

Entwicklung von Hybridfügeverbindungen in Metallwerkstoffen im Hinblick auf die Tragfähigkeit und Dichtigkeit

Prof. Dr.-Ing. Martin-Christoph Wanner, Dipl.-Ing. Ralf Glienke,
Dipl.-Wirt.Ing. Christoph Blunk
Fraunhofer-Anwendungszentrum Großstrukturen in der
Produktionstechnik (AGP)
Albert-Einstein-Straße 30
18059 Rostock, GERMANY

Aufgrund von Wettbewerbs- und Kostendruck sehen sich viele Industriebereiche gezwungen, innovative Produkte und Produktionsprozesse zu entwickeln und zur Serienreife zu bringen, um auch zukünftig am Markt erfolgreich zu sein. Durch diese Entwicklung erlangt die mechanische Fügechnik im Bereich der nicht lösbaren Verbindungselemente, insbesondere bei hochfesten (Blind-)Niet- und Schließringbolzenverbindungen, wieder zunehmend Bedeutung. Gerade in Anwendungsfällen, in denen endbeschichtete Bauteile oder unterschiedliche Materialien miteinander verbunden werden müssen, stellen alternative Verfahren, wie beispielsweise das Nieten, eine vielversprechende Lösung dar. Derartige Anforderungen stellen speziell die thermischen Fügeverfahren vor eine oft unüberwindbare Hürde.

Neue Verfahren bringen jedoch neue Herausforderungen mit sich. So ist das Trag- und Dichtigkeitsverhalten mechanisch gefügter Verbindungen unzureichend erforscht. Es existieren zur Dimensionierung von Blindniet- und Schließringbolzenverbindungen derzeit keine Normen oder Regelwerke, so dass der Einsatz derartiger Verbinder oft auf empirisch ermittelten Kenntnissen beruht.

Ziel eines abgeschlossenen Forschungsvorhabens [1] war die systematische Untersuchung des Tragverhaltens sowie der Dichtigkeitseigenschaften mechanisch gefügter, geklebter sowie hybrid gefügter Verbindungen. Ausgangspunkt der Untersuchungen war die Fragestellung, inwiefern der Einsatz von Kleb- und Dichtstoffen im Fügespalt die Tragverhaltenseigenschaften beeinflusst bzw. ob durch eine gezielte Auswahl und Kombination der Fügeverfahren Kleben und Nieten ein positiver Einfluss auf das Tragverhalten erzielt werden kann. Der Einsatz von Kleb- und Dichtstoffen ist in vielen Anwendungsfällen notwendig, um aufgrund von Fertigungstoleranzen auftretende Spalte zwischen den Fügeteilen zu überbrücken und eine dichte Verbindung zu gewährleisten.

Keywords: Tragverhalten, Dichtigkeit, Schließringbolzen, Blindniete, Dichtstoff, Klebstoff, Überlappverbindung, SL-Verbindung

Einleitung und Problemstellung

In vielen Industriebereichen müssen aus konstruktionstechnischer Sicht unterschiedliche Materialien oder vorbeschichtete Bauteile miteinander verbunden werden. Dies ist mit thermischen Fügeverfahren, wie beispielsweise Punktschweißen, nicht oder nur mit erhöhtem Aufwand möglich. Zum einen lassen sich einige Metalle und Legierungen nicht beliebig

miteinander verbinden, zum anderen können sich die Bauteile durch den beim Schweißen einhergehenden Wärmeeintrag verziehen oder bereits vorbehandelte Oberflächen beschädigt werden. Dies verursacht oft zeit- und kostenintensive Nacharbeit.

Eine geeignete Alternative bietet in vielen Fällen die Verwendung mechanischer Verbindungsmittel, wie beispielsweise der Einsatz von hochfesten Blindnieten oder Schließringbolzen (SRB). Mit derartigen Fügeelementen lassen sich unterschiedlichste Materialkombinationen, auch mehrlagig, nahezu beliebig verbinden. Die Verbindungen müssen jedoch nicht nur den im Betrieb ausgesetzten mechanischen Belastungen widerstehen, sondern darüber hinaus oft weitere Funktionsmerkmale, wie z. B. Dichtigkeit oder Korrosionsbeständigkeit gegenüber aggressiven Medien, aufweisen. Derartige Verbindungen sind im Schienenfahrzeugbau, in der LKW-Fertigung oder im Bauwesen zu finden. Abbildung 1 zeigt typische Anwendungsbeispiele schubbeanspruchter Verbindungen mit Blindnieten und Schließringbolzen.

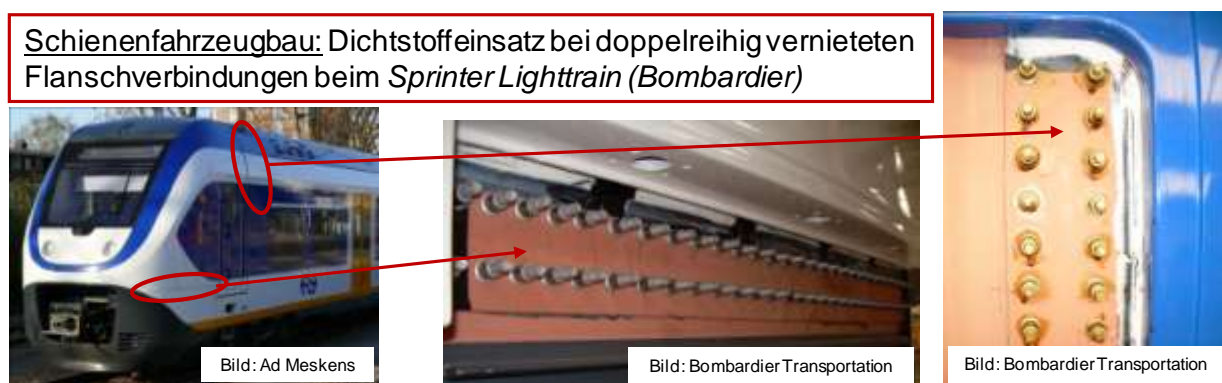


Abbildung 1: Einsatzmöglichkeiten tragfähiger und dichter Flanschverbindungen im Schienenfahrzeugbau

Aufgrund von Kenntnisdefiziten durch fehlende Regelwerke zur Auslegung tragfähiger und dichter Blindniet- bzw. Schließringbolzenverbindungen erfolgt häufig eine kostspielige Überdimensionierung seitens der Anwender. Durch den übermäßigen Einsatz von Dichtstoffen und/oder Verbindungsmitteln entsteht ein hoher zeitlicher und finanzieller Aufwand, da die Zusammenhänge zwischen dem zeitabhängigen viskoelastischen Verhalten der Dichtstoffe und den Verbindungsparametern, wie Dichtigkeit, Vorspannkraft, statische und dynamische Tragfähigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit, unzureichend erforscht sind. Diesem Defizit wurde mit diesem Forschungsvorhaben Rechnung getragen.

Das Verhalten von mechanisch gefügten Verbindungen bei Belastung lässt sich jedoch nur näherungsweise und unter großem Aufwand beschreiben, da aufgrund der überlagerten Beanspruchungen in den Fügeteilen und Fügeelementen sehr komplexe Zusammenhänge wirken. Während die Gestaltung und Dimensionierung von Schraubenverbindungen in [2] oder [3] eindeutig geregelt ist, existieren diesbezüglich für Blindniet- und Schließringbolzenverbindungen derzeit keine Normen. Besonders bei stark beanspruchten Konstruktionen besteht daher ein erhöhter Informationsbedarf, welcher mit der derzeitigen vorhandenen Literatur nicht gedeckt werden kann. Diese Wissenslücke kann nur anhand von experimentell ermittelten Erkenntnissen geschlossen werden. Da bisher speziell für jeden Einsatzbereich individuelle Versuche erforderlich sind, tragen die Forschungstätigkeiten dazu bei, die Unsicherheit seitens der Anwender beim Einsatz von hochfesten Blindniet- und

Schließringbolzenverbindungen zu vermindern, indem Entscheidungshilfen für die Fertigung tragfähiger und dichter mechanisch gefügter Verbindungen herausgearbeitet werden.

Als ein kritischer Punkt bei punktförmigen Verbindungen, wie es bei der Verwendung der mechanischen Füge­technologie der Fall ist, ist die Dichtigkeit der hergestellten Verbindung zu nennen. Während bei stoffschlüssigen Fügeverfahren die Dichtigkeit der Verbindung zumeist unproblematisch ist, können bei mechanisch gefügten Verbindungen Undichtigkeiten an verschiedenen Punkten der Verbindung auftreten. In einer früheren Forschungsarbeit (AiF 13880 BR [4]) wurden dabei folgende Leckage­wege als ursächlich für eine undichte Verbindung identifiziert (Abbildung 2):

- Leckage zwischen Nietdorn und Niethülse (bei mehrteiligen Fügeelementen, insbesondere Blindniete),
- Leckage zwischen Fügeelement und Füge­teil,
- Leckage zwischen den Füge­teilen.

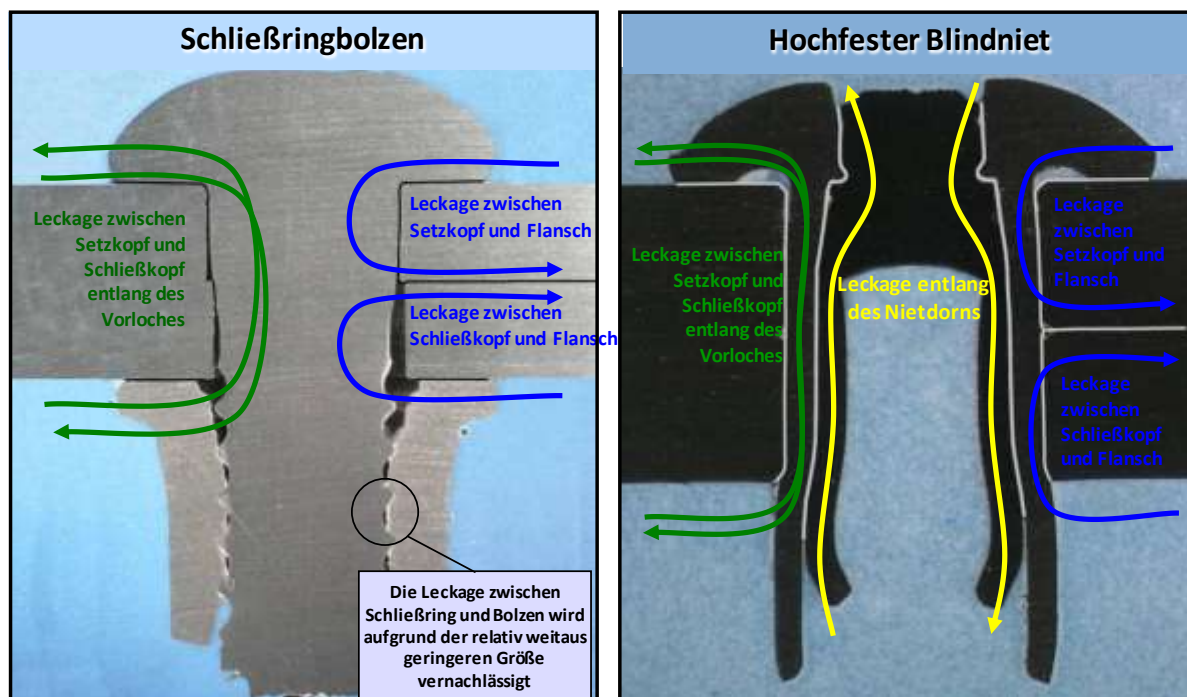


Abbildung 2: Schematische Darstellung möglicher Leckage­wege nach [4]

In den früheren Untersuchungen wurden nur die beiden erstgenannten Leckage­wege betrachtet, so dass bezüglich der Flanschdichtigkeit weiterhin Forschungsbedarf bestand. Die Flanschdichtigkeit wird in diesem Beitrag als Dichtigkeit in Füge­richtung (Verbinderdichtigkeit) sowie zwischen den Füge­teilen in Belastungsrichtung verstanden (Abbildung 3).

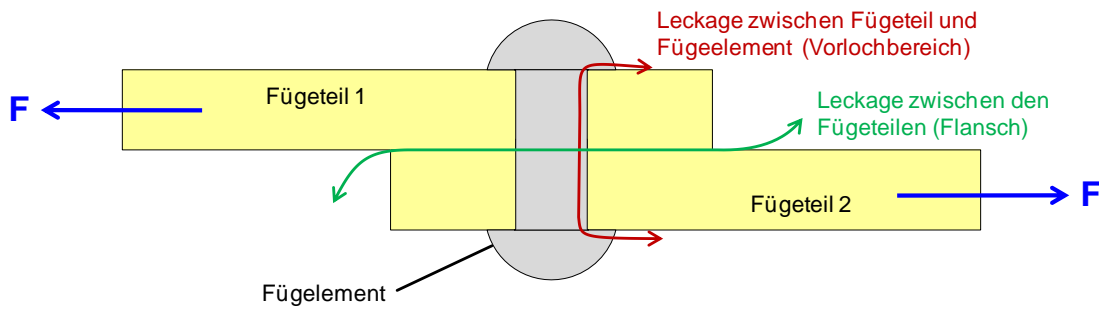


Abbildung 3: Beschreibung der Flanschdichtigkeit nach [1]

Stand der Technik

Die Ausführungen zum Stand der Technik beziehen sich auf o.g. Flanschverbindungen, d.h. es werden einschnittige Überlappverbindungen betrachtet (vgl. Abbildung 3).

Flanschtragverhalten mit Blindnieten und Schließringbolzen

Im Sinne der VDI 2230 [3] bzw. der DIN 25201-2 [5] hat eine Schraubenverbindung im Maschinenbau bzw. Schienenfahrzeugbau die Aufgabe Bauteile so miteinander zu verbinden, dass das Auftreten von Schlupf oder das Auseinanderklaffen verhindert wird.

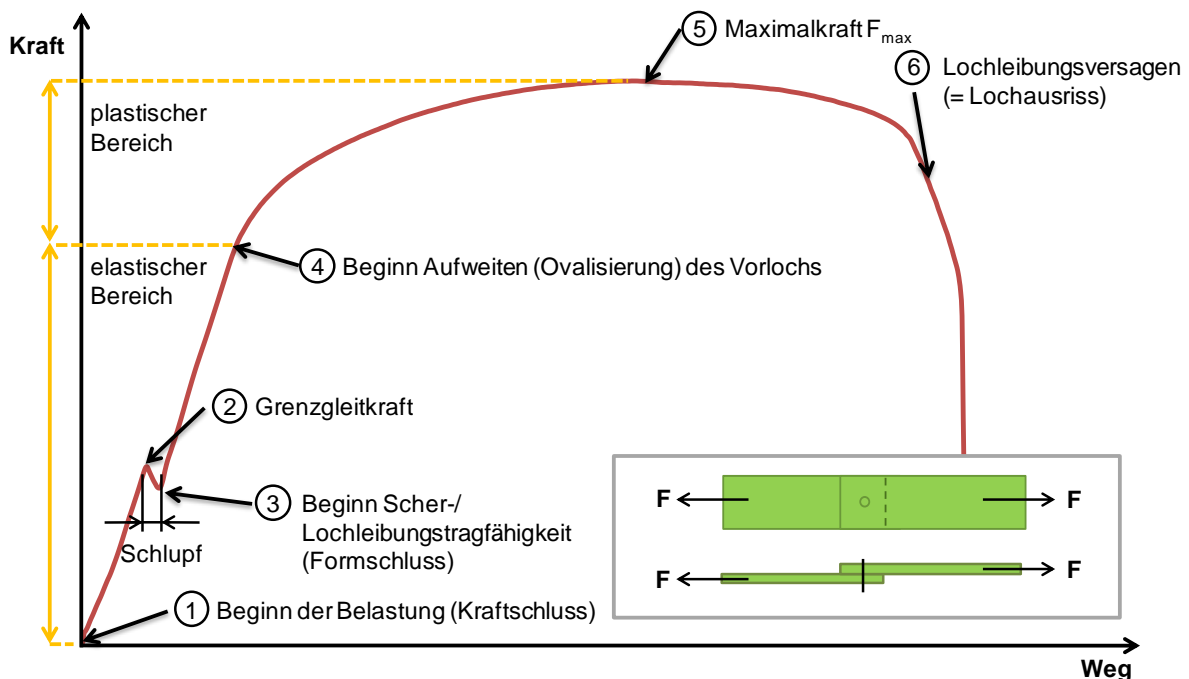


Abbildung 4: Charakteristisches Last-Verformungs-Verhalten kraft- und formschlüssiger Fügeverbindungen

Das Last-Verformungs-Verhalten nach durchgeführtem Scherzugversuch in Anlehnung an DVS 3480-1 [6] ist in Abbildung 4 dargestellt. Bei Belastungsbeginn 1 nimmt der Weg nahezu proportional zur Prüflast zu. Bis zum Erreichen der maximalen Gleitlast (auch Grenzgleitkraft genannt) 2 gehorcht die Verbindung den Gesetzen der Haftreibung. Beim Überwinden der Grenzgleitkraft geht die Verbindung in den Zustand der Gleitreibung über. Der auftretende Schlupf entspricht maximal dem doppeltem Nennlochspiel für einschnittige

Verbindungen und ist gleichbedeutend mit dem Anlegen des Verbindungselements an die beanspruchte Lochwand. Nach diesem Anlegen wird der Formschluss 3 erreicht, d.h. die Lochwandung wird bis zum Erreichen der Streckgrenze reversibel verformt und der Bolzen auf Abscheren beansprucht. Bis zu diesem Punkt geht man von elastischem Tragverhalten aus 4. Anschließend kommt es einhergehend mit plastischer Verformung zum Versagen der Verbindung. In der Regel besteht die Forderung nach duktilem Bauteilverhalten, so dass das Lochleibungsversagen, wie in Abbildung 4 dargestellt, maßgebend wird. D.h., dass bis zum Bruch große sichtbare Verformungen ertragen werden können. Beim Erreichen der Maximalkraft 5 ist das Vorloch plastisch verformt. Der Probenkörper versagt mit dem Lochausreißen 6 schlagartig. Dies bedeutet den Kollaps für die Verbindung.

Aufgrund der Eignung von Schließringbolzen zum Einbringen einer Vorspannkraft in die Verbindung werden sie bevorzugt für kraftschlüssige Anschlüsse verwendet. Der kraftschlussbedingte Tragverhaltensanteil von Blindnieten in Scherverbindungen liegt je nach Nietanordnung zwischen 5% und 12% der Scherbruchlast, so dass Blindnieten vornehmlich formschlüssig (ohne Schlupf) ausgelegt werden [7].

Ab einer Einzelblechdicke von 3 mm aus unlegiertem Baustahl lässt sich das Tragverhalten näherungsweise auch nach DIN 18800-1 [2] in Analogie zu Schrauben- und Vollnietverbindungen beschreiben. Die Beanspruchbarkeiten aller Verbindungsarten (Form- und Kraftschluss) sind hiernach in den Tragsicherheitsnachweisen für Abscheren, Lochleibung, Zug im Nettoquerschnitt sowie Gleitsicherheit einheitlich geregelt. Die Gleitsicherheit $V_{g,R,d}$ ergibt sich aus dem Produkt der eingebrachten Vorspannkraft F_V und dem Haftreibungsbeiwert μ unter Berücksichtigung der Schnittigkeit m und der Anzahl der Verbindungsmittel n :

$$(1) \quad V_{g,R,d} = n \cdot m \cdot \mu \cdot F_V$$

Die Lochleibungstragfähigkeit lässt sich in Abhängigkeit von der maßgebenden Einzelblechdicke t , der Streckgrenze des Grundwerkstoffes f_{yk} , dem maßgebenden Loch- und Randabstand α_l sowie dem Schraubenschaftdurchmessers d_{sch} unter Verwendung eines materialeitigen Abminderungsbeiwertes wie folgt ermitteln:

$$(2) \quad V_{l,R,d} = t \cdot d_{sch} \cdot \alpha_l \cdot f_{yk} / \gamma_M$$

Die Lochschwächung in zugebeanspruchten Querschnittsteilen wird über die Grenzzugkraft im Nettoquerschnitt unter Zugrundelegung der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes berechnet:

$$(3) \quad N_{R,d} = A_{netto} \cdot f_{u,k} / (1,25 \cdot \gamma_M)$$

Die Abscherbeanspruchung $V_{a,R,d}$ lässt sich insbesondere für Blindniete aufgrund des diskontinuierlichen Querschnittes in der Scherebene nur experimentell ermitteln.

Kleben und Dichten

Das Abdichten der o. g. Flanschbereiche erfolgt in der Regel mit Kleb-/Dichtstoffen hoher Elastizität (siehe Abbildung 5), die bei mittleren Klebfestigkeiten von ca. 2-10 MPa die Füge-teile zusätzlich stoffschlüssig verbinden. Beim Kleben werden Füge-teile aus gleichen oder unterschiedlichen Werkstoffen durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) verbunden [8]. Nachteilig bei diesem Fügeverfahren sind die Fixierung der Bauteile bis zum Erreichen der Handhabungs- bzw. Endfestigkeit der Klebung, die z. T. aufwendige Oberflächenvorbehandlung sowie Alterungseffekte. Die Festigkeit von Klebver-

bindungen ist mit max. 50 MPa (quasistatische Scherzugbelastung) im Vergleich zu den Metallen verhältnismäßig gering, was jedoch in den meisten Fällen durch genügend große Klebflächen kompensiert wird [9].

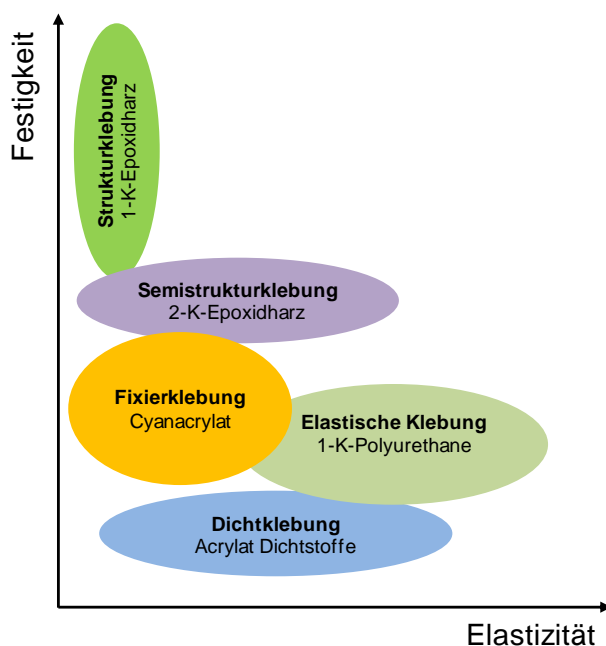


Abbildung 5: Festigkeits-Elastizitätseigenschaften von Klebstoffen

Wird eine Klebverbindung parallel zur Klebfläche belastet, entstehen Scherspannungen τ in der Klebschicht, die sich vereinfacht als Verhältnis der Querkraft zur Klebfläche darstellen lassen. Wird die Verbindung bis zum Bruch belastet, erhält man mit der Bruchkraft F_{max} die Klebfestigkeit τ_B . Wie aus Gleichung 4 hervorgeht, hat die Klebfläche einen entscheidenden Einfluss auf die Klebfestigkeit.

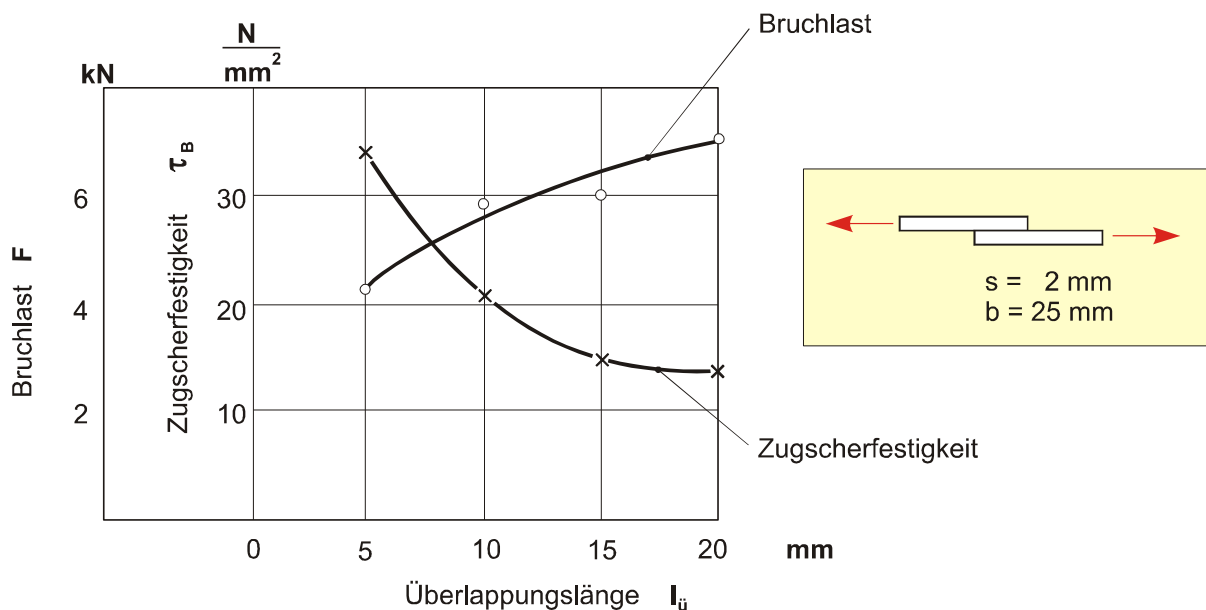
$$(4) \quad \tau_B = \frac{F_{max}}{A_{Kleb}} = \frac{F_{max}}{l_{\ddot{u}} \cdot b}$$

Für den Tragfähigkeitsnachweis einer Klebverbindung nach Gleichung 5 gilt, dass die durch eine Querkraft hervorgerufenen Scherspannungen die zulässigen Spannungswerte nicht überschreiten dürfen. Die zulässige Scherspannung ergibt sich dabei aus der Klebfestigkeit und muss je nach Anwendungsfall um einen geeigneten Sicherheitsfaktor S reduziert werden.

$$(5) \quad \frac{\tau_{vorh}}{\tau_{zul}} \leq 1 \text{ mit } \tau_{vorh} = \frac{F_{Q,vorh}}{A_{Kleb}} \text{ und } \tau_{zul} = \frac{\tau_B}{S}$$

Der Spannungsverlauf darf jedoch nur als Näherung angesehen werden, da die Spannungsspitzen an den Überlappungsenden wesentlich höhere Werte annehmen können. Eine der in der praktischen Anwendung am häufigsten durchgeführten Prüfungen von Klebverbindungen ist der Zugscherversuch nach DIN EN 1465 [10]. Dünne Bleche werden nach genauen Vorschriften überlappend geklebt und im Zugversuch geprüft. Die mittlere Zugscherfestigkeit ist die mittlere Bruchlast einer Anzahl Proben durch die jeweilige Klebfläche dividiert, wobei auch das Erscheinungsbild der Bruchflächen von Bedeutung ist. Verglichen werden können Klebstoffe, Oberflächenbehandlungen und der Einfluss einer Alterung der Klebproben. Für Berechnungen von Klebverbindungen eignen sich diese Werte nur eingeschränkt. Das Prüfergebnis ist von zu vielen Einflussfaktoren abhängig. Mittels

Zugscherproben aus dünnen Blechen werden im Beispielexperiment die in Abbildung 6 dargestellten Abhängigkeiten von der Überlappungslänge erläutert.



Fügeteilwerkstoff: Al Cu Mg pl, chemisch gebeizt
 Klebstoff: 2-Komponenten-Epoxidharz

Abbildung 6: Einfluss der Überlappungslänge bei Klebungen nach [1]

Es ist ersichtlich, dass der Anstieg der Bruchlast mit der Vergrößerung der Klebfläche nicht linear erfolgt. Die Verbindungsfestigkeit ist kein konstanter Wert, sondern fällt mit der Überlappungslänge stark ab. Es ist schnell eine Grenze erreicht, wo es nicht mehr sinnvoll ist, zur Übertragung größerer Kräfte, die Überlappungslänge weiter zu erhöhen.

Nachweis der Flanschdichtigkeit

Die Qualität einer Verbindung kann unabhängig von der mechanischen Festigkeit allein durch ihre Dichtigkeit gegenüber äußeren Umwelteinflüssen wie Gas, Wasser oder anderen funktionsbeschränkenden Fremdkörpern bestimmt sein. Beispielsweise ist es in der Luftfahrt bzw. dem Schienenfahrzeugbau wichtig, sich gegen die äußere Umgebung abzuschirmen. Trotz gründlicher Recherche konnte keine aktuelle Literatur zur Konstruktion von dichten Nietverbindungen gefunden werden. Ein Grund dafür könnten die Entwicklungen in der Schweißtechnologie sein. Die früher bei Dampf- und Druckkesseln üblichen Nietverbindungen wurden praktisch vollständig durch einfacher zu fertigende Schweißverbindungen verdrängt. Im Flugzeugbau werden die Tanks und Zellen genietet und zusätzlich durch Dichtungsmassen abgedichtet.

Um die Dichtigkeit einer Flanschverbindung nachweisen und untersuchen zu können, kommen in Abhängigkeit der Strömungsrichtung nach DIN EN 1779 [11] zwei Prinzipien in Betracht. Dichtigkeitsprüfungen sind in der Regel für geschlossene Objekte, wie Behälter oder Tanks, vorgesehen, die entweder mit Prüfgas befüllt (Strömung aus dem Objekt) oder evakuiert (Strömung in das Objekt) werden können. Für die Messung der Leckrate kommen in der Regel spezielle Prüf gases zum Einsatz. Besonders eignen sich Helium oder Wasserstoff. Die

genannten Gase zeichnen sich durch ihre geringe Atomgröße und ihr geringes Atomgewicht aus. Diese Eigenschaften begünstigen eine gute Diffusion der Prüfgase auch durch kleinste Lecks hindurch. In der Praxis hat sich bei stationären Dichtigkeitsprüfungen insbesondere Helium bewährt.

Für die Dichtigkeitsmessung werden häufig spezielle Heliumlecktestgeräte verwendet. Das integrierte Massenspektrometer reagiert nur auf die relative Atommasse 4, wodurch Heliumatome (^4He) eindeutig nachweisbar sind, da in diesem Bereich keine Störungen durch andere Elemente auftreten [12]. Bei der Dichtigkeitsmessung mit Heliumleckdetektoren können die folgenden vier Verfahrensvarianten unterschieden werden (Abbildung 7).

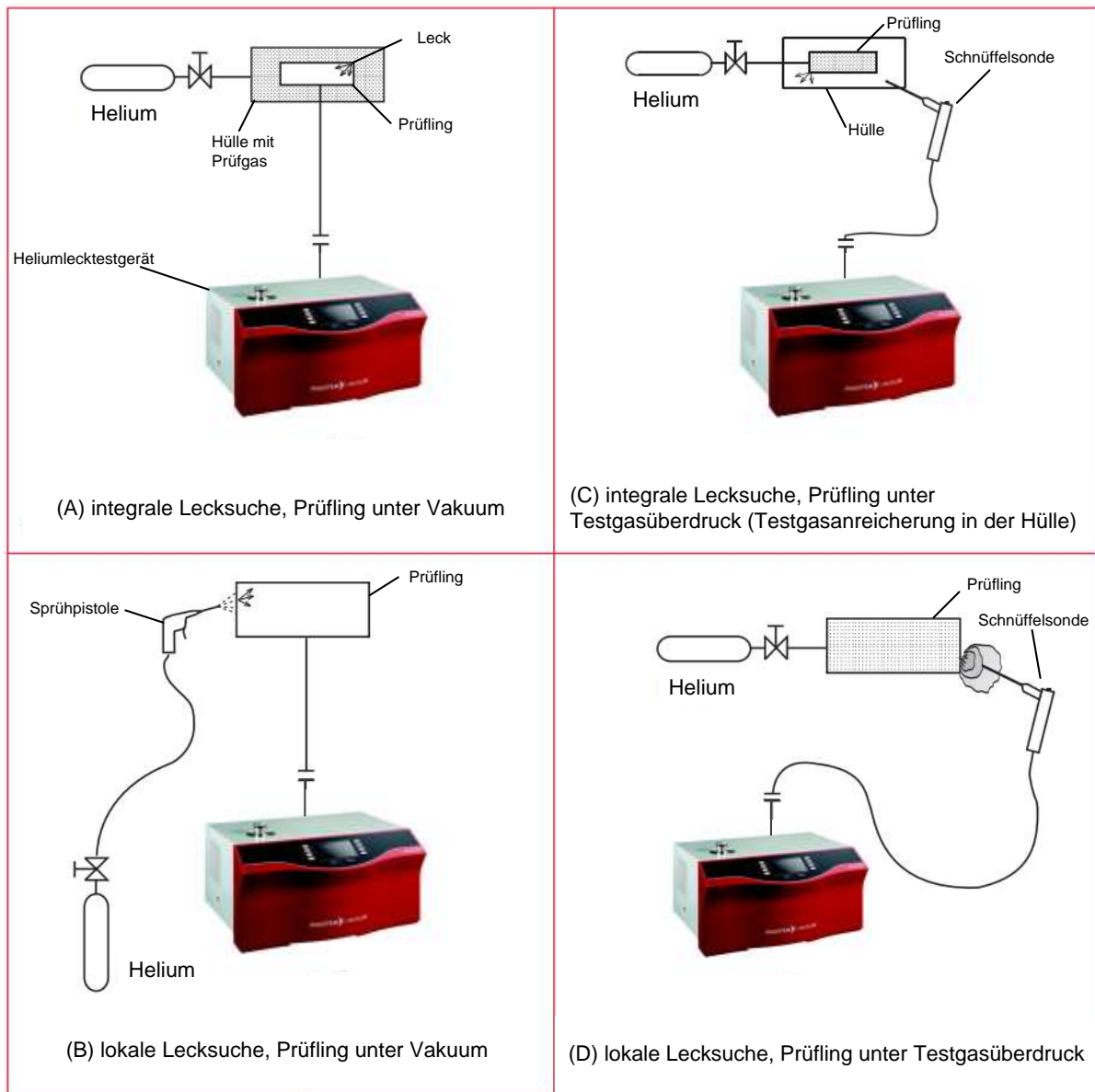


Abbildung 7: Mögliche Verfahren zur Lecksuche nach [12]

Im Betriebsmodus *Vakuum* wird das Heliumlecktestgerät (HLT) direkt an den Prüfling angeschlossen und dieser evakuiert. Bei der ersten Variante befindet sich der komplette Prüfling in einer mit Prüfgas gefüllten Hülle (Abbildung 7A). Aufgrund des Druckunterschieds strömt das Prüfgas durch etwaige Lecks aus der Hülle in den Prüfling und wird durch den Leckdetektor erfasst. Bei dieser Variante handelt es sich um eine integrale Messung. Das

bedeutet, dass bei diesem Verfahren alle Undichtigkeiten des Prüflings erfasst werden und eine Leckrate für das Gesamtsystem ermittelt wird. Allerdings kann keine Aussage über Ort und Größe einzelner Lecks getroffen werden.

Dagegen ist bei der zweiten Variante das Primärziel die Lokalisierung von Leckagen. Anstelle der mit Prüfgas gefüllten Hülle wird eine fein dosierbare Sprühpistole verwendet. Die verdächtigen Stellen werden gezielt mit Prüfgas besprüht (Abbildung 7B). An einer undichten Stelle wird durch den im inneren des Prüflings herrschenden Unterdruck das Prüfgas angesaugt und im HLT-Gerät detektiert. Die Lecks lassen sich damit sehr genau orten, jedoch ist diese Methode weniger exakt als die vorhergehende, weil die Prüfgaskonzentration an der Leckagestelle nicht eindeutig definiert ist. In Abhängigkeit vom Prüfaufbau und der verwendeten Messtechnik können bei der Vakuummethode Leckraten von $5 \cdot 10^{-9}$ mbar·l·s⁻¹ oder kleiner nachgewiesen werden.

Als dritte Variante kann der Prüfling alternativ mit einer Hülle umschlossen werden (Abbildung 7C). Das aus dem befüllten Objekt austretende Gas sammelt sich in der Hülle an. Über die Schnüffelsonde kann die Prüfgaskonzentration in der Hülle gemessen und so eine Aussage über Dichtigkeit des Prüflings getroffen werden. Hierbei handelt es sich wie bei der ersten Variante um eine integrale Messung, bei der eine Leckrate für das Gesamtobjekt bestimmt wird. Die kleinste nachweisbare Leckrate im Schnüffelbetrieb ist etwas höher als bei den Vakuummethoden und liegt im Bereich von $5 \cdot 10^{-7}$ mbar·l·s⁻¹.

Als vierte und letzte Variante kann im Betriebsmodus *Schnüffeln* das Prüfobjekt gezielt nach undichten Stellen abgesucht werden. Hierbei handelt es sich wie bei der zweiten Variante um eine lokale Messung. Dazu wird mit Überdruck Prüfgas in den Prüfling gefüllt. An undichten Stellen strömt das Prüfgas aus dem Objekt heraus und kann mit der Schnüffelsonde lokalisiert werden (Abbildung 7D). Weitere Prüfmethoden und -verfahren zur Dichtigkeitsmessung finden sich in DIN EN 1779 [11].

Experimenteller Befund

Die experimentellen Erkenntnisse beziehen sich auf das kürzlich abgeschlossene EFB/AiF-Forschungsvorhaben: „Flanschtragverhalten von Blindniet- und Schließringbolzenverbindungen bei Dichtstoffeinsatz“ [1].

Versuchsbedingungen

Verbindungselemente

Die Vielfalt der am Markt verfügbaren mechanischen Verbinder ist ebenso zahlreich wie deren mögliche Anwendungsfälle. Die Auswahl geeigneter Verbinder für das Forschungsvorhaben erfolgte daher in enger Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss.

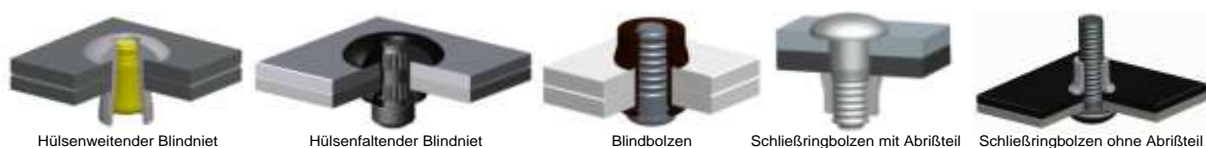


Abbildung 8: Schematische Darstellung der untersuchten Fügeelementtypen aus [1]

Bei der Auswahl der Verbinder wurde besonders darauf Wert gelegt, dass eine große Breite an unterschiedlichen Verbindervarianten (siehe Abbildung 8) betrachtet wird, um die Einflüsse der charakteristischen Eigenschaften eines jeden Verbinders, wie z. B. Vorspannkraft, Umformverhalten oder Nietdornverriegelung, auf die Tragfähigkeit und Dichtigkeit besonders hervorzuheben. Eingesetzt wurden verschiedene Blindniete des Durchmessers 6,4 mm sowie Blindniet- (6,4 mm) und Schließringbolzen (8,0 mm) als Stahl- bzw. Aluminiumausführung.

Kleb-/Dichtstoffe

Im Rahmen des Vorhabens wurden 12 Kleb- und Dichtstoffe hinsichtlich der Eignung als Flanschdichtstoff untersucht. Bedeutend für diesen Beitrag ist einerseits der *SikaForce-7888* als 2-komponentiger Polyurethan-Reaktionsklebstoff, der sich durch eine hohe Klebfestigkeit auf verschiedenen Oberflächen auszeichnet. Die Aushärtung erfolgt durch Polyaddition. Im Vergleich zu den übrigen betrachteten Kleb- und Dichtstoffen weist er sowohl auf der verzinkten als auch auf der mit Epoxidharz beschichteten Oberfläche die höchste Klebfestigkeit auf. Die Klebfestigkeiten (Klebfläche 20 x 45 mm) aus den Versuchen liegen bei 15,4 N/mm² für die EP-Beschichtung und bei 22,5 N/mm² für die bandverzinkte Oberfläche. Bei letzterer liegt diese damit sogar über dem vom Hersteller angegebenen Wert von 20 N/mm². Als zweites fiel die Wahl auf einen reinen Dichtstoff, den *Terostat 4006*. Beim Terostat 4006 handelt es sich um einen Dichtstoff auf Basis eines lösemittelarmen Butylkautschuks. Dieser zeichnet sich durch ein hohes Haftvermögen auf Metallen und Kunststoffen aus. Er ist zudem alterungs- und witterungsbeständig. Die Aushärtung erfolgt durch Verdunstung von Lösungsmitteln und dauert etwa ein bis zwei Wochen. Bei großen Überlappungen, welche die Verdunstung des Lösungsmittels erschweren, kann die vollständige Aushärtung unter Umständen erst nach mehreren Wochen oder gar Monaten erfolgen. Der Dichtstoff bleibt aber im Gegensatz zum SikaForce-7888 auch nach dem Aushärten zähplastisch und ist damit nicht für die Übertragung von Kräften geeignet.

Fügeteilwerkstoffe

Im Forschungsvorhaben wurden drei verschiedene Werkstoffe, wie sie vielfach im Schienenfahrzeugbau Anwendung finden, untersucht. Diese sind ein bandverzinkter Stahl (DX51) mit guten Kaltumformeigenschaften, ein unlegierter, normalisierter Baustahl S355J2N sowie die Aluminiumlegierung EN AW 5083 mit einer hervorragenden Korrosionsbeständigkeit. Die Blechstärke der Stahlwerkstoffe beträgt jeweils 3 mm, die der Aluminiumlegierung 4 mm.

Last-Verformungs-Verhalten und Versagensmechanismus

Einelementverbindungen

Die Untersuchung der Tragfähigkeit von mechanisch gefügten Einelementproben wurde in Anlehnung an DVS/EFB 3480-1 [6] durchgeführt. Die einschnittig ungestützte Verbindung aus je zwei Blechen der Abmessung 105 x 45 x 3 mm diente als Probenkörper. Die Probenform ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt.

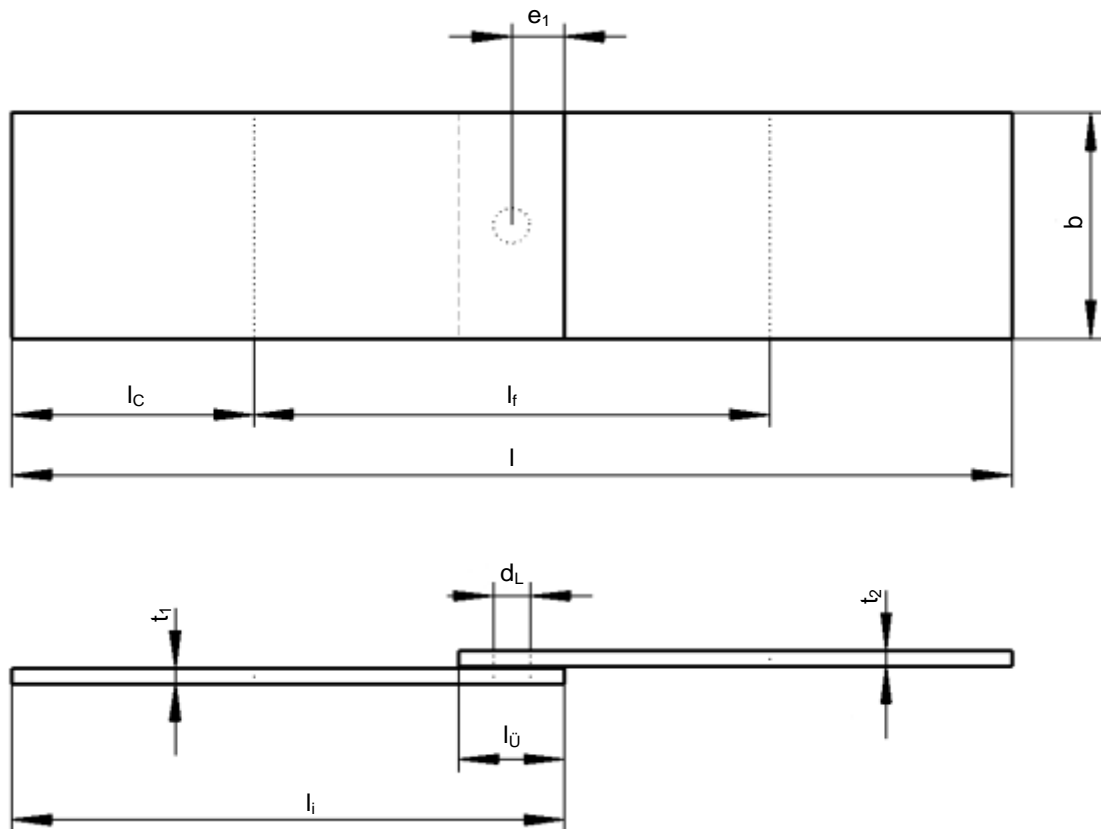


Abbildung 9: Einschnittig überlappte Einpunktprobe nach [6]

Die Scherzugversuche zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Tragverhaltens und der Versagensform vom Fügeelementtyp. In Abbildung 10 sind jeweils charakteristische Kraft-Weg-Kurven zur Beschreibung des Last-Verformungs-Verhaltens für einen Blindniet (M-Lock), einen Blindbolzen (Avbolt) und einen Schließringbolzen (HuckSpin) dargestellt.

Die rote Kurve beschreibt das Verhalten eines Blindnietes. Aufgrund der guten Vorlochfüllung der Blindniete ist kein Gleitbereich erkennbar. Die Maximalkraft liegt geringfügig oberhalb der errechneten Grenzlochleibungskraft, so dass das Versagen durch Abscheren dominiert wird, erkennbar am Abflachen der Kurve bereits vor dem Erreichen der Grenzlochleibungskraft. Lediglich eine geringfügige Vorlochweitung durch das Schrägstellen des Verbinders ist feststellbar.

Das Tragverhalten eines Blindbolzens zeigt die grüne Kurve. Deutlich ist bei etwa 2 kN der Übergang vom Kraftschluss in den Formschluss zu erkennen. Das Gleiten der Verbindung ist aufgrund des Lochspiels von $\Delta d = 0,8 \text{ mm}$ klar ersichtlich. Oberhalb der Grenzlochleibungskraft fällt die Kurve zunehmend nach rechts ab, der Lochleibungsdruck ist zu hoch und das Vorloch weitet sich auf. Dies zeigt sich in einer deutlichen Wegzunahme (duktiler Bauteilversagen), wodurch im Gegensatz zum Abscherversagen eine gewisse Resttragfähigkeit bei Überbeanspruchung vorhanden ist.

Gleiches gilt für den Schließringbolzen (blaue Kurve). Die Grenzgleitkraft liegt wegen der höheren Vorspannkraft bei etwa 6 kN, bevor die Verbindung in den Formschluss übergeht. Das Abflachen der Kurve setzt auch hier mit der Überschreitung der Grenzlochleibungskraft und der plastischen Verformung des Bauteilwerkstoffs ein.

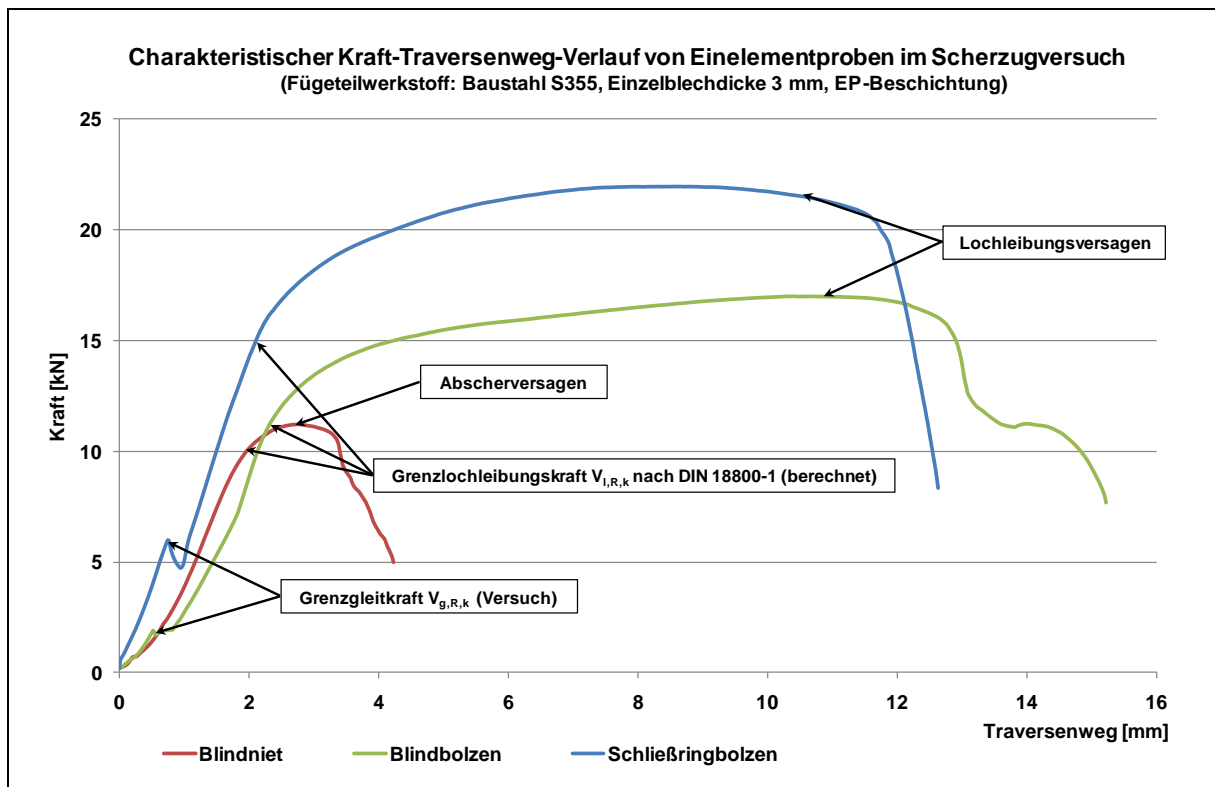


Abbildung 10: Last-Verformungs-Verhalten von Enelementproben im Scherzugversuch

Weiterhin konnte ein Zusammenhang von Versagensmechanismus und dem Last-Verformungs-Verhalten festgestellt werden. Liegt die Grenzlochleibungskraft deutlich über der Mindestabscherkraft eines Verbinders, handelt es sich in der Regel um Abscherversagen (Abbildung 11 links). Liegt die Abscherkraft umgekehrt deutlich über der Lochleibungstragfähigkeit, tritt Lochleibungsversagen auf, wobei der Verbinder intakt bleibt (Abbildung 11 Mitte). Liegen Abscherkraft und Lochleibungstragfähigkeit auf einem vergleichbaren Niveau, tritt demzufolge kombiniertes Versagen auf, welches mit dem Ovalisieren des Vorloches und dem Abscheren des Verbinders einhergeht (Abbildung 11 rechts).

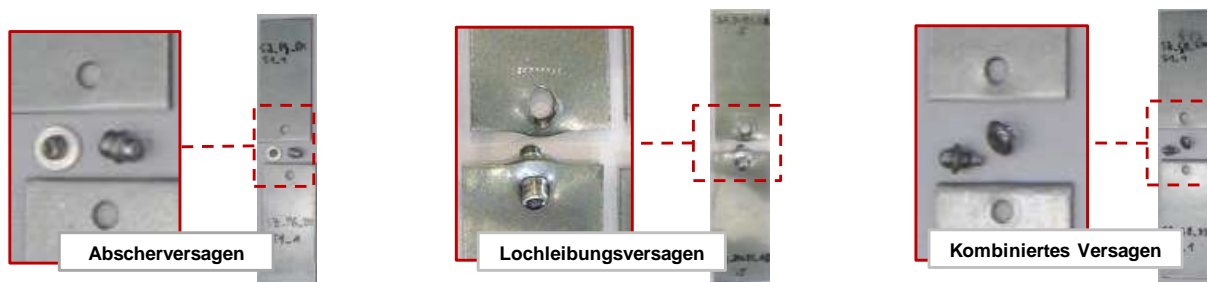


Abbildung 11: Charakteristische Versagensmechanismen bei Scherzugbeanspruchung

Die Kombination der elementaren Fügeverfahren mechanisches Fügen und Kleben wird an dieser Stelle nicht diskutiert.

Mehrelementverbindungen

Ausgehend von den Untersuchungen an den Enelementproben wird in diesem Abschnitt wiederum der Einfluss der Fügeelementtypen sowie zusätzlich der Einfluss des Kleb- bzw.

Dichtstoffes auf die Tragfähigkeit von hybrid gefügten Mehrelementproben untersucht. Weiterhin wird der Lochabstand quer zur Krafrichtung und somit die Anzahl der Fügeelemente variiert. Zudem wird erörtert, inwiefern die Ergebnisse der Tragfähigkeitsversuche mit Einelementproben auf Mehrelementproben übertragbar sind. Da die Untersuchung von Mehrelementproben generell einen höheren zeitlichen und materiellen Aufwand verursacht, kann bei einer positiven Übereinstimmung der Versuchsaufwand zukünftig deutlich reduziert werden. Für die Versuche an Mehrelementverbindungen wurden gezielt ein Repräsentant für die Blindniete und ein Repräsentant für Schließringbolzen ausgewählt, welche die charakteristischen Eigenschaften der Verbindertypen widerspiegeln. Die Versuche wurden mit dem M-Lock, einem hochfesten Blindniet mit Hülsenweitung und guter Vorlochfüllung aber geringer Vorspannkraft, und dem HuckSpin, einem Schließringbolzen mit sehr hoher Vorspannkraft und ohne Vorlochfüllung durchgeführt.

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, sind die Mehrelementproben aus dergleichen Charge wie die Einelementproben gefertigt. Es werden ausschließlich EP-beschichtete Bleche aus S355J2N untersucht. Die Probenbleche haben die Maße 200 x 150 x 3 mm. Die Überlappplängen wurden analog zu den Einelementproben gewählt. Zum Einfluss des Lochabstandes quer zur Krafrichtung wurden die zulässigen Mindest- und Maximalabstände nach DIN 18800-1 [2] betrachtet. Als Mindestabstand wurde $e_{3,min} = 20$ mm und als Maximalwert $e_{3,max} = 56$ mm festgelegt. Als Zwischenwert wurde zusätzlich $e_3 = 40$ mm gewählt. Abbildung 12 zeigt beispielhaft die Probenbleche mit den Loch- und Randabständen für die untersuchten Blindniete.

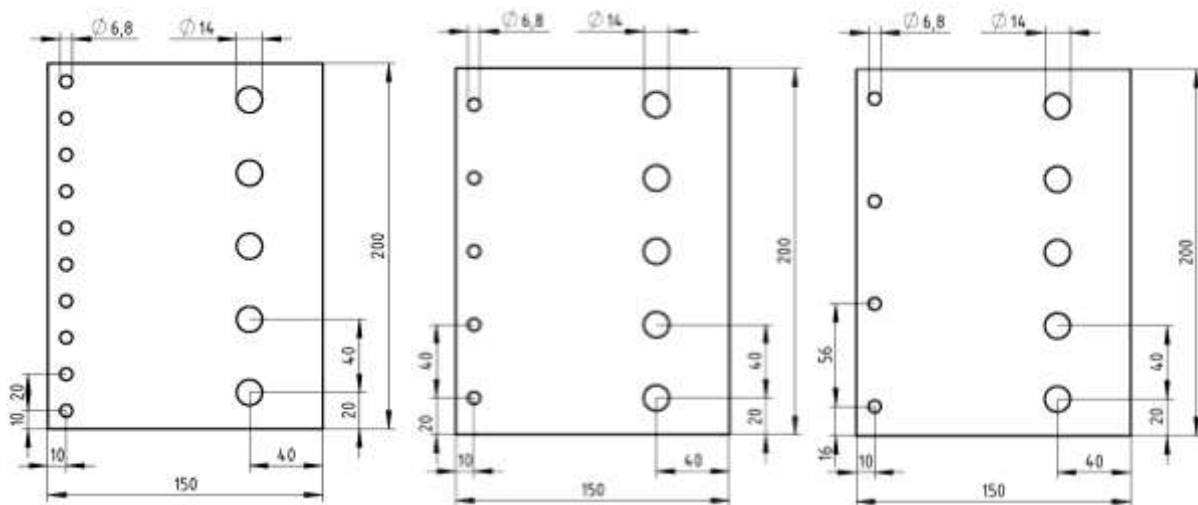


Abbildung 12: Variation der Loch- und Randabstände am Beispiel der Blindnietverbindung

Die Probenherstellung für die Versuche erfordert eine hohe Sorgfalt, damit der richtige Sitz der Fügeelemente durch die geforderte volle Lochüberdeckung sichergestellt wird. Ein Schrägstellen der Fügeelemente beim Setzen ist absolut unerwünscht und könnte das Versuchsergebnis beeinflussen. Die Vorlöcher werden durch Bohren eingebracht. Nach dem Bohren werden die Löcher entgratet und die Proben von Spänen sowie Schmutz und Öl befreit (siehe Abbildung 13 A). Bei den Hybridproben werden unmittelbar vor der Kleb- bzw. Dichtstoffapplikation die Kontaktflächen mit Isopropanol gereinigt. Dann erfolgt nach dem vollständigen Ablüften der girlandenförmige Dichtstoffauftrag (Abbildung 13 B). Zum Setzen der Verbinder wird ein Fügepart senkrecht in einer Halterung platziert und die Verbinder in die

Vorlöcher eingebracht. Die Verbinder werden anschließend in der in Abbildung 13 C angegebenen Reihenfolge von innen nach außen gesetzt, um die Klebschicht gleichmäßig zu belasten und für eine homogene Dichtstoffverteilung zu sorgen. Da für die Mehrelementversuche nur hybrid und mechanisch gefügte Verbindungen untersucht werden, entfällt eine zusätzliche Fügefixierung bis zum Aushärten der Dicht-/Klebstoffe.

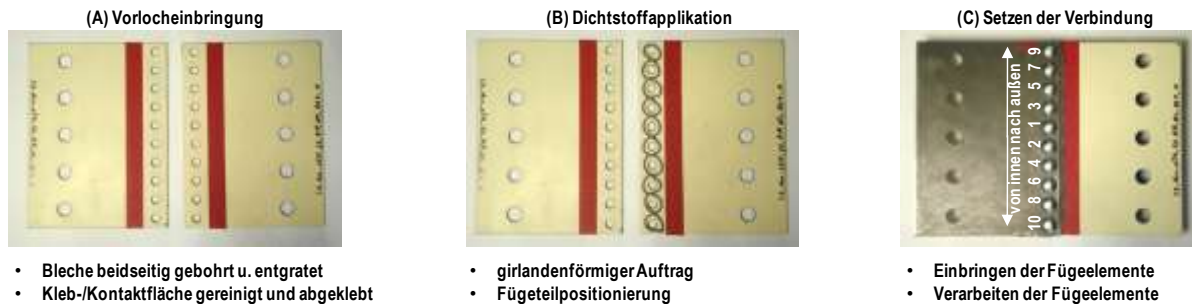


Abbildung 13: Vorlochherstellung und Fügeprozess bei Mehrelementverbindungen [1]

Die Scherzugversuche mit den Mehrelementproben werden im weggeregelten Prüfmodus bei einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt. Der Scherzugversuch endet mit dem Bruch der Probe. Aufgrund der geringen Gesamtprobenlänge wird eine spezielle Probenhalterung verwendet, mit der die Proben kraftschlüssig verschraubt werden. Die Einspannung der Proben über einen Los- und einen Festblock ist dabei so konzipiert, dass die Kraftnulllinie genau durch die Scherfuge verläuft. Dadurch werden Biegemomente minimiert und zusätzliche Ausgleichsbleche können entfallen. Abbildung 14 zeigt die Konzeption der Einspannung in einem CAD-Entwurf.

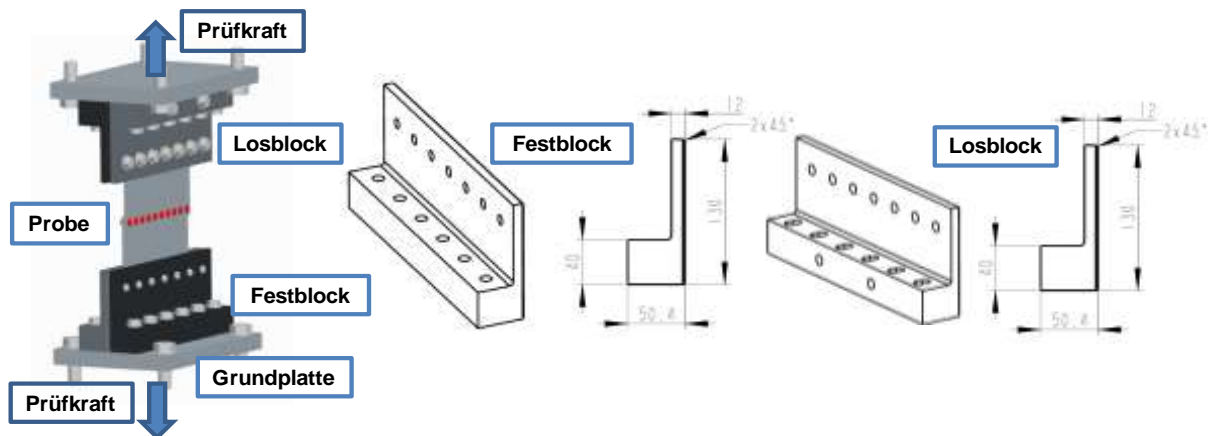


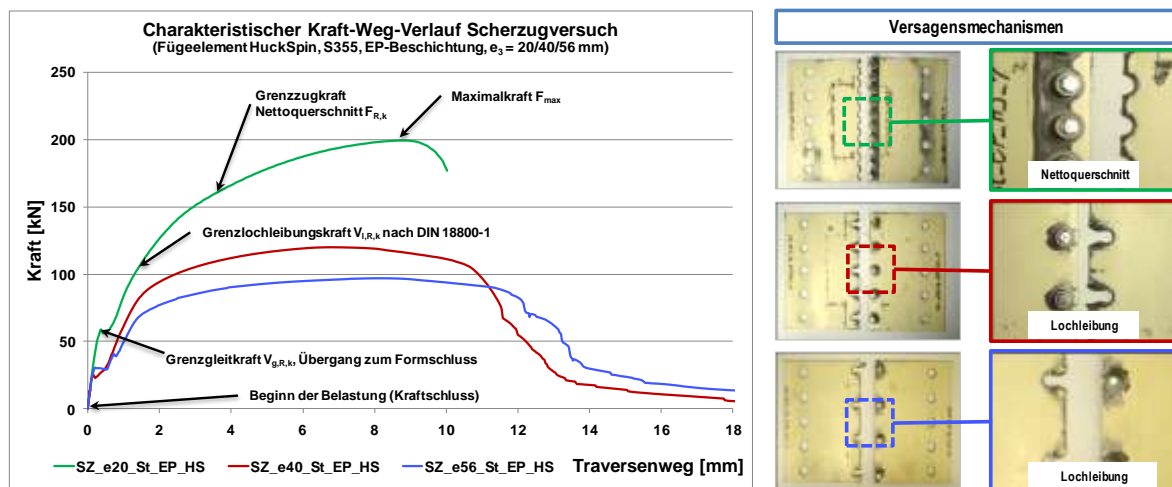
Abbildung 14: CAD-Konzeption der Probeneinspannung aus [1]

Die Scherzugversuche werden bei einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt. Die Steuerung erfolgt somit weggeregelt.

In diesen Beitrag wird nur auf die Ergebnisse der Hybridfügeverbindung mit Schließringbolzen in Verfahrenskombination mit Kleben bzw. Dichten eingegangen, Blindnietverbindungen werden an dieser Stelle nicht betrachtet. Zum besseren Verständnis werden den Hybridverbindungen zunächst die Ergebnisse der elementar gefügten Mehrelementverbindungen vorangestellt.

Im Gegensatz zu Blindnietverbindungen handelt es sich bei der Verwendung vom SRB (hier

HuckSpin) in der Regel um kraftschlüssige Verbindungen. Der Kurvenverlauf der drei Serien ist dabei vergleichbar (siehe Abbildung 15). Die Grenzgleitkraft der drei Serien unterliegt jedoch großen Unsicherheiten. Rechnerisch ergeben sich Haftreibungsbeiwerte zwischen 0,27 und 0,41. Um derartigen Schwankungen entgegen zu treten, sollte für die Auslegung als gleitfest vorgespannte Verbindung daher eine definierte Reibflächenvorbehandlung in Erwägung gezogen werden. Nach dem Überschreiten der Grenzgleitkraft verläuft die Kurve nochmals linear. Die Kraftübertragung erfolgt durch Formschluss. Im Kurvenverlauf ist ab der rechnerisch ermittelten Grenzlochleibungskraft eine überproportionale Wegzunahme zu erkennen. Die Grenzlochleibungskraft wird für den HuckSpin aufgrund der großen Auflagefläche auf Basis einer einschnittig gestützten oder mehrschnittigen Verbindung ermittelt. Die Versuchsergebnisse unterstützen diese Vorgehensweise. Aufgrund des durch die Bohrungen stark geschwächten Grundmaterialquerschnitts überschreitet die Serie mit dem geringsten Lochabstand senkrecht zur Krafrichtung (SZ_e20_St_EP_HS) im Verlauf des Scherzugversuchs die Grenzzugkraft des Nettoquerschnitts, wodurch das Grundmaterial auf der Linie des geringsten verbleibenden Restquerschnitts (kritische Risslinie) abreißt. Durch den geringen Verbinderrabstand überlagern sich zudem die Lochleibungsspannungen der einzelnen Vorlöcher, wodurch das Material zusätzlich belastet wird. Zur Ausnutzung des maximalen Lochleibungsdrucks müssen die Lochabstände e_3 mindestens den dreifachen Lochdurchmesser betragen. Das ist bei dieser Serie nicht der Fall und führt somit lediglich zu einer maximalen Bruchkraft von 19,8 kN je Niet. Die beiden Serien mit einem Bohrlochabstand von 40 mm und 56 mm versagen durch Lochleibung. Die Maximalkräfte je Niet liegen mit 23,3 kN und 23,9 kN auf dem Niveau der Einelementprobe.



Serie	$A_{net}^{1)}$ [mm ²]	$F_{R,k}^{1)}$ [kN]	$V_{g,R,k}^{2)}$ [kN]	$F_v^{1)}$ [kN]	$\mu_b^{1)}$	$V_{l,R,k}^{1)}$ [kN]	$V_{g,R,k}^{3)}$ [kN]	$F_{max}^{2)}$ [kN]	Stabw ¹⁾ [kN]	$F_{max}/n^{1)}$ [kN]	n	Versagen bei F_{max}
SZ_e20_St_EP_HS	354,0	162,8	~60	185,0	0,32	105,7	298,1	197,7	3,9	19,8	10	Versagen Nettoquerschnitt
SZ_e40_St_EP_HS	477,0	219,4	~25	92,5	0,27	79,7	149,1	116,3	3,2	23,3	5	Lochleibungsversagen, Lochausriss
SZ_e56_St_EP_HS	501,6	230,7	~30	74,0	0,41	63,8	119,3	95,5	1,4	23,9	4	Lochleibungsversagen, Lochausriss

¹⁾ rechnerisch ermittelt | ²⁾ experimentell ermittelt | ³⁾ lt. Datenblatt

Abbildung 15: Versuchsergebnisse elementar gefügter Mehrelementverbindung mit SRB

Im nächsten Schritt wird die Prüfung an den Mehrelementproben mit variierendem Lochabstand um die Kleb- bzw. Dichtstoffapplikation erweitert. Es werden wieder jeweils drei Serien mit Mindest- und mit Maximalabstand auf Einflüsse auf das Tragverhalten hin untersucht. Die mechanisch gefügte Verbindung sowie der im Scherzugversuch ermittelte Mittelwert der Bruchfestigkeit des Klebstoffs (15,4 N/mm²) mit identischer Überlapplänge

dienen dabei als Referenz.

Mit Beginn der Belastung steigen alle drei Kurven der Reihe mit Mindestverbinderabstand gleichstark an (Abbildung 16). Bei etwa einer Kraft von 50 kN ist bei der Hybridverbindung mit Terostat 4006 (SZ_e20_St_EP_HS_DS1) ein erster Kraftabfall erkennbar, der auf das Gleiten der Verbindung beruht. Bei 60 kN fängt die Verbindung ohne Dichtstoff im Fügespalt zu gleiten an. Dies entspricht einer Reduzierung der Grenzgleitkraft um 15% durch Dichtstoffeinsatz. Ursächlich dafür ist das elastische Verhalten des Dichtstoffes. Dagegen verhindert der Einsatz des hochfesten Strukturklebstoffs (SikaForce 7888) zuverlässig den Gleitbereich. Zudem kann bei dieser Verbindung eine Addition der einzelnen Grenztragfähigkeiten beobachtet werden, so dass sich $V_{sup} = \sim 130$ kN ergibt. Eine weitere Steigerung der Belastung führt ab etwa 162 kN zur Überschreitung der Grenzzugkraft im Nettoquerschnitt. Dadurch beginnt das Probenmaterial zu fließen und reißt entlang der kritischen Risslinie ab (siehe Abbildung 16).

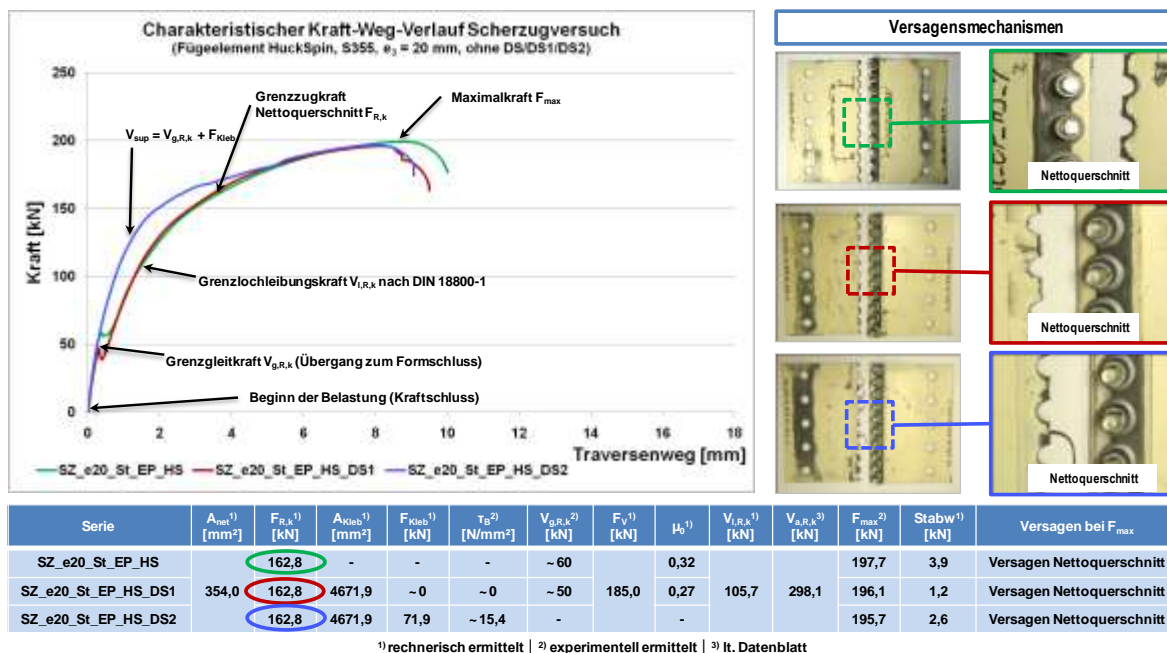


Abbildung 16: Versuchsergebnisse hybrid gefügter Mehrelementverbindung mit SRB und Kleb- bzw. Dichtstoff: SikaForce 7888 bzw. Terostat 4006

Als letzte Versuchsreihe zur Tragfähigkeit wird der HuckSpin an Proben mit maximalem Verbinderabstand untersucht (Abbildung 17). Wie bei den Proben zuvor liegt auch in diesem Fall bei der Hybridverbindung mit Terostat 4006 (SZ_e56_St_EP_HS_DS1) die Grenzgleitkraft niedriger als bei der Verbindung ohne Dichtstoff. Nach dem Überwinden des Gleitbereichs steigen beide Kurven linear bis zum Erreichen der rechnerisch ermittelten Grenzlochleibungskraft an. Über diesen Punkt hinaus ist das typische Abflachen der Kraft-Weg-Kurve erkennbar, dass die plastische Verformung des Grundwerkstoffs kennzeichnet. Die Maximalkraft der Hybridverbindung liegt hier mit 86 kN deutlich unter der Serie ohne Dichtstoff (95,5 kN). Der Kurvenverlauf der mit SikaForce 7888 geklebten Verbindung (SZ_e20_St_EP_HS_DS2) steigt ohne Anzeichen von Gleiten linear über den errechneten Wert der Tragfähigkeit der Klebung von 76,8 kN. Mit dem Bruch der Klebung fällt die Kraft schlagartig ab, bis der Verbinder an der Lochwand anliegt. Nach einem kurzen linearen

Anstieg ist die Grenzlochleibungskraft überschritten und die Verbindung versagt allmählich auf Lochleibung. Aufgrund des großen Fügeelementabstandes kommt es nicht zu einer Überlagerung der Grenztragfähigkeiten. Da die Tragkraft der Klebung geringfügig unterhalb der Maximalkraft liegt, bleiben bei einem unerwarteten Bruch optimale Notlaufeigenschaften der Verbindung erhalten. Im Gegensatz zur Blindnietverbindung (Abscheren) handelt es sich hierbei um ein duktiles Versagensverhalten.

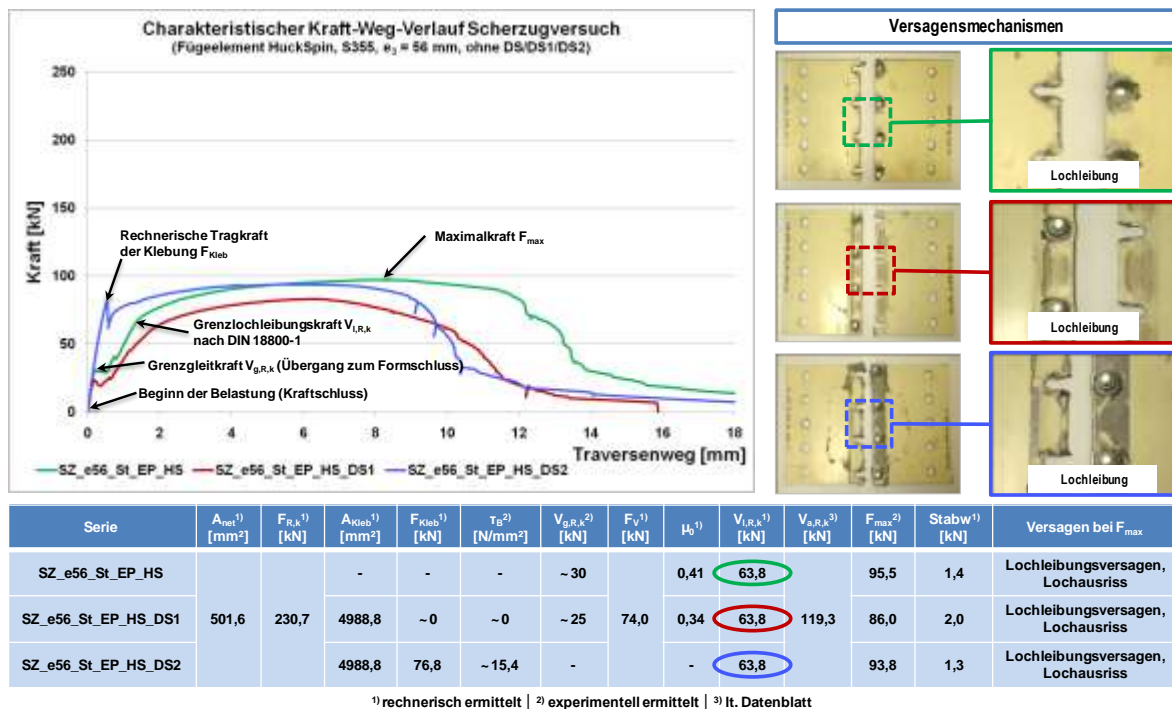


Abbildung 17: Versuchsergebnisse hybrid gefügter Mehrelementverbindung mit SRB und Kleb- bzw. Dichtstoff: SikaForce 7888 bzw. Terostat 4006

Identifikation der Dichtigkeit

Im Rahmen der Versuche sollte die Flanschdichtigkeit nachgewiesen werden. Also gilt es versuchstechnisch die Leckage im Vorlochbereich sowie die Leckage zwischen den Fügeteilen im Überlappungsbereich auszuschließen (vgl. Abbildung 3).

Versuchsmethodik zur Prüfung der Flanschdichtigkeit

Keine aus Abschnitt 2.3 benannte Variante zur Prüfung der Flanschdichtigkeit kann ohne weiteres angewendet werden. Es müssen zusätzliche Hilfsmittel zur Anwendung kommen (siehe Abbildung 18).

Tabelle 1: Schätzungen von Grenzleckraten nach [12]

Begriff /Kriterium	Bemerkung	Q _L [mbar·l/s]	relevante Teilchengröße
Wasserdicht	tropfen	Q _L < 10 ⁻²	
dampfdicht	„schwitzen“	Q_L < 10⁻³	
bakteriendicht (Kokken) (Stäbchen)		Q _L < 10 ⁻⁴	ø = 1 µm ø = 0,5–1 µm, 2- 10 µm lang
öldicht		Q _L < 10 ⁻⁵	
virendicht (Vaccine z. B. Pocken) (kleinste Viren, Bakteriophagen) (Viroide, RNA)		Q _L < 10 ⁻⁶ Q _L < 10 ⁻⁸ Q _L < 10 ⁻¹⁰	ø = 3·10 ⁻⁷ m ø = 3·10 ⁻⁸ m ø = 1·10 ⁻⁹ m (Fäden)
gasdicht		Q_L < 10⁻⁷	
»absolut dicht«	technisch	Q _L < 10 ⁻¹⁰	

Vom Ansatz her haben sich das partielle Vakuumverfahren (Verfahren A2) sowie die Prüfung mit einer Vakuumglocke (Verfahren B2.1) als praktikabel erwiesen [11]. Das Vakuumverfahren sieht die Evakuierung des Prüfobjektes vor, während die verdächtigen Stellen mit einer gasdichten Folie abgedichtet werden. Im Verfahren B2.1 wird das Prüfobjekt mit Prüfgas gefüllt. Die Vakuumglocke wird außen angebracht, an den Detektor angeschlossen und evakuiert. Da weder das Evakuieren der Flanschverbindung noch das Befüllen mit Prüfgas konstruktionsbedingt möglich sind, wird für die hier durchgeführten Untersuchungen eine Kombination beider zuvor beschriebenen Verfahren angewendet (siehe Abbildung 19).

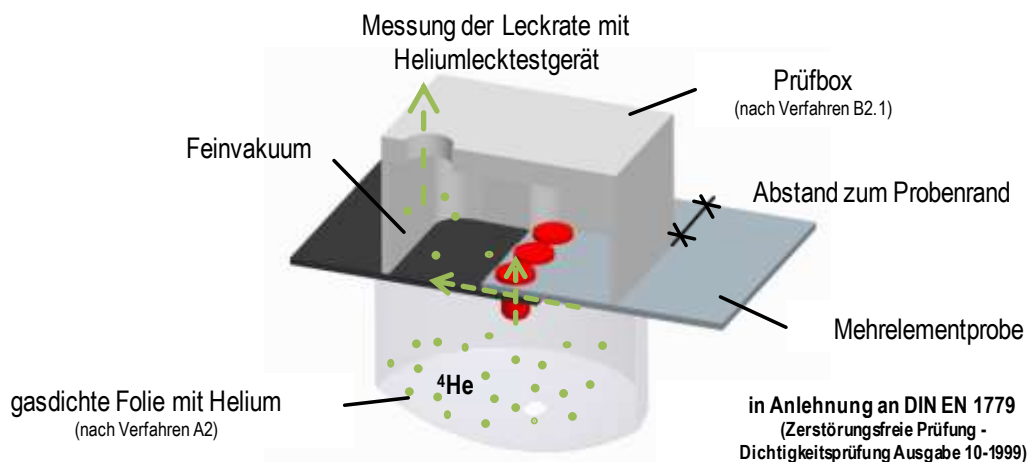


Abbildung 19: Dichtigkeitsmessung an Mehrelementproben aus [1]

Messung der Flanschdichtigkeit

Um die Proben hinsichtlich der Dichtigkeit bewerten zu können, wird mit dem Heliumlecktestgerät die Leckrate gemessen und auf einem PC mit einer speziellen Software über die Zeit aufgezeichnet. Es konnte festgestellt werden, dass nach einer Messdauer von über 60 Sekunden keine signifikante Änderung der Leckrate mehr festzustellen ist. Die Messungen wurden zur Sicherheit daher auf 120 Sekunden festgelegt. Der typische Verlauf einer Leckrate-Zeit-Kurve ist in Abbildung 20 dargestellt.

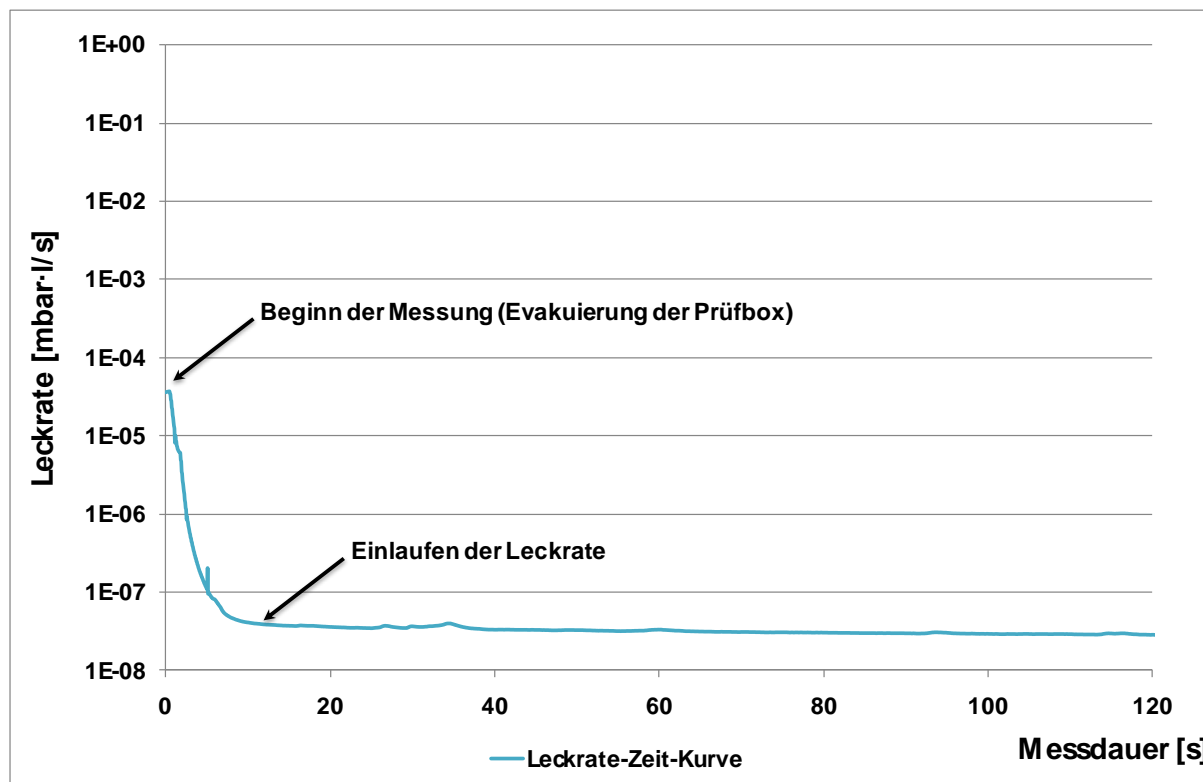


Abbildung 20: Charakteristischer Verlauf einer Leckrate-Zeit-Kurve einer gasdichten Probe

Der steile Abfall der Leckrate, der die ersten zehn Sekunden der Messung kennzeichnet, ist auf die Evakuierung der Prüfbox zurückzuführen. Anschließend läuft die Leckrate auf einem konstanten Niveau ein.

Zuerst wurden die mechanischen Fügeverbindungen ohne Dichtstoffeinsatz untersucht. Das Ziel, durch Reduzierung des Lochabstandes senkrecht zur Krafrichtung, gas- oder dampfdichte Verbindungen zu fertigen, konnte nicht erreicht werden. Obwohl mit abnehmendem Verbinderabstand eine Verringerung der Leckrate festgestellt wurde, konnte keine Verbindung das Mindestkriterium der Dampfdichtigkeit erreichen, wie es beispielsweise für den Einsatz im Schienenfahrzeugbau gefordert ist. An den Proben mit maximalem Lochabstand ($e_3 = 56$ mm) konnten z.T. keine Messungen durchgeführt werden, da das Heliumlecktestgerät aufgrund der unzureichenden Dichtigkeit den notwendigen Unterdruck für die Messung in der Vakuumglocke nicht aufbauen konnte.

Der Einsatz von Dichtstoff zur Fertigung dichter Flanschverbindungen ist somit unabdingbar. In einem nächsten Schritt wird daher an einer verkleinerten Auswahl von Proben die Leckrate an Hybridverbindungen gemessen. Zur Abdichtung kommen die beiden zuvor verwendeten Kleb-/Dichtstoffe zum Einsatz. Bevor die Messungen durchgeführt werden können, müssen die Proben vollständig ausgehärtet sein.

Die Auswertung der Ergebnisse (siehe Abbildung 21) bescheinigt allen Proben eine Leckrate kleiner als $1 \cdot 10^{-6}$ mbar·l·s⁻¹ (virendicht). Der Dichtstoff Terostat 4006 erreicht bei drei von vier Messreihen sogar die Gasdichtigkeit. Ein Einfluss des Verbindertyps kann hier nicht festgestellt werden.

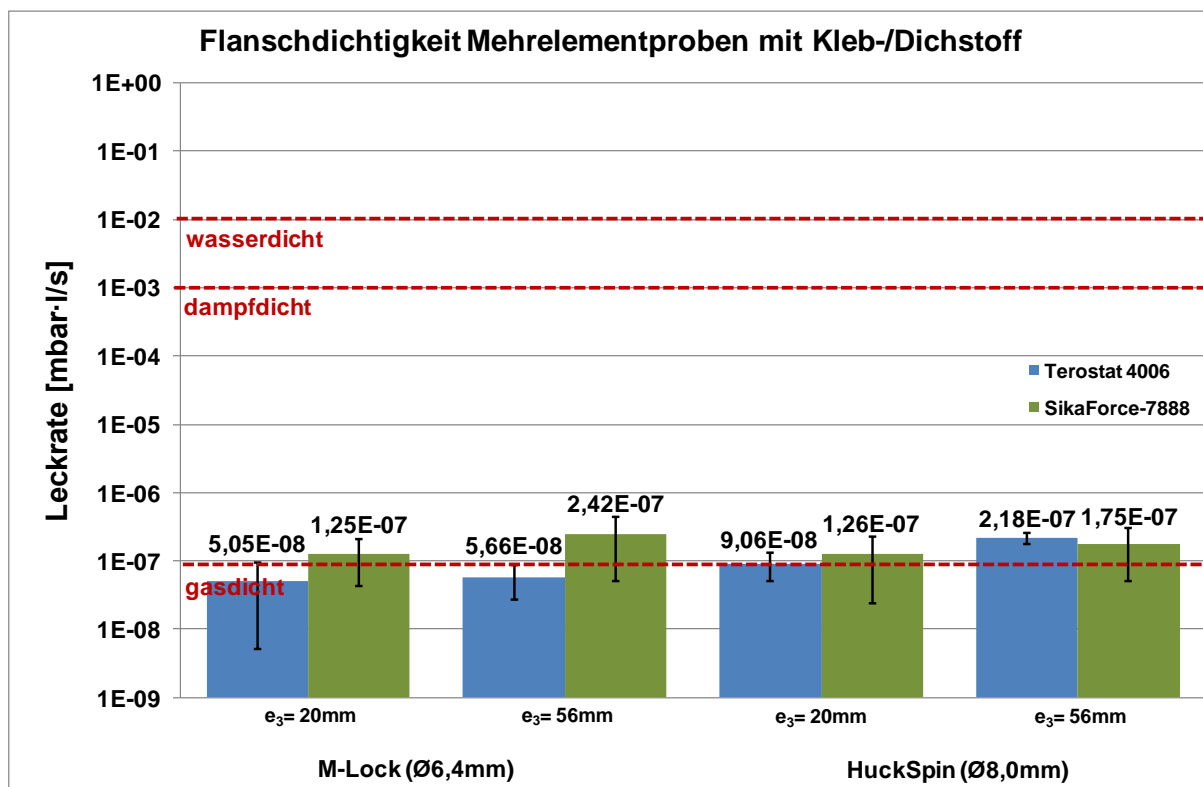


Abbildung 21: Ergebnisse der Messung der Flanschdichtigkeit bei Mehrelementverbindungen mit Kleb- bzw. Dichtstoffapplikation

Einfluss einer Beanspruchung auf die Flanschdichtigkeit

In der Praxis sind Verbindungen ständigen Einwirkungen (statischen Lasten) ausgesetzt. Die Dichtigkeit der Verbindung muss auch im Falle einer derartigen Beanspruchung der Verbindung ausreichend gewährleistet sein. Im Folgenden werden die Proben daher statischen Belastungen ausgesetzt. Gleichzeitig wird die Leckrate gemessen. Ziel der Untersuchungen ist es, einen Zusammenhang von Belastung und Dichtigkeit herzustellen.

Aufgrund der gleichzeitig stattfindenden Dichtigkeitsmessung werden die Scherzugversuche mit einer Traversengeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Für die Messung wird zuerst das Heliumlecktestgerät eingeschaltet und die Prüfbox evakuiert (Abbildung 21 A). Sobald sich die Leckrate auf einem konstanten Niveau eingependelt hat, werden beide Messungen zeitsynchron gestartet. Beim Überschreiten einer kritischen Last ($F_{undicht}$, siehe Abbildung 21 B) wird die Probe undicht. Eine Probe wird als undicht eingestuft, sobald die Leckrate den Wert von $1 \cdot 10^{-3}$ mbar·l·s⁻¹ überschreitet. Die Messung wird in dem Fall automatisch vom Heliumlecktestgerät unterbrochen, um eine Verunreinigung der empfindlichen Messsensorik zu vermeiden und nachfolgende Messungen nicht zu beeinflussen.

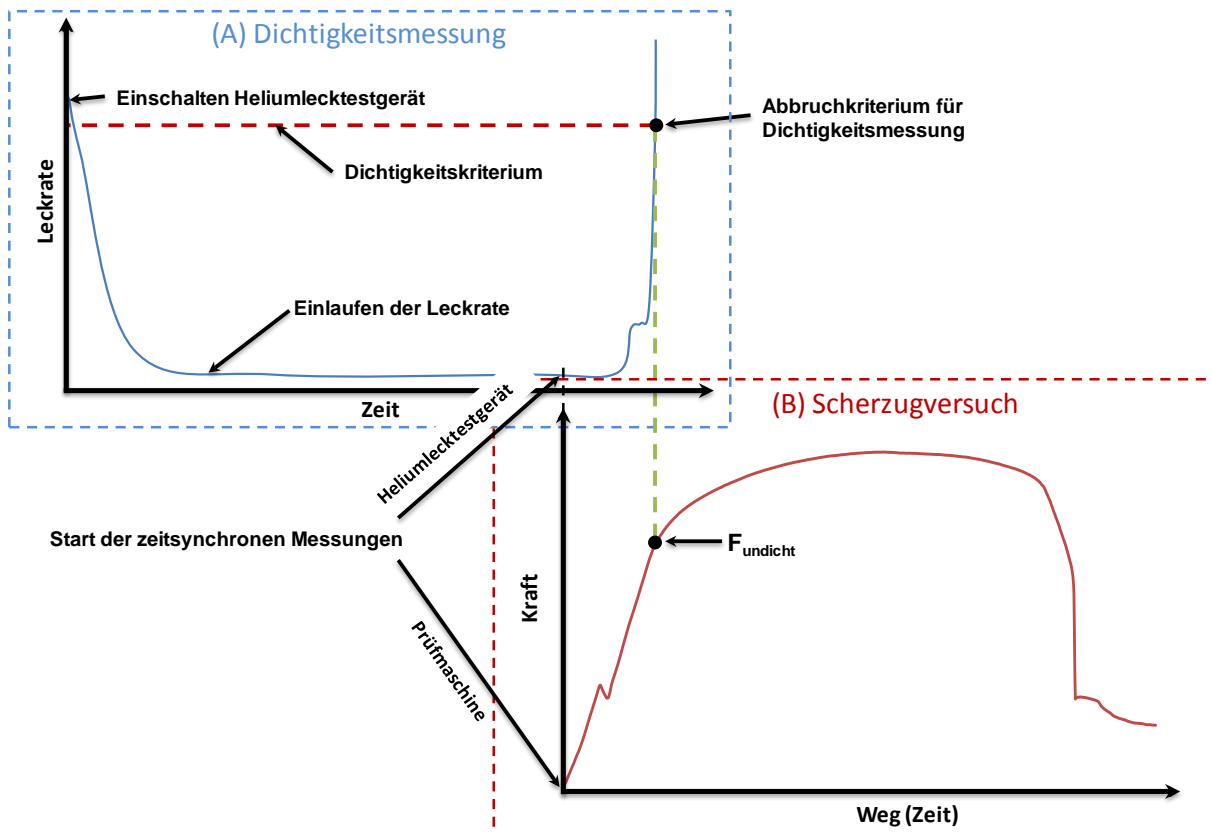


Abbildung 21: Schema der Ermittlung der Tragfähigkeit dichter Verbindungen nach [1]

Über die von der jeweiligen Prüfsoftware aufgezeichnete Messdauer kann die Kraft, bei der die Leckrate den Grenzwert überschreitet, genau bestimmt werden.

Abbildung 21 ist für die Darstellung der Versuche nicht überschaubar genug. Daher werden für die Auswertung die Leckrate-Zeit-Diagramme der Dichtigkeitsmessung (Abbildung 21 A) in die Kraft-Weg-Diagramme der Scherzugversuche (Abbildung 21 B) integriert und die Leckrate auf einer zweiten y-Achse skaliert. Abbildung 22 zeigt das Resultat dieser Maßnahme.

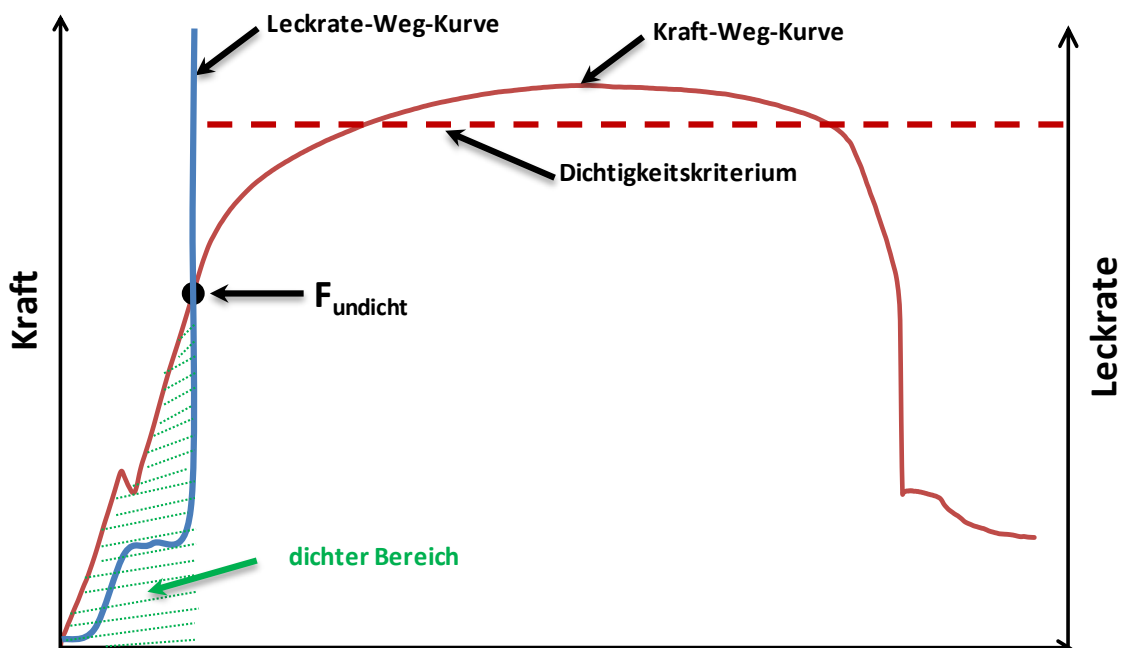


Abbildung 22: Dichtigkeitsmessung und Kraft-Traversenweg-Messung zeitsynchronisiert [1]

Es kann an dieser Stelle nur auf die Ergebnisse der Hybridfügeverbindung mit Schließringbolzen in Verfahrenskombination mit Kleben bzw. Dichten eingegangen werden. Die Versuchsergebnisse der Dichtigkeitsuntersuchungen unter statischer Beanspruchung unterliegen besonders bei den mit Terostat 4006 gefertigten Proben einigen Schwankungen. Das Dichtigkeitsversagen der mit SikaForce 7888 gefertigten Proben kann dagegen einer gewissen Systematik unterstellt werden. Abbildung 23 zeigt die Versuchsergebnisse für den HuckSpin-Schließringbolzen.

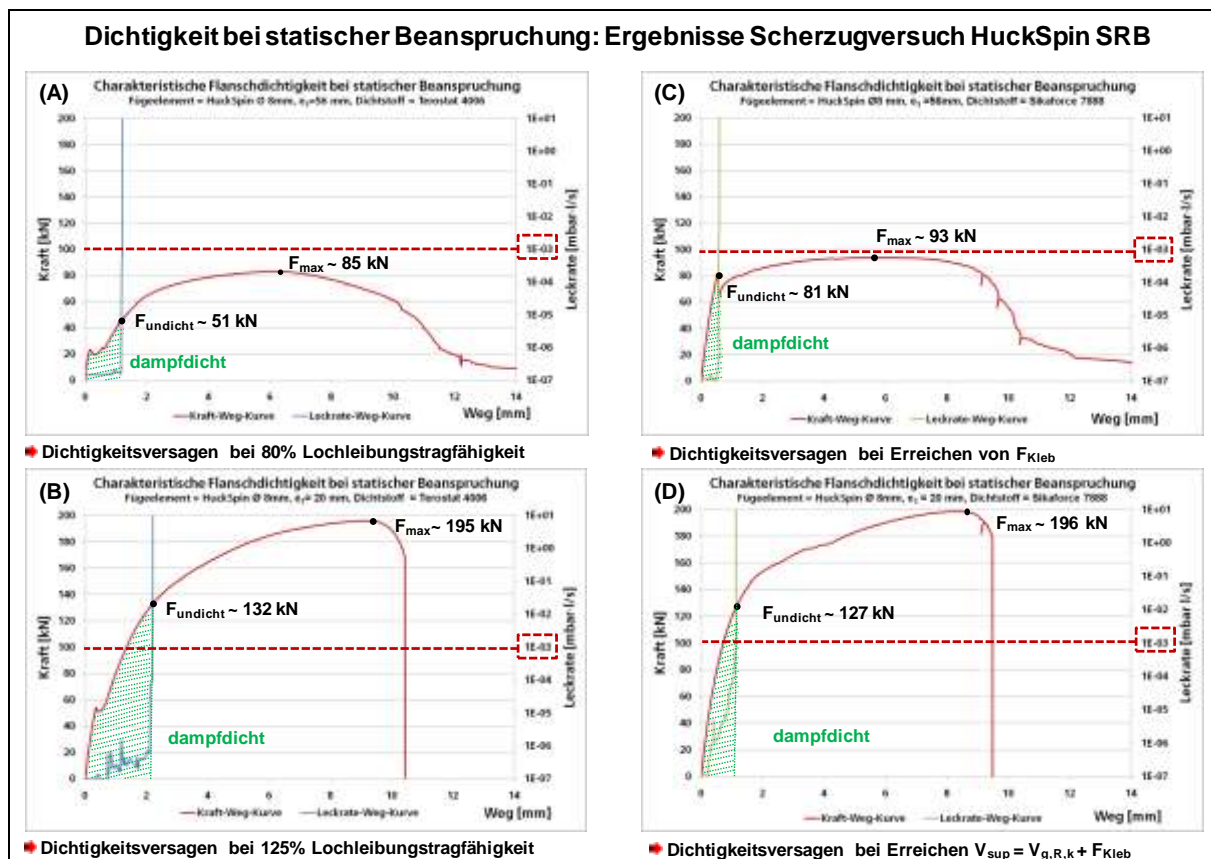


Abbildung 23: Dichtigkeitsmessung HuckSpin bei statischer Belastung

Aus Abbildung 23 A geht hervor, dass bei den Proben mit maximalem Verbinderabstand und *Terostat 4006* beim Erreichen von 80% der Lochleibungstragfähigkeit das Dichtigkeitsversagen eintritt. Mit Verringerung des Verbinderabstands auf das zulässige Minimum kann die Dichtigkeit der Probe bis auf 125% der Lochleibungstragfähigkeit (Abbildung 23 B) gesteigert werden. Mit Sicherheit darf angenommen werden, dass die Überschreitung der Grenzgleitkraft (zulässige Kraft für gleitfeste Verbindungen) nicht gleichbedeutend mit dem Dichtigkeitsversagen ist, was sich auf die gute Spaltüberbrückbarkeit zurückführen lässt. Die Ergebnisse bei Verwendung des hochfesten Klebstoffs *SikaForce 7888* fallen konstanter aus. Die Diagramme zeigen einen sprunghaften Anstieg der Leckrate jeweils beim Versagen der Klebung. Für die Verbindung mit maximalem Verbinderabstand gilt: $F_{\text{Kleb}} \sim F_{\text{undicht}}$ (siehe Abbildung 23 C). Beim minimalen Verbinderabstand ist die überlagerte Tragwirkung, die aus der Klebfestigkeit und der Grenzgleitkraft resultiert, für das Dichtigkeitsversagen ausschlaggebend: $V_{\text{sup}} \sim F_{\text{undicht}}$ (Abbildung 23 D). Aufgrund der Delamination der EP-Beschichtung wird die Verbindung schlagartig undicht. Das Versagen ist

im Gegensatz zu den Proben mit *Terostat 4006* dadurch berechenbar.

Vorgespannte Hybridverbindung

Mit dem Einsatz kombinierter Fügeverfahren wird generell das Ziel verfolgt, Nachteile und Vorteile des jeweiligen Einzelverfahrens in sinnvoller Weise auszugleichen, um auf diese Weise optimierte Verbindungseigenschaften zu erhalten [13]. Bei der Schließringbolzenverbindung in Verfahrenskombination mit Kleben geschieht dies im besonderen Maße. Die vorgespannte Hybridverbindung ist namentlich auf die Eignung der Schließringbolzen zum Einbringen einer planmäßigen Vorspannkraft in die Fügeverbindung bei zusätzlichem Klebstoffeinsatz zurückzuführen.

Voraussetzungen

Bei den hybridgefühten Mehrelementproben nach Abschnitt 3.3.2 konnten unter Einhaltung gewisser Loch- und Randabstände (vgl. Abbildung 16, Serie SZ_e20_St_EP_HS_DS2) Zuwächse von 116 % bei der Gleitlast bzw. 61 % bei der Klebfestigkeit erzielt werden. Bis zum Erreichen dieser Grenzlasten konnte ein gemeinsames Tragverhalten konstatiert werden. Als Begründung hierfür sind der schlagartige Abfall der Flanschdichtigkeit und das Gleiten innerhalb der Verbindung beim Überschreiten dieser Grenzlasten zu nennen.

Das Zusammenwirken verschiedener Fügeverfahren ist auch im Stahlbau bekannt, allerdings bei Kombination von gleitfest vorgespannten Passverbindungen mit HV-Schrauben und Schweißnähten. Grundsätzlich dürfen nur Fügeverbindungen kombiniert werden, die ein vergleichbares Last-Verformungsverhalten aufweisen [15]. Gemäß DIN 18800-1, Element 836 [2] darf bei gleitfest vorgespannten Passverbindungen und Schweißnähten eine gemeinsame Kraftübertragung angenommen werden, die Grenzschnittgrößen ergeben sich in diesem Fall durch Addition der Grenzschnittgrößen der einzelnen Fügeverbindungen.

Ein gleichartiges Last-Verformungs-Verhalten darf n. M. d. Verf. prinzipiell auch bei Klebungen und gleitfest vorgespannten Verbindungen (GV) angenommen (siehe Abbildung 24).

In der Dissertation zum mechanischen Verhalten klebgeschrumpfter und geklebter Welle-Nabe-Verbindungen (WNV) von Grunau [16] wurde bereits erkannt, dass mit klebgeschrumpften Verbindungen erhebliche höhere Lasten als bei geklebten Verbindungen übertragen werden können. Hierin wird eine Erklärung für die hohe Festigkeit der WNV angegeben. Als Hauptursache muss der quasi-hydrostatische Spannungszustand, der in der Klebschicht klebgeschrumpfter WNV herrscht, angesehen werden. Hydrostatische Druckspannung bewirkt im Allgemeinen bei Kunststoffen eine Steigerung der Bruchfestigkeit [...].

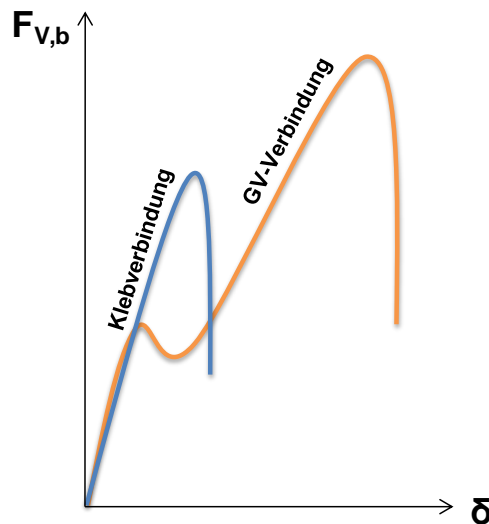


Abbildung 24: Gegenüberstellung des Last-Verformungs-Verhaltens von Klebung und GV-Verbindung

Steigerung der Tragfähigkeit

In Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden weiterführende experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Vorspannkraft auf die Tragverhaltenseigenschaften durchgeführt. Hierzu wurden Prüfkörper (einschnittige Enelementproben aus Stahlwerkstoff S355, Einzelblechdicke $t = 3$ mm, nachträglich mit Epoxidharz beschichtet) mit dem 2-komponentigen Polyurethanklebstoff (*Sikaforce 7888*) in Kombination mit nicht planmäßig vorgespannten und planmäßig vorgespannten Verbindungselementen im quasistatischen Scherzugversuch geprüft. Als nicht planmäßig vorgespanntes Verbindungselement wird hier die M8 Standardschraube (Fk 8.8) verwendet, die mit einem Anziehdrehmoment von 5 Nm angezogen wird und eine Vorspannkraft von etwa 2,9 kN in die Verbindung einbringt. Als planmäßig vorgespanntes Verbindungselement kommt der Huck-SRB M8 (Fk 8.8) mit einer Vorspannkraft von 19 kN zum Einsatz.

Zuerst wurde in Versuchen an einschnittig überlappten Scherzugproben nach DVS-Merkblatt [6] das Last-Verformungsverhalten elementar gefügter Verbindungen (Schrauben-, Schließringbolzen und Klebverbindung) ermittelt. Die rechnerische Auswertung der Klebung ergibt eine max. übertragbare Schubspannung von $12,94 \text{ N/mm}^2$. Die mittlere Gleitlast bei der Schraubenverbindung beträgt 1.207 N, die Schließringbolzenverbindung gleitet bei 7.030 N, was erwartungsgemäß auf das höhere Vorspannkraftniveau zurückzuführen ist (siehe Abbildung 25). Oberhalb der Gleitlasten gelten die Schrauben- und die Schließringbolzenverbindung als versagt. Die nachfolgenden Versuche wurden mit hybridgefügtten Probekörpern (Schließringbolzen-Kleben und Schrauben-Kleben) durchgeführt. In Abbildung 25 sind die Kraft-Feinweg-Verläufe der elementaren Fügeverbindungen und Hybridverbindungen dargestellt. Zur Charakterisierung des Last-Verformungsverhaltens wurde der Kraftbereich bis zum ersten Abfall heraus gezoomt. Hierin lässt sich ein gleichartiges Last-Verformungsverhalten erkennen. Weiterhin wird deutlich, dass die nicht planmäßig vorgespannte Verbindung (Schrauben-Kleben) geringere Prüfkräfte erträgt als die Klebung. Eine Erhöhung der Tragfähigkeit bei der Kombination beider Fügeverfahren kann nicht festgestellt werden. Ganz anders verhält sich die planmäßig vorgespannte

Fügeverbindung in Verfahrenskombination mit Kleben. Die Gleitlast infolge des Klebstoffeinsatzes wächst von 7.029 N auf 18.616 N (+164 %) bzw. lässt sich die Klebfestigkeit auf 18,12 N/mm² (+33 %) steigern. Eine Überlagerung (Superposition) der Einzeltragfähigkeiten kann konstatiert werden (Abbildung 25).

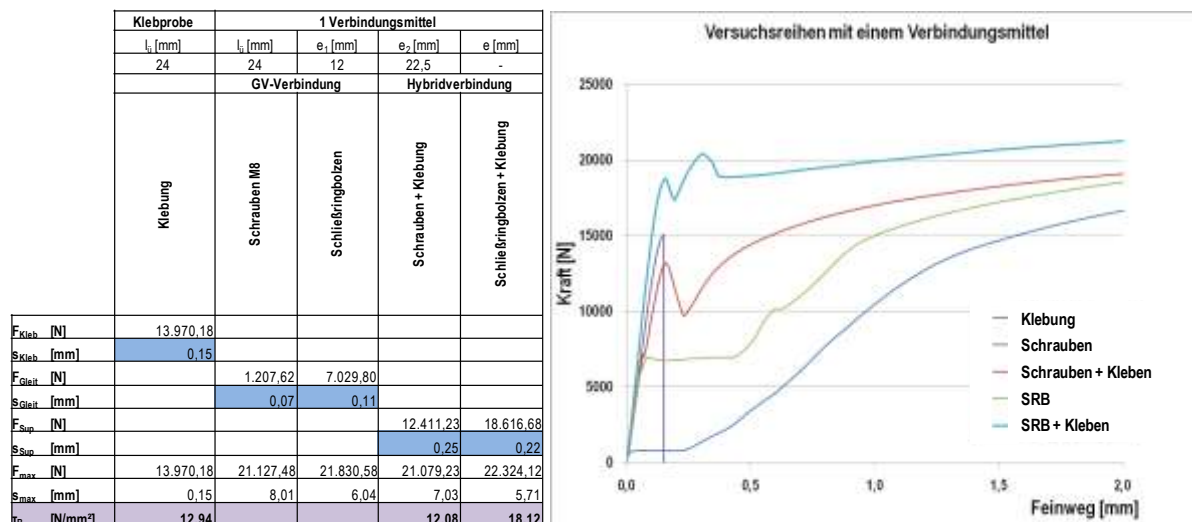


Abbildung 25: Kraft-Feinweg-Verlauf und Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse von Klebung, Schrauben- und SRB-Verbindung und Hybridfügeverbindung (einschnittig ungestützte Probenform) [1]

Beim Einsatz von Klebstoff in der Schraubverbindung nimmt die Klebfestigkeit im Fügebereich ab ($\tau_B = 12,08 \text{ N/mm}^2$), was auf den fehlenden Klebstoff im Bereich des Schraubenquerschnitts zurück zu führen ist (vgl. Abbildung 25).

Weiterhin wurden Mehrelementproben untersucht. Die Abbildung 26 zeigt die Versuchsergebnisse für die einschnittige gestützte Verbindung. Dies wurde durch die Anordnung zweier Fügeelemente in Krafrichtung hintereinander liegend erreicht.

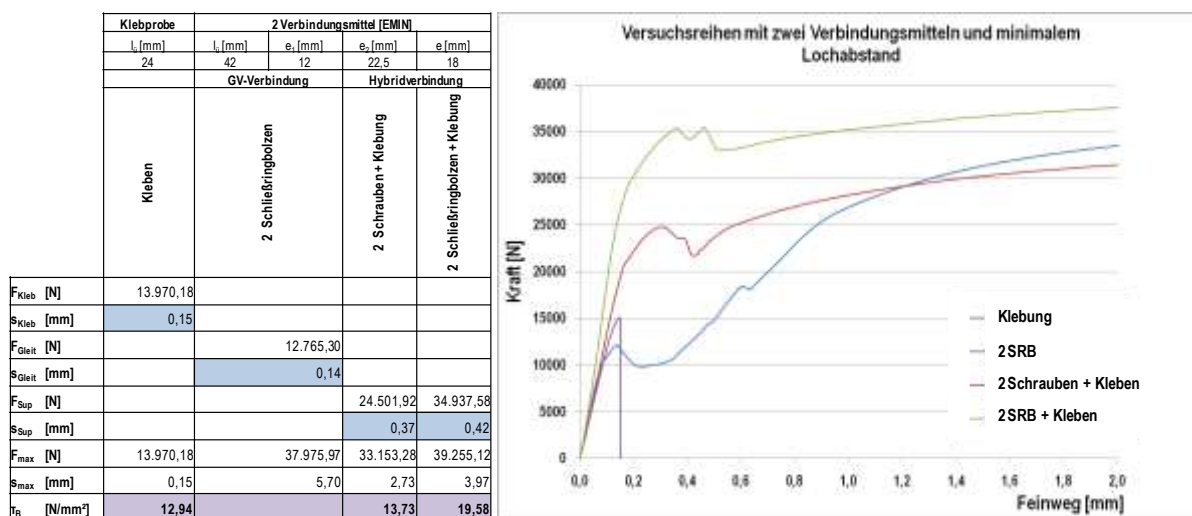


Abbildung 26: Kraft-Feinweg-Verlauf und Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse von Klebung, Schrauben- und SRB-Verbindung und Hybridfügeverbindung (einschnittig gestützte Probenform) [1]

Im Vergleich zur GV-Verbindung mit planmäßig vorgespannten SRB werden durch die Hybridverbindung auch hier weitaus höhere Traglasten erreicht. Im Fall der Hybridverbindung aus Klebung und Standardschraube ist zwar im Vergleich zur Eielementverbindung eine Steigerung der Tragfähigkeit erkennbar, diese wird jedoch lediglich durch die größere Überlappungslänge und somit größere Klebfläche erzeugt. Die Klebfestigkeit bleibt in etwa im Bereich der reinen Klebprobe. Daraus kann abgeleitet werden, dass die geringe Schraubenvorspannkraft keinerlei Wirkung im Sinne einer Superposition der Einzeltragfähigkeiten erzielt. Das Tragverhalten wird letztlich nur durch den eingesetzten Klebstoff bestimmt.

Ganz anders verhält sich die Hybridverbindung mit Schließringbolzen im Vergleich zur elementaren GV-Verbindung. Hier erhöht sich sowohl die Gleitlast auf 273% (die Hybridverbindung gleitet ab einer durchschnittlichen Belastung von 34,9 kN im Vergleich zum Gleiten der GV-Verbindung bei 12,8 kN) bzw. lässt sich bei der Auswertung über eine gemeinsame Scherspannung ein Wert von 19,58 N/mm² erreichen (+143% gegenüber der elementaren Klebung).

Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, dass durch den Einsatz der betrachteten elementaren Fügeverfahren keine hinreichend dichte Verbindungen herstellbar sind. Abhilfe schafft hier die Verwendung von Dicht- oder Klebstoff im Fügespalt. Mit beiden Varianten ist eine den meisten Anwendungsfällen genügende Dichtigkeit realisierbar. Gleichzeitig aber nimmt die Verwendung von Kleb- oder Dichtstoff einen Einfluss auf das Tragverhalten der Verbindung. Während beim Einsatz von *Terostat 4006* die Grenzgleitkraft um bis zu 15% geringer ausfällt, jedoch die Dichtigkeit auch über das Gleiten der Verbindung hinaus gewährt wird, kann durch *SikaForce 7888* ein Gleiten der Verbindung von vorneherein gezielt verhindert und dadurch die Grenztragfähigkeit beachtlich erhöht werden. Erst mit dem Versagen der Klebung verlieren diese Verbindungen ihre Dichtigkeit.

Vorteile für den Einsatz von Dichtstoff (*Terostat 4006*) in mechanisch gefügten Hybridverbindungen bieten folglich Einsatzbereiche, in denen die Dichtigkeit gewährleistet und dabei, z.B. aufgrund von Fertigungstoleranzen, große Spalte überbrückt werden müssen. Eine Erhöhung der Tragfähigkeit ist jedoch nicht erforderlich.

Als weitere wesentliche Erkenntnis der Forschungstätigkeit kann die Steigerung der Tragfähigkeit von mechanischen gefügten Verbindungen bei der Kombination mit hochfestem Strukturklebstoff (*SikaForce 7888*) genannt werden. Voraussetzung ist jedoch, dass das verwendete Fügeelement eine ausreichende Vorspannkraft in die Verbindung einbringt sowie definierte Rand- und Lochabstände eingehalten werden.

Das Versagensverhalten bzw. die prognostizierten Tragfähigkeiten nach DIN 18800-1 lassen sich für elementar gefügte Verbindungen beim Einsetzen der realen Werkstoffkennwerte R_{ch} bzw. R_m hinreichend genau berechnen und können im Experiment nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Tragfähigkeit und Dichtigkeit haben gezeigt, dass die Eigenschaften von mechanisch gefügten Verbindungen von vielen Parametern beeinflusst werden. Diese tragen folglich entscheidend zur Qualität der Verbindung bei. Hinsichtlich der elementaren Fügeverfahren müssen u.a. die Parameter Fügeteilmaterial, Verbindertyp sowie Rand- und Lochabstände berücksichtigt werden. Bei Hybridverbindungen kommen weitere

relevante Fertigungsparameter hinzu. Neben der Auswahl eines geeigneten Kleb- oder Dichtstoffs müssen außerdem die jeweiligen Verarbeitungsparameter sichergestellt werden. Das Ergebnis der Fügeaufgabe hängt neben den zuvor genannten Einflussgrößen maßgeblich von der Klebflächenvorbereitung, dem Fügezeitpunkt (Topfzeit), den Umweltbedingungen (Luftfeuchte, Temperatur) und dem Zusammenspiel mit dem gewählten Fügeelement (Setzgeschwindigkeit, Vorspannkraft) ab. Vor einer Verallgemeinerung der Ergebnisse ohne weitere Untersuchungen ist daher an dieser Stelle abzuraten.

Literatur

- [1] GLIENKE, R.; BLUNK, Chr.; HENKEL, K.-M.; WANNER, M.-C.; LIEBRECHT, F.; DENKERT, Chr.; FÜSSEL, U.: *Flanschtragverhalten von Blindniet- und Schließringbolzenverbindungen bei Dichtstoffeinsatz; Abschlussbericht zum EFB-Forschungsvorhaben AiF 281 ZBR*; Universität Rostock, 2011
- [2] DIN 18800-1: *Stahlbauten - Bemessung und Konstruktion*; Beuth-Verlag GmbH, Berlin 2008
- [3] VDI 2230: *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen*, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 2003
- [4] DELIN, M; HENKEL, K.-H; WANNER, M.-C.; LIEBRECHT, F.; SIX, S.; FÜSSEL, U.: *Dichtsysteme für mechanische Fügeelemente mit Vorlochoperation; Abschlussbericht zum EFB-Forschungsvorhaben AiF 13880 BR*; Universität Rostock, 2006
- [5] DIN 25201-1: *Konstruktionsrichtlinie für Schienenfahrzeuge und deren Komponenten - Teil 1: Einteilung, Kategorie von Schraubenverbindungen*; Beuth-Verlag GmbH, Berlin 2006
- [6] DVS/EFB 3480-1: *Prüfung von Verbindungseigenschaften - Prüfung der Eigenschaften mechanisch und kombiniert mittels Kleben gefertigter Verbindungen*; Beuth-Verlag GmbH, Berlin 2007
- [7] METSCHKOW, B.; DEHLKE, K.: *Gestaltung und Dimensionierung von Nietverbindungen; Abschlussbericht zum EFB-Forschungsvorhaben AiF 391D*; Universität Rostock, 1994
- [8] DIN EN 923: *Klebstoffe - Benennung und Definition*; Beuth-Verlag GmbH; Berlin 2008
- [9] FRITZ, A. H.; SCHULZE, G.: *Fertigungstechnik*; Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2006
- [10] DIN EN 1465: *Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappklebungen*; Beuth-Verlag GmbH; Berlin 2009
- [11] DIN EN 1779: *Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung - Kriterien zur Auswahl von Prüfmethode und Verfahren*; Beuth-Verlag GmbH; Berlin 1999
- [12] UMRATH, W.: *Grundlagen der Vakuumtechnik*; Auflage 07/98; Leybold Vakuum; Köln 1997
- [13] HABENICHT, G.: *Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen*; Springer Verlag, Heidelberg Berlin; 2006

- [14] DIN EN 1330-8: *Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Begriffe für die Dichtheitsprüfung*; Beuth-Verlag GmbH; Berlin 1998
- [15] KINDMANN, R.; STRACKE, M.: *Verbindungen im Stahl- und Verbundbau*; Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2009
- [16] GRUNAU, A.: *Mechanisches Verhalten klebgeschrumpfter und geklebter Wellen-Naben-Verbindungen*; Dissertation Universität Paderborn; Februar 1987