

Innovative Verbindungstechnik für kritische Bereiche, Teil 1

Klebeverbindungen in der Kältetechnik

Jörg Peters, Monika Knabe, Dr. Jürgen Schenk,
Fritz Liebrecht, Gunnar Henke und Alexander Wirsching

Bei der vorgestellten Arbeit geht es nicht darum, in der Kältetechnik nun zu kleben, weil in anderen Bereichen der Technik auch vielfach Klebeverbindungen verwendet werden. Ziel ist es, zu zeigen, dass diese Technik in solchen Fällen anwendbar ist, in denen Löten schwieriger oder gar unmöglich ist, weil es z.B. der Betreiber eines Serverraumes zum Schutz der EDV schlicht verbietet. Damit Klebeverbindungen in der Kältetechnik eingesetzt werden können, ist selbstverständlich der Nachweis dafür notwendig, dass solche Verbindungen allen Anforderungen hinsichtlich Dichtigkeit, Dauerfestigkeit, praktischer Handhabbarkeit etc. genügen. Die nachfolgend dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass auch für die Kältetechnik technisch sichere Klebeverbindungen herstellbar sind.

Das konstruktive Kleben als stoffschlüssiges, wärmearmes Fügeverfahren hat sich in allen Bereichen der handwerklichen und industriellen Metallverarbeitung als leistungsfähige und effiziente Technologie etabliert. Sowohl bei der Fertigungsprozessgestaltung für neue Produkte als auch in der laufenden Fertigung erobert sich das Kleben als Fügeverfahren neue Anwendungsgebiete, häufig als Alternative oder anwendungsbezogene Ergänzung zu den etablierten thermischen und mechanischen Fügeverfahren.

In vielen Bereichen der Technik werden inzwischen sogar hochbeanspruchte Verbindungen mittels Klebetechnik realisiert. Beispiele dafür finden sich u.a. im Flugzeug- und im Automobilbau. In der Kältetechnik sind derartige Verbindungstechniken bisher nicht gebräuchlich.

Der hohe Erneuerungsgrad bei Industrieklebstoffen und die bedeutenden Weiterentwicklungen zugehöriger Reinigungs- und Oberflächenvorbehandlungsmethoden haben in den vergangenen 15 Jahren zu einem qualitativ neuen Stand der Technik geführt. Daraus ergeben sich günstige Voraussetzungen, um das Kleben als sicheres

und effizientes Fügeverfahren im technisch und technologisch anspruchsvollen Gebiet der Kältetechnik zu etablieren. Dies betrifft vorrangig das Kleben von artgleichen Cu-Rohrverbindungen. Der Einsatz einfach zu verarbeitender pastöser Konstruktionsklebstoffe eröffnet die Möglichkeit hochbeanspruchbare Klebeverbindungen durch wärmearmes Fügen zu erzeugen, mit ähnlichen Eigenschaftspotenzialen wie die etablierten Lötverbindungen.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Bundesfachschule Kälte-Klima-Technik (Projektleitung), der TEKO Gesellschaft für Kältetechnik mbH, der TU Dresden (Institut für Produktionstechnik,

zu den Autoren

Jörg Peters,
Bundesfachschule Kälte-Klima-Technik
Monika Knabe, Dr. Jürgen Schenk,
Institut für Luft- und Kältetechnik
Dresden gGmbH
Fritz Liebrecht, Gunnar Henke,
TU Dresden, Institut für Produktionstechnik,
Professur Fügetechnik und Montage
Alexander Wirsching,
TEKO Gesellschaft für Kältetechnik mbH

Lehrstuhl Fügetechnik und Montage) und dem Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH wurden experimentelle Untersuchungen zur Herstellung stabiler Klebeverbindungen für die Rohrleitungsverbindung in der Kältetechnik durchgeführt.

- Diese Untersuchungen umfassten die
- Auswahl und Erprobung geeigneter Klebstoffe hinsichtlich der Kompatibilität mit Kältemitteln (HFKW) und Ölen (POE-Öle)
 - Klebetechnologie einschließlich Vorbehandlung der Rohrleitungen
 - Erprobung in einer Versuchskälteanlage bei TEKO

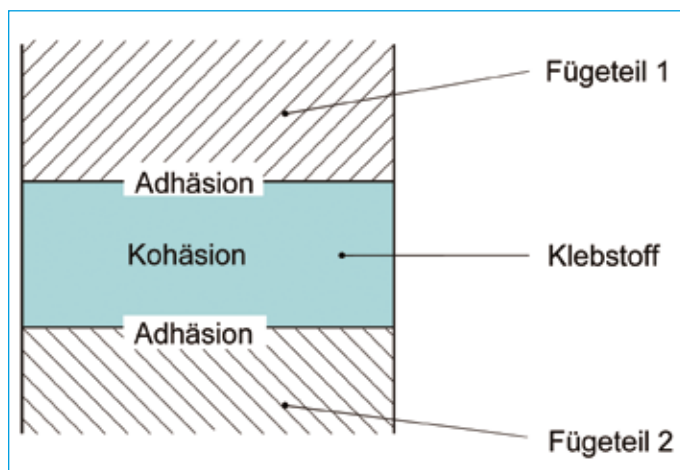


Bild 1 Prinzipieller Aufbau einer Klebeverbindung

Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des DKV am 24. November 2006 in Dresden.

Zuwendungsgeber für das Pilotprojekt: HA Hessen Agentur GmbH (TSH – Technologie Stiftung Hessen GmbH), TSH-Proj.-Nr. 75/04-01, BMWA – Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, AZ: VIII C 5 – 70 91 96/9

Luft- und Raumfahrt	30–40 MPa
Industrie, konstruktiv	15–25 MPa
Industrie, nicht konstruktiv	5–10 MPa
Elastische Dickschichtklebung	< 5 MPa

Bild 2 Einteilung der Klebstoffe nach der Klebfestigkeit von Klebverbindungen im Zugscherversuch

- Test der Klebeverbindungen unter wechselnden Drücken und Temperaturen in einem speziellen Versuchsstand beim ILK Dresden

Stand der Technik Metallkleben

Das konstruktive Kleben von Metall-Halbzeugen wie Guß, Profil, Blech und Rohr mit dem Ziel definierte Kräfte und Momente dauerhaft unter vorgegebenen Bedingungen zu übertragen, wurde insbesondere im Bereich des Blechklebens Mitte der 90er Jahre flächendeckend eingeführt.

Grundlage hierfür ist die Entwicklung neuer chemisch härtender Klebstoffsysteme, im Wesentlichen auf Basis von Poly-

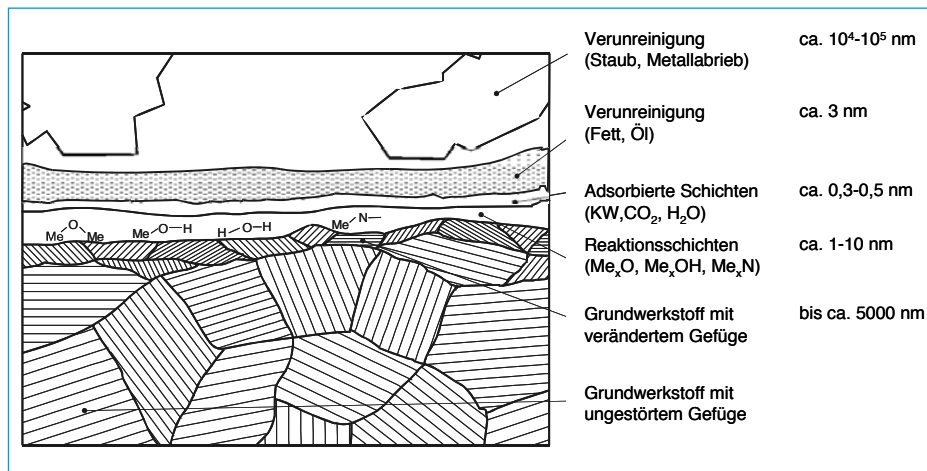


Bild 3 Schichtaufbau bei Metallen

urethan- und Epoxidharzprodukten, mit denen bei einfachen Aushärtungsbedingungen (Wegfall von Autoklavprozessen u. ä.) hochfeste Klebverbindungen entstehen, deren Eigenschaftspotenzial hinsichtlich statischer, dynamischer und medialer Belastbarkeit eine neue Qualität darstellt.

Dem Klebstoff als ein nach DIN EN 923 „... nichtmetallischen Stoff, der Füge-teile durch Flächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) verbinden kann ...“, kommt hierbei zentrale Bedeutung zu. Den prinzipiellen Aufbau einer Klebverbindung zeigt Bild 1.

Prinzip der Reaktionsauslösung	Beispiel
Temperatur	1-Komponenten Epoxydharz
Zugabe eines Härter	2-Komponenten Epoxydharz
Zugabe eines Härter	2-Komponenten Polyurethan
Feuchtigkeit	Feuchtigkeitsvernetzendes Silicon
Strahlung	UV-härtendes Diacrylat
Ausschluss von Sauerstoff	Anaerob härtendes Diacrylat
Feuchtigkeit auf Oberflächen	Cyanacrylat

Bild 4 Härtingsprinzipien chemisch reagierender Klebstoffe

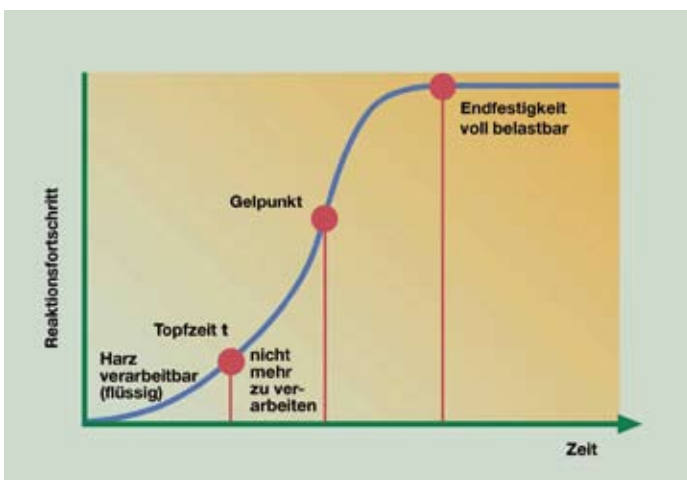


Bild 5 Zeitabhängiger Aushärtungsverlauf eines 2-Komponenten-Klebstoffes (Quelle: Folienserie Fonds der chemischen Industrie)

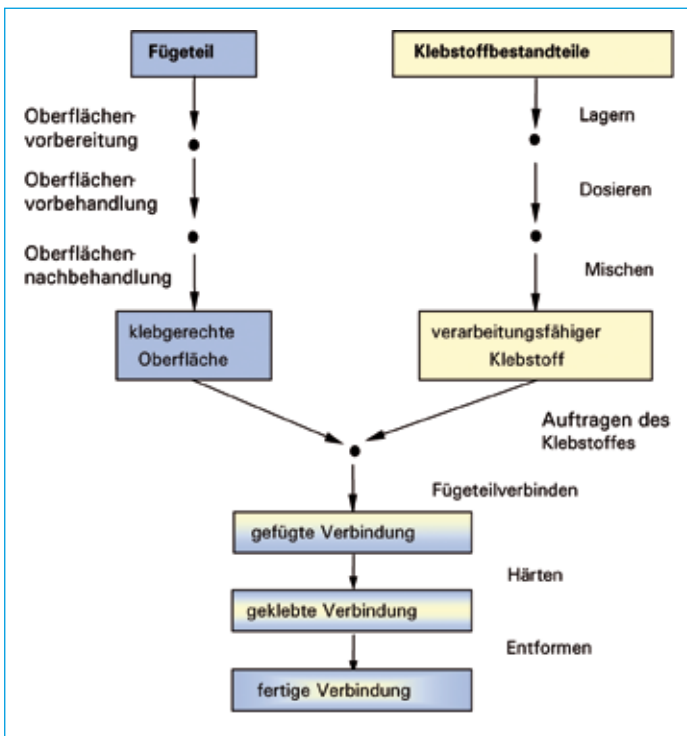


Bild 6 Fertigungsprozess „Kleben“

Die vom Klebstoffhersteller formulierten Kohäsionseigenschaften des organischen Klebstoffes im Sinne seiner Eigenfestigkeit, vergleiche Bild 2, können im Idealfall bei Schaffung optimaler Adhäsionseigenschaften zu den Fügeteilen in

eine entsprechende Verbundfestigkeit der Klebung umgesetzt werden, sodass diese mit der Fügeteilfestigkeit selbst nahezu identisch ist.

Für den Aufbau von Adhäsionskräften ist die Benetzung der Fügeteiloberflächen

mit dem bei der Verarbeitung flüssigen Klebstoff zwingend notwendig. Metalle weisen in der Regel wegen ihrer gegenüber Kleb-(Kunst-)stoffen höheren Bindungsenergie eine gute Benetzbarkeit auf. Mit entsprechender Benetzung können die die Adhäsion hervorruhenden Bindungskräfte zwischen Klebstoff und Fügeteiloberfläche wirksam werden. Da diese Bindungskräfte nur eine Reichweite von 0,1–0,6 nm (1 nm = 1×10^{-6} mm) besitzen, müssen sich die Reaktionspartner im Abstandsbereich dieser Kraftwirkung annähern können. Damit kommt einerseits der Fließfähigkeit des Klebstoffes, gekennzeichnet durch dessen Viskosität, und andererseits der Grenzschicht der Fügeteile große Bedeutung zu.

Als Grenzschicht wird bei Metallen, die einen, wie in Bild 3 skizzierten, ausgeprägten Schichtaufbau aufweisen, die mit dem Grundmaterial fest verbundene Deck- bzw. Reaktionsschicht (z.B. Oxidschicht bei Aluminium) definierter Rauigkeit verstanden.

Mögliche Kontaminationen der Fügeteiloberfläche wie z.B. Öle, Silikon, Staub oder Adsorbate führen zur Verschlechterung von Benetzung und Haftungsaufbau und sind deshalb vor Klebstoffauftrag zu beseitigen bzw. auf ein Mindestmaß zu reduzieren.

Mit der Bereitstellung klebgerechter Fügeteiloberflächen kann dann die eigentliche Klebfertigung erfolgen, wobei Art und Verfahren von Klebstoffauftrag, Fügen, Fixieren und Härten jeweils produktspezifisch zu gestalten sind.

Allen Anwendungen gemeinsam ist die Notwendigkeit den charakteristischen Härtingverlauf chemisch härtender Klebstoffe, wie in Bild 4 aufgelistet, zu berücksichtigen, um Verbindungsfehler oder die Beeinträchtigung von Fertigungsumwelt und Fügeteilen sicher zu vermeiden.

Den Reaktionsverlauf der in diesem Projekt favorisierten chemisch härtenden 2-Komponenten-Klebstoffe charakterisiert exemplarisch Bild 5.

Unter Beachtung der bei Fertigung und im Servicefall praxisrelevanten Bedingungen für das Fügen bei Kälteanlagen, wurde der Prozess der Klebfertigung schrittweise umgesetzt.

Anforderungsprofil Klebstoff / Klebverbindung

Um aus der Vielzahl potenziell geeigneter Klebstoffe (ca. 30 000 Industrieklebstoffe in Deutschland) die anwendungsbezogenen geeigneten Vertreter herauszufinden

Klebstoff	Kurzzeichen	Charakterisierung
Polyurethan 1 und Primer 1	PU1/P1	einkomponentig feuchtigkeitshärtende Polyurethane
Polyurethan 1 und Primer 2	PU1/P2	
Polyurethan 2 und Reiniger	PU2/CI	
Silicon 1	Silicon	feuchtigkeitshärtendes Silicon
Epoxydharz 1	EP	zweikomponentig kalthärtendes Epoxidharz

Tabelle 1 Übersicht zur Klebstoffauswahl

Zyklus (Tage)	Zeit (Stunden)	Temperatur (°C)	rel. Feuchte (%)
5 im Wechsel von:	8	70	100
	16	-6	50
2 konstant:	24	23	65

Tabelle 2 Langzeitbeständigkeit von Kupfer-Edelstahl-Klebsverbindungen

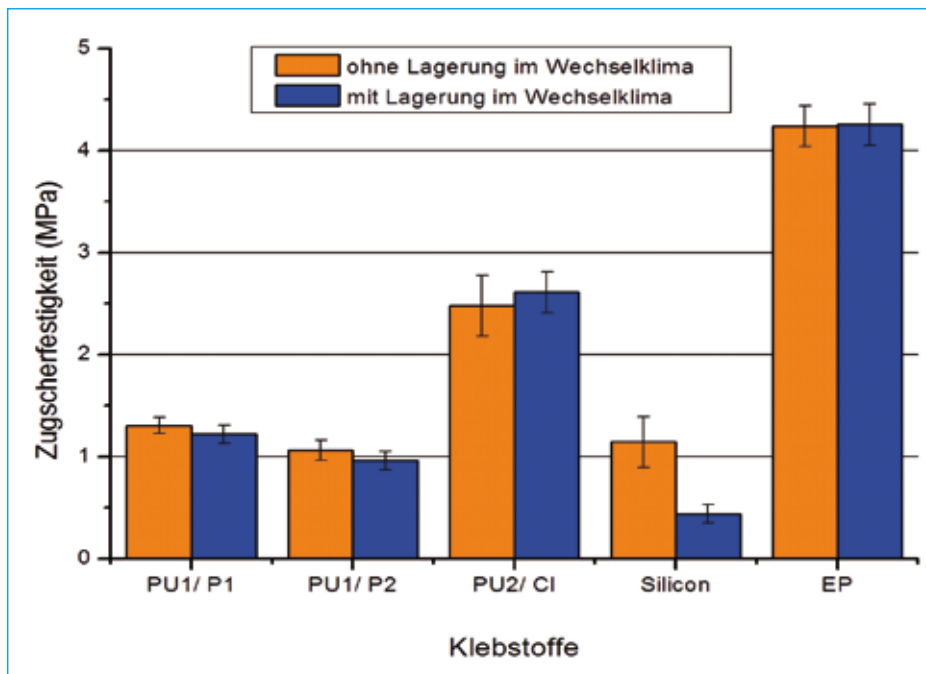


Bild 7 Zugscherfestigkeiten geklebter Edelstahl-Kupfer-Verbindungen nach Alterung

den, macht sich die Erstellung eines die wesentlichen Anforderungen umreisenden Anforderungsprofils für den Klebstoff bzw. die Klebverbindung erforderlich.

Im konkreten Fall wird sich auf die dominanten Anforderungen beschränkt, da es bei zu umfangreicher Auflistung von Anforderungen häufig zum vorzeitigen, nicht gerechtfertigten Ausschluss ganzer Klebstoffklassen kommen kann.

Anforderungen an den Klebstoff in der Kältetechnik:

- hohe Festigkeit bei gleichzeitig gutem Deformationsvermögen,
- einfache Verarbeitung und schnelle Aushärtung sowie
- gute chemische Medienbeständigkeit und Dichtwirkung

Anforderungen an die Klebverbindung in der Kältetechnik:

- kein undefinierter Klebstoffaustritt an den Überlappungsenden,
- hohe Verbindungsfestigkeit bei vorgegebenen Fügespalten und Überlappungslängen

Mit diesen Randbedingungen wurden Voruntersuchungen zur Klebfestigkeit an ebenen Zugscherproben absolviert, um mit geringem Aufwand orientierende Ergebnisse zur Eignung unterschiedlicher Klebstoffklassen zu gewinnen.

Voruntersuchungen zur Klebstoffauswahl

Bei der Klebstoffauswahl wurde exemplarisch mit den Fügepartnerwerkstoffen Edelstahl und Kupfer begonnen, zwei Werk-



Bild 8 Bruchbilder mit Siliconklebstoff nach Lagerung Normal- (oben)/Wechselklima (unten)



Bild 9 Bruchbilder mit Klebstoff PU1/P1 nach Wechselklima

stoffe die für sich genommen nicht unproblematisch zu kleben sind, bei deren Verbund vor allem die sehr unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zu berücksichtigen sind. Ausgewählt wurden deshalb sehr flexible einkomponentig feuchtigkeitshärtende Polyurethanklebstoffe in Verbindung mit speziellen Primern oder Reinigern, ein Siliconklebstoff sowie im Kontrast dazu ein zweikomponentig kalthärtender Epoxidharzklebstoff (Tabelle 1). Die Klebstoffbezeichnungen wurden in dieser Veröffentlichung anonymisiert.

Versuchsbedingungen und Versuchsprogramm

Um im ersten Schritt Aussagen zur prinzipiellen Klebbarkeit der im Kälteanlagenbau typischen Werkstoffe Kupfer und



Bild 10 Bruchbilder mit Klebstoff EP nach Wechselklima

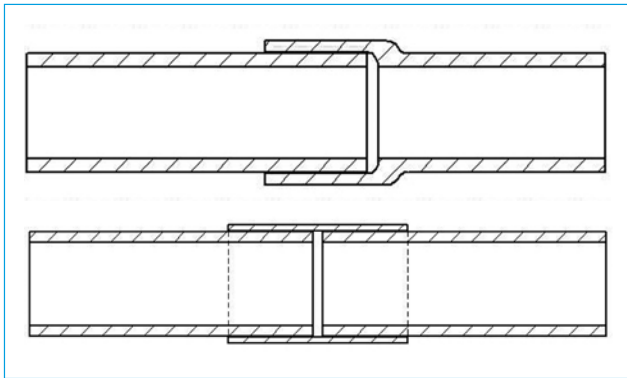


Bild 11 Verbindungsarten Kupferrohrklebungen. Oben: Rohr-Rohr aufgeweitet (RR), unten: Rohr-Muffe-Rohr (RM)

Rohrdurchmesser [mm]	Überlappungslänge [mm]	Klebspalt [mm]	Verbindungs- typ
12	ca. 9,0	0,1–0,15*	RR
	ca. 10,5**	0,03–0,04	RM
54	ca. 14,5	0,25–0,35	RR
	ca. 33,0**	0,1–0,15	RM

* ... Übergangspassung bei anaeroben Klebstoffen / **... je Seite

Tabelle 3 Repräsentativ festgelegte Rohrverbindungen

Edelstahl zu gewinnen, wurden Überlappklebungen mit ebenen Blechzuschnitten untersucht. Die mit dem Kupferblech zu klebenden Edelstahlbleche hatten eine Breite von 20mm. Sie wurden mit zugeschnittenen Kupferblechen überlappend mit 40mm Verbindungslänge geklebt, sodass eine Festigkeitsprüfung im Zugscherversuch erfolgen konnte. Beide Fügepartienwerkstoffe wurden durch Schleifen mit Schleifpapier und anschließendes Reinigen mit Aceton behandelt. Je Versuch wurden 10 Klebungen hergestellt.

Die Klebungen wurden einem Klimawechseltest über 28 Tage unterzogen, bei dem die Bedingungen Wärme, Feuchtigkeit und Kälte nachgestellt wurden. Der zeitliche Wechsel dieser Bedingungen ist in Tabelle 2 dargestellt. Dagegen stehen die Festigkeitswerte, die nach 28 Tagen Lagerung bei 23 °C und 65% relativer Feuchte als Referenzwerte erhalten wurden.

Das Ergebnis der Versuche zeigt in Bild 7, dass bis auf den eingesetzten Siliconklebstoff mit dem Abfall der Festigkeit unter die Hälfte des Ausgangswertes, alle anderen Klebungen ein gutes Alterungsverhalten aufweisen.

Beim Siliconklebstoff könnten die Ursachen des mangelhaften Alterungsverhaltens mit dessen relativ hoher Wasserdurchlässigkeit zusammenhängen.

Die Bruchflächen der gealterten und geprüften Proben bieten das Bild eines Adhäsionsbruches auf dem Kupfer, während die Bruchflächen der bei Normklima gealterten Proben einen Kohäsionsbruch erkennen lassen, Bild 8.

Die sehr flexiblen feuchtigkeitshärtenden Polyurethanklebstoffe besitzen ein vergleichsweise niedriges Festigkeitsniveau, was aber bei den zu erwartenden mechanischen Beanspruchungen und der konstruktiv begrenzten Klebfläche ebenfalls zum vorläufigen Ausschluss dieser Klebstoffgruppe wie auch der vergleichbar niederfesten Siliconklebstoffe führt. Die Probenbrüche sind nahezu vollständig kohäsiv, siehe Bild 9.

Die kleineren Flächenanteile, bei denen die rote Kupferoberfläche sichtbar wird, sollten nicht voreilig mangelhafter Adhäsion des Klebstoffes zugeschrieben werden. Bei Verwendung des Klebstoffes PU1 ist eine Kombination mit dem Primer 1 vorteilhafter als die mit dem Panel Primer. Mit dem wesentlich steiferen Epoxidharzklebstoff werden beträchtlich höhere Festigkeiten erzielt. Die Probenbrüche erfolgen stets grenzschichtnah am Kupfer, siehe Bild 10.

Dies steht im Einklang mit den mechanischen Eigenschaften des Klebstoffes und der Tatsache, dass sich Kupfer bei Kräfteinwirkung sehr viel stärker verformt als Edelstahl. Vorläufig wird der Schluss gezogen werden, dass alterungsbeständige Klebverbindungen von Edelstahl auf Kupfer unter simulierten Bedingungen eines Temperaturwechsels bei hohem Feuchtigkeitsangebot möglich sind.

Laborversuche Rohrklebungen

In der nächsten Phase der Projektbearbeitung wurden die o.g. Erkenntnisse für praxisrelevante Rohrverbunde artgleicher Kupferrohre verifiziert. Die dafür charakteristischen Fügeiteilanordnungen sind in Bild 11 schematisch dargestellt.

In Absprache mit den Projektpartnern wurden für die Laboruntersuchungen die in nachfolgender Tabelle aufgelisteten Rohrverbindungen im Sinne repräsentativer Verbindungstypen festgelegt.

Diese Rohrverbindungen wurden manuell und unter gleich bleibenden Fertigungsbedingungen, siehe Kasten Klebfertigung, mit kommerziellen Industrieklebstoffen geklebt. ■

Klebfertigung „Labor“

Schritt 1: Vorreinigen mit Isopropanol im Ultraschallbad t=120s



Schritt 2: Trocknen der Proben bei RT oder mit Heißluft

Schritt 3: Umfangsschleifen der Proben mit synthetischem metallfreiem Vlies



Schritt 4: Reinigen mit Isopropanol im Ultraschallbad t=300s

Schritt 5: Trocknen der Proben mit Heißluft, Klimatisierung auf RT im Gestell



Teil 2 dieses Berichtes mit den Ergebnissen der Alterungsuntersuchungen, Wechselbeanspruchungen und Prüfungen in einer realen Anlage finden Sie in der nächsten Ausgabe der KK.

Schritt 6: Klebstoffapplikation mit Kartuschenpistole als Raupe oder / und Spatelaufrag auf gesamte Klebfläche



Schritt 7: Fixierung der Teile auf Ablagegestell bzw. mit Fixierdornen



Schritt 8: Aushärtung der Proben je nach Versuchsplan

- bei RT oder
- Warmaushärtung im Laborofen (t=80 °C, =15 min)

Klebstoff	Aushärtung
1K-anaerob härtender Klebstoff	Endfest 6h/RT
1K-anaerob härtender Klebstoff	Endfest 24h/RT
2K-kalthärtendes Epoxidharz	Endfest 24h/RT
2K-Epoxidharz	Endfest 3h/80 °C
2K-Epoxidharz	Endfest 16h/40 °C
2K-Epoxidharz	Endfest 4h/60 °C

Tabelle 4 Bezeichnungen, Reaktionstyp und Aushärtebedingungen der eingesetzten Versuchsklebstoffe