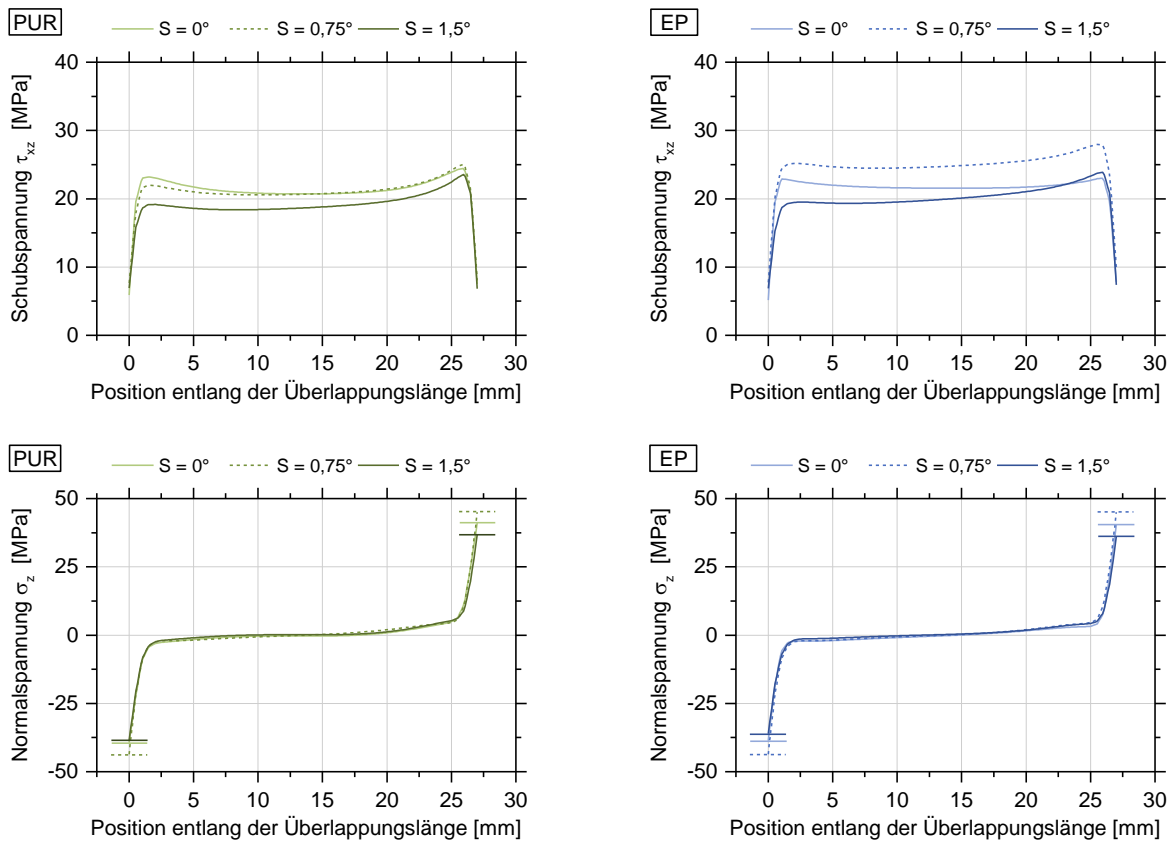


Abbildung A.19 Spannungsverteilung an der Innenseite der Klebfuge bei imperfektionsfreier Geometrie sowie bei verschiedenen Schiefstellungen des innenliegenden KHP; links: Klebstoff PUR; rechts: Klebstoff EP; oben: Schubspannung τ_{xz} ; unten: Normalspannung σ_z