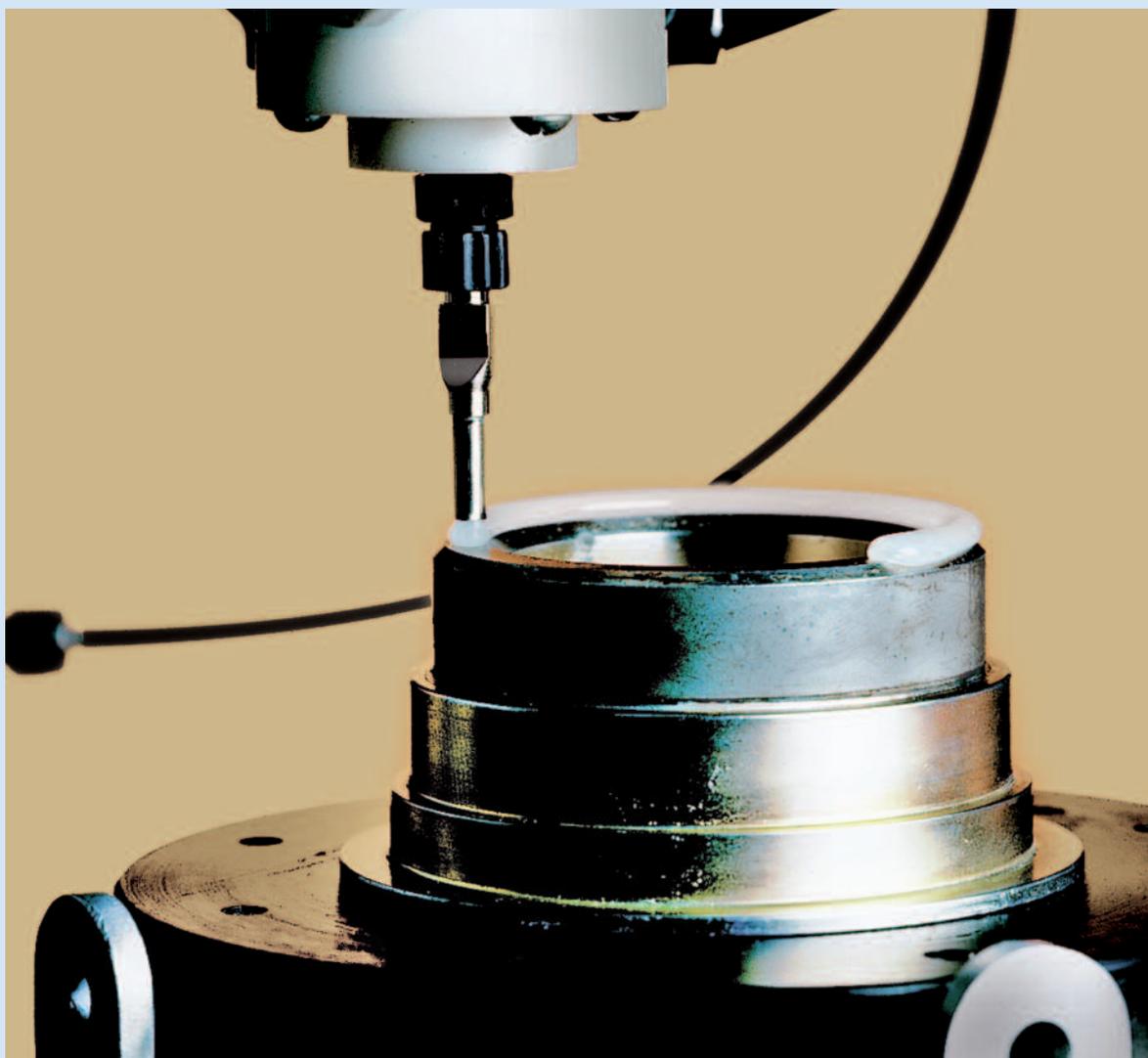


Merkblatt 382

Kleben von Stahl und Edelstahl Rostfrei



Stahl-Informations-Zentrum
Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

Stahl-Informations-Zentrum

Das Stahl-Informations-Zentrum ist eine Gemeinschaftsorganisation Stahl erzeugender und verarbeitender Unternehmen. Markt- und anwendungsorientiert werden firmenneutrale Informationen über Verarbeitung und Einsatz des Werkstoffs Stahl bereitgestellt.

Verschiedene **Schriftenreihen** bieten ein breites Spektrum praxisnaher Hinweise für Konstrukteure, Entwickler, Planer und Verarbeiter von Stahl. Sie finden auch Anwendung in Ausbildung und Lehre.

Vortragsveranstaltungen schaffen ein Forum für Erfahrungsberichte aus der Praxis.

Messen und Ausstellungen dienen der Präsentation neuer Werkstoffentwicklungen und innovativer, zukunftsweisender Stahlanwendungen.

Als **individueller Service** werden auch Kontakte zu Instituten, Fachverbänden sowie Spezialisten aus Forschung und Industrie vermittelt.

Die **Pressearbeit** richtet sich an Fach-, Tages- und Wirtschaftsmedien und informiert kontinuierlich über neue Werkstoffentwicklungen und -anwendungen.

Das Stahl-Informations-Zentrum zeichnet besonders innovative Anwendungen mit dem **Stahl-Innovationspreis** (www.stahl-innovationspreis.de) aus. Er ist einer der bedeutendsten Wettbewerbe seiner Art und wird alle drei Jahre ausgelobt.

Die **Internet-Präsentation** (www.stahl-info.de) informiert über aktuelle Themen und Veranstaltungen und bietet einen Überblick über die Veröffentlichungen des Stahl-Informations-Zentrums. Publikationen können hier bestellt oder als PDF-Datei heruntergeladen werden. Anmeldungen zu Veranstaltungen sind ebenfalls online möglich.

Der **Newsletter** informiert Abonnenten per E-Mail über Neuerscheinungen, Veranstaltungen und Wissenswertes.

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

Die Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER) ist eine Gemeinschaftsorganisation von Unternehmen und Institutionen aus den Bereichen

- Edelstahlherstellung,
- Edelstahlhandel und Anarbeitung,
- Edelstahlverarbeitung,
- Oberflächenveredelung,
- Legierungsmittelindustrie,
- Marktforschung und Verlage für nichtrostende Stähle.

Die Aufgaben der ISER umfassen die firmenneutrale Information über Eigenschaften und Anwendungen von Edelstahl Rostfrei. Schwerpunkte der Aktivitäten sind

- praxisbezogene, zielgruppenorientierte Publikationen,
- Online-Informationsplattform unter www.edelstahl-rostfrei.de,
- Pressearbeit für Fach- und Publikumsmedien,
- Messebeteiligungen,
- Durchführung von Schulungsveranstaltungen,
- Errichtung von Kompetenzzentren „Edelstahl-Rostfrei-Verarbeitung“,
- Informationen über Bezugsmöglichkeiten von Produkten aus Edelstahl Rostfrei,
- individuelle Bearbeitung technischer Anfragen.

Ein aktuelles Schriftenverzeichnis wird auf Anforderung gerne übersandt - oder ist einsehbar unter www.edelstahl-rostfrei.de/Publikationen.

Impressum

Merkblatt 382
„Kleben von Stahl und Edelstahl Rostfrei“
Ausgabe 2012
ISSN 0175-2006

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Paul L. Geiß
Technische Universität
Kaiserslautern
Fachgebiet Füge-technik
Arbeitsgruppe Werkstoff- und
Oberflächentechnik
Kapitel 1, 2, 5; Abschnitte 3.1, 3.2,
3.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.5

Dr.-Ing. Christian Fritzsche
Anwendungstechnik
Füge-technik
Salzgitter Mannesmann Forschung
GmbH
Abschnitt 7.2

Dipl.-Ing. Felix Kleiner
Adhesive Engineering
Henkel AG & Co. KGaA,
Standort München
Abschnitte 9.1, 9.2

Dipl.-Ing. Manfred Peschka
Klebtechnik und Oberflächen
Fraunhofer-Institut für Fertigungs-
technik und Angewandte Material-
forschung (IFAM), Bremen
Kapitel 6; Abschnitte 3.5, 8.3

Dr.-Ing. Markus Rauscher
Werkstofftechnologie
AUDI AG, Ingolstadt
Abschnitt 9.3.1

Dr.-Ing. Hans Christian Schmale
Karosseriefertigung Rohbau
Daimler AG, Bremen
Abschnitte 4.3, 4.4, 7.1, 7.3, 7.4

Dr.-Ing. Daniel Vogt
Corporate Technical Service
Sika Services AG,
Widen (Schweiz) /

Inhalt

	Seite		Seite
Dipl.-Phys. Artur Zanotti Anwendungstechnik Kleb- und Dichtstoffe Sika Deutschland GmbH, Bad Urach Abschnitte 8.1, 8.2	1	Vorbemerkungen 4 Einführung 4 Grundlagen der Klebtechnik 5	6.1.4 Fügen und Fixieren 23 6.1.5 Aushärten der Klebschicht 24 6.2 Qualitätssicherung 24
Dipl.-Betriebswirt (BA) Christian Weber Marketing Kleb- und Dichtstoffe Bau Sika Deutschland GmbH, Bad Urach / Dipl.-Ing. (FH) Frank Boldt Anwendungstechnik Kleb- und Dichtstoffe Bau Sika Deutschland GmbH, Bad Urach Abschnitte 9.4.1, 9.4.2	3 3.1 3.1.1 3.1.2 3.1.3 3.2 3.3 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.4 3.5	Klebstoffe 6 Physikalisch aushärtende Klebstoffe 7 Kontaktklebstoffe 7 Plastisole 7 Schmelzklebstoffe 7 Permanent klebrige nicht aushärtende Kleb- stoffe (Haftklebstoffe) 10 Chemisch reagierende Klebstoffe 10 Zweikomponenten- klebstoffe 11 Einkomponenten- klebstoffe 11 Mikroverkapselte Klebstoffe 12 Primer 12 Klebstoffauswahl 12	7 7.1 Allgemeiner Verfahrensablauf und Eigenschaften 25 7.2 Punktschweiß- klebverbindungen 26 7.3 Nietklebverbindungen ... 28 7.4 Clinch- klebverbindungen 29
Prof. Dr.-Ing. Michael Wibbeke Hochschule Hamm-Lippstadt Lehrgebiet Fertigungstechnologie Mechatronik Abschnitt 9.3.2	4	Eigenschaften und Prüfung von Klebverbindungen 13 Festigkeit 13 Zeitstandverhalten 14 Schwingfestigkeit 14 Schlagfestigkeit 16 Beständigkeit 17 Temperatur 18 Feuchtigkeit 19	8 Kleben von nicht- rostenden Stählen 30 8.1 Spezifische Vorteile beim Kleben nicht- rostender Stähle 30 8.2 Beständigkeit strukturell geklebter Verbunde aus nichtrostenden Stählen 31 8.3 Oberflächenbehandlung nichtrostender Stähle 31
Herausgeber/Redaktion: Stahl-Informations-Zentrum Postfach 10 48 42 40039 Düsseldorf Informationsstelle Edelstahl Rostfrei Postfach 10 22 05 40013 Düsseldorf	4	Gestaltung und Dimensionierung von Klebverbindungen 19 Gestaltung 19 Dimensionierung 20	9 Anwendungen der Klebtechnik 32 9.1 Schraubensicherungen .. 32 9.2 Welle-Nabe- Verbindungen 34 9.3 Kleben im automobilen Karosseriebau 36 9.3.1 Karosseriefertigung und Montage 36 9.3.2 Reparaturkonzepte für die Karosserie- Instandsetzung 38 9.4 Kleben von Bau- elementen aus Stahl 38 9.4.1 Structural Glazing 40 9.4.2 Dachdeckungen und Fassadenbekleidungen ... 41
Die dieser Veröffentlichung zu- grunde liegenden Informationen wurden mit größter Sorgfalt re- cherchiert und redaktionell be- arbeitet. Eine Haftung ist jedoch ausgeschlossen.	5	Klebertechnische Fertigung 20 Prozessgestaltung 20 Vorbereiten der Fügeteile 22 Vorbereiten der Klebstoffe: Lagern, Dosieren, Mischen 23 Auftragen der Klebstoffe 23	10 Literatur 42 10.1 Zitierte Literatur 42 10.2 Ergänzende Literatur 43 10.3 Bildnachweis 43
Ein Nachdruck - auch auszugs- weise - ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und bei deutlicher Quellenangabe gestattet.	6	11 Normen und Regelwerke 44	

Vorbemerkungen

Das Kleben wird seit vielen Jahren in weiten Bereichen der Technik erfolgreich angewendet, um Stahl und andere hochbelastbare Werkstoffe zu verbinden. Geklebte Verbindungen sind zuverlässig, erreichen eine hohe Lebensdauer und besitzen spezifische Eigenschaften, die sich mit anderen Verbindungstechniken nicht realisieren lassen.

Voraussetzung dafür ist, dass die Klebungen werkstoffgerecht gestaltet und gefertigt werden. Dafür benötigen Konstrukteure und Fertigungstechniker Kenntnisse, die über das in der üblichen Ausbildung vermittelte werkstoffkundliche Wissen hinausreichen. Bisher wird die Klebtechnik nur in einigen speziellen Ausbildungsgängen ihrer Bedeutung entsprechend behandelt.

Analog der schweißtechnischen Weiterbildung werden die europaweit harmonisierten Kurse Klebpraktiker (DVS®/EWF-European Adhesive Bonder - EAB) nach Richtlinie 3305 des Deutschen Verbands für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS), Klebfachkraft (DVS®/EWF-European Adhesive Specialist - EAS) nach Richtlinie DVS®/EWF 3301 und Klebfachingenieur (DVS®/EWF-European Adhesive Engineer - EAE) nach Richtlinie DVS®/EWF 3309 von den akkreditierten Bildungseinrichtungen am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen oder dem Technologie Centrum TC Kleben in Übach-Palenberg angeboten.

Die Weiterentwicklung der Klebtechnik durch Forschungsaktivitäten wird durch den Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik (GAK) gefördert, einen Zusammenschluss der Forschungsvereinigung des Deutschen Verbands für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS), der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA), der DECHEMA e.V.

(Fachgruppe Klebtechnik) und des Internationalen Vereins für Technische Holzfragen (IVTH). Das Anliegen besteht neben der Forschungsförderung u.a. darin, die Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Klebtechnik schneller in die industrielle und handwerkliche Praxis umzusetzen.

Ziel dieses Merkblatts ist es, über die Leistungsfähigkeit der Klebtechnik beim Verbinden von Stahl mit Stahl und mit anderen Werkstoffen sowie über die fertigungstechnischen Voraussetzungen zu informieren. Nach kurzer Darstellung der wissenschaftlichen Grundlagen der Klebtechnik werden die heute verfügbaren Klebstoffe, die konstruktiven und fertigungstechnischen Voraussetzungen sowie die notwendigen Maßnahmen zur Qualitätssicherung beschrieben. Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Bereichen der Technik veranschaulichen die vielfältigen Möglichkeiten, geklebte Verbindungen sinnvoll und wirtschaftlich einzusetzen.

Die Besonderheiten beim Kleben **nichtrostender Stähle**, die ausgehend vom Konsumgüterbereich vielfach auch unter dem Begriff „Edelstahl Rostfrei“ zusammengefasst werden, sind in Kapitel 8 beschrieben.

1 Einführung

Das Kleben ist für hochbelastbare Werkstoffe das mit Abstand flexibelste Fügeverfahren. Damit lassen sich alle technisch nutzbaren Werkstoffe flächig und stoffschlüssig miteinander verbinden.

Die Klebtechnik bietet dem Konstrukteur gestalterische Freiheit und lässt sich in allen industriellen Bereichen in vorhandene Fertigungsabläufe der Einzel- oder Serienproduktion integrieren.

Die Grundlage für die strukturelle Metallklebtechnik wurde mit der Entwicklung synthetischer Klebstoffe zu Beginn des vorigen Jahrhunderts geschaffen. Wichtige

Vorteile	Zu beachten
<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Wärmebeeinflussung der Fügeteile • Gleichmäßige Spannungsverteilung • Flächige Verbindungen möglich • Geeignet zum Fügen unterschiedlicher Werkstoffe, Vermeidung von Kontaktkorrosion • Verbinden sehr dünner Fügeteile (z. B. Folien) möglich • Gas- und flüssigkeitsdichte Verbindung, keine Spaltkorrosion • Toleranzausgleich durch Spaltüberbrückung • Gute Dämpfungseigenschaften • Hohe dynamische Festigkeit • Verbesserte Crash- und Steifigkeitseigenschaften im Fahrzeugbau 	<ul style="list-style-type: none"> • Begrenzte Warmfestigkeit • Reinigung und Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile vielfach erforderlich • Zerstörungsfreie Qualitätsprüfung nur bedingt möglich • Klebgerechte Gestaltung der Fügeteile erforderlich

Tabelle 1: Eigenschaften von Klebverbindungen

Meilensteine waren die Einführung der Phenolharzklebstoffe gegen Ende der 1920er Jahre sowie die Entwicklung der Epoxidharze und Polyurethane in den 1940er Jahren.

Gegenüber Klebstoffen auf Basis natürlicher Ausgangsstoffe besitzen synthetische Klebstoffe eine deutlich größere Beständigkeit und können zudem eine haltbare adhäsive Bindung mit den Metalloberflächen eingehen. Hinsichtlich Festigkeits- und Verformungseigenschaften ist es heute möglich, definierte Forderungen, die sich aus der Konfiguration der Klebverbindung ergeben, durch einen gezielten chemischen Aufbau präzise zu erfüllen.

Das Kleben erweitert durch die Vielzahl seiner vorteilhaften Eigenschaften (**Tabelle 1**) zunehmend das Spektrum der bislang in der Stahl verarbeitenden Industrie üblichen Verbindungstechniken. Für den Leichtbau von Automobilkarosserien mit Stahl bieten sich aus der Sicht der Klebtechnik außerordentlich interessante Aspekte. Das Gleiche gilt für die flächige Verbindung von Stahl mit anderen Werkstoffen, beispielsweise zur Sanierung von Betonbrücken durch aufgeklebte Stahlaschen.

2 Grundlagen der Klebtechnik

Unter Kleben versteht man das flächige Verbinden gleicher oder verschiedenartiger Werkstoffe unter Verwendung einer meist artfremden Substanz, die an den Oberflächen der zu verbindenden Teile haftet und die Kräfte von einem Füge teil auf das andere überträgt. Kleben zählt zu den stoffschlüssigen und im klassischen Sinne nicht lösbaren Verbindungstechniken.

In den letzten Jahren sind jedoch Entwicklungen zu einer gezielten Lösbarkeit geklebter Verbindungen unter bestimmten Be-

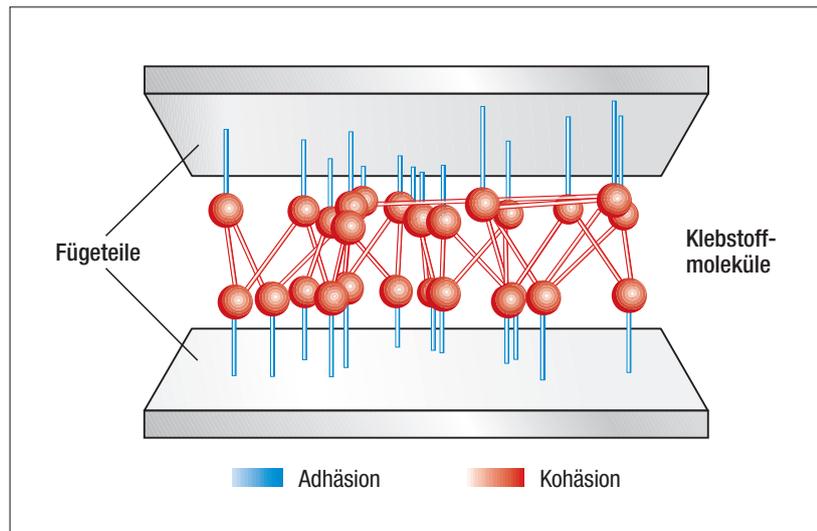


Abb. 1: Schematische Darstellung des stoffschlüssigen Zusammenhalts einer Klebverbindung

dingungen zu beobachten. Beispiele sind das Kleben als Montagehilfe ohne spätere Funktion oder auch der Aspekt des stofftrennenden Recyclings, der zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Die Festigkeit einer Klebverbindung wird neben der Adhäsion zwischen Klebstoff und Füge teil auch von der Kohäsion des Klebstoffs bestimmt. Das Erzielen ausreichender Adhäsionskräfte erfordert die vollständige Benetzung der Füge teile. Hierzu muss der Klebstoff beim Auftrag oder in einer Phase des Fügeprozesses einen flüssigen bzw. niedrigviskosen Zustand annehmen, um sich der Kontur der Füge teiloberflächen bis in den Nanometerbereich anzupassen. Die Kohäsion wird durch den inneren Zusammenhalt des Klebstoffs nach der Aushärtung charakterisiert (**Abb. 1**). Als Aushärtung wird in der Klebtechnik allgemein der Übergang vom flüssigen in den festen Zustand bezeichnet.

Hochmolekulare Polymere können durch Lösung in organischem Lösungsmittel (Lösungsmittelklebstoffe) oder durch Dispergierung in Wasser (Dispersionsklebstoffe) in einen niedrigviskosen Zustand überführt werden. Die Aushärtung

solcher Klebstoffsysteme erfolgt durch einen Trocknungsvorgang, der bei nichtporösen Füge teilen wie Stahl vor dem Fügen erfolgen muss. Bei Schmelzklebstoffen wird das hochmolekulare Polymer durch Wärmezufuhr kurzzeitig in den flüssigen Zustand überführt, um eine ausreichende Benetzung mit dem Füge teil zu erzielen. Bei der Härtung verklammern sich die beweglichen Makromoleküle des Klebstoffs, wodurch letztlich die Kohäsion entsteht.

Ein grundsätzlich anderer Weg besteht darin, als Klebstoff niedrigmolekulare und damit niedrigviskose Stoffe zu verwenden, die erst in der Klebfuge durch chemische Reaktionen in ein festes, hochmolekulares Polymer überführt werden. Dieses ist dann später in der Regel nicht mehr löslich oder schmelzbar, da alle Moleküle durch chemische Bindungen vernetzt sind (chemisch reagierende oder Reaktionsklebstoffe).

Je nach Art der chemischen Reaktion, die zur Bildung von Makromolekülen und dem damit verbundenen Übergang von der flüssigen in die feste Phase führt, unterscheidet man zwischen Polymerisations-, Polyadditions- und Polykondensationsklebstoffen. Bei

der Polymerisation wird die von Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen ausgehende Aushärtungsreaktion durch geringe Mengen an Radikalen initiiert. Ein typischer Repräsentant dieser Klasse von Klebstoffen sind radikalisch aushärtende Acrylate. Werden zwei Klebstoffkomponenten mit unterschiedlichen chemisch reagierenden funktionalen Gruppen im stöchiometrischen Verhältnis zur Reaktion gebracht, spricht man von Polyadditionsklebstoffen. Dieser Aushärtemechanismus findet z. B. bei zweikomponentigen Polyurethan- oder Epoxidharzklebstoffen statt. Das charakteristische Merkmal von Polykondensationsklebstoffen ist das Abspalten einer niedermolekularen Verbindung während der Aushärtereaktion. Zu dieser Gruppe zählen beispielsweise kondensationsvernetzende Phenolharze. Bei den sog. Haftklebstoffen, die im physikalischen Sinne Festkörper sind, führt aufgrund ihrer hohen molekularen Beweglichkeit und Fließfähigkeit ein kurzzeitiges Zusammenpressen

der Fügebauteile zum Aufbau von Adhäsionskräften. Sie erfordern keinen nachgeschalteten Verfestigungsvorgang.

Entsprechend den vorstehenden Ausführungen können Klebstoffe nach der Verarbeitungsform und der Art ihrer Aushärtemechanismen eingeteilt werden (**Abb. 2**).

3 Klebstoffe

Zum Kleben von Stahl steht heute eine unüberschaubare Vielzahl unterschiedlicher Klebstoffe zur Verfügung, die sich sowohl hinsichtlich ihrer Verarbeitung als auch bezüglich ihrer Festigkeits- und Beständigkeitseigenschaften deutlich unterscheiden.

Die üblicherweise gemessenen Zugscherfestigkeiten und die bisweilen ermittelten Druckscherfestigkeiten liefern ebenso wie die Torsionsfestigkeiten, die in der Literatur bevorzugt angegeben werden, nur selten ausreichende

Informationen über die tatsächliche Brauchbarkeit des Klebsystems in Bezug auf einen bestimmten Anwendungsfall. Der Einfluss der zu erwartenden Einsatzbedingungen auf das Verhalten des geklebten Verbunds ist anhand von Bauteilversuchen zu verifizieren.

Werden beispielsweise für den Einsatz in Motoren Nocken aus Sinterwerkstoffen auf Stahl-Hohlwellen geklebt, ist eine Scherfestigkeit von mindestens 10 N/mm² wünschenswert. Wesentlich wichtiger ist allerdings die Kriechfestigkeit der Verbindung bei einer mehrere Stunden andauernden Temperaturbelastung von 80 °C und mehr, da bei einem abgestellten Motor immer davon ausgegangen werden muss, dass gerade ein Nocken ein Ventil betätigt und die Verbindung damit belastet bleibt. Wichtigstes Kriterium für die Klebung ist in diesem Fall die Positionsgenauigkeit der Nocken auf der Welle.

Ein anderes Beispiel ist der Karosseriebau. Hier genügen bei Falzklebungen und Stahl-Glas-Ver-

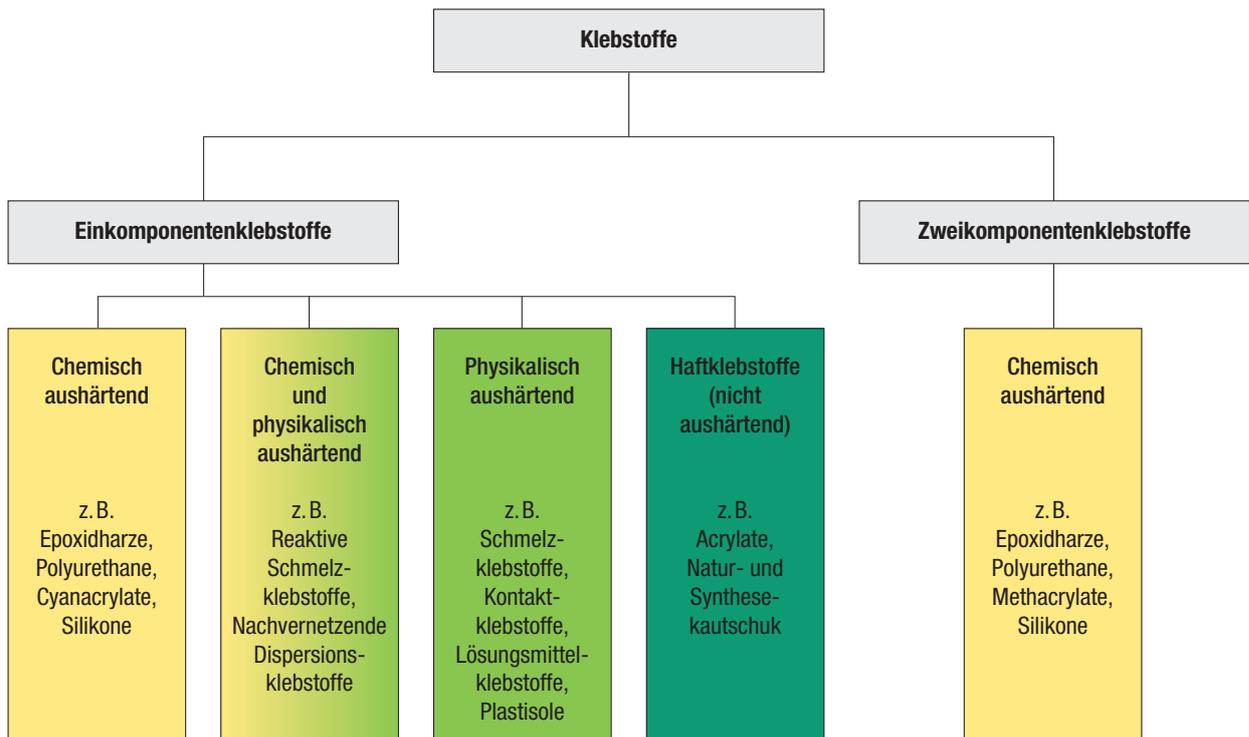


Abb. 2: Einteilung der Klebstoffe nach ihren Aushärtemechanismen

bindungen meist geringe Festigkeiten der Klebstoffe, da hier üblicherweise große Klebflächen verwendet werden. Für eine hohe dynamische Festigkeit und gute Dämpfungseigenschaften der Karosserie ist entscheidend, dass der Klebstoff eine gute plastische Verformbarkeit besitzt. Des Weiteren ist im Rohbau eine gute Haftung auch auf beölten Oberflächen wichtig.

Neben diesen mechanischen Aspekten sind bei der Auswahl von Klebstoffen die verarbeitungstechnischen Bedingungen von Bedeutung. Beim Umgang mit Klebstoffen sind die in den Datenblättern der Klebstoffhersteller spezifizierten Verarbeitungshinweise hinsichtlich Umwelt-, Arbeits- und Gesundheitsschutz zu beachten.

Die wichtigsten Klebstoffe sind in **Tabelle 2** zusammenfassend aufgeführt. Gegliedert nach ihren Aushärtemechanismen, sind diese in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.1 Physikalisch aushärtende Klebstoffe

Physikalisches Aushärten ist dadurch gekennzeichnet, dass der Übergang des Klebstoffs vom niedrigviskosen und damit benetzungsfähigen Zustand in einen Festkörper nur durch physikalische Vorgänge wie Verdampfung, Erstarrung aus Schmelzen oder Diffusionsvorgänge geschieht, ohne dass sich die polymeren Komponenten des Klebstoffs im chemischen Sinne verändern.

3.1.1 Kontaktklebstoffe

Kontaktklebstoffe bestehen aus polymeren Komponenten, die zwar bereits hochmolekular, aber chemisch nicht vernetzt sind. Zur Benetzung der Festkörperoberfläche werden sie durch Zugabe von Lösungsmitteln in einen niedrigviskosen Zustand gebracht.

Kontaktklebstoffe müssen auf beide Fügeteile aufgetragen werden. Der Erstarrungsprozess erfolgt durch Trocknen vor dem Zusammenfügen. Die Fügeteile werden zusammengepresst, nachdem sich die Klebeschichten nicht mehr klebrig anfühlen.

Während des Anpressens und noch danach läuft ein Diffusionsprozess zwischen den Klebstoffmolekülen beider Schichten ab, der die beiden Fügeteile fest miteinander verbindet. Ist mindestens ein Fügeteil porös, kann die Klebung vor oder auch nach einem nur teilweisen Trocknen des Lösungsmittels zusammengefügt werden, da das verbleibende Restlösungsmittel durch das poröse Fügeteil entweichen kann. In diesem Fall ist es auch möglich, nach dem Zusammenbringen der Fügeteile Nachpositionierungen vorzunehmen, weil der Klebstoff im halbtrockenen Zustand noch weitgehend die Eigenschaften einer Flüssigkeit besitzt.

Im getrockneten Zustand liegt die Klebschicht in der Regel im thermoplastischen, d.h. molekular nicht räumlich vernetzten Zustand vor. Sowohl die Wärmebeständigkeit als auch die Kriechfestigkeit der aufgetragenen Klebstoffschichten ist geringer als die der chemisch reagierenden Klebstoffe. Allerdings ist es möglich, diesen Polymersystemen langsam wirkende Härter zuzusetzen, die eine räumlich weitmaschige Vernetzung des Systems im Verlauf einiger Tage bewirken. Die Verarbeitungseigenschaften der Kontaktklebstoffe verändern sich dadurch nicht. Die Beständigkeit und auch die Festigkeit des Systems kann durch Zugabe von Härtern in erheblichem Maße gesteigert werden. Ein Nachteil dieser Kontaktklebstoffe besteht im oftmals sehr hohen Lösungsmittelgehalt (bis zu 80 % Gewichtsanteil), so dass bei ihrer Verarbeitung entsprechende Schutzmaßnahmen zu treffen sind.

3.1.2 Plastisole

Plastisole sind in Weichmachern dispergierte Polymere, meistens Polyvinylchlorid (PVC), die während der Erwärmung beim Aushärten die als Lösungsmittel wirkenden Weichmacher aufnehmen und sich damit in weiches PVC umwandeln. Die Klebschicht liegt im thermoplastischen Zustand vor, so dass Wärmebeständigkeit und Kriechfestigkeit geringer sind als bei chemisch reagierenden Systemen. Derartige Klebstoffe haben insbesondere im Karosseriebau weite Verbreitung gefunden.

3.1.3 Schmelzklebstoffe

Die Schmelzklebstoffe zählen ebenfalls zu den physikalisch aushärtenden Klebstoffen. Sie liegen im festen, hochmolekularen Zustand vor und enthalten keine Lösungsmittel. Diese Klebstoffe werden zunächst geschmolzen und dann aufgetragen oder als Pulver bzw. Folien zwischen die Fügeteile gebracht und dort unter Kontaktdruck und Wärme in den schmelzflüssigen Zustand überführt. Mit Schmelzklebstoffen realisierte Klebverbindungen können direkt nach der Abkühlung des Klebstoffs Kräfte übertragen.

Insbesondere beim Kleben von Metallen ist darauf zu achten, dass aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit der Fügeteile der Schmelzklebstoff im Grenzschichtbereich nicht zu schnell erstarrt, was die vollständige Benetzung der Oberflächen erschweren würde. Es empfiehlt sich daher, beim Einsatz derartiger Bindemittel die Fügeteile vorzuwärmen. Eine Steigerung der Festigkeit und auch der Langzeitbeständigkeit von Schmelzklebstoffen kann erreicht werden, wenn diesen durch Zusätze oder speziellen Aufbau der Polymere die Möglichkeit der Vernetzung auch nach Erreichen der Schmelztemperatur gegeben wird.

Verarbeitung und Art des Aushärtemechanismus		Typisches Basisharz (Beispiel)	Charakteristische Eigenschaften
Ein-komponentige chemisch aushärtende Klebstoffe	Wärme	Epoxidharz (1K)	Hohe Festigkeit, Anwendung auch auf leicht beölten Substraten möglich
	Wärme	Phenolharz (1K)	Aushärtung unter erhöhtem Druck
	Chemisch bei Kontakt mit Luftfeuchtigkeit	Polyurethan (1K)	Einfache Verarbeitung, langsames Aushärten, Reaktion feuchtigkeitsabhängig
		Silikonharz (1K)	Einfache Verarbeitung, langsames Aushärten, Reaktion feuchtigkeitsabhängig
	Chemisch unter Sauerstoffabschluss (anaerob) und bei Kontakt mit Metallen	Diacrylsäureester (1K)	Verarbeitung als Flüssigklebstoff oder als mikroverkapselte Vorbeschichtung
Physikalisch aushärtende Klebstoffe	Abkühlen aus der Schmelze	Ethylvinylacetat (EVA), Polyamid	Sehr schnelle Verarbeitung, lösungsmittelfrei
	Ablüften (Lösungsmittelklebstoffe)	Vinylacetat	Preisgünstig, lösungsmittelhaltig, mindestens ein Füge teil muss diffusionsdurchlässig sein
	Trocknen und dann mit Druck fügen (Kontaktklebstoffe)	Neoprenkautschuk	Einfache Verarbeitung, niedriger Preis, lösungsmittelhaltig
	Trocknen einer Dispersion	Verschiedene Basisharze	Einfache Verarbeitung, lange Ablüftzeit, sehr geringer Lösungsmittelgehalt
	Absorbieren des Weichmachers (Plastisole)	PVC-Copolymere	Preisgünstig, vergleichsweise gute Haftung auch auf beölten Blechen
Haftklebstoffe	Permanent klebrig	Acrylat, Natur- und Synthesekautschuk	Schnelle Verarbeitung, umweltfreundlich
Kombiniert chemisch und physikalisch aushärtende Klebstoffe	Zunächst physikalisches Aushärten, dann chemische Nachvernetzung	Reaktive Polyurethan-Schmelzklebstoffe	Schnelle Anfangsfestigkeit
		Neoprenkautschuk mit Isocyanathärtern	Einfache Verarbeitung, niedriger Preis, lösungsmittelhaltig
		Nachvernetzende Dispersionsklebstoffe	Großflächige Klebungen möglich, lösungsmittelfrei
Zwei-komponentige chemisch aushärtende Klebstoffe	Chemische Reaktionen (Polyreaktion) nach Mischen verschiedener Komponenten	Epoxidharz (2K)	Exaktes Einhalten des Mischungsverhältnisses notwendig, Verarbeitung z. B. über statische oder dynamische Mischer
		Polyurethan (2K)	Exaktes Einhalten des Mischungsverhältnisses notwendig, Verarbeitung z. B. über statische oder dynamische Mischer, reaktive Ausgangssubstanzen, keine Wärmezufuhr erforderlich
		Acrylate (2K)	Kontaminationstolerant, radikalisch aushärtend, als zwei flüssige Komponenten oder als Harz und Härterlack im Einsatz

Tabelle 2: Eigenschaften und Anwendungen technischer Klebstoffe

Kleben von Stahl und Edelstahl Rostfrei

Verarbeitungsbedingungen		Festigkeit (1: hoch, 4: gering)	Verformbarkeit (1: hoch, 4: gering)	Alterungsbeständigkeit (1: hoch, 3: gering)	Wärmebeständigkeit [°C]	Umweltverträglichkeit (1: gut, 4: weniger gut)	Typische Anwendungsbereiche
T [°C]	Druck [N/mm ²]						
140	0	1	2	2	bis 150	2 – 3	Automobilindustrie (Karosseriebau)
150	8	1	3	1 – 2	bis 200	2 – 3	Flugzeugbau, Holzbau
80	0	3	1	2 – 3	bis 110	1 – 2	Elastisches Kleben im Fahrzeugbau und Bauwesen
20	0	4	1	1	bis 200	1 – 2	Dichten und Kleben mit Glaswerkstoffen bei Structural Glazing im Bauwesen
20	0	1 – 2	2	1 – 2	bis 120	3 – 4	Schrauben-/Gewindesicherungen
> 100	0	3 – 4	1	3	90 – 120	1	Elektronik, Automobilindustrie
30	0	4	2	3	bis 80	4	Kleben von Papier, Leder und Textilien
10 – 20	ca. 1	3 – 4	1	2 – 3	bis 110	3 – 4	Fußbodenverlegung, Schuh- und Möbelherstellung, Automobilindustrie
10 – 20	ca. 1	3 – 4	1	3	bis 100	1	Verpackungs-, Holz- und Lederindustrie, Bauwesen
> 150	0	3 – 4	1	2	bis 120	3	Fahrzeugbau (z. B. Abdichten von Spalten)
10 – 20	> 1 – 5	4	1	1 – 3	bis 120	1	Klebebänder im Bauwesen und Fahrzeugbau
10 – 20	> 1 – 5	3 – 4	1	2	bis 100	1	Automobilindustrie
10 – 20	ca. 1	3	1	1 – 2	bis 120	3 – 4	Sportartikel, Automobilindustrie (Innenausstattung)
20 – 65	0	4	1	3	bis 120	2 – 3	Kaschierklebungen
20	0	1 – 2	2	3	bis 120	3 – 4	Strukturelle Klebungen im Fahrzeug- und Flugzeugbau
20	0	2 – 3	1	2 – 3	bis 120	3 – 4	Automobilindustrie (z. B. Beschichten von Schäumen mit Textilien), Möbelindustrie (z. B. Kleben von PVC-Folien auf Holz)
20	0	2	3 – 4	3	bis 115	2 – 3	Kleben von Permanentmagneten auf Rotoren für Elektroantriebe

Alle Angaben sind ungefähre Anhaltswerte. Die Eigenschaften spezieller Klebstoffsysteme können stark von diesen abweichen!

Dies gelingt sowohl mit Epoxidharzsystemen als auch mit den heute am weitesten verbreiteten nachvernetzenden Polyurethan-Schmelzklebstoffen, bei denen die nachträgliche chemische Reaktion durch von außen einwirkende Feuchtigkeit initiiert wird. Mit derartigen Systemen werden beispielsweise Windschutzscheiben in Kraftfahrzeug-Karosserien eingeklebt.

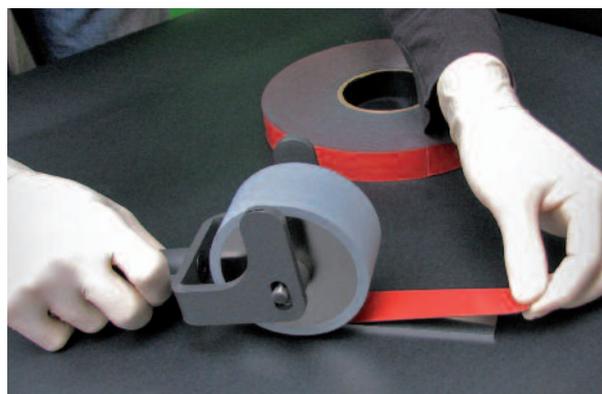
Naturgemäß kann ein Schmelzklebstoff ohne Nachvernetzung nur bis zu seiner Verarbeitungstemperatur wärmebeständig sein. Der Vorteil einer solchen Klebung liegt darin, dass sie durch Wärme wieder gelöst und auch wieder hergestellt werden kann. Die nachvernetzenden Schmelzklebstoffe können bei relativ geringen Temperaturen (ca. 60 bis 80 °C) aufgebracht werden und widerstehen im ausgehärteten Zustand durchaus Temperaturen von 120 bis 150 °C.

3.2 Permanent klebrige nicht aushärtende Klebstoffe (Haftklebstoffe)

Haftklebstoffe, im englischen Sprachgebrauch auch als Pressure Sensitive Adhesives (PSAs) bezeichnet, sind hochviskose Polymersysteme, die in ihrem Endzustand zumindest teilweise Eigenschaften einer Flüssigkeit behalten. Dadurch kann sich das Haftklebstoff-Bindemittel der Oberflächenrauigkeit der Füge-teile anpassen und Adhäsionskräfte aufbauen.

Haftklebstoffe kommen heute nicht nur in Form von Klebebändern, die einseitig oder zweiseitig mit Bindemitteln beschichtet sind, zum Einsatz, sondern auch als sog. Transfersysteme. Diese werden mit einem Trägermaterial auf den Festkörper aufgetragen, das anschließend abgezogen wird. Haftklebstoffe können zudem aus der Schmelze bei Temperaturen von etwa 80 °C aufgetragen werden und sind daher bereits bei der

Abb. 3: Klebebandapplikation und Anpressen mittels Handroller



Anwendung lösungsmittelfrei. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, sie als wässrige Dispersionen auf das Füge-teil aufzutragen und anschließend die wässrige Komponente abdampfen zu lassen. Schließlich sind heute auch Haftklebstoffe lieferbar, die als lösungsmittelfreie oder auch lösungsmittelhaltige, niedrigviskose Systeme auf die Oberflächen aufgetragen werden und anschließend durch kurzzeitige Bestrahlung mit ultraviolettem Licht oder Erwärmung in den klebfähigen Zustand gebracht werden können.

Haftklebstoffe werden in der Regel nur auf eine der beiden adhäsiv zu fügenden Flächen aufgetragen. Eine gute Klebung wird nur durch gleichmäßiges und kurzzeitiges Aneinanderpressen der Fügeflächen erreicht. Deren Positionierung muss exakt erfolgen, weil die Klebung sofort nach dem Anpressen eine relativ hohe Festigkeit besitzt. In der Regel stellt sich nach Stunden oder Tagen eine weitere Festigkeitssteigerung von 50 bis 100 % der Anfangsfestigkeit ein.

Haftklebstoffe sind im Allgemeinen lösungsmittel- und beinahe monomerfrei. Ihre Verarbeitung ist einfach, die Empfindlichkeit gegenüber Verarbeitungsfehlern relativ gering. Hilfswerkzeuge werden häufig nicht benötigt. Die Verarbeitung kann beliebig schnell erfolgen. Nach dem Zusammenfügen ist die so geschaffene Verbindung sofort mechanisch belastbar.

Abb. 3 zeigt die definierte Applikation eines zweiseitig beschichteten Haftklebebands mit einem Handroller.

3.3 Chemisch reagierende Klebstoffe

Die große Gruppe der chemisch reagierenden Klebstoffe besteht aus zunächst niedermolekularen und damit fließfähigen oder niedrigviskosen Substanzen, in denen reaktive chemische Gruppen vorhanden sind, die unter bestimmten Bedingungen miteinander reagieren. Dabei entstehen aus niedermolekularen Systemen polymere Stoffe hoher Molekularmasse und hoher mechanischer Widerstandsfähigkeit.

Bei chemischen Reaktionsprozessen darf der Festigkeitsaufbau erst nach dem Auftragen des Klebstoffs und dem Zusammenfügen der Teile stattfinden, da der Klebstoff sonst die Fähigkeit zur Benetzung verlieren würde. Die chemische Reaktion kann dadurch gestartet werden, dass kurz vor dem Klebstoffauftrag zwei oder mehr reaktionsfähige Komponenten miteinander gemischt werden, die sich dann bei Raumtemperatur nach dem Auftrag in eine makromolekulare Substanz umwandeln. Bis diese zumindest teilweise entstanden ist, müssen die Füge-teile fixiert werden, da der Klebstoff im niedermolekularen Zustand keine Kräfte übertragen kann. Die

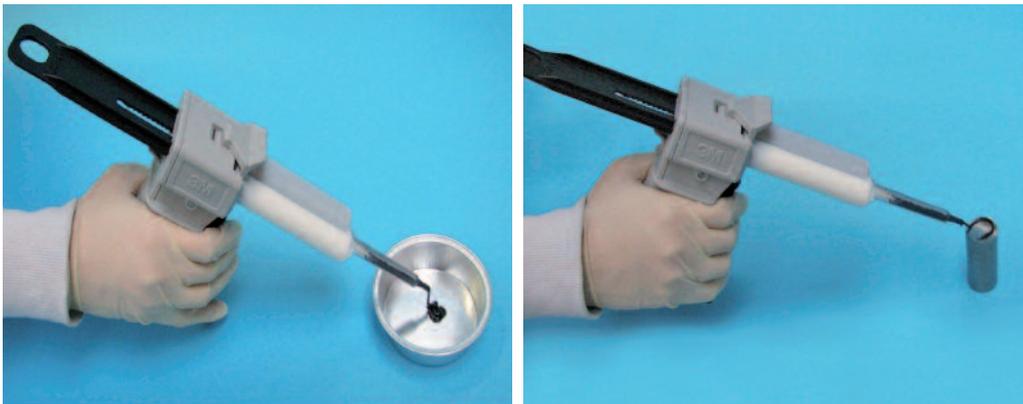


Abb. 4:
Verarbeitung und
Applikation eines
Zweikomponenten-
strukturklebstoffs

zur Aushärtereaktion notwendige Zeit kann in den meisten Fällen durch Zufuhr von Wärme verkürzt werden.

Der chemische Aufbau der reaktiven Komponenten kann auch so ausgeführt werden, dass die Reaktion nur unter Zufuhr von Wärme oder bestimmten anderen Bedingungen in der Klebfuge einsetzt. Man bezeichnet diese Klebstoffe als Einkomponentenreaktionsklebstoffe, obwohl sie vom chemischen Standpunkt her meistens aus zwei oder mehr reaktionsfähigen Komponenten bestehen.

3.3.1 Zweikomponentenklebstoffe

Zu dieser Gruppe zählen in erster Linie Polyester, kalthärtende Epoxidharze, Polyurethane und auch Acrylatklebstoffe. Die üblichen Zweikomponentenbindemittel müssen vor dem Auftrag in einem bestimmten Verhältnis aus verschiedenen Komponenten angemischt werden. Auf einfache Weise geschieht dies mit Hilfe eines Kartuschensystems (Abb. 4). Unter Verwendung von dazugehörigem Auftragsgerät und Mischdüse werden die Harz- und Härterkomponenten im erforderlichen Verhältnis angemischt. Um ein exaktes Mischungsverhältnis zu gewährleisten, werden vor der Klebstoffapplikation die ersten Hübe Klebstoff verworfen. Bei den Acrylatklebstoffen der zweiten Genera-

tion ist es möglich, jeweils eine Komponente auf eine der Füge-teiloberflächen aufzutragen, die Teile dann zusammenzufügen und somit die Aushärtereaktion zu initiieren.

Da bei zweikomponentig zu verarbeitenden Klebstoffen die chemische Reaktion direkt nach dem Mischvorgang beginnt, ist bei der Klebstoffverarbeitung die sog. Topfzeit zwingend einzuhalten. Diese gibt den Zeitraum an, innerhalb dessen sich der Klebstoff ohne signifikante Beeinflussung der Benetzungseigenschaften auftragen lässt. Nach Überschreiten der Topfzeit kann die zu weit vorangeschrittene Klebstoffvernetzung zu herabgesetzten Verbundfestigkeiten in Folge mangelnder Benetzung führen. Bei Erwärmung des Klebstoffs während der Applikation ist zu beachten, dass aufgrund der beschleunigten chemischen Reaktion die Topfzeit erheblich verkürzt werden kann. Zudem kühlt der erwärmte Klebstoff beim Auftrag auf die Füge-teile sehr schnell ab. Die damit verbundene Reduzierung der Viskosität erschwert die Benetzung der Füge-teiloberfläche.

3.3.2 Einkomponentenklebstoffe

Einkomponentig zu verarbeitende Klebstoffe bestehen aus niedrigmolekularen und plastifizierenden Substanzen. Sie lassen sich wesentlich einfacher als Zwei-

oder Mehrkomponentenbindemittel anwenden, erfordern aber den Einsatz physikalischer Effekte zur Initiierung der Aushärtereaktion.

Einkomponentensysteme, die durch Zufuhr von Wärme aushärten, werden auch warmhärtende Einkomponentenklebstoffe genannt. Als Basisharze dienen Phenol- und Epoxidharze, für hochwarmfeste Klebstoffe auch Polybenzimidazole und Polyamide.

Im Fall der Phenolharze und Polyamide verläuft der Vernetzungsprozess in Form einer Polykondensation. Daher muss die Klebfuge während des Aushärtvorgangs und der Wärmezufuhr einem zusätzlichen Druck ausgesetzt werden, durch den das Wasser aus der Klebfuge entfernt wird. Dieser Druck muss höher sein als der Dampfdruck des Wassers bei der Aushärtetemperatur.

Bei warmhärtenden Epoxidharzen ist dagegen kein besonderer Anpressdruck erforderlich, da die Härtingsreaktion als Polyaddition abläuft. Nur bei großflächigen Klebungen ist für Kontaktdruck der Teile zu sorgen, da im ungehärteten Zustand auch diese Bindemittel keine mechanischen Kräfte übertragen und Verformungen der Füge-teile zu einem Ablösen im geklebten Bereich führen können. In der Fahrzeugindustrie werden diese Klebstoffe wegen ihrer Kontaminationstoleranz zum Kleben von Blechen mit einer definierten Belegung von Umformschmierstoffen eingesetzt.

Neben der Zufuhr von Wärme können auch andere physikalische Effekte zum Initiieren der Aushärtereaktion eingesetzt werden. Am gebräuchlichsten sind Klebstoffsysteme, bei denen die chemische Reaktion durch Bestrahlung (z.B. UV-Licht), in Abwesenheit von Sauerstoff (anaerob) oder unter Feuchtigkeitseinfluss ausgelöst wird. Diese Systeme werden auch als kalthärtende Einkomponentenklebstoffe bezeichnet.

Besonders die UV- oder lichthärtenden Systeme, meist Klebstoffe auf Basis von Acrylaten und Epoxidharzen, kommen aufgrund der präzise zu kontrollierenden Aushärtung vermehrt zum Einsatz. In den niedrigmolekularen Basis- harzen sind sog. Photoinitiatoren gelöst bzw. chemisch integriert, die unter Bestrahlung mit UV- oder sichtbarem Licht die Vernetzung veranlassen. Man unterscheidet zwischen Klebstoffen, die nur unter kontinuierlicher Bestrahlung vernetzen (radikalischer Reaktionsmechanismus) und solchen, bei denen die Vernetzung durch kurze Bestrahlung der offenen Klebschichten gestartet wird und sich nach dem Zusammenfügen ohne weitere Bestrahlung fortsetzt (ionischer Reaktionsmechanismus).

Durch Feuchtigkeit vernetzende, kalthärtende Einkomponentenklebstoffe wie beispielsweise Einkomponenten-Polyurethan- und -Silikonharzsysteme werden häufig als Dichtmassen und elastische Klebstoffe eingesetzt. Sie liegen im nicht ausgehärteten Zustand niedermolekular und nicht vernetzt vor.

In der Klebfuge härten diese Systeme durch Einwirken von Feuchtigkeit, die von außen in die Klebschicht diffundiert, zu einem dreidimensional chemisch vernetzten gummielastischen Werkstoff aus. Silikonharze besitzen eine hohe Verformbarkeit und die charakteristische Eigenschaft, ihre Festigkeits- und Verformungseigen-

schaften im Temperaturbereich von -40 bis $+150$ °C praktisch nicht zu ändern.

3.3.3 Mikroverkapselte Klebstoffe

Eine Sondergruppe sind mikroverkapselte chemisch härtende Klebstoffsysteme, die vorzugsweise als Schrauben-Sicherungsmittel verwendet werden. Sowohl anaerob aushärtende Klebstoffe (Diacrylsäureester) als auch Zwei- oder Mehrkomponentenreaktionssysteme auf Basis von Epoxidharzen, Polyestern oder Polyurethanen können mikroverkapselt werden. Auf diese Weise lassen sich die Komponenten beispielsweise in einer Latexlösung auf die Füge- teile auftragen. Erst durch relativ hohen mechanischen Druck werden die Kapseln zerstört und die darin enthaltenen reaktiven Systeme härten bei Raumtemperatur zu Polymeren aus. Im Fall von Schrauben- bzw. Gewindesicherungen kann das mikroverkapselte System bereits vom Hersteller auf die Füge- teile aufgetragen werden.

3.4 Primer

Als Primer bezeichnet man Beschichtungssysteme, die vor dem Klebstoffauftrag zusätzlich auf die zu fügenden Oberflächen aufgebracht werden, um diese gegen unkontrollierte Veränderungen durch die Umwelt zu schützen oder die Adhäsion des später aufzubringenden Klebstoffs zu verbessern. Primer sind in der Regel hochverdünnte Polymerlösungen, die die Oberflächen gut benetzen und unter Umständen kleinere Verunreinigungen beseitigen. Unter dem Aspekt der Lösungsmittelproblematik verwendet man inzwischen auch Systeme in Form von wässrigen Dispersionen oder sogar trockene Pulver, die z.B. elektrostatisch aufgebracht werden. Primer werden üblicher-

weise in Trockenschichtdicken von wenigen Mikrometern aufgetragen.

Sie ähneln in ihrem chemischen Aufbau den Klebstoffen und können beim Einsatz von Reaktionsklebstoffen auch bereits vor deren Applikation ausgehärtet werden. Sie dienen in diesem Fall der Verbesserung der Benetzung und dem Schutz der Oberflächen bis zum Klebstoffauftrag. Insbesondere mit gehärteten Primern beschichtete Füge- teile können vor dem Klebstoffauftrag bis zu mehrere Wochen ohne Beeinträchtigung der Adhäsionsqualität gelagert werden. Nachträgliche Kontaminationen auf dem Primer sind erfahrungsgemäß weniger kritisch als z.B. auf zeitnah vorbehandelten Metalloberflächen. Außerdem können sie, falls notwendig, ohne Beeinträchtigung der Klebeigenschaften mit milden Reinigungsmitteln entfernt werden. Primer dieser Art sind dementsprechend nützliche Hilfsmittel, um die Fertigungsschritte beim Kleben zeitlich zu entkoppeln.

3.5 Klebstoffauswahl

Für eine systematische Klebstoffauswahl sind drei Hauptaspekte wichtig, anhand derer auch eine Versuchsmatrix zum Nachweis der Klebstoffeignung abgeleitet werden kann:

- Haftung des Klebstoffs auf den Füge- teiloberflächen (Adhäsion)
- innere Festigkeit des Klebstoffs (Kohäsion)
- Klebstoffverarbeitung und -applikation

Während die beiden ersten Aspekte die Endeigenschaften des Klebstoffs und der Klebverbindung betreffen, müssen bei der Klebstoffverarbeitung und -applikation die Fertigungseigenschaften mit dem geplanten Prozess in Einklang gebracht werden. Dazu zählen u. a.:

- Topfzeit (bei 2K-Klebstoffen) bzw. Hautbildungszeit (bei feuchtigkeitsvernetzenden 1K-Klebstoffen) gegenüber Applikationszeit
- Zeit bis zum Erreichen der Handhabungsfestigkeit gegenüber Taktzeit und äußeren Umgebungsbedingungen wie Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit etc.
- Klebstoffapplikation (manuell oder automatisch), vorgesehene Applikationsverfahren
- Kompatibilität des Klebstoffs mit der zum Einsatz kommenden Anlagentechnik
- Aushärtebedingungen des Klebstoffs (Temperatur, Druck, Zeit, Strahlung etc.)

Hinweis: Der letztlich installierte Prozess muss den Aushärtebedingungen des Klebstoffs gerecht werden, und zwar auch unter Berücksichtigung der in der Praxis auftretenden Prozessschwankungen. Nur dann ist gewährleistet, dass die erzeugte Klebverbindung das gewünschte Eigenschaftsprofil ausbildet.

4 Eigenschaften und Prüfung von Klebverbindungen

Die Eigenschaften von Klebverbindungen werden anhand definierter Kennwerte, z.B. der Festigkeit, der Verformbarkeit oder der Beständigkeit gegen schädigende Umwelteinflüsse beschrieben. Ermittelt werden diese an geklebten Bauteilen oder geeigneten Prüfkörpern. Da Bauteilprüfungen unter betriebsnahen Bedingungen äußerst aufwendig sind, werden meist standardisierte Prüfverfahren an bauteilähnlichen, vereinfachten und verkleinerten Prüfkörpern verwendet. Die wichtigsten Eigenschaften von Klebverbindungen und deren Prüfung sind im Folgenden aufgeführt.

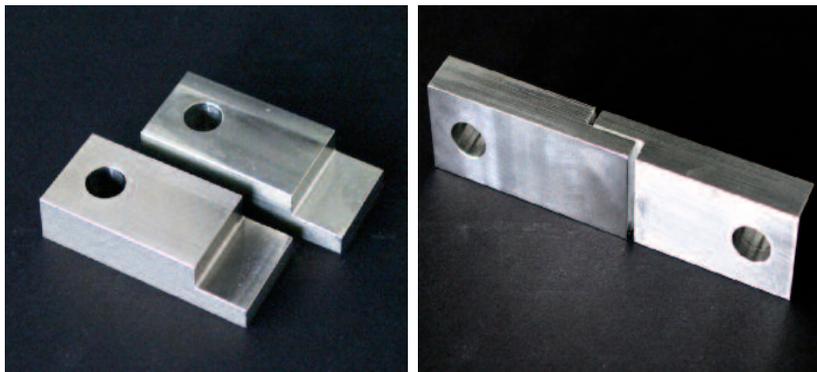


Abb. 5: Geometrie der dicken Zugscherprobe, links: Füge­teile vor dem Kleben, rechts: geklebter Verbund

4.1 Festigkeit

Die Festigkeitseigenschaften einer Klebverbindung ergeben sich aus dem Zusammenwirken zahlreicher Parameter, die sich im Wesentlichen den Einflussgrößen Klebschicht, Oberflächen bzw. Werkstoffe der Füge­teile, geometrische Gestaltung der Klebfuge und Beanspruchungsbedingungen zuordnen lassen. Von großer Bedeutung sind zudem die Wechselwirkungen zwischen Klebschicht und Füge­teiloberflächen.

Bei metallischen Werkstoffen wie Stahl erfolgt die Ermittlung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften im Wesentlichen durch den Zugversuch nach DIN EN ISO 6892 (vormals DIN 50145). Anhand definierter Proben werden die relevanten Werkstoffkenngrößen wie Zugfestigkeit, Elastizitäts- oder Schubmodul, Streckgrenze und Bruchdehnung experimentell ermittelt.

Bei Klebverbindungen sind diese nach DIN EN ISO 6892 ermittelten Kenngrößen nur bedingt aussagekräftig, da es durch die unterschiedliche Verformung von Füge­teilen und Klebschicht unter Belastung zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung kommt. Auf die Festigkeitseigenschaften einer Klebverbindung hat das Verformungsverhalten der Klebschicht aber auch der Füge­teile maßgeblichen Einfluss.

Für die Dimensionierung von Klebverbindungen und die Beurteilung verschiedener Klebstoffe ist es deshalb wichtig, dass Spannungs-Verformungs-Verhalten der Klebschicht unter definierten Spannungszuständen zu kennen. Hierfür werden sog. Schubspannungs-Gleitungsdiagramme (τ - γ -Diagramme) verwendet.

Bei der mechanischen Prüfung nach ISO 11003-2 (vormals DIN 54451) führt die Verwendung dicker Füge­teilquerschnitte und geringer Überlappungslänge (Abb. 5) zu geringeren Normalspannungen in der Klebfuge. Zudem werden Füge­teildehnungen und damit verbundene zusätzliche Spannungsspitzen vermindert.

Die Schubspannung τ berechnet sich aus dem Quotienten aus Kraft F und Klebfläche A . Die Gleitung $\tan(\gamma)$ wird aus dem Quotienten aus Füge­teilverschiebung v und Klebschichtdicke d berechnet. Bei der Analyse des Schubspannungs-Gleitungsverhaltens werden beispielsweise Klebstoffkennwerte wie Schubmodul, Schubspannung an der 1%-Dehnungsgrenze sowie Bruchgleitung ermittelt.

Eine Übersicht über die wichtigsten Prüfnormen für Stahlklebungen und für Klebungen von Stahlteilen mit anderen Werkstoffen enthält **Tabelle 3**.

Bei der Qualifizierung von Klebstoffen zum Fügen von Stahlbauteilen und Hybridverbunden

Norm	Titel
DIN EN 1464	Klebstoffe – Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen – Rollenschälversuch
DIN EN 1465	Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen
DIN EN 14444	Strukturklebstoffe – Qualitative Bestimmung der Beständigkeit geklebter Baugruppen – Keilberstprüfung (ISO 10354, modifiziert)
DIN EN 14869-1	Strukturklebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen – Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf verklebter Hohlzylinder (ISO 11003-1, modifiziert)
DIN EN 14869-2	Strukturklebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen – Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeiteile (ISO 11003-2, modifiziert)
DIN EN 15337	Klebstoffe – Bestimmung der Scherfestigkeit von anaeroben Klebstoffen unter Verwendung von Bolzen-Hülse-Probekörpern (ISO 10123, modifiziert)
DIN EN 15865	Klebstoffe – Bestimmung der Drehfestigkeit von anaeroben Klebstoffen auf geklebten Gewinden (ISO 10964, modifiziert)
DIN EN 15870	Klebstoffe – Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen (ISO 6922, modifiziert)
DIN EN ISO 9653	Klebstoffe – Prüfverfahren für die Scherschlagfestigkeit von Klebungen
DIN EN ISO 9664	Klebstoffe – Verfahren zur Prüfung der Ermüdungseigenschaften von Strukturklebungen bei Zugscherbeanspruchung
DIN EN ISO 10365	Klebstoffe – Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder
DIN EN ISO 11339	Klebstoffe – T-Schälprüfung für geklebte Verbindungen aus flexiblen Fügeiteilen
ISO 11003-1	Klebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen – Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpfgeklebter Hohlzylinder
ISO 11003-2	Klebstoffe – Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen – Teil 2: Scherprüfverfahren für dicke Fügeiteile

Tabelle 3: Wichtige Normen zur Prüfung von Klebstoffen und Klebverbindungen

sind bei der Prüfung bevorzugt die tatsächlich zum Einsatz kommenden Fügeiteilwerkstoffe und anwendungsbezogene Prüfgeometrien zu benutzen. Mit geeigneten Verfahren werden die Oberflächen der Fügeiteile zur Erzielung möglichst gleichmäßiger und reproduzierbarer Adhäsionseigenschaften gereinigt und vorbehandelt (siehe auch Abschnitt 6.1.1).

Darüber hinaus sind die in den Normen angegebenen Prüfvorschriften einzuhalten. Im Prüfbericht sind dann von der Norm abweichende Fügeiteilwerkstoffe deutlich anzugeben.

4.2 Zeitstandverhalten

Klebstoffe neigen bei lang einwirkender Beanspruchung zum Kriechen, d. h. zu plastischen Verformungen, so dass ihre Langzeitfestigkeit geringer sein kann als ihre Festigkeit bei kurzzeitig einwirkenden Lasten. Geklebte Stahlverbindungen können bei Raumtemperatur und kurzzeitigen quasistatischen Belastungen etwa 30 N/mm² Schubbeanspruchung ohne Versagen ertragen. Nach längerer Zeit beträgt die Festigkeit bei einer Reihe von Klebstoffen nur noch etwa 50%, bei hochfesten und hochwarmfesten mit geringerer Verformbarkeit noch etwa 70% der quasistatischen Anfangsfestigkeit.

4.3 Schwingfestigkeit

Zur Untersuchung der Schwingfestigkeit geklebter Verbindungen werden diese üblicherweise einer zeitlich veränderlichen zyklischen Belastung ausgesetzt, die sich allgemein aus einem dynamischen Anteil in Sinus-, Dreiecks- oder Rechteckform und einem statischen Anteil, der sog. Mittelspannung zusammensetzt. Die grundsätzlich möglichen Beanspruchungsfälle für einen sinusförmigen Belastungsverlauf sind in **Abb. 6** dargestellt.

Genormte Standard-Schwingversuche für die industrielle Anwendung sind beispielsweise DIN 50100 für metallische Werkstoffe sowie DIN EN ISO 9664 und ASTM D 3166 für Klebstoffe bzw. Klebverbindungen. Während sich DIN 50100 auf homogene Probekörper aus metallischen Werkstoffen bezieht (Belastungsarten Zug/Druck, Biegung oder Verdrehung), beschreibt DIN EN ISO 9664 die Prüfung geklebter Zugscherproben aus Dünnschleib-Fügeteilen. Obwohl die Begrifflichkeiten beider Normen ähnlich und grundsätzlich übertragbar sind, handelt es sich bei der Prüfung der Zugscherprobe eigentlich um die Ermittlung der Gestalterschwingfestigkeit (Gestalterschwingfestigkeit) des Klebverbunds und nicht um die Bestimmung von Werkstoffkennwerten unter schwingender Belastung.

Die Bewertung der Ergebnisse von Schwingfestigkeitsversuchen an Klebverbindungen wird im Vergleich zu homogenen Bauteilen aus einem Werkstoff zudem dadurch erschwert, dass je nach Versuchsparameter unterschiedliche Versagensmechanismen auftreten können. Insbesondere die Höhe der Mittelspannung und die Prüftemperatur beeinflussen das Ver-

sagensverhalten und die ertragbare Schwingungsamplitude.

Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsprüfung geklebter Verbindungen werden, wie in den Werkstoffwissenschaften gebräuchlich, in einem Wöhlerdiagramm dargestellt. Aufgrund der im Regelfall relativ großen Streuungen dieser Ergebnisse sind statistische Methoden zur Versuchsauswertung erforderlich. Abweichend zu reinen Materialproben wird bei Klebverbindungen oft nicht die Schwingzahl bis zum Bruch, sondern bis zu einem anderen definierten Ereignis, z.B. einer vorgegebenen Risslänge oder einem bestimmten Steifigkeitsabfall, aufgetragen.

Im Allgemeinen kennt man bei Werkstoffen und nach aktuellem Forschungsstand auch bei Klebverbindungen keinen echten Dauerfestigkeitsbereich. Daher werden Dauerfestigkeiten als ertragbare Spannungsamplituden für bestimmte Grenzschnwingzahlen N_D (Stahl-Klebverbindungen 10^7 , Leichtmetall-Klebverbindungen 10^8) definiert. Diese Dauerfestigkeiten hängen wie bereits erwähnt von der Mittelspannung ab, also davon, ob im Zugschwell-, Druckschwell- oder

Wechselbereich geprüft wird. Im Allgemeinen reduziert eine Zug-Mittelspannung die Dauerfestigkeit im Vergleich zu einer rein wechselnden Beanspruchung, wogegen eine Druck-Mittelspannung diese erhöht. Die Verringerung der ertragbaren Spannungsamplitude mit zunehmender Mittelspannung, die sog. Mittelspannungsempfindlichkeit, kann bei Klebstoffen besonders ausgeprägt sein.

Die wechselnde mechanische Beanspruchung der Proben während der Prüfung kann zu einer deutlichen Temperaturerhöhung der Klebschicht führen. Aufgrund des temperaturabhängigen Festigkeitsverhaltens polymerer Werkstoffe können sich in der Folge verfälschte Schwingfestigkeitsergebnisse einstellen.

Bei der Wahl der Schwingfrequenz ist deshalb darauf zu achten, dass während des Versuchs keine signifikante Temperaturerhöhung eintritt. Die in der DIN EN ISO 9664 angegebene Schwingfrequenz von 30 Hz ist insbesondere für die Prüfung höherfester Strukturklebstoffe, wie z.B. Epoxidharzklebstoffe geeignet. Werden weniger steife Klebstoffe mit hohen Bruchdehnungen wie z.B. Polyurethane geprüft, ist die Prüf-

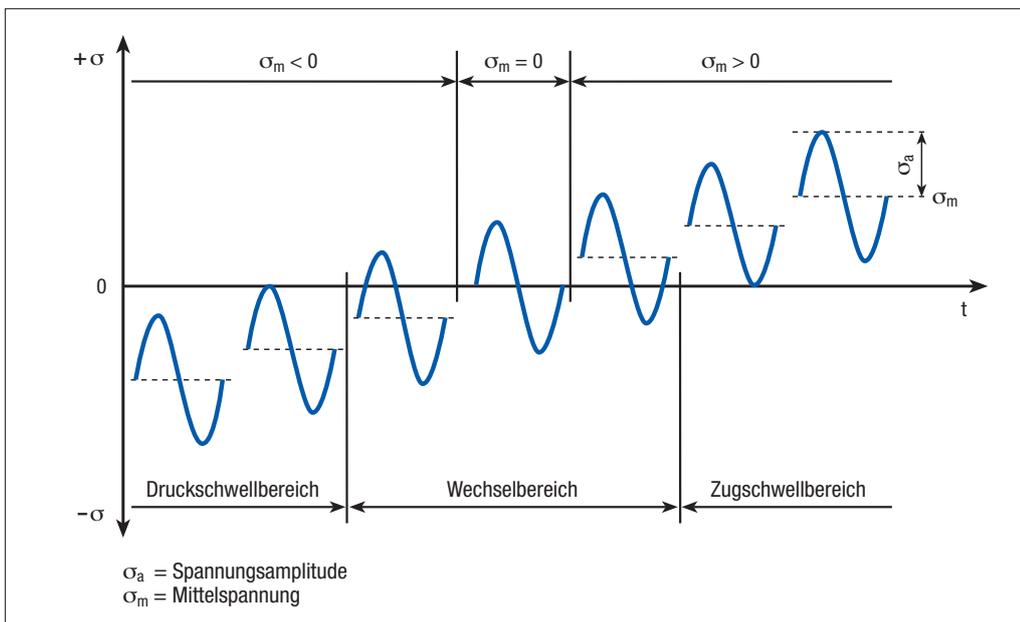


Abb. 6:
Beanspruchungs-
fälle bei sinus-
förmiger Belastung

frequenz zu reduzieren. Hier kommen üblicherweise Schwingfrequenzen im Bereich von 1 bis 10 Hz zur Anwendung, um eine Temperaturerhöhung zu vermeiden und einen ungehinderten Ablauf der zeitabhängigen Verformungsprozesse in der Klebschicht zu ermöglichen.

Große Wirkung auf die Schwingfestigkeit können auch fertigungsbedingte Einflüsse wie geometrische Klebschichtfehler haben. **Abb. 7** zeigt das Ergebnis aus Schwingfestigkeitsuntersuchungen mit fehlerfreien und fehlerbehafteten geklebten Zugscherproben. Während bei quasistatisch-zügiger Beanspruchung kaum signifikante Unterschiede im Spannungs-Verformungsverlauf auftreten, bewirken geometrische Klebschichtfehler bei schwingender Beanspruchung eine deutliche Verkürzung der Lebensdauer.

Neben äußeren Fehlern an der Klebfuge, die durch eine Sichtprüfung erkennbar sind, können auch nicht sichtbare Fehler innerhalb der Klebschicht bzw. in der Grenzschicht zum Füge teil die Schwingfestigkeit reduzieren.

4.4 Schlagfestigkeit

Klebstoffe weisen ein geschwindigkeitsabhängiges Materialverhalten auf. Dieses führt bei schlagartiger Belastung, d.h. hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit, zu veränderten Verbindungseigenschaften gegenüber einer langsamen, z.B. quasistatisch-zügigen Belastung. Im Allgemeinen wird ab einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s von einer schlagartigen Belastung gesprochen. Typische Geschwindigkeiten bei der Schlagprüfung geklebter Verbindungen liegen zwischen 1 und 5 m/s.

Die Prüfung der Schlagfestigkeit von Klebstoffen kann nach verschiedenen Methoden erfolgen. In der Praxis ist die Bestimmung der Schlagschälenergie bzw. des Schlagschälwiderstands mittels Keilschlagversuch nach DIN EN ISO 11343 aufgrund des vergleichsweise einfachen Versuchsaufbaus weit verbreitet. Werden über die Energieaufnahme hinaus genauere Kennwerte wie Schubspannungs- und Gleitungsverhalten des Klebstoffs benötigt, kann ein gleitratens-

abhängiger Schubspannungs-Gleitungsversuch (τ - γ -Versuch) in Anlehnung an ISO 11003-2 durchgeführt werden (vgl. auch Abschnitt 4.1).

Wie bei Stahl steigt auch bei Klebstoffen die Festigkeit üblicherweise mit zunehmender Deformationsgeschwindigkeit an. Mit der Festigkeitszunahme des Klebstoffs geht in der Regel die Abnahme seiner Verformungsfähigkeit einher. Dies kann als grundsätzliche Versprödungsneigung eines Klebstoffs bei höherer Beanspruchungsgeschwindigkeit verstanden werden. Die linke Grafik in **Abb. 8** zeigt dieses typische Verhalten anhand eines gleitratenabhängigen Schubspannungs-Gleitungsversuchs an einem kalthärtenden Epoxidharzklebstoff (2K-EP). Die Bruchgleitung geht bei höherer Beanspruchungsgeschwindigkeit deutlich zurück.

Das spröde Klebstoffverhalten bei höherer Beanspruchungsgeschwindigkeit verhinderte in der Vergangenheit oft den Einsatz in hochdynamisch beanspruchten Bauteilen. Die Verfügbarkeit schlagoptimierter Klebstoffsysteme ist insbesondere für die Fahrzeugindustrie von Bedeutung, da die Realisierung leichterer Karosseriekonzepte den Einsatz der Klebtechnik auch in crashrelevanten Strukturbereichen erfordert.

Da Klebstoffe im Crashfall nur in einem sehr geringen Maß zur Energieabsorption beitragen, ist es wichtig, dass die Verbindung deutlich über die Streckgrenzen der Füge teilwerkstoffe hinaus belastet werden kann, ohne dass es zu einem Versagen kommt. Dadurch kann ein Großteil der Energie durch plastische Füge teildeformation abgebaut werden. Ein crashoptimiertes Klebstoffsystem muss daher zum einen eine entsprechende Festigkeit aufweisen, um die zur Plastifizierung des Füge teilwerkstoffs erforderliche Kraft übertragen zu können. Zum anderen muss der Klebstoff eine ausreichende Zähigkeit besitzen, um die durch

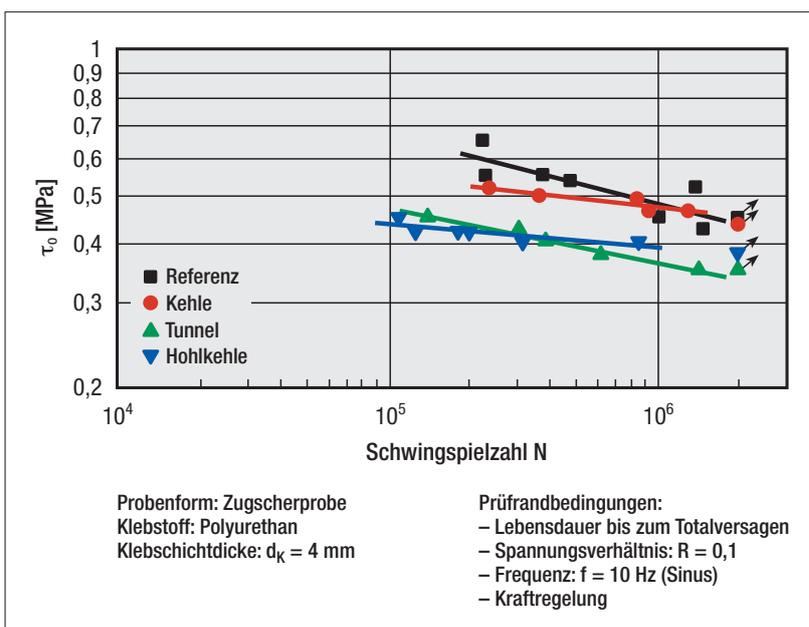


Abb. 7: Veränderung der Wöhlerlinie geklebter Zugscherproben durch geometrische Klebschichtfehler [1]

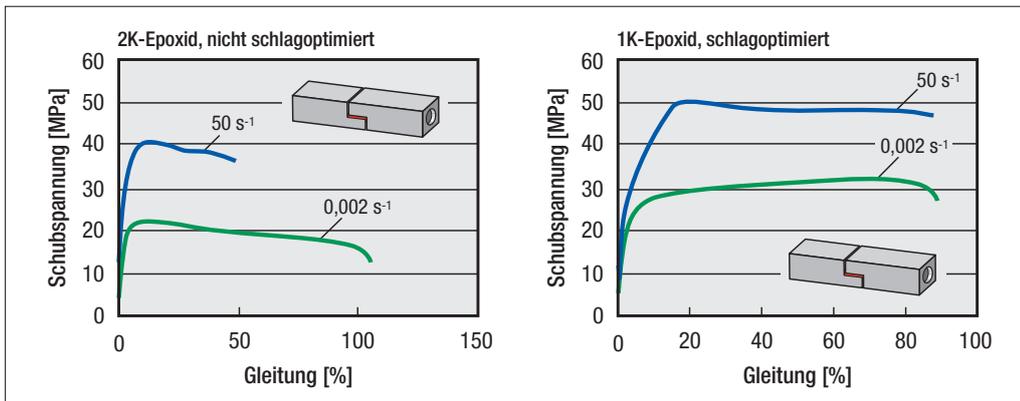


Abb. 8: Gleitratenabhängiger Schubspannungs-Gleitungsversuch für zwei Epoxidharzklebstoffe [2]

das Fließen der Fügepartielemente induzierten Spannungen im Überlappungsbereich abzubauen zu können.

Bis zum Ende der 1990er Jahre wurde das Strukturkleben nur vereinzelt im automobilen Karosseriebau angewendet, da die in erster Linie auf Epoxidharz basierenden verfügbaren Klebstoffe zwar hohe Festigkeiten und für die Versteifung wichtige hohe Elastizitätsmodulwerte aufwiesen, jedoch im Crashfall insbesondere bei tiefen Temperaturen das genannte spröde Bruchverhalten zeigten. Erst in jüngster Zeit hat das Kleben von Strukturbauteilen mit der Entwicklung spezieller schlagzäher Strukturklebstoffe eine große und weiter zunehmende Verbreitung erfahren. Bei diesen Klebstoffen werden zähelastische Partikel mit einer Größe zwischen 0,5 und 2 µm in die spröde Epoxidharzmatrix eingebracht und chemisch mit dieser verbunden. Bei Schlagbelastung und lokal hohen Spannungsspitzen reduzieren diese zähen Partikel die Energiedichte, behindern das Risswachstum und absorbieren Energie.

Das Verhalten eines solchen modifizierten Epoxidharzklebstoffs (1K-EP) ist in der rechten Grafik in **Abb. 8** dargestellt. Bei diesem ist keine signifikante Abnahme der Gleitung mit steigender Belastungsgeschwindigkeit feststellbar.

4.5 Beständigkeit

In einer Stahlklebung übernimmt ein nichtmetallischer organischer Werkstoff als Klebschicht die gesamte kraftübertragende Funktion. Damit ist das Verhalten der Klebung auch weitgehend von den technischen Eigenschaften des organischen Stoffes und dessen Adhäsion zur Stahloberfläche abhängig.

Die Beständigkeit und das Langzeitverhalten von Klebverbindungen sind folglich besonders in denjenigen Bereichen von Bedeutung, in denen das Versagen der Klebung das Versagen der Gesamtstruktur einer Konstruktion bewirkt und damit Folgeschäden nach sich zieht. Für das Langzeitverhalten einer Klebverbindung sind folgende Faktoren bestimmend:

- Alterungsverhalten der Klebstoffe
- zeitabhängiges mechanisches Verhalten in Form des Kriechens unter Last
- Beständigkeit der Adhäsion unter dem Einfluss der zu erwartenden Einsatzbedingungen

Das Verhalten der Polymere unter schädigenden Einflüssen, auch als Alterungsverhalten bezeichnet, ist besonders kritisch unter Umgebungseinflüssen wie Feuchtigkeit, UV-Strahlung (z. B. in Stahl-Glas-Klebung) und aggressiven Medien wie organischen Lösungsmitteln, Säuren oder Laugen zu betrachten.

Die als Degradation bezeichneten Mechanismen, die zur Verringerung der Festigkeit geklebter Verbunde führen, lassen sich in vier Grundtypen unterteilen:

- korrosive Unterwanderung
- temperaturinduzierte Schädigung
- feuchtigkeitsinduzierte Schädigung durch Quellung und Hydrolyse (Spaltung einer chemischen Bindung durch Reaktion mit Wasser)
- Adhäsionsverlust (Enthaftung)

Ihre Auswirkungen lassen sich sowohl anhand der Festigkeitsänderungen im Verlauf der Alterungszeit als auch anhand des charakteristischen Bruchverhaltens erkennen. Als Kenngrößen für das Langzeitfestigkeitsverhalten einer Klebung sind demzufolge nicht die im quasistatischen Kurzzeitversuch ermittelten Klebfestigkeiten maßgebend. Entscheidend sind die Festigkeitswerte, die sich unter zeitabhängiger Beanspruchung mit den angegebenen Einflüssen ergeben. Da diese Alterungsvorgänge in der Regel nur sehr langsam ablaufen, wird in Kurzzeitalterungsverfahren gezielt versucht, durch Temperaturerhöhung oder andere Verschärfung der Alterungsbedingungen einen „Zeitraffereffekt“ zu erzeugen. Ziel aller Verfahren ist hierbei die Bewertung des Langzeitverhaltens einer Klebung in relativ kurzen Zeitabschnitten anhand von Laborprüfkörpern.

4.5.1 Temperatur

Bauteile aus Stahl ertragen im Gegensatz zu Klebstoffen im Allgemeinen Temperaturen bis etwa 400 °C ohne größere Festigkeitsverluste, je nach Legierungszusammensetzung auch höhere. Demgegenüber sind die mechanischen Eigenschaften der Klebstoffe in der Regel stark temperaturabhängig und ihre maximale Einsatztemperatur ist von der Art des Polymernetzwerks abhängig. Beispielsweise lassen sich heute beim Einsatz selbstklebender Systeme (Haftklebstoffe) Wärmebeständigkeiten von Stahlklebungen bis zu 120 °C realisieren. Die Festigkeit derartiger Klebungen beträgt jedoch nur einen Bruchteil der bei Raumtemperatur erreichbaren Werte.

Andere physikalisch aushärtende Klebstoffe sowie Reaktionsklebstoffe ermöglichen Klebungen mit Wärmebeständigkeiten bis zu 100 °C und können im wenig belasteten Zustand oftmals kurzzeitigen Erwärmungen bis 150 °C widerstehen.

Eine höhere Warmfestigkeit lässt sich mit heißhärtenden Einkomponenten-Epoxidharzsystemen, Epoxid-/Phenolharz-Kombinationen, Polyimiden und auch Silikonharzen erreichen. Eine Dauerbeanspruchbarkeit bis zu Temperaturen von 200 bis 250 °C ist heute mit diesen Klebstoffen erreichbar.

Kurzzeitige Überhitzungen gering beanspruchter Klebungen bis 200 °C sind in einigen Fällen zulässig. Eine weitere Steigerung der Temperaturbeständigkeit von Klebstoffen ist nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse nicht zu erwarten. Bei Einsatzbereichen bis zu 600 °C muss auf keramische, d.h. anorganische Klebstoffe ausgewichen werden, mit denen sich allerdings nur geringe Festigkeiten bei hoher Schlagempfindlichkeit und meist auch Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Verbindungen erreichen lassen. In diesen Fällen ist beispielsweise das Lötens eine vorteilhafte Alternative.

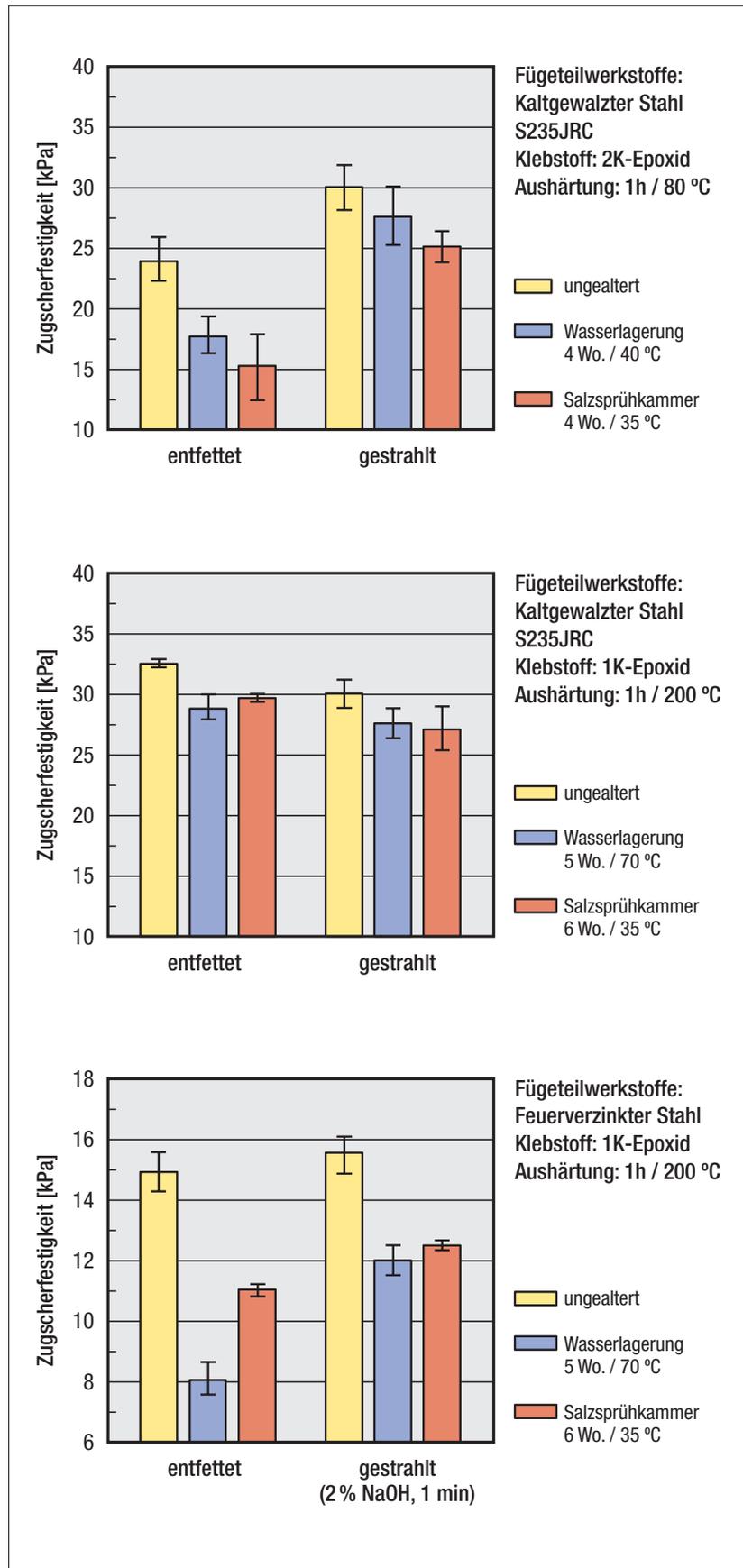


Abb. 9: Zugscherfestigkeiten von beschleunigt gealterten und ungealterten Stahlklebungen

Geklebte Stahlverbindungen können auch bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt eingesetzt werden. Bis zu Temperaturen von etwa -40 bis -55 °C bestehen keinerlei Bedenken, wenn der Klebstoff genügend plastische Verformbarkeit aufweist. Erst bei tieferen Temperaturen ist mit Versprödung und Festigkeitsabfall zu rechnen. Dies gilt nicht für Silikone und hochplastifizierte Systeme für spezielle Tieftemperatureinsätze.

Wird ein oberflächenveredelter, lackierter oder kunststoffbeschichteter Stahl geklebt, ist die Wärmebeständigkeit der Beschichtung zu beachten.

4.5.2 Feuchtigkeit

Feuchtigkeit aus umgebenden Medien, Flüssigkeiten und der Atmosphäre können sich negativ auf die Eigenschaften von Stahl-Klebeverbindungen auswirken.

Wasser kann die Klebungen korrosiv an den Fügeiteilkanten angreifen. Ausgehend von dieser Kantenkorrosion kann eine beschleunigte Schädigung im Klebschichtbereich eintreten und die Klebeverbindung zerstören. Diese sog. Primärkorrosion, die für das Langzeitverhalten von Metallklebungen generell als besonders problematisch angesehen werden muss, lässt sich durch geeignete Schutzschichten und Versiegelungen wirkungsvoll verhindern.

Die Widerstandsfähigkeit im Grenzschichtbereich als wichtigstes Kriterium einer Klebung hängt wesentlich von den Eigenschaften der Fügeiteile wie z.B. der verwendeten Stahlqualität, dem durch Vorbehandlungsverfahren im Sinne guter Beständigkeit modifizierbaren Oberflächenzustand, aber auch von der Chemie bzw. Struktur der Klebstoffe ab.

Abb. 9 zeigt, wie die Langzeitbeständigkeit von Klebungen durch Klebstoffauswahl oder Anwendung bestimmter Oberflächenvorbehandlungsverfahren gesteigert werden kann.

Zusätzlich können adhäsionsverbessernde Haftvermittler eingesetzt werden. So lassen sich Klebungen realisieren, die unter dem Aspekt der Feuchtigkeitsbeständigkeit eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer aufweisen.

5 Gestaltung und Dimensionierung von Klebeverbindungen

5.1 Gestaltung

Neben den Eigenschaften von Klebschicht und Fügeiteiloberflächen bzw. -werkstoffen sowie den Beanspruchungsbedingungen ist die klebgerechte konstruktive Gestaltung der Verbindung grundlegende Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit einer Klebung. Besondere Bedeutung hat in diesem Zusammenhang die mechanische Beanspruchung, der eine Klebeverbindung unterliegt (Abb. 10).

Ausgelegt werden sollten Klebeverbindungen bevorzugt auf Schubbelastungen. Ein auf Zug beanspruchter Stumpfstoß ist wegen

der geringen Zugfestigkeit der Klebstoffe konstruktiv möglichst zu vermeiden. In einem solchen Verbund kann die Gesamtfestigkeit der Fügeiteile nicht ausgenutzt werden.

Ungünstig auf Klebeverbindungen wirken sich auch Schäl- oder Spaltbeanspruchungen aus, da im Klebstoff hohe Spannungskonzentrationen linienförmig auftreten und kein Flächeneffekt besteht. Bei dieser Beanspruchung wirkt sich die geringe Festigkeit der Polymere im Vergleich zu den Metallen besonders ungünstig aus. Bei unvermeidbarer Schäl- bzw. Spaltbeanspruchung kann die Linienbelastung durch geeignete Maßnahmen wie z.B. Flächenvergrößerung oder Steifigkeitserhöhung verringert werden. Die Empfindlichkeit gegenüber Schälbeanspruchungen wurde in den letzten Jahren zudem durch verbesserte Plastifizierungsmöglichkeiten der Klebstoffe erheblich reduziert.

Bei Zugscherverbindungen ist zu beachten, dass eine Vergrößerung der Überlappungslänge nicht zu einer proportionalen Festigkeitssteigerung des Verbunds führt, da die Spannungsverteilung im Längs-

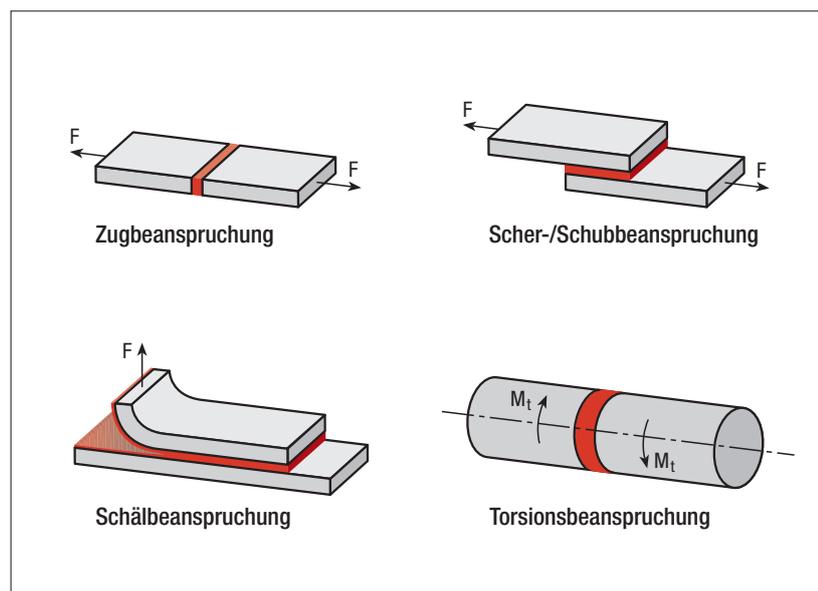


Abb. 10: Beanspruchungen von Klebeverbindungen

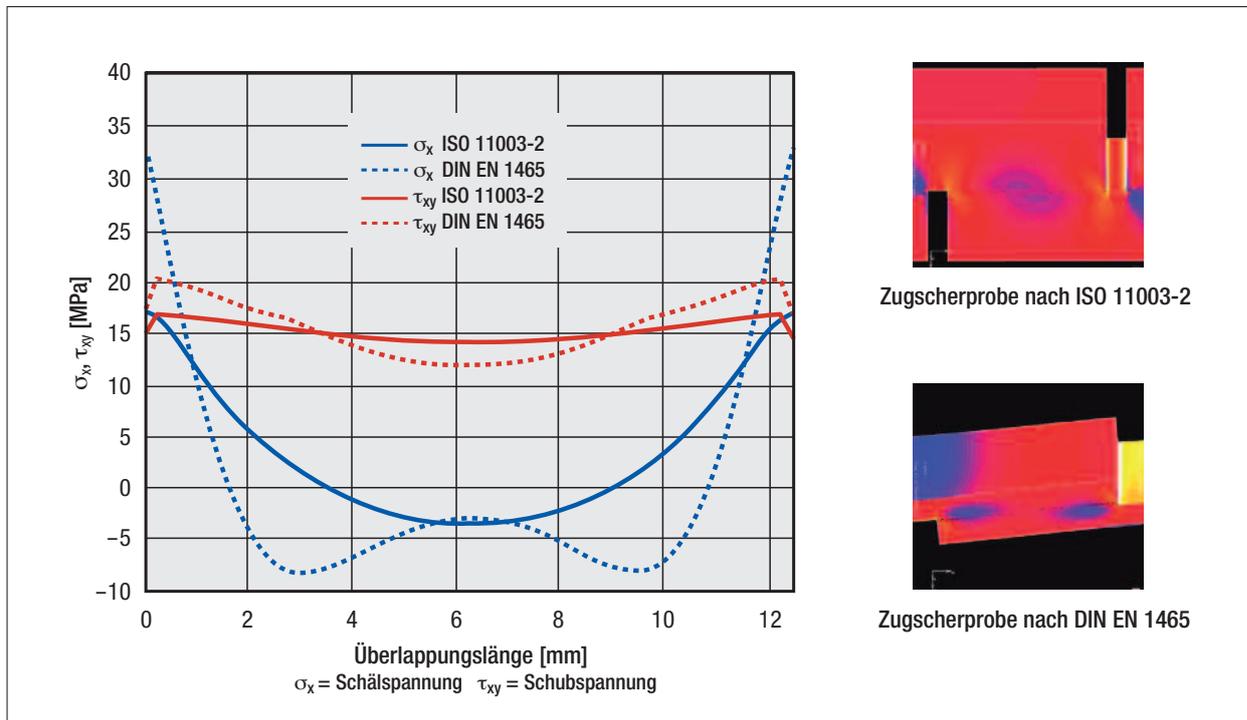


Abb. 11: Spannungsverteilung in einschnittig überlappter Zugscherprobe nach ISO 11003-2 und DIN EN 1465

schnitt einer Klebverbindung weder in den Fügeteilen noch in der Klebschicht selbst homogen ist (Abb. 11). Die Spannungsverteilung wird maßgeblich durch die Nachgiebigkeit der Fügeteile, Dicke der Klebschicht und das Spannungs-Dehnungsverhalten des Klebstoffs beeinflusst.

Einige konstruktive Beispiele, die gemäß den vorstehenden Ausführungen vorteilhafte bzw. zu vermeidende Klebfugengeometrien aufweisen, sind in Abb. 12 dargestellt.

Zusammengefasst sollten bei der Gestaltung von Klebverbindungen folgende Grundsätze berücksichtigt werden:

- Sicherstellung ausreichend großer Klebflächen
- Beanspruchung der Klebverbindung möglichst auf Schub
- Gewährleistung einer möglichst homogenen Spannungsverteilung
- Dimensionierung der Klebschichtdicke entsprechend dem zu verwendenden Klebstoff

5.2 Dimensionierung

Hinweise für die überschlägige Dimensionierung bei einfachen Verbindungsgeometrien geben die technischen Datenblätter der Klebstoffhersteller. Für die Berechnung komplexer Anwendungen stehen analytische und numerische Verfahren zur Verfügung, die die klebstoffspezifischen Materialeigenschaften berücksichtigen und an den jeweiligen Einzelfall angepasst werden müssen, z. B. [3].

6 Klebtechnische Fertigung

6.1 Prozessgestaltung

Die Leistungsfähigkeit geklebter Verbindungen mit Stahlfügeteilen hängt wesentlich von einem stabilen Fertigungsprozess ab. Voraussetzung für diesen ist, dass die Randbedingungen der in der Qualifizierungsphase durchgeführten Versuche in die Serienfertigung überführt werden, unabhängig da-

von, ob manuell oder automatisch gefertigt werden soll. Die Randbedingungen beziehen sich vor allem auf:

- Zustand der Oberflächen
- Prozesstemperaturen, -zeiten und -drücke

Eine Besonderheit der Klebtechnik besteht darin, dass sich die Eigenschaften der Verbindung erst im Laufe der Fertigung einstellen, da die ausgehärtete Klebschicht durch chemische Reaktion aus den Ausgangsstoffen (Monomere, Prepolymere) entsteht. Die Adhäsion zwischen Klebstoff und Fügeteilen sowie die Kohäsion des Klebstoffs können im Verlauf der Fertigung sehr leicht und oftmals auch unbewusst beeinflusst werden. Deshalb muss der Klebprozess exakt unter den zuvor spezifizierten Bedingungen durchgeführt werden. In der Praxis zeigt sich ein deutlicher individueller Einfluss bei manueller Ausführung, weshalb die klebtechnische Fertigung in zunehmendem Maße automatisiert durchgeführt wird.

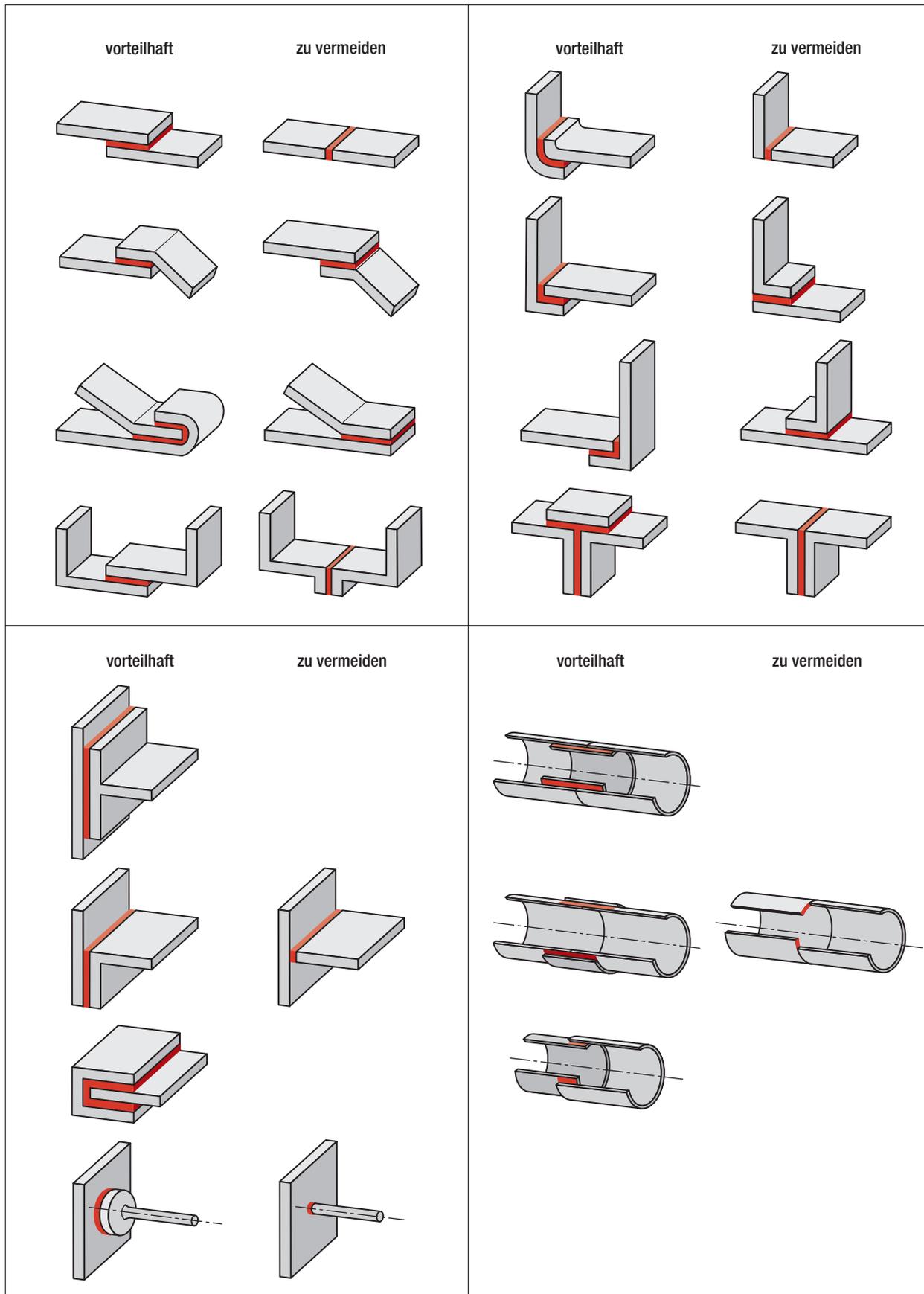


Abb. 12: Beanspruchungsgerechte Klebfugengestaltung

Die klebtechnische Fertigung kann in die folgenden Teilschritte gegliedert werden:

- Vorbereiten der Fügeteile
- Vorbereiten der Klebstoffe
- Auftragen der Klebstoffe
- Fügen und Fixieren
- Aushärten der Klebschicht

Da die Qualität des geklebten Endprodukts nicht zu 100% zerstörungsfrei überprüft werden kann, kommt der Qualitätssicherung eine große Bedeutung zu.

6.1.1 Vorbereiten der Fügeteile

Zur Herstellung einer Klebung, die dem festgelegten Qualitätsstandard entspricht, ist es erforderlich, die Oberflächen der Fügeteile vor dem Klebstoffauftrag in einen definierten und kontrollierbaren Zustand zu überführen. Dieser kann durch entsprechende Reinigungs- und gegebenenfalls Vorbehandlungsprozesse erreicht werden.

Zu den industriell üblichen Reinigungsmethoden zählen:

- mechanische Reinigung (z.B. Schmirgeln oder Strahlen)
- Wischentfettung mit lösungsmittelgetränkten Tüchern
- Tauchentfettung im Ultraschallbad
- Dampfentfettung mit Lösungsmitteln
- Waschen mit alkalischen wässrigen Lösungen
- Hochdruckwasserstrahlen

Als günstig zum Entfetten mit organischen Lösungsmitteln erweisen sich Ultraschallbäder oder Dampfentfettungsanlagen, in denen sich mit hoher Zuverlässigkeit die besten Reinigungsergebnisse erzielen lassen. Bedingt durch die VOC-Richtlinie kommen vermehrt Reinigungsprozesse mit alkalischen Lösungen zum Einsatz. Die bei erhöhten Temperaturen durchgeführten Prozesse besitzen eine den organischen Lösungsmitteln vergleichbare Reinigungswirkung,

erfordern aber einen nachgeschalteten Spülprozess. Zu beachten ist, dass nicht nur das Reinigungsbad, sondern auch das Spülbad regelmäßig auf Wirksamkeit kontrolliert werden muss. Beim Wechsel der Bauteile vom Reinigungsbad in das Spülbad kommt es zu einer Verschleppung der Reinigungsmittel, wodurch die Wirksamkeit des Spülvorgangs herabgesetzt wird.

Bei einigen klebtechnischen Anwendungen, insbesondere im automobilen Karosseriebau, kann durch speziell formulierte Klebstoffsysteme mit hoher Ölverträglichkeit auf eine Reinigung und auch Vorbehandlung verzichtet werden.

Eine Vorbehandlung kann auch bei spanend hergestellten Stahlbauteilen entfallen. Da die durchgeführte mechanische Oberflächenbearbeitung bei den meisten Stahlsorten die Voraussetzung für eine gute Haftung der Klebstoffe schafft, wird durch das Entfernen der Kühlschmierstoffe bereits ein ausreichender Oberflächenzustand erreicht.

Bei hohen Anforderungen an die Beständigkeit der Klebung, insbesondere gegenüber feuchtwarmer Umgebung, ist nach dem Reinigen/Entfetten eine nachfolgende Oberflächenvorbehandlung erforderlich. Die gebräuchlichsten Verfahren sind:

- Strahlen
- Schleifen
- Bürsten
- bei nichtrostenden Stählen auch Beizen

Die Eignung der Oberflächenbehandlungsverfahren ist von der verwendeten Stahlqualität abhängig und vorab im Rahmen der Qualifizierung zu überprüfen. Gute Oberflächeneigenschaften werden insbesondere durch Strahlverfahren erzielt, wobei sich das Strahlmittel Korund als besonders geeignet erwiesen hat. Zu beachten ist, dass der Strahlprozess immer erst nach einer Entfettung durch-

geführt und das Strahlmittel auch im Neuzustand auf Kontaminationen überprüft wird. Beim Druckluftstrahlen kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Trägermedium geringe Ölmengen aus dem Kompressor enthält. Zudem kann Strahlgut an der bearbeiteten Oberfläche anhaften. Daher ist eine nochmalige Reinigung ratsam.

Auf die Besonderheiten bei der Reinigung und Vorbehandlung nichtrostender Stähle wird in Abschnitt 8.3 näher eingegangen.

Beim Kleben verzinkter Stahlteile ist die Art des Verfahrens zu berücksichtigen, mit dem der Zinküberzug aufgebracht wurde. Bei der Stückverzinkung von Bauteilen bilden sich Oberflächen mit zum Teil großen Kristalliten aus. Diese Kristallite sind für das Kleben von Bedeutung, da sie aufgrund ihrer Vorzugsrichtungen lokale Spannungsspitzen in der Klebschicht hervorrufen können. In der Praxis führt dies zu stark schwankenden Haftfestigkeiten. Bei der Bandverzinkung (Schmelztauch- oder elektrolytisches Verfahren) entstehen vergleichsweise kleine Kristallite. Diese Oberflächen weisen in der Praxis gute Haftfestigkeiten auf. Grundsätzlich gilt sowohl für die Stück- als auch für die Bandverzinkung, dass frische Oberflächen für eine Klebung oftmals ungünstig sind. Die sich unter der Bewitterung bildende Deckschicht ist noch sehr dünn und chemisch nicht stabil.

Des Weiteren ist zu beachten, dass bestimmte Spaltprodukte aus Klebstoffen (z.B. Essigsäure aus acetatvernetzenden 1K-RTV-Silikon-Klebstoffen) als Elektrolyt wirken und zu einer Schädigung der Zinkschicht bis hin zu ihrem vollständigen Abbau führen können. Mit dem Verlust des Korrosionsschutzes geht, begünstigt durch das saure Medium, eine beschleunigte Korrosion des Grundwerkstoffs einher.

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, dass für eine opti-

mierte klebtechnische Verbindung je nach Art der Verzinkung und deren Oberflächeneigenschaften geeignete Klebstoffe und Vorbehandlungsverfahren ausgewählt werden müssen.

Beim Kleben organisch beschichteter Stahlbleche, wie sie beispielsweise im Coil-Coating-Verfahren hergestellt werden, genügt bei ausreichender Benetzbarkeit als Vorbereitung für das Kleben üblicherweise eine Reinigung und gegebenenfalls eine schwache mechanische Aufrauung. Eine Entfernung der Beschichtung ist zu vermeiden. Bei der Klebstoffauswahl ist zu berücksichtigen, dass in diesem Fall die Haftung des Klebstoffs auf einer Kunststoffoberfläche erfolgt. Zudem wird die Festigkeit der Klebverbindung bei solchen Mehrschichtsystemen auch von der Haftung der Beschichtung zum Grundwerkstoff sowie deren Kohäsionsfestigkeit bestimmt.

6.1.2 Vorbereiten der Klebstoffe: Lagern, Dosieren, Mischen

Die Funktionsfähigkeit geklebter Verbindungen hängt in entscheidendem Maß davon ab, wie die Klebstoffe gelagert, gehandhabt, dosiert und gemischt werden. Klebstoffe verändern sich bei längerer Lagerung in ihrer Reaktivität. Dieser Prozess kann durch ungünstige Bedingungen beschleunigt werden. Deshalb sind die vom Klebstoffhersteller vorgegebenen Lagerbedingungen unbedingt einzuhalten. Das Lager selbst muss nach dem First-in-first-out-Prinzip (FIFO) geführt werden, um eine Überlagerung des Klebstoffs zu vermeiden.

Klebstoffe sind als chemische Zubereitungen per Definition Gefahrstoffe. Dies ist bei der Handhabung von Klebstoffen zu berücksichtigen, insbesondere was den innerbetrieblichen Transport sowie den persönlichen Arbeitsschutz der Mitarbeiter betrifft. Je nach Klebstoff und Anwendung

kann der Einsatz von technischen Arbeitsschutzmaßnahmen wie z. B. die Installation einer Absaugung erforderlich sein.

Zur Erzielung eines spezifischen Eigenschaftsprofils werden Klebstoffen Füll- und Funktionsstoffe beigemischt. Diese überwiegend anorganischen Bestandteile können sedimentieren, speziell nach längerer Lagerung. Ob ein Klebstoff zu Sedimentation neigt, ist im Verarbeitungsdatenblatt des Klebstoffherstellers vermerkt. Vor der Benutzung ist ein derartiger Klebstoff im Liefergebilde zu homogenisieren.

Bei der Verarbeitung von Mehrkomponentensystemen müssen die einzelnen Komponenten in einem festgelegten (stöchiometrischen) Mischungsverhältnis dosiert werden. Bei manueller Verarbeitung sind geeignete Mischbecher und Waagen einzusetzen. Für das Mischen können Edelstahlspatel oder bei größeren Mengen auch Laborrührer verwendet werden, wobei darauf geachtet werden muss, möglichst wenig Blasen in den Klebstoff einzurühren.

Besonderes Augenmerk ist auf das homogene Mischen der beiden Komponenten zu richten. Sind die Komponenten unterschiedlich eingefärbt, erkennt man die Homogenität an der schlierenfreien Mischfarbe. Unterscheiden sich die Komponenten in ihrer Farbe nicht oder nur geringfügig, ist der Mischvorgang mittels geeigneter Vorversuche zu qualifizieren.

Werden die Klebstoffe maschinell dosiert und gemischt, ist die korrekte Einstellung der Maschine regelmäßig zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren. Bei der maschinellen Verarbeitung erfolgt die Mischung bedarfsgerecht direkt vor der Applikation mittels statischer oder dynamischer Mischer. Auf diese Weise können auch Klebstoffe mit geringen Verarbeitungszeiten prozesssicher eingesetzt werden, so dass sich insgesamt sehr kurze Taktzeiten realisieren lassen.

6.1.3 Auftragen der Klebstoffe

Um Klebstoffe manuell aufzutragen, stehen geeignete Hilfsmittel wie z. B. Spatel, Zahnspachtel, Pinsel oder Walzen zur Verfügung. Für die maschinelle Applikation stellt die darauf spezialisierte Industrie unterschiedliche Verfahren bereit (**Abb. 13**).

6.1.4 Fügen und Fixieren

Nach der Applikation des Klebstoffs werden die Bauteile zusammengefügt. Hierbei sind die durch den Klebstoff vorgegebenen Prozesszeiten („Topfzeit“, „Hautbildezeit“, „offene Zeit“ etc.) zu berücksichtigen. Großen Einfluss auf diese haben die klimatischen Bedingungen am Fertigungsort (Temperatur und relative Luftfeuchte). So führt beispielsweise bei 2K-Klebstoffen bereits eine Erhöhung der Raumtemperatur von 23 °C (Normklima) auf 30 °C näherungsweise zu einer Halbierung der im Datenblatt angegebenen Topfzeit. Das Fügen muss vor Ablauf der genannten Prozesszeiten abgeschlossen sein. Außerhalb des vorgegebenen Zeitfensters gefügte Verbindungen erreichen nicht die üblicherweise zu erwartenden Endeigenschaften (Festigkeit, Langzeitbeständigkeit).

Für die Dauer der Aushärtung, mindestens aber bis zur Erreichung der Handhabungsfestigkeit, sind die Fügebauteile gegen seitliches Verschieben zu fixieren. Erfordert der eingesetzte Klebstoff eine definierte Anpressung, ist eine geeignete Druckvorrichtung einzusetzen, die einen gleichmäßigen Druck über die gesamte Fügefläche ausübt.

Bei großen Stückzahlen und/oder langen Härtezeiten entscheidet das Fixieren über die Wirtschaftlichkeit des Klebverfahrens, da Fixiervorrichtungen kostenintensiv sind. Idealerweise wird dies bereits in der Konstruktionsphase berücksichtigt und eine Fixiervor-

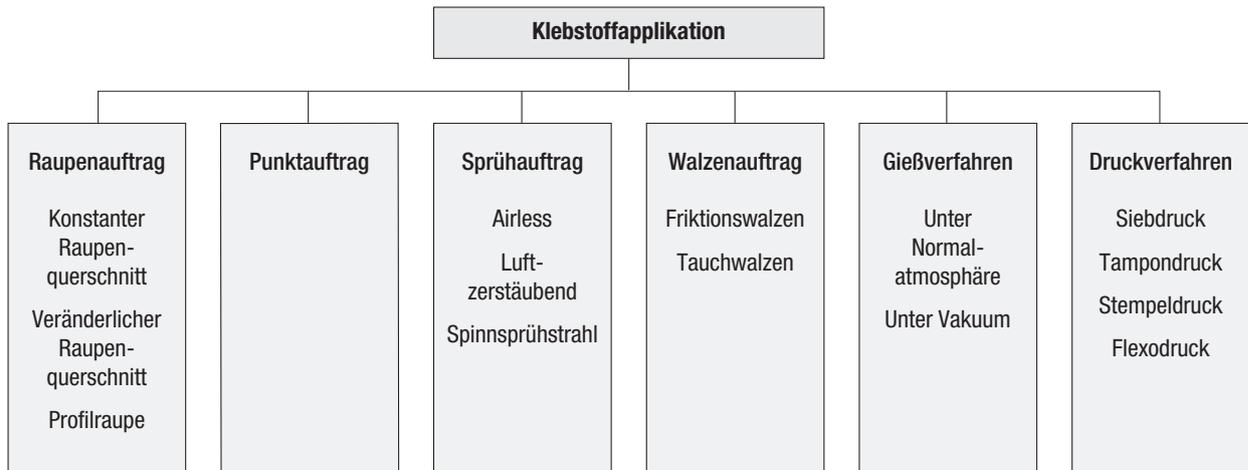


Abb. 13: Übersicht über die Applikationsverfahren

richtung durch z.B. Nut-Feder-Konstruktionen überflüssig. Auch die Kombination mit Widerstandspunktschweißen oder mit mechanischen Fügeverfahren (Clinchen, Stanznieten) ersetzt eine aufwändige Fixierung und ermöglicht ein verbessertes Eigenschaftsprofil der geklebten Stahlkonstruktion (siehe auch Abschnitt 7.1).

6.1.5 Aushärten der Klebschicht

Wie jede chemische Reaktion ist auch das Aushärten einer Klebschicht von den Randbedingungen wie z.B. Temperatur, Druck und Feuchtigkeit abhängig. Jahreszeitlich bedingte Änderungen des Raumklimas können die chemische Reaktion erheblich beeinflussen. Bei der Gestaltung klebtechnischer Fertigungsprozesse ist dies in der Qualifizierungsphase zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in die Festlegung der Fertigungsabläufe einzubeziehen.

Die zu Elastomeren vernetzenden Klebstoffe wie z.B. 1K-Polyurethane benötigen Luftfeuchtigkeit für die chemische Reaktion. Werden großflächige Klebungen mit diesen Klebstoffen ausgeführt, ist auf einen ausreichenden Abstand der einzelnen Raupen zueinander mit der Möglichkeit des Luftzutritts ebenso zu achten wie auf

eine ausreichend lange Ruhezeit der Bauteile (Reaktionsfortschritt ca. 3 mm in 24 h bei Normklima, d.h. 23 °C und 50 % rel. Feuchte).

Erfordert der Klebstoff eine erhöhte Härtetemperatur, kann diese mit verschiedenen Wärmequellen in die Klebschicht eingebracht werden. Zu beachten ist, dass sich die vom Klebstoffhersteller vorgegebenen Zeit-Temperatur-Angaben auf die Temperatur in der Klebschicht und nicht in der Umgebung beziehen. Durch geeignete Vorversuche ist die für das Aufheizen zusätzlich benötigte Zeit zu ermitteln.

Werden Stahlbauteile mit transparenten Bauteilen geklebt, können strahlungshärtende Klebstoffe eingesetzt werden (z.B. UV-härtende Klebstoffe). Der für die Aushärtung dieser Klebstoffe wesentliche Parameter ist die Strahlungsintensität. Da über die Lebensdauer der Strahlungsquelle deren Intensität abnimmt, ist diese periodisch zu überprüfen und gegebenenfalls auszutauschen.

6.2 Qualitätssicherung

Zur Sicherung der Qualität geklebter Verbindungen müssen neben den Klebprozessen auch die vor- und nachgeschalteten Prozessschritte berücksichtigt werden.

In der DVS-Richtlinie 3310 „Qualitätsanforderungen in der Klebtechnik“ wird ein Maßnahmenkatalog für drei unterschiedliche Anforderungen (umfassend, Standard, elementar) definiert. Neben der bereits in den Vorbemerkungen erwähnten klebtechnischen Weiterbildung ist diese Richtlinie ein praxisgerechtes Hilfsmittel zur Etablierung einer unternehmens- und produktspezifischen Qualitätssicherung. Für das Kleben im Schienenfahrzeugbau existiert mit der Norm DIN 6701 ein explizites Regelwerk für die Qualitätssicherung durch Hersteller und Zulieferer.

7 Hybridfügen

Unter Hybridfügen wird in der Regel die Kombination von zwei elementaren Fügeverfahren verstanden, die parallel oder zeitlich versetzt in einem lokal begrenzten Werkstückbereich gemeinsam eingesetzt werden. Dabei ergänzen sich die spezifischen Eigenschaften der kombinierten Fügeverfahren in sinnvoller Weise, so dass sich Vorteile in der fertigungstechnischen Umsetzung sowie verbesserte Verbindungseigenschaften ergeben. Wichtige industrielle Bedeutung für das Fügen dünner Bleche hat insbesondere die Kombi-

nation des Klebens mit dem Widerstandspunktschweißen sowie mit den punktförmigen mechanischen Fügeverfahren wie z.B. Nieten oder Clinchen.

7.1 Allgemeiner Verfahrensablauf und Eigenschaften

Der Fertigungsprozess zur Herstellung der genannten Hybridverbindungen besteht aus vier grundlegenden Prozessschritten:

- Klebstoffapplikation
- Fügepositionierung
- Punktschweißen bzw. mechanisches Fügen
- Klebstoffaushärtung

Beim Einsatz von Nietverfahren ist gegebenenfalls eine zusätzliche Vorlocheroperation zu berücksichtigen. Durch Variation der Prozessschrittfolge ergeben sich unterschiedliche Verfahrensvarianten (Abb. 14).

Bei der industriell vorwiegend eingesetzten Fixiermethode wird der Klebstoff vor dem Punktschweißen bzw. mechanischen Fügen auf die Fügeteile aufgetragen und erst danach ausgehärtet. Die punktförmigen Verbindungselemente übernehmen während der Klebstoffaushärtung die Fixierung der Fügeteile und ermöglichen damit unmittelbar die weitere Handhabung des Bauteils. Auf

diese Weise kann das Kleben auch in Fertigungsprozesse mit kurzen Taktzeiten integriert werden.

Bei der Injektions- bzw. Kapillarmethode wird der Klebstoff nach dem Setzen des punktförmigen Verbindungselements eingebracht. Voraussetzung hierfür ist die Verwendung eines niedrigviskosen Klebstoffs, der unter Ausnutzung des Kapillareffekts in die Fügezone eindringen kann. Zu berücksichtigen ist, dass hierbei der Klebstoff den Fugebereich nicht vollständig ausfüllt und aufgrund der geringen Viskosität leicht wieder austreten kann. Dementsprechend ist bei der weiteren Handhabung auf die Lage des Bauteils zu achten.

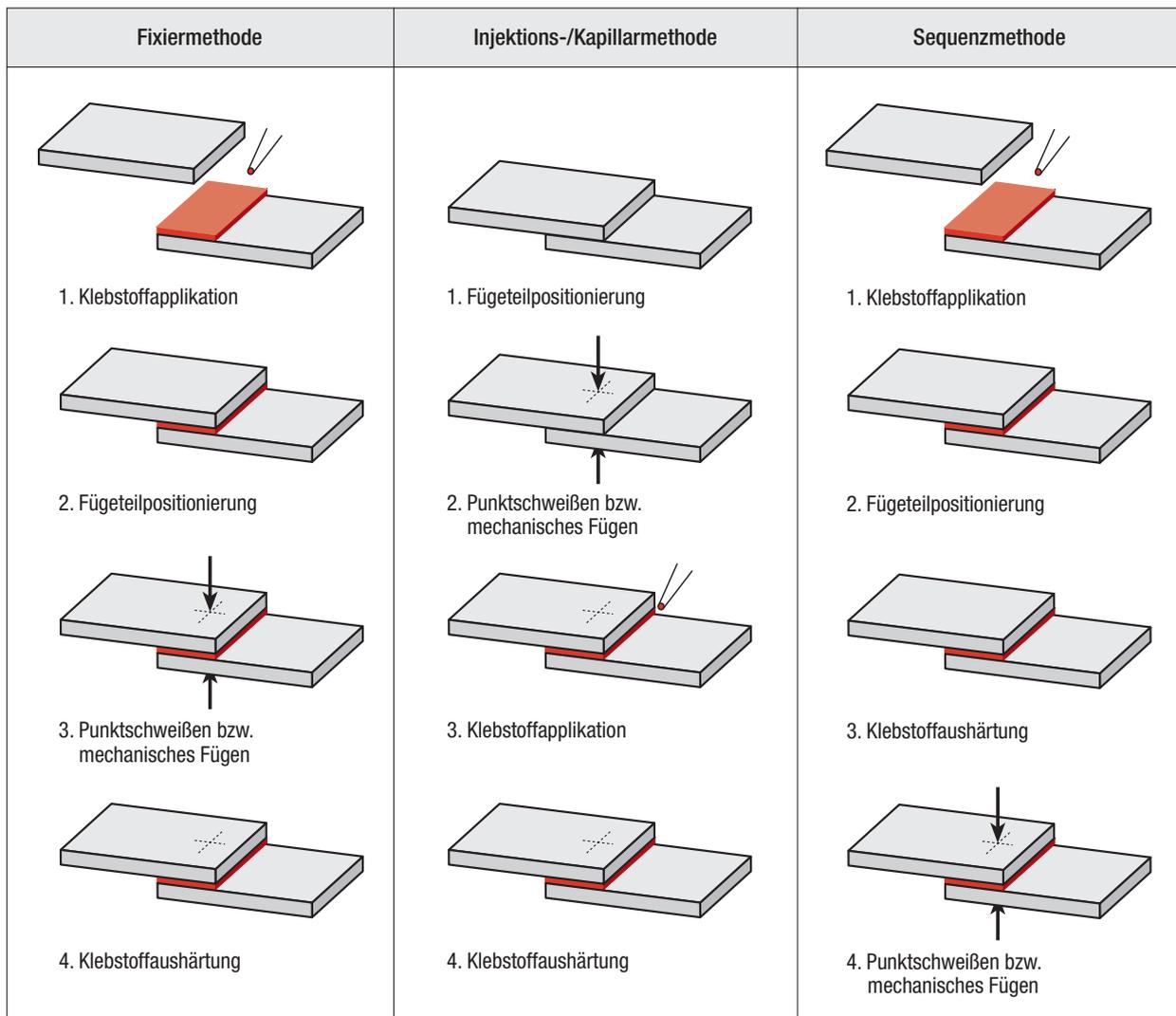


Abb. 14: Verfahrensvarianten beim Hybridfügen [4]

Abb. 15:
Punktschweiß-
geklebter T-Stoß



Bei der Sequenzmethode erfolgt das punktförmige Fügen erst nach Auftrag und Aushärtung des Klebstoffs. Bei ausgehärteten oder vorgehärteten Klebstoffen muss jedoch mit einer örtlichen Schädigung der Klebschicht gerechnet werden. Zudem ist diese Variante für das Widerstandspunktschweißkleben ungeeignet, da die Klebschicht den Übergangswiderstand für den Schweißprozess erhöht.

Hybridgefügte Verbindungen zeichnen sich bei Nutzung der spezifischen Anwendungsvorteile und Anwendung geeigneter Dimensionierungsverfahren durch ein Eigenschaftsprofil aus, das dem der elementaren Klebverbindungen zum Teil überlegen ist:

- Erzeugung einer sofortigen Anfangsfestigkeit nach dem Fügen
- höhere Verbindungssteifigkeit
- vielfach verbesserte Festigkeitseigenschaften unter schwingender Belastung
- höheres Energieaufnahmevermögen unter schlagartiger Belastung
- Unterstützung der Klebschicht bei Schäl- und statischer Langzeitbeanspruchung
- geringerer Temperatureinfluss auf die Festigkeitseigenschaften
- zusätzliche Verbindungssicherheit durch zeitverzögertes Versagen der punktförmigen Verbindung gegenüber der Klebschicht

Die Beständigkeit hybridgefügter Verbindungen gegenüber Spalt- und Kontaktkorrosion liegt durch die gas- und flüssigkeitsdichte Ausführung des Fügebereichs auf dem Niveau elementarer Klebverbindungen. Bei mechanischen Fügeverfahren ist zur Vermeidung von Kontaktkorrosion allerdings ein entsprechender Oberflächenschutz der mechanischen Verbindungselemente erforderlich.

Inwieweit die Festigkeitseigenschaften einer Hybridverbindung stärker von der Klebschicht oder dem punktförmigen Verbindungselement geprägt werden, hängt im Wesentlichen von den mechanischen Eigenschaften der Klebschicht ab. Mit dem Einsatz hochfester Klebstoffe, die in der Regel eine deutliche Festigkeits- und Steifigkeitssteigerung bewirken, wird das Kleben zum Hauptfügeverfahren.

7.2 Punktschweiß- klebverbindungen

Das Punktschweißkleben kann grundsätzlich für alle Fügeaufgaben eingesetzt werden, für die sich auch das elementare Widerstandspunktschweißen eignet. Im Karosseriebau zählt das Punktschweißkleben inzwischen zu den Standardfügeverfahren. **Abb. 15** zeigt das Punktschweißkleben beispiel-

haft an einer bauteilähnlichen Probe.

Für die Fertigung punktschweißgeklebter Verbindungen nach der üblichen Fixiermethode ist es erforderlich, die Schweißparameter (Schweißstromstärke, Elektrodenkraft und Schweißzeit) anzupassen, da die an widerstandspunktgeschweißten Verbindungen ermittelten Schweißbereiche in der Regel verschoben bzw. eingegrenzt werden. Der Reduktion der Schweißbereiche kann durch längere Schweißzeiten und höhere Elektrodenkräfte entgegengewirkt werden [5].

Einen großen Einfluss auf den Schweißprozess hat die Viskosität des eingesetzten Klebstoffs. Hochviskose Klebstoffe erfordern aufgrund ihrer geringeren Fließfähigkeit einen zusätzlichen Nebenschluss für die prozesssichere Ausführung der ersten Schweißpunkte. Dies gilt insbesondere in Kombination mit eingeschränkt umformbaren, beispielsweise hochfesten Blechen. Klebstoffe mit mittlerer bis geringer Viskosität lassen sich dahingehend einfacher verarbeiten und ermöglichen verringerte Vorhalte- und Schweißzeiten. Den gegenläufigen Forderungen nach guter Verarbeitbarkeit (geringe Viskosität) und hoher Auswaschbeständigkeit (hohe Viskosität) kann durch die Verwendung sog. thixotroper Klebstoffe, deren Viskosität mit zunehmender Verformung abnimmt, begegnet werden. Ein direkter Einfluss der rheologischen Eigenschaften der Klebstoffe, d. h. ihres Verformungs- und Fließverhaltens, auf die Qualität der Schweißpunkte ist bislang nicht bekannt [5].

Beim Punktschweißkleben von Fügeteilen aus höherfesten Werkstoffen besteht die Gefahr, den Klebstoff während des Schweißvorgangs zu entflammen. Ursächlich dafür ist einerseits die mit zunehmender Werkstofffestigkeit abnehmende Wärmeleitfähigkeit, andererseits der größere erforderliche Energieeintrag. Um diesen

so gering wie möglich zu halten, sollten Randschweißungen vermieden werden. Zudem sollte die Taktung des Prozesses eine Abkühlung der Bauteile zwischen den einzelnen Schweißungen ermöglichen [5], um Wärmestaus zu vermeiden.

Einer der wesentlichen Vorteile des Punktschweißklebens ist die verbesserte Verbindungssteifigkeit, wie das Kraft-Verformungsverhalten geklebter Probekörper unter quasistatischer Belastung zeigt (Abb. 16). Die Verwendung eines hochfesten Strukturklebstoffs ermöglicht die Ausnutzung der Fügeteilwerkstoffe bis zu annähernd 100 % ihrer Streckgrenze. Dies ist besonders relevant bei der Verwendung höherfester Stähle, deren Werkstoffausnutzung auf diese Weise maximiert werden kann.

Neben der höheren Steifigkeit weisen die hybridgefügten Zug-scherproben aber auch ein deutlich höheres Niveau der ertragbaren Maximalkräfte gegenüber den elementar punktgeschweißten Proben auf. Nach dem Versagen der Klebschicht verhindert das punktförmige Verbindungselement zudem den Rissfortschritt und damit einen spontanen Bruch der Verbindung.

Der geringe Unterschied in den maximalen Zugscherkräften zwischen den hybridgefügten und den elementar geklebten Verbindungen lässt sich darauf zurückführen, dass die beim Punktschweißkleben ergänzend eingesetzten Schweißpunkte die festigkeitsrelevante Klebfläche um mindestens ihre eigene Fläche sowie um eine gegebenenfalls zusätzlich geschädigte Klebfläche reduzieren.

Unter schlagartiger Belastung führt die rissstoppende Wirkung der Schweißpunkte zu höheren ertragbaren Zugscherkräften, sowohl im Vergleich zum elementaren Kleben als auch zum elementaren Widerstandspunktschweißen.

Die dämpfende Wirkung der Klebschicht und die gleichmäßi-

gere Spannungsverteilung in der Fügezone hybridgefügtter Verbindungen kommen besonders bei schwingender Belastung zum Tragen. Wie bereits an Proben aus weichen oder Tiefziehstählen nach-

gewiesen [7], lassen sich mit dem Punktschweißkleben auch bei hoch- und höchstfesten Stählen deutlich höhere Verbindungsfestigkeiten erreichen als mit den elementaren Fügeverfahren (Abb. 17).

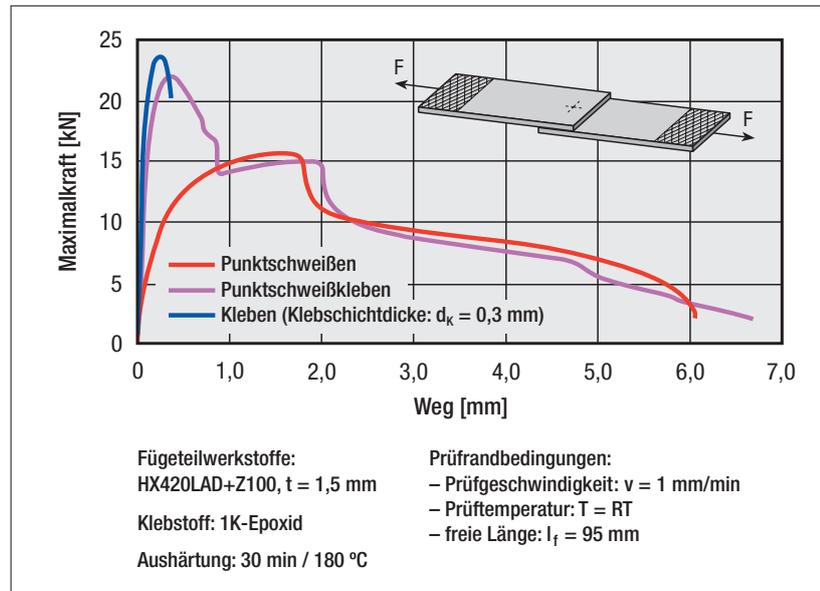


Abb. 16: Kraft-Verformungsverhalten unter quasistatischer Belastung [6]

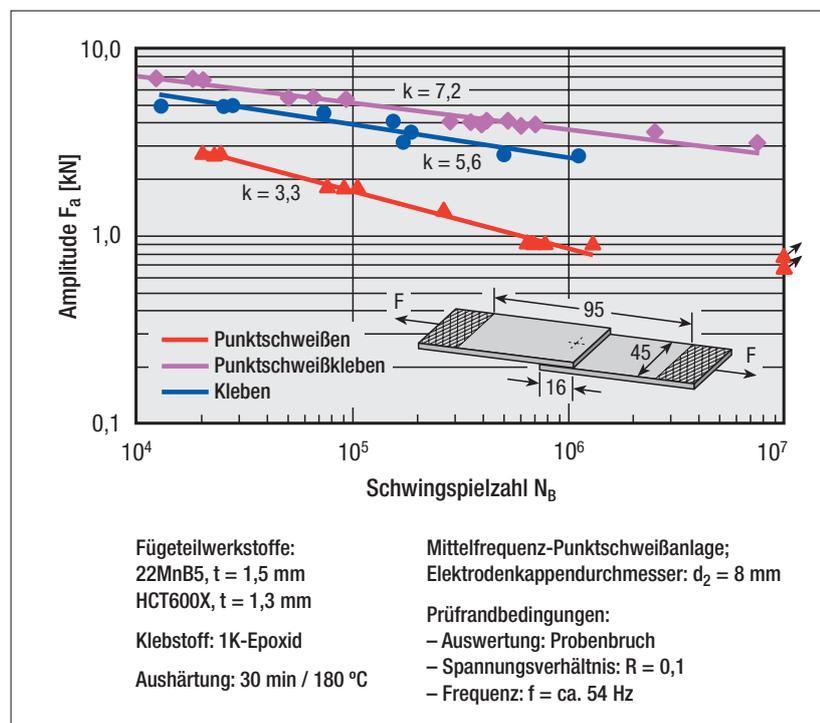


Abb. 17: Zugscherfestigkeiten punktschweißgeklebter und elementar gefügter Verbindungen unter schwingender Belastung [5]

Abb. 18:
Halbhohlstanz-
nietkleben zur
Herstellung einer
Verbindung in
Mischbauweise



Entscheidend hierfür sind neben den geometrischen Randbedingungen im Fugebereich vor allem die aufgetragene Menge und die rheologischen Eigenschaften des Klebstoffs. Durch sachgerechte Klebstoffauswahl und Anpassung der Nietgeometrie, Matrizengravur und Prozessparameter kann diese Beeinflussung jedoch weitestgehend unterbunden werden.

7.3 Nietklebverbindungen

Wie das Kleben selbst zählen auch die verschiedenen Nietverfahren zu den wärmearmen Füge-techniken. Das Nietkleben eignet sich deshalb im Vergleich zum Widerstandspunktschweißkleben besonders für das Fügen verzugs-empfindlicher oder beschichteter Fügeteile. Auch die Verbindung artfremder Fügeteilwerkstoffe ist ohne weiteres möglich.

Zur Herstellung von Nietkleb-verbindungen können Blind-, Voll-, Halbhohl- und Hohlните sowie Stanzniete (Voll- und Halbhohl-

stanzniete) eingesetzt werden. Eine durch Halbhohlstanznietkleben hergestellte Verbindung aus Stahl mit Aluminium im Bereich von A-Säule und Längsträger eines Pkw ist in **Abb. 18** dargestellt.

Den grundsätzlichen Verfahrens-ablauf beim Nietkleben am Beispiel des Halbhohlstanznietklebens mittels Fixiermethode zeigt **Abb. 19**. Bei dieser Methode sind Wechselwirkungen zwischen den kombinierten Fügeprozessen nicht auszuschließen, wodurch sowohl die Ausbildung der Nietverbindung als auch die der Klebschicht beeinflusst werden kann.

Während des Nietvorgangs ist eine Verschmutzung der Füge-werkzeuge, Bauteile und Auf-nahmeverrichtungen durch den unkontrollierten Austritt pastösen Klebstoffs zu vermeiden.

Nietklebverbindungen, aber auch Clinchklebverbindungen (vgl. Abschnitt 7.4) weisen bei Verwend-ung hochfester Strukturklebstoffe grundsätzlich ein ähnliches Verformungsverhalten unter quasistatischer und schlagartiger Belastung auf wie Punktschweißklebverbindungen. Obwohl die Zugscher-festigkeiten elementar genieteter sowie geclinchter Verbindungen gegenüber denen punktgeschweiß-

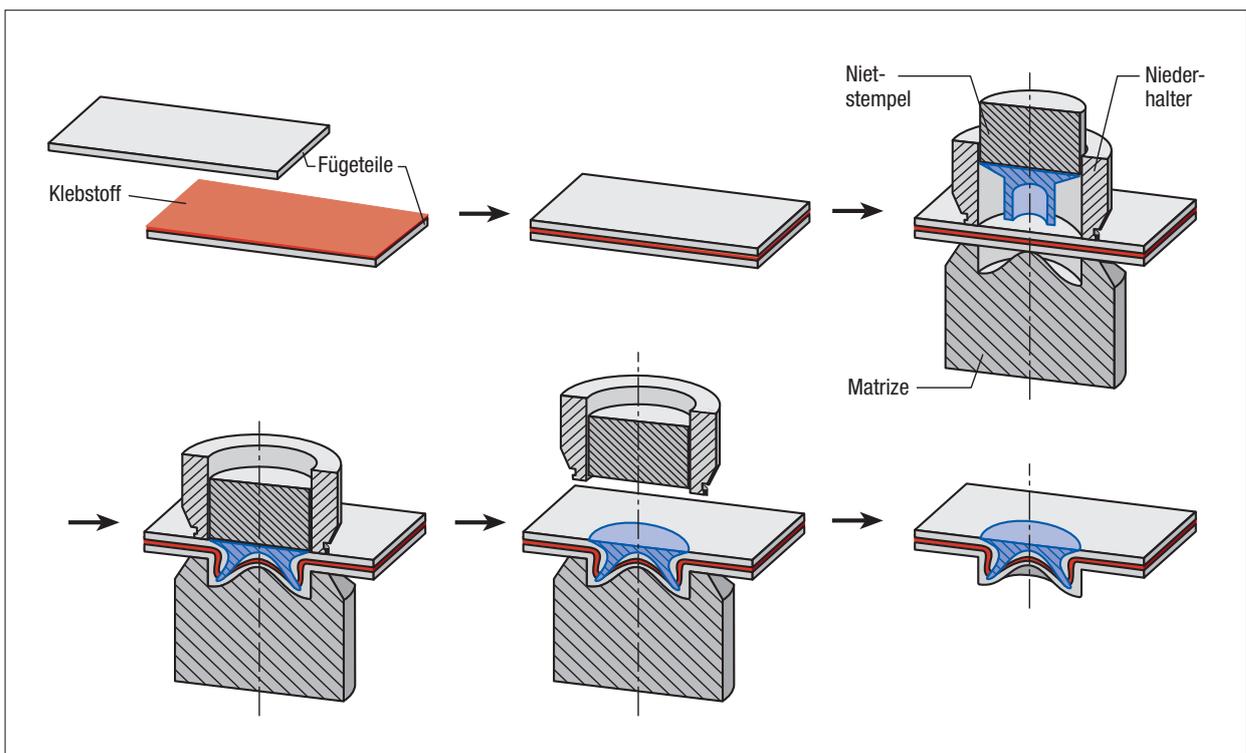
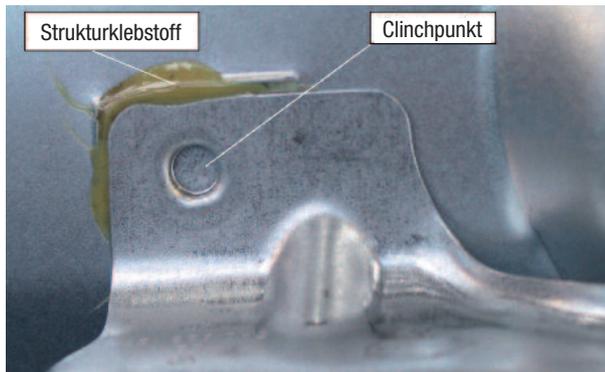


Abb. 19: Verfahrensablauf beim Halbhohlstanznietkleben

Abb. 20:
Clinchkleben zur
Aussteifung einer
Motorhaube



ter Verbindungen deutlich geringer sind, liegen die Festigkeiten der entsprechenden hybridgefügte Verbindungen allesamt auf ähnlichem Niveau.

Im Vergleich zu elementar geklebten Verbindungen sind die maximalen Festigkeiten stanznietgeklebter und clinchgeklebter Verbindungen ähnlich wie bei Punktschweißklebverbindungen etwas geringer (vgl. Abschnitt 7.2). Eine Ursache hierfür ist die durch den zusätzlichen Fügeprozess geschädigte Klebschicht [4].

7.4 Clinchklebverbindungen

Auch beim Clinchen handelt es sich um ein wärmearmes Fügeverfahren. Das Clinchkleben ermöglicht daher ebenfalls die Verbindung verzugempfindlicher oder beschichteter Fügeteile sowie unterschiedlicher Fügeteilwerkstoffe.

Für die Herstellung einer Clinchklebverbindung, wie sie am Beispiel einer Pkw-Motorhaube aus Tiefziehstahl in **Abb. 20** dargestellt ist, können einstufige und

mehrstufige Clinchverfahren mit und ohne Schneidanteil eingesetzt werden.

Der Verfahrensablauf am Beispiel der Kombination Kleben und Clinchen ohne Schneidanteil ist in **Abb. 21** dargestellt. Analog zum Nietkleben kann es auch beim Clinchkleben nach der Fixiermethode zu einer gegenseitigen Beeinflussung bei der Fügeelement- und Klebschichtausbildung kommen, der jedoch bei sachgerechter Ausführung entgegengewirkt werden kann (vgl. Abschnitt 7.3).

Ebenso gilt es, die Verschmutzung der Fügewerkzeuge, Bauteile und Aufnahmevorrichtungen durch einen unkontrollierten Klebstoffaustritt während des Clinchvorgangs zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund ist beim Clinchkleben mit pastösen Klebstoffen die Verwendung von Clinchsystemen ohne Schneidanteil vorteilhaft. Bei ausreichender Überdeckung werden durch die dichten Verbindungselemente Verschmutzungen der Clinchwerkzeuge verhindert.

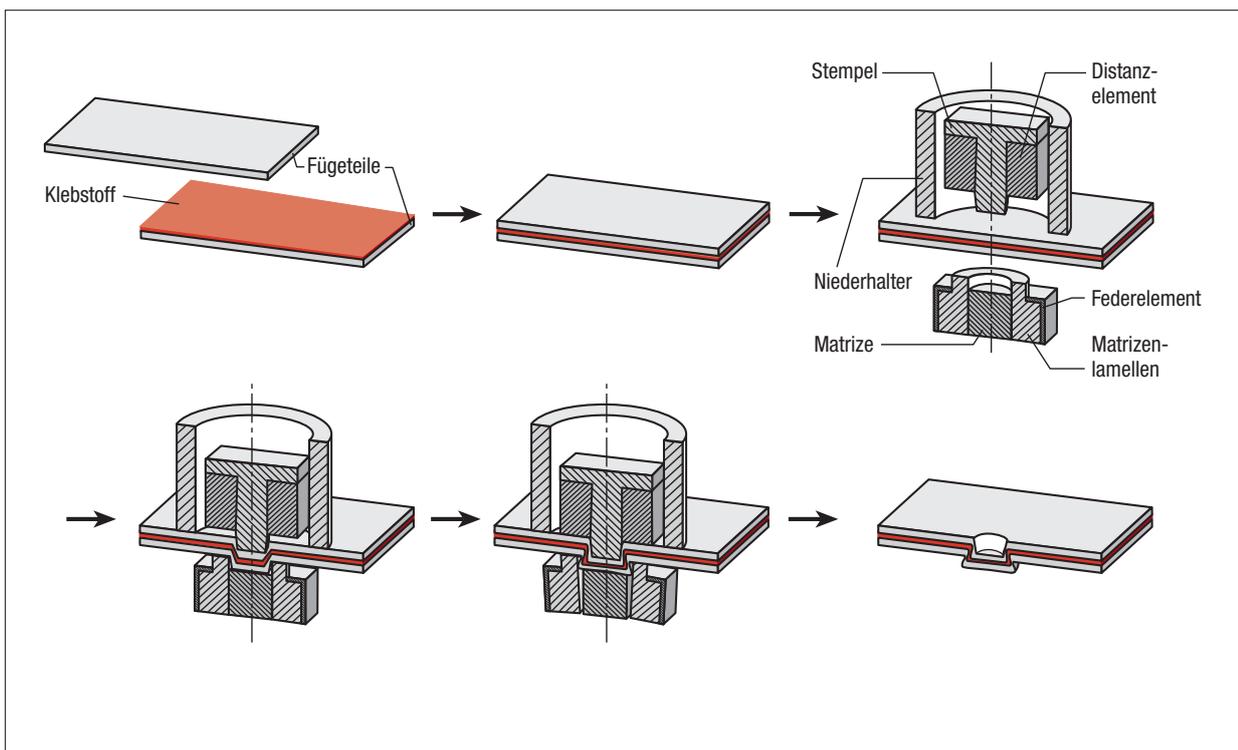


Abb. 21: Verfahrensablauf beim Clinchkleben (System ohne Schneidanteil)

Das Trag- und Versagensverhalten clinchgeklebter Verbindungen unter mechanischer Belastung ist grundsätzlich dem widerstandspunktschweißgeklebter und nietgeklebter Verbindungen, wenn auch in geringfügig anderer Ausprägung, ähnlich (vgl. Abschnitte 7.2 und 7.3).

8 Kleben von nichtrostenden Stählen

8.1 Spezifische Vorteile beim Kleben nichtrostender Stähle

Nichtrostende Stähle, die ausgehend vom Konsumgüterbereich häufig auch unter dem Begriff „Edelstahl Rostfrei“ zusammengefasst werden, werden vorrangig für Bauteile eingesetzt, die hohen Anforderungen an die Korrosions- und Langzeitbeständigkeit unterliegen. Die Korrosionsbeständigkeit dieser Stähle, die durch Massenteile von mindestens 10,5% Chrom gekennzeichnet sind, beruht auf der Ausbildung einer dichten, nur wenige Nanometer dicken, elektrisch leitenden Deckschicht aus Chromoxiden, der sog. Passivschicht.

Von großer Bedeutung sind darüber hinaus vor allem für strukturelle Anwendungen die vorteilhaften Eigenschaften der nichtrostenden Stähle in Bezug auf Festigkeit und Verformungsverhalten. Des Weiteren finden nichtrostende Stähle bei hohen Hygieneanforderungen und Ansprüchen an das dekorative Aussehen der Bauteile Verwendung.

Um diese Eigenschaften in einer Gesamtkonstruktion nutzen zu können, bedarf es Fügetechniken, die die Korrosionsbeständigkeit und mechanischen Eigenschaften der nichtrostenden Stähle nicht negativ beeinflussen. Das Kleben als wärmearmes Fügeverfahren eignet sich hierfür in besonderer Weise. Thermisch bedingte Eigenschaftsänderungen der Füge-

teile, die die Oberflächen auch optisch in Form von Anlauffarben beeinträchtigen können, treten nicht auf. Die flächige Verbindung mit günstiger Lasteinleitung ermöglicht eine gute Materialausnutzung.

Weitere Vorzüge sind neben der elektrochemischen Entkopplung die elastischen Eigenschaften der Klebschicht, die unterschiedliche Wärmeausdehnungen verschiedenartiger Fügepartner, z. B. bei Edelstahl-Glas-Klebverbindungen, kompensieren können. Gerade bei Edelstahl-Sichtflächen bietet sich das Kleben an, da auf Schweißpunkte oder auch mechanische Punktverbindungen verzichtet werden kann. Außerdem zeichnet sich die umliegende Tragstruktur nicht auf der Sichtfläche ab.

In der Vergangenheit wurde unterstellt, dass sich nichtrostende Stähle aufgrund ihrer inerten Oberfläche grundsätzlich schlecht kleben lassen. Diese Annahme konnte inzwischen für viele Klebstoffsysteme widerlegt werden.

Industriezweige mit vielfältigen Möglichkeiten für den Einsatz der Klebtechnik zum Verbinden nichtrostender Stähle sind z. B. das Bauwesen, der Anlagenbau sowie der klassische Maschinenbau, in

den letzten Jahren aber auch verstärkt der Nutzfahrzeug- und Automobilbau. Hier werden nichtrostende Stähle beispielsweise für hochbelastete Komponenten zur Verbesserung von Steifigkeit und Crasheigenschaften oder zur Realisierung von Leichtbaukonzepten durch Mischbauweisen eingesetzt.

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der austenitischen nichtrostenden Stähle werden Bauteile aus diesen auch häufig frei in Kombination mit Isolationselementen verbaut, für deren Verbindung das Kleben als flächiges Fügeverfahren ohne Durchbruch der Fügebauteile besonders vorteilhaft ist (Abb. 22).

Neben diesen hochfesten strukturellen Klebverbindungen, die von warmhärtenden 1K-Epoxidharz-Klebstoffen dominiert werden, hat sich eine Vielzahl von Anwendungen mit mittelfesten oder hochelastischen Klebstoffen auf nichtrostenden Stählen bewährt. Zum Einsatz kommen überwiegend Zweikomponentenklebstoffe auf Epoxidharz- oder Polyurethanbasis, die drucklos bzw. unter geringem Fixierdruck bei Raumtemperatur aushärten.

Im Schienenfahrzeugbau werden beispielsweise Außenbauteile aus nichtrostenden Stählen



Abb. 22: Geklebter Rückwandrahmen eines Aufliegers für den Tiefkühlfrachtverkehr

an die Fahrzeugstruktur (teilweise ebenfalls aus Edelstahl) von Bussen sowie Straßen- und U-Bahnen geklebt. Im Innenausbau von Gebäuden werden Verkleidungsteile für Rolltreppen, Aufzugs- und Lüftungsanlagen bis hin zu polierten Edelstahlspiegeln durch Kleben unsichtbar befestigt.

8.2 Beständigkeit strukturell geklebter Verbunde aus nichtrostenden Stählen

Obwohl sich Klebverbindungen aus nichtrostenden Stählen im Vergleich zu anderen Metallklebungen als weniger anfällig gegen korrosive Schädigungen erwiesen haben, gilt es vor allem bei hochfesten Verbindungen, besonderes Augenmerk auf die üblicherweise geforderte Langzeitbeständigkeit zu legen.

So haben Festigkeitsuntersuchungen an Klebverbindungen mit warmhärtenden Epoxidharzklebstoffen gezeigt, dass das strukturelle Kleben von nichtrostenden Stählen grundsätzlich in der Qualität entsprechender Klebungen aus unlegierten und niedrig legierten Stählen möglich ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Lebensdauererwartung von Edelstahlverbunden unter klimatischer Exposition durch andere Versagensmechanismen beeinflusst wird als bei anderen metallischen Fügepartnern.

Während Werkstoffe mit geringer Korrosionsbeständigkeit insbesondere durch schnittkanteninduzierte korrosive Unterwanderung der Klebfläche geschwächt werden, konnte beispielsweise bei Klebungen der nichtrostenden Stahlsorten 1.4301 (X5CrNi18-10) und 1.4376 (X8CrMnNi19-6-3) unter langanhaltender feuchtwarmer Belastung lediglich eine Schädigung in der Polymer-Metall-Grenzschicht als festigkeitsdominierend identifiziert werden [8].

In diesen Untersuchungen mittels Klimawechseltest VW PV

1200 wurde dennoch bereits nach einer Alterungsdauer von einem Monat ein deutlicher Abfall der Festigkeitswerte festgestellt. Die kohäsiven Bruchflächen der Zugscherproben zeigten deutliche alterungsbedingte Veränderungen der chemischen Struktur des Polymernetzwerks, die auf die simultane Einwirkung von Feuchtigkeit und Temperatur zurückzuführen sind.

Unter dem zusätzlichen Einfluss chloridhaltiger Medien kann es trotz der generell guten Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle vereinzelt zur Bildung von elektrochemischen Konzentrationszellen und dadurch zur Herabsetzung der Korrosionsbeständigkeit im Bereich der Fügestelle kommen.

Untersuchungen in Anlehnung an den VDA-Klimawechseltest 621-415 (Salzsprühnebelprüfung mit 5%iger NaCl-Lösung) an Zugscherproben aus nichtrostendem Stahl der Sorte 1.4376 (X8CrMnNi19-6-3) haben gezeigt, dass der korrosive Angriff ausschließlich unter Anwesenheit von Klebstoff im Bereich der Überlappungsenden der Verbunde beginnt und von dort zu einer Unterwanderung der Klebschicht, verbunden mit einer teilweise starken Schädigung der Fügepartner in Form von Lochkorrosion, führt [8].

Die durch den VDA-Wechseltest hervorgerufenen Veränderungen der mechanischen Kennwerte (Zugscherfestigkeit und Bruchdehnung) sind jedoch trotz der teilweise deutlichen korrosiven Schädigung der Klebung vergleichsweise gering und nahezu ausschließlich auf die korrosive Unterwanderung der Klebschicht und die damit verbundene Verringerung der Traganteile des Klebstoffs zurückzuführen.

Es wird deutlich, dass auch beim Kleben nichtrostender Stähle wie bei allen anderen Fügepartnern grundsätzlich darauf geachtet werden muss, dass keine dauerfeuchten, korrosionsfördernden

Spalten im Umfeld der Verklebung vorhanden sind.

Eine Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit geklebter Verbunde aus nichtrostenden Stählen, insbesondere in chloridhaltigen Medien, kann durch die Verwendung höherlegierter nichtrostender Stähle oder durch eine entsprechende Oberflächenvorbehandlung, wie z. B. Beizen oder Elektropolieren erzielt werden. Sie sollte auf jeden Fall durch spezifische Beständigkeitsprüfungen (vgl. Abschnitt 4.5) verifiziert werden.

Unter dem Einfluss rein feuchtigkeits- und temperaturdominierter Klimabelastungen ist der Einfluss der Stahlsorte dagegen eher von untergeordneter Bedeutung. In **Abb. 23** ist die Abhängigkeit der Zugscherfestigkeiten vom Klebstoffsystem (1K- und 2K-Epoxidharz-Klebstoffe sowie 2K-Polyurethan-Klebstoff) und der verwendeten Stahllegierung exemplarisch dargestellt.

8.3 Oberflächenbehandlung nichtrostender Stähle

Wie bei anderen Fügepartnern ist auch bei nichtrostenden Stählen die Eignung der einzusetzenden Vorbehandlungsprozesse von den Anforderungen an die Klebverbindung, z. B. den zu übertragenden Kräften, der erwarteten Lebensdauer und den Umgebungsbedingungen während der Nutzungsphase, sowie der verwendeten Stahlsorte abhängig (vgl. auch Abschnitt 6.1.1). Hinweise zur Eignung finden sich in den Datenblättern der Klebstoffhersteller. Die anwendungstechnische Beratung durch diese sowie eigene Versuche runden die Absicherung des Klebprozesses ab.

Auch bei nichtrostenden Stählen ist grundsätzlich darauf zu achten, dass die zu verklebenden Flächen absolut frei von Schmutz, Fett und Ölrückständen sind. Vielfach ist der Einsatz eines speziellen Haftreinigers erforderlich.

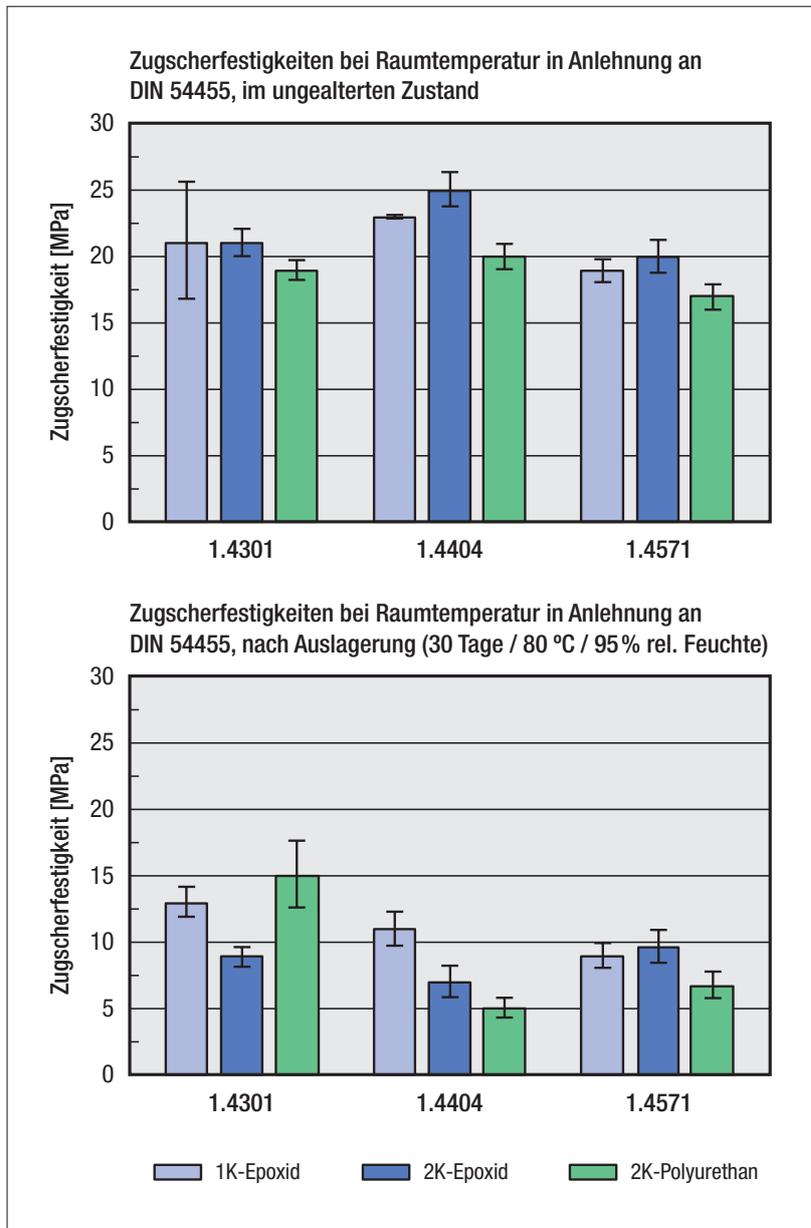


Abb. 23: Zugscherfestigkeiten von Edelstahlklebungen nach feuchtwarmer Auslagerung

Bei austenitischen nichtrostenden Stählen darf die mechanische Reinigung bzw. Oberflächenvorbehandlung durch Schleifen oder Bürsten nicht mit zu großen Anpressdrücken erfolgen, da die gegenüber unlegierten Stählen geringere Wärmeleitfähigkeit andernfalls zu einem Anlaufen oder Verwerfen der Bauteile führen kann. Aus diesem Grund sollten bei maschineller Bearbeitung auch nicht zu hohe Schleifgeschwindigkeiten gewählt werden.

Zur Verhinderung von Fremdrost müssen die verwendeten Schleifmittel bzw. die beim Strahlen eingesetzten Strahlmittel eisenfrei sein. Schleif- und Strahlmittel, die bereits für die Bearbeitung unlegierter Stähle verwendet wurden, dürfen nicht auch für Edelstahl benutzt werden, da auch sie Fremdrost verursachen. Als Strahlmittel eignen sich Glasperlen, Glasbruch, Edelstahlkorn oder eisenfreier Quarzsand.

9 Anwendungen der Klebtechnik

Ausgehend vom Kleben von Aluminiumbauteilen im Flugzeugbau in der Mitte des vorigen Jahrhunderts hat sich die Klebtechnik zwischenzeitlich auch in vielen anderen Anwendungsbereichen etabliert, in denen metallische Werkstoffe miteinander verbunden werden. Einige typische Beispiele für Verbindungen von Stahl mit Stahl, aber auch anderen Werkstoffen sind im Folgenden beschrieben und demonstrieren die vielfältigen Anforderungen, denen das Kleben bei sachgerechter Klebstoffauswahl und Prozessdurchführung gerecht wird.

9.1 Schraubensicherungen

Schraubverbindungen zählen zu den wichtigsten lösbaren Verbindungen im Maschinenbau, in der Montage und der Reparatur. Ihre Funktionssicherheit hängt von den Kräften und Drehmomenten ab, die eine Verbindung längs und/oder quer zur Schraubenachse belasten (Abb. 24).

Für das Versagen einer Schraubverbindung gibt es im Wesentlichen zwei Ursachen. Zum einen können Setz- oder Kriechvorgänge zur Verringerung oder zum Verlust der Vorspannkraft führen und damit ein Lockern der Verbindung bewirken. Zum anderen kann es durch dynamische Dauerlasten, insbesondere quer zur Schraubenachse, zu Relativbewegungen zwischen den Füge-teilen kommen. Dadurch wird ein Losdrehmoment erzeugt, das selbst bei voller Vorspannung die Selbsthemmung der Verbindung aufheben kann. Die Folge ist ein selbsttätiges Losdrehen und schließlich der Verlust der Verbindungselemente.

Entgegenwirken lässt sich diesen Versagensmechanismen vor allem durch die richtige Auslegung und Konstruktion der Verbindung,

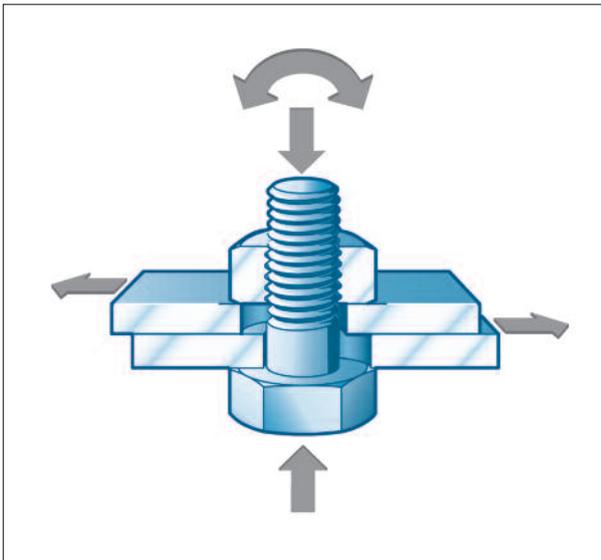


Abb. 24:
Belastung einer
Schrauben-
verbindung

beispielweise durch eine geringe Nachgiebigkeit der Fügeteile bei gleichzeitig hoher Elastizität der Verbindungselemente. Des Weiteren ermöglicht die Verwendung hochfester Schrauben ausreichend hohe Vorspannkräfte, wodurch die Gefahr von Relativbewegungen verringert wird. Sind diese Maßnahmen nicht oder nur mit Einschränkungen umsetzbar, können Schraubensicherungen Abhilfe schaffen, die ihrer Wirkung entsprechend in Setz-, Losdreh- und Verliersicherungen eingeteilt werden.

Setzsicherungen, z.B. Spannscheiben und Tellerfedern, erhöhen die Elastizität der Verbindung und gleichen damit Vorspannkräfteverluste durch Setzen aus. Bei erzwungenen Relativbewegungen zwischen den Fügeteilen können sie das selbsttätige Losdrehen der Schraubverbindung aber nicht verhindern. Verliersicherungen, z.B. Kronenmuttern oder sog. selbstsichernde Muttern, unterbinden lediglich den Verlust der Verbindungselemente, lassen aber ein teilweises Lockern bzw. Losdrehen zu.

Am wirksamsten sind Losdreh-sicherungen, die sowohl die Vorspannung der Verbindung weitestgehend erhalten als auch Relativbewegungen bei dynamischer Be-

anspruchung unterbinden. Neben Schrauben und Muttern mit sperrenden Elementen, z.B. Sperrzahn- und Rippsschrauben, stehen insbesondere Klebstoffe als Losdreh-sicherungen zur Verfügung. Diese stellen als sog. chemische Schraubensicherungen eine bewährte Alternative zu den mechanischen Sicherungselementen dar, da sie keine Beschädigung der Anlageflächen verursachen und sich auch für gehärtete Fügeteiloberflächen eignen. Abhängig vom Losdrehmoment kann die Verbindung mit üblichem Werkzeug ohne Beschädigung wieder gelöst werden. Zur Anwendung kommen in erster Linie anaerob härtende sowie mikroverkapselte Reaktionsklebstoffe.

Anaerob härtende Klebstoffe auf Diacrylsäureester-Basis (vgl. Abschnitt 3.3.2) werden unmittelbar vor der Montage von Hand oder mit Hilfe spezieller Dosiergeräte auf das Gewinde aufgetragen. Diese einkomponentig zu verarbeitenden Reaktionsklebstoffe bleiben solange flüssig, wie sie im Kontakt mit dem Sauerstoff der Luft stehen. Erst mit Montage der Verbindungselemente härten sie unter Sauerstoffabschluss und durch metallischen Kontakt aus. Da der Klebstoff sämtliche Zwischenräume zwischen den Gewinde-

gängen ausfüllt, wird jegliche Bewegung im Gewinde unterbunden. Darüber hinaus dichtet er die Verbindung gas- und flüssigkeitsdicht ab und verhindert Spaltkorrosion, was ein späteres Lösen im Reparaturfall erleichtert.

Die Anwendung erfolgt durch tropfen- oder raupenförmiges Auftragen des Klebstoffs auf eine der Kontaktflächen und anschließendes Eindrehen der Schraube. Hierbei ist wichtig, dass nach dem Einschrauben die gesamte wirksame Gewindeoberfläche benetzt ist. Bei größeren Abmessungen der Verbindungselemente stellt beidseitiger Auftrag sicher, dass keine Lufteinschlüsse in der Klebschicht entstehen. Bei Sacklochgewinden sollte der Klebstoff am Grund der Gewindebohrung aufgetragen werden, damit dieser beim Anziehen der Schraubverbindung nach oben steigt und die Gewindeoberfläche vollständig benetzt. Überschüssiger, aus der Klebfuge austretender Klebstoff bleibt durch den Kontakt mit Sauerstoff über längere Zeit flüssig und kann nach der Montage problemlos entfernt werden. Bei passiven Oberflächen, z.B. bei nichtrostenden Stählen, kann der Einsatz eines Aktivators zur Beschleunigung der Aushärtung erforderlich sein.

Für die Auswahl geeigneter Sicherungsklebstoffe sind im Wesentlichen folgende Kenngrößen relevant:

- Festigkeit/Losdrehmoment
- Gewindegröße (bestimmt die Viskosität des Klebstoffs)
- Einsatztemperatur
- Werkstoff (macht ggf. einen Aktivator erforderlich)
- Umgebungsbedingungen
- Aushärtezeit des Klebstoffs

Wichtige Hinweise hierzu enthalten die Auswahltabellen der Klebstoffhersteller. Für die konkrete Anwendung sind jedoch die Nutzung der technischen Datenblätter und gegebenenfalls Vorversuche unter Fertigungsbedingungen unerlässlich.

Mikroverkapselte Klebstoffe, ebenfalls auf Basis von Acrylaten oder in Form von Zwei- oder Mehrkomponentensystemen (vgl. Abschnitt 3.3.3) werden bereits beim Schraubenhersteller als Vorbeschichtung auf die Gewinde aufgetragen. Durch mechanische Beanspruchung während des Verschraubens werden die Kapseln zerstört. Die darin enthaltenen Klebstoffe werden freigesetzt, benetzen Schrauben- und Muttergewinde und härten durch chemische Reaktion aus. Die ersten zwei bis drei Gewindegänge dieser vorbeschichteten Schrauben sind frei von Klebstoff, um das Einschrauben zu erleichtern.

Aufgrund ihrer einfachen Verarbeitung ohne zusätzliche Arbeitsschritte eignen sich vorbeschichtete Schrauben besonders für die Serienfertigung. Bereits vorhandene Montageeinrichtungen können üblicherweise so angepasst werden, dass sich ohne Werkzeugwechsel auch vorbeschichtete Schrauben einsetzen lassen. Wie bei anaerob härtenden Klebstoffen steht eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte mit unterschiedlichen Losdrehmomenten, Einsatztemperaturbereichen etc. zur Verfügung. Auch die Dichtwirkung gegenüber Flüssigkeiten und Gasen ist meist gegeben. Die funktionellen Eigenschaften von Schrauben aus Stahl mit klebender Beschichtung sind in DIN 267, Teil 27 festgelegt. Für Auswahl und Anwendung sind die Auswahltabellen und technischen Datenblätter der Schraubenhersteller heranzuziehen.

Generell sind sowohl anaerob härtende Klebstoffe als auch mikroverkapselte Systeme nur für den einmaligen Einsatz vorgesehen. Nach dem Verschrauben dürfen die Verbindungselemente nicht weiter angezogen oder gelöst werden. Beim Wiederschrauben sollten neue Verbindungselemente verwendet werden oder die Gewinde mittels Gewindebohrer bzw. Schneideisen oder geeigneter

Lösungsmittel gereinigt werden. Bei vorbeschichteten Schrauben sind inzwischen Produkte erhältlich, die auch bei zwei- oder dreimaliger Verwendung noch genügend Kapseln für die notwendige Sicherungswirkung besitzen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass bestimmte Öle und Reinigungssysteme die Aushärtung der Reaktionsklebstoffe hemmen oder sogar gänzlich verhindern können. Neuere Klebstoffentwicklungen verfügen jedoch über eine höhere Toleranz gegenüber üblichen Industrieölen, wie Motor-, Korrosionsschutz- und Schneidölen.

9.2 Welle-Nabe-Verbindungen

Anaerob härtende, aber auch zwei- oder mehrkomponentige Reaktionsklebstoffe können nicht nur zur Schraubensicherung eingesetzt werden, sondern haben sich insbesondere bei Welle-Nabe-Verbindungen unter einer Vielzahl von Belastungen und Umgebungsbedingungen bewährt. Typische Anwendungsfälle sind:

- Montage von Lagern in Gehäusen oder auf Wellen
- Montage von Zahnrädern, Kettenrädern, Riemenscheiben und Rotoren auf Wellen
- Fügen von Zylinderlaufbuchsen
- Einbau von Kernlochdeckeln in Motoren
- Montage von Führungsbuchsen für Bohrvorrichtungen

Gegenüber formschlüssigen Fügeverfahren wie der Verwendung von Passfedern, Stiften oder Keilprofilen und kraft/reibschlüssigen Verbindungsverfahren wie Einpressen oder Aufschrupfen besitzen wärmearme stoffschlüssige Klebverbindungen wesentliche Vorteile:

- Verhinderung von Relativbewegungen zwischen den Fügeteilen
- gleichmäßigere Spannungsverteilung im Fugebereich
- Spannungsverminderung in den Fügeteilen

- höhere statische und dynamische Belastbarkeit
- Vermeidung von Spaltkorrosion, Passungsrost und ggf. Kontaktkorrosion durch vollständige Abdichtung des Fugespalts
- geringere Fertigungskosten durch größere zulässige Toleranzen sowie ggf. Entfall von Verbindungselementen, z.B. Passfedern

Je nach Lage und Größe der Toleranzfelder der Fügeteile können geklebte Welle-Nabe-Verbindungen entweder als geklebte Spielpassungen oder als geklebte Übermaßpassungen ausgeführt werden. Letztere lassen sich nach der Art der Montage auch in geklebte Presspassungen und geklebte Schrumpfpassungen einteilen.

Geklebte Spielpassungen, die vorwiegend bei gering belasteten Verbindungen eingesetzt werden, sind dadurch gekennzeichnet, dass der Wellendurchmesser bei allen Toleranzpaarungen kleiner als der Innendurchmesser der Nabe ist. Die Montage nach Auftrag des Klebstoffs auf üblicherweise beide Oberflächen erfolgt damit bei gleicher Temperatur der Fügeteile kraftfrei. Der Klebstoff füllt den Fugespalt vollständig aus und überträgt nach dem Aushärten die Last. Vorteilhaft ist, dass die Fügeteile mit relativ groben Toleranzen gefertigt werden können und der Klebstoff Zentrierungsfehler bis zu einem gewissen Grad ausgleicht. Der Einbau von Wellen und Lagern ist dementsprechend weitgehend spannungsfrei möglich, was ihre Lebensdauer positiv beeinflusst.

In **geklebten Übermaßpassungen**, bei denen der Wellendurchmesser stets geringfügig größer als der Nabeninnendurchmesser ist, werden die Klebstoffe zur Unterstützung einer kraftschlüssigen Verbindung eingesetzt. Während reine Übermaßpassungen Untersuchungen zufolge nur einen maximalen Flächenkontakt von

25 bis 30% zwischen Welle und Nabe aufweisen, steht bei zusätzlicher Verwendung eines Klebstoffs die vollständige Kontaktfläche zur Verfügung. Dementsprechend addieren sich die Festigkeiten von Übermaßpassung und Klebverbindung, so dass bei gleichen Abmessungen erheblich größere Kräfte bzw. Drehmomente als mit den elementaren Verbindungsarten übertragen werden können.

Bei geklebten Presspassungen wird die Welle nach ein- oder beidseitigem Auftrag des Klebstoffs mit hohem Druck axial in die Nabe eingepresst. Die übertragbaren Kräfte und Momente werden vorwiegend durch die Flächenpressung und den Haftbeiwert in der Fügezone bestimmt. Der eingesetzte Klebstoff sollte demzufolge im flüssigen Zustand eine große Schmierwirkung besitzen, im ausgehärteten Zustand jedoch eine möglichst hohe Haftkraft gewährleisten.

Bei geklebten Schrumpfpassungen erfolgt die Montage durch unterschiedliche Temperaturdehnung, indem die Nabe höheren Temperaturen als die Welle ausgesetzt wird. Üblicherweise wird hierzu der Klebstoff auf die kalte Welle aufgetragen und die Nabe kurzzeitig auf bis zu 200 °C erwärmt. Die Möglichkeit, die Welle zu unterkühlen und den Klebstoff auf die Nabe aufzutragen, ist weniger empfehlenswert, da Kondensatbildung auf der kalten Welle die Aushärtung der Klebschicht und somit die Klebfestigkeit beeinflussen kann. Bei sehr großen Übermaßen oder kleinen Durchmessern kann aber die Kombination beider Varianten erforderlich sein.

Geklebte Schrumpfpassungen zeichnen sich durch besonders hohe Verbindungsfestigkeiten aus, die auf den speziellen Spannungszustand in der Fügezone zurückzuführen sind. Mit dem Temperaturengleich zwischen Welle und Nabe entstehen beträchtliche Druckspannungen in der Klebschicht, da der Klebstoff mit ein-

Abb. 25:
Klebstoffauftrag zur Montage eines Wälzlagers



setzender Härtingsreaktion nur noch sehr begrenzt aus dem Füge-spalt austreten kann.

In bestimmten Fällen kann es vorteilhaft sein, formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen mit dem Kleben zu kombinieren, z.B. als geklebte Keilwellenverbindungen. Diese können noch höhere Kräfte bzw. Momente als die vorstehenden Verbindungen übertragen. Darüber hinaus werden Verdrehspiel und Passungsrost unterbunden.

Grundsätzlich ist bei der Herstellung geklebter Welle-Nabe-Verbindungen darauf zu achten, dass der Klebspalt nach der Montage vollständig mit Klebstoff ausgefüllt ist. Dazu wird dieser im Allgemeinen umlaufend als Raupe auf die Welle bzw. Nabe aufgetragen (**Abb. 25**). Für die Serienfertigung können manuelle oder automatisierte Dosiersysteme eingesetzt werden. Um die Montage zu erleichtern, sollte zumindest eines der beiden Fügeteile in einem Winkel von 15 bis 30° angefast werden. Dies vermindert auch die Gefahr des Abstreifens des Klebstoffs während der Montage. Weiterhin sollten die Bauteile, sofern es die Passungsart zulässt, unter langsamer Drehung ineinandergeschoben werden. Danach dürfen diese nicht mehr bewegt werden, bis eine ausreichende Handfestigkeit vorhanden ist.

Die Aushärtung kann bei passiven Fügeteiloberflächen oder

großen Füge-spalten durch spezielle Aktivatoren beschleunigt werden. Wie bei Schraubensicherungen sollte auch bei Welle-Nabe-Verbindungen im Vorfeld auf die Verträglichkeit des einzusetzenden Klebstoffs mit Ölen bzw. Reinigungssystemen geachtet werden. Klebstoffe mit höherer Öltoleranz sind verfügbar. Weitere Hinweise zur Auswahl und Anwendung enthalten die Auswahltabellen bzw. technischen Datenblätter der Klebstoffhersteller.

Die Demontage geklebter Welle-Nabe-Verbindungen ist nach Erwärmen meist mit üblichen Abziehvorrichtungen möglich. Stellt die Demontagefähigkeit ein wesentliches Konstruktionsmerkmal dar, können anaerobe Klebstoffe mit entsprechendem Festigkeits-/Temperaturverhalten ausgewählt werden. Zur Wiederverklebung der Fügeteile sind die Klebstoffreste der vorherigen Klebung vollständig zu entfernen. Dies kann mechanisch, z.B. mit Drahtbürsten, oder mittels geeigneter Lösungsmittel erfolgen.

Bei der klebgerechten Gestaltung von Welle-Nabe-Verbindungen gilt es, die in Abschnitt 5.1 erwähnten Konstruktionshinweise zu berücksichtigen. Wie bei allen Klebverbindungen sind auch bei Welle-Nabe-Verbindungen Belastungen durch Druck- und Schubspannungen vorteilhaft. Die an der Kraftübertragung beteiligten

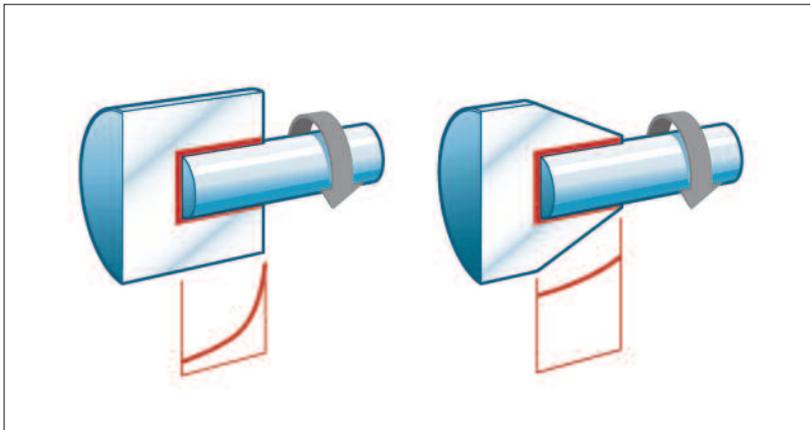


Abb. 26: Abbau von Spannungsspitzen durch günstige Gestaltung der Teile

Bauteile sollten möglichst geringe Deformationen erfahren. Dazu sind diese so zu gestalten, dass ihre Steifigkeiten aufeinander abgestimmt sind und scharfe Lastübergänge vermieden werden (Abb. 26). Sollen zwei oder mehr Füge-teile mit dem Ende einer Welle verbunden werden, sind abgestufte Klebflächen zur Erleichterung der Montage empfehlenswert.

Für die überschlägige Dimensionierung geklebter Welle-Nabe-Verbindungen stehen analytische Näherungsverfahren unter Berücksichtigung anwendungsspezifischer Korrekturfaktoren zur Verfügung [9]. Die genaue Festigkeit lässt sich jedoch nur durch Versuche an Originalbauteilen bestimmen.

9.3 Kleben im automobilen Karosseriebau

9.3.1 Karosseriefertigung und Montage

Mit dem zunehmenden Einsatz neuer Werkstoffe und neuartiger Konstruktionsweisen hat die Klebtechnik insbesondere in der Karosseriefertigung große Bedeutung erlangt. So trägt das Kleben zu einem verbesserten Struktur- und Crashverhalten der Karosserien bei und ermöglicht die Verbindung von Werkstoffen in Mischbauweise.

Zu den Hauptanwendungen im Karosseriebau zählen Struktur-, Falz- und Unterfütterungsklebungen (Abb. 27). Bei der Montage hat das Einkleben der Scheiben die größte Bedeutung. In modernen Leichtbaukarosserien findet man heute Klebnähte von insgesamt mehr als 100 m Länge.

Unter **Strukturklebungen** werden Verbindungen in der Karosseriestruktur verstanden.

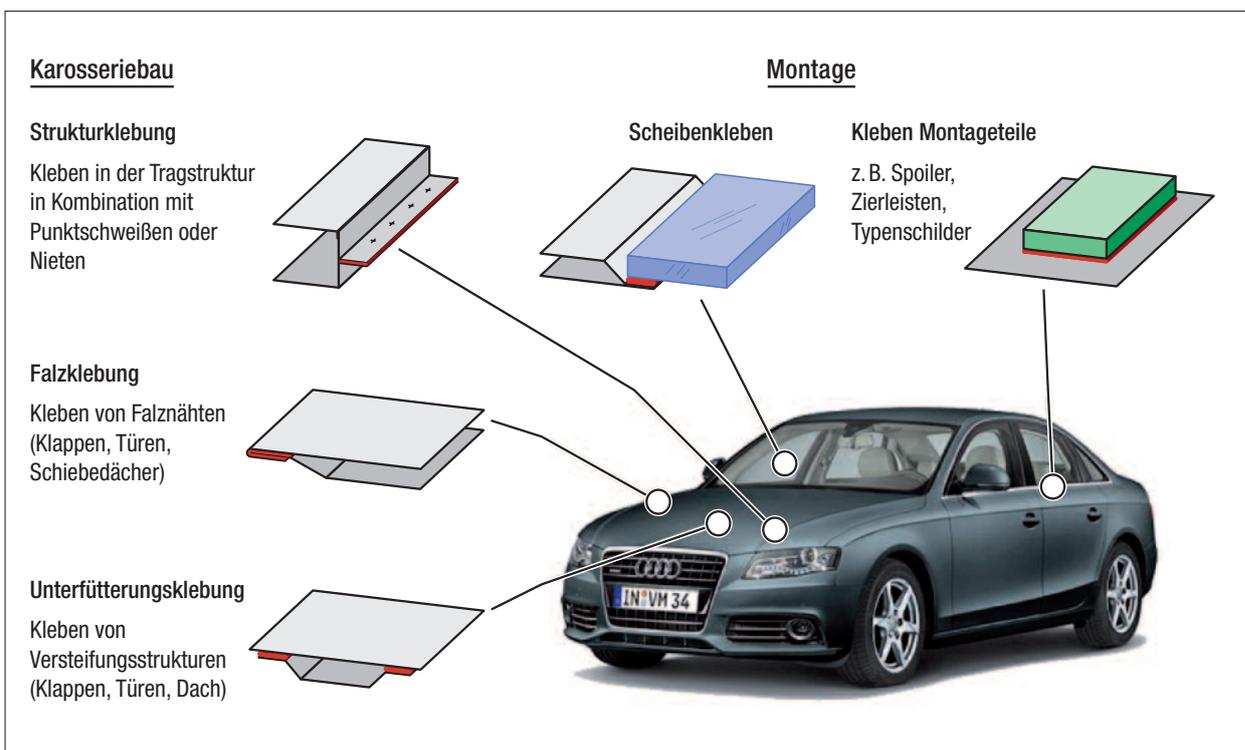


Abb. 27: Anwendungen der Klebtechnik in Karosseriebau und Montage

Sie tragen zur Optimierung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Karosserie bei. Zudem werden die Crasheigenschaften verbessert, da die hochfesten und schlagzähen Verbindungen bei dynamischer Beanspruchung eine Belastung des Werkstoffs über seine Streckgrenze hinaus ermöglichen. So kann durch die Deformation des Bauteils entsprechend viel Energie aufgenommen werden.

Da beim Kleben auf eine Fixierung der Fügeteile bis zur Aushärtung des Klebstoffs nicht verzichtet werden kann, wird das Strukturkleben meist mit punktförmigen Fügetechniken wie dem Punktschweißen oder dem Nieten eingesetzt. Durch Kombination der Fügeverfahren können die Punktabstände vergrößert und dadurch die Anzahl der Fügepunkte reduziert werden. Die Klebschichtdicke ergibt sich dabei aus dem punktförmigen Fügeverfahren, dem Punktabstand sowie der Steifigkeit der zu verbindenden Bauteile. Klebstoffe mit speziellen Formulierungen ermöglichen das Verbinden von Blechen, die mit Korrosionsschutz- und Tiefziehölen versehen sind.

Falzklebungen, oftmals auch als Bördelfalzklebungen bezeichnet, werden an Anbauteilen wie Türen, Front- und Heckklappen sowie an Schiebedachausschnitten zur Verbindung der Außenhaut mit dem Innenblech eingesetzt. Das mit Klebstoff versehene Außenblech wird bei diesem Hybridfügeverfahren durch Umlegen um 180°

mit dem Innenblech verbunden (**Abb. 28**).

Auf diese Weise wird eine flächige Verbindung ohne optische Beeinträchtigung der Außenhaut geschaffen. Das Falzkleben verbessert die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Bauteile und durch die abdichtende Wirkung des Klebstoffs auch deren Korrosionsbeständigkeit. Der Korrosionsschutz kann z.B. durch eine PVC-Nahtabdichtung weiter erhöht werden.

Zur Anwendung kommt hier eine große Bandbreite an Klebstoffen - von Epoxidharz über Acrylate und PVC-Expoxy-Blends bis hin zu Kautschuk. Die Breite der Falzklebung, die Füllung der Falzschlaufe und der Umfaltung sowie zusätzliche Abdichtmaßnahmen sind dabei abhängig von hersteller- und bauteilspezifischen Vorgaben.

Unterfütterungsklebungen dienen im Wesentlichen dazu, großflächige Bauteile an darunterliegenden Versteifungsstrukturen abzustützen. Sie werden vor allem an Klappen, Türen und Dächern eingesetzt.

An Unterfütterungsklebstoffe werden besondere Anforderungen im Hinblick auf ein gutes Spaltüberbrückungsvermögen gestellt. Darüber hinaus dürfen sie nur einen geringen Aushärtungsschrumpf besitzen, um ein Abzeichnen der Klebverbindung an der Außenhaut zu verhindern. Erfüllt werden diese Anforderungen heute zumeist von kautschuk-

basierten Klebstoffsystemen, die je nach Anwendungsfall und Viskosität Spaltbreiten bis zu 10 mm überbrücken können.

Der Auftrag der im Karosseriebau eingesetzten Klebstoffe erfolgt abhängig von den vorstehend genannten Anwendungen und Klebstoffsystemen durch Raupen- oder Sprühapplikation. Bei hochviskosen Klebstoffsystemen kann durch beheizte Anlagenkomponenten die Applikation durch eine temperaturbedingte Verringerung der Viskosität erleichtert werden.

Die Aushärtung der wärmehärtenden Klebstoffe erfolgt herstellereigenspezifisch entweder im Karosseriebauofen oder in den Lack- und Ofenprozessen bei rund 180 °C für etwa 20 Minuten. Anbauteile werden zum Erreichen der Handhabungsfestigkeit häufig in vorgelagerten thermischen Prozessen z.B. mittels Ofen, Induktion oder Infrarot vorgehärtet. Beim Einsatz von kalthärtenden 2K-Klebstoffsystemen kann durch moderate Temperaturzufuhr die Aushärtung beschleunigt werden.

Eine wesentliche Anwendung des Klebens in der Montage ist das Einkleben der feststehenden Scheiben mit feuchtigkeitsvernetzenden Polyurethanklebstoffen. Bei dieser sog. **Direktverglasung** wird im Gegensatz zu den Anwendungen im Karosseriebau auf lackierten Oberflächen geklebt. Dementsprechend ist bei der Anwendung auf eine gute Haftung des Klebstoffs auf dem Lack zu achten bzw. ein geeignetes Primersystem anzuwenden. Auf der Glasseite ist eine Behandlung mittels Aktivator und Primer erforderlich. Ein glasseitig aufgetragener Keramiksiebdruck schützt den Klebstoff vor UV-Strahlung.

Die Direktverglasung trägt zu einem großen Anteil zur (Verwindungs-)Steifigkeit der Karosserie bei. Entsprechend dimensionierte Klebschichtdicken erlauben im Zusammenhang mit den dauerflexiblen Polyurethanklebstoffen ein ausreichendes Verformungs-

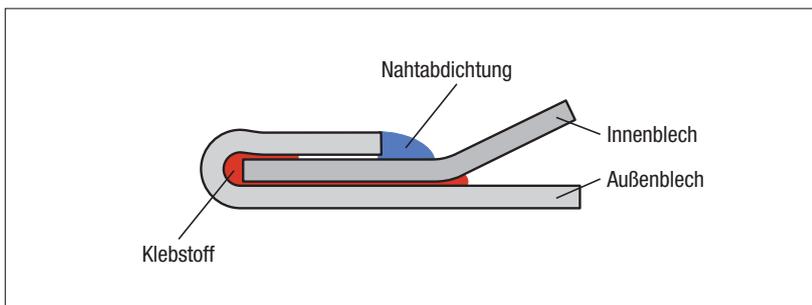


Abb. 28: Schematischer Aufbau einer Falzklebung

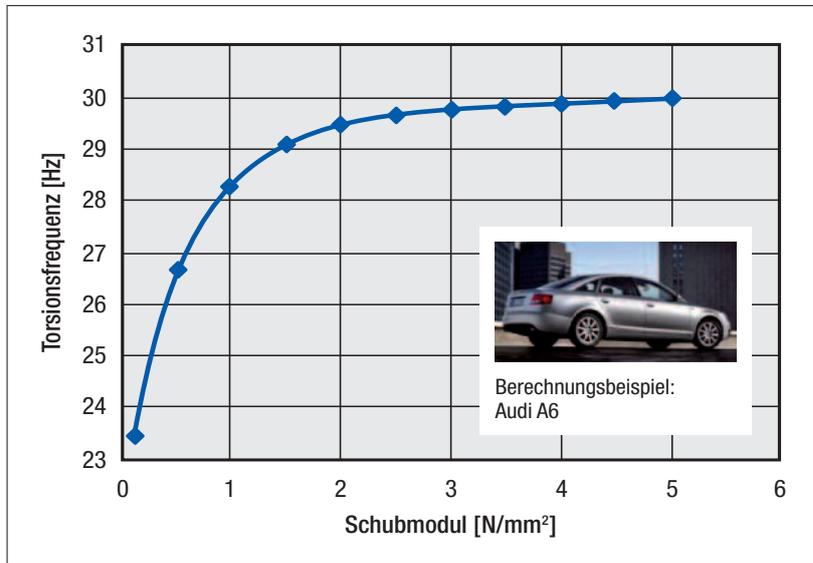


Abb. 29: Einfluss des Schubmoduls des Scheibenklebstoffs auf die dynamische Karosseriesteifigkeit bei Torsion

vermögen, um auftretende Spannungen durch Torsion der Karosserie abzubauen. **Abb. 29** verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem Schubmodul des Scheibenklebstoffs und der Torsionsfrequenz, die ein Maß für die dynamische Karosseriesteifigkeit ist.

9.3.2 Reparaturkonzepte für die Karosserie-Instandsetzung

Den steigenden Anforderungen an die Struktur- und Crasheigenschaften moderner Fahrzeuge gilt es auch bei der Karosserie-Instandsetzung nach einem Unfall Rechnung zu tragen. So müssen die ursprünglichen Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften, wie sie vor dem Schadenseintritt vorlagen, durch eine fachgerechte Reparatur wieder vollwertig hergestellt werden.

Der zunehmende Einsatz neuer Konstruktions- und Werkstoffkonzepte bedeutet dabei vielfach eine Herausforderung für die Instandsetzung. So lassen sich beispielsweise Bauteile aus höher- und höchstfesten Stählen, wie sie vor allem in der Karosseriestruktur verwendet werden, nur noch be-

dingt rückformen oder richten. Aus diesem Grund ist bei größeren Deformationen meist der Austausch oder ein Teilersatz des betreffenden Bauteils entsprechend den Herstellervorgaben erforderlich.

Hier kommt insbesondere der Fügechnik neben den einzusetzenden Trennverfahren eine wichtige Rolle zu. So sind beispielsweise das Widerstandspunktschweißen oder das MIG-Löten auch bei höherfesten Stählen einsetzbar. Die genaue Einhaltung der Prozessparameter nach den jeweiligen Herstellervorschriften ist jedoch unabdingbar, um eine Verringerung der Festigkeiten oder einen wärmebedingten Verzug der Bauteile zu vermeiden. Nicht zuletzt bestimmen die Zugänglichkeit der Fügestelle und die vorliegende Werkstoffpaarung die Eignung eines Fügeverfahrens für die Karosserie-Instandsetzung.

Wärmearme Fügeverfahren wie das Kleben und auch Hybridfügeverfahren, z.B. Nietkleben, haben in den letzten Jahren wachsende Bedeutung erlangt. Sie werden auch für die Reparatur von Strukturteilen verwendet, die in der Serienfertigung ursprüng-

lich thermisch gefügt wurden. Hierfür stehen spezielle crash-stabile 2K-Reparaturklebstoffe auf Epoxidharzbasis zur Verfügung, die ein ähnliches Eigenschaftsprofil wie die in der Serie eingesetzten wärmehärtenden 1K-Epoxidharz-Klebstoffe aufweisen, aber unter Werkstattbedingungen bei rund 60 °C ausgehärtet werden können.

Die Anwendbarkeit der wärme-armen Fügeverfahren für die Reparatur von Strukturkomponenten aus höherfesten Stählen wurde in [10, 11] untersucht. Innerhalb dieser Untersuchungen wurden Reparaturkonzepte für eine Teilabschnitts- sowie für eine Teilausschnittsreparatur, u.a. auf Basis des Blindnietklebens (**Abb. 30**), entwickelt.

Mit der entwickelten Reparaturstrategie wurde die Grundlage für die Reparatur von Karosseriestrukturen aus höherfesten Stahlwerkstoffen geschaffen. Die ermittelten Ergebnisse und Vorgehensweisen bilden eine umfangreiche Basis für eine im Hinblick auf die Wiederherstellung der Bauteileigenschaften abschätzbare Unfallinstandsetzung.

Bei verschiedenen Automobilherstellern entsprechen das Blindnietkleben und das Stanznietkleben als Reparaturverfahren bereits den Herstellervorgaben für bestimmte Bauteile der Karosseriestruktur, aber auch der Außenhaut. Neben einer hohen Reparatur-Prozesssicherheit bieten die Verfahren auch Vorteile hinsichtlich eines verbesserten Korrosionsschutzes und reduzierter Reparaturzeiten.

9.4 Kleben von Bauelementen aus Stahl

Das Kleben ist als strukturelles Fügeverfahren im Stahlbau trotz verschiedener Vorteile gegenüber dem Schweißen und dem Schrauben immer noch die Ausnahme. Dies ist u.a. darin begründet, dass sich die Kräfte in

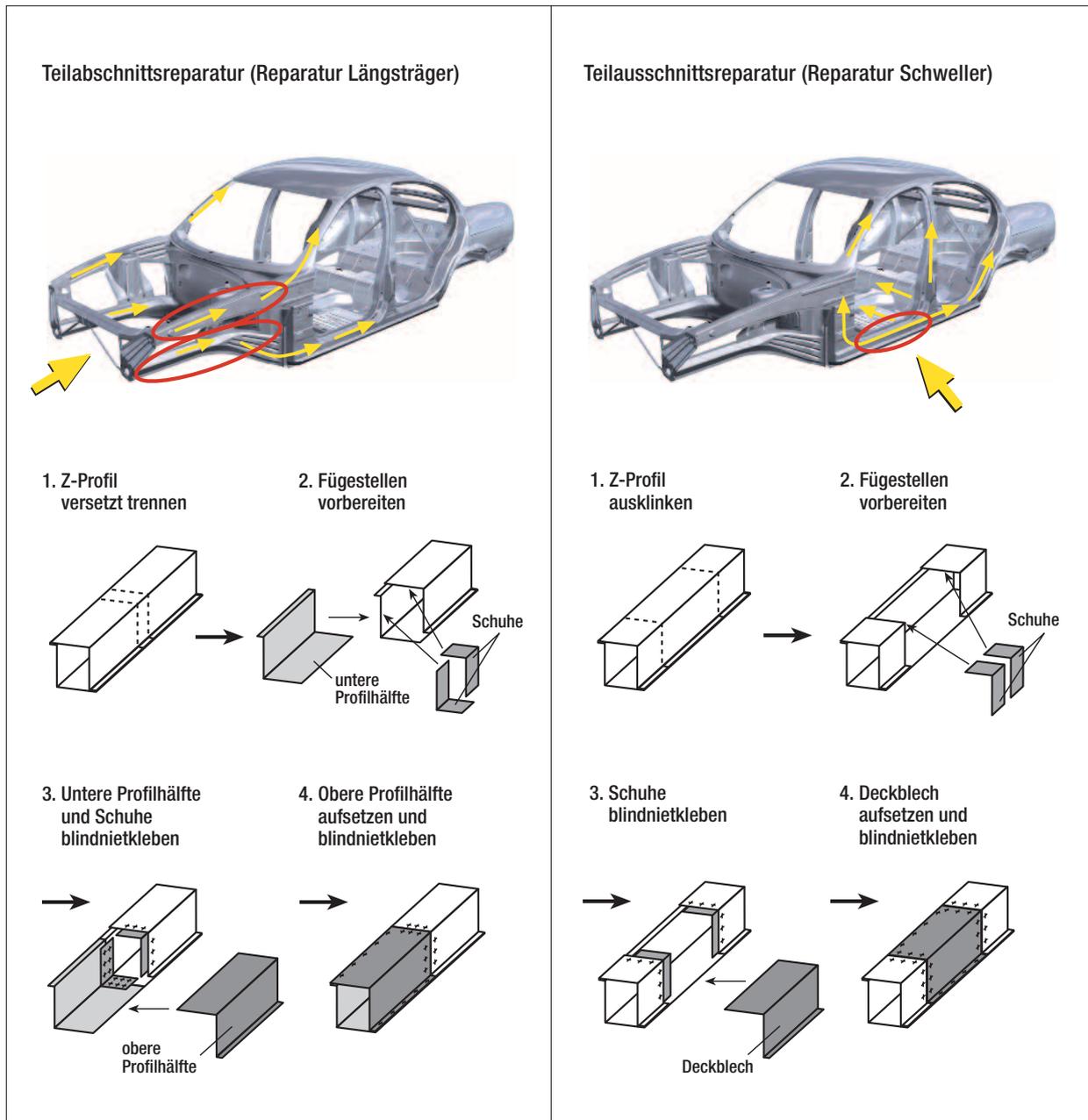


Abb. 30: Reparaturkonzept für eine Teilabschnitts- sowie für eine Teilausschnittsreparatur mittels Blindnietkleben [11]

den klassischen Tragsystemen des Stahlbaus mit Walzprofilen unter Ausnutzung der hohen Werkstofffestigkeiten in den Knoten konzentrieren, wodurch der Einsatz von Klebverbindungen ungünstig ist.

Mit einer Änderung der Bauweise im Sinne einer klebgerechten Konstruktion ergeben sich jedoch auch im Bauwesen neue Potenziale für den Einsatz der Klebtechnik. So wie Klebstoffe

im modernen Fahrzeugbau zur unverzichtbaren Fügetechnik für die Herstellung hochbelastbarer crachsicherer und energiesparender Stahl- und Stahl-Hybrid-Leichtbaustrukturen geworden sind, könnten sich die Vorteile der Klebtechnik zukünftig auch in Stahl-Leichtbaustrukturen nutzen lassen, die aktuell zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Wegweisend in der Anwendung des strukturellen Klebens

sind beispielsweise sog. Structural-Glazing-Fassaden, bei dem großflächige Verglasungs- oder Brüstungselemente auf statisch tragende Unterkonstruktionen aus Metall geklebt werden (Abschnitt 9.4.1). Als nicht tragendes Fügeverfahren zum Aufbringen von Dachdeckungen und Fassadenbekleidungen in der Klempnertechnik wird das Kleben dagegen bereits heute zunehmend eingesetzt (Abschnitt 9.4.2).

9.4.1 Structural Glazing

Der Wunsch nach einer flächenbündigen Fassadengestaltung ohne sichtbare Befestigungselemente führte in den vergangenen Jahren zur Entwicklung strukturell geklebter Ganzglasfassaden, die als Structural-Glazing- oder auch als Structural-Sealant-Glazing-Fassaden bezeichnet werden (Abb. 31).

Dabei werden großflächige Isolierglaselemente mit hochfesten elastischen Klebstoffen werkseitig auf Adapterrahmen aus nichtrostendem Stahl oder Aluminium geklebt, die später mit der Unterkonstruktion mechanisch verbunden werden. Die Klebverbindung übernimmt hierbei die Abtragung der Windlasten.

In Deutschland besitzen einige dieser Fassadensysteme eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Einbauhöhen bis zu 100 m. Vielfach ist aber eine entsprechende behördliche „Zustimmung im Einzelfall“ erforderlich. Bei sämtlichen Systemen sind zudem in Deutschland bei Einbauhöhen oberhalb von 8 m mechanische Sicherungen notwendig, die meist verdeckt zwischen den einzelnen Isolierglaselementen eingebracht werden.

Aufgrund der erforderlichen UV- und Witterungsbeständigkeit während der Nutzungsdauer dürfen in Structural-Glazing-Fassaden sowohl für die strukturelle Verklebung mit dem Metallrahmen als auch für den Isolierglasverbund selbst ausschließlich hochfeste geprüfte und zugelassene 1K- oder 2K-Silikon-Klebstoffe eingesetzt werden. Für die dauerhafte Abdichtung der Fugen zwischen den einzelnen Glaselementen werden hochelastische Silikondichtstoffe verwendet. Die Eigenschaften dieser Klebstoffe sind über einen großen Temperaturbereich zwischen -40 und +150 °C weitgehend konstant.

Generell zeichnen sich 1K-Silikone durch eine einfache Verarbeitung mit Standardpistolen



Abb. 31: Structural-Glazing-Fassade, Jüdisches Museum Berlin

aus, 2K-Silikone bieten aufgrund ihrer schnelleren Aushärtung Vorteile bei größeren Klebfugenabmessungen und bei der Reparatur von Fassadenelementen direkt auf der Baustelle.

Neben den Rahmenwerkstoffen und Klebstoffen sind in den Zulassungen von Structural-Glazing-Systemen auch die Oberflächen, Vorbehandlungsmaßnahmen sowie die kontrollierte werkseitige Herstellung der Verklebung definiert.

Bei der Vorbehandlung der Fügeiteile gilt grundsätzlich, dass der Rahmen aus nichtrostendem Stahl bzw. anodisiertem oder pulverbeschichtetem Aluminium mit einem Haftreiniger gereinigt und aktiviert werden muss. Vor der Verklebung ist die angegebene Abluftzeit des Haftreinigers zu beachten.

Entscheidend ist beim Structural Glazing zudem eine exakte

vorherige Dimensionierung der Fugen, da Anpassungen während der Ausführung nicht mehr möglich sind. Grundlage für die Berechnung der erforderlichen Klebfugegeometrie sind die technischen Eigenschaften des Klebstoffs, die Werkstoffkennwerte der angrenzenden Materialien, die Umgebungseinflüsse auf das Bauelement, dessen Konstruktion sowie die einwirkenden Lasten.

Ebenso wie Glas lassen sich auch nicht transparente Baumaterialien wie Panels aus oberflächenveredeltem oder nichtrostendem Stahl bei entsprechender Profilunterkonstruktion durch strukturelles Kleben an Fassaden befestigen. Diese Technik eröffnet den Architekten vielfältige Möglichkeiten bei der Gestaltung von Fassaden.

Panelverklebungen im Brüstungsbereich oder in hinterlüfteten Fassaden sind durch die zu verkle-

benden Fassadenelemente gegen UV-Strahlung geschützt. Daher können für diese Verbindungen auch weniger UV-stabile Klebstoffe wie Polyurethan verwendet werden. Da hier die strukturelle Verklebung sämtliche Lasten (Eigen- und Windlast) abtragen muss, ist eine detaillierte Berechnung der Klebflächen für eine lange Haltbarkeit ebenfalls unerlässlich.

9.4.2 Dachdeckungen und Fassadenbekleidungen

Während das strukturelle Kleben im Fassadenbau wie vorstehend dargestellt noch zahlreichen Restriktionen unterliegt, hat sich das Kleben als nicht tragendes Fügeverfahren zur Herstellung von Dachdeckungen und Fassadenbekleidungen aus Metall in der Klempnertechnik bewährt. Als Alternative zu den thermischen oder mechanischen Fügeverfahren bietet es die Möglichkeit, Dächer und Fassaden ohne Stehfalze und sichtbare Befestigungen herzustellen (Abb. 32).

Die aufzubringenden Blechtafeln oder Blechbahnen (Scharen) sind, anders als etwa Trapezprofile, nicht selbsttragend und benötigen daher eine vollflächige Unterstützung durch eine Schalung oder

einen anderen ebenen tragfähigen Untergrund, der eine gute Befestigungsmöglichkeit zum Schutz gegen auftretende Windlasten bietet. Neben Schalungen aus einseitig scharfkantigem Schnittholz eignen sich u. a. Baufurniersperrholz, mineralisch gebundene Spanplatten oder Betonuntergründe.

Bei der Gestaltung und Herstellung der Klebverbindungen sind neben den Angaben auf den Gebinden und in den technischen Datenblättern der Klebstoffe, insbesondere hinsichtlich deren Eignung und Verarbeitung, auch die material- und verarbeitungstechnischen Vorgaben in den Regelwerken des Klempnerhandwerks [12, 13] zu beachten.

Zur Befestigung der Blechtafeln bzw. -bahnen auf dem Untergrund, aber auch zum Verbinden untereinander, kommen insbesondere geprüfte hochelastische 1K-Polyurethan-Klebstoffe und Polyurethanhybridklebstoffe zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch eine hohe Alterungsbeständigkeit aus und ermöglichen den Ausgleich temperaturbedingter Längenänderungen zwischen den verschiedenen Fügepartnern. Zudem besitzen sie dichtende Funktion.

Wichtig für die fachgerechte Ausführung ist wie bei allen Klebverbindungen eine geeignete Ober-

flächenvorbereitung. Grundsätzlich reichen die Produkteigenschaften der elastischen 1K-Polyurethan- und Polyurethanhybridklebstoffe aus, um nach der Entfernung von Fett- und Ölresten sowie losen Verunreinigungen direkt auf die verschiedenen Untergründe zu kleben. Für eine optimale Haftung und Verbesserung der Lebensdauer ist aber meist die Verwendung von speziellen Haftreinigern und häufig auch Haftvermittlern erforderlich. Bleche aus feuerverzinktem oder nichtrostendem Stahl, aber auch organisch beschichtete Bleche, müssen zudem vor der Anwendung des Haftreinigers und dem Auftrag des Haftvermittlers unter leichtem Druck angeschliffen werden, um die Oberfläche aufzurauen. Konkrete Hinweise zur Oberflächenvorbereitung enthalten die Produktdatenblätter der Klebstoffhersteller.

Nach der Oberflächenvorbereitung werden die Polyurethan- und Polyurethanhybridklebstoffe je nach Typ und Anwendungsfall vollflächig oder streifenförmig, im Einzelfall auch punktuell mittels Kartusche oder Schlauchbeutel aufgetragen. Die vollflächige Verklebung bietet Vorteile hinsichtlich einer schalldämpfenden Wirkung sowie eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf den Blechunterseiten, der streifenförmige Auftrag erleichtert bei großformatiger Verlegung die ebene Ausrichtung der Tafeln oder Scharen. Generell ist eine vorherige Dimensionierung der Klebverbindung in Abhängigkeit des eingesetzten Klebstoffs, der zu verbindenden Werkstoffe sowie der anzunehmenden Lasten und Umgebungsbedingungen notwendig.

Die Einhaltung der vorgegebenen Klebschichtdicke kann bei vollflächigem Auftrag durch Verwendung eines Zahnpachtels, bei streifenförmigem Auftrag durch das Umschlagen der Bleche oder durch Montagebänder, die auch eine temporäre Fixierung übernehmen, sichergestellt werden.



Abb. 32: Wohngebäude-Erweiterung mit geklebten Fassadenblechen aus wetterfestem Baustahl

Durch entsprechend angepasste Klebstoffdicken lassen sich auch Toleranzen in der Unterkonstruktion ausgleichen.

Bei der Verklebung der Blechtafeln bzw. -bahnen auf geneigten oder senkrechten Untergründen sind diese z. B. mit Hilfe der Montagebänder bis zum Aushärten des Klebstoffs gegen Abrutschen zu sichern.

Neben den genannten Dachdeckungen und Fassadenbekleidungen eignen sich 1K-Polyurethan- und Polyurethanhybridklebstoffe auch für andere typische Anwendungen in der Klempner-technik wie zur Herstellung von Attiken, Mauerwerksabdeckungen oder Fensterbänken.

10 Literatur

10.1 Zitierte Literatur

[1] Schlimmer, M.; Klapp, O.: Einfluss fertigungsbedingter Imperfektionen auf die mechanischen Verbindungseigenschaften von 1K-PUR-Klebung im Nutzfahrzeugbau. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11933 N. Institut für Werkstofftechnik (IfW), Universität GH Kassel, 2001

[2] Hahn, O.; Döpmeier, T.: Untersuchungen zum Crashverhalten kalthärtender Klebstoffsysteme in Aluminiumverbindungen. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13952 N. Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF), Universität Paderborn, 2007

[3] Brede, M. (Projektleiter); u. a.: Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlklebverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben P 676. FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (Hrsg.). Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2008

[4] DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (Hrsg.): Merkblatt DVS/EFB 3450-1: Hybridfügen: Clinchkleben - Stanznietkleben: Überblick. Verl. für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2007

[5] Hahn, O.; Thommes, H.; u. a.: Untersuchungen zum Punktschweißkleben von höherfesten Stahlfeinblechen mit neuen warm- und kalthärtenden Klebstoffsystemen. Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben Nr. 14476 N (FOSTA P 704). Paderborn, 2008

[6] Hahn, O.; Teutenberg, D.: Einfluss konstruktions- und fertigungsbedingter Toleranzen auf die Schwingfestigkeit geklebter und punktschweißgeklebter Stahlblechverbindungen. Abschlussbericht zum FOSTA-Forschungsvorhaben P 795. Paderborn, 2010

[7] Drewes, E.-J. (Projektleiter); u. a.: Neue Stähle mit hoher statischer, dynamischer und Dauerfestigkeit für den Automobilbau. Abschlussbericht zum BMBF-Untersuchungsvorhaben 03 M 3021. Krupp Hoesch Stahl AG (u. a.), Dortmund (u. a.), 1995

[8] Geiß, P. L.; Vogt, D.; u. a.: Ermittlung der Schädigungsmechanismen in Edelstahlklebungen als Beitrag zur Fertigungssicherheit und Zuverlässigkeit. Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben Nr. 14704 N (FOSTA P 680). Kaiserslautern, 2009

[9] Loctite Worldwide Design Handbook. 2., überarb. Aufl. Loctite European Group, München, 1998

[10] Hahn, O.; Wibbeke, M.; u. a.: Werkstatt-Reparaturkonzept für Kfz-Strukturen aus höherfesten Stahlwerkstoffen im Automobilkarosseriebau. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben P 617. FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (Hrsg.). Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2006

[11] Wibbeke, M.: Werkstatt-Reparaturkonzept für Kfz-Strukturen aus höherfesten Stahlwerkstoffen unter Einsatz des Fügeverfahrens Blindnietkleben (D 755). Dissertation Universität Paderborn. Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2006

[12] Zentralverband Sanitär Heizung Klima (Hrsg.): Richtlinien für die Ausführung von Klempnerarbeiten an Dach und Fassade (Klempnerfachregeln). St. Augustin, 2009

[13] Zentralverband Sanitär Heizung Klima (Hrsg.): Merkblatt: Kleben in der Klempnertechnik. St. Augustin, 2003

10.2 Ergänzende Literatur

Adhäsion: Kleben & Dichten / Industrieverband Klebstoffe e.V. (Hrsg.): Handbuch Klebtechnik 2010, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010

Brandenburg, A. (Verf.): Kleben metallischer Werkstoffe. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd.144. Verl. für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verl., Düsseldorf, 2001

Brockmann, W.; Geiß, P. L.; u. a.: Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren. Wiley-VCH, Weinheim, 2005

Burchardt, B.: Elastisches Kleben: technologische Grundlagen und Leitfaden für die wirtschaftliche Anwendung. 3., aktual. Aufl. Die Bibliothek der Technik, Bd. 166. Verl. Moderne Industrie, Landsberg a. Lech, 2005

Endlich, W.: Kleb- und Dichtstoffe in der modernen Technik. 4. Aufl. Vulkan-Verl., Essen, 1998

Endlich, W.: Kleben und Dichten - aber wie?: Leitfaden für den Praktiker. Fachbuchreihe „Die schweißtechnische Praxis“, Bd. 32. Verl. für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verl., Düsseldorf, 1996

Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6., aktual. Aufl. Springer, Berlin/Heidelberg, 2009

Habenicht, G.: Kleben - erfolgreich und fehlerfrei: Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie. 5., überarb. und erg. Aufl. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008

Heinzmann, R.: Elastisches Kleben im Bauwesen: zukunftsweisende Fügetechnik für Gebäude und Infrastruktur. Die Bibliothek der Technik, Bd. 212. Verl. Moderne Industrie, Landsberg a. Lech, 2001

Onusseit, H. (Hrsg.): Praxiswissen Klebtechnik - Band 1: Grundlagen. Hüthig, Heidelberg, 2008

Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. (Hrsg., heute: Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.): Dokumentation 707: Fügen durch Umformen. Nieten und Durchsetzfügen - Innovative Verbindungsverfahren für die Praxis. Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 1996

Symietz, D.; Lutz, A.: Strukturkleben im Fahrzeugbau: Eigenschaften, Anwendungen und Leistungsfähigkeit eines neuen Fügeverfahrens. Die Bibliothek der Technik, Bd. 291. Verl. Moderne Industrie, Landsberg a. Lech, 2006

Fachzeitschriften

Adhäsion: Kleben & Dichten, Vieweg + Teubner / Springer Fachmedien, Wiesbaden

International Journal of Adhesion and Adhesives, Elsevier, Amsterdam

The Journal of Adhesion, Taylor & Francis, London

10.3 Bildnachweis

Titelbild: Henkel AG & Co. KGaA
Abb. 3: Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik, TU Kaiserslautern

Abb. 4: Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik, TU Kaiserslautern

Abb. 5: Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik, TU Kaiserslautern

Abb. 15: Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF), Universität Paderborn

Abb. 18: Daimler AG

Abb. 20: TOX-PRESSOTECHNIK GmbH & Co. KG

Abb. 22: Schmitz Cargobull AG

Abb. 24: Henkel AG & Co. KGaA

Abb. 25: Henkel AG & Co. KGaA

Abb. 26: Henkel AG & Co. KGaA

Abb. 27: Audi AG

Abb. 29: Audi AG

Abb. 31: Jüdisches Museum Berlin, Jens Ziehe

Abb. 32: Walter Hallschmid GmbH & Co. KG / Reinhard Eder Blechbau GmbH

11 Normen und Regelwerke

Normen

ASTM D 3166 (reapproved 2005)
Prüfung der Ermüdungsfestigkeit von Metallklebungen im Zugscher-versuch

DIN 267-27:2009
Mechanische Verbindungselemente - Teil 27: Schrauben aus Stahl mit klebender Beschichtung, Technische Lieferbedingungen

DIN 6701-1:2004
Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen - Teil 1: Grundbegriffe, Grundregeln

DIN 6701-2:2006
Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen - Teil 2: Qualifikation der Anwenderbetriebe, Qualitätssicherung

DIN 6701-3:2010
Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen - Teil 3: Leitfaden zur Konstruktion und Nachweisführung von Klebverbindungen im Schienenfahrzeugbau

DIN 6701-4:2010
Kleben von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen - Teil 4: Ausführungsregeln und Qualitätssicherung

DIN 8593-8:2003
Fertigungsverfahren Fügen - Teil 8: Kleben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe

DIN 54455:1984
Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen; Torsionsscher-Versuch

DIN 54461:2005
Strukturklebstoffe - Prüfung von Klebverbindungen - Biegeschäl-versuch

DIN EN 923:2008
Klebstoffe - Benennungen und Definitionen

DIN EN 1464:2010
Klebstoffe - Bestimmung des Schälwiderstandes von Klebungen - Rollenschälversuch

DIN EN 1465:2009
Klebstoffe - Bestimmung der Zug-scherfestigkeit von Überlappungs-klebungen

DIN EN 13887:2003
Strukturklebstoffe - Leitlinien für die Oberflächenvorbehandlung von Metallen und Kunststoffen vor dem Kleben

DIN EN 14444:2006
Strukturklebstoffe - Qualitative Bestimmung der Beständigkeit geklebter Baugruppen - Keilberstprüfung (ISO 10354:1992, modifiziert)

DIN EN 14869-1:2011
Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf verklebter Hohlzylinder (ISO 11003-1:2001, modifiziert)

DIN EN 14869-2:2011
Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Füge-teile (ISO 11003-2:2001, modifiziert)

DIN EN 15337:2007
Klebstoffe - Bestimmung der Scherfestigkeit von anaeroben Klebstoffen unter Verwendung von Bolzen-Hülse-Probekörpern (ISO 10123:1990, modifiziert)

DIN EN 15865:2009
Klebstoffe - Bestimmung der Drehfestigkeit von anaeroben Klebstoffen auf geklebten Gewinden (ISO 10964:1993, modifiziert)

DIN EN 15870:2009
Klebstoffe - Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen (ISO 6922:1987, modifiziert)

DIN EN ISO 9227:2006
Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären - Salzsprühnebelprüfungen

DIN EN ISO 9653:2000
Klebstoffe - Prüfverfahren für die Scherschlagfestigkeit von Klebungen

DIN EN ISO 9664:1995
Klebstoffe - Verfahren zur Prüfung der Ermüdungseigenschaften von Strukturklebungen bei Zugscherbeanspruchung

DIN EN ISO 10365:1995
Klebstoffe - Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder

DIN EN ISO 11339:2010
Klebstoffe - T-Schälprüfung für geklebte Verbindungen aus flexiblen Füge-teilen

DIN EN ISO 11343:2005
Klebstoffe - Bestimmung des dynamischen Keil-Schlag-Widerstandes von hochfesten Klebungen unter Schlagbelastung - Keil-Schlag-Verfahren

ISO 11003-1:2001
Klebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen - Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpfgeklebter Hohlzylinder

ISO 11003-2:2001
Klebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens von Strukturklebstoffen - Teil 2: Scherprüfverfahren für dicke Füge-teile

Regelwerke

DVS 1618

Elastisches Dickschichtkleben im Schienenfahrzeugbau
Merkblatt des DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., Ausgabe 2002

DVS 2520

Kleben in der Nutzfahrzeug-Reparatur - Kofferaufbauten
Merkblatt des DVS, Ausgabe 2009

DVS 3310

Qualitätsanforderungen in der Klebtechnik
Richtlinie des DVS, Ausgabe 2003

DVS/EFB 3450-1

Hybridfügen: Clinchkleben - Stanznietkleben: Überblick
Merkblatt des DVS (Hrsg.), Ausgabe 2007

Merkblatt DVS/EFB 3480-1

Prüfung von Verbindungseigenschaften - Prüfung der Eigenschaften mechanisch und kombiniert mittels Kleben gefertigter Verbindungen
Merkblatt des DVS (Hrsg.), Ausgabe 2007

VDA 621-415

Prüfung des Korrosionsschutzes von Kraftfahrzeuglackierungen bei zyklisch wechselnder Beanspruchung
Prüfblatt des Verbands der Automobilindustrie e.V. (VDA), Ausgabe 1982

VDI 2229

Metallkleben: Hinweise für Konstruktion und Fertigung
Richtlinie des VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ausgabe 1979

VDI/VDE 2251 Blatt 8

Feinwerkelemente - Klebverbindungen

Richtlinie des VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.), Ausgabe 2007

VW PV 1200

Fahrzeugteile - Prüfung der Klimawechselfestigkeit (+80/-40) °C
Prüfvorschrift der Volkswagen AG

ZVSHK-Merkblatt:

Kleben in der Klempnertechnik
Zentralverband Sanitär Heizung Klima, Ausgabe 2003



**Stahl-Informations-Zentrum
im Stahl-Zentrum**

Postfach 10 48 42 · 40039 Düsseldorf
Sohnstraße 65 · 40237 Düsseldorf
E-Mail: siz@stahl-info.de · www.stahl-info.de



Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

Postfach 10 22 05 · 40013 Düsseldorf
Sohnstraße 65 · 40237 Düsseldorf
E-Mail: info@edelstahl-rostfrei.de · www.edelstahl-rostfrei.de