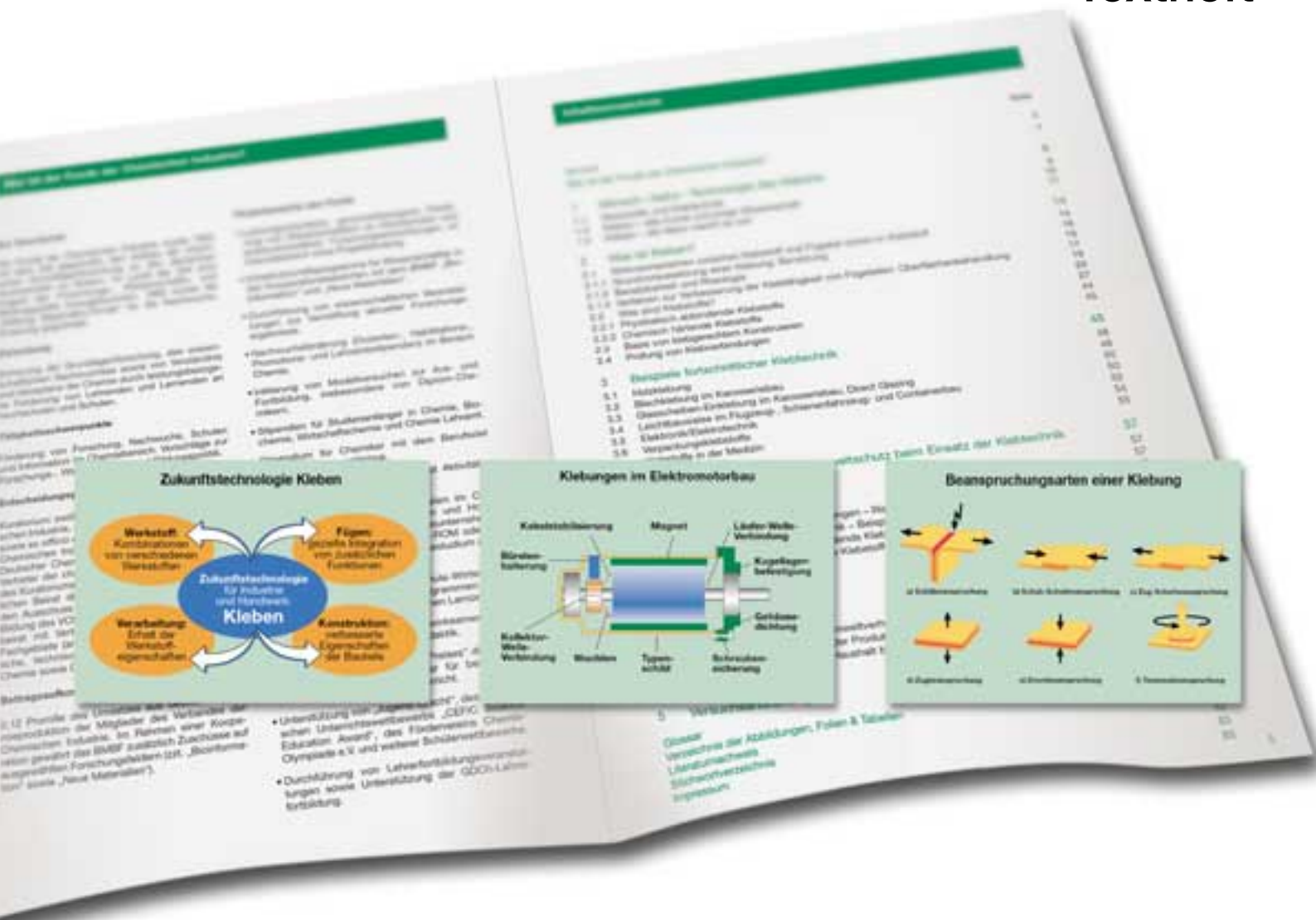




# Informationsserie des Fonds der Chemischen Industrie

## 27 Kleben/Klebstoffe

Textheft





Kleben ist heute in allen Bereichen des täglichen Lebens und der Industrie ein unverzichtbares Fügeverfahren, um zwei oder mehrere Substrate miteinander zu verbinden. Durch dieses Verfahren können Verbundwerkstoffe geschaffen werden, die Mobilität und Kommunikation ermöglichen, den Umgang mit Nahrungsmitteln erleichtern, Gesundheit und Hygiene sichern, die Wohnqualität verbessern und die Herstellung innovativer Produkte in vielen Fällen erst möglich machen. Die vorliegende Informationsserie „Kleben/Klebstoffe“ enthält hierfür zahlreiche Beispiele.

Jährlich werden alleine in Deutschland mehr als 500.000 Tonnen Klebstoff produziert und verbraucht – Tendenz steigend. Für die unterschiedlichsten Anwendungen bieten die Klebstoffhersteller über 25.000 verschiedene Produkte an – maßgeschneidert für (fast) jeden Zweck. Denn Klebstoff ist nicht gleich Klebstoff. Je nach Anwendung muss er extreme Minusgrade oder mehrere hundert Grad Hitze aushalten können, hochelastisch oder extrem stabil sein. Die Informationsserie „Kleben/Klebstoffe“ wird, wie die weiteren Informationsserien des Fonds der Chemischen Industrie, Schulen und Bildstellen im Inland kostenlos zur Verfügung gestellt. Das Begleitheft kann separat ohne Folien angefordert werden. Diese Serie ist auch auf CD-ROM und im Internet unter [www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds) erhältlich.

Der Fonds der Chemischen Industrie verfolgt mit seinen Informationsserien das Ziel, sachlich fundierte Informationen zu praxisrelevanten chemischen Themen zur Verfügung zu stellen. Wir wollen zeigen, wie die Entdeckung chemischer Vorgänge durch die industrielle Entwicklung und Fertigung zu Produkten des täglichen Lebens führt. Häufig steht zu Beginn einer Erfindung der Zufall oder die Natur Pate, während sich im Laufe des industriellen Innovationsprozesses und der konsequenten Weiterentwicklung nur die Produkte auf dem Markt halten, die unseren heutigen und immer weiter steigenden Anforderungen genügen.

In unseren Gremien arbeiten Vertreter der chemischen Industrie gemeinsam mit Hochschullehrern und Lehrern der Chemie. Wir hoffen, mit der vorliegenden Informationsserie, ausgehend von den Alltagserfahrungen mit dem Klebprozess bzw. dem Alltagsprodukt Klebstoffe, Neugierde am industriellen Hochleistungskleben und insbesondere auch Interesse und Begeisterung für die chemischen und physikalischen Grundlagen zu wecken.

Frankfurt am Main/Düsseldorf,  
September 2001

Die Herausgeber

## Zur Geschichte

Der Fonds der Chemischen Industrie wurde 1950 mit dem Ziel gegründet, den Aufbau der chemischen Grundlagenforschung an den deutschen Hochschulen zu fördern. Im Laufe der Zeit sind Fragen der Forschungs-, Wissenschafts- und Bildungspolitik hinzugekommen. 1965 wurde die „Stiftung Stipendien-Fonds“ für die Nachwuchsförderung gegründet.

## Zielsetzung

Sicherung der Grundlagenforschung, des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie von Verständnis und Akzeptanz der Chemie durch leistungsbezogene Förderung von Lehrenden und Lernenden an Hochschulen und Schulen.

## Tätigkeitsschwerpunkte

Förderung von Forschung, Nachwuchs, Schulen und Information im Chemiebereich. Vorschläge zur Forschungs-, Wissenschafts- und Bildungspolitik.

## Entscheidungsgremium

Kuratorium: zwölf Forschungsvorstände der chemischen Industrie, sechs Hochschullehrer der Chemie sowie *ex officio* die Präsidenten des Verbandes der Chemischen Industrie (VCI) und der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh). Vorsitzender ist ein Vertreter der chemischen Industrie. Die Mitglieder des Kuratoriums bilden zugleich den wissenschaftlichen Beirat der Stiftung Stipendien-Fonds und den Ausschuss für Forschung, Wissenschaft und Bildung des VCI. Unterstützend ist ein Forschungsbeirat mit Vertretern der einzelnen chemischen Fachgebiete (anorganische, organische, physikalische, technische/makromolekulare, biologische Chemie sowie Chemiedidaktik) tätig.

## Beitragsaufkommen

0,12 Promille des Umsatzes aus deutscher Chemieproduktion der Mitglieder des Verbandes der Chemischen Industrie. Im Rahmen einer Kooperation gewährt das BMBF zusätzlich Zuschüsse auf ausgewählten Forschungsfeldern (zzt. „Bioinformation“ sowie „Neue Materialien“).

## Förderbereiche des Fonds

- Leistungsorientierte, personenbezogene Förderung von Wissenschaftlern an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen im Chemiebereich ohne Projektbindung.
- Infrastrukturhilfeprogramme für Wissenschaftler in den Kooperationsbereichen mit dem BMBF „Bioinformation“ und „Neue Materialien“.
- Durchführung von wissenschaftlichen Veranstaltungen zur Vermittlung aktueller Forschungsergebnisse.
- Nachwuchsförderung (Dozenten-, Habilitations-, Promotions- und Lehramtsstipendien) im Bereich Chemie.
- Initiierung von Modellversuchen zur Aus- und Fortbildung, insbesondere von Diplom-Chemikern.
- Stipendien für Studienanfänger in Chemie, Biochemie, Wirtschaftschemie und Chemie Lehramt.
- Stipendium für Chemiker mit dem Berufsziel Wissenschaftsjournalismus.
- Unterrichtsförderung für Schulen mit Aktivitäten im Chemiebereich.
- Erstellung von Informationsmaterialien im Chemiebereich für Lehrer an Schulen und Hochschulen sowie Ausbilder in Mitgliedsunternehmen (Informationsserien auf Folien, CD-ROM oder im Internet, Informationen zum Chemiestudium unter [www.chemie-im-fokus.de](http://www.chemie-im-fokus.de) u. a.).
- Förderung von Schule-Hochschule-Wirtschaft-Partnerschaften, Mentoringprogrammen und Schülerlaboren an außerschulischen Lernorten.
- Förderung von öffentlichkeitswirksamen Forschungsprojekten der Chemiedidaktik.
- Stiftung des „Friedrich-Wöhler-Preises“ der MNU für praktizierende Chemielehrer für besondere Verdienste um den Chemieunterricht.
- Unterstützung von „Jugend forscht“, des europäischen Unterrichtswettbewerbs „CEFIC Science Education Award“, des Fördervereins Chemie-Olympiade e.V. und weiterer Schülerwettbewerbe.
- Durchführung von Lehrerfortbildungsveranstaltungen sowie Unterstützung der GDCh-Lehrerfortbildung.

Vorwort	3
Wer ist der Fonds der Chemischen Industrie?	4
<b>1 Mensch – Natur – Technologie des Klebens</b>	<b>6</b>
1.1 Werkstoffe und Klebtechnik	6
1.2 Kleben – alte Kunst und junge Wissenschaft	10
1.3 Kleben – die Natur macht es vor!	11
<b>2 Was ist Kleben?</b>	<b>14</b>
2.1 Wirkmechanismen zwischen Klebstoff und Füge­teil sowie im Klebstoff	14
2.1.1 Grundvoraussetzung einer Klebung: Benetzung	16
2.1.2 Benetzbarkeit und Rheologie	16
2.1.3 Verfahren zur Verbesserung der Klebfähigkeit von Füge­teilen: Oberflächenbehandlung	17
2.2 Was sind Klebstoffe?	19
2.2.1 Physikalisch abbindende Klebstoffe	20
2.2.2 Chemisch härtende Klebstoffe	27
2.3 Basis von klebgerechtem Konstruieren	44
2.4 Prüfung von Klebverbindungen	45
<b>3 Beispiele fortschrittlicher Klebtechnik</b>	<b>48</b>
3.1 Holzklebung	48
3.2 Blechklebung im Karosseriebau	48
3.3 Glasscheiben-Einklebung im Karosseriebau, Direct Glazing	50
3.4 Leichtbauweise im Flugzeug-, Schienenfahrzeug- und Containerbau	50
3.5 Elektronik/Elektrotechnik	52
3.6 Verpackungsklebstoffe	54
3.7 Klebstoffe in der Medizin	55
<b>4 Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutz beim Einsatz der Klebtechnik</b>	<b>57</b>
4.1 Gesundheitsschutz	57
4.1.1 Arbeitsschutz	57
4.1.2 Verbraucherschutz	57
4.1.3 Stoffinduzierte Gesundheitsauswirkungen – Risiko	58
4.1.4 Gesundheitsschutz in der Klebtechnik – Beispiele toxikologischer Bewertungen	59
4.1.4.1 Physikalisch abbindende Klebstoffe	59
4.1.4.2 Chemisch härtende Klebstoffe	59
4.1.5 Klebstoffauswahl	60
4.2 Umweltschutz in der Klebtechnik	60
4.2.1 Luft	60
4.2.2 Wasser	60
4.2.3 Boden	61
4.2.4 Beispiele zur Bewertung des Umweltverhaltens von Klebstoffen	61
4.2.4.1 Klebstoffe bei der Produktion bzw. im industriellen Einsatz	61
4.2.4.2 Klebstoffe im Haushalt beim Endverbraucher	61
4.2.5 Ausblick	62
<b>5 Versuchsanordnungen</b>	<b>63</b>
Glossar	73
Verzeichnis der Abbildungen, Folien & Tabellen	80
Literaturnachweis	82
Stichwortverzeichnis	83
Impressum	86

## 1.1 Werkstoffe und Klebtechnik

Die Welt um uns herum und mit ihr unsere Lebens- und Arbeitsgewohnheiten ändern sich in einem atemberaubenden Tempo. Wer hätte noch vor 15 Jahren geglaubt, dass z.B. Computer und Handys Allerweltsartikel des täglichen Gebrauchs werden könnten? Dass es ein 3-Liter-Auto geben könnte oder ablösbare Klebestreifen, die beim Abnehmen eines Posters nicht auch die Tapete mit herunterreißen? Die ständig steigenden Anforderungen an neue gegenständliche Produkte wirken als Motor des technischen Fortschritts: Jede Neuentwicklung muss heutzutage nicht nur – wie dies schon früher der Fall gewesen ist – besser und preiswerter sein als ihr Vorgängerprodukt, sondern sich heute auch dem Anspruch der Nachhaltigkeit stellen. Die Berücksichtigung ökologischer Aspekte trägt dazu bei, dass die Entwicklung neuer Produkte zunehmend anspruchsvoller wird und sich die Hersteller komplexeren Anforderungen an ihre Neuentwicklungen gegenübersehen. Steigende Anforderungen an Produkte haben von jeher ganz entscheidend dazu beigetragen, dass Werkstoffe weiter- bzw. neu entwickelt wurden.

Außer den klassischen Metallen sind dies spezifische Legierungen, Kunststoffe, aber auch Keramiken und Gläser. Eine besondere Rolle in dieser Entwicklung spielen so genannte Verbundwerkstoffe, die durch das Zusammenfügen verschiedener Materialien entstehen.

Ein schon lange bekannter Verbundwerkstoff ist der Stahlbeton. Neueren Ursprungs sind die durch Glas- oder Kohlenstofffasern verstärkten Kunststoffe, wie sie z. B. für den Bau von Sportbooten, zunehmend aber auch im Automobil-, Schienenfahrzeug- und Flugzeugbau verwendet werden.

Ein anderes gutes Beispiel für die Entwicklung und den Einsatz neuer Werkstoffe ist die Entwicklung des Rades bzw. des Reifens (Abb. 1). Speichenräder aus Holz genühten den Anforderungen der alten Ägypter. Für die Fertigung heutiger Reifen für unsere modernen Fortbewegungsmittel reicht selbst die Verwendung von Naturkautschuk allein nicht mehr aus. Hohe Geschwindigkeiten, wie wir sie von Autos erwarten, können nur durch Verbundkörper verschiedener Werkstoffe – nichts anderes ist ein Autoreifen – erreicht werden.

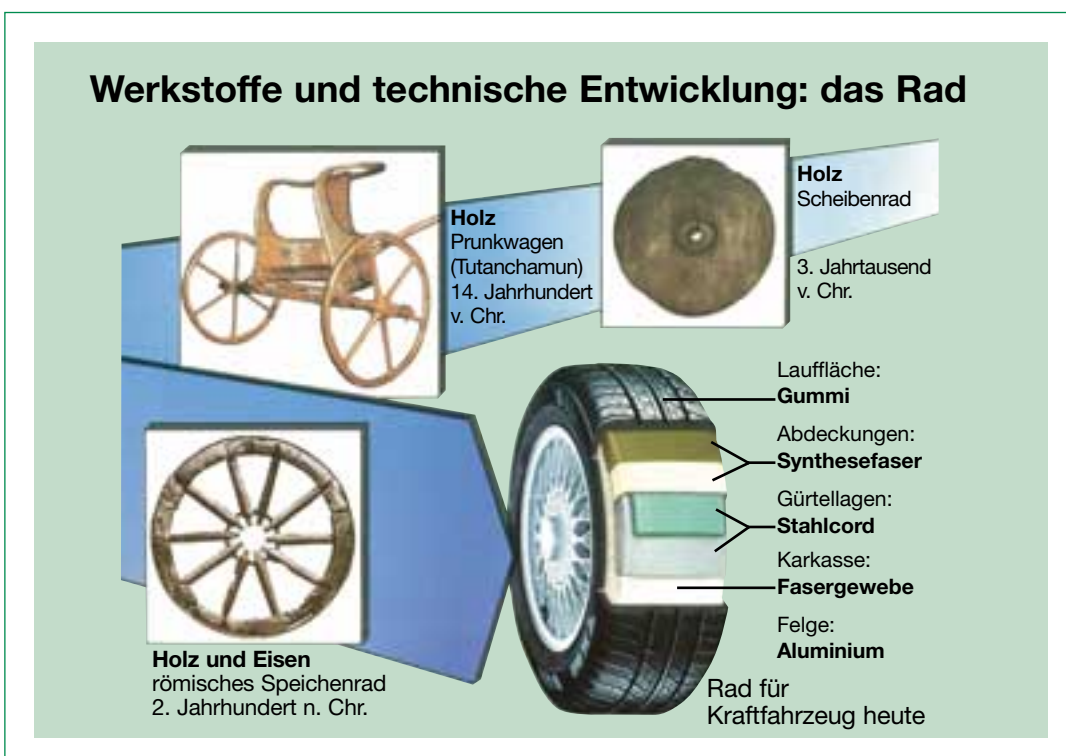


Abbildung 1  
Folie 1



## Fügeverfahren

Die Entwicklung neuer Werkstoffe mit ihren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten schafft weitere Herausforderungen an die Verarbeitungstechnik, insbesondere wenn verschiedene Werkstoffe zu Bauteilen gefügt werden, um ihre unterschiedlichen vorteilhaften Eigenschaften auch im Verbund zu nutzen. Das wirft die Frage auf: Welches Fügeverfahren (Abb. 2) ist in der Lage, diese Vielfalt von Werkstoffen artgerecht, d.h. unter Beibehaltung

3. Diese beiden Gründe führen in der Produktherstellung zu der Möglichkeit, die spezifischen Werkstoffeigenschaften für ein Bauteil optimal zu nutzen. Dies ermöglicht neue Bauweisen.
4. Im Weiteren ist es möglich, durch die Klebtechnik gezielt zusätzliche, über das eigentliche Verbinden hinausgehende Eigenschaften in das Bauteil zu integrieren.

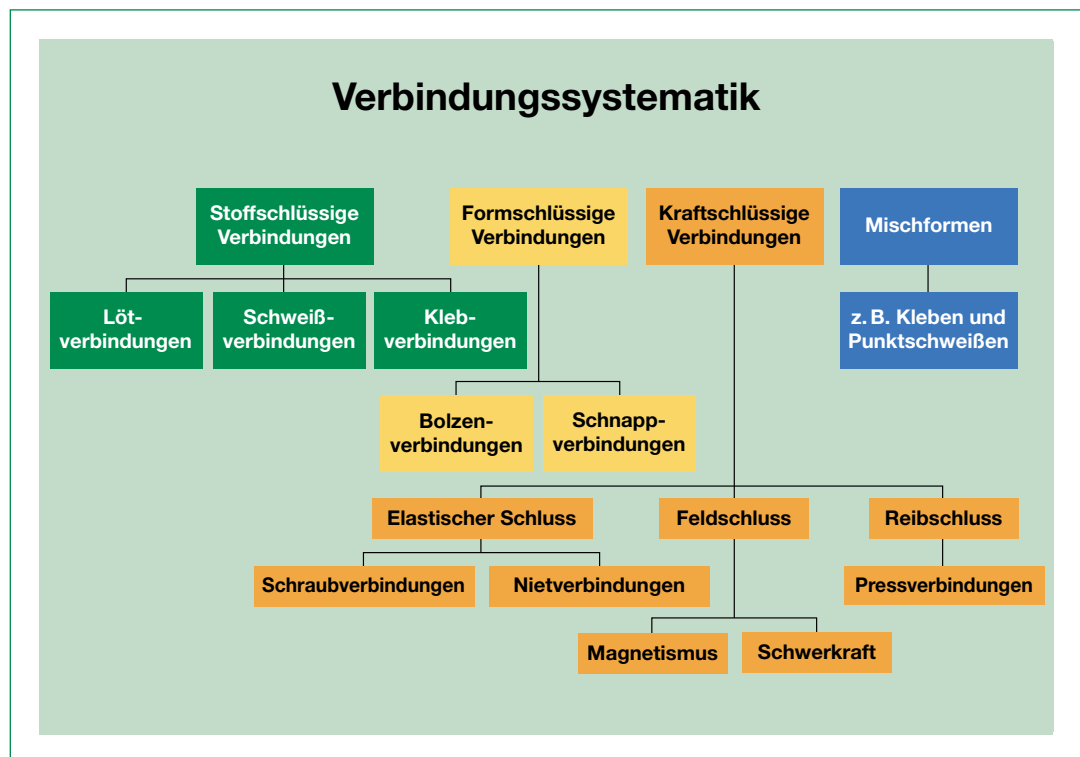


Abbildung 2  
Folie 2

ihrer spezifischen Eigenschaften, zusammenzuführen? Die traditionellen Verbindungstechniken haben wohl bekannte Nachteile. Bei thermischen Verfahren wie dem Schweißen verändert der Werkstoff innerhalb einer Wärmeeinflusszone seine spezifischen Eigenschaften. Mechanische Verfahren wie Nieten oder Schrauben wiederum ermöglichen nur eine punktförmige Kraftübertragung; außerdem muss man in die zu verbindenden Werkstücke auch noch Löcher bohren, den Werkstoff also „verletzen“ und damit u. U. schwächen. Die Klebtechnik dagegen nimmt aus vier wesentlichen Gründen zukünftig in Industrie und Handwerk eine Schlüsselstellung ein (Abb. 3), denn:

1. Bei fachgerechtem Einsatz können klebtechnisch nahezu alle Werkstoffe in beliebigen Kombinationen langzeitbeständig miteinander verbunden werden.
2. Durch den Fertigungsprozess „Kleben“ werden die Werkstoffeigenschaften der Fügeteile in der Regel erhalten: Der Klebprozess ist im Vergleich zum Schweißen oder Löten relativ wärmearm, eine Verletzung der Fügeteile wie beim Nieten oder Schrauben findet nicht statt.

Der Einsatz der Klebtechnik in der industriellen Fertigung kann darüber hinaus zu Zeiteinsparungen in der Produktion führen, den Produktionsprozess beschleunigen und somit konkret ökonomische Vorteile mit sich bringen. Im Schiffbau beispielsweise können mittlerweile die Innendecks in die Primärstruktur eingeklebt werden. Hierdurch entfallen aufwendige Richtarbeiten, die ein Befestigen der Innendecks durch Schweißen notwendig machen würde. Das Kleben zeichnet sich darüber hinaus durch weitere Vorteile aus:

- Übertragung hoher Zugscherkräfte durch entsprechend große Klebflächen. Beispiele: heißhärtende Epoxidharzklebstoffe – ca. 40 MPa auf Aluminium; 1-K-Polyurethanklebstoffe, feuchtigkeitsvernetzend – ca. 5 MPa (Werte bezogen nach DIN EN 1465, vgl. S. 49).
- Ausfüllen von Unebenheiten bei den Materialflächen, größere Toleranzen können durch spaltfüllende Klebstoffe überbrückt werden.
- Vermeidung von Kontaktkorrosion bei Metallklebungen im Vergleich zum Nieten oder Schrauben (Klebstoff als Isolator).

## Zukunftstechnologie Kleben

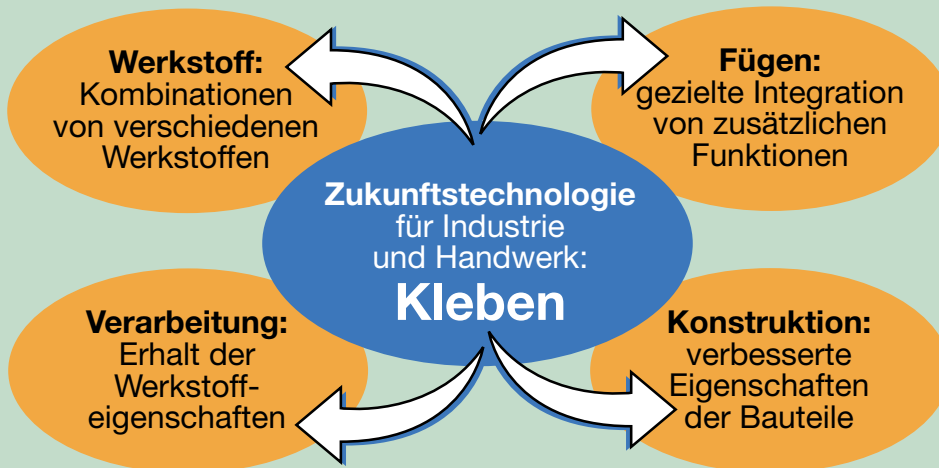


Abbildung 3  
Folie 3

### Beispiele für Klebungen aus Alltag und Technik

Was im Alltag hilft, kleine Missgeschicke zu beheben, ist schon seit langem ein wesentlicher Bestandteil industrieller Produktion. Allerdings bleibt dies dem Blick zum großen Teil verborgen, denn in der Regel verstecken sich die Klebstoffe für den Verbraucher unsichtbar zwischen zwei oder mehreren Substraten.

### Beispiel Nahrungsmittelindustrie

Die moderne Form von Vertrieb und Selbstbedienung mit ihren Fertiggerichten, Tiefkühl- oder Instant-Nahrungsmitteln wäre ohne Klebstoffe zur Herstellung von undurchlässigen Verpackungs-

materialien wie Verbundfolien oder zum hermetischen Verschluss von Packungen undenkbar. Das Beispiel der Flaschenetikettierung (Abb. 4) mag verdeutlichen, inwieweit man schon bei scheinbar einfachen, „alltäglichen“ klebtechnischen Anwendungen von „Hightech“-Lösungen sprechen kann: Papierkleben gilt als kinderleicht, ob mit dem Klebestift oder einem flüssigen Papierklebstoff. Die Ansprüche an die Festigkeiten werden von der Reißfestigkeit der Papieroberfläche bestimmt und sind daher begrenzt. Mit dem Flaschenetikett hat es aber eine besondere Bewandnis: Wegen der schnell laufenden Abfüllautomaten muss der Klebstoff einen hohen Anfangstack (Klebrigkeit) aufweisen und das Etikett bei der Anwendung sauber aus

## Flaschenetikettierung

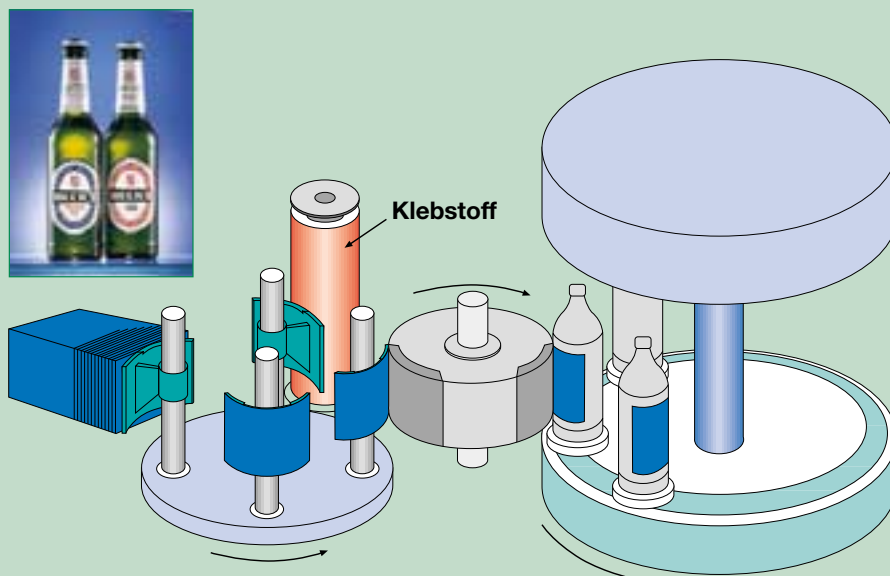


Abbildung 4  
Folie 4



einem Magazin abheben. Nach dem Abrollen an dem meist feuchten Flaschenkörper darf das Etikett dann weder verrutschen noch wellen. Und wenn die Flaschen einmal im Regen stehen oder sich Kondenswasser gebildet hat, sollen die Etiketten trotzdem halten. Kommt das Leergut schließlich zurück, sollen sich dann die Etiketten beim Waschen vor dem Wiederbefüllen wieder leicht ablösen. All dies macht ein speziell eingestellter Caseinleim möglich: Er klebt schnell, wasserbeständig und löslich in der alkalischen Waschflüssigkeit.

### **Beispiel Medizin**

Vom Pflaster bis hin zur hoch entwickelten Medizintechnik erstreckt sich das Einsatzgebiet von Klebstoffen. Sie ermöglichen die Produktion von Papiertaschentüchern und Windeln, machen es möglich, Tabletten vor Feuchtigkeitseinflüssen zu schützen und kleben Wunden.

### **Beispiel Haushalt**

Wer hat sich noch nicht über den Handtuchhalter geärgert, der nach dem Saugerprinzip befestigt wird. Irgendwann liegt er mit dem Handtuch auf dem Boden. Auch Kunststoffhaken mit einem haftklebrigen Schaumstoffbelag enttäuschen bisweilen. Versuchen Sie es mit einem Kontaktklebstoff (s. *Kapitel 2.2.1*): Man bestreicht damit die Fügefläche des Hakens, drückt den Haken kurz an die Fliese und zieht ihn zunächst wieder ab. Dabei wird Klebstoff auf die Fliese übertragen. Man lässt nun die Klebstofffilme etwa 15 Minuten abtrocknen, bis sich der Klebstoff trocken anfühlt, und vereinigt dann die Klebstofffilme, indem man den Haken fest an die Fliese drückt. Die Klebung ist kurz danach belastbar. Normalerweise eignen sich Klebstoffe, die durch Verdunsten eines flüchtigen Lösungsmittels abbinden, nicht besonders gut für die Klebung zweier nicht saugfähiger Werkstoffe, da es sehr lange dauern kann, bis das Lösungsmittel aus der Klebfuge entwichen ist und der Klebstoff abgebunden hat. Dieses Problem wird hier umgangen durch den Kontaktklebeffekt, der die feste Vereinigung zweier Klebstofffilme nach dem Verdunsten des Lösungsmittels ermöglicht.

Das scheinbar triviale Ankleben eines abgebrochenen Kaffeetassenhenkels gibt einen ersten Einblick in die Komplexität der Anforderungen, denen sich klebtechnische Problemlösungen gegenübersehen: Greift man bei dieser Reparatur zum „Alleskleber“, der in vielen Alltagsfällen bei einer Anzahl von Werkstoffen durchaus zu befriedigenden Ergebnissen führt, wird das Klebergebnis enttäuscht. Nach wenigen Waschgängen in der Spülmaschine wird sich diese Klebung wieder auflösen, da der „Alleskleber“ den besonderen Bedingungen der Spülmaschine (detergentienhaltiges, alkalisches Spülmittel bei bis zu 70 °C) nicht gewachsen ist. Für derartige Anwendungen empfiehlt sich ein 2-K-Epoxidharzklebstoff (s. *Kapitel 2.2.2*): Harz und Härter des Reaktionsklebstoffs auf Epoxidharzbasis mischen, Bruch-

flächen dünn bestreichen, Henkel andrücken und die Klebung bis zur Endhärtung mit Klebeband fixieren. Ein Trick für schwierige Fälle, z. B. bei mehreren Bruchstücken: Vor dem Zusammenfügen warten, bis der Klebstoff zähflüssig zu werden beginnt; die Teile lassen sich dann besser fixieren.

### **Beispiel Handwerk**

Oder schauen Sie einmal dem Schuster in einer Schnellreparaturwerkstatt zu, wenn er einen neuen Gummiabsatz anklebt. Er zieht den alten Absatz mit einer Zange vom Schuh, raut die Fügefläche an und entfernt dabei alte Klebstoffreste. Dann bestreicht er den Rand der Fügefläche des neuen Absatzes etwa einen halben Zentimeter breit mit einem mittelviskosen Klebstoff, drückt den Absatz an die Gegenfläche des Schuhs und presst ihn in der Presse noch kurz an. Danach ist die Klebung fest, und der Rand kann versäubert werden. Der Reaktionsklebstoff, der es ihm gestattet, so schnell zu arbeiten, basiert auf einem Cyanacrylsäureester, auch häufig Sekundenkleber (s. *Kapitel 2.2.2*) genannt. In dünner Schicht härtet dieser Klebstoff im Kontakt mit Feuchtigkeit oder Spuren alkalischer Stoffe sehr rasch aus. Im konkreten Fall ist es nicht erforderlich, den Klebstoff auf die ganze Fügefläche aufzutragen, dies wäre sogar bei der nächsten Reparatur störend, denn die außerordentlich feste Klebung ließe sich dann nur noch unter Materialbeschädigung mechanisch lösen. Zum Ankleben von Schuhsohlen dagegen aus Leder oder Gummi verwendet man üblicherweise einen Kontaktklebstoff (s. *Kapitel 2.2.1*) auf Polychlorbutadienbasis, denn er bildet im Gegensatz zu Cyanacrylaten einen flexibel-elastischen Film. Beide Fügeflächen werden mit dem Kontaktklebstoff bestrichen, nach einer Abluftzeit von etwa 15 Minuten presst man die Sohle an den Schuh. Auch hier ist die hohe Anfangsfestigkeit der Klebung unmittelbar nach dem Zusammenfügen der Teile hilfreich.

Bei den bisher dargestellten Beispielen beruhte die Klebwirkung auf den Mechanismen der Adhäsion und der Kohäsion (s. *Kapitel 2.1*). Bei dem im Folgenden dargestellten Klebstoff steht eine andere Erscheinung im Vordergrund: die Fähigkeit des Klebstoffs, das zu klebende Material anzulösen.

### **Beispiel Modellbau**

Der gängige Modellbauklebstoff für Polystyrolteile, z. B. von Häusermodellen des Modelleisenbahnbau, besteht im Wesentlichen aus einer Lösung von Polystyrol in einem organischen Lösungsmittel. Nach dem Auftragen wird der Werkstoff an der Oberfläche angelöst und quillt auf. Drückt man nun das Gegenstück an, beobachtet man denselben Effekt. Dabei verschwindet durch Materialvermischung oder Diffusion praktisch die Grenze zwischen den beiden Teilen. Nachdem das Lösungsmittel verdunstet ist, haften die Teile fest zusammen. Man nennt diese „Diffusionsklebung“ auch Kaltverschweißung. (Übrigens: Nach dem gleichen Prinzip klebt man auch Versorgungsleitungen aus Kunststoff/PVC).

### Beispiel industrielle Fertigung

Der Flugzeugbau brachte der modernen Klebtechnik erst den entscheidenden Technologieschub. Hier inspirierte die grundlegende Forderung nach Gewichtseinsparung zu neuen Bauweisen und Konstruktionswegen. Bei ganzen Flugzeuggenerationen wie der Airbusfamilie sind etwa 30 % aller Teile per Klebtechnik verbunden.

Im Automobilbau werden heute klassische Fügeverfahren mit dem Kleben kombiniert bzw. z.T. sogar durch diese ersetzt. Gestiegene Ansprüche an Motordichtungen haben dazu geführt, dass in modernen Motoren viel geklebt wird, z.B. die Zylinderkopfdichtung, die verschiedenen Teile für die Kühlwasserversorgung und die Ölwanne. Immer häufiger setzt man Klebstoff auch als Strukturwerkstoff ein. Neuere Automobile enthalten bis zu 100 m Klebnähte in der Karosserie-Konstruktion. Darüber hinaus erhöhen direkt eingeklebte Front- und Heckscheiben die Steifigkeit von Karosserien und führen zu einer Gewichtsreduzierung. Eine individuell ausgerichtete Dickschichtklebung dämpft gleichzeitig Vibrationen und verbessert die Wärmedämmung ohne zusätzlich eingesetzte Werkstoffe, wie dies bei herkömmlichen Konstruktionen erforderlich ist. Optimierte Konstruktionen mit verbesserten Fahreigenschaften, geringerem Gewicht und reduzierter Korrosionsanfälligkeit führen zu niedrigen Cw-Werten (s. *Glossar*) und tragen zu einer nicht unerheblichen Energieeinsparung bei.

Beim funktionsintegrierenden Leichtbau kommt der Klebtechnik eine besondere Rolle zu: Bei dieser Bauweise wird versucht, Produkte mit zusätzlichen Funktionen auszustatten, ohne sie um weitere Komponenten zu ergänzen. So können z.B. entsprechend ausgelegte Klebfugen zwischen zwei Metallen, Glasscheiben oder Holzplatten die Funktion eines Scharniers übernehmen.

In der Elektronik ergänzt man das dort klassische Fügeverfahren, das Lötten, gleichfalls zunehmend durch die Klebtechnik, um beispielsweise höchstintegrierte Bauelemente spannungsfrei und ohne übermäßige Wärmeentwicklung miteinander zu verbinden.

### Einschränkungen beim Einsatz der Klebtechnik

Das Kleben erfordert, wie andere Hochleistungstechnologien auch, dass bei seinem Einsatz in der Fertigung spezielle Prozessführungen eingehalten werden. Ein umfassender Qualitätsnachweis der Klebung durch zerstörungsfreies Prüfen ist in der Regel nicht möglich. Kleben gilt daher – wie das Schweißen und Lötten – als so genannter spezieller Prozess. Daher ist für den Einsatz im Betrieb eine entsprechend hohe Fertigungsqualität notwendig, d.h., Produktqualität wird hergestellt und nicht erprüft. Bei der Langzeitbeständigkeit von Klebverbindungen sind Abbaumechanismen zu beachten. Diese können die Festigkeit der Klebung schwächen, sind jedoch, da bekannt, in der Regel

handhabbar. Eine von der Natur gesetzte Grenze darf jedoch beim Einsatz der Klebtechnik nicht aus den Augen verloren werden: Ein eindeutiger Nachteil von Klebungen im Vergleich zu anderen Fügeverfahren besteht darin, dass sie nur begrenzt thermisch belastbar sind, da Klebstoffe aus organischen Verbindungen bestehen.

## 1.2 Kleben – alte Kunst und junge Wissenschaft

Schon in der jüngeren Steinzeit, also ca. 8000 v. Chr. (s. *Tab. 1*), bedienten sich die Menschen eines Birkenharzes zum Befestigen von Speer- und Beilspitzen (*Abb. 5*). Bei der Entdeckung des Gletschermannes „Ötzi“ wurden Ausrüstungs- und Kleidungsstücke gefunden, so ein aus einem Eibenstämmchen gefertigtes Beil, dessen Klinge mit dem Klebstoff Birkenpech sowie Lederstreifen befestigt ist. Um 5000 v. Chr. benutzte man in Babylon tierisches Blut, Eiweiß, verschiedene Pflanzenharze oder Asphalt als Klebstoffe beim Bau von Häusern und Tempeln. Im alten Ägypten (vor ca. 3500 Jahren) wurde das Kleben sogar „professionalisiert“: Der Beruf des Leimkochers (Kellopos) entstand (*Abb. 5*). Die Kunst des Leimsiedens, das die alten Ägypter entwickelt hatten, wurde später von den Griechen und Römern übernommen. Ein Indiz dafür, dass die Kunst des Klebens zur Zeit der Römer schon recht weit entwickelt war, mag ein Eichenholzkästchen aus der Römerzeit sein, das um 1886 in Breslau gefunden wurde: Auf dem Deckel dieses Eichenholzkästchens waren fünf metallische Münzen aufgeklebt. Der vermutlich auf einer Eiweiß-Kalk-Verbindung basierende Klebstoff muss eine für damalige Verhältnisse extreme Haftkraft besessen haben, da vier der fünf aufgeklebten Münzen noch nach fast zwei Jahrtausenden auf der Holzunterlage haften. Mitte des 14. Jahrhunderts bedienten sich die Azteken beim Bauen der Klebwirkung des Blutes, die auf das Blutalbumin zurückzuführen ist. Sie mischten Tierblut unter den Zement. Noch heute sind diese Werke der aztekischen Baukunst recht gut erhalten und zeugen von der Qualität des Bindemittels (*Abb. 5*).

Um 1830 wurde Naturkautschuk als Klebrohstoff eingesetzt. Mit der Erfindung der Vulkanisierbarkeit von Kautschuk 1841 durch Goodyear setzt die Geschichte der synthetisch hergestellten Kunststoffe und somit der synthetischen Klebstoffe ein. Damit wurde erstmals in der Geschichte der Menschheit ein Naturstoff chemisch verändert und so ein halb-synthetischer Werkstoff mit neuen mechanischen bzw. technologischen Eigenschaften hergestellt (Kunststoff). 1864 gelang es W. Parks, das halb-synthetische Celluloid herzustellen. Die ersten „echten“ Kunststoffe, die aus den Laboratorien der Chemiker stammten und zu denen es in der Natur keine Parallelen mehr gab, waren die Phenolharze. Ihre technische Nutzung begann 1902 und ist eng mit dem Namen Baekeland verbunden, der 1905 das erste Phenolharz unter dem Produktnamen



Abbildung 5

Bakelite vertrieb. Mit der Herstellung dieser Werkstoffe war der entscheidende Schritt in der Kunststoffentwicklung getan: von der Nutzung von Naturstoffen über die chemische Modifizierung hin zu den vollsynthetischen Kunststoffen. In den folgenden Jahrzehnten nahm die Entwicklung der synthetischen Kunststoffe und Klebstoffe einen rasanten Aufschwung. Kunstkautschuke wie Polychloropren, Buna (Polybutadien) und Siliconkautschuk wurden synthetisiert. Es folgten die Epoxidharze und die Polyurethane, nach dem zweiten Weltkrieg die Methacrylat- und Cyanacrylat-Klebstoffe (Sekundenklebstoffe). Etwas Etymologie zum Abschluss: Der Begriff „kleben“ stammt aus dem althochdeutschen „kliban“ (norddeutsch „Klei“ = toniger Schlick) und „leimen“ aus dem indogermanischen „leimo“ = Lehm.

### 1.3 Kleben – die Natur macht es vor!

Die Geschichte der Menschheit bietet so viele Beispiele klebtechnischer Anwendungen in den unterschiedlichsten Entwicklungsstadien, dass man das Kleben für eine Erfindung des Homo sapiens halten könnte, wobei die Natur immer wieder Ausgangspunkt und Vorbild für die Anwendung der Füge-technik Kleben durch den Menschen war. Die folgenden Beispiele einiger klebtechnischer Lösungen aus dem Tier- und Pflanzenreich zeigen, wie der Mensch von der Natur lernen und so die Technologie des Klebens weiterentwickeln konnte und kann.

#### Beispiel Feldwespe

Streift man mit „klebtechnischem Blick“ durch das Reich der Insekten, stößt man auf die in Mitteleuropa heimische Feldwespe: Mit ihren Kauwerkzeugen zerkleinert sie Holz, wobei sie die langen Fasern der Cellulose des Holzes durch

Schabbewegungen mechanisch grob zerkleinert. Anschließend frisst sie diese Späne, fügt wässriges Verdauungssekret hinzu und verkürzt damit chemisch nochmals die Faserlänge der Cellulose. Der Nestbauklebstoff ist jetzt fertig zur Weiterverarbeitung. Beim Trocknen verdunstet das Wasser aus der Masse, die Cellulosefasern verfilzen und der Klebstoff wird fest. Mit dieser Klebtechnik kann die Feldwespe recht beständige Nester konstruieren. Diese Technik hat sich der Mensch bei der Verschönerung seiner Wohnungen zu Nutze gemacht: Die Klebfähigkeit von Tapetenkleister beruht auf demselben Prinzip.

#### Beispiel Gummibaum

Beim Lösungs- bzw. Dispersionsmittel Wasser kann die Langzeitbeständigkeit der Klebungen ein Problem werden. Auch hier bietet die Natur wieder eine Lösung an, diesmal aus dem Pflanzenreich: Die Gummilich der Gummibaum-Gewächse ist eine Dispersion von Polymeren (Naturlatex) in Wasser. Die Dispersion ist also eine Möglichkeit, das umweltfreundliche Lösungsmittel Wasser zu benutzen und trotzdem eine langzeitbeständige Klebung zu erreichen. In der Holz verarbeitenden Industrie wird dieser „Trick“ der Natur schon lange genutzt.

#### Beispiel Honigbiene

Während die Feldwespe sich also eines Klebstoffs bedient, dessen Wirkprinzip auf dem Lösungsmittel Wasser beruht, verwendet die Honigbiene dagegen einen Nestklebstoff, der völlig ohne Lösungsmittel auskommt: Wachs, das bei Körpertemperatur der Biene flüssig ist. Erst nach Abkühlung erstarrt der Klebstoff in seiner beständigen Form. So erfüllt der Bienenklebstoff die Idealforderung an moderne Klebstoffe (Schmelzklebstoffe): lösungsmittelfrei und trotzdem zum Auftrag flüssig.

## Geschichte des Klebens

- vor 3 Mrd. Jahren** Klebähnliche Vorgänge bei Urzellen: Sie erwerben eine klebrige Außenhülle, wodurch sie sich mit Nachbarzellen zu Klumpen und Kolonien verbinden. Muscheln stellen hochfeste Verbindungen zu unterschiedlichsten Untergründen her; Sonnentau und Spinnen produzieren klebrige Sekrete; Bienen verarbeiten Wachsplättchen; Vögel stellen die ersten „geklebten“ Verbundwerkstoffe beim Nestbau her.
- vor 80000 Jahren** Ab dieser Zeit sind Klebanwendungen durch den Menschen bekannt: Kollagen wird von Höhlenmenschen am Toten Meer benutzt. Bei Ausgrabungen wird es als Zierrat auf Schädeln, als Dichtmasse für Behälter und als Klebstoff identifiziert.
- vor 35000 Jahre** Tierblut und Eiweiß als Bindemittel zum Untergrund bei Höhlenmalereien; Hüttenbauten aus Holz, Reisig und Schilf, die mit Lehm verstärkt werden.
- 8000 v. Chr.** Waffen bei fortgeschrittenen Jägerkulturen: Baumharze dienen der verstärkenden Klebwirkung beim Befestigen von Feuerstein- oder Knochenspitzen in Holzschäften; „Kleister“ durch Verkochen pflanzlicher Bestandteile; „Leime“ durch Verkochen tierischer Bestandteile.
- 5000 v. Chr.** In Mesopotamien und Ägypten: Nutzung von Asphalt (natürliche Vorkommen) als Klebstoff (Mosaik) und in Verbindung mit Harzen als Dichtstoff zur Bootsabdichtung.
- 2000 v. Chr.** Vorderasien: Gelatineleim zur Möbelherstellung.
- 1000 v. Chr.** China: Hautleime bei Lackarbeiten: Saft des Lackbaums verbindet bei Verdunstung bis zu 30 verschiedene Schichten.
- 1500** Kautschuk wird von den Spaniern aus Mittelamerika, wo es Azteken und Mayas schon lange verwenden, nach Europa gebracht; Casein, schon bei den Römern bekannt, wird als erster „Kunststoff“ bei der Papierbeschichtung und Buchbinderei verwendet.
- 1700** Leimsiedereien.
- 1841** Vulkanisierbarkeit des Kautschuks wird entdeckt (Goodyear).
- 1905** Baekeland bringt unter dem Namen „Bakelite“ das erste Phenolharz auf den Markt.
- 1921** Grundlagen der makromolekularen Chemie durch Max Staudinger.
- 1922** BASF erhält Patent zur Herstellung von in organischen Lösungsmitteln löslichen Harnstoff-Formaldehyd-Harzen.
- 1928** In den USA erstmals Produktion von Polyvinylchlorid (PVC); Produktion von Polymethylmethacrylat (PMMA) als „Plexiglas“ bei Röhm & Haas.
- 1930** Erste technische Herstellung von Polyvinylacetat (PVAC), Polystyrol (PS) und Polyacrylnitril (PAN).
- 1931** Erste stabile Kunststoff-Dispersion auf Basis von Acrylsäureestern (BASF, Röhm & Haas) und Vinylacetat (Wacker, Hoechst); Produktionsaufnahme von Polychloroprenen.
- 1936** P. Castan (de Tre Frères, Schweiz) benutzt die Polyaddition zum Aufbau von Kunststoffen und erfindet Epoxidharze, die ihm 1939 patentiert werden. C. Ellis (Ellis-Foster Comp. USA) entdeckt die rasche Härtbarkeit ungesättigter Polyester mit Styrol durch Peroxide.
- 1937** Auf den Forschungsarbeiten von O. Bayer, Leverkusen, basieren die Polyaddition von Polyurethanen (PUR) aus Diisocyanaten und Polyolen.
- 1940** IG Farben erhält Patent für Methacrylat-Klebstoffe (heute „Agomet“ der Degussa, Hanau).
- 1941** Großtechnische Produktion gesättigter und ungesättigter Polyester-Harze
- 1943** Herstellung temperaturbeständiger Siliconkautschuke; in den USA erste Verwendung von Phenolharz-Polyvinylacetaten mit Formulierungen für Metall-Holz-Verklebungen im englischen Flugzeugbau; Epoxidharz-Formulierungen für Metall/Metall-Verbindungen im deutschen Flugzeugbau.
- 1946** Industrielle Herstellung von Epoxidharzen.
- 1953** V. Krieble (USA) führt anaerob härtende Klebstoffe auf Dimethylacrylat-Basis unter dem Namen „Loctite“ ein.
- 1958** Erste Cyanacrylat-Klebstoffe „Eastman 910“ in den USA und 1960 „Sicomat“ in Deutschland auf dem Markt.
- 1967** Erste temperaturfeste Polyimid-Klebstoffe (bis 300 °C) in den USA.
- 1968** Beginn der feuchtigkeitshärtenden Polyurethan-Entwicklungen „Sikaflex“ und „Betaseal“ zum Klebdichten von Kfz-Front- und Heckscheiben.
- 1970** Rasche Weiterentwicklung der Polyurethan-Chemie mit vielfältigen 1- und 2-K-Formulierungen; erste UV-lichthärtende Acrylat-Formulierungen; Entwicklung von MS-Polymeren in Japan, Anwendung bei erdbebensicheren Bauweisen.
- 1980** Reaktive Schmelzklebstoffe.
- 1984** Entwicklung anisotrop leitfähiger Klebstoffe. Die Leitfähigkeit entsteht durch einen direkten Kontakt der Füge-teile über einzelne, sich in der Klebstoffmatrix nicht berührende Füllstoffpartikel (z.B. goldbeschichtete Polystyrolkugeln/Durchmesser 5 mm), die elektrisch leitfähig sind.
- 1988** Entwicklung von hochfesten Klebstoffen zum Kleben beölter Stahlbleche unter Großserienbedingungen (z.B. Automobilbau). Hierbei handelt es sich um spezielle heißhärtende 1-K-Epoxidharzklebstoffe.
- ab 1990** Entwicklung von diversen Klebstoffen mit multiplen Härtungsmechanismen. Z.B. Cyanacrylate, die zunächst durch UV-Bestrahlung an- und dann über Luftfeuchtigkeit aushärten.
- 1993** Entwicklung aerob härtender Klebstoffe, deren Härtung durch Sauerstoffzutritt eingeleitet wird. Diesen Klebstoffen sind Hydroperoxidbildner wie z.B. Hydrazon beigefügt, die oxidativ Peroxide bilden und die Polymerisation starten.
- 1995** Entwicklung von silanvernetzenden Polyurethan-Prepolymeren (S-PUR), die die Palette der 1-K-feuchtigkeitshärtenden gummielastischen Klebstoffe ergänzen. Sie zeigen eine verbesserte Balance zwischen Reaktivität und Lagerstabilität, ein Ausbleiben der Blasenbildung und besitzen keinen isocyanatbasierten Reaktionsmechanismus mehr.
- 2000** Entwicklung wiederlösbarer Klebstoffsysteme für Reparatur und Recycling basierend auf den Methoden Temperatur-, Spannung-, Strom- und/oder pH-Wert-Änderung.

### Beispiel Seepocke

Die Seepocke (Abb. 6), eine Krebsart, die in Küstengewässern heimisch ist, kann sich als freischwimmende Larve an praktisch alle marinen Hartsubstanzen heften. Die Anheftung erfolgt dabei mit einem Sekret der so genannten „Zementdrüsen“. Bei diesem Sekret handelt es sich um einen 2-K-Reaktionsklebstoff mit hoher Resistenz gegen Wasser und enormer Langzeitbeständigkeit. Bei der Anheftung ist die Beschaffenheit des Untergrundes völlig unerheblich. Auch während des Wachstums und bei den verschiedenen Häutungen bleibt der Krebs stets fest mit dem Untergrund verbunden, weil eine ständige Neusekretion von Klebstoffen die Haftung garantiert.

### Beispiel Termiten

Vor 150 Millionen Jahren verfügten die Soldaten primitiver Termiten zur Abwehr von Feinden über säbelartige Kiefer. 30 Millionen Jahre später entwickelte sich über den Zangen ein düsenartiges Gebilde. 70 Millionen Jahre später ist die höchstentwickelte Form erreicht: Die Kieferzangen sind verschwunden, übrig geblieben ist nur die Düse, aus der nun Klebstoff spritzt und so die Angreifer lahm legt. Ohne diese Art der Klebstoffapplikation wäre die moderne Autoproduktion nicht denkbar.

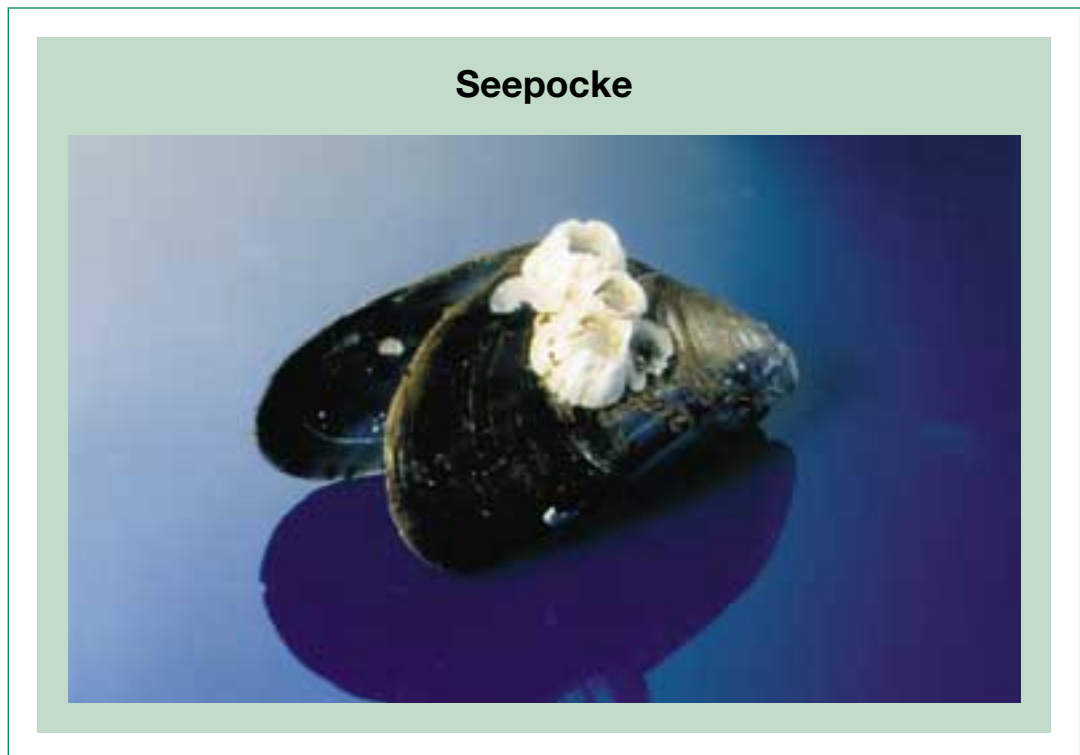


Abbildung 6



## 2 Was ist Kleben?

Kleben ist das Verbinden zweier Füge­teile mittels eines Klebstoffs. Nach DIN EN 923 wird ein Klebstoff definiert als

- ein Nichtmetall
- ein Bindemittel, das über Adhäsion und Kohäsion wirkt.

### Adhäsion und Kohäsion

Als Adhäsion bezeichnet man das Haften gleich- oder verschiedenartiger Stoffe aneinander, mit Kohäsion die innere Festigkeit eines Werkstoffes wie hier des Klebstoffs.

Die adhäsiven Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Füge­teil betreffen nicht nur die reine Berührungsfläche (Adhäsionszone) von Klebstoff und Füge­teil, sondern beeinflussen auch den Zustand des Klebstoffs in der Nähe der Oberfläche des Füge­teils (Übergangszone) (Abb. 7).

- In der Kohäsionszone liegt der Klebstoff in seinem üblichen Zustand vor.
- In der Adhäsionszone weist der Klebstoff durch die Haftung an der Oberfläche der Füge­teile eine modifizierte chemische Struktur und Zusammensetzung auf, die vom Zustand in der Kohäsionszone abweicht. Folglich sind hier auch die makroskopischen Eigenschaften des Klebstoffs verändert.

- In der Übergangszone zwischen Adhäsions- und Kohäsionszone verändern sich Struktur, Zusammensetzung und makroskopische Eigenschaften des Klebstoffs kontinuierlich. Der Einfluss der Übergangszone kann z. B. darin bestehen, dass eine Entmischung des Klebstoffs auftritt, indem kleine Klebstoffbestandteile in Poren der Oberfläche diffundieren. So wird die optimale Zusammensetzung des Klebstoffs gestört.

### 2.1 Wirkmechanismen zwischen Klebstoff und Füge­teil sowie im Klebstoff

- Adhäsionszone
  - Übergangszone
  - Kohäsionszone
- ]} Grenzschicht

#### Die Adhäsionszone

Wie oben beschrieben, liegt der Klebstoff in der Adhäsionszone in einer durch die Anbindung an die Füge­teiloberfläche modifizierten molekularen Struktur vor. Das Phänomen der Adhäsion findet seine Erklärung in molekularen Wechselwirkungen zwischen der Füge­teiloberfläche und dem Klebstoff, die sich in die schwächeren zwischenmolekularen Wechselwirkungen und in die starken chemischen Bindungen unterscheiden lassen (Tab. 2). Allerdings treten chemische Bindungen nur bei sehr wenigen Kombinationen von Füge­teilen und Klebstoffen auf, z. B. zwischen Silicon und Glas, Polyurethan und

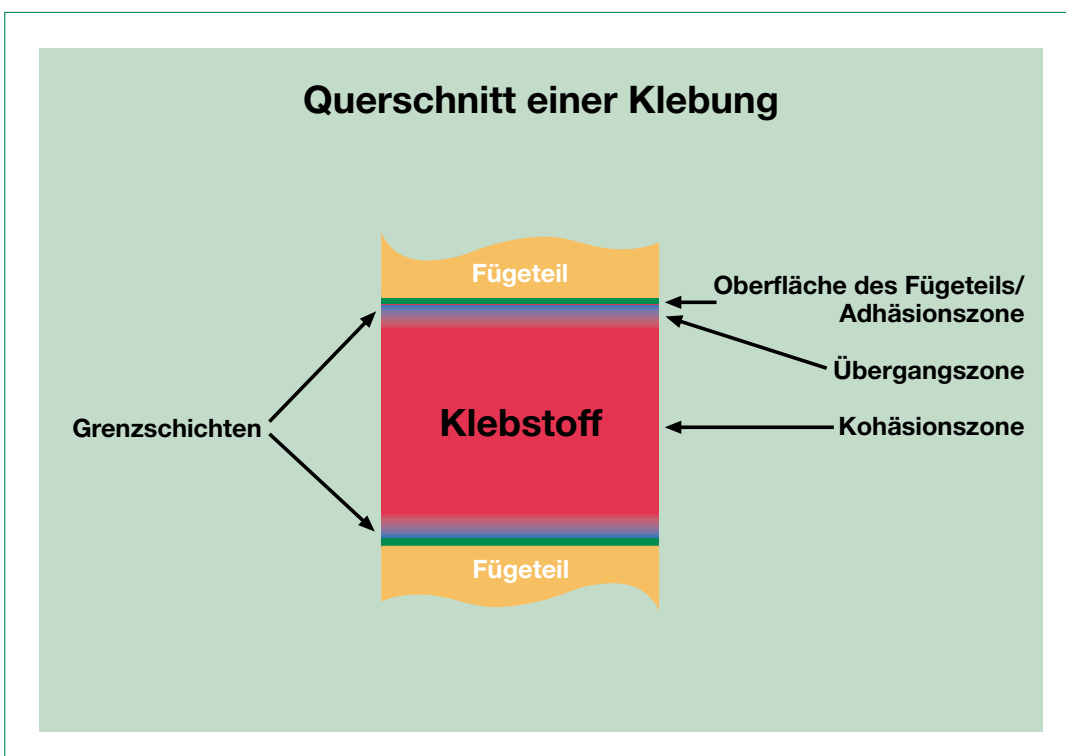


Abbildung 7  
Folie 5



## Adhäsionskräfte

Art	Bindungslängen in nm	Bindungsenergien in kJ/mol
<b>chemische Bindungen</b>		
• kovalente	0,1–0,2	150–950
• metallische	0,3–0,5	100–400
• ionische	0,2–0,3	400–800
<b>zwischenmolekulare Wechselwirkungen</b>		
• van-der-Waals-Kräfte	0,4–0,5	2–15
• Wasserstoffbrückenbindungen	0,2	20–30

Tabelle 2

Glas oder Epoxidharz und Aluminium. In einigen dieser Klebverbindungen konnte nachgewiesen werden, dass chemische Bindungen bis zu 50 % aller Wechselwirkungen ausmachen können. Ihre Langzeitbeständigkeit hängt direkt von ihrer Feuchtigkeitsbeständigkeit ab. Auf die Morphologie der Oberfläche des Fügeteils hebt neben den zwischenmolekularen und chemischen Adhäsionskräften der vereinzelt genannte Haftmechanismus der „mikromechanischen Verklammerung“ ab. Dieser Bezeichnung liegt die Vorstellung zu Grunde, dass ein Klebstoff sich mit einer aufgerauten Fügeiteiloberfläche gut „verzahnen“ kann. Dem Konzept der „mikromechanischen Verklammerung“ wird jedoch i.A. nur eine untergeordnete Bedeutung beigemessen. Liegen im Fügeiteil jedoch regelrechte – vielleicht sogar konstruktiv eingebrachte – Hinterschneidungen vor, die von Klebstoff umflossen werden, dann kann dies die Festigkeit des Klebverbundes steigern.

### Die Übergangszone

Die Übergangszone, in der ein Klebstoff veränderte chemische, mechanische und optische Eigenschaften besitzt, kann eine Dicke von wenigen nm bis fast in den mm-Bereich aufweisen. Dies hängt von der Art der Oberfläche des Fügeteils, des Klebstoffs und den Härtingsbedingungen ab. Bei dicken Übergangszonen oder dünnen Klebfugen kann das Verhalten der gesamten Klebung von den Eigenschaften der Übergangszone bestimmt sein, da keine Kohäsionszone vorliegt.

### Die Kohäsionszone

Im Bereich der Kohäsionszone weist der Klebstoff seine nominellen, in den Datenblättern angegebenen Kunststoffeigenschaften auf. Diese werden von folgenden molekularen Kräften verursacht (Abb. 8):

1. den chemischen Bindungen innerhalb der Klebstoff-Polymere,
2. den chemischen Bindungen, die zur Vernetzung des Polymers führen,
3. den zwischenmolekularen Wechselwirkungen zwischen den Klebstoff-Molekülen und
4. den mechanischen Verklammerungen verschiedener Klebstoff-Moleküle.

Die vier genannten Kohäsionskräfte beeinflussen bereits die Eigenschaften des unausgehärteten Klebstoffs und bestimmen beispielsweise die Viskosität. Bei der Aushärtung erfolgt hauptsächlich eine Verfestigung des Klebstoffs über Bindungen zwischen den Klebstoff-Molekülen. Diese Bindungen werden neu erzeugt (z. B. bei der Vernetzung kurzkettiger Moleküle zu langkettigen) oder vorhandene Bindungen werden verstärkt.

Für eine maximal erreichbare Klebfestigkeit tragen sowohl die Adhäsion (inkl. Übergangszone) als auch die Kohäsion bei. Wie bei einer Kette gilt auch bei einer Klebung, dass das schwächste Glied die Belastbarkeit bestimmt.

- Die kohäsiven Eigenschaften eines Klebstoffs sind seitens des Herstellers bereits festgelegt. Diese muss der Anwender durch eine optimale Aushärtung zu erreichen versuchen.
- Weiterhin muss die Adhäsionsfestigkeit ausreichend hoch sein. Das ist der Fall, wenn nicht die Adhäsion der limitierende Faktor bei der Festigkeitsprüfung ist, sondern die Eigenfestigkeit des Klebstoffs.

Die klebstoffspezifische maximale Belastbarkeit einer Klebung ist also dann gegeben, wenn bei einer Festigkeitsprüfung (s. Glossar) der Bruch im Klebstoff erfolgt (Kohäsionsbruch) und nicht in der Adhäsionszone zwischen Material und Klebstoff.

## Die Beiträge zur Kohäsionsfestigkeit eines Klebstoffs

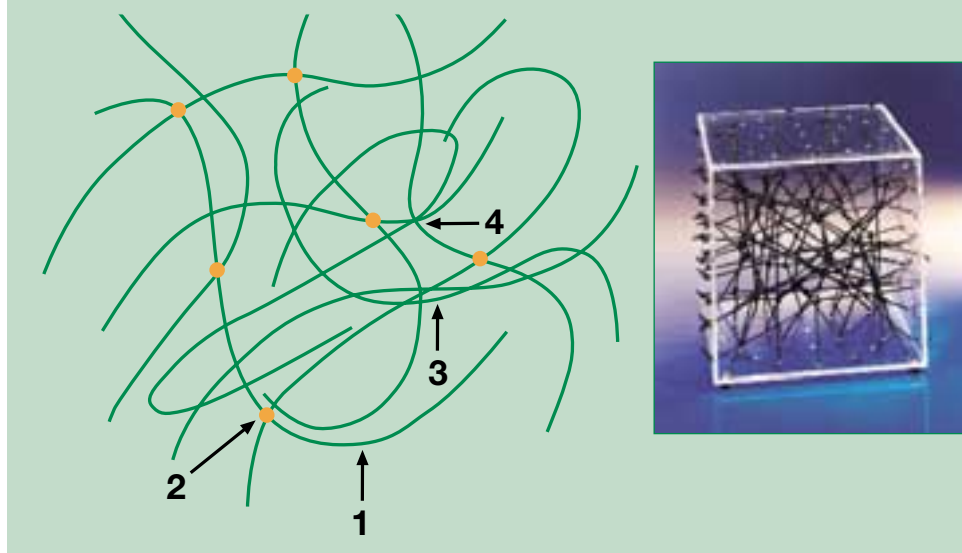


Abbildung 8  
Folie 6

### 2.1.1 Grundvoraussetzung einer Klebung: Benetzung

Grundvoraussetzung zur Ausbildung der adhäsiven Grenzschicht ist eine gute Benetzung der Oberfläche des Fügeteils durch den flüssigen Klebstoff. Der Grad der Benetzung, der u. a. von den Oberflächenspannungen von Klebstoff und Fügeteil bestimmt wird, ist somit ein Kriterium für die Qualität der Adhäsion. Die Annäherung in atomaren Dimensionen ist aber nur eine notwendige Voraussetzung für die Ausbildung von Adhäsionskräften. Bestimmend für die Adhäsion sind die Zugänglichkeit und der Anteil physikalisch oder chemisch aktiver Strukturen von Fügeteiloberfläche und Klebstoff.

Das Benetzen der Fügeteiloberfläche durch den flüssigen Klebstoff ist für die Adhäsion zwar eine notwendige, allein jedoch nicht hinreichende Voraussetzung. Eine gute Benetzung allein garantiert nicht unbedingt die angestrebte gute, langzeitbeständige Haftung des Klebstoffs an der Oberfläche.

Als Beispiel sei hier Edelstahl genannt: Er weist zwar eine hohe Oberflächenspannung auf, ist also gut benetzbar, bietet aber auf Grund seines passiven Charakters (Bindungsträgheit) den Klebstoffen nur relativ schlechte Adhäsionsmöglichkeiten auf der Oberfläche.

Ist die zu klebende Oberfläche inkompatibel mit einem Klebstoff – weil z. B. der flüssige Klebstoff schon beim Auftrag nicht genügend benetzt oder weil die adhäsiven Bindungen zu schwach sind – so kann die Oberfläche mit einem entsprechenden Haftvermittler beschichtet werden. Diese Haftvermittler wirken über unterschiedliche bifunktionelle

chemische Gruppen. Ein Teil der Gruppen ist auf die Chemie der Fügeteiloberfläche, der andere auf den Klebstoff abgestimmt. Die häufigsten Haftvermittler gehen mit beiden Partnern eine chemische Bindung ein. Oberflächenbehandlungsverfahren (s. *Glossar*) stellen andere Möglichkeiten dar, die Benetzung der Fügeteiloberfläche zu verbessern bzw. zu ermöglichen.

Zur Festigkeit eines Klebverbundes liefert die Adhäsion einen wichtigen Beitrag. Die Adhäsion kann der Anwender weitgehend beeinflussen durch:

- die Sauberkeit und gegebenenfalls die Vorbehandlung der Fügeteiloberflächen,
- die Abstimmung des Klebstoffs und gegebenenfalls des Haftvermittlers/Primers auf die Chemie der Fügeteiloberfläche.

Allerdings lässt sich der direkte Schluss von der (mikroskopischen) Adhäsion zur makroskopischen Verbundfestigkeit (und umgekehrt) nicht ziehen. Die makroskopischen kohäsiven Merkmale eines Klebstoffs (z. B. Kohäsionsfestigkeit, elastisches Verhalten) sind weitgehend durch die Wahl der Klebstoffbasis und Klebstoffformulierung festgelegt und lassen sich vom Anwender kaum beeinflussen.

### 2.1.2 Benetzbarkeit und Rheologie

Die Rheologie ist ein Teilgebiet der Mechanik. Sie beschreibt, wie sich ein Körper (Festkörper oder Flüssigkeit oder Gas) bei Beanspruchung durch äußere Kräfte verformt. Ideale Fluide wie Flüssigkeiten oder Gase werden irreversibel verformt – sie

fließen. Auch Festkörper können unter Anwendung genügend großer Kräfte irreversibel verformt werden – auch sie fließen dann. Neben den ausgeprägten Beanspruchungen ist der Zeitfaktor zu beachten. Folgendes Beispiel soll diesen Zusammenhang veranschaulichen: Das Glas der berühmten Fenster der Kathedrale von Chartres ist „geflossen“, seit diese Fenster vor mehr als 600 Jahren hergestellt wurden. Im Mittelalter waren die eingesetzten Glasstücke am oberen wie am unteren Rand gleich dick. Doch im Laufe der Zeit sind die Silicate unter dem Einfluss der Schwerkraft so weit nach unten geflossen, dass die Wandstärke der einzelnen Gläser oben hauchdünn geworden ist, während sie sich unten fast verdoppelte. Man kann somit sagen, dass festes Glas zur Gruppe der Fluide gehört – man muss nur lange genug warten!

Die Fähigkeit eines Klebstoffs, eine Fügeiteiloberfläche zu benetzen, wird auch von seinen rheologischen Eigenschaften bestimmt. Dabei sind die stofflichen Charakteristika Viskosität und Thixotropie (s. Seite 84/85) von Bedeutung, die unter dem Begriff „rheologische Eigenschaften“ zusammengefasst werden. Für die Verarbeitung und die Verarbeitbarkeit eines Klebstoffs bildet die Kenntnis dieser spezifischen Eigenschaften eine wichtige Voraussetzung (typische Viskositätswerte siehe Tabelle 3). Ausschlaggebend für die Viskosität (Tab. 3) eines Klebstoffs ist der Molekülaufbau,

Viskosität durch den Anwender nur sehr bedingt möglich; allenfalls gelingt das bei Klebstoffsystemen, die in ihrer Rezeptur bereits Reaktivverdünner enthalten.

Die Angabe der Viskosität eines Klebstoffs erfolgt durch den Wert der dynamischen Viskosität in Pa s; bei dünnflüssigen Klebstoffen in mPa s. Sie ist definiert durch die Kraft in Newton, die notwendig ist, um in einer Flüssigkeitsschicht von 1 m<sup>2</sup> Flächengröße und 1 m Höhe die eine Grenzfläche parallel zur gegenüberliegenden anderen Grenzfläche mit einer Geschwindigkeit von 1 ms<sup>-1</sup> zu verschieben. Gemessen werden diese Eigenschaften mit so genannten „Viskosimetern“ oder „Rheometern“ (s. Glossar), die je nach Art der zu untersuchenden Fließvorgänge konstruiert werden.

Unter der Thixotropie versteht man die Eigenschaft flüssiger Stoffe, durch mechanische Einwirkung (z. B. Rühren, Schütteln, Kneten) vorübergehend in einen Zustand niedrigerer Viskosität überzugehen. Thixotrope Klebstoffe werden gezielt formuliert, indem der Rezeptur Thixotropiermittel, z. B. Kieselsäureprodukte, beigefügt werden. Auf diese Weise werden folgende Vorteile erreicht:

- kein Abfließen an vertikalen Klebflächen,
- kein oder nur geringes Aufsaugen des Klebstoffs bei porösen Fügeiteilwerkstoffen,

<b>Typische Viskositätswerte</b>			
<i>h</i> in mPa s bei 20 °C			
Petroleum	0,65	Kaffeesahne	~ 10
Wasser	1,0	Honig	~ 10 <sup>4</sup>
Quecksilber	1,5	Polymerschmelzen	~ 10 <sup>3</sup> –10 <sup>6</sup>
Traubensaft	2–5	Bitumen	~ 10 <sup>8</sup>
Blut (bei 37 °C)	4–25	Glas	~ 10 <sup>23</sup>

Tabelle 3

insbesondere die Länge von Haupt- und evtl. vorhandenen Seitenketten sowie die vorhandenen polaren Gruppen. Von Letzteren gehen maßgeblich die Kraftereinwirkungen aus, die die Beweglichkeit der Seitenglieder und Kettensegmente beeinflussen. Höhere Viskositäten sind vorteilhaft, um z. B. ein zu starkes Abfließen an den Klebfugenrändern zu vermeiden. Je nach vorgesehenem Verarbeitungsverfahren sind entsprechende Viskositäten erforderlich: z. B. eine niedrigviskose Einstellung zum Spritzen, zum Auftragen durch Siebdruck eine pastöse. Eine Erhöhung der Viskosität auf gegebene Verarbeitungsverhältnisse kann über die Zugabe von Verdickungsmitteln, z. B. Kieselsäuregelen, erfolgen. Zu hohe Viskositäten werden bei lösungsmittelhaltigen Klebstoffen über entsprechende Lösungsmittelzusätze verringert. Bei lösungsmittelfreien Reaktionsklebstoffen sind Änderungen der

- verbesserte Auftrag- bzw. Verstreichbarkeit des Klebstoffs,
- Erzielung höherer Klebschichtdicken.

### 2.1.3 Verfahren zur Verbesserung der Klebfähigkeit von Fügeiteilen: Oberflächenbehandlung

Aus den Betrachtungen der grundlegenden Wirkmechanismen des Klebens ergeben sich Forderungen an die Beschaffenheit des Fügeiteils, die für eine qualitativ gute, beständige Klebung erfüllt werden müssen.

1. Die Fügeiteiloberfläche muss gut benetzbar sein, d. h., der gewählte Klebstoff soll nicht von ihr abperlen, sondern sich flächig auf der Fügeiteiloberfläche ausbreiten (spreiten).

2. Die Fügeiteiloberfläche muss gut klebbar sein, d. h. zwischenmolekulare und chemische Wechselwirkungen mit den Klebstoffmolekülen eingehen.
3. Die Oberflächenschicht des Fügeiteils muss fest mit dem Fügeiteil verbunden sein. Man stelle sich stark verrostete Träger aus Baustahl vor, die miteinander verklebt werden sollen. Entfernt man nicht die oberflächliche Rostschicht, verklebt man nur den Rost miteinander, der bei einer Beanspruchung der Fügeiteile mitsamt dem Klebstoff abfällt. Die Oxidschicht des Aluminiums dagegen ist im Gegensatz zum Rost sehr fest mit dem Grundwerkstoff verbunden und stellt einen guten Haftgrund dar.
4. Die Oberfläche darf sich nach dem Klebprozess nicht mehr unkontrolliert verändern. Geschliffener Stahl z. B. rostet – leider auch noch unter einer Klebstoffschicht, wenn die Klebung in eine feuchte Umgebung gebracht wird. Um eine langzeitbeständige Klebung zu erreichen, reicht beim Stahl ein Anschleifen der Oberfläche allein nicht aus – es müssen darüber hinaus geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um bei der Verwendung dieses Fügeiteils in feuchter Umgebung ein Rosten unter der Klebschicht zu verhindern.

Diese Zusammenhänge verdeutlichen die Notwendigkeit einer Oberflächenbehandlung des Fügeiteils, damit eine Oberfläche geschaffen werden kann, die den oben genannten Anforderungen genügt. Hiermit ist allgemein die Behandlung von Werkstoffoberflächen gemeint, mit dem Ziel:

1. in der Produktion Klebbedingungen zu schaffen, die eine gleich bleibende Qualität der Klebungen garantieren (Reproduzierbarkeit), ferner

2. die Benetzung und die Adhäsion sowie
3. die Langzeitbeständigkeit der Klebverbindung zu verbessern.

Allgemein unterscheidet man bei der „Oberflächenbehandlung“ drei Methodenklassen (Abb. 9): Oberflächenvorbereitung, Oberflächenvorbehandlung und Oberflächennachbehandlung.

Zur Oberflächenvorbereitung gehören das Reinigen (Entfetten) und das Passendmachen (z. B. Entgraten) der Fügeiteiloberfläche.

Alle mechanischen (z. B. Schleifen, Strahlen), chemischen (Metalle: z. B. Beizen (s. Glossar); Kunststoffe: z. B. Gasphasenfluorierung) oder physikalischen Verfahren (Kunststoffe: z. B. Niederdruckplasma), die die Struktur und/oder die chemische Zusammensetzung der Oberfläche im Vergleich zum Grundwerkstoff verändern, werden als Oberflächenvorbehandlung bezeichnet. Exemplarisch sei an dieser Stelle eine Oberflächenvorbehandlung des sonst schwer klebbaren Polyethylens genannt. Hier bedient man sich des so genannten Coronaverfahrens: Hierbei lässt man zur Verbesserung der Haftungseigenschaften beispielsweise bei der Herstellung von Verbundfolien elektrische Entladungen in Anwesenheit von Luftsauerstoff bei Spannungen bis zu 60.000 Volt einwirken.

Mit Oberflächennachbehandlung sind all die Verfahren gemeint, die der Konservierung der behandelten Oberfläche dienen, z. B. indem ein Primer aufgetragen wird.

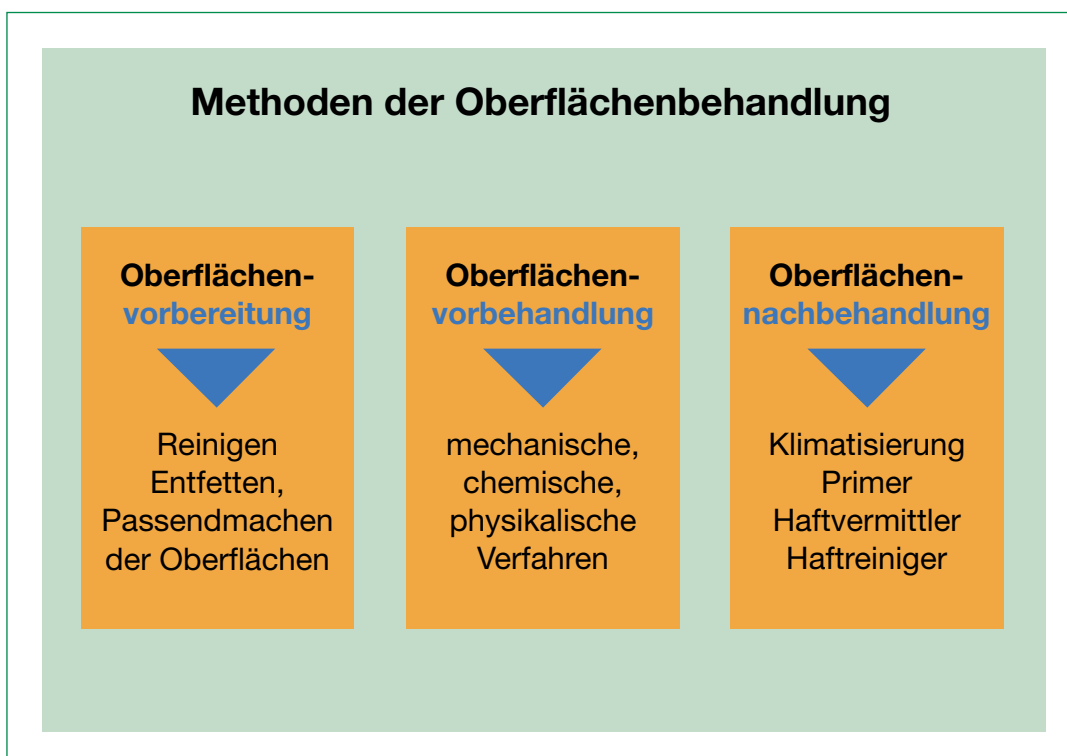


Abbildung 9

## 2.2 Was sind Klebstoffe?

Die Schilderungen im Kapitel 1.3 haben deutlich gemacht, dass es eine große Anzahl unterschiedlicher Klebstoffarten gibt, die in der Bio- und Technosphäre verwendet werden. Die bekannten Klebstoffarten lassen sich zum einen nach der chemischen Basis (Abb. 10) und zum anderen nach dem Verfestigungsmechanismus klassifizieren (Abb. 11).

Die bei den Kunststoffen übliche Einteilung in Duromere, Thermoplasten und Elastomere ist bei Klebstoffen wenig hilfreich. So gibt es z.B. ver-

schiedene Polyurethanklebstoffe, die als Duromere, als Elastomere und Thermoplasten aushärten. Damit aber jede Klebstoffgruppe einen definierten Platz erhält, bedarf es also eines weiteren Ordnungskriteriums, nämlich der Art und Weise, wie sich der Klebstoff verfestigt: also nach dem Abbindemechanismus, entweder auf physikalischem oder auf chemischem Wege.

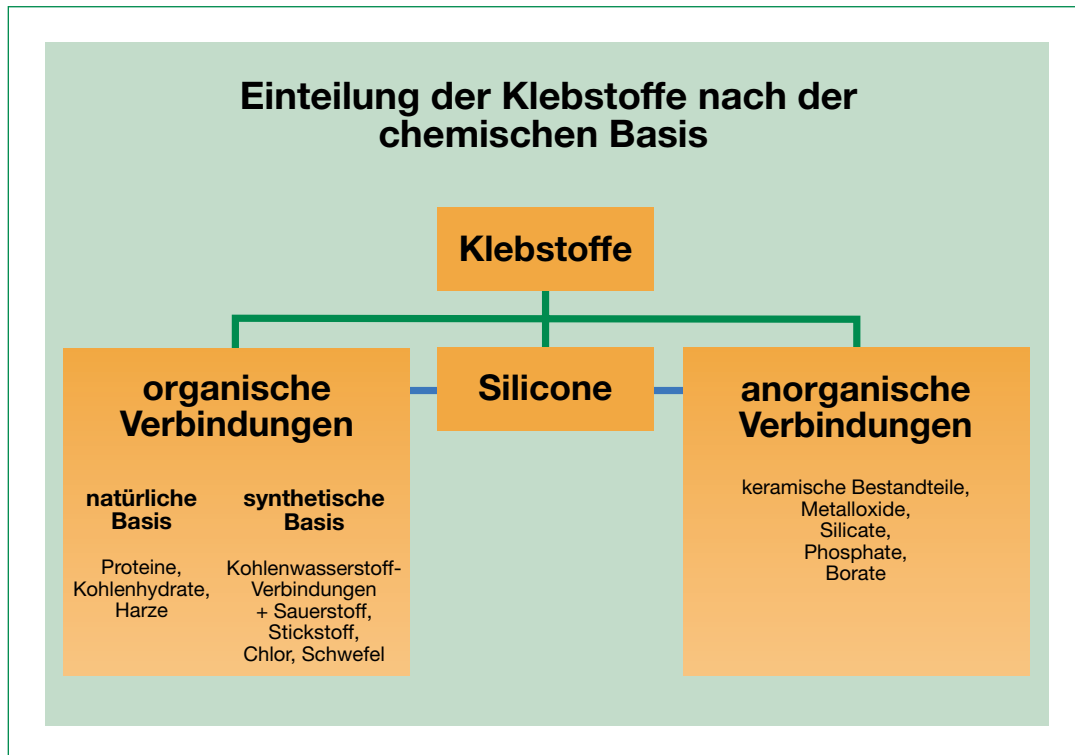


Abbildung 10



Abbildung 11  
Folie 7



## 2.2.1 Physikalisch abbindende Klebstoffe

Hierbei handelt es sich um Klebstoffe, die bereits beim Auftragen chemisch im Endzustand vorliegen (Abb. 12). Daher können nur Polymere verwendet werden, die sich verflüssigen lassen: schmelzbare und lösliche Thermoplaste. Obwohl stark aufquellbare, gering vernetzte Elastomere streng genommen unlöslich sind, können sie doch in bestimmten Fällen noch eingesetzt werden. Dabei genügt es, wenn sie stark aufquellen, damit so die Oberflächen benetzt werden.

erhöhter Temperatur zum Kriechen (s. Glossar). Andererseits sind mit dieser Kunststoffart aufgrund ihrer thermoplastischen Struktur thermisch lösbare und auch wiederherstellbare Klebungen zu verwirklichen. Die Klebung darf allerdings nicht bis zum Schmelzbereich des Klebstoffs erhitzt werden, weil der Klebstoff schon bei wesentlich geringeren Temperaturen, im so genannten „Erweichungsbereich“, an Festigkeit verliert. Die Verarbeitungstemperatur kann innerhalb einer gewissen Bandbreite variiert

Physikalisch abbindende Klebstoffe			
Bezeichnung	Art der Abbindung	Basisrohstoffe	Anwendungsgebiete
Schmelzklebstoffe	Erstarren der Schmelze	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere, Polyamide, Polyester u. a.	Verpackungsindustrie, Druck-, Textil-, Schuh-, Holz verarbeitende Industrie, Fahrzeugbau, Elektrotechnik
lösungsmittelhaltige Nassklebstoffe	Verdunsten von Lösungsmitteln	polymere Vinylverbindungen, Polymethylmethacrylat, Natur- und Synthetikgummi u. a.	Druck- und Verpackungsindustrie, PVC-Rohrklebung, Haushaltsklebstoffe
Kontaktklebstoffe		Polychloropren, Butadien-Acrylnitril-Kautschuk u. a.	Fußbodenverklebungen, Matratzen- und Schuhherstellung, Automobilindustrie
Dispersionsklebstoffe	Verdunsten von Wasser	nicht wasserlösliche Polymere des Vinylacetats, auch in Verbindung mit Comonomeren, Polyacrylsäureester u. a.	Verpackungsindustrie, Schuhherstellung, Lebensmittelindustrie, Holz verarbeitende Industrie
weitere wasserbasierte Klebstoffe		Glutin, Casein, Dextrin, Methylcellulose, Polyvinylalkohol u. a.	Papier, Tapeten
Haftklebstoffe	durch Oberflächenkontakt dauerklebrige Schichten	spezielle Polyacrylate, Polyvinylether, Naturkautschuk u. a.	Klebebänder für handwerkliche und industrielle Zwecke, Wundpflaster, Etiketten
Plastisole	Sol-Gel-Prozess durch Erwärmung	PVC und Weichmacher	Karosseriebau

Abbildung 12  
Folie 8

### Schmelzklebstoffe (Hotmelts)

Verschiedene Polymere können als Schmelzklebstoffe eingesetzt werden (Abb. 13). Der Klebstoff ist in erwärmter Form flüssig und somit verarbeitbar, abgekühlt jedoch fest. Die industriell verwendeten Schmelzklebstoffe liegen bei Raumtemperatur in Form von Blöcken, Stangen, als Granulat, als Pulver oder auch als Folien vor. Das Aufbringen auf die Fügeoberfläche geschieht als Schmelze, wobei der Klebstoff durch Walzen oder Spritzen aufgetragen wird und direkt nach dem Auftrag oder durch eine Wiedererwärmung der abgebundenen Schicht gefügt wird. Oder aber der feste Klebstoff wird als Folie oder Netz aufgelegt und anschließend heiß verpresst. Das Fügen geschieht im Allgemeinen unter Druckanwendung. Schmelzklebstoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie beim Abkühlen sehr schnell ihre innere Festigkeit aufbauen können.

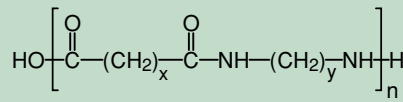
Das jedermann bekannte Beispiel eines natürlichen Schmelzklebstoffs ist das Bienenwachs, das der Honigbiene als Baumaterial dient (s. Kapitel 1.3). Klebfestigkeiten zwischen 15 und 35 MPa lassen sich mit technischen Schmelzklebstoffen erreichen, allerdings neigen sie bei Dauerbelastung oder

werden (Abb. 13) und hängt von der in der jeweiligen Anwendung gewünschten Viskosität des Klebstoffs ab. Die Schmelzviskosität entscheidet über das Applikationsverhalten eines Klebstoffs. Eine niedrige Viskosität erleichtert im Regelfall die Benetzung.

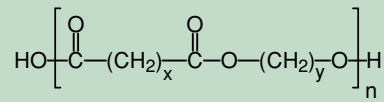
Industriell finden Schmelzklebstoffe ein weites Anwendungsfeld. Die Verpackungsindustrie (Herstellung von Verpackungen aus Papier, Pappe und Blech) gehört zu den größten Verbrauchern. In der Druckindustrie werden Schmelzklebstoffe zum Aufkleben von Buchrücken eingesetzt, die Textilindustrie verwendet sie zum Aufbringen von Applikationen und die Schuhindustrie benutzt Schmelzklebstoffe z.B. bei Sohlenklebungen. In der Holz verarbeitenden Industrie werden Schmelzklebstoffe bei Furnierummantelungen und Kantenleimungen eingesetzt. Im Fahrzeugbau dienen Schmelzklebstoffe zum Kleben von Dämm- und Polstermaterialien, von Scheinwerferstreuscheiben in den Metallrahmen, von Radabdeckungen und vielem mehr. Auch in der Elektrotechnik benutzt man diese Klebstoffart beispielsweise zum Kleben von Spulenwicklungen und Spulenenden (Abb. 14).



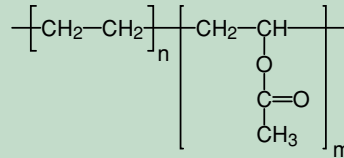
## Grundstoffe von Schmelzklebstoffpolymeren



Polyamid



Polyester



Ethylvinylacetat-Copolymer (EVA)

Grundstoff	Erweichungsbereich in °C	Schmelzviskosität in Pa s	Verarbeitungstemperatur in °C
Polyamid (PA)	95–175	1–20	120–240
Polyester	50–230	20–2000	150–240
Ethylvinylacetat-Copolymer (EVA)	90–200	20–10000	max. 200

Abbildung 13

## Auftrag durch Schmelzklebstoffpistolen



Möbelindustrie



Verpackungsindustrie



Elektronikindustrie

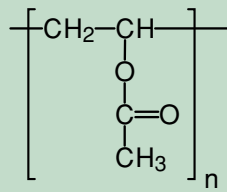
Abbildung 14

### Lösungsmittelhaltige Nassklebstoffe

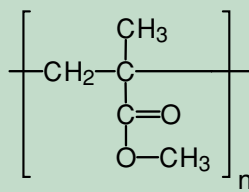
Der „Verarbeitungstrick“ bei dieser Klebstoffklasse ist der Einsatz von organischen Lösungsmitteln, in denen die thermoplastischen Polymere vorliegen (Abb. 15). Der Lösungsmittelgehalt dieser Klebstoffe beträgt in der Regel 75 bis 85 %. Nach der Verarbeitung verdunstet das Lösungsmittel, wodurch die Makromoleküle die Kohäsion aufbauen können und der Klebstoff abbindet. Die Ausbildung von van-der-Waals-Wechselwirkungen und Verknäuelungen zwischen den Thermoplast-Ketten sorgen dann für den Zusammenhalt der Polymer-

moleküle untereinander. Diese Klebstoffklasse zeigt gute Benetzungseigenschaften auf vielen Substraten, vor allem auf lösungsmitteldurchlässigen Fügebauteilen. Entsprechend der Bandbreite möglicher Rohstoffe, aus denen Nassklebstoffe hergestellt werden, haben sie unterschiedliche Leistungsmerkmale. Der Verarbeitungsablauf von Nassklebstoffen wird durch Zeitangaben (Zeitspannen) bestimmt, in denen der Klebstoff noch bzw. nicht mehr zu bearbeiten ist. Diese Kennwerte geben die Klebstoffhersteller auf den Datenblättern bekannt. Die für einen Nassklebstoff angegebene **Mindesttrockenzeit** beschreibt die Zeitspanne, die nach

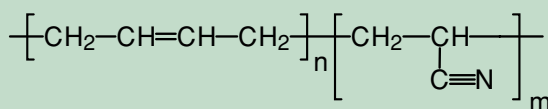
## Grundstoffe für lösungsmittelhaltige Nassklebstoffe



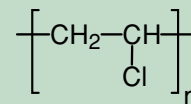
Polyvinylacetat



Polymethylmethacrylat



Nitrilkautschuk



Polyvinylchlorid (PVC)

Abbildung 15

dem Klebstoffauftrag abgewartet werden muss, bis ein Teil des Lösungsmittels verdunstet ist. Selbst bei lösungsmitteldurchlässigen Fügeteilen sollte diese Mindesttrockenzeit vor dem Fügen eingehalten werden. Daran schließt sich die **Nassklebzeit** oder auch **offene Zeit** an, innerhalb derer der aufgetragene Nassklebstoff auf dem Fügeteil ruhen kann, ohne dass durch diese Wartezeit Einbußen in der Endfestigkeit der ausgeführten Klebung hingenommen werden müssen. Wird die Nassklebzeit überschritten und das eigentliche Fügen erst nach Ablauf der Nassklebzeit ausgeführt, hat dies eine Schwächung der Klebung zur Folge. Nassklebstoffe verfügen über eine geringe Anfangsfestigkeit, die langsam bis zur Handfestigkeit und anschließend bis zur Endfestigkeit ansteigt. Mit dieser Klebstoffart sind keine hohen Zugscherfestigkeiten (s. *Glossar*) erreichbar. Aufgrund ihrer thermoplastischen Natur verfügen Nassklebstoffe nur über eine eingeschränkte Formbeständigkeit unter Hitzeinfluss. Darüber hinaus reagieren sie naturgemäß empfindlich auf Lösungsmittel und zeigen unter Belastung eine Neigung zum Kriechen. Industriell wird diese Klebstoffklasse vor allem beim Kleben von Papier und Pappen sowie beim Diffusionskleben (Quell- bzw. Kaltschweißen) von löslichen Thermoplasten (z. B. PVC) eingesetzt. Der Trend in der Klebstoffentwicklung geht jedoch aus ökologischen Gründen weg von lösungsmittelhaltigen Klebstoffen hin zu lösungsmittelfreien Systemen.

### Kontaktklebstoffe

Bei Kontaktklebstoffen handelt es sich um lösliche Elastomere zusammen mit Harzen als Lösung in einem organischen Lösungsmittel oder als Dispersion in Wasser. Der „Verarbeitungstrick“ ist derselbe wie bei Nassklebstoffen: Das Lösungsmittel ent-

weicht, der Klebstoff verfestigt sich. Die unterschiedliche Bezeichnung dieser beiden Klassen deutet allerdings ihr Unterscheidungsmerkmal schon an: Während die „Nassklebstoffe“ einen „nassen“ Klebfilm verursachen und ihr Lösungsmittel erst beim Abbindevorgang entweicht, kleben Kontaktklebstoffe sozusagen „trocken“. Man trägt den Klebstoff auf beide Fügeteile auf und lässt das Lösungsmittel vor dem Zusammenfügen fast vollständig abdampfen. Die umweltfreundliche Alternative Wasser als Lösungsmittel bei dieser Klebstoffklasse stellt allerdings aufgrund der Feuchtigkeitsempfindlichkeit der Klebung bisher noch nicht in allen Anwendungen einen gleichwertigen Ersatz für die organischen Lösungsmittel dar.

Als Grundstoffe für Kontaktklebstoffe werden häufig Polychloroprene, Butadien-Styrol-Kautschuk, Butadien-Acrylnitril-Kautschuk in Lösungsmitteln oder wässrige Acrylat-Dispersionen eingesetzt. Die Abluftzeit beschreibt hier die Zeitspanne, nach deren Ablauf der aufgetragene Klebstoff beim Berühren scheinbar trocken ist, aber noch Restlösungsmittel enthält. Dann klebt man unter möglichst hohem Druck – erst jetzt wird der Kontakt zwischen den Fügepartnern hergestellt und die Klebstoffpolymere diffundieren ineinander. Die Datenblätter geben Auskunft über die Kontaktklebzeit, d.h. über den Zeitraum, der ohne Einbußen bei der Endfestigkeit der Klebung verstreichen kann, bevor gefügt werden muss. Begrenzt wird diese Zeit durch die beginnende Kristallisation der Klebschicht, durch die die Polymere ihre Fähigkeit verlieren, adhäsive Bindungen mit dem Fügepartner auszubilden. Beim eigentlichen Fügen mit Kontaktklebstoffen entscheidet nicht die Anpressdauer, sondern der Anpressdruck (mindestens 0,5 MPa) über die Festigkeit der Klebung,

deren innere Festigkeit auf der Ausbildung von van-der-Waals-Kräften und Verknüelungen der Moleküle zwischen den Polymerschichten beruht. Kontaktklebstoffe sind zwar in der Regel sofort handfest, mit ihnen können allerdings keine besonders hohen Zugscherfestigkeiten erreicht werden. Sie verfügen über eine hohe Flexibilität, die in einem gewissen Rahmen einstellbar ist, sind jedoch nur bedingt warmformbeständig und reagieren empfindlich auf Lösungsmittel bzw. bei Dispersionen auf Wasser. Ihre Neigung zum Kriechen bei erhöhten Temperaturen unter Belastung kann in bestimmten Grenzen unterdrückt werden. Ein wichtiges Einsatzgebiet von Kontaktklebstoffen war früher das Kleben von PVC- und Parkettfußböden. Dort sind sie heute in weiten Teilen Europas vorwiegend durch lösungsmittelfreie Systeme ersetzt. Aber nach wie vor werden Kontaktklebstoffe aufgrund ihrer hohen Flexibilität und ihrer günstigen Eigenschaft, verhältnismäßig hohe Anfangsfestigkeiten zu erreichen, in der Automobilindustrie, bei der Matratzen- und Schuhherstellung verwendet.

### Dispersionsklebstoffe

Bei Dispersionsklebstoffen (Tab. 4) handelt es sich um heterogene Systeme, die aus einer festen Polymerphase und einer Wasserphase bestehen, wobei der Feststoffgehalt 40 bis 70 % beträgt. Im Kapitel 1.3 wurde die Feldwespe vorgestellt, wie sie diese Klebstoffart beim Nestbau verwendet und die Klebstoffpartikelchen durch später verdunstendes Verdauungssekret am vorzeitigen Abbinden hindert.

Bei industriell hergestellten Dispersionsklebstoffen (Abb. 16) werden die einzelnen Klebstoffpartikel durch Hilfsstoffe und Emulgatoren im Wasser in Schwebe gehalten und liegen daher in flüssiger, ver-

arbeitbarer Form vor. Das Abbinden erfolgt bei Dispersionsklebstoffen langsam durch das Entweichen des Wassers, das entweder verdunstet oder in die Fügeiteile eindringt. Dadurch erhöht sich die Konzentration der Polymerpartikel. Sie können sich immer mehr annähern, bis sie ineinander fließen. Dieser Prozess wird als „Filmbildung“ bezeichnet (Abb. 17). Die offene Zeit, in der der Klebstoff nach dem Auftragen ohne Einbußen bei der Endfestigkeit auf dem Fügeiteil „ruhen“ kann, wird bei Dispersionsklebstoffen durch die Temperatur, die Klebschichtdicke sowie durch die Saugfähigkeit der Fügeiteile bestimmt. Danach werden die Fügeiteile aufeinander gepresst, wobei die Presszeit in der Regel im Minutenbereich liegt (je nach Temperatur). Vor der Weiterverarbeitung ist die ebenfalls temperaturabhängige Nach-Abbindezeit einzuhalten.

Mit Dispersionsklebstoffen lassen sich keine hohen Zugscherfestigkeiten (s. Glossar) erreichen. Gemäß ihrer thermoplastischen Natur verfügen sie nur über eine eingeschränkte Formbeständigkeit bei thermischer Belastung. Außerdem sind sie aufgrund der eingelagerten Emulgatoren feuchtigkeitsempfindlich und zeigen unter Belastung eine Neigung zum Kriechen. Allerdings können sie über hohe Flexibilität verfügen, die in einem gewissen Rahmen einstellbar ist. Besonders geeignet sind Dispersionsklebstoffe, wenn es darum geht, großflächige Verbundsysteme aus wasserdurchlässigen Materialien zu kleben. Demgemäß werden sie häufig in der Papierverarbeitung, der Verpackungsherstellung und in der Möbelindustrie eingesetzt. Die folgende Zusammenstellung soll einen Überblick über die Vielzahl der Anwendungsgebiete von Dispersionsklebstoffen und eingesetzten Polymeren geben (Tab. 4).

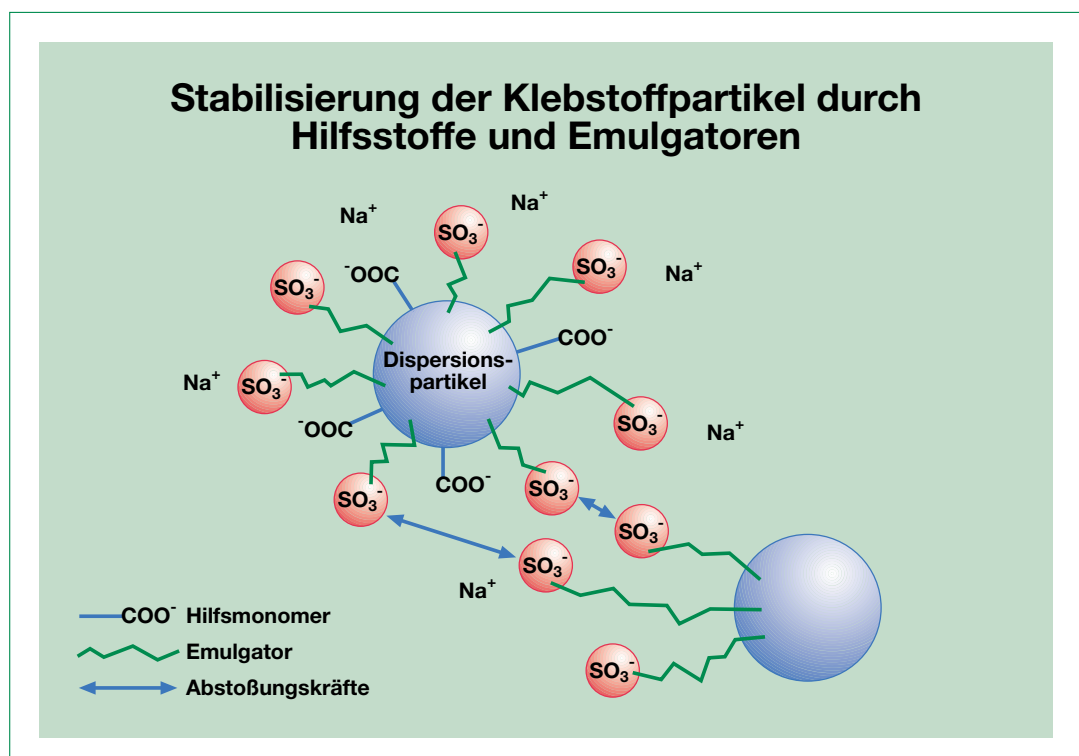


Abbildung 16  
Folie 9

## Filmbildung einer Polyacrylatdispersion in der Klebfuge

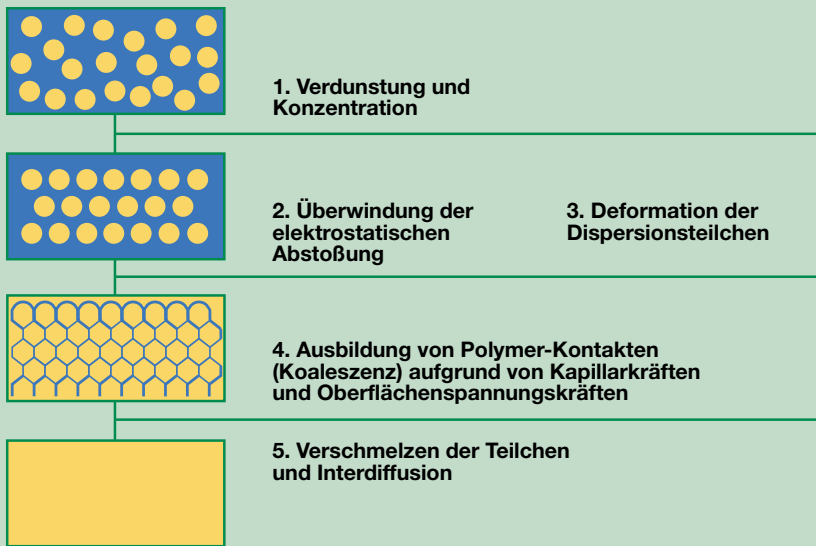


Abbildung 17  
Folie 10

## Dispersionsklebstoffe

<b>Polyvinylacetat</b>	Gute Haftung auf cellulosehaltigen Substraten wie Holz und Papier, vor allem für Holzleime eingesetzt
<b>Vinylacetat-Copolymere</b>	Gute Haftung auf vielen polaren Kunststoffen
<b>Polyacrylate</b>	Gute Alterungs- und Medienbeständigkeit, vor allem für Haftklebstoffe (Etiketten, Klebebänder), Permanentklebstoffe (z. B. für Fliesen, Boden- und Wandbeläge) und Kaschierklebstoffe (z. B. für Glanzfolien)
<b>Polyvinylidenchlorid</b>	Physiologisch unbedenklich, deshalb bevorzugt für Kaschierklebstoffe im Lebensmittelbereich
<b>Styrol-Butadien-Copolymere</b>	Kaschierklebstoffe (z. B. Aluminiumfolie auf Papier)
<b>Polyurethane</b>	Mit meist sehr guter Haftung auf vielen Substraten und hohen Kohäsionsfestigkeiten. Anwendung im Bereich der Schuhindustrie und zur Folienkaschierung
<b>Polychloropren</b>	Hohe Elastizität und Kohäsionsfestigkeit. Verwendung vor allem in der Schuhindustrie
<b>Kautschuklatizes</b>	(z. B. Chloroprenlatex) Alternative zu lösungsmittelhaltigen Kontaktklebstoffen

Tabelle 4

### Wasserbasierte Klebstoffe

Die Gruppe der wasserbasierten Klebstoffe umfasst vier Untergruppen (Tab. 5): Klebstoffe auf Basis tierischer Bindegewebsproteine (Glutinleime), auf Basis pflanzlicher Naturprodukte, die Gruppe der Caseinleime sowie Klebstoffe mit dem Grundstoff Polyvinylalkohol (PVAL). Die Ausbildung der Klebschicht erfolgt bei wasserbasierten Klebstoffen durch Verdunstung oder Aufnahme des Wassers durch die Fügeteile. Einige pflanzliche Leime und die Caseinleime haben die Besonderheit, dass die Basisrohstoffe in kaltem Wasser unlöslich sind und in alkalischem Medium (Natronlauge, Ammoniak) aufgeschlossen werden müssen. Die folgende Übersicht zeigt eine Auswahl unterschiedlicher Inhaltsstoffe wasserbasierter Klebstoffe und deren häufigste Anwendungsgebiete.

### Haftklebstoffe

Haftklebstoffe liegen als chemisch fertige Klebstoffe in hochviskoser Form vor, die in der Regel als Film auf ein flexibles Trägermaterial aufgebracht werden (Klebebänder oder Etiketten). Die Besonderheit dieser Klebstoffe ist nun, dass sie nicht zu einem Feststoff abbinden, sondern zähflüssig bleiben. Diesbezüglich nehmen sie in der Gruppe der physikalisch abbindenden Klebstoffe eine Sonderstellung ein. Bei der Herstellung von Systemen mit Haftklebstoffen können die Klebstoffe in organischen Lösungsmitteln gelöst sein (Bsp.: Kautschuke, Acrylate), in wässrigen Dispersionen vorliegen (Bsp.: Acrylatdispersionen) oder aus einer lösungsmittelfreien Schmelze (Haftschmelzklebstoffe) stammen. Die Formulierung der verschiedenen Haftklebstoffe ist ähnlich: das Basispolymer

## Weitere wasserbasierte Klebstoffe

Klebstoffart	Herkunft des Basisrohstoffes	Anwendungsgebiete
<b>Glutinleime</b>		
Hautleime	Rohhautabfälle und Bindegewebe	Papierkleben
Fischleim	Fischhäute	gummierte Klebestreifen
<b>auf Basis pflanzlicher Naturprodukte</b>		
Stärkeleim	Mais, Kartoffeln, Reis	Papierkleben
Methylcellulose	Casein: Cellulose aus Holz	Tapetenkleister
<b>Caseinleim</b>	Eiweißbestandteil der Milch	Flaschenetikettierung
<b>PVAL-Klebstoffe</b>	Verseifungsprodukt des Polyvinylacetats oder anderer Polyvinylester	Kleben von Papier, Pappe, Holz; Grundstoff für feuchtigkeitsaktivierbare Gummierungen

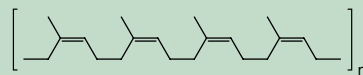
Tabelle 5

als kohäsionsbestimmende Komponente, klebrige Harze und Weichmacher als adhäsionsbestimmende Bestandteile sowie Zusatzstoffe für spezielle Eigenschaften.

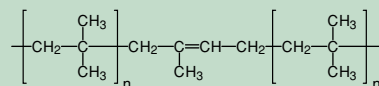
Als Basispolymere in Haftklebstoffen ist eine Vielzahl von Klebgrundstoffen in Kombination mit entsprechenden Zusätzen (klebrig machende Harze, Weichmacher, Antioxidantien) im Einsatz (Abb. 18). Hierbei zeigt die Stereochemie keinen nennenswerten Einfluss auf die Festigkeiten der Klebungen. Der Begriff Haftklebstoff ist dahingehend zu verstehen, dass es bei dieser Klebstoffart – im Unterschied zu anderen Klebstoffen – zu einer sofortigen Ausbildung von Adhäsion und Kohäsion beim Fügen kommt. Um die Benetzung zwischen Klebstoff und Fügeoberfläche zu beschleunigen, ist ein Anpressdruck von ca. 0,2 MPa erforderlich (vgl.

englisch für Haftklebstoffe „pressure sensitive adhesives“, PSA). Bei nicht ausreichendem Anpressdruck oder zu geringen Verarbeitungstemperaturen (Viskosität steigt an) kann es zu Klebfehlern wie Blasen oder Ablösungen kommen. Die eigentliche Adhäsion erfolgt bei Haftklebstoffen wie bei anderen Klebstoffen über zwischenmolekulare Wechselwirkungen. Bei Haftklebstoffen handelt es sich aber auch in der fertigen Klebung noch um eine viskose Flüssigkeit. Deshalb hat die Viskosität eine direkte Auswirkung auf die Kohäsionsfestigkeit des jeweiligen Haftklebstoffs. Man unterscheidet hier zwischen wiederablösbaren und permanent haftenden Typen. Beim Ablösen eines Haftklebstoffs (z.B. Klebeband) von einer Oberfläche wird nicht die Adhäsion zwischen Klebstoff und Oberfläche zerstört, sondern es erfolgt ein Bruch in der oberflächennahen Kohä-

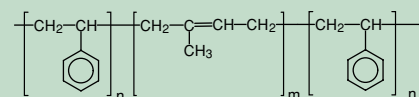
## In Haftklebstoffen verwendete Kautschuke



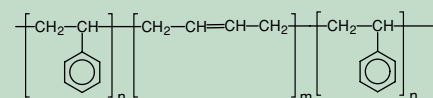
Naturkautschuk



Butylkautschuk  
(IIR, „Isobutylene-Isoprene-Rubber“)



Styrol-Isopren-Blockcopolymer (SIS)



Styrol-Butadien-Blockcopolymer (SBS)

Abbildung 18

sionszone des Klebstoffs. So bleiben immer Rückstände des Klebstoffs auf der Fügeiteiloberfläche (z.B. Spuren von Etiketten auf Fenstern). Ist ein Klebeband z.B. mit einem niederviskosen, also weniger zähflüssigen Haftklebstoff versehen, so ist dessen Kohäsionsfestigkeit gering, und es lässt sich wieder ablösen. Allerdings lässt sich auch keine hohe Endfestigkeit erreichen. Charakteristisch ist jedoch das schnelle Erreichen einer relativ hohen Anfangshaftung, da Benetzungsvorgänge mit niederviskosen Systemen schnell ablaufen.

Bei höher viskosen Systemen kann man dagegen keine schnelle Anfangshaftung erreichen, da diese Klebstoffe wesentlich länger brauchen, um die Fügeiteiloberfläche vollständig zu benetzen. Aufgrund der hohen Viskosität ergibt sich eine höhere Kohäsion mit höheren Endfestigkeiten. Aus diesem Grunde werden diese Systeme für eine permanente Haftung eingesetzt. Da raue Oberflächen besonders bei den hochviskosen Haftklebstoffen die Benetzung erschweren und hinauszögern, sollten die zu verbindenden Fügepartner idealerweise über eine glatte Oberfläche verfügen. Da viele Haftklebstoffe (besonders die Kautschukklebstoffe und die Silicone) eine

den verschiedenartigen Klebebändern für handwerkliche und industrielle Zwecke (Abb. 19).

### Plastisole

Plastisole sind 1-K-Klebstoffe, die pastös auf die Fügeiteile aufgetragen werden. Die Paste wiederum besteht aus zwei nebeneinander vorliegenden Komponenten: PVC-Partikel und Weichmacher (s. Glossar). Die festen PVC-Partikel werden in dem hochviskosen Weichmacher in einem Mengenverhältnis 1:1 bis 4:1 dispergiert. Zum Abbinden wird der aufgetragene Klebstoff erwärmt, so dass das thermoplastische PVC aufquillt und den Weichmacher aufnehmen kann. Bei diesem Vorgang handelt es sich um einen rein physikalischen Sol-Gel-Prozess (Abb. 20). Das zweiphasige System (Sol) wandelt sich durch Einlagerung des Weichmachers in das gequollene Polymer in ein einphasiges System (Gel) um. Erst bei einer Temperatur von 150 bis 180 °C ist dieser Prozess abgeschlossen, bei dem eine Klebschicht resultiert, die aus einem plastifizierten Polymer besteht. Plastisole verfügen über hohe Flexibilität und über gute Schälfestigkeit, haben allerdings den

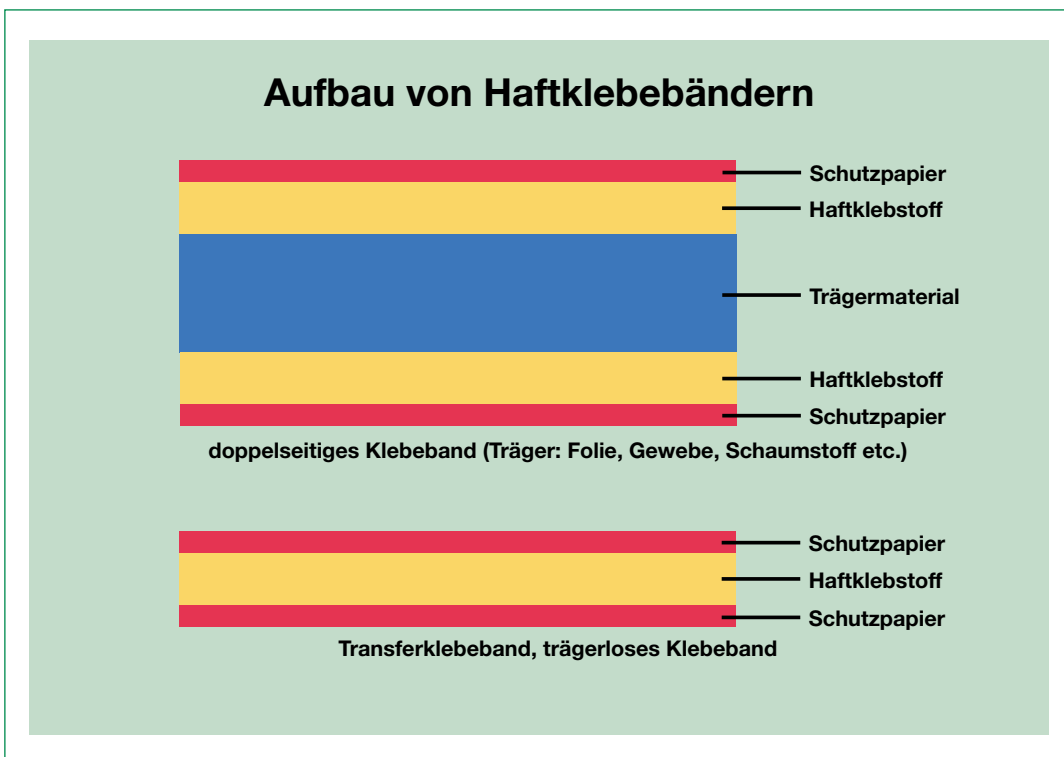


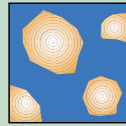
Abbildung 19

sehr geringe Oberflächenspannung besitzen, bedarf es außer einer Reinigung der Fügeiteiloberfläche meist keinerlei Vorbehandlungen – Verbindungen mit Haftklebstoffen sind auch auf den meisten Kunststoffoberflächen „selbstklebend“. Schälwiderstand und Scherfestigkeit von Haftklebstoffen sinken bei Erhöhung der Temperatur, darüber hinaus zeigen sie unter Belastung eine Neigung zum Kriechen. Unter den verschiedenen Klebstoffarten finden Haftklebstoffe im Alltag die wohl vielseitigste Anwendung. Ihr Einsatz richtet sich nach ihren charakteristischen Eigenschaften (s. Glossar, Haftklebstoffe, Tab. 7) und reicht von Wundpflastern über Etiketten bis hin zu

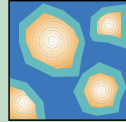
Nachteil, empfindlich gegen Zugscherbelastungen zu sein sowie unter Belastung eine Neigung zum Kriechen zu zeigen, was in ihren üblichen Anwendungen als Klebdichtstoff jedoch keine negativen Auswirkungen hat. Ferner sind sie als Thermoplasten naturgemäß nur in geringem Maße temperaturbeständig; bei einer Überhitzung, wie sie z. B. beim Punktschweißen auftreten kann, besteht außerdem die Gefahr der Abspaltung von Salzsäure. Ein typisches Anwendungsgebiet der Plastisole ist der Karosserierohbau. Hier dienen Plastisole neben ihrer fugendenden Funktion dazu, Fugen gegen Feuchtigkeit abzudichten, Vibrationen zu



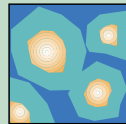
## Abbindemechanismus der Plastisole



Paste aus hartem PVC-Korn in flüssigem Weichmacher (Plastisol)



Anquellung der Paste bei 40 °C



Vorgelierung ab 100 bis 120 °C



Sol-Gel-Prozess bei 160 bis 180 °C

Abbildung 20  
Folie 11

dämpfen und die Steifigkeit der Karosserie zu erhöhen. Darüber hinaus ermöglichen Plastisole das Kleben von nicht vorbehandelten Blechen, da sie die Fähigkeit besitzen, Öl aufnehmen zu können. PVC-Plastisole bereiten bei der Wiederverwertung der geklebten Bauteile aus Umwelt-Gesichtspunkten Probleme (PVC-Problematik), so dass mehr und mehr Ersatzstoffe z. B. auf Basis von Epoxidharzen verwendet werden.

### 2.2.2 Chemisch härtende Klebstoffe

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Arten von chemisch härtenden Klebstoffen (Reaktions-

klebstoffe) vorgestellt, wobei sie nach Art der zugrunde liegenden Polyreaktionen in drei verschiedene Klassen eingeteilt werden (Abb. 21). Damit der Klebstoff tatsächlich auch erst in der Klebfuge aushärtet, mussten die Hersteller einen Verarbeitungsmodus entwickeln, der die chemische Reaktion zum festen Klebstoff so lange blockiert oder unterbindet, bis der Klebstoff an seinem letztendlichen Bestimmungsort, in der Klebfuge, angelangt ist. Die Art dieses Modus richtet sich nach dem Aushärtungsmechanismus der unterschiedlichen Klebstoffe: Klebstoffe, die nach Mischung mit ihren Reaktionspartnern spontan, d. h. bereits bei Raumtemperatur, reagieren, werden als Zweikomponenten-Klebstoffe

## Chemisch härtende Klebstoffe

Bezeichnung	Art der Härtung	Basisrohstoffe	Anwendungsgebiete
<b>Cyanacrylate</b>	Polymerisation	Cyanacrylsäureester	Kleben von Kleinteilen; Kleben von Gläsern aller Art, Gewebeklebstoff, Sprühverbände
<b>Methylmethacrylate</b>		Methacrylsäuremethylester	Kunststoffkleben in Automobil- und Schienenfahrzeugbau
<b>Anaerob härtende Klebstoffe</b>		Diacylsäureester von Diolen	Motoren, Elektromotoren, Schraubensicherungen, Welle-Nabe-Verbindungen
<b>Strahlenhärtbare Klebstoffe</b>		Epoxyacrylate, Polyesteracrylate	Kleben von Glas und transparenten Kunststoffen, Dentaltechnik
<b>Phenolformaldehydharze</b>		Phenole, Formaldehyd	Holzwerkstoffe, Kleben von Brems- und Kupplungsbelägen, strukturelle Aluminiumklebungen im Flugzeugbau
<b>Silicone</b>	Polykondensation	Polyorganosiloxane	Dichtungen; Automobilbau, Elektrotechnik; Spezialanwendungen in Luft- und Raumfahrt
<b>Polyimide</b>		Aromatische Tetracarbonsäureanhydride und aromatische Diamine	Metallklebungen im Luft- und Raumfahrtbereich
<b>Epoxidharzklebstoffe</b>		Oligomere Diepoxide und Polyamine oder Polyamidoamine	Strukturklebstoff im Fahrzeug- und Flugzeugbau, Karosseriebau, Elektronik, Verkleben von FVK, Reparaturklebungen
<b>Polyurethane</b>	Polyaddition	di- und ggfs. trifunktionelle Isocyanate, Polyole	Karosseriebau; Verbinden von Materialien mit stark unterschiedlichen Last- und Temperaturdehnungsverhalten, Glasscheibenkleben in Fahrzeugen

Abbildung 21  
Folie 12

(2-K) vertrieben, sie befinden sich als Grundstoff „Harz“ und „Härter“ in getrennten Behältern, sie sind also mechanisch blockiert. Erst kurz vor dem Auftrag werden sie zum eigentlichen Klebstoff gemischt.

Einkomponenten-Klebstoffe (1-K) wiederum liegen in ihrer endgültigen Mischung schon fertig vor, sie sind allerdings chemisch blockiert: Solange sie nicht die besonderen Bedingungen vorfinden, bei denen der Härter aktiviert wird, kleben sie nicht. Sie brauchen entweder hohe Temperaturen oder Substanzen oder Medien (Licht, Luftfeuchtigkeit) aus der Umgebung, die den Verfestigungsmechanismus initiieren. Die Behältnisse, in denen sie transportiert und aufbewahrt werden, sind bei dieser Klebstoffklasse mit Bedacht und nach ihrer reaktionsblockierenden Fähigkeit zu wählen.

## Polymerisationsklebstoffe

### Cyanacrylate (Sekundenklebstoffe)

Cyanacrylate werden umgangssprachlich als „Sekundenklebstoffe“ bezeichnet. Tatsächlich verdeutlicht diese Bezeichnung sehr anschaulich das vorherrschende Merkmal dieser Klebstoffklasse. Innerhalb von Sekunden erreicht man mit diesem Klebstoff handfeste Klebungen, deren Endfestigkeit allerdings erst nach einigen Stunden erreicht wird. Chemisch gesehen sind Sekundenklebstoffe 1-K-Reaktionsklebstoffe auf Basis von Cyanacrylsäureestern. Die besondere Struktur von Cyanacrylsäureestern erklärt auch die hohe Geschwindigkeit, mit der die Aushärtungsreaktion einsetzt (Abb. 22). Die Cyan- und Ester-Gruppen üben eine stark elektronenanziehende Wirkung aus, die den Angriff nucleophiler Agenzien, beispielsweise

Amine, begünstigt und das entstehende Carbanion stabilisiert. Aus der Wasserdissoziation stammende Hydroxid-Ionen oder Amine, die in entsprechenden Primern enthalten sind, können so angreifen und eine anionische Polymerisation in Gang setzen (Abb. 23). So kann die Aushärtung bei dieser Klebstoffart entweder durch eine Luftfeuchtigkeit zwischen 50 und 70 %, durch vorhandene Feuchtigkeit auf den Fügeflächen oder Kontakt mit basischen Untergründen ausgelöst werden. Sind allerdings saure Beimischungen oder sauer reagierende Untergründe vorhanden, ist die notwendige Konzentration nucleophiler Hydroxid-Ionen so weit reduziert, dass die Härtung von Sekundenklebstoffen verlangsamt wird. Starke Säuren führen zur Protonierung des Carbanions und zum sofortigen Abbruch der Kettenreaktion. Zwar können auch schwache Säuren einen Kettenabbruch herbeiführen, ihre nucleophilen, konjugierten Basen allerdings können neue Polymerisationen initiieren. In einem neutralen oder basischen Umfeld läuft die Reaktion so lange, bis alle Monomere verbraucht sind. Das Verhalten von Cyanacrylaten gegenüber Wasser ist jedoch ambivalent: Sie benötigen zwar Wasser zur Aushärtung, eine zu hohe Feuchtigkeit kann aber zur Auflösung der Klebung führen. Als Reaktionsmechanismus hierfür wird die ebenfalls basisch katalysierte Hydrolyse des Cyanacrylatpolymers postuliert (Abb. 24). Formaldehyd kann in der Tat als Reaktionsprodukt der Hydrolyse nachgewiesen werden. Im Einklang mit dem postulierten Mechanismus ist auch der Anstieg der Reaktionsgeschwindigkeit um zwei Größenordnungen bei Erhöhung des pH-Wertes von 7 auf 8, aus dem sich folgern lässt, dass die Reaktion durch das Hydroxid-Ion gestartet wird. Zu den typischen Verbundeigenschaften der Sekundenklebstoffe zählt neben ihrer relativ hohen Festigkeit, dass sie spröde und wenig flexibel sind sowie als Thermoplast nur

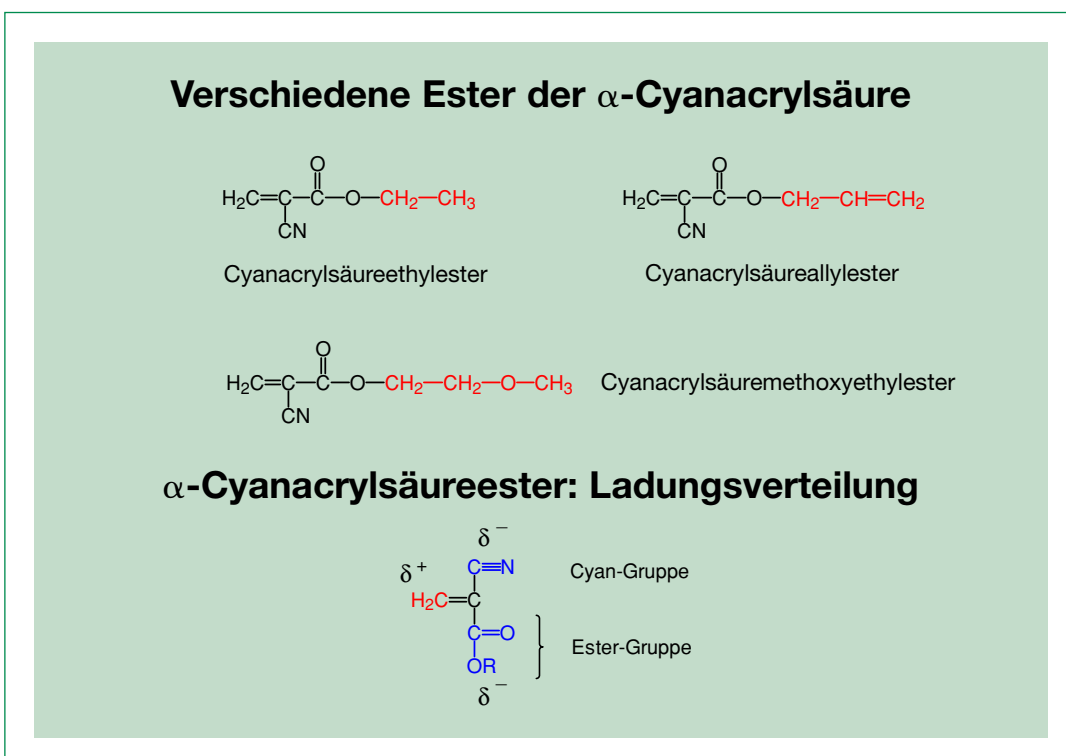


Abbildung 22  
Folie 13



## Methylmethacrylate (MMA)

Bei Methylmethacrylaten handelt es sich um Reaktionsklebstoffe auf der Basis von Methylmethacrylat (Methacrylsäuremethylester), dem Härter, Dibenzoylperoxid als typischem Radikalbildner und N,N-Dimethyl-p-toluidin als typischem Beschleuniger beigegeben sind. Die Aushärtung des reaktiven Systems aus MMA-Monomeren, Radikalbildner (3 bis 5 %) und Beschleuniger läuft nach dem Mechanismus der Radikalkettenpolymerisation ab (Abb. 25). Bei einem Härteranteil von über 5 % verringert sich die Festigkeit des Klebstoffs

verfahren. Neben den bei 2-K-Klebstoffen üblichen Verfahren (Klebstoffauftrag mit Hilfe von Doppelkartuschen, Verarbeitung mit direktem Härterzusatz) können bei MMA-Klebstoffen die unterschiedlichen Komponenten getrennt auf jeweils ein Füge teil aufgebracht werden. Die eigentliche Aushärtereaktion findet erst nach dem Fügen in der Klebfuge statt. So vermeidet man schwierig einstellbare Mischungsverhältnisse (etwa Harz : Härter 100 : 3) und umgeht eine lästige kurze Topfzeit (s. Glossar), die im Ablauf der industriellen Fertigung genauestens

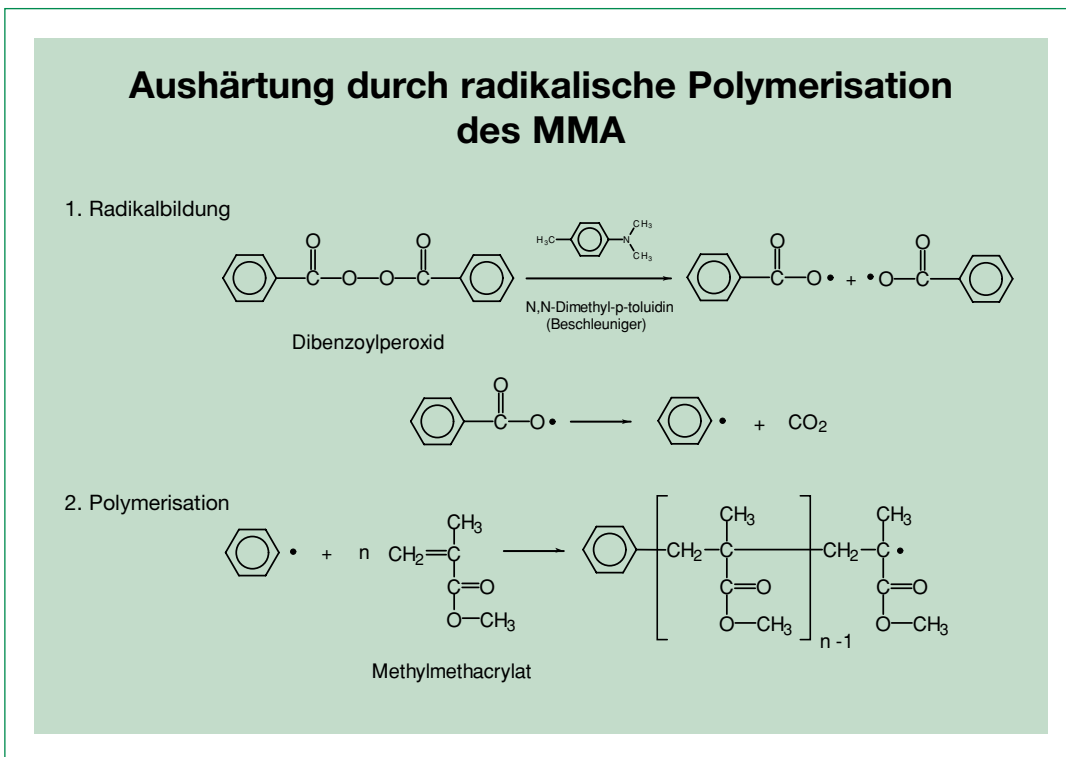


Abbildung 25  
Folie 15

geringfügig. Eine Absenkung der Härtermenge unter 3 % verlängert die Aushärtzeit erheblich, bringt aber eine nur geringfügige Erhöhung der Festigkeit mit sich. Mit MMA-Klebstoffen sind Zug-scherfestigkeiten vor Alterung bis über 30 MPa erzielbar, in manchen Fällen können schon nach 5 Minuten Funktionsfestigkeiten von 5 MPa erreicht werden. Die Endfestigkeit stellt sich bei Raumtemperatur nach ca. 12 bis 24 Stunden ein. Eine Erhöhung der Temperatur bei der Aushärtung beschleunigt zwar den Prozess, allerdings müssen dann auch Einbußen bei der Endfestigkeit hingenommen werden. MMA-Klebstoffe härten zu Thermoplasten aus, die jedoch einer Temperaturbelastung zwischen ca. -50 °C bis ca. 100 °C, kurzzeitig sogar bis 180 °C standhalten können. Sie zeigen gute Haftungseigenschaften auf vielen Kunststoffoberflächen und sind relativ unempfindlich gegenüber etwas fetthaltigen Oberflächen. Mit dieser Klebstoffart können je nach Viskosität des Klebstoffs auch größere Spaltbreiten überbrückt werden, wobei die Elastizität und die Flexibilität des ausgehärteten Klebstoffs in einem gewissen Rahmen einstellbar sind. Interessant sind bei MMA-Klebstoffen die unterschiedlichen Verarbeitungs-

eingehalten werden muss und so zu Problemen führen kann. MMA-Klebstoffe werden zum Kleben von Kunststoffen untereinander und zum Kleben von Metallen mit Kunststoffen verwendet. Klassische Anwendungsgebiete für diese Klebstoffart finden sich in der Automobilindustrie und im Schienenfahrzeugbau.

### Anaerob härtende Klebstoffe

Dieser 1-K-Klebstoff auf Basis von Dimethacrylsäureestern härtet anaerob aus, d.h. unter Ausschluss von Sauerstoff. Sauerstofffreie Verhältnisse liegen nach der Verarbeitung im Füge spalt vor, wenn die Geometrie der Füge teile zu Sauerstoffabschluss führt. Um dann die Aushärtungsreaktion in Gang zu setzen, ist ein Metallkontakt (Kupfer oder Eisen) und bei kupfer- und eisenfreien Füge teilen ein Beschleuniger notwendig. Um nicht vorzeitig auszuhärten, muss der Klebstoff bis zum Gebrauch in seinem Behälter Kontakt mit Sauerstoff haben. Hierzu bedient man sich luftdurchlässiger Kunststoffflaschen, die nur halb gefüllt und vor der Füllung mit Sauerstoff durchspült werden.

Ein häufig eingesetzter Grundstoff für anaerobe Klebstoffe ist Tetraethylenglykoldimethacrylat, kurz: TEGMA. Die Kohäsionsbildung bei anaerob härtenden Klebstoffen läuft nach dem Mechanismus einer radikalischen Polymerisation ab (Abb. 26). Diese Reaktion wird durch Sauerstoff inhibiert, indem TEGMA-Radikale durch Sauerstoff abgefangen werden und so reaktionsträge TEGMA-Peroxid-Radikale gebildet werden. In diesem Zustand liegt der Klebstoff im Gebinde des Herstellers vor. Wird er dann verarbeitet und so eine Zufuhr von Sauerstoff unterbunden, treten die Härterkomponenten in Aktion, ein komplexes System aus Radikalbildner (z. B. Cumolhydroperoxid), Beschleuniger (z. B.

N,N-Dimethyl-p-toluidin) und Saccharin, das als Metallkomplexbildner und Reduktionsmittel für Metallionen dient. In einer Reaktion zwischen Saccharin und N,N-Dimethyl-p-toluidin (Abb. 27) wird der restliche im Klebstoff und in der Klebfuge vorhandene Sauerstoff verbraucht. Dabei entsteht ein Aminoal. Dieses wiederum löst Metallionen von der Fügeiteiloberfläche, reduziert diese zu einer niedrigeren Oxidationsstufe, die ihrerseits den Zerfall des Radikalbildners in aktive Radikale katalysiert. Diese Reaktion ist eine Teilreaktion des gesamten Härtungsmechanismus anaerober Klebstoffe (Abb. 27), dessen Schlüsselreagenz das Aminoal darstellt. Die aktivierten Radikale starten die

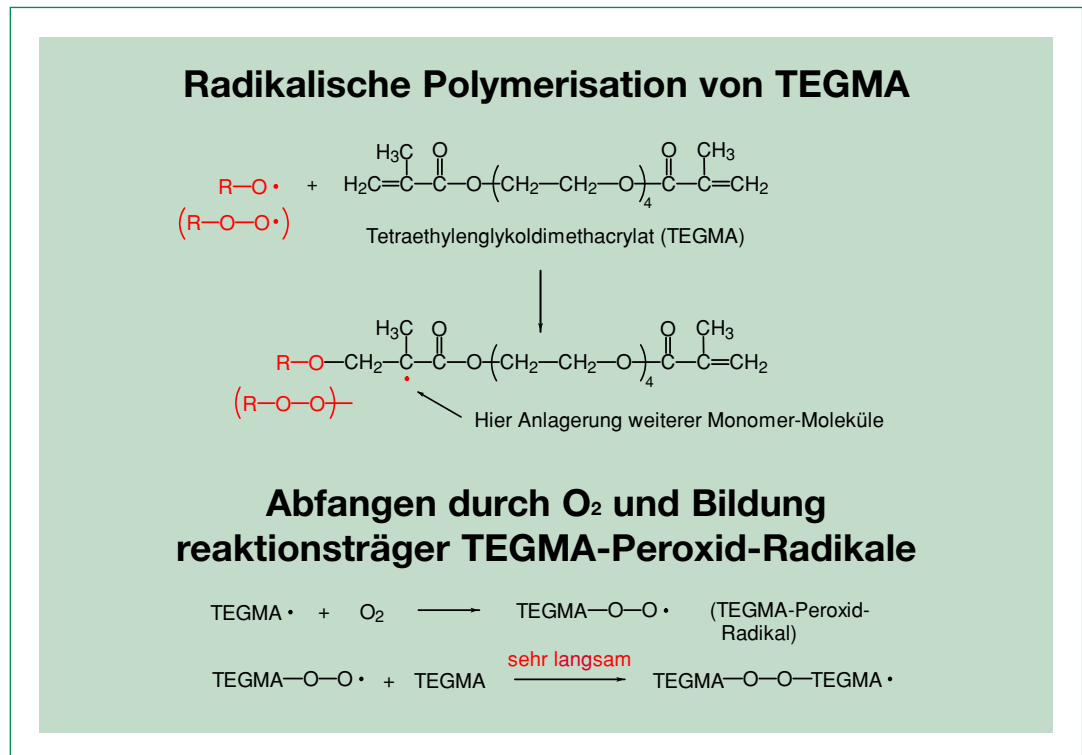


Abbildung 26  
Folie 16

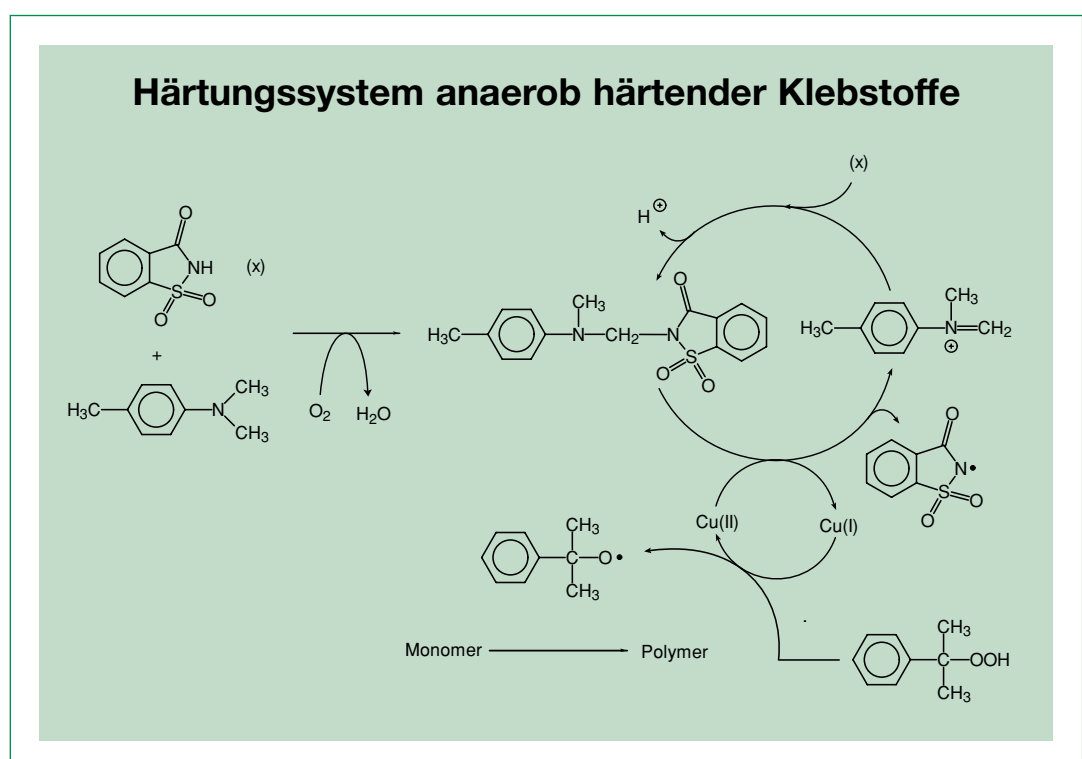


Abbildung 27  
Folie 17

Polymernetzenreaktion. Da die Reaktion als Kreisprozess abläuft, garantiert die stetige Regeneration des Aminals über die o. g. Reaktionsschritte eine hohe Zahl an aktiven Radikalen, wie sie für eine effektive Aushärtung des Klebstoffs in der Klebfuge notwendig ist. Anaerob ausgehärtete Klebstoffe sind Duomere und können demgemäß hohe und temperaturbeständige Festigkeiten erreichen. Die mit besonders hochfesten anaerob härtenden Klebstoffen verbundenen Fügepartner lassen sich erst bei Temperaturen von 300 bis 400 °C wieder auseinander bringen. Allerdings sind diese Klebverbindungen sehr spröde, so dass sie nicht für flexible Fügepartner geeignet sind. Eine Aushärtung erfolgt ausschließlich im gefügten Bereich. Es wird nur eine relativ geringe Spaltbreitenüberbrückung (maximaler Klebspalt: ca. 0,1 mm) erzielt. Anaerob härtenden Klebstoffen kommen neben ihrer fügen Aufgabe oft gleichzeitig Dichtfunktionen zu, da sie sehr beständig gegen Öle, Lösungsmittel und Feuchtigkeit sind. Aufgrund all dieser Eigenschaften wird diese Klebstoffart beim Einbau von Motoren im Fahrzeugbau eingesetzt. Weitere typische Anwendungsgebiete sind Schraubensicherungen und Kleben von rotationssymmetrischen Fügepartnern z. B. in Elektromotoren (Abb. 28).

Voraussetzung für ihren Einsatz: Mindestens eins der beteiligten Fügepartner muss lichtdurchlässig sein. Es gibt strahlenhärtbare Reaktionsklebstoffe auf der Basis von Polyurethanen, Polyestern, Polyethern, Siliconen u. a. Klebstoffe dieses Typs härten durch eine radikalische Polymerisation über die Acrylatendgruppen aus. Das Kettenwachstum wird durch eine UV/VIS-induzierte photochemische Primärreaktion über Photoinitiatoren gestartet. Beim Aushärtungsprozess dieser Klebstoffklasse ist nicht nur die erforderliche Wellenlänge des Lichtes zu beachten. Ein entscheidender Wert zur Erreichung einer optimalen Kohäsion ist die Strahlungs-dosis, die zur hinreichenden Vernetzung des Klebstoffs notwendig ist.

Ausgehärtete strahlenhärtbare Klebstoffe sind meistens Thermoplaste, gelegentlich aber auch Duomere. Der Grad der Vernetzung ist durch die eingesetzten Rohstoffe im Klebstoff einstellbar. Die Rohstoffauswahl bestimmt ebenfalls die Elastizität und die Verformbarkeit des ausgehärteten Klebstoffs. Mit strahlenhärtbaren Klebstoffen lassen sich Anfangszugscherfestigkeiten bis ca. 25 MPa erreichen, sie sind ausgelegt für eine Dauereinsatztemperatur von -30 °C bis max. 120 °C,

### Schrauben sichern mit anaeroben Klebstoffen



#### Schrauben sichern.

Die Schrauben eines Motorgehäuses werden gegen selbsttätiges Lösen gesichert. Bei Überschreiten eines bestimmten Losbrechmomentes kann die Schraube wieder gelöst werden.

Abbildung 28

### Strahlenhärtbare Klebstoffe

Bei diesen Klebstoffen handelt es sich um 1-K-Systeme, bei denen die Härtung durch Licht ausgelöst wird. Strahlenhärtbare Klebstoffe benötigen keine hohen Temperaturen, kein Lösungsmittel und keine besonders aufwendigen Apparaturen, um auszuhärten – bestimmte definierte Lichtwellen genügen. Die Härtungszeiten können im Bereich von 1 Sekunde bis zu einigen Minuten liegen.

kurzzeitig halten sie Temperaturen bis 180 °C stand. Strahlenhärtbare Klebstoffe werden vor allem zum Kleben von Glas (Optik, Glasdesign) benutzt (Abb. 29). Aber auch beim Fügen transparenter Kunststoffe sowie als flüssige Dichtung von Metall-/Kunststoffgehäusen werden diese Klebstoffe verwendet. Außerdem werden strahlenhärtbare Kunststoffe vermehrt in der Dentaltechnik eingesetzt (s. Seite 61).



## Glasdesign und Glasbau



Abbildung 29

### Polykondensationsklebstoffe

#### Phenolformaldehydharze

Phenolformaldehyd-Klebstoffe (kurz meist Phenolharze genannt) härten je nach Zusammensetzung bei Temperaturen im Bereich zwischen 100 und 140 °C aus. Die Basis dieses Reaktionsklebstoffs bildet ein unter alkalischen Bedingungen entstehendes Additionsprodukt von Formaldehyd mit Phenol: das so genannte Resol (Abb. 30). In dem zu applizierenden Klebstoff ist diese Reaktion schon abgelaufen.

Dieses Resol wird in der Klebfuge unter Abspaltung von Wasser zum Duromer ausgehärtet (Kondensationsreaktion) (Abb. 31). Da der Härtungsprozess Temperaturen auf jeden Fall über 100 °C fordert, liegt das abgespaltene Wasser gasförmig vor. Um nun ein Aufschäumen des Systems zu verhindern, werden Phenolharzklebstoffe unter Anpressdruck von bis zu 0,8 MPa ausgehärtet.

### Vorkondensation von Phenol mit Formaldehyd

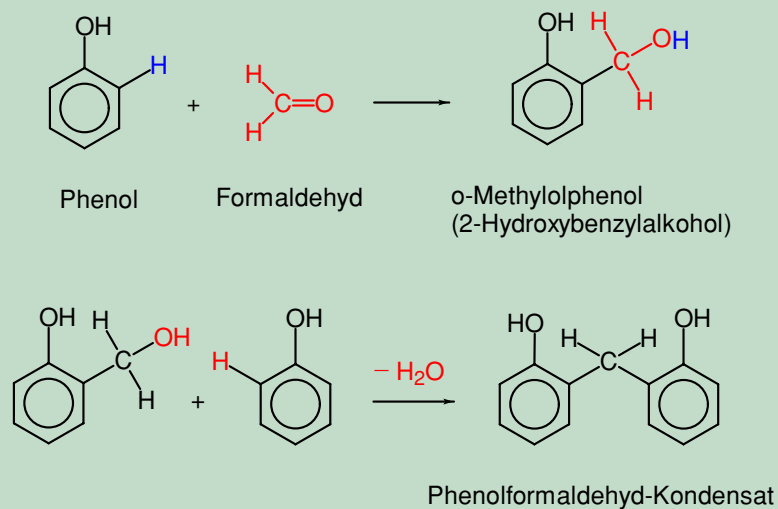


Abbildung 30  
Folie 18

## Aushärtereaktion des Phenolformaldehydharzes

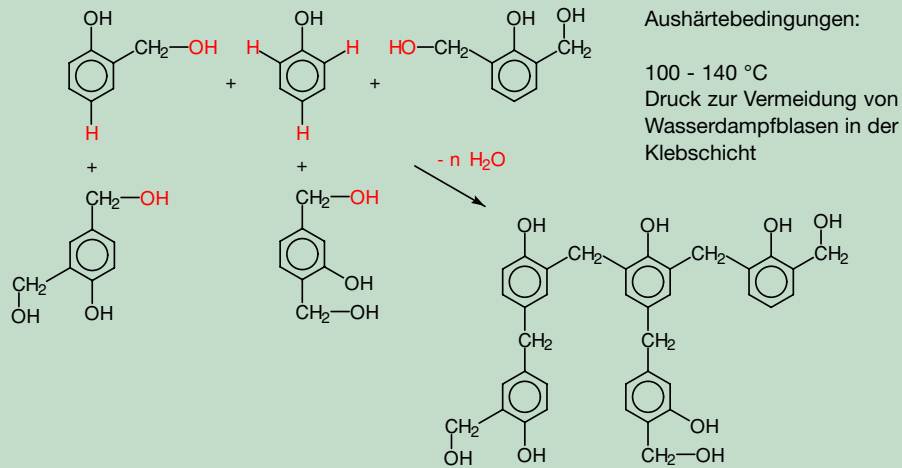


Abbildung 31  
Folie 19

Phenolharze in reiner Form sind sehr spröde und empfindlich gegen Schälbelastungen (s. *Glossar*), weswegen sie in den allermeisten Fällen mit elastizitätserhöhenden Zusätzen, z. B. Kunstkautschuk, versehen werden. Allgemein zeichnen sich modifizierte Phenolharzklebstoffe durch eine hohe Stabilität der Klebung und gute mechanische Eigenschaften aus. Auf oxidativ gebeizten Aluminiumoberflächen zeigen Phenolharze eine sehr gute Adhäsion und Langzeitbeständigkeit. Darüber hinaus weisen sie eine gute Temperaturbeständigkeit von bis ca. 250 °C auf. Neben Phenol als Ausgangsmonomer für die Formaldehydkondensation werden auch Phenolderivate wie z. B. Resorcin (m-Dihydroxybenzol) eingesetzt.

Resorcin-Formaldehydharze verfügen über einen höheren Vernetzungsgrad als andere Phenolharzklebstoffe und zeichnen sich aufgrund dessen durch eine größere Beständigkeit gegenüber Wasser und Witterungseinflüssen aus und werden vorwiegend für Holzkonstruktionen verwendet, die wasser- und witterungsbeständig sein müssen (Bootsleim).

Allgemein werden Phenolharze bevorzugt dort eingesetzt, wo es zu hohen Temperaturbelastungen in der Klebschicht kommt. Klassisches Beispiel ist das Kleben von Brems- und Kupplungsbelägen (Abb. 32). Typische Anwendungsgebiete dieser Klebstoffart findet man außerdem im Flugzeugbau (s. *Kapitel 3.4*),

## Bremsbeläge

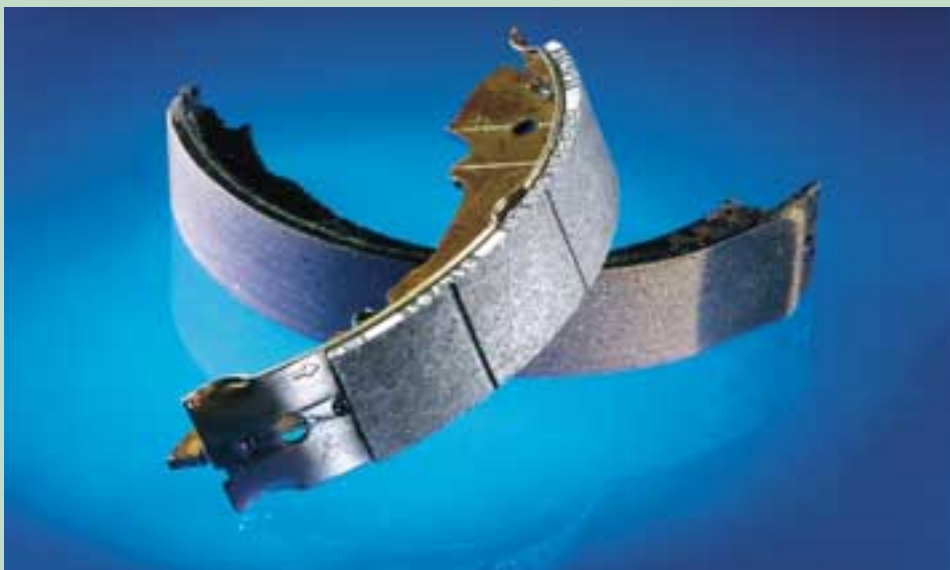


Abbildung 32

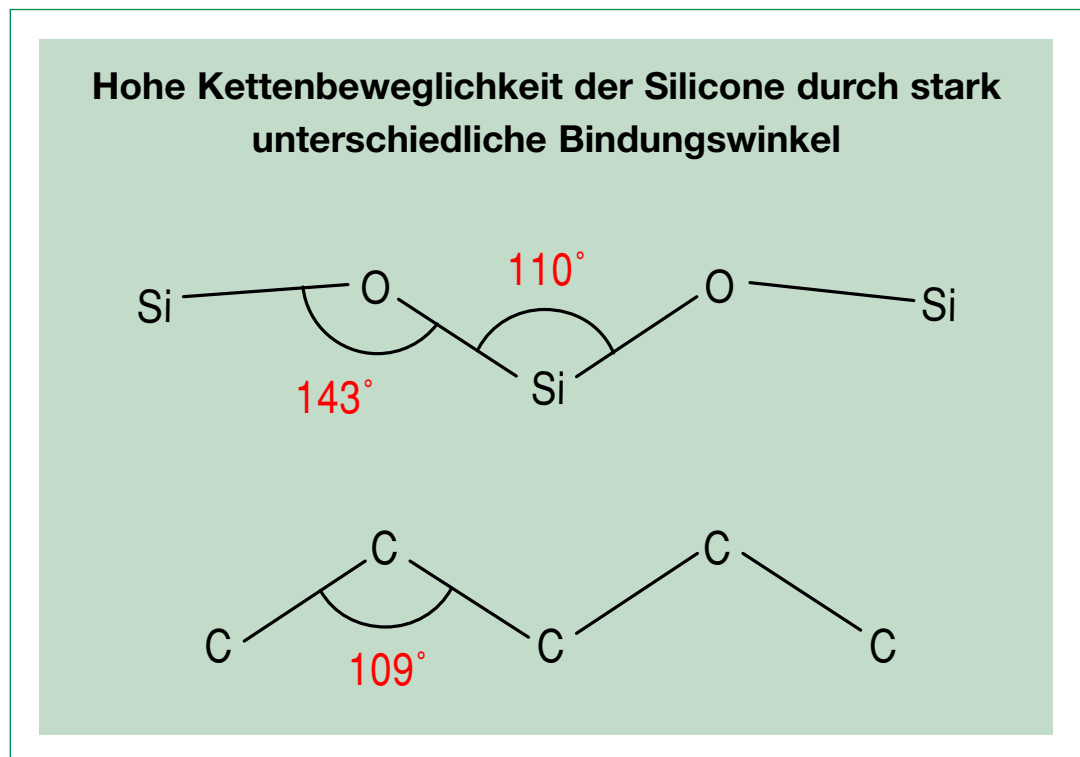
bei strukturellen Aluminiumklebungen sowie in der Möbelindustrie, die mengenmäßig den größten Verbrauch an Phenolharzen bei strukturellen Holzklebungen zu verzeichnen hat.

## Silicone

Innerhalb der „organischen“ Klebstoffe nehmen die Silicone eine Sonderstellung ein, da ihr Molekülgerüst aus Silicium- und Sauerstoff-Atomen besteht. Diese Tatsache beschert den Siliconen besondere Eigenschaften. Wie kein anderer organischer Klebstoff bleiben Silicone auch bei tiefen Temperaturen ( $-70$  bis  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) hoch elastisch und verändern dabei auch ihre sonstigen Eigenschaften nicht wesentlich. Der Grund für diese hohe Elastizität ist die hohe Kettenbeweglichkeit der Siliconpolymere. Die stark unterschiedlichen Bindungswinkel von Si-O-Si ( $143^{\circ}$ )- und O-Si-O ( $110^{\circ}$ )-Bindungen verhindern eine lineare Kettenstruktur und erschweren die Ausbildung von van-der-Waals-Kräften zwischen den Ketten (Abb. 33). Dadurch lassen sich

den Kohlenstoff oxidiert und so die Kette zerstört. Dieser Angriff ist bei Silicium-Sauerstoff-Ketten nicht möglich, da das Silicium bereits oxidiert vorliegt. Auch andere chemisch aggressive Substanzen können dieser Klebstoffart kaum schaden. Außerdem zeigen Silicone eine hervorragende Feuchtigkeits- und Witterungsbeständigkeit. Klebungen mit Siliconen sind allerdings mechanisch nur wenig belastbar (Anfangszugscherfestigkeiten meist unter  $1\text{ MPa}$ ), so dass sie hauptsächlich als Dichtmittel Verwendung finden. Wegen ihrer geringen Oberflächenspannung lassen sie sich in der Regel weder lackieren noch beschichten. Außerdem sind Silicone anfällig gegen Schimmelbefall. Für Metallklebungen werden sie dann eingesetzt, wenn die niedrigen Festigkeiten zu Gunsten höherer Flexibilität und Beständigkeit bei tiefen Temperaturen in Kauf genommen werden können.

Silicone werden als 1-K- und 2-K-Systeme angeboten. Beide Systeme härten durch Polykondensation aus, 1-K-Systeme mit Feuchtigkeit, 2-K-Systeme



die einzelnen Polymerketten gut gegeneinander verschieben – der Klebstoff ist elastisch.

Silicone zeichnen sich auch durch eine hohe Temperaturbeständigkeit aus ( $-100$  bis  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  Dauergebrauchstemperatur, kurzfristig bis  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ursache hierfür sind die höheren Bindungsenergien von Silicium-Sauerstoff-Bindungen (etwa  $370\text{ kJ/mol}$ ) im Vergleich zu Kohlenstoffbindungen (etwa  $350\text{ kJ/mol}$ ). Ein weiterer Vorteil der Silicium-Sauerstoff-Ketten gegenüber reinen Kohlenstoffbindungen zeigt sich in ihrer UV-Beständigkeit. Unter UV-Einfluss entsteht aus Luftsauerstoff partiell aktiver Sauerstoff (Radikal,  $\text{O}_3$ ), der die Kohlenstoffkette rein organischer Klebstoffe an Fehlstellen angreift,

durch Reaktion von Hydropolysiloxanen mit einem Kieselsäureester. Die Basis dieses Reaktionsklebstoffs bilden Polyorganosiloxane. Die freigesetzten Kondensate werden durch die Art des eingesetzten Härterers bestimmt. Bei sauren Härtern (Vernetzer) werden Säuren abgespalten, bei basischen Vernetzern Amine, bei neutralen Härtern Oxime oder Alkohol.

**1-K-Siliconklebstoffe** benötigen zum Aushärten je nach Spezifikation 5 bis 95 % relative Feuchtigkeit, um den chemischen Prozess der Vernetzung einzuleiten und zu beschleunigen. Bei dem gebrauchsfertigen Reaktionsklebstoff sind die endständigen Hydroxyl-Gruppen der Polydimethylsiloxane durch

Vernetzer blockiert (Abb. 34). Zur Vernetzung des Klebstoffs sind neben der Luftfeuchtigkeit Temperaturen im Bereich zwischen 5 und 40 °C notwendig, wobei sich die Siloxane durch Hydrolyse und anschließende Polykondensationsreaktionen vernetzen (Abb. 35). Die vollständige Vernetzung und Durchhärtung hängt von der Schichtdicke ab und kann mehrere Tage dauern, wobei sich die Aushärtung durch eine einsetzende Hautbildung zeigt. Bei einer Schichtdicke von wenigen Millimetern ist die Klebschicht in der Regel in 24 Stunden durchgehärtet. Die Anwendungsgebiete von 1-K-Siliconen unterscheiden sich nach den in

ihnen eingesetzten Härtern. Sauer vernetzende Systeme werden vor allem für feuchtigkeitsbeständige Klebungen von Glas und Keramik verwendet, z. B. bei Fugenabdichtungen im Sanitärbereich. Vor der Klebung von Metallen ist bei dieser Variante der Silicone die mögliche Gefahr einer Säurekorrosion, bei Kunststoffklebungen die Möglichkeit der Spannungsrisssbildung durch die entstehende Essigsäure zu prüfen. Für Klebungen und Dichtungen auf Beton, Putz, Mauerwerk und Metallen eignen sich vor allem alkalisch vernetzende Systeme, wobei allerdings eine Vergilbung durch die abgespaltenen Amine möglich ist. Dieses Problem tritt bei neutral

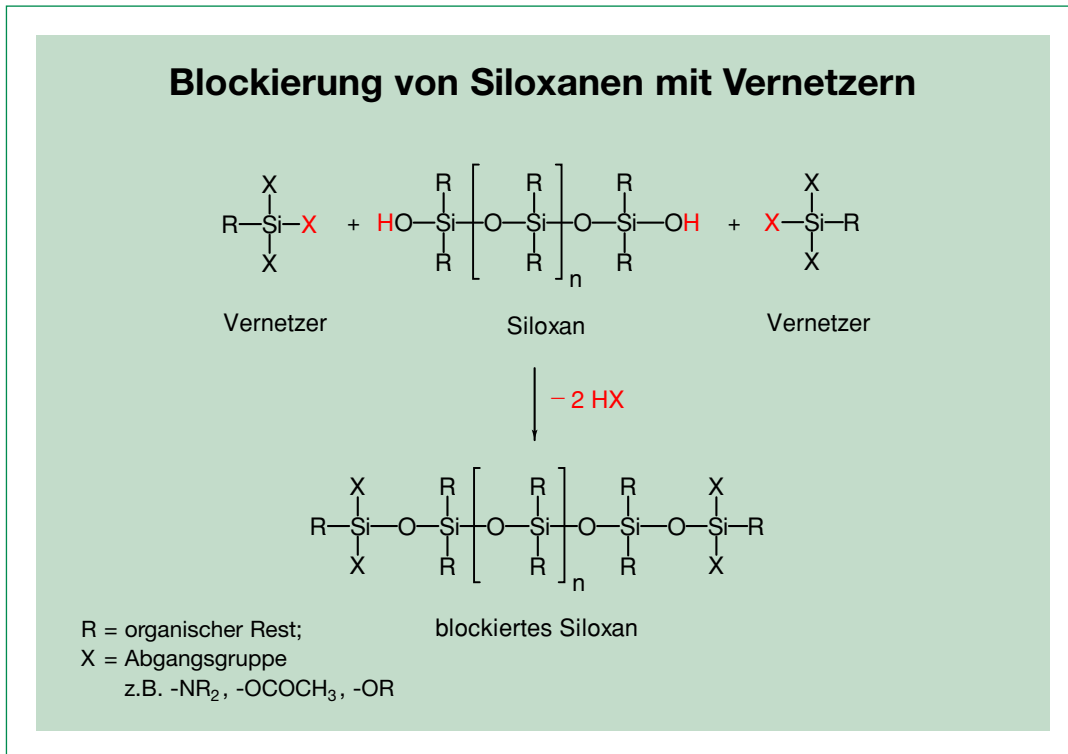


Abbildung 34  
Folie 20

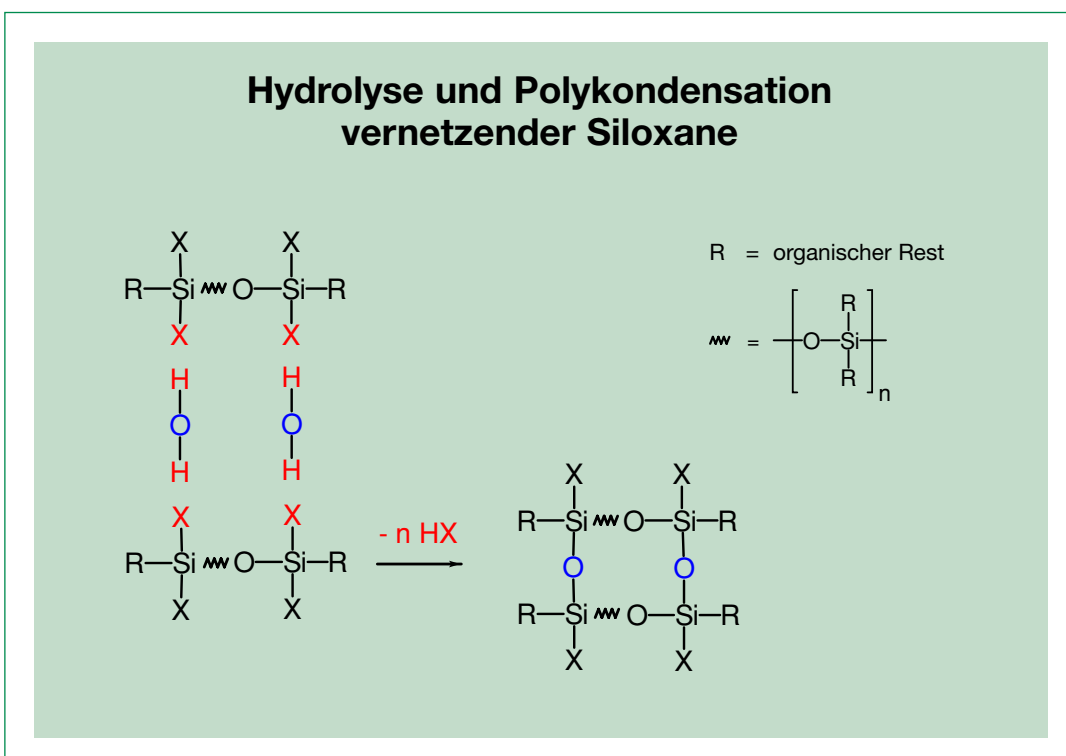


Abbildung 35  
Folie 21

vernetzenden Systemen nicht auf, die sich auch gut bei Klebungen mit Glas, Beton, Putz und Kunst- und Natursteinen verwenden lassen. Unter Alkohol- absplaltung vernetzende Systeme sind besonders für Metall-Kunststoffklebungen geeignet, wenn man Spannungsrisse vermeiden möchte. Allgemein reicht das Anwendungsspektrum von 1-K-Siliconklebstoffen vom Einsatz beim Fügen von Bügeleisen über den Automobilbau und die Elektrotechnik bis hin zu Spezialanwendungen in der Luft- und Raumfahrttechnik.

**2-K-Siliconklebstoffe** werden dagegen in der Massenproduktion z. B. in der Elektronik und der Elektroindustrie sowie in der Produktion von Hausgeräten und in der Automobilindustrie eingesetzt, wenn Klebschichtdicken von über 6 mm oder größere Klebflächen benötigt werden. Diese Variante des Siliconklebstoffs findet überall dort Verwendung, wo die vorhandene Luftfeuchtigkeit nicht ausreicht, um den Härtingsprozess vollständig ablaufen zu lassen. Die Basis dieser Siliconklebstoffvariante bilden Hydroxypolysiloxane, die mittels eines Kieselsäureesters und z. B. eines Zinn-Katalysators vernetzt werden (Abb. 36). Die Dauer

zugeführt wird und der Klebstoff dadurch frühzeitig aushärtet (s. Glossar, Topfzeit).

## Polyimide

Bei Polyimiden liegt eine Besonderheit vor. Obwohl sie eine linear unvernetzte Polymerstruktur besitzen und danach zu den Thermoplasten zu zählen sind, bilden sie einen schwer schmelzbaren und fast unlöslichen Stoff. Der Grund hierfür ist in der aromatischen und heterozyklischen Ringstruktur der Polymerbausteine zu suchen. Dieser komplexe Kettenaufbau schränkt die Beweglichkeit der Polymerketten selbst bei hohen Temperaturen stark ein. Die Anziehungskräfte zwischen den einzelnen Polymerketten können nur schwer aufgebrochen werden, und der Schmelzbereich verschiebt sich entscheidend nach oben. *Tabelle 6* soll den Einfluss der Molekülstruktur von Polymeren auf deren Schmelzbereich verdeutlichen.

Die Herstellung technischer Polyimide erfolgt durch Umsetzung der Anhydride 4-basischer Säuren, wie z. B. Pyromellithsäureanhydrid mit aromatischen Diaminen, wie z. B. Diaminodiphenyloxid (s. Abb.

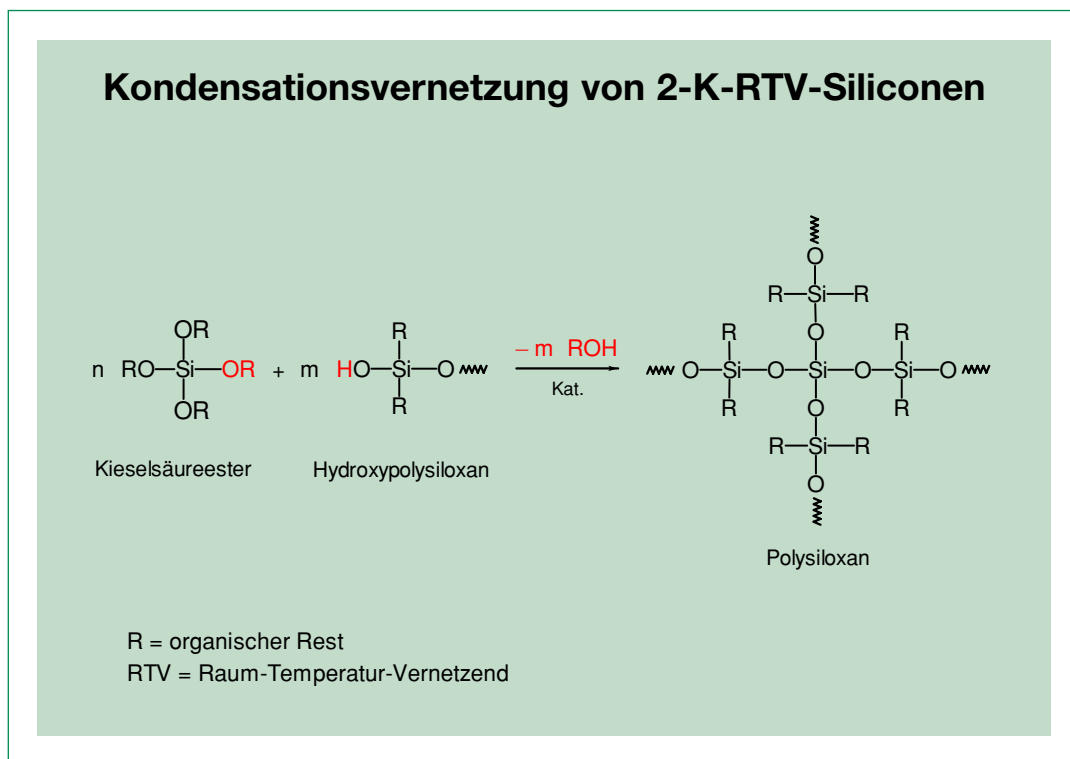


Abbildung 36

der Aushärtungsreaktion kann bis zu 24 Stunden in Anspruch nehmen, wobei dies vom pH-Wert, der Katalysatorkonzentration und den eingesetzten Grundstoffen abhängig ist. Während 1-K-Systeme mit gängigen Pumpen direkt aus dem Gebinde heraus verarbeitbar sind, müssen 2-K-Silicone zusammengegeben und gemischt werden. Bei diesem Vorgang muss mit großer Sorgfalt vorgegangen werden. Erstens darf keine Luft, die den Härtingsprozess behindern kann, in die Mischung „eingerührt“ und zweitens nicht zu schnell gerührt werden, damit dem System nicht zu viel Wärme

37). Als Zwischenprodukt entsteht durch Addition des aromatischen Amins an das Carbonsäureanhydrid unter Aufspaltung des Anhydridringes eine Polyamidocarbonsäure, die in polaren Lösungsmitteln löslich bzw. in Wasser dispergierbar ist. In dieser Form wird der Klebstoff appliziert und nach dem Fügen bei Temperaturen zwischen 230 und 350 °C und einem Anpressdruck zwischen 0,8 und 1 MPa in einem Autoklaven ausgehärtet. Spezielle Polyimide werden noch bis zu 16 Stunden bei 400 °C nachgehärtet.

## Einfluss der Molekülstruktur auf den Schmelzbereich

Molekülstruktur	Beispiel	Schmelzbereich in °C
lineares Kettenmolekül	Polyethylen	110 bis 130
Kettenmolekül mit kurzen Seitenketten	Polypropylen	160 bis 165
lineares Kettenmolekül mit Heteroatomen	Polyamid-6,6	220 bis 240
lineares Kettenmolekül mit aromatischen Ringstrukturen	Polyethylenterephthalat	250 bis 260
lineare aromatische Ringstruktur	Polysulfon	260 bis 320
lineare aromatische und heterocyclische Ringstruktur	Polyimid	380 bis 400

Tabelle 6

## Herstellung und Aushärtung der Polyimide

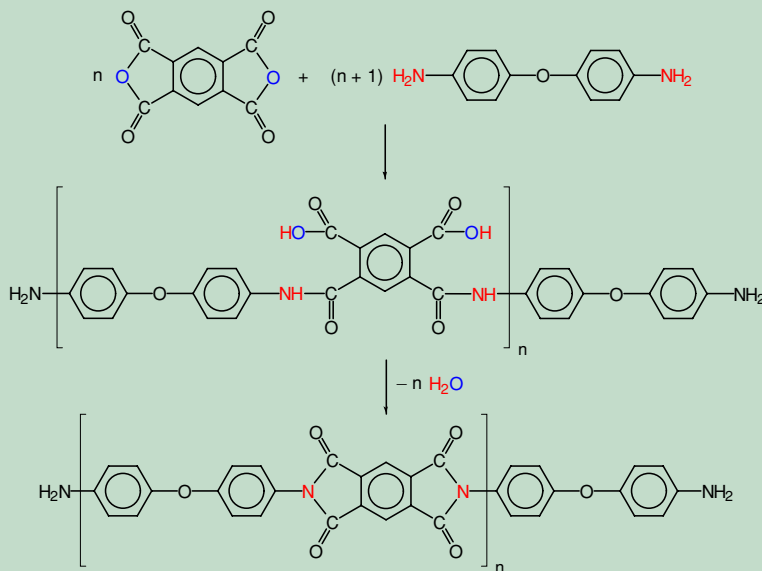


Abbildung 37  
Folie 22

1-K-Polyimide gehören zu der Klasse der hochtemperaturbeständigen Reaktionsklebstoffe. Sie halten einer Dauereinsatztemperatur bis ca. 320 °C stand, kurzzeitig kann die Temperatur sogar bis 500 °C ansteigen. Polyimide werden daher vorzugsweise für hochwertige und wärmebeständige Metallklebungen im Luft- und Raumfahrtbereich eingesetzt. Klebungen mit Polyimiden weisen eine hohe Klebfestigkeit bei geringer Flexibilität auf, sind allerdings feuchtigkeitsempfindlich.

### Polyadditionsklebstoffe

#### Epoxidharze

Die sehr verbreiteten Epoxidharze werden in unterschiedlichen Systemen angeboten: als heißhärtende 1-K, kalthärtende 2-K und als reaktive Schmelzklebstoffe. Hier werden die kalthärtenden 2-K-Epoxidharzsysteme vorgestellt. Die beiden Komponenten sind zum einen das Harz (Prepolymer auf der Basis von Bisphenol A) sowie



zum anderen der Härter (Polyamine oder Polyamidoamine). Diese Systeme härten über einige Stunden bis hin zu einigen Tagen bei Raumtemperatur aus (Abb. 38). Allerdings kann auch hier die Aushärtzeit durch eine Erwärmung verkürzt werden, was übrigens auch zu einer Steigerung von Festigkeit und Beständigkeit der Klebung führt. Die Aushärtung setzt sofort nach dem Zusammengeben und dem Vermischen der

1. der dem Klebstoff eigenen Aushärtungsgeschwindigkeit,
2. der Umgebungstemperatur,
3. der Ansatzmenge.

Den Reaktionsverlauf eines 2-K-Epoxidharz-Klebstoffs bei Raumtemperatur über die Zeit zeigt Abbildung 39.

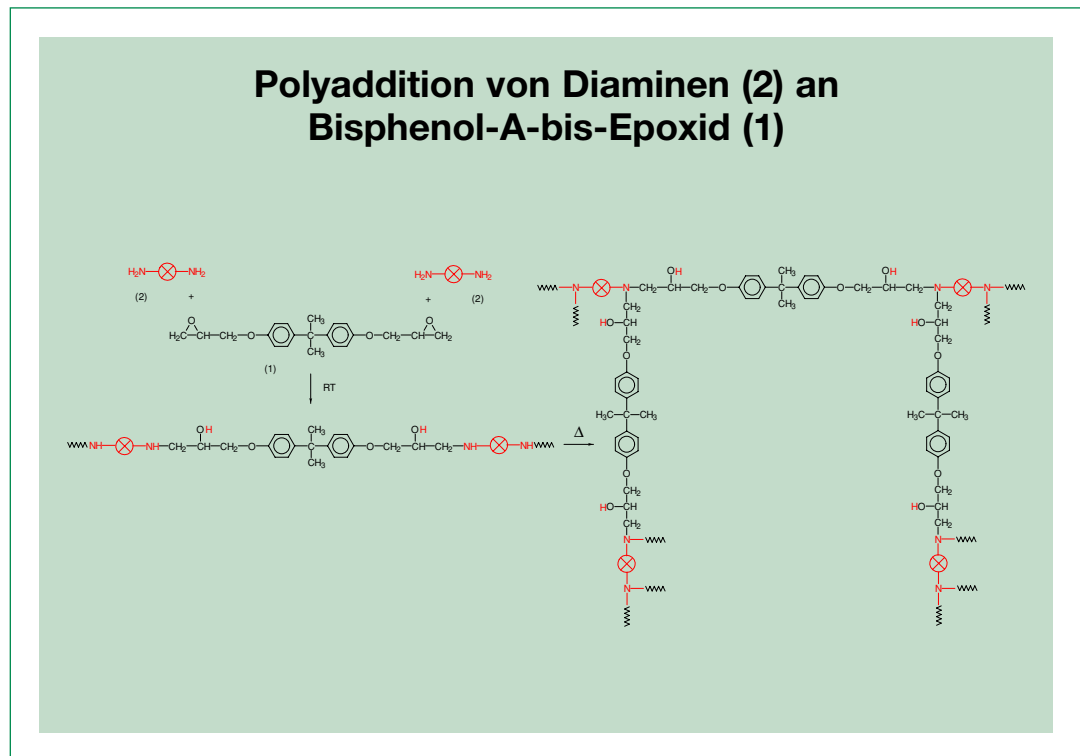


Abbildung 38  
Folie 23

Komponenten ein, wobei 2-K-Systeme jedoch relativ empfindlich gegenüber Mischungsfehlern sind. Ein wichtiger Begriff in der Klasse der 2-K-Reaktionsklebstoffe ist die so genannte „Topfzeit“ oder Gebrauchsdauer: Diese beschreibt die Zeitspanne, während der der Klebstoff nach dem Zusammengeben noch verarbeitet werden kann. Sie hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der die chemische Aushärtungsreaktion abläuft.

Die Topfzeit ist abgelaufen, wenn der Klebstoff zu zähflüssig geworden ist, um die Fügeteiloberfläche gut zu benetzen. Nach Ablauf der Topfzeit kann der Klebstoff nicht mehr verwendet werden, da sich Adhäsionskräfte nicht mehr optimal ausbilden können. Je höher die Temperatur, desto schneller laufen die Aushärtungsreaktionen ab, desto kürzer wird also die Topfzeit. Als Faustregel gilt hierbei, dass eine Temperaturveränderung von  $\pm 10^\circ\text{C}$  die angegebene Aushärtezeit halbiert bzw. verdoppelt (*Grundlage: Arrhenius-Gleichung*). Bei jeder Aushärtungsreaktion handelt es sich um einen exothermen Prozess. Bei großen Ansatzmengen kann die entstehende Wärme nicht so schnell wie bei kleineren Ansätzen an die Umgebung abgegeben werden. Der Ansatz kann sich sehr stark erhitzen, und die Topfzeit verringert sich. Die Topfzeit ist somit abhängig von

Am „Gelpunkt“ des Klebstoffs (Abb. 39) liegt ein Wendepunkt vor: Hier wird der inzwischen viskose Klebstoff endgültig zu einem Feststoff, der allerdings erst geraume Zeit später seine Endfestigkeit, bei der das System voll belastbar ist, erreichen wird. Erhöht man nun die Temperatur, wird die Endfestigkeit eher erreicht und liegt auf einem etwas höheren Niveau. Letzteres liegt daran, dass aufgrund der höheren Teilchenbeweglichkeit die Vernetzungsreaktionen begünstigter ablaufen können und eine höhere Vernetzungsdichte erreicht wird. Die Effekte sind bei tieferen Temperaturen umgekehrt. Dies kann so weit gehen, dass die Reaktionen für eine Aushärtung zu langsam sind. Systeme auf Epoxidharzbasis gehören zu den am meisten verbreiteten Konstruktionsklebstoffen. Ob im Fahrzeug- oder Flugzeugbau, auf dem Bausektor oder im Haushalt, überall trifft man auf die so genannten „Epoxy“-Klebstoffe. In der Mikroelektronik werden sie mit Zusätzen (Ag-Pulver) als elektrisch leitfähiger Klebstoff verwendet. Sie dienen auch als Matrixharz zum Kleben faserverstärkter Kunststoffe. Wird ihnen z. B. Aluminiumoxid-( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )-Pulver zugegeben, zeigen sie wärmeleitende Eigenschaften. Der große Vorteil von Epoxidharzen liegt darin, dass sie sich für Metallklebung eignen und darüber hinaus auch auf vielen Kunststoffen eine gute Haftung aufweisen. Allgemein besitzen sie eine sehr gute Beständigkeit gegen physikalische und chemische Einflüsse.

## Aushärtungsverlauf eines 2-K-Epoxidharzklebstoffs bei Raumtemperatur

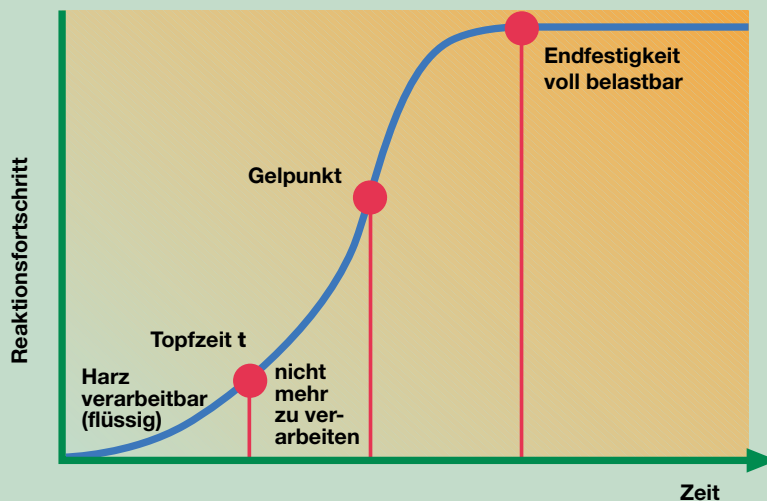


Abbildung 39  
Folie 24

Darüber hinaus zeichnen sie sich durch eine hohe Langzeitbeständigkeit aus, da sie nur eine geringe Neigung zum Kriechen zeigen. Je nach Typ halten sie einer Temperaturbelastung zwischen 100 °C und max. 200 °C auf Dauer stand. Alle Epoxidharze härten als Duromere aus, was ihre vergleichsweise geringe Flexibilität und hohen Festigkeiten erklärt. Mit speziellen heißhärtenden, hochfesten 1-K-Epoxidharzklebstoffen ist es sogar möglich, definiert beölte, nicht vorbehandelte Bleche strukturell, d. h. selbsttragend, zu kleben (Rohkarosseriebau), eine Einsatzweise der Klebtechnik, die – mit Ausnahme heißhärtender 1-K-Polyurethanklebstoffe – bis jetzt durch keinen anderen Klebstoff realisiert werden kann.

### Polyurethane

Wie bei den Epoxidharzen hat der Klebstoffanwender auch bei reaktiven Polyurethanklebstoffen die Auswahl zwischen unterschiedlichen Klebstoffsystemen: Polyurethanklebstoffe (PUR) gibt es als kalthärtende 2-K-Systeme, als heißhärtende 1-K-Systeme, als feuchtigkeitshärtende 1-K-Systeme, bei denen in einem ersten Aushärteschritt eine Polykondensationsreaktion abläuft und erst in einem zweiten Schritt eine Addition stattfindet, sowie als reaktive 1-K-PUR-Schmelzklebstoffe, bei denen eine Nachvernetzung durch Feuchtigkeit, Wärmezufuhr oder eine Kombination von beidem abläuft. Diese Systeme können zu Elastomeren oder zu Duromeren aushärten, wobei der Grad der Vernetzung und somit die Festigkeit durch die unterschiedlichen Rohstoffe bestimmt werden, die die Klebstoffsysteme enthalten.

Bei den **2-K-Systemen** wird die Verfestigung durch das Zusammengeben und das Vermischen der Komponenten Harz (Poly-Glykole oder PUR-Pre-

polymer mit endständigen Hydroxyl-Gruppen) und Härter (modifiziertes Isocyanat) in Gang gesetzt (Abb. 40, 41). Bei Raumtemperatur dauert die Aushärtung einige Stunden bis zu Tagen. Dieser Prozess kann allerdings durch Erwärmen beschleunigt werden, was auch die Festigkeit der Klebung steigert. Die Klebschicht von 2-K-Systemen ist je nach Rohstoffeinsatz nach der Aushärtung zähhart bis gummielastisch-flexibel.

Die **heißhärtenden 1-K-Systeme** bestehen aus PUR-Prepolymeren mit endständigen Hydroxyl-Gruppen und chemisch blockierten Isocyanat-Härtern. Die Isocyanat-Gruppen werden mit Phenol verkappt (Abb. 42). Es bilden sich Phenylcarbaminsäureester-Gruppen. Die zur Spaltung notwendige Temperatur kann durch Einsatz geeigneter Katalysatoren herabgesetzt werden. So kann z. B. bei einem dimeren TDI-Prepolymer (Desmodur TT) die Verkapppung bei 120 °C oder bei Zusatz eines Phosphinkatalysators schon bei Raumtemperatur aufgehoben werden. Heißhärtende 1-K-Systeme benötigen zum Verfestigen eine Temperatur von 100 bis 200 °C, wobei die Zeitspanne je nach Höhe der eingesetzten Temperatur zwischen einigen Minuten und bis zu einigen Stunden variiert. Die Klebschicht dieser PUR-Klebstoffe ist in der Regel zähhart und hochfest, aber doch elastisch. Bei heißhärtenden 1-K-PUR-Klebstoffen entweichen in der Wärme partiell gesundheitsgefährdende Isocyanatverbindungen aus dem System. Dieser Gefährdung muss mit geeigneten Lüftungstechnischen Maßnahmen begegnet werden.

Bei den **feuchtigkeitshärtenden 1-K-Systemen** handelt es sich um zähflüssige (viskose) Klebstoffe, die aus nicht flüchtigen PUR-Prepolymeren mit Isocyanat-Endgruppen bestehen. Als Auslöser für die Verfestigung des Klebstoffs benötigen diese Systeme Feuchtigkeit, wodurch das isocyanathalti-

## Bildung von Polyurethanen

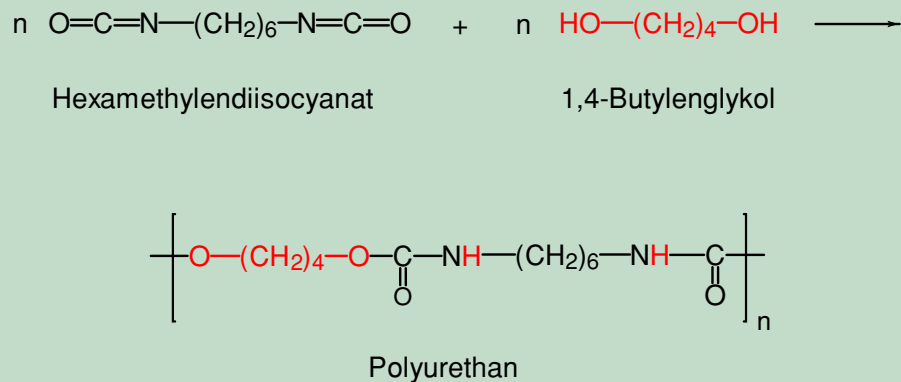


Abbildung 40  
Folie 25

## Isocyanate als Härter für 2-K-Systeme

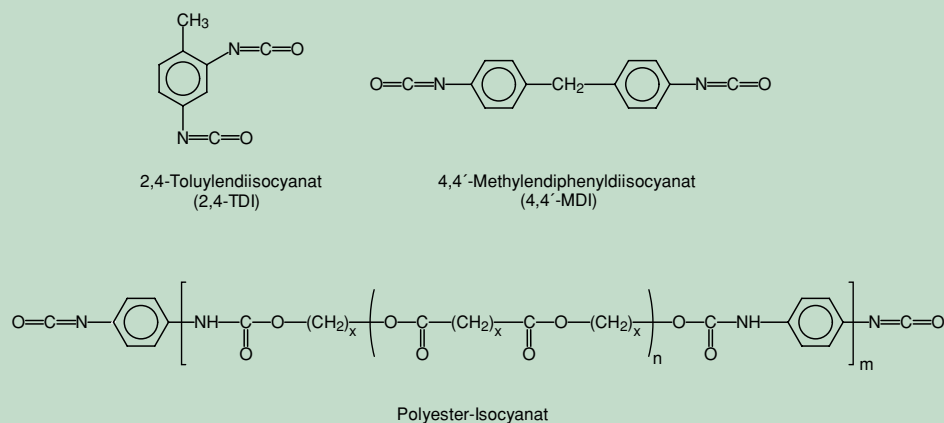
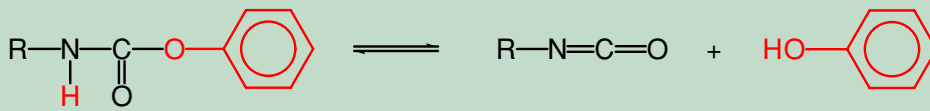


Abbildung 41

ge Prepolymer teilweise in Amine umgewandelt wird. Hierbei wird in geringen Mengen Kohlenstoffdioxid abgespalten, was den Klebvorgang allerdings nicht stört. Die Amin-Gruppen reagieren dann mit verbliebenen Isocyanat-Gruppen und härten so das Klebstoffsystem aus (Abb. 43). Diese Reaktion kann in einem Temperaturbereich von 5 bis 40 °C ablaufen, wobei eine relative Luftfeuchtigkeit von 40 bis 70 % notwendig ist. Allerdings sind auch so genannte „Booster-Systeme“ auf dem Markt, die mit einem feuchtigkeitshaltigen Gel arbeiten. Diese ermöglichen eine beschleunigte Aushärtung, die unabhängig vom Grad der vorhandenen Luft-

feuchtigkeit ist. Bei 1-K-Systemen setzt sich die feuchtigkeitsbedingte Durchhärtung der Klebschicht, die auf der Ausbildung von Harnstoffverbindungen beruht, von außen nach innen mit einer Geschwindigkeit von einigen Millimetern pro Tag fort. Bei der Verarbeitung dieser Klebstoffe ist die sog. Hautbildungszeit zu beachten, also die Zeit, in der sich der Klebstoff an seiner Oberfläche bereits verfestigt, d.h. eine „Haut“ gebildet hat und ein Benetzen des zweiten Fügeteils nicht mehr möglich ist. In solchen Fällen können keine adhäsiven Wechselwirkungen mehr entstehen. Nach der Aushärtung ist die Klebung gummielastisch-flexibel,

## Deblockierung eines Isocyanates in der Wärme



mit Phenol "verkapptes"  
Isocyanat

Abbildung 42

## Aktivierung des isocyanatgruppenhaltigen Prepolymers durch Feuchtigkeit

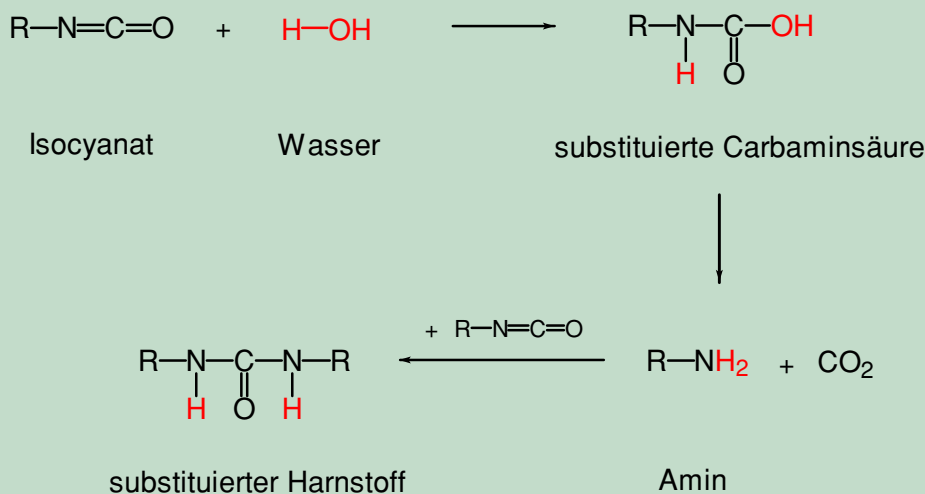


Abbildung 43  
Folie 26

weshalb feuchtigkeitshärtende 1-K-PUR-Systeme dort zum Einsatz kommen, wo Materialien mit stark unterschiedlichem Last- und Temperaturendeckungsverhalten verbunden werden müssen, etwa beim Kleben von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) auf Stahl oder von Wand- und Bodenplatten aus Aluminium auf Stahlträger. Abbildung 44 zeigt eine Hochgeschwindigkeitsfähre, deren Polycarbonatscheiben in die Schiffstruktur aus Aluminium mit diesen Klebstoffen eingeklebt wurden.

**Reaktive PUR-Schmelzklebstoffe** verfestigen sich durch eine Kombination von physikalischen

und chemischen Vorgängen (Abb. 45). Die chemische Nachvernetzung kann bei PUR-Schmelzklebstoffen durch den Einfluss von Wärme, Luftfeuchtigkeit oder von beidem ausgelöst werden. Feuchtigkeitsnachvernetzende Systeme bestehen aus höhermolekularen, schmelzbaren Polyurethanen mit endständigen Isocyanat-Gruppen, die durch Feuchtigkeit aktiviert werden können. Wärmenachvernetzende Systeme werden dagegen mit blockierten Isocyanaten ausgestattet, die durch Wärmezufuhr freigesetzt werden. Reaktive PUR-Schmelzklebstoffe härten als Elastomere aus und haben dementsprechend gummielastisch-

plastische Klebschichteigenschaften. Selbst auf beöhlten Blechen (Karosseriebau), einer Oberfläche also, die den meisten anderen Klebstoffen eine Adhäsion unmöglich machen würde, haften die reaktiven PUR-Schmelzklebstoffe gut. Reaktive PUR-Schmelzklebstoffe haben den großen Vorteil, nur eine sehr niedrige Auftragstemperatur von 50 bis 100 °C zu benötigen, wohingegen reguläre Schmelzklebstoffe erst in einem Temperaturbereich von 120 bis 240 °C verarbeitet werden können. Bei der Verarbeitung ist dieser PUR-Klebstoff demgemäß thermoplastisch. Bei der Abkühlung baut sich schnell eine Anfangsfestigkeit auf, so dass die

Fügeteile zur Weiterverarbeitung rasch fixiert sind. Die Endfestigkeit wird erst später erreicht.

Die Verbundeigenschaften der Polyurethane unterscheiden sich entsprechend ihrem Vernetzungsgrad im ausgehärteten Zustand. Mit gummielastisch-flexiblen Systemen ist eine sehr hohe elastische Verformbarkeit erzielbar, die mit einer maximalen Bruchdehnung von über 600 % nur noch von den Siliconen (s. Seite 38, *Silicone*) übertroffen wird. Diese Klebstoffe erlauben dicke Klebschichten und sind beschichtbar. Ihre geringen Zugscherfestigkeiten von unter 6 MPa werden konstruktiv über große



Abbildung 44

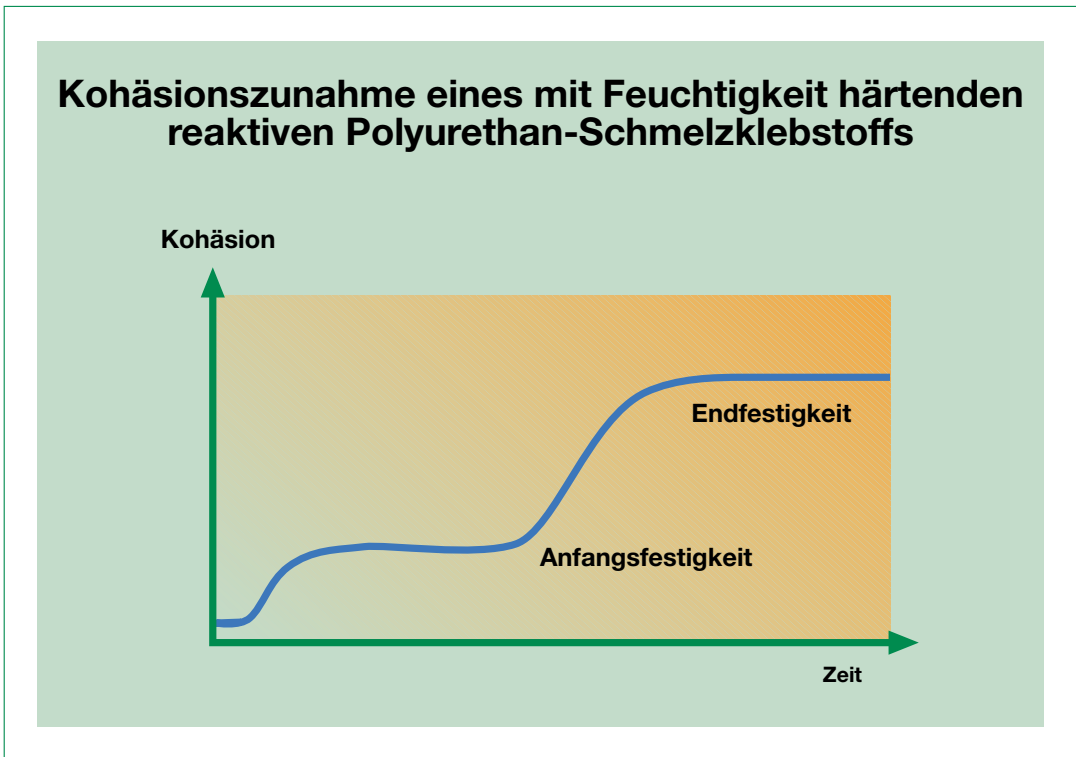


Abbildung 45



Klebflächen ausgeglichen. Gegen Feuchtigkeitseinflüsse und UV-Strahlen werden sie geschützt. Dauergebrauchstemperaturen in einer Bandbreite von ca. -40 bis 100 °C sind kein Problem.

### Ausblick

Die dargestellte Vielfalt der Klebstoffe wird noch dadurch erhöht, dass die Eigenschaften der unterschiedlichen Klebstoffarten durch Modifikationen in jeder Substanzklasse variiert werden können. Sogar Klebstoffe mit verschiedenen Härtungsmechanismen werden kombiniert, wie etwa reaktive Schmelzklebstoffe, die in einem ersten Schritt wie gewöhnliche thermoplastische Schmelzklebstoffe aufgebracht und anschließend über chemische Reaktionen zu Elastomeren oder Duromeren vernetzt werden. Gleiches gilt für reaktive Dispersionsklebstoffe, reaktive Haftklebebänder und UV-härtende Cyanacrylate, die im ersten Schritt über Feuchtigkeit zu Thermoplasten aushärten, im zweiten Schritt mit UV-Strahlen zu Duromeren vernetzen. Diese Entwicklungen deuten an, dass die Grenzen zwischen den einzelnen Klebstoffklassen zu fließen beginnen. Die Entwicklung wird geprägt von neuen Anforderungen, etwa an die Temperaturbeständigkeit oder an zusätzliche Funktionen (elektrische Leitfähigkeit, Elastizität etc.), die neue Applikationen eröffnen. Bei all diesen steigenden Anforderungen geht die Entwicklung in der Klebstofftechnologie heute immer mehr weg von den Lösungsmittelklebstoffen hin zu lösungsmittelfreien Systemen. Wie auch bei allen anderen Kunststoffen wird die Emission von Gefahrstoffen kontinuierlich reduziert.

## 2.3 Basis von klebgerechtem Konstruieren

Bei der Klebtechnik handelt es sich um ein systemisches Fügeverfahren, das auf einer Vielzahl ineinander greifender Prozesse beruht. Grundlegende Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit einer Klebung ist neben den Eigenschaften der Klebschicht, des Fügeteilwerkstoffs und der Beanspruchung auch die geometrische Gestaltung. Fehler in geklebten Konstruktionen treten häufig auf, weil wesentliche Grundregeln einer klebgerechten Konstruktion vernachlässigt werden. Bereits in der Konstruktionsphase eines Bauteils sind die speziellen Zusammenhänge zu berücksichtigen. Die prinzipielle Anforderung an eine Klebung besteht darin, Kräfte zu übertragen und die durch diese Belastungen auftretenden Spannungen dauerhaft auszuhalten. Für die konstruktive Gestaltung von Klebungen sind dazu auf der Basis einer langzeitbeständigen, d.h. insbesondere feuchtigkeitsresistenten Haftung zwei wichtige Voraussetzungen zu erfüllen: zum einen das Vorhandensein ausreichender Klebflächen, zum anderen Maßnahmen zur Vermeidung von Spannungsspitzen in der Klebung bei mechanischer Beanspruchung.

Klebungen können im Wesentlichen

- (a) Schälbeanspruchungen,
- (b) Schub-Scherbeanspruchungen,
- (c) Zug-Scherbeanspruchungen,
- (d) Zugbeanspruchungen,
- (e) Druckbeanspruchungen sowie
- (f) Torsionsbeanspruchungen

ausgesetzt sein (Abb. 46).

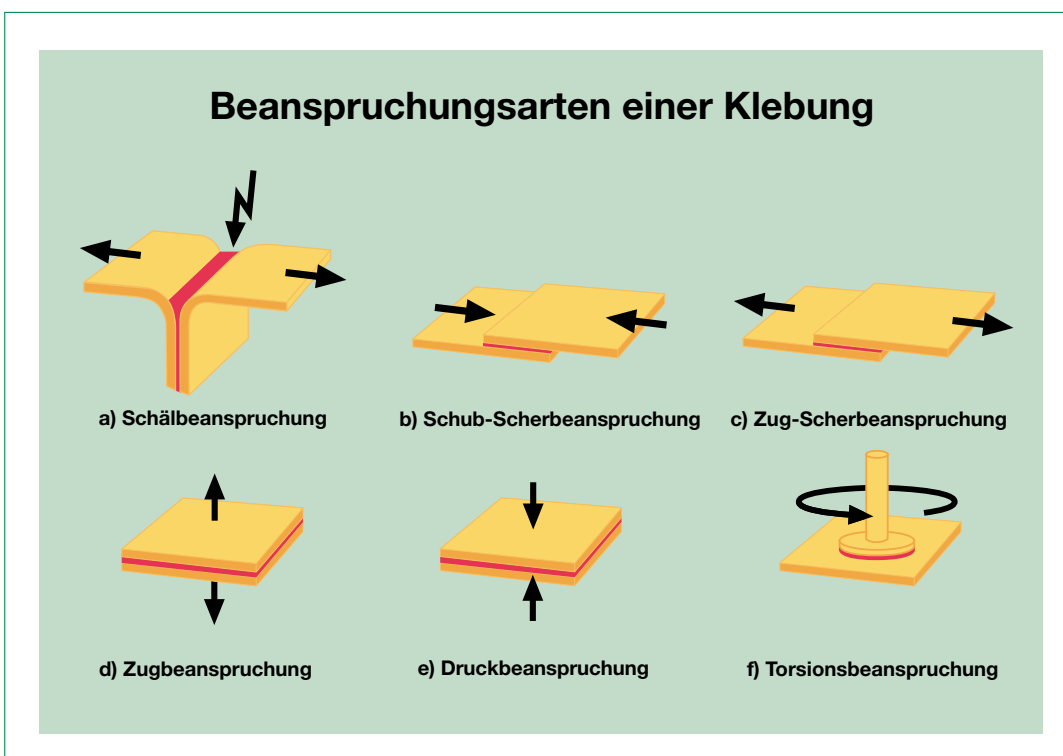


Abbildung 46  
Folie 27



Schälbeanspruchungen führen zu einer nahezu linienförmigen, hohen Beanspruchung des Klebstoffs in der Klebfuge, die häufig die Endfestigkeit der meisten Klebstoffe um ein Vielfaches übersteigt.

Als flächiges Fügeverfahren muss die Klebtechnik ihre Verbindungen auf Scher- bzw. Schubbeanspruchungen auslegen. Die Fügeile werden parallel zur Klebfläche auseinander gezogen, so dass hier die gesamte Klebfläche beansprucht wird. In der Regel lassen sich Klebverbindungen durch eine entsprechende Vergrößerung der Klebfläche so dimensionieren, dass die Beanspruchungen flächig verteilt werden können und somit die punktuellen Bruchlasten nicht übersteigen.

Zugbeanspruchungen wirken senkrecht zur Fügeebene. Sie werden konstruktiv nur in Ausnahmefällen berücksichtigt, da Klebflächenvergrößerungen zur Erhöhung der mechanischen Belastbarkeit, wie sie bei schubbeanspruchten Klebungen vergleichsweise einfach möglich sind, häufig nicht realisiert werden können.

Gegenüber Druckbeanspruchungen sind Klebverbindungen unempfindlich.

Das Verhalten von Klebverbindungen auf Torsionsbeanspruchungen ist vergleichbar mit dem auf eine Scher- bzw. Schubbeanspruchung.

## 2.4 Prüfung von Klebverbindungen

Die Wahl des Prüfverfahrens richtet sich nach den Eigenschaften der zu prüfenden Klebverbindung. Klebfestigkeiten werden mit dem Zugscherversuch, Schälwiderstände mit dem Rollen- bzw. Winkelschälversuch und das Adhäsionsverhalten z. B. mit dem Keiltest ermittelt. Um Aussagen über die Langzeitbeständigkeit von Klebungen zu erhalten, werden die Klebproben in mögliche Umgebungsbedingungen ausgelagert (feuchtwarme Klimaauslagerung, Schwitzwassertest, Salzsprühtest, Kataplasma, Klimawechseltest) und einer anschließenden mechanischen Prüfung unterzogen.

Bei den mechanischen Prüfungen werden die Klebverbindungen bis zum Bruch belastet. Die Art des auftretenden Bruches wie Adhäsionsbruch, Kohäsionsbruch, Fügeilebruch oder eine Kombination der Brucharten gibt Aufschluss über die Qualität der Klebung oder liefert Hinweise hinsichtlich potenzieller Fertigungsfehler. Bei ausgelagerten Proben liefert der Kohäsionsbruch die Aussage, dass trotz der auf die Klebung einwirkenden Einflüsse (etwa Feuchtigkeit) die Adhäsion stabil geblieben ist. Adhäsionsbrüche dagegen zeigen, dass die Klebung an ihrer sensibelsten Stelle versagt hat. Sie können auf prinzipielle Inkompatibilitäten zwischen Werkstoff und Klebstoff, Oberflächenbehandlungs- und/oder Verarbeitungsfehler hindeuten. Verarbeitungsfehler können sein

- Topfzeit/Hautbildezeit überschritten
- Oberfläche zu kalt
- Klebstoff zu kalt
- Klebstoff überlagert
- Mischungsfehler

### Zugscherversuch nach DIN EN 1465

Der Zugscherversuch ist der am weitesten verbreitete Standardprüfversuch zur Festigkeitsermittlung mittelfester und hochfester Klebungen. Die Klebfestigkeit einschnittig überlappter Klebverbindungen bei Beanspruchung der Fügeile wird durch Zugscherkräfte in Richtung der Klebfläche ermittelt. Die normentsprechende Überlappung entspricht einer Breite von 25 mm und einer Länge von 12,5 mm. Jede Probe ist einzeln auszumessen und wird so in die sich selbst ausrichtenden Einspannklemmen der Zugprüfmaschine eingespannt, dass eine mittlere Krafteinleitung in die Klebschicht sichergestellt ist (Abb. 47).

Der Normversuch wird mit einer gleich bleibenden Geschwindigkeit der ziehenden Einspannklemmen so durchgeführt, dass bis zum Trennen der Fügeile eine Zeitspanne von  $65 \pm 20$  s eingehalten wird. Die auftretende Höchstkraft  $F_{max}$  ist dann am Kraftanzeiger abzulesen und zu protokollieren. Die Klebfestigkeit  $\tau_B$  in  $N/mm^2 = MPa$  wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\tau_B = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{L_{\ddot{U}} \cdot b}$$

- $F_{max}$  = Höchstkraft in N
- $L_{\ddot{U}}$  = Überlappungslänge in mm
- $b$  = mittlere Probenbreite in mm
- $A$  = Klebfläche in mm

### Keiltest nach DIN 65448

Der Keiltest ist eines der ganz wenigen Prüfverfahren, das es erlaubt, die Qualität einer Klebung unter gleichzeitiger Einwirkung von mechanischer, medialer und chemischer Beanspruchung zu testen. Zur Durchführung des Keiltests werden zwei unter Fertigungsbedingungen vorbehandelte Bleche vorgeschriebener Dicke miteinander verklebt. In die Klebung wird ein Keil getrieben. Der nach dem Eintreiben des Keils in der Klebschicht auftretende Riss wird an seinem Ende markiert. Anschließend wird der so vorbereitete Probekörper in einem feuchtwarmen Prüfklima (z. B. 75 min bei 50 °C und 95 % rel. Feuchte) oder in Wasser ausgelagert. Die durch das Aufkeilen unter Spannung stehende Klebung reißt ggf. unter der Keilbelastung weiter. Nach der Auslagerung wird der Rissfortschritt markiert und gemessen, die Klebfläche getrennt und die Bruchfläche beurteilt. Der Vorteil dieser Versuchsdurchführung gegenüber dem Zugscherversuch liegt in der Möglichkeit einer relativ schnellen Ergebnisfindung sowie einer direkten Einwirkung der Alterungsmedien auf die unter mechanischer Belastung stehende Klebschicht (Abb. 48).

## Zugscherversuch

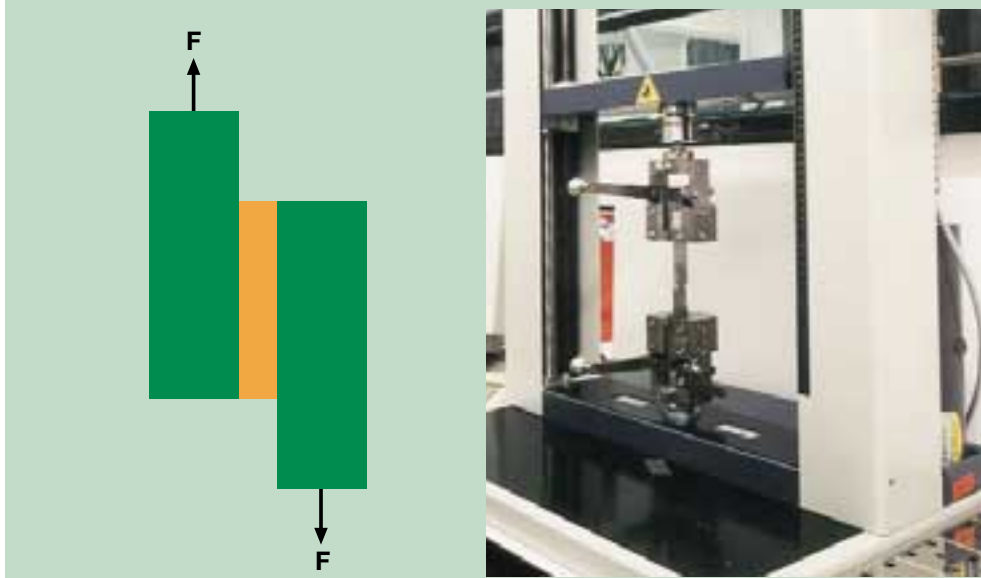


Abbildung 47  
Folie 28

## Keiltest

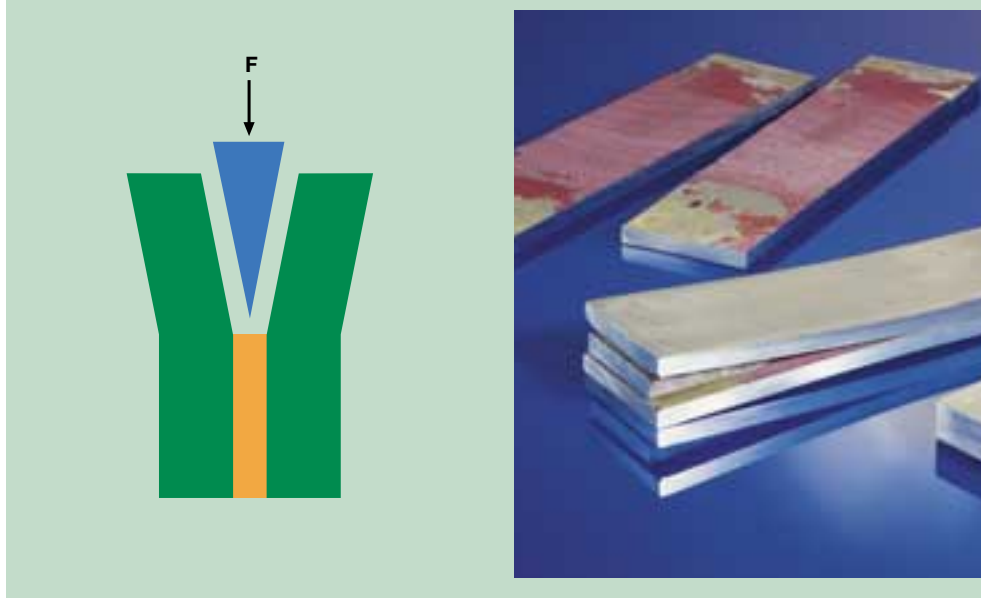


Abbildung 48

## Schälversuch

Schälversuche ermitteln den Widerstand von Klebverbindungen gegen abschälende Kräfte. Sie werden vorwiegend zur vergleichenden Beurteilung von Klebstoffen und Oberflächenbehandlungsmethoden genutzt, da sie Unterschiede im Adhäsions- und Kohäsionsverhalten der Klebschichten mit großer Empfindlichkeit anzuzeigen vermögen. Für diese Versuche werden Proben an ihren nicht geklebten Schenkeln durch Zugkräfte so lange

beansprucht, bis die Klebschicht reißt und beide Probenhälften voneinander getrennt sind. Die dazu erforderliche Kraft wird bei gleichzeitiger Messung der Längenänderung zwischen den Einspannköpfen registriert. Als Ergebnis des Schälversuchs erhält man ein Schälendiagramm. Das Bruchbild liefert Aussagen über die Stabilität der Adhäsion (Abb. 49).

## Schälversuch

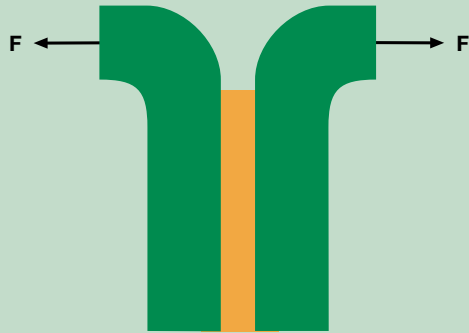


Abbildung 49

## 3 Beispiele fortschrittlicher Klebtechnik

### 3.1 Holzklebung

In der Holzverarbeitung und speziell im Möbelbau haben Polyvinylacetat-Dispersionsleime den Tischlerleim auf der Basis tierischer Eiweiße schon vor mehreren Jahrzehnten abgelöst, und Kondensationsharze (Harnstoff-, Melamin-, Phenol- und Resorcin-Formaldehydharze) haben die Entwicklung neuer Holzwerkstoffe von der Sperrholzplatte über die Spanplatte bis zu Holzlaminatträgern (Resorcin/Phenol-Formaldehydharze) für den Gebäudebau ermöglicht (Abb. 50). Melamin-Formaldehydharze werden in Verbindung mit Spezialpapieren insbesondere eingesetzt zur Herstellung von dekorativen Schichtpressstoffplatten für die Laminierung von Holz im Möbelbau. Polyurethanklebstoffe, aushärtend durch die Einwirkung von Feuchtigkeit, sind heute für die Herstellung von Spanplatten von wachsender Bedeutung als formaldehydfreie Alternative zu den o. g. Polykondensationsharzen; darüber hinaus nutzt man sie in

zunehmendem Maße für die Klebung von Holzbauteilen. Wie in vielen Bereichen der Technik besteht auch bei den Klebstoffen für Holz die Tendenz zu 100%-Systemen; sie verbinden einfache Anwendung mit rascher Aushärtung. Heißschmelzklebstoffe haben sich hier insbesondere bewährt als Montageklebstoffe und zum Kleben dekorativer Kantenabdeckungen. PUR-Schmelzklebstoffe, die durch die Einwirkung von Feuchtigkeit härten, werden stark zunehmend für konstruktive Holzklebungen und Kombinationsklebungen von Holz mit verschiedenartigen Werkstoffen eingesetzt. Dieser Klebstoff-Typ vereinigt zwei unterschiedliche Mechanismen der Verfestigung: Durch die Erstarrung des Schmelzklebstoffs bei der Abkühlung werden die Teile rasch fixiert, anschließend führt die chemische Aushärtung, verbunden mit einer Molekülvernetzung, zu einer hohen Belastbarkeit der Klebungen (s. Seite 46).

#### Dachkonstruktion aus Holzlaminatträgern



Abbildung 50

### 3.2 Blechklebung im Karosseriebau

Autokarosserien werden überwiegend aus Stahlblechen der Dicke 0,6 bis 0,8 mm zusammengefügt. Die Weiterentwicklung der Karosserien ist gekennzeichnet durch den nicht nur modischen Trend nach flacherer Gestaltung mit einem möglichst geringen Windwiderstand, niedrigem Gewicht und daher sparsamem Treibstoffverbrauch. Flächige Bauteile,

wie z. B. Motor- und Kofferraumhauben, aber auch Tür- und Dachbleche werden mit stegartigen Blechverstreben fest verbunden und dadurch versteift. Das gebräuchlichste Verfahren des Zusammenfügens derartiger Karosseriebauteile, das Punktschweißen, kann man unter den flächigen Sichtseiten nicht anwenden, weil dies zu störenden

Einzügen führen und aufwendige Nacharbeit (Spachteln) erfordern würde. Daher begann man vor etwa 40 Jahren damit, die Teile zusammenzukleben und den Anteil der Schweißpunkte auf wenige Fixierungen im Randbereich zu reduzieren. Das Kleben musste in den vom Fließband vorgegebenen Fertigungsablauf eingefügt werden (Abb. 51). Die Forderungen des Automobilkarosseriebaus an die strukturelle Klebtechnik sind extrem: Spezielle Oberflächenvorbearbeitungen der Bleche, die als

180 bis 230 °C härtend) sind so formuliert, dass sie im ungehärteten Zustand bis zu 20 Gewichtsprozent des Öls durch Lösen in sich aufnehmen können. Zwar wird in der Praxis beim Auftragen des Klebstoffs so viel Öl verdrängt, dass eine sofortige erste Haftung des Klebstoffs weitgehend sichergestellt ist, die verbleibende Ölmenge wird jedoch vom Klebstoff aufgenommen und in den Klebstofffilm eingebaut.



Abbildung 51  
Folie 29

unabdingbar für eine hohe Festigkeit und Beständigkeit der Klebungen gelten, sind im Rahmen von Großserien nicht möglich. Mehr noch: Die Fügeteile sind darüber hinaus während des Fertigungsprozesses auch noch mit Korrosionsschutzölen überzogen. Diese können erst vor der Endveredelung entfernt werden.

Wesentliche Punkte eines Anforderungsprofils an Klebstoffe, die im Karosserierohbau eingesetzt werden sollen, sind:

- strukturelle Klebungen mit definierten Eigenschaften über die Lebensdauer des Bauteils unter Betriebsbeanspruchung,
- Stabilität bei 170 bis 230 °C über ca. 30 Minuten während der Lackierprozesse,
- Ablauffestigkeit und Auswaschbeständigkeit im ungehärteten Zustand,
- automatische Verarbeitbarkeit,
- Durchschweißbarkeit für Punktschweißungen als Rissstopper.

Nur von heißhärtbaren Klebstoffen sind die oben erwähnten Anforderungen zu erfüllen. Die für diese Anwendungen speziell entwickelten Klebstoffe (bei

Die hohen Temperaturen beschleunigen die Lösungsvorgänge im Klebstoff. Das Öl ist schließlich im ausgehärteten Klebstofffilm nahezu gleichmäßig verteilt und diffundiert nicht wieder an die Oberfläche.

Crashversuche verdeutlichen, dass durch das Kleben die Schwingfestigkeit und die Energieabsorption, auch nach Alterungseinflüssen, im Vergleich zu ausschließlich punktgeschweißten Konstruktionen deutlich verbessert werden konnte. Stand der Technik ist heutzutage die Kombination des Klebens mit dem Punktschweißen, das so genannte Punktschweißkleben, welches im Karosseriebau in großem Maße angewandt wird.

Für die Blechklebung im Karosserierohbau werden eingesetzt: Plastisolklebstoffe, im Wesentlichen füllstoffhaltige Pasten aus pulverförmigem PVC, Weichmachern und Haftvermittlern, für Spezialanwendungen aber auch einkomponentige heißhärtbare Epoxidharzklebstoffe.

Anwendungsbeispiele: Versteifungen und Bördelnähte an Motor- und Kofferraumhauben, Türen, Dachkonstruktionen.



### 3.3 Glasscheiben-Einklebung im Karosseriebau, Direct Glazing

Die Glasscheiben werden im Automobilbau nach der Lackierung der Karosserie eingebaut. Front- und Heckscheiben wurden früher über ein Profil auf Elastomerbasis, das die Scheibe umgab, in die Karosserie eingesetzt, wobei eine schnurförmige, klebrige Elastomer-Dichtmasse zur Verstärkung der Dichtwirkung eingebracht wurde.

Seit dem Beginn der 70er Jahre hat sich das so genannte Direct Glazing immer mehr durchgesetzt (Abb. 52). Dazu verwendet man mit Feuchtigkeit

härtende 1-K-Polyurethanklebstoffe und – alternativ dazu – MS-Polymere (modifizierte Siloxane). Vorteile dieser Technik sind, neben einer exzellenten Abdichtung: die Verwendung größerer Scheiben und die Senkung des Gewichts der Karosserie, da die Glasscheibe über den zu einem Elastomeren aushärtenden Klebstoff zum Konstruktionswerkstoff wird, die Steifigkeit der Konstruktion verstärkt und so die Verwendung dünnerer Bleche gestattet.



Abbildung 52

### 3.4 Leichtbauweise im Flugzeug-, Schienenfahrzeug- und Containerbau

#### Flugzeugbau

Seit mehreren Jahrzehnten gehört das Kleben zu den wichtigsten Fügeverfahren im Flugzeugbau. Es ist durch besondere Merkmale gekennzeichnet wie z. B. Betriebszeiten von bis zu 30 Jahren, hohe dynamische und mediale Belastungen, extreme, teilweise sehr kurzzeitige Temperaturwechselbeanspruchungen von Tieftemperaturen im Stratosphärenbereich bis zu Wüstenklimata.

Der Einsatz der Klebtechnik im Flugzeugbau ermöglicht eine extreme Leichtbauweise durch den konsequenten Einsatz von Leichtmetalllegierungen, faserverstärkten Kunststoffen und sog. Sandwichbauteilen. Geklebt wird sowohl im Innenbereich bei der Herstellung von Strukturen mit Leichtbau-Wabenplatten (Abb. 53) als auch bei der Herstellung hoch beanspruchter Fügeverbindungen, sog. „primary structures“, wie z. B. bei Außen-

blechversteifungen verschiedener geometrischer Abmessungen, bei Sandwichstrukturen aus Aluminium- oder Kunststoffwaben mit aufgeklebten Beplankungen oder Blechpaketklebungen. Als Beispiel hierfür mag das Airbus-Seitenleitwerk dienen. Es besteht aus einem Aluminium-Fachwerkrahmen und einer Beplankung aus carbonfaserverstärktem Epoxidharz-Kunststoff (CFK). Die Einzelteile der Beplankung werden vorgehärtet und das ganze Bauteil dann in einer Vorrichtung in einem Autoklaven geklebt.

Zum Kleben der Blech- und Sandwichbauteile werden im Flugzeugbau hauptsächlich Epoxidharzklebstoffe, insbesondere als vorgefertigte Filme mit einer Aushärtungstemperatur von mindestens 120 °C eingesetzt. Die erzielbaren Zugscherfestigkeiten liegen bei etwa 20 MPa (statisch) und 1 MPa



(dynamisch). Ein Angriff von Schälkräften wird durch die Wahl der Konstruktionen vermieden, zur Sicherheit wird jedoch ein Schälwiderstand von etwa 4 N/mm angestrebt.

### Schienefahrzeugbau

Im Schienenfahrzeugbau haben neue Bauelemente, z. B. auf der Basis von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), zu einer enormen Gewichtsersparnis, aber auch zu einer Rationalisierung des Fertigungsverfahrens geführt. Im Regio Shuttle der Fa. ADtranz (Abb. 54) wird eine Fachwerkbauweise benutzt, die aus Zug- und Druckstreben in Drei-

ecksanordnung besteht und damit die leichteste Bauweise für tragende Strukturen darstellt. Aufgrund der Fachwerkbauweise müssen keine Bleche aufgeschweißt werden, die Schubspannungen aufnehmen. In den Streben entstehen nur Zug- und Druckkräfte. Um das Fachwerk zu schließen, werden großflächige Außenhautelemente auf die tragende metallische Struktur mit feuchtigkeitsvernetzenden 1-K-Polyurethanklebstoffen aufgeklebt. Somit entfallen in der Fertigung die aufwändigen Richt- und Spachtelarbeiten, wie sie bei aufgeschweißten metallischen Außenhautelementen auftreten. Die verwendeten GFK-Außenhautele-



Abbildung 53  
Folie 30



Abbildung 54

mente ermöglichen als Sandwichplatten eine gute thermische Isolation und weisen sehr gute akustische Eigenschaften auf. Da kein Hitzeverzug wie beim Schweißen auftritt, geben die Außenbekleidungsstücke dem Fahrzeug eine fertig lackierte, plane, glatte und bündige Außenfläche ohne zusätzlichen Aufwand.

Diese Kombination von metallischer Struktur und Faserverbundkunststoff-Bauteilen ist nur durch Kleben wirtschaftlich und sicher realisierbar. Um die unterschiedlichen thermischen Längenänderungen von Struktur und Bekleidung auszugleichen, wird eine hoch elastische Dickschichtklebung eingesetzt. Die Klebungen zeichnen sich durch zufriedenstellend hohe Festigkeiten auch bei Dauerschwingungen im Bereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $80^{\circ}\text{C}$  und schlagartiger Beanspruchung aus. Darüber hinaus besitzen sie eine sehr gute Beständigkeit gegen Alterung, auch in feuchter Umgebung. Die Dicke der Klebfugen bewegt sich zwischen 4 und 18 mm. Sie hängt von der Größe der Teile ab, die bis zu 8,5 Meter lang sein können und dann den Klebspalt durch sehr hohe Schubverformungen belasten. Vorteilhaft an der Konstruktion ist darüber hinaus

der hohe Dämpfungsbeitrag für die dynamischen Laufeigenschaften und den Fahrkomfort.

Im Ergebnis ist der Regio Shuttle etwa 25 % leichter als das leichteste vergleichbare herkömmliche Fahrzeug, und das mit besserer Fahrkultur, geringeren Fertigungskosten und reduziertem Energieverbrauch im Betrieb.

### Containerbau

Im Container- und Kühlcontainerbau werden in großem Umfang Sandwich-Paneele verwendet. Man verbindet dabei Kernmaterialien, z.B. Kunststoffschäume, Mineral- oder Wabenplatten mit Deckplatten aus Aluminium oder GFK. Hierfür werden nieder- bis mittelviskose Epoxidharzklebstoffe eingesetzt, womit man auch die konfektionierten Paneele klebt. In steigendem Maße verwendet man neuerdings auch hier die bereits erwähnten MS-Polymere. Sie weisen eine gute Haftung ohne vorherige Anwendung eines Primers auch an lackierten Oberflächen auf und sind wegen ihrer guten elastischen Eigenschaften und ihrer hohen UV-Stabilität universell anwendbar (Abb. 55).



Abbildung 55  
Folie 31

## 3.5 Elektronik/Elektrotechnik

### Elektronische Schaltungen

Die rasche Entwicklung der Elektronik ist von Anfang an gekennzeichnet durch eine fortschreitende Verkleinerung der Bauteile und eine immer größer werdende Komplexität der Schaltungen. Die fortschreitende Miniaturisierung führte nicht nur zu immer kleineren, sondern auch zu hitzeempfindlicheren Bauteilen. Zudem wurde es aus Kostengründen notwendig, die Bestückung der Leiterplatten zu rationalisieren. Bei der Lösung der dadurch entstan-

denen Aufgaben war eine fortschrittliche Klebtechnik gefordert. Klebstoffe übernahmen vielfältige Aufgaben bei der Montage elektronischer Schaltungen, neben der mechanischen Befestigung auch Funktionen als elektrische Leiter und Isolierungen. In großem Umfang werden heute elektronische Bauteile in ihrer vorgesehenen Position vor dem Lötens mit Klebstoffen fixiert (Abb. 56).

## Punktförmiger Klebstoffauftrag auf einer Leiterplatte



Abbildung 56  
Folie 32

Verwendet werden einkomponentige pastöse Epoxidharzklebstoffe, die anschließend in 3 Minuten bei 120°C abbinden, in geringerem Umfang aber auch Acrylatklebstoffe, die durch UV-Licht vorgehärtet werden, um ein rasches Fixieren zu bewirken; ihre Endfestigkeit erreichen sie anschließend durch Wärmeeinwirkung.

Elektrisch leitfähige Klebstoffe sind üblicherweise Epoxidharzklebstoffe mit einem besonders geringen Gehalt an ionischen Verunreinigungen, in kleinerem Umfang werden aber auch spezielle Polyimidklebstoffe eingesetzt. In beiden Fällen enthalten

diese Klebstoffe 70 bis 80 Gewichtsprozent hochfeinen Silberpulvers. Sie werden eingesetzt, wenn die Teile wegen ihrer Hitzeempfindlichkeit, insbesondere bei Reparaturen, nicht gelötet werden können. Ferner erlangen bei steigenden Anforderungen an das Wärmemanagement der Schaltungen wärmeleitende Klebstoffe, z. B. mit einem hohen Gehalt an Aluminiumoxid, zunehmende Bedeutung.

### Digital Versatile Disc (DVD) – Herstellung

Im Unterschied zur Compact Disc (CD) ist die DVD eine Sandwich-Konstruktion, das heißt, jede DVD ist ein gebundener Körper, dabei sind verschiedene

## Kleben von Digital Versatile Discs (DVD)



Abbildung 57

Ausführungen mit Informationen auf einer oder auf beiden Seiten möglich. Für das Zusammenfügen der DVD-Konstruktionen verwendet man UV-härtende Acrylatklebstoffe, die unter UV-Licht in wenigen Sekunden abbinden und neben hoher optischer Reinheit eine sehr gute Langzeitbeständigkeit in feuchtwarmer Umgebung aufweisen. Daneben gewinnen spezielle Heißschmelzklebstoffe auf der Basis thermoplastischer Elastomere zunehmend an Bedeutung (Abb. 57).

### Elektromotoren

Eine Vielzahl elektrischer Geräte, von der Küchenmaschine über den CD-Player bis zur Videokamera, wird mit Elektromotoren ausgerüstet. Man verlangt von diesen in großen Serien hergestellten Motoren präzisen Gleichlauf und lange Lebensdauer. Beim Zusammenbau sind Klebstoffe heute unverzichtbar z. B. zur Verbindung von Läufer und Welle, von Kollektor und Welle, zur Kugellagerbefestigung und auch als Schraubensicherung. Eingesetzt werden bevorzugt anaerob, d.h. unter Ausschluss von Luft-sauerstoff härtende Acrylatklebstoffe (anaerob härtende Klebstoffe) (Abb. 58).

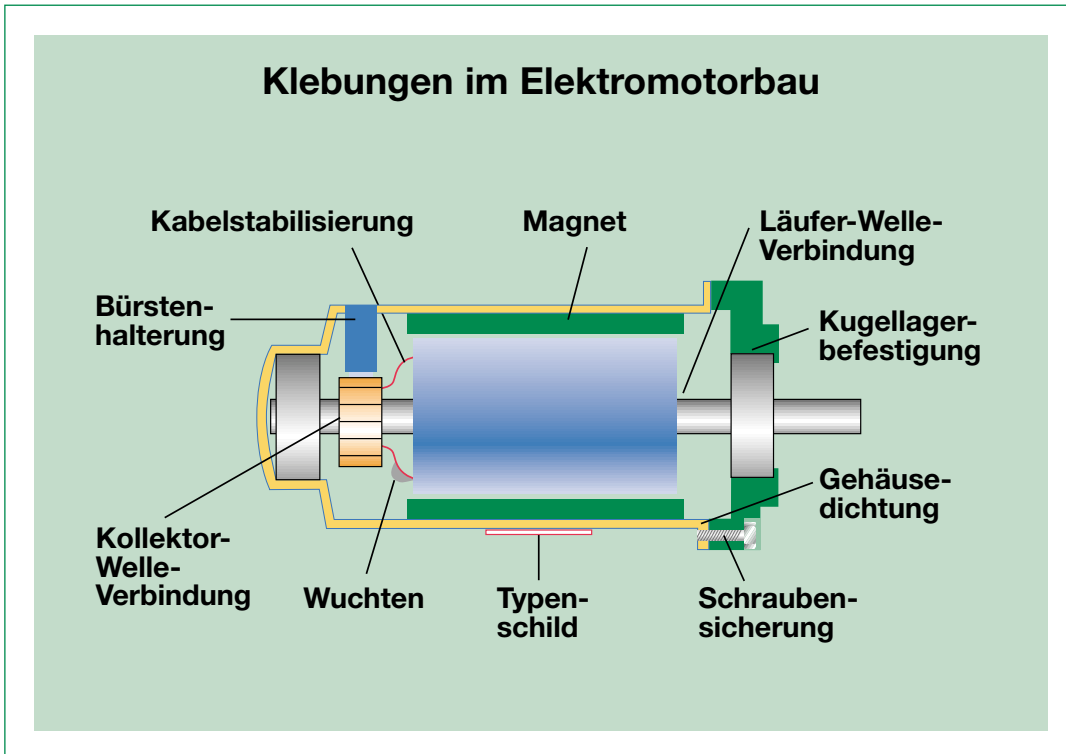


Abbildung 58  
Folie 33

### 3.6 Verpackungsklebstoffe

Ein außerordentlich hoher Anteil aller industriell hergestellten Produkte kommt, sei es wegen der geforderten Stabilität gegen die Bedingungen bei Lagerung und Transport, aber auch aus optischen Gründen, nur verpackt in den Handel. Das verwendete Verpackungsmaterial besteht heute nur noch selten wie bei normalen Briefumschlägen oder Papiertüten lediglich aus einer einzigen Materiallage, sondern wird meistens aus verschiedenen miteinander verbundenen Materialien hergestellt (Abb. 59).

Durch Laminieren mit Papier, insbesondere Hochglanzpapier, ist es möglich, den Werkstoff Karton in ansprechender Weise mit Produktinformationen zu versehen und ihm ein werbewirksames Aussehen zu verleihen. Klebstoffe hierfür basieren auf Stärke, Dextrin und Glutin, aber auch auf Polyvinylacetat-Dispersionen.

Wichtige Anforderungen an überdruckte Verpackungen, speziell an die vielfältigen Verpackungen für Lebensmittel, sind Festigkeitsverhalten, Tempe-

raturbeständigkeit, Undurchlässigkeit für Feuchtigkeit, Sauerstoff und Aromen. Diese wie auch die Brillanz des Aussehens lassen sich meist nur durch die Kombination verschiedener Materialien erfüllen. Laminiert werden Filme und Folien aus Polyester (PETP, PBTP), Polyamiden, Polyethylen, Polypropylen, Cellophan, Papier, Polyvinylchlorid, Polyvinylidenfluorid, Polyimiden, Aluminium und einigen anderen Werkstoffen. Häufig werden auch metallisierte Folien eingesetzt. Für die Folienlaminiierung verwendet man lösungsmittelhaltige Klebstoffe auf Polyurethanbasis; die neuere Entwicklung führt allerdings hin zu lösungsmittelfreien Systemen, entweder so genannten High-solid-Produkten oder zu Klebstoffen auf der Grundlage wässriger Polyurethandispersionen. An die Gleichmäßigkeit der Klebstoff-Eigenschaften, speziell an die Viskositätsstabilität, werden hohe Anforderungen beim Einsatz in Verpackungsautomaten gestellt. Zum Verschließen von Verpackungen (z. B. Faltschachteln, Paketen) verwendet man Dispersionsleime und Heißschmelzklebstoffe.



## Folienlaminierung: Fertigprodukte



Abbildung 59

### 3.7 Klebstoffe in der Medizin

Der Einsatz von Klebstoffen in der Medizin beschränkte sich lange Zeit auf die Herstellung selbstklebend ausgerüsteter Verbandsmaterialien (Wundpflaster, selbstklebende Textilstreifen etc.) (Abb. 60). Die ersten hierfür eingesetzten Haftklebstoffe basierten auf Naturkautschuk. Dieser wurde später teilweise abgelöst durch synthetische Kautschuke (z. B. Polyisopren, Polyisobutylen). In der Mitte des 20. Jahrhunderts erhielten Haftklebstoffe auf der Grundlage von Polyacrylsäureestern

eine stark wachsende Bedeutung, sowohl generell als auch auf dem Gebiet der Verbandsmaterialien.

Heute werden Klebstoffe in der Medizin auf verschiedenen Gebieten eingesetzt mit dem Ziel, traditionelle Techniken durch schonendere Verfahren zu ersetzen. So können in manchen Fällen, statt zu nähen, spezielle Cyanacrylatklebstoffe zum raschen Verschließen von Hautverletzungen verwendet werden. Vorteilhaft ist hier die Abdeckung

## Beispiele selbstklebender Verbandsmaterialien



Abbildung 60

der gesamten Verletzung, wodurch Nachbluten und Infektionsgefahr weitgehend unterdrückt werden können. Normalerweise wird hierzu der Cyanacrylsäurebutylester dem Methyl- und dem Ethylester vorgezogen wegen seiner langsameren Aushärtung in Verbindung mit geringerer Wärmeentwicklung bei der Polymerisation; daneben verursacht er eine geringere Gewebereizung. Grundsätzlich kommt der Einsatz dieses Klebstoffs aber nur bei verhältnismäßig kleinen Wunden und gelegentlich in der Gefäßchirurgie in Betracht. Für die Herzgefäßchirurgie ist Fibrin, hergestellt aus Fibrinogen, einem löslichen aus Blut gewonnenen Protein, ein wichtiges Dichtungsmittel mit hämostatischer Wirkung. Im Vergleich zu Cyanacrylaten ist Fibrin gewebeverträglicher, muss allerdings vor der Anwendung einer besonderen Behandlung unterzogen werden, um eine Übertragung von Keimen zu verhindern. Von besonderem Erfolg und derzeit ohne Konkurrenz ist der Einsatz von Klebstoffen auf Methacrylatbasis in der Orthopädie zur Verankerung von Gelenkprothe-

sen im Knochen. Die verwendeten Produkte bestehen a) aus einer pulverförmigen Komponente: einer Mischung aus Polymethylmethacrylat und einem Polymerisationsauslöser sowie b) einer flüssigen Komponente, die als wesentlichen Bestandteil Methylmethacrylat und einen Polymerisationsbeschleuniger enthält. Obwohl dieser Klebstofftyp bei der Anwendung wegen seiner starken Wärmeentwicklung eine nicht unerhebliche Belastung für Knochen und Gewebe darstellt, sind hiermit verankerte Hüft- und Knie-Implantate inzwischen in 90 Prozent der Fälle etwa 15 Jahre funktionsfähig (Abb. 61).

In der Zahnmedizin haben Füllzemente auf der Basis UV-härtender Acrylate inzwischen ältere Füllmaterialien, insbesondere Amalgam, weitgehend ersetzt. Die Produkte erlauben eine lange Verarbeitungszeit, verbunden mit minutenschneller Abbindeung unter UV-Licht.

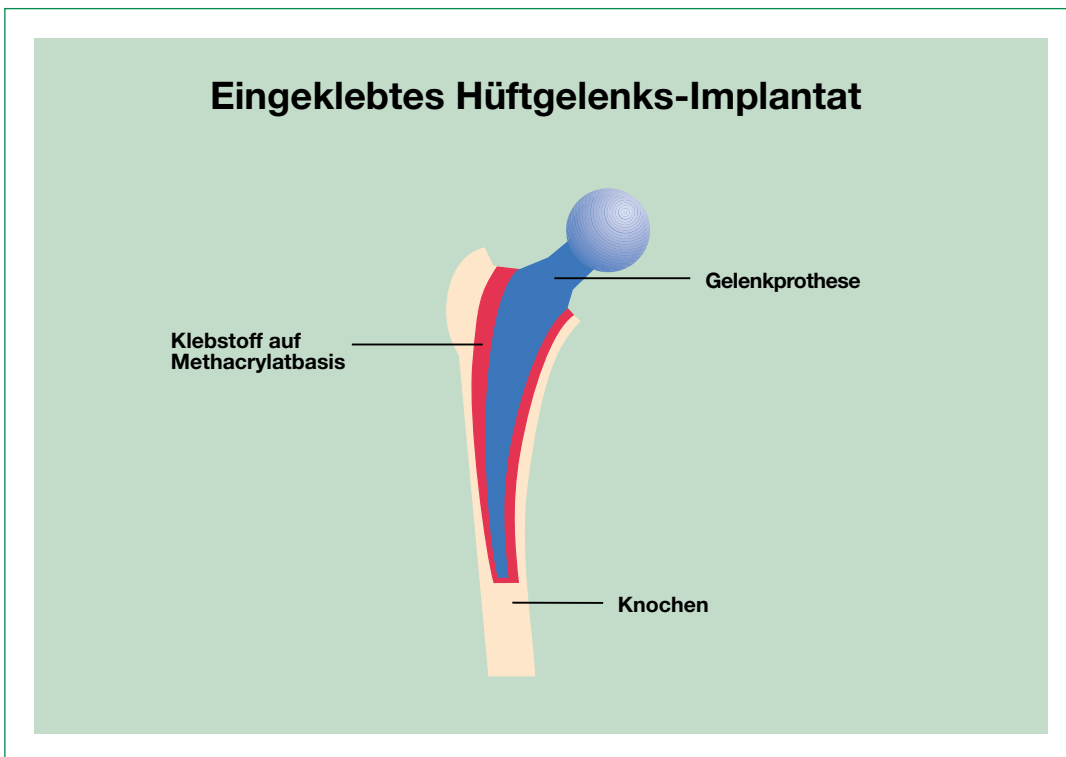


Abbildung 61



Der verantwortliche Umgang mit Rohstoffen und Produkten von deren Herstellung über die Nutzung bis hin zum Recycling bzw. zur Entsorgung ist heute ein allgemein anerkanntes Prinzip. So gelten bei der Entwicklung und der Herstellung von Klebstoffen seit geraumer Zeit die Leitlinien des VCI (Verband der Chemischen Industrie) „Responsible Care“ (verantwortliches Handeln) und „Sustainable Development“ (nachhaltige zukunftsverträgliche Entwick-

lung) (Abb. 62). Das bedeutet konkret, dass bei der Entwicklung neuer Klebstoffe Aspekte des Gesundheitsschutzes und der Umweltverträglichkeit berücksichtigt werden. Das hat Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Klebstoffe, die Produktgestaltung, Empfehlungen in Bezug auf Applikation und Einsatzzweck sowie die Verwertung nach der Verwendung.



Abbildung 62

### 4.1 Gesundheitsschutz

Der Gesundheitsschutz hat die Aufgabe, den Menschen vor Gefahren und Belästigungen zu schützen. Bezüglich des gewerblichen und industriellen Arbeitsumfeldes spricht man von „Arbeitsschutz“. Bezüglich des privaten Verwenders bzw. Benutzers geklebter Produkte von „Verbraucherschutz“.

#### 4.1.1 Arbeitsschutz

Industrielle oder gewerbliche Nutzer der Klebtechnik bedürfen eines besonderen Schutzes, da die Beschäftigten täglich, oftmals über viele Stunden, intensiven Umgang mit Klebstoffen haben. Neben physikalischen Einwirkungen wie Brennbarkeit bis hin zur Explosionsfähigkeit und Verbrennungen bei der Verarbeitung von Heißschmelzklebstoffen sind besonders chemische Einwirkungen wie Toxizität, Hautreizungen, Verätzungen sowie Allergien auszuschließen. Dieses wird erreicht durch die Gestal-

tung des Arbeitsplatzes (Arbeitsstättenrichtlinien) mit Luftwechsellern und örtlichen Absaugungen, persönliche Schutzeinrichtung des Mitarbeiters wie Arbeitskleidung, Handschuhe, Schutzbrille sowie Einhaltung der Arbeitshygiene wie gründlicher Körperreinigung in Pausen und nach Arbeitsende und Unterlassung von Essen, Trinken und Rauchen am Arbeitsplatz. Über die Einhaltung der auf Grund des Gefährdungspotenzials notwendigen Maßnahmen wachen Sicherheitsfachkräfte. Die Verarbeiter von Klebstoffen werden regelmäßig in Fragen der Arbeitssicherheit und des Umweltschutzes geschult und bei einem besonderen Gefährdungspotenzial arbeitsmedizinisch überwacht.

#### 4.1.2 Verbraucherschutz

Während bei professionellen Anwendungen mögliche Gefahren durch geeignete Schutzmaßnahmen auch in der Langzeitanwendung sicher beherrscht werden können, sind an die Klebstoffe, die von pri-

vaten Verwendern im häuslichen Bereich ohne besondere Schutzmaßnahmen benutzt werden, andere Ansprüche zu stellen. Dies auch besonders deshalb, weil der private Konsument anders als der gewerbliche in der Regel keine Kenntnisse über die Produkteigenschaften und Gefährdungspotenziale besitzt. So sind aus der großen Anzahl der für unterschiedlichste Anwendungen angebotenen Klebstofftypen nur relativ wenige, und dann nur in Kleinverpackungen wie Tuben, Kartuschen oder Dosen, für den Privatanwender erhältlich. Andererseits benutzt der Privatanwender Klebstoffe üblicherweise nicht täglich, sondern eher gelegentlich, und dieses auch nur zeit- und mengenmäßig begrenzt. Insofern sind die beschriebenen Maßnahmen des Arbeitsschutzes in der Regel weder möglich noch nötig. Dennoch ist es unabdingbar, dass die auch auf Kleingebinden angebrachten Sicherheitshinweise beachtet werden und Grundprinzipien der Arbeitshygiene Beachtung finden.

### 4.1.3 Stoffinduzierte Gesundheitsauswirkungen – Risiko

Die Toxikologie (s. Glossar) bearbeitet Fragestellungen zu möglichen stoffinduzierten Wirkungen chemischer Verbindungen sowie Stoffmischungen. Die Bewertung des Gesundheitsrisikos ist ein Prozess, der in mehreren Schritten abläuft. Der erste ist eine gut begründete Beurteilung von möglichen unerwünschten Eigenschaften von Stoffen (*Gefährdungspotenzial*, s. Glossar) auf Grund ermittelter Daten. Im zweiten Schritt werden die Stoffmengen, die Art sowie das Ausmaß eines möglichen Kontakts ermittelt (*Exposition*, s. Glossar).

Abschließend wird überprüft, ob eine unerwünschte Eigenschaft eines Stoffes durch den vorhersehbaren Kontakt zum Tragen kommen kann. Ohne Kontakt mit dem unerwünschten Stoff besteht für den Menschen kein gesundheitliches Risiko. In der Risikobewertung wird ermittelt, ob und in welchem Umfang ein Gesundheitsrisiko vorhanden ist, welches sich aus dem Zusammenwirken des jeweiligen Gefährdungspotenzials mit der Art und der Höhe der Exposition ergibt (Abb. 63). Während man die Exposition beispielsweise durch automatisierte Verarbeitung (z. B. Roboter) oder geeignete Schutzmaßnahmen (wie Handschuhe, Absaugung, Schutzbrille etc.) verringern kann, ist das Gefährdungspotenzial eine grundsätzliche Eigenschaft eines Stoffes oder einer Zubereitung (Stoffmischung). Dieses bestimmt die Kennzeichnung. Das Gefährdungspotenzial erniedrigt sich im Regelfall, wenn der Anteil des gefährlichen Stoffes geringer wird. Häufig können kleine Mengen eines gefährlichen Stoffes enthalten sein, ohne dass das Produkt gekennzeichnet werden muss (*Einstufung*, s. Glossar). Physiko-chemische Eigenschaften, die Art und Höhe der Exposition und die Möglichkeit der Stoffaufnahme bestimmen die jeweilige Menge und die daraus resultierende Dosis, die aufgenommen werden kann. Unterhalb einer bestimmten Dosis wird in der Regel keine unerwünschte Wirkung ausgelöst. Die Höhe der Dosis ist entscheidend, ob und in welchem Ausmaß durch einen Stoff ein Gesundheitsschaden ausgelöst werden kann. Das Maß des Risikos einer gesundheitlichen Auswirkung ermittelt sich demnach aus der Höhe des Gefährdungspotenzials des Stoffes und der Höhe der Exposition (Kontaktmöglichkeit).

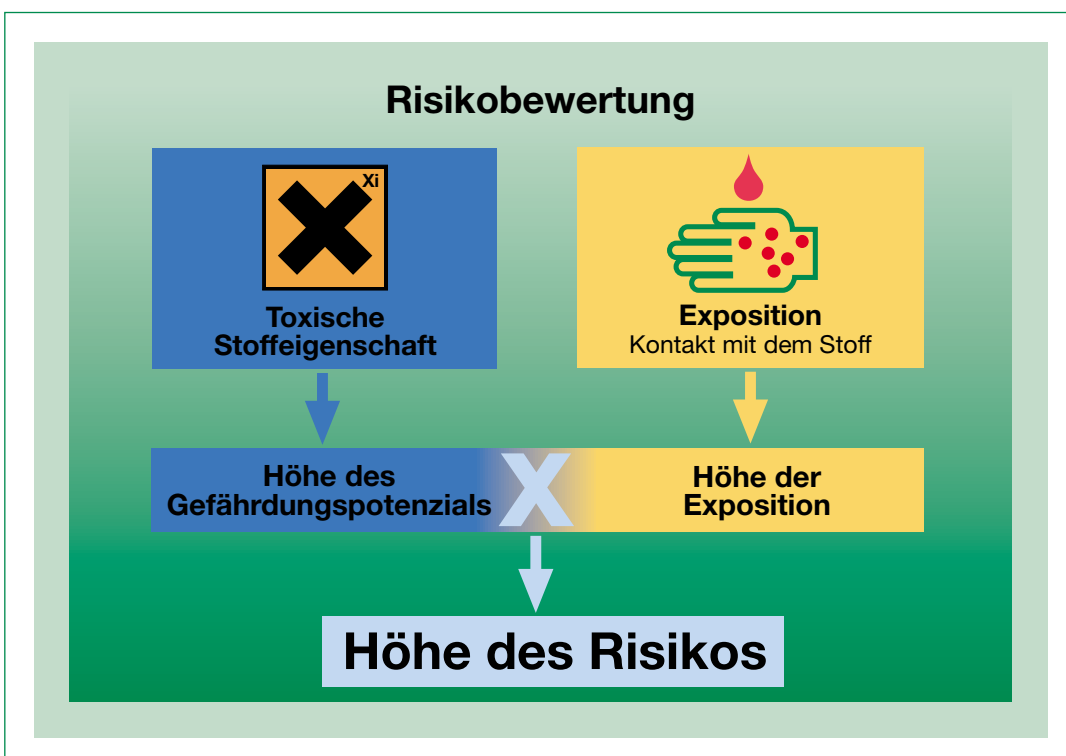


Abbildung 63  
Folie 34

## 4.1.4 Gesundheitsschutz in der Klebtechnik – Beispiele toxikologischer Bewertungen

Aus der Vielzahl unterschiedlicher Klebstofftypen werden im Folgenden diejenigen beschrieben, welche auch im häuslichen Bereich Anwendung finden.

### 4.1.4.1 Physikalisch abbindende Klebstoffe

Die wirksame Klebsubstanz besteht überwiegend aus festen Polymeren und Harzen, die für die Anwendung in eine flüssige Form gebracht werden müssen. Das kann entweder beim Verarbeiter durch Erhitzen (Schmelzklebstoffe) oder beim Klebstoffhersteller durch Lösen in organischen Lösungsmitteln bzw. Dispergieren in Wasser geschehen. Der trockene, vollständig abgelüftete Klebstoff ist im Allgemeinen reaktionsträge und biologisch weitgehend inert. Eine gesundheitliche Gefährdung ist deshalb in der Regel auszuschließen. Dagegen resultiert ein Gefährdungspotenzial aus den teilweise erforderlichen Hilfsmitteln wie organischen Lösungsmitteln, die bis zu 80 % im Klebstoff enthalten sein können.

#### Schmelzklebstoffe

Diese Klebstoffe enthalten überwiegend Polymere und Harze und nur sehr wenige Hilfsstoffe in kleinen Mengen. Ein gesundheitliches Gefährdungspotenzial liegt praktisch nicht vor. Bei der manuellen Heißverarbeitung, dem Aufschmelzen, besteht die Gefahr von Verbrennungen, vor denen sich der Verarbeiter schützen muss. Beim Erhitzen können kleine Mengen von Hilfsstoffen, Verunreinigungen oder Rückspaltungsprodukten freigesetzt werden, die aber bei der Verarbeitung kleiner Klebstoffmengen ohne Belang sind. Im gewerblichen Bereich wird aufgrund der Mengen und langen Zeiträume eine Absaugung empfohlen.

#### Lösungsmittelklebstoffe (z. B. Kontaktklebstoffe)

In diesen Klebstofftypen sind die Polymere und Harze in organischen Lösungsmitteln gelöst. Das Gefährdungspotenzial bestimmt sich durch die Art der verwendeten Lösungsmittel (z. B. Brennbarkeit, Reizpotenzial). Aufgrund ihrer hohen Flüchtigkeit ist vor allem die Exposition durch Einatmen der Dämpfe zu beachten. Für die meisten Lösungsmittel sind maximale Konzentrationen am Arbeitsplatz sowie Überschreitungsfaktoren festgelegt (Arbeitsplatzgrenzwert, s. Glossar). Diese Grenzwerte werden aufgrund der kleinen Mengen im Konsumentenbereich in der Regel nicht erreicht oder nur kurzzeitig überschritten.

#### Dispersionsklebstoffe (z. B. Weißleim/Holzklebstoff)

Bei diesen Klebstoffen sind die organischen Lösungsmittel durch Wasser ersetzt, in denen geeignete Polymere dispergiert sind. Das Gefährdungspotenzial durch die Lösungsmittel entfällt hier. Allerdings sind wasserbasierte Klebstoffe dem Angriff von Mikroorganismen ausgesetzt (z. B. Schimmelbildung). Deshalb müssen Dispersions-

klebstoffe mit kleinen Mengen von Konservierungsmitteln geschützt werden. Das Gefährdungspotenzial liegt dabei in der Auslösung allergischer Hautreaktionen, wie sie auch durch natürliche Polymere, wie Naturlatex und nicht modifizierte Kolophonharze ausgelöst werden können. Das Risiko einer Sensibilisierung von Nichtallergikern ist in der Regel durch die extrem niedrigen Anteile an Konservierungsmitteln in den Klebstoffen äußerst gering. Der Hautkontakt ist dabei die relevante Exposition. Je nach Verwendungszweck kann ein Hautkontakt unvermeidlich sein, wie beispielsweise bei angerührten Tapetenkleistern. Jedoch ist bei diesen die Konzentration der Konservierungsmittel durch das Anrühren mit Wasser reduziert. Da auch allein das längere Tragen von Schutzhandschuhen, unter anderem wegen der ständigen Feuchtbelastung (Schwitzen), zu Hautreaktionen führen kann, ist zu überlegen, ob das verbleibende sehr geringe Risiko bei einem direkten Hautkontakt das Tragen geeigneter Schutzhandschuhe rechtfertigt.

#### Haftklebstoffe

Der private Konsument kommt mit diesen Klebstoffen nur in Form von selbstklebend ausgerüsteten Artikeln wie Etiketten, Klebebändern etc. in Berührung. Insofern ist ein Gefährdungspotenzial des privaten Konsumenten in der Praxis nicht vorhanden. Industriell werden derartige Artikel mit Klebstoffen aus Lösung, vor allem aber aus Dispersion und auch Schmelze hergestellt.

### 4.1.4.2 Chemisch härtende Klebstoffe

Die chemisch reaktiven Monomere/Oligomere bzw. Härter/Vernetzungskomponenten bestimmen bei diesen Produkten das Gefährdungspotenzial. Die nach vollständiger Aushärtung vorliegenden Klebstoffpolymere haben in der Regel kein Gefährdungspotenzial. Für die Expositions- und Risikobetrachtungen ist deshalb der Zeitraum der Verarbeitung bis zur vollzogenen Aushärtung relevant.

#### Sekundenkleber (Cyanacrylatklebstoffe)

Diese Klebstoffgruppe reagiert mit Wasser aus der Umgebung oder vom zu klebenden Teil. Da beim privaten Verbraucher im Normalfall nur Tröpfchen zur Anwendung gelangen, liegt das Gefährdungspotenzial hier in der Problematik, dass bei Hautkontakt oder Spritzern ins Auge ungewollte Verklebungen stattfinden (können mit Seifenlauge allmählich gelöst werden). Bei gewerblicher Anwendung ist die Reizwirkung des Cyanacrylat-Monomers sowie die thermische Belastung und schnelle Polymerisationsreaktion zu beachten. Eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit vermeidet Atemwegsreizungen. Cyanacrylate sind gemäß der Gefahrstoffverordnung spezifisch zu kennzeichnen. Bei umfangreichen Arbeiten ist neben einer Einstellung der Luftfeuchtigkeit das Tragen von Schutzbrille und Handschuhen zu empfehlen.

#### Siliconklebdichtstoffe

Silicone reagieren mit Wasser je nach Typ unter Abspaltung von Essigsäure oder Alkoholen, wobei

erstere bereits geruchlich deutlich wahrnehmbar ist, bevor eine Reizwirkung eintritt. Im Übrigen sind die langsam abgespaltenen Mengen so klein, dass insbesondere im privaten Bereich kein Risiko besteht. Alte Rezepturen neutraler Silicone, die Butanonoxim abspalten, müssen gekennzeichnet werden, sind jedoch nur noch in Spezialbereichen im Einsatz.

### **Epoxidharzklebstoffe**

Wegen ihrer guten Eigenschaften beispielsweise beim Kleben von Glas, Keramik oder Metallen werden Epoxidharze auch von Heimwerkern gerne verarbeitet, zumal durch die Abpackung in der Doppelspritze auch kleinste Mengen gut dosiert und anschließend gemischt werden können. Flüssige Epoxidharze wie auch Vernetzer sind reizend für Haut und Augen und können hautsensibilisierend wirken. Insofern sollte auch der Heimwerker Hautkontakt vermeiden. Bei der industriellen Verarbeitung sind Schutzbrille und geeignete Handschuhe zu tragen. Epoxidharze mit einem Molekulargewicht bis 700 sind mit Xi-R36/38-43 zu kennzeichnen. Monomere und oligomere Epoxidharze bis zu einer Kettenlänge von 3 n sind reizend für Haut und Augen und hautsensibilisierend.

### **4.1.5 Klebstoffauswahl**

Im privaten Bereich gibt es seitens des Gesetzgebers keine Regelung, sie wird sich insbesondere an den Erfahrungen des Benutzers und den Empfehlungen des Klebstoffherstellers orientieren. Im gewerblichen und besonders im industriellen Bereich hat sich die Auswahl des geeigneten Klebstoffsystems für den jeweiligen Anwendungszweck nach den technischen Erfordernissen und dem Gefährdungspotenzial zu richten. Bei gleicher Eignung ist das Produkt mit dem niedrigeren Gefährdungspotenzial vorzuziehen. Ist aus technischen Gründen ein Klebstoff mit Gefährdungspotenzial unverzichtbar, ist die Exposition durch geeignete Maßnahmen bis hin zur Automatisierung der Verarbeitung so zu begrenzen, dass ein gesundheitliches Risiko vermieden wird. Unter Berücksichtigung dieser und der weiteren in diesem Kapitel beschriebenen Regeln ist ein sicherer Umgang mit Klebstoffen gewährleistet. Die Klebstoffhersteller leisten dazu Hilfestellung mit Informationen in ihren Technischen Merkblättern und Sicherheitsdatenblättern. Im Bedarfsfall sollte sich der Anwender direkt an den Hersteller wenden. Wie aus den Ausführungen dieses Kapitels ersichtlich, unternehmen die Hersteller von Klebstoffen erhebliche Anstrengungen für den Gesundheitsschutz privater Verbraucher wie auch professioneller Anwender. An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass mengenmäßig nur ein kleiner Teil der Klebstoffe als gefährliche Zubereitung einzustufen ist.

Die Beachtung der Sicherheitshinweise auf den Gebinden für die Privatkonsumenten sowie die Einhaltung der geltenden Vorschriften in den Betrieben dienen dem Schutz der Menschen gemäß dem Motto: „Vorbeugen ist besser als Heilen“.

## **4.2 Umweltschutz in der Klebtechnik**

Umweltaspekte haben in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung gewonnen. Einen positiven Beitrag zeigt folgendes Beispiel: In der Automobilfertigung werden pro Fahrzeug bis zu 40 kg Klebdichtstoffe eingesetzt. Ziel ist vor allem die Einsparung an Energie in Form von Treibstoff durch so genannten „Leichtbau“, da über die Lebensdauer des Autos weniger Gewicht bewegt werden muss und so Ressourcen geschont werden (Bsp. 3-Liter-Auto). Auf der anderen Seite kann Klebstoff im gleichen Beispiel auch zur Umweltbelastung werden, wenn Reste aus Verarbeitung und evtl. Reinigung anfallen. Nach Ende des Lebenszyklus des Fahrzeugs darf die eingesetzte Klebstoffmenge das Recycling nicht behindern und muss ordnungsgemäß entsorgt werden. Zur Bestimmung der Auswirkungen auf die Umwelt wird im Vorfeld eine Expositionsanalyse durchgeführt. Hierzu wird die zu erwartende Konzentration in der Umwelt rechnerisch ermittelt. Gleichzeitig wird die Konzentration bestimmt, bei der keine Schädigung der Umweltorganismen zu erwarten ist. Die Berechnungsmodelle und Bestimmungsmethoden sind international standardisiert. Eine Beeinträchtigung oder Gefährdung der Umwelt kann mit Sicherheit ausgeschlossen werden, wenn die errechnete Konzentration in der Umwelt (PEC) niedriger ist als die vorhergesagte Konzentration, bei der unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren keine Schädigung von Umweltorganismen verursacht wird (PNEC).

### **4.2.1 Luft**

Eine Beeinträchtigung der Luft stellen die Immissionen von organischen Lösungsmitteln dar. Insofern werden seit vielen Jahren seitens der Klebstoffindustrie erhebliche Anstrengungen unternommen, auf lösungsmittelreduzierte oder möglichst -freie Klebstoffe umzustellen. Hier konnten schon gute Erfolge erzielt werden, was auch in Hinblick auf den Gesundheitsschutz vorteilhaft ist. Das Kleben hat an der Gesamtlösungsmittellemission in Europa nur noch einen Anteil von 5 %. Die wenigen großen Anwendungen im Industriebereich arbeiten mit Lösungsmittelrückgewinnungsanlagen. Ein typisches Beispiel zeigt der Baubereich. Lag der Anteil der Lösungsmittelklebstoffe 1985 noch bei rund 50 %, waren es 1997 weniger als 10 % mit weiter sinkender Tendenz. Die Substitution erfolgte vor allem durch Dispersionsklebstoffe (Abb. 64).

### **4.2.2 Wasser**

Speziell bei Dispersionsklebstoffen besteht die Gefahr von Gewässerbelastungen. Organische Polymere und Prepolymere sind zwar biologisch schwer abbaubar, können aber in biologischen Kläranlagen mit dem Überschussschlamm eliminiert werden. Bei der Verwendung im Handwerk, Haushalt und Do-it-yourself-Bereich gelangen üblicherweise relativ geringe Mengen Klebstoff in große Mengen Abwasser (kommunale Kläranlage). Aufgrund der übli-



## Substitution von lösungsmittelhaltigen Klebstoffen in der Bauklebstoffindustrie 1985–1997

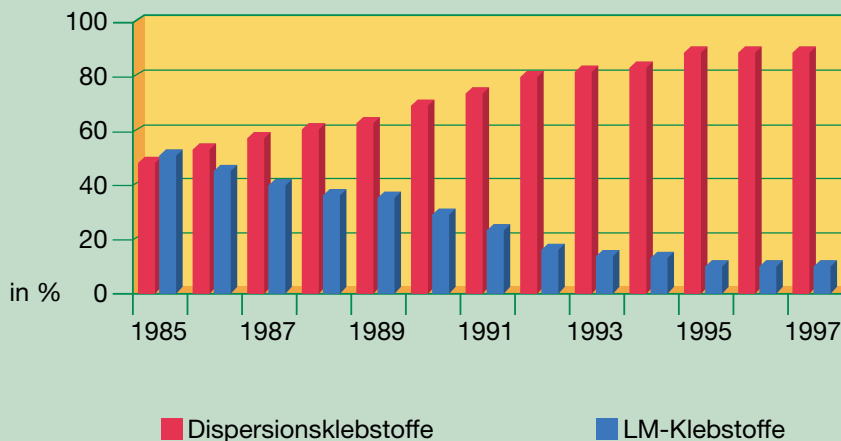


Abbildung 64

cherweise geringen Toxizität von Polymeren gegen Wasserorganismen und der sehr niedrigen Konzentration von Klebstoffen im Abwasser ist in diesem Fall eine Schädigung der Kläranlage und des angeschlossenen Oberflächengewässers (Vorfluter) nicht zu erwarten. Im industriellen Bereich anfallende Restmengen sowie Spülwässer müssen gemäß der Abfallgesetze entsorgt werden.

### 4.2.3 Boden

Im Privatbereich werden flüssige Klebstoffreste in den Schadstoffmobilen gesammelt, häufig aber auch mit dem Hausmüll entsorgt, wobei die Mengen klein sind. Im gewerblichen Bereich richtet sich die Entsorgung nach so genannten Abfallschlüsselnummern (entnimmt der Verarbeiter den Sicherheitsdatenblättern), welche die Entsorgung regeln. Üblicherweise werden Klebstoffreste deponiert oder verbrannt, wobei in den entsprechenden Verbrennungsanlagen spezifische Luftbelastungen nicht zu erwarten sind. Die bei der Herstellung der Klebstoffe aufgewandte Energie kann hierbei zum Teil wieder zurückgewonnen werden.

### 4.2.4 Beispiele zur Bewertung des Umweltverhaltens von Klebstoffen

#### 4.2.4.1 Klebstoffe bei der Produktion bzw. im industriellen Einsatz

Im industriellen Bereich fallen sowohl ausgehärtete Klebstoffreste als auch unvernetzte und flüssige Klebstoffe an. Erstere werden ebenso wie die Feststoffe als Abfälle direkt der Entsorgung, oder besser der Weiterverwendung, zugeführt. Im ökologisch ungünstigsten Fall werden sie deponiert, üblicherweise jedoch weiter verwendet, sei es über

Kompostierung oder zur Energiegewinnung durch Verbrennung. Flüssige Klebstoffe werden behandlungsbedingt mit dem Abwasser entsorgt und direkt oder – ggf. nach einer spezifischen Vorbehandlungsmaßnahme – in eine Kläranlage eingeleitet und dort biologisch abgebaut oder eliminiert.

#### 4.2.4.2 Klebstoffe im Haushalt beim Endverbraucher

Klebstoffe beim Endverbraucher gehören zu unterschiedlich zu betrachtenden Gruppen:

- Feste Klebstoffabfälle im Haus wie ausgehärteter Papier- oder Holzleim werden überwiegend mit dem Müll entsorgt.
- Zur Entfernung wasserlöslicher, ausgehärteter Klebstoffe im Haus wird in der Regel – wie beim Tapetenkleister – Wasser verwendet. Dieses klebstoffhaltige Wasser wird mit dem Abwasser über die Kläranlage entsorgt. Die mehr oder weniger gelösten Klebstoffanteile, z. B. Cellulose-Derivate, sind unter realen Umweltbedingungen gut eliminierbar, so dass nur relativ geringe Mengen in den Vorfluter (Fluss) gelangen. Bei der Verrottung (Kompostierung) wird Cellulose – wie von pflanzlichem Material bekannt – langsam, aber gründlich zersetzt.
- Klebstoffe am Haus, wie z. B. Dachrinnenklebstoffe, oder im Umfeld, wie z. B. am Auto, sind Auswaschungsprozessen durch Regen und ähnlichen Prozessen ausgesetzt, so dass mit dem Wasser eine kleine Menge an Klebstoffbestandteilen über den Regenwasserkanal direkt in den Fluss gelangt.

Unter Berücksichtigung aller verwendeten Klebstoffe wird die zu erwartende Umweltkonzentration (PEC) ermittelt. Dabei wird die ungünstigste Situation vorausgesetzt, um zu gewährleisten, dass alle denkbaren Möglichkeiten erfasst sind (Abb. 65).

#### 4.2.5 Ausblick

Klebstoffe insgesamt stellen zwar kein brisantes Umweltproblem dar, ausgehärtete und nicht mehr verwertbare Restmengen sowie Applikationsüberschüsse sind jedoch Abfälle. Diese müssen nicht nur entsorgt werden, sondern stellen auch einen unnötigen Verbrauch an Material und Ressourcen dar. Die

wiederverwertbare Konstruktion aufgrund lösbarer Klebverbindungen wird in der Zukunft eine wichtige Frage sein. Neben Technologien zur Trennung verklebter Materialien wird eine weitere Herausforderung der Klebtechnik die ressourcenschonende Optimierung der Produktions- und Applikationsprozesse sein. Auf der anderen Seite wird es erforderlich sein, nicht entfernbare Klebstoffe in den späteren Recyclingprozess einzubinden. Dies bedeutet, dass der entsprechende Klebstoff schon bei der Herstellung eines Fügeteils auf den nach der Lebensdauer einsetzenden Wiedergewinnungsprozess abgestimmt sein muss.

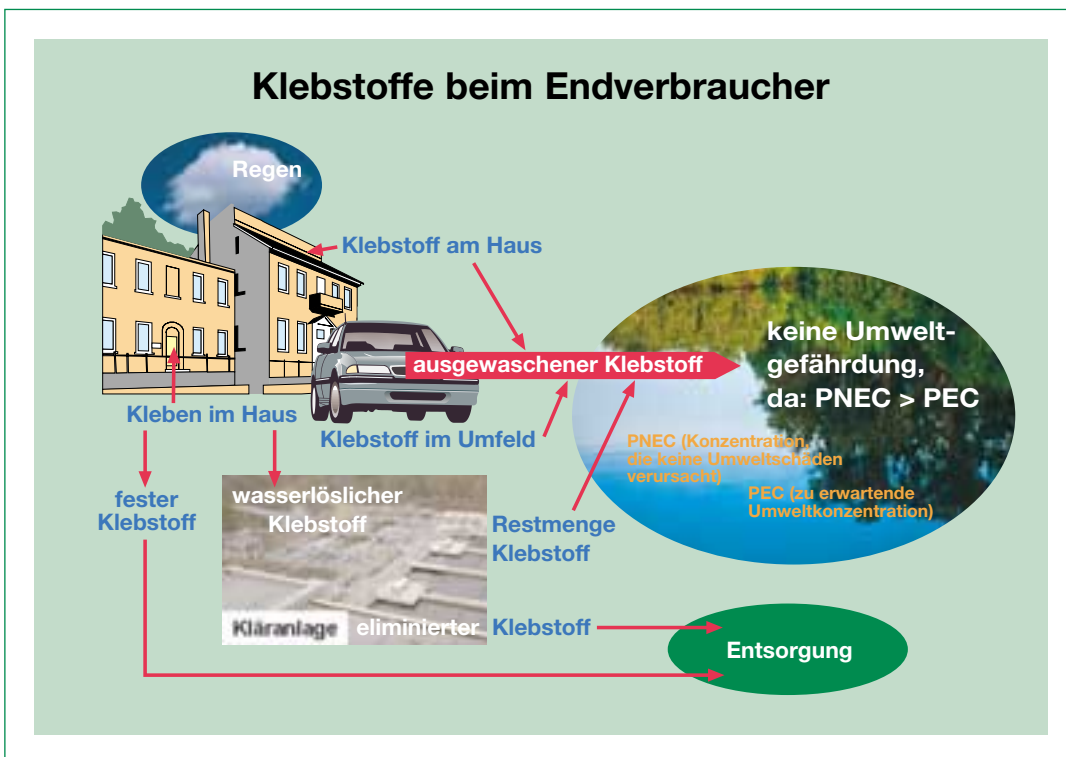


Abbildung 65  
Folie 35



## 5 Versuchsanordnungen

### Versuch 1: Die meisten Klebstoffe sind aus organischen Grundstoffen aufgebaut (Kohlenstoffnachweis)

**Geräte** Schutzbrille, Reagenzgläser, Reagenzglasklammer, Spatel, Brenner, Messer

**Chemikalien/Materialien** Klebstoffproben: z. B. Holzleim: Ponal® oder Uhu® oder Tapetenkleister, z. B. Metylan® oder Glutolin® oder Schmelzklebstoff, z. B. Pattex® Patronen oder Uhu® Klebepatronen

**Warnhinweise** Keine lösungsmittelhaltigen Klebstoffe mit der Kennzeichnung „F“ „(leicht) entzündlich“ verwenden! Raum gut lüften! Dämpfe nicht einatmen! Entstehende Dämpfe können sich entzünden! Schutzbrille tragen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen!

Einzelne Klebstoffproben werden etwa 1/2 cm hoch in ein Reagenzglas gegeben. Anschließend wird kräftig in der Brennerflamme erhitzt.

Erweiterung: Feste Klebstoffe (z. B. Schmelzklebstoff oder Tapetenkleister) mit Kupfer(II)-oxid mischen und in ein Reagenzglas (Supremax®) geben. Kräftig erhitzen. Die entweichenden Dämpfe in Kalkwasser (Lösung von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in Wasser) leiten. **Achtung!** Das Kalkwasser darf beim Abkühlen nicht in das heiße Reagenzglas aufsteigen! Kalkwasser erst entfernen, dann das Erhitzen beenden!

### Versuch 2: Klebstoffe bestehen aus Makromolekülen (Tyndalleffekt)

**Geräte** 2 Bechergläser (250 ml, hohe Form), 2 Glasrührstäbe, Taschenlampe, Karton (DIN A5, schwarz), Schere, Spatel

**Chemikalien/Materialien** Vielzweckklebstoff, z. B. Uhu® flinke Flasche, Pritt® Alleskleber, Tesa® Vielzweckkleber, Tapetenkleister, z. B. Metylan® oder Glutolin® Wasser

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen!

Ein Becherglas wird bis etwa 1 cm unter den Rand mit Wasser gefüllt. Dann fügt man 5 Spatelspitzen Tapetenkleister hinzu und rührt gut um. Einige Minuten quellen lassen. Den Karton rollt man trichterförmig zusammen und klebt ihn mit Vielzweckklebstoff so, dass eine Öffnung von ca. 1 cm Ø entsteht. Man verdunkelt den Raum und leitet das Licht der Taschenlampe durch die Trichteröffnung. Das Becherglas mit dem Tapetenkleister wird in den Strahlengang der Lampe gestellt.

Zur Kontrolle wiederholt man den Versuch mit einem Becherglas voll Wasser.

### Versuch 3: Wirkungsweise der Klebstoffe (Prinzip der Adhäsion)

**Geräte** 2 plan geschliffene Glasplatten (Abdeckscheiben, Dicke ca. 1,0 cm, Ø ca. 12 cm), jeweils mit Griff auf der Mitte der nicht geschliffenen Seite 2 Glasplatten mit rauer Oberfläche (Kathedralglas), sonst Ausführung wie oben, Becherglas (250 ml), Pipette

**Chemikalien/Materialien** Wasser (hier: Klebstoffersatz), Öl (Speiseöl oder Ähnliches)

**Hinweis** Achtung! Die Oberflächen der Platten dürfen nicht mit den Fingern oder Händen berührt werden, damit sie nicht verschmutzen!

**Durchführung** Das Becherglas wird mit Wasser gefüllt. Die gesamte Oberfläche einer plan geschliffenen Platte wird mit Hilfe der Pipette mit Wasser benetzt, dann wird vorsichtig eine zweite Platte darauf gelegt. Versuche, die beiden Platten durch Zug senkrecht voneinander zu trennen.

**Versuch 3a** Eine der beiden plan geschliffenen Platten wird dünn mit Öl bestrichen, dann die andere Platte mit Wasser benetzt. Man fügt die Platten vorsichtig zusammen und versucht, sie durch Zug senkrecht voneinander zu trennen.

**Versuch 3b** Versuch 3 mit Kathedralglas wiederholen.

#### Versuch 4: Benetzen von Werkstoffoberflächen – Oberflächenspannung

**Geräte** Becherglas (250 ml), Pipette, Aluminiumblech (Oberfläche nicht entfettet), Aluminiumblech (Oberfläche entfettet und angeraut), PVC-Platte, PE-Platte

**Chemikalien** Wasser

**Hinweis** Oberflächen nicht mit den Fingern o. Ä. berühren.

**Durchführung** Das Becherglas wird mit Wasser gefüllt. Mit Hilfe der Pipette tropft man vorsichtig Wasser auf die Oberflächen der verschiedenen Werkstoffe.

#### Versuch 5: Herstellen von Caseinleim

**Geräte** Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Becherglas (250 ml), Glasrührstab, Waage, Messzylinder, Wäscheklammern, Pinsel

**Chemikalien/Materialien** Casein (Säurecasein), verd. Natronlauge (ca. 4%ig), Sperrholzbrettchen o. Ä. (ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,5 cm)

**Warnhinweise** Natronlauge verursacht Verätzungen! Schutzbrille und Schutzhandschuhe tragen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von Natronlauge von der Gefahrstoffverordnung auf die Arbeitsblätter übertragen! Man gibt 25 ml verd. Natronlauge in ein Becherglas und löst unter Rühren 10 g Casein darin auf. Einige Minuten quellen lassen! Der Klebstoff wird vor dem Verarbeiten evtl. mit etwas Wasser streichfähig gemacht. Dann werden Klebversuche durchgeführt, dabei kann man Klebstellen mit Hilfe der Wäscheklammern so lange fixieren, bis der Klebstoff abgebunden ist.

#### Versuch 6: Herstellen von Stärkekleister (I)

**Geräte** 2 Bechergläser (250 ml, weite Form), Glasrührstab, Brenner, Dreifuß, Wärmeschutznetz, Messzylinder, Waage, Spatel, Pinsel

**Chemikalien/Materialien** Maisstärke o. Ä., Wasser, Salicylsäure, Schreibpapier

**Durchführung** Aus 10 g Stärke und 10 ml Wasser wird ein Brei hergestellt. Man erhitzt ca. 120 ml Wasser bis zum Sieden und löst den Brei unter Umrühren darin auf. Anschließend wird eine Spatelspitze Salicylsäure zugesetzt. Nun kann man mit Papier diverse Klebversuche durchführen.

#### Versuch 7: Herstellen von Stärkekleister (II)

**Geräte** Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Becherglas (250 ml), Glasrührstab, Messzylinder, Waage, Pinsel

**Chemikalien/Materialien** Natronlauge (ca. 7%ig) Salzsäure (10%ig), Stärkepulver, Wasser, Universal-Indikatorpapier, Schreibpapier, Papierklebstoff, z. B. Pritt® Stift, Uhu® Stic oder Tesa® Klebstift

**Warnhinweise** Säuren und Laugen verursachen Verätzungen! Schutzbrille und Schutzhandschuhe tragen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) der verwendeten Chemikalien von der Gefahrstoffverordnung, der verwendeten Klebstoffe von den Verpackungen auf die Arbeitsblätter übertragen!

Zunächst stellt man eine 20%ige Stärkesuspension (etwa 50 ml) her, zu der nach und nach unter Rühren verd. Natronlauge zugesetzt wird, bis eine viskose Lösung entsteht. Anschließend wird mit Salzsäure neutralisiert. Mit dem Stärkekleister führt man Klebversuche an Papier durch. Diese Versuche werden mit industriell gefertigten Klebstoffen (z. B. den genannten Klebstiften) wiederholt. Anschließend vergleicht man die Ergebnisse.

#### Versuch 8: Herstellen einer Methylcellulose-Lösung

**Geräte** 3 Bechergläser (100 ml), 3 Glasrührstäbe, Spatel

**Chemikalien/Materialien** Methylcellulose, z. B. Metylan® oder Glutolin®, Wasser, Aceton, Ethylacetat

**Warnhinweise** Aceton und Ethylacetat sind leicht entzündlich! Alle Flammen löschen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) der verwendeten Lösungsmittel von der Gefahrstoffverordnung auf die Arbeitsblätter übertragen!

Ein Becherglas wird zu 1/3 mit Wasser gefüllt. Dann fügt man 5 Spatel voll Methylcellulose hinzu und rührt gut um. 15 bis 20 Minuten warten. Man wiederholt den Versuch mit den anderen Lösungsmitteln.

## Versuch 9: Schmelzklebstoffe – Eigenschaften und Verwendung

**Geräte** Klebepistole, z. B. Pattex® Supermatik, Uhu® Pistole oder Klebepistolen von Bosch®, Black & Decker® oder Steinel®, Thermometer

**Materialien** Dünne Aluminiumfolie, Holzbrettchen (ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,5 cm), Schmelzklebstoff-Patronen, z. B. Pattex® Patronen oder Uhu® Klebepatronen

**Warnhinweise** Flüssigen Klebstoff nicht mit den Fingern berühren! Verbrennungsgefahr!

**Durchführung** Die Eintauchspitze des Thermometers wird vorsichtig mit dünner Aluminiumfolie umwickelt (Thermometerschutz). Man bringt Schmelzklebstoff-Patronen in der Klebepistole zum Schmelzen. **Achtung!** Verarbeitungshinweise beachten!

Die Temperatur des Klebstoffs wird nach Austritt aus der Düse gemessen. Dann trägt man den flüssigen Klebstoff auf ein Holzbrettchen auf und klebt es mit einem anderen Holzbrettchen zusammen. Nacheinander trägt man verschieden große Klebstoffmengen auf die Holzbrettchen auf und prüft die Abkühlung der Schmelze mit Hilfe des Thermometers. Bei Bedarf muss man den Klebstoff wieder kurz erwärmen, damit das Thermometer aus der Schmelze herausgezogen werden kann. Die Festigkeiten der Klebungen prüft man von Hand (Trennversuch).

**Versuch 9a** Flüssigen Schmelzklebstoff trägt man auf Holzbrettchen auf und wartet 1, 1,5 und 2 Minuten bis zum Zusammenfügen mit einem anderen Holzbrettchen. Nach etwa 30 Minuten wird die Festigkeit der Klebungen von Hand geprüft.

## Versuch 10: Klebstoffe können organische Lösungsmittel enthalten

**Geräte** Magnesiumrinne, Reagenzglas, Reagenzglaslampe, Reagenzglashalter, Brenner

**Chemikalien/Materialien** Lösungsmittelhaltiger Klebstoff, z. B. Pattex® oder Uhu® greenit

**Warnhinweise** Raum gut lüften! Unter dem Abzug arbeiten!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen!

a) Man tropft etwas lösungsmittelhaltigen Klebstoff (ca. 3 g) auf eine Magnesiumrinne und hält sie mit Hilfe der Klammer in die Brennerflamme, so dass sich der Klebstoff entzündet.

b) Man gibt etwas Klebstoff (ca. 3 g) in das Reagenzglas, hält es in die Brennerflamme und erhitzt vorsichtig. Dabei versucht man, die entweichenden Dämpfe zu entzünden.

## Versuch 11: Gelöste Kunststoffe als Klebstoff

**Geräte** 4 Reagenzgläser, Reagenzglasgestell, 4 kleine Etiketten, Bleistift o. Ä., 4 Korkstopfen, 2 Glasplatten, Messer oder Zange, Pinsel

**Chemikalien/Materialien** Polystyrol (PS), Polymethylmethacrylat (PMMA), Aceton oder Butylacetat

**Warnhinweise** Aceton und Butylacetat sind leicht entzündlich! Alle Flammen löschen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) der verwendeten Lösungsmittel von der Gefahrstoffverordnung auf die Arbeitsblätter übertragen!

### 1. Herstellung des Klebstoffs

Die vier Reagenzgläser werden etwa 2 cm hoch mit einem der Lösungsmittel gefüllt. Dann gibt man 3 etwa erbsengroße Stücke des jeweiligen Kunststoffs hinein und beschriftet die Gläser entsprechend. Man verschließt sie mit den Korkstopfen und lässt sie bis zum nächsten Tag stehen. Man schüttelt etwas und verdünnt evtl. noch mit dem entsprechenden Lösungsmittel. Jetzt gießt man die beiden Klebstoffe aus zwei der Reagenzgläser auf Glasplatten und lässt das Lösungsmittel unter dem Abzug verdunsten.

### 2. Kleben

Die jeweils zurückbleibenden Kunststoffe werden von den Glasplatten abgetrennt, in Stücke geschnitten und mit dem entsprechenden in Reserve gehaltenen Klebstoff geklebt. Nicht mehr benötigten Klebstoff gießt man ebenfalls auf Glasplatten und lässt das Lösungsmittel unter dem Abzug verdunsten.

### Versuch 12: Ein einfacher Vielzweckklebstoff

**Geräte** Becherglas (100 ml), Glasrührstab, Waage, Messzylinder

**Chemikalien/Materialien** Polyvinylacetat (PVAc), Ethylacetat, Papier, Pappe, Stoffreste  
Kunststoffplättchen, ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm,  
Holzbrettchen, ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm,  
Metallplättchen, ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm

**Warnhinweise** Ethylacetat ist leicht brennbar!  
Alle Flammen löschen! Versuch unter dem Abzug durchführen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von Ethylacetat von der Gefahrstoffverordnung auf die Arbeitsblätter übertragen!

In das Becherglas füllt man 30 ml Ethylacetat und löst unter Umrühren 8 g Polyvinylacetat darin auf. Evtl. muss man zunächst etwas quellen lassen. Mit verschiedenen Materialien werden Klebversuche durchgeführt.

### Versuch 13: Nachweis von Polyvinylacetat in Holzleim

**Geräte** Schutzbrille, 3 Reagenzgläser, Reagenzglasklammer, Reagenzglasständer, Brenner, Spatel, Siedesteinchen

**Chemikalien/Materialien** Holzleim, z. B. Ponal® oder Uhucoll®, Polyvinylacetat (PVAc)-Pulver, verd. Natronlauge (etwa 1%ig), Eisen(III)-chlorid, destilliertes Wasser

**Warnhinweise** Natronlauge verursacht Verätzungen! Schutzbrille tragen! Gefahr des Siedeverzuges! Siedesteinchen verwenden!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der Klebstoffe, für die verwendeten Chemikalien von der Gefahrstoffverordnung auf die Arbeitsblätter übertragen!

Das erste Reagenzglas wird etwa zu 1/3 mit dest. Wasser gefüllt, in das man eine Spatelspitze Holzleim fügt und durch leichtes Schütteln auflöst, anschließend gibt man eine Spatelspitze Eisen(III)-chlorid dazu und schüttelt kurz.

Das zweite Reagenzglas wird etwa zu 1/3 mit verd. Natronlauge gefüllt, zu der man ebenfalls eine Spatelspitze Holzleim und Siedesteinchen hinzufügt. Vorsichtig schüttelt man und erhitzt kurz in der Brennerflamme. Nach dem Abkühlen wird mit einer Spatelspitze Eisen(III)-chlorid vermischt.

Dieser Versuch wird mit Polyvinylacetat wiederholt.

### Versuch 14: Herstellen und Prüfen einer Polyvinylalkohol-Lösung

**Geräte** Becherglas (100 ml), Glasrührstab, Dreifuß, Wärmeschutznetz, Brenner, Thermometer (bis 100 °C), Messzylinder  
Waage, Pinsel

**Chemikalien/Materialien** Polyvinylalkohol (PVA), Papierstreifen, Wasser

**Durchführung** In das Becherglas füllt man 50 ml Wasser und erwärmt auf ca. 85 °C. Anschließend werden etwa 3 g Polyvinylalkohol dazugegeben und unter Umrühren aufgelöst. Den entstandenen Klebstoff trägt man dünn auf Papier auf und führt entsprechende Klebversuche durch.

## Versuch 15: Wirkungsweise und Eigenschaften der Sekundenklebstoffe

**Geräte** Messer

**Chemikalien/Materialien** Sekundenklebstoffe (Cyanacrylsäureester), z. B. Pattex® Blitz-Kleber, Uhu® Sekundenkleber oder Loctite® Universal Kleber, Kunststoffplättchen (PVC\*, PMMA\* oder ABS\*), ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm  
Gummistücke, z. B. aus einer Gummischnur zurechtschneiden, Metallplättchen (Al, Fe) nicht entfettet, ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm  
Metallplättchen (Al, Fe) entfettet, Maße: siehe oben, Aceton

**Warnhinweise** **Vorsicht beim Umgang mit Sekundenkleber! Sekundenkleber können Hautverklebungen verursachen! Hinweise auf der Klebstoffverpackung beachten! Aceton bereithalten! Raum gut lüften! Achtung! In der S I den Versuch nicht als Schülerversuch durchführen lassen!**

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) des verwendeten Lösungsmittels aus der Gefahrstoffverordnung und der eingesetzten Klebstoffe von den Verpackungen auf die Arbeitsblätter übertragen!

Auf ein Kunststoffplättchen trägt man 1 Tropfen Sekundenklebstoff auf, legt ein anderes Kunststoffplättchen darüber und drückt kurz fest. Ebenso verfährt man mit den Gummistücken und mit den Metallplättchen.

Man prüft die Klebstellen insbesondere bei den entfetteten und nicht entfetteten Metalloberflächen. Festigkeiten werden nach 1, 3, 10 und 30 Minuten und 24 Stunden geprüft.

## Versuch 16: Wirkungsweise und Verwendung von Epoxidharzklebstoffen

**Geräte** Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Mischwanne, Pappe oder dicke Polyethylenfolie, Rührstab, Wäscheklammern

**Chemikalien/Materialien** Epoxidharz, z. B. Pattex® Kraft-Mix, Harz oder Uhu® plus, Harz, Kalthärter, z. B. Pattex® Kraft-Mix, Härter oder Uhu® plus, Härter, Kunststoffplättchen (kein Polyethylen oder Polypropylen!), ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm, Metallplättchen, ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm, Schleifpapier, Waschbenzin (zum Entfetten)

**Warnhinweise** **Hinweise des Herstellers beachten! Hautkontakt vermeiden! Raum gut lüften! Dämpfe nicht einatmen! Waschbenzin ist leicht entzündlich! Alle Flammen löschen! Achtung! In der S I den Versuch nicht als Schülerversuch durchführen lassen!**

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe und für Benzin von der Gefahrstoffverordnung auf die Arbeitsblätter übertragen!

Zuerst werden die Werkstoffe angeraut und entfettet. Dann mischt man das Epoxidharz mit dem Härter in der Mischwanne, auf Pappe oder dicker Polyethylenfolie im jeweils angegebenen Verhältnis gut durch, trägt den Klebstoff dünn auf die Werkstoffe auf und fügt die Teile zusammen, Überlappungslänge: 1,2 cm. Die Klebstellen werden z. B. mit Wäscheklammern fixiert. Aushärtungszeit beachten! Nach dem Aushärten prüft man die Klebungen von Hand auf Festigkeit. **Vorsicht!** Hände durch Stofflappen schützen.

\* PVC = Polyvinylchlorid  
PMMA = Polymethylmethacrylat (Acrylglas)  
ABS = Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer

## Versuch 17: Herstellen und Prüfen von Polyurethan-Klebstoffen

**Geräte** Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Pappbecher, Glasrührstab, Alufolie oder Polyethylenfolie, Waage, Stoppuhr

**Chemikalien/Materialien** Diisocyanat, z. B. Pattex® Montage Füllkleber, Härter, Polyalkohol, z. B. Pattex® Montage Füllkleber, Harz, Kunststoffplättchen mit angerauter Oberfläche (kein Polyethylen oder Polypropylen), ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,5 cm, Schleifpapier

**Warnhinweise** Pattex® Montage Füllkleber enthält Diisocyanate. Hinweise des Herstellers beachten! Kontakt mit Augen, Schleimhaut und Haut vermeiden. Von Kindern fern halten. Bei Berührung mit den Augen gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren. Bei Berührung mit der Haut sofort mit viel Wasser abwaschen. Alufolie oder Polyethylenfolie als Arbeitsunterlage verwenden. **Achtung!** In der S I den Versuch **nicht** als Schülerversuch durchführen lassen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen!

Harz und Härter werden im angegebenen Mischungsverhältnis (2:1) auf der genannten Unterlage gemischt und gut umgerührt. Dann trägt man den Klebstoff dünn auf die Fügeflächen zweier Kunststoffplättchen auf, legt die Füge-teile mit den Klebflächen übereinander (Überlappungslänge: 1,2 cm) und drückt kurz fest, gegebenenfalls fixieren. Dann lässt man den Klebstoff aushärten. Die Topfzeit der Harz/Härter-Mischung beträgt 8 bis 10 Minuten. Die Aushärtezeit beträgt ca. 5 Stunden. Nach dem Aushärten kann man Trennversuche von Hand durchführen. **Vorsicht!** Hände durch Stofflappen schützen!

## Versuch 18: Melaminharz-Klebstoff

**Geräte** Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Reagenzglas, Reagenzglasklammer, Reagenzglasständer, Brenner, Minipresse oder Bügeleisen, Trockenschrank, Messzylinder, Waage, Glasrührstab

**Chemikalien/Materialien** Melamin (2,4,6-Triamino-1,3,5-triazin), Formaldehyd-Lösung, 35%ig, verd. Natronlauge (ca. 4%ig), verd. Schwefelsäure (ca. 2%ig), Indikatorpapier, Furnierholzstreifen

**Warnhinweise** Beim Arbeiten mit Natronlauge, Schwefelsäure und Formaldehyd-Lösung Schutzbrille und Schutzhandschuhe tragen! Formaldehyd steht im Verdacht, krebserregend zu sein! Unter dem Abzug arbeiten! **Achtung!** In der S I **nicht** als Schülerversuch durchführen lassen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) der genannten Chemikalien von der Gefahrstoffverordnung auf die Arbeitsblätter übertragen!

In einem Reagenzglas setzt man 5 ml einer schwach alkalischen Formaldehyd-Lösung an (pH-Wert etwa 7-8) und fügt 2,5 g Melamin hinzu. Dann wird vorsichtig mit kleiner Flamme erwärmt, bis sich das Melamin gelöst hat und die Masse etwas zähflüssig geworden ist. Nach dem Abkühlen säuert man mit verd. Schwefelsäure (pH-Wert etwa 6) an und erhitzt erneut kurz, bis die Masse zähflüssig wird. Furnierholzstreifen werden mit der Masse bestrichen und in der Presse aufeinander geschichtet. Dann wird gut zusammengepresst. Im Trockenschrank lässt man den Klebstoff bei etwa 130 °C aushärten. Zusammenpressen und Aushärten können auch mit einem heißen Bügeleisen (Einstellung Leinen) vorgenommen werden.



## Versuch 19: Harnstoffharz-Klebstoff

**Geräte** Schutzbrille, Messzylinder, Schutzhandschuhe, Waage, Reagenzglas, Glasrührstab, Reagenzglasklammer, Pinsel, Reagenzglasständer, Pipette, Brenner, Siedesteinchen, Minipresse oder Bügeleisen, Becherglas (400 oder 500 ml), Trockenschrank

**Chemikalien/Materialien** Harnstoff, Formaldehyd-Lösung, ca. 35%ig, verd. Natronlauge, ca. 4%ig, Ammoniumchlorid-Lösung (gesättigt), Furnierholzstreifen, Holzbrettchen

**Warnhinweise** Beim Arbeiten mit Natronlauge und Formaldehyd-Lösung Schutzbrille und Schutzhandschuhe tragen! Formaldehyd steht im Verdacht, krebserregend zu sein. Unter dem Abzug arbeiten! Vorsicht beim Erhitzen! Siedeverzug möglich! Siedesteinchen verwenden! **Achtung!** In der S I **nicht** als Schülerversuch durchführen lassen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) der genannten Chemikalien von der Gefahrstoffverordnung auf die Arbeitsblätter übertragen!

In ein Reagenzglas gibt man 3 g Harnstoff und fügt 3 ml Formaldehyd-Lösung hinzu. Durch Erwärmen wird der Harnstoff aufgelöst. Dann fügt man 1 bis 2 Siedesteinchen und ca. 15 bis 20 Tropfen verd. Natronlauge hinzu. Unter vorsichtigem Schütteln wird leicht erhitzt, bis die Flüssigkeit zähflüssig wird. Einen Furnierholzstreifen bestreicht man dünn mit dem entstandenen Klebstoff. Ein Holzbrettchen tränkt man mit Ammoniumchlorid-Lösung. Die beiden Teile werden in der Presse mit den Klebflächen übereinander gelegt und fest zusammengepresst. Den Klebstoff lässt man im Trockenschrank bei 120 bis 130 °C aushärten. Pressen und Aushärten können auch mit einem heißen Bügeleisen (Einstellung Leinen) vorgenommen werden.

## Versuch 20: Bestimmen der offenen Zeit von Kontaktklebstoffen

**Geräte** Ziehspachtel, Schere, Lineal, Bleistift, Uhr, Massestück (m = 1 kg)

**Materialien** Kontaktklebstoff, z. B. Pattex®, Kraftkleber oder Uhu® greenit, Zeichenkarton (DIN A5), Gummipättchen

**Warnhinweis** Alle Flammen löschen! Raum gut lüften!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) des verwendeten Klebstoffs von der Verpackung auf die Arbeitsblätter übertragen!

Den Zeichenkarton unterteilt man mit Hilfe von Bleistift und Lineal in 5 mm breite Streifen. Mit dem Ziehspachtel trägt man einen dünnen Klebstofffilm (Dicke etwa 300 µm) auf. Nach dem Abdunsten des Lösungsmittels (nach 10 bis 15 Minuten) schneidet man in Abständen von 15 Minuten jeweils einen Streifen ab und halbiert ihn. Die Streifenstücke werden mit den Klebstoffschichten über Kreuz aufeinander gelegt. Über die Klebfläche legt man ein Gummipättchen und belastet es mit dem Massestück 10 Sekunden. Danach wird versucht, die zusammengesetzten Hälften zu trennen. Sobald dies ohne Materialriss möglich ist, ist die offene Zeit des Kontaktklebstoffs beendet.

## Versuch 21: Prüfen der Anfangsfestigkeit von Kontaktklebstoffen

**Geräte** Zahnpachtel (z. B. aus dem Baumarkt), Tapetenwalze o. Ä., Stecheisen, Schraubstock

### Materialien

Schichtpressstoffplatte, ca. 12 cm x 12 cm, Spanholzplatte, ca. 12 cm x 12 cm, Oberflächen sollten staub- und fettfrei sein. Kontaktklebstoff, z. B. Pattex® Kraftkleber, Pattex® transparent oder Uhu® greenit, Vielzweckklebstoff

**Warnhinweise** Alle Flammen löschen! Raum gut lüften! Vorsicht beim Umgang mit dem Stecheisen! **Achtung!** In der S I **nicht** als Schülerversuch durchführen lassen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen!

Den Kontaktklebstoff trägt man mit einem Zahnpachtel auf die Rückseite der Schichtpressstoffplatte und auf die Spanholzplatte auf. Nach einer Abluftzeit von etwa 15 Minuten werden die Klebteile zusammengefügt und miteinander verpresst, indem man die Walze unter möglichst hohem Druck über die aufgeklebte Schichtpressstoffplatte rollt. Die geklebten Platten werden in einem Schraubstock befestigt. Dann versucht man, die zusammengesetzten Teile mit dem Stecheisen wieder zu trennen. Der Versuch wird mit einem Vielzweckklebstoff wiederholt.

## Versuch 22: Festigkeiten wasserbasierter Dispersions-Holzleime in Abhängigkeit von der Abbindezeit

**Geräte** Pinsel, Wäscheklammern, Lineal, Uhr

**Materialien** Holzleim, z. B. Ponal® expreß oder Uhucoll®, Vielweckklebstoff, z. B. Uhu® flinke Flasche oder Tesa® Vielweckkleber, Weichholzbrettchen, ca. 10 cm x 2,5 cm x 0,5 cm

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen!

Drei Weichholzbrettchen werden an den vorgesehenen Klebflächen (Überlappungslänge 1,2 cm) dünn mit Holzleim bestrichen und mit anderen Holzbrettchen verklebt. Nach dem Zusammenfügen werden die Klebkörper mit Wäscheklammern fixiert. Die Festigkeiten der Klebungen werden nach 10, 20, 60 Minuten, 3 Stunden, 1 Tag von Hand geprüft oder in einer Zerreißvorrichtung gemessen. Der Versuch wird mit einem Vielweckklebstoff wiederholt. Man vergleicht die Ergebnisse miteinander.

## Versuch 23: Reaktionsklebstoffe (Topfzeit, Reaktionswärme)

**Geräte** Thermometer (bis 250 °C), Glasrührstab, Uhr, Mischwanne mit Löffel

**Materialien** Pattex® Stabilit express, Uhu® plus schnellfest, Alufolie, Papiertuch

**Warnhinweise** Hinweise des Herstellers und Gefahrensymbole auf den Packungen beachten! Alle Flammen löschen! Raum gut lüften! Wegen der starken Reaktionsbeschleunigung bei erhöhten Temperaturen sollte dieser Versuch nur mit kleinen Klebstoffmengen durchgeführt werden. **Achtung!** In der S I den Versuch **nicht** als Schülerversuch durchführen lassen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen!

Die Eintauchspitze des Thermometers wird gut mit Alufolie umwickelt. Zwei Messlöffel Härterpulver von Pattex® Stabilit express gibt man in die entsprechende Mischwanne, füllt mit dem Harz (ca. 3 g) bis zum Rand auf und rührt gut durch, bis ein gleichmäßiges Gemisch entstanden ist. Das Thermometer wird in das Gemisch eingetaucht, nach ca. 3 Minuten wird die Temperatur abgelesen und notiert. Um herauszufinden, wie lange das Gemisch nach dem Anrühren verarbeitbar ist, wird ein Glasrührstab in Abständen von jeweils 1 Minute in die Mischung getaucht und wieder herausgezogen. Zwischendurch säubert man den Glasstab mit dem Papiertuch. Kurz bevor das Gemisch hart wird, wird die Temperatur erneut gemessen. Der Versuch wird mit Uhu® plus schnellfest wiederholt.

## Versuch 24: Schrauben sichern mit anaerob härtendem Klebstoff

**Geräte** Schutzbrille, Schutzhandschuhe

**Chemikalien/Materialien** anaerob härtender Klebstoff (mittelfest), z. B. Loctite 542, DELO ML 5327, anaerob härtender Klebstoff (niedrigfest), z. B. Loctite 5331, DELO ML 5198 Stahlschrauben/-muttern unterschiedlicher Größe Edelstahlschrauben/-muttern unterschiedlicher Größe, Schraubenschlüssel, Butylacetat (zum Entfetten)

**Warnhinweise** Hinweise des Herstellers beachten! Hautkontakt vermeiden! Raum gut lüften! Dämpfe entzündlich! Alle Flammen löschen! **Achtung!** In der S I **nicht** als Schülerversuch durchführen lassen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen.

Zunächst werden die Schrauben und Muttern mit Butylacetat entfettet. Auf jede Schraube werden am Gewindeende 2 bis 3 Tropfen Klebstoff aufgetragen und die dazugehörige Schraubenmutter mit einigen Drehungen aufgeschraubt. Nach 5 Minuten wird in regelmäßigen Abständen vorsichtig manuell geprüft, ob und wie der Klebstoff schon „angezogen“ hat. Je Werkstoff/Klebstoff-Kombination wird mindestens eine Verschraubung mindestens 24 Stunden härten gelassen und dann mit einem passenden Schraubenschlüssel geprüft.

## Versuch 25: Aushärtung von feuchtigkeitsvernetzenden 1-K-Polyurethan-Klebstoffen

**Geräte** Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Kunststoffunterlagen

**Chemikalien/Materialien** feuchtigkeitsvernetzender 1-K-Polyurethan-Klebstoff, z. B. Sikaflex 255, Kartuschen 500 ml (Klebstoff), Kartuschenpistole (manuell), Kunststoffunterlage (z. B. 50 x 50 cm)

**Warnhinweise** Hinweise des Herstellers beachten! Hautkontakt vermeiden! Raum gut lüften! **Achtung!** In der SI **nicht** als Schülerversuch durchführen lassen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen.

Auf die Unterlage werden 4 Klebstoffraupen (Höhe: ca. 1 cm/Breite: ca. 2 cm) von jeweils etwa 20 cm Länge aufgebracht. Die aushärtenden Klebstoffraupen werden, um die Hautbildungszeit zu bestimmen und den Aushärtungsfortschritt zu untersuchen, täglich mit einem Messer durchgeschnitten. Parallel dazu wird die Raumtemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit dokumentiert.

## Versuch 26: Aushärtung von feuchtigkeitsvernetzenden 1-K-Siliconen

**Geräte** Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Stahlbleche, Edelstahlbleche, Platten aus Glas oder durchsichtigem Kunststoff, Kunststoffunterlage

**Chemikalien/Materialien** 1-K-Silicon (essigsäure-  
abspaltend), 1-K-Silicon (neutralvernetzend),  
Stahlbleche (ca. 20 x 100 mm),  
Edelstahlbleche (ca. 20 x 100 mm),  
Platten aus Glas oder durchsichtigem Kunststoff  
(ca. 200 x 100 mm),  
Butylacetat (zum Entfetten/Reinigen), Testtinten

**Warnhinweise** Hinweise des Herstellers beachten! Hautkontakt vermeiden! Raum gut lüften! **Achtung!** In der SI **nicht** als Schülerversuch durchführen lassen!

**Durchführung** Gefahrensymbole sowie Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) von den Verpackungen der verwendeten Klebstoffe auf die Arbeitsblätter übertragen.

Auf je ein Stahl- bzw. Edelstahlblech wird essigsäureabspaltendes Silicon als dünne Raupe aufgetragen und mit einer durchsichtigen Platte gefügt. Auf weitere Edelstahlbleche wird jeweils eines der beiden Silicone aufgetragen und offen ausgehärtet. Mit Testtinten wird die Beschichtbarkeit der ausgehärteten Silicone untersucht und dokumentiert.

## Hinweise und Erläuterungen zu den Versuchen

**Zu Versuch 1** Der in den meisten Klebstoffen enthaltene Kohlenstoff lässt sich als Kohlendioxid durch Trübung des Kalkwassers (Bildung von schwer löslichem Calciumcarbonat) nachweisen. Damit ist auch gleichzeitig gezeigt, dass Klebstoffe auf organischen Verbindungen basieren.

**Zu Versuch 2** Löst man Klebstoffe in entsprechenden Lösungsmitteln (hier: Wasser), so lassen sich die Makromoleküle durch Lichtstreuung nachweisen. Diese Erscheinung, auch Tyndalleffekt genannt, tritt nur bei Makromolekülen auf, deren Molekularmasse  $>10^4$  ist.

**Zu Versuch 3** Die plan geschliffenen Platten lassen sich kaum bzw. nur mit erheblichem Kraftaufwand voneinander trennen. Sie sind „zusammengeklebt“, und zwar mit dem „Klebstoff“ Wasser, der aber nicht aus Makromolekülen aufgebaut ist. Zwischen den Wassermolekülen wirken allerdings erhebliche Anziehungskräfte (vgl. auch Versuch 4: Oberflächenspannung), die aber nur eine sehr geringe Reichweite aufweisen. Die freie Beweglichkeit der kleinen Wassermoleküle bewirkt andererseits, dass

die beiden Platten parallel zur Berührungsebene verhältnismäßig leicht verschoben und schließlich getrennt werden können.

**Zu Versuch 4** Polyethylen weist in der Reihe der genannten Werkstoffe die geringste Oberflächenenergie auf und ist unvorbehandelt schlecht klebbar.

**Zu Versuch 5** Casein quillt unter Laugeneinwirkung schnell auf. Es bildet eine viskose Masse: Leim. Durch Zugabe von Aluminiumsulfat o. Ä. kann die Wasserbeständigkeit erhöht werden.

**Zu Versuch 6** Stärke quillt in heißem Wasser. Es entsteht ein Kleister, der beim Erkalten nachdickt und evtl. mit Wasser weiter verdünnt werden muss. Die Salicylsäure dient als Konservierungsmittel.

**Zu Versuch 7** Es zeigt sich etwa der gleiche Effekt wie in Versuch 6. Da die überschüssige Lauge schädigend auf Substrate wirken kann, muss neutralisiert werden.

**Zu Versuch 8** Methylcellulose ist ein Ether, der durch teilweise Methylierung der Hydroxyl-Gruppen der Cellulose hergestellt wird. Methylcellulose löst sich in Wasser, in den weiteren angegebenen organischen Lösungsmitteln jedoch nicht.

**Zu Versuch 9** Schmelzklebstoffe basieren auf thermoplastischen Polymeren, beim Erwärmen werden sie flüssig, beim Abkühlen wieder fest, ohne sich dabei chemisch zu verändern.

**Zu Versuch 10** Zunächst brennt das flüchtige Lösungsmittel (bläulich-gelbe Flamme), dann der Grundstoff (gelbe, rußende Flamme).

**Zu Versuch 11** Durch das Verdunsten des Lösungsmittels entsteht wieder das Gefüge des jeweiligen Kunststoffs, der Klebstoff bindet ab.

**Zu Versuch 12** Polyvinylacetat ist ein Basisrohstoff industriell gefertigter Vielzweckklebstoffe. Zum Lösen verwendet man häufig Gemische aus Ethylacetat, Aceton und ggf. Anteilen von Ethanol.

**Zu Versuch 13** Im Reagenzglas zeigt sich die braun-beige Farbe von PVAc-Holzleim und dem Hexaaqua-Eisen(III)-Komplex. Dieser Versuch dient als Kontrollversuch. Mit Hilfe von Natronlauge wird das Polyvinylacetat verseift. So ergibt sich im Reagenzglas 2 und 3 eine kräftige Rotbraunfärbung, die durch den Eisen(III)-Acetat-Komplex hervorgerufen wird.

**Zu Versuch 14** Polyvinylalkohol ist ein Thermoplast, der durch alkalische Verseifung von Polyvinylacetat hergestellt wird. Da Polyvinylalkohol häufig noch Anteile von Acetyl-Gruppen aufweist, ist er in kaltem Wasser in der Regel nur schlecht löslich.

**Zu Versuch 15** Die Aushärtung des Cyanacrylat-Klebstoffs wird durch Polymerisation bewirkt, ausgelöst durch Hydroxid-Ionen oder basische Stoffe. An dieser Stelle sollte unbedingt auf den richtigen Umgang mit Sekundenklebern eingegangen werden: Hautkontakt vermeiden. Klebstoff von der Haut, unmittelbar nach der Benetzung, mit Aceton abtupfen, später mit warmem Seifenwasser ablösen. Dämpfe nicht einatmen. (Vgl. auch Info-Blatt „Information zur ersten Hilfe und Unfallbehandlung bei Verklebungen mit Cyanacrylat-Klebstoffen (Sekundenkleber)“, Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf)

**Zu Versuch 16** Epoxidharze entstehen durch Umsetzung von aromatischen Dihydroxy-Verbindungen mit Epichlorhydrin. Durch Polyaddition bilden sich zunächst linear aufgebaute zähflüssige Harze. Durch Zugabe von Aminen oder Polyamidoaminen werden die Harze in weiteren Polyadditionsreaktionen vernetzt und härten aus.

**Zu Versuch 17** Dieser Klebstoff härtet ebenfalls durch eine Polyadditionsreaktion aus.

**Zu Versuch 18** Die Reaktion läuft stufenweise ab: Als Zwischenprodukt bildet sich u. a. Hexamethylolmelamin, das durch Druck und Wärme unter Wasserabspaltung und Bildung von Etherbrücken zum vernetzten Melaminharz kondensiert und somit aushärtet.

**Zu Versuch 19** Die Reaktion läuft ebenfalls stufenweise ab: Zunächst entsteht Methylolharnstoff. Daraus bilden sich unter Abspaltung von Wasser zunächst lineare und schließlich vernetzte Harnstoffharzmoleküle. Ammoniumchlorid beschleunigt die Reaktion: Ammoniumchlorid reagiert in wässriger Lösung sauer. Die vorhandenen Wasserstoff-Ionen beschleunigen katalytisch den Aushärtungsvorgang.

**Zu Versuch 23** Das Aushärten ist mit einem Temperaturanstieg verbunden, d. h., es handelt sich um eine exotherme Reaktion.

**Zu Versuch 24** Anaerob härtende Klebstoffe härten unter Metallionenkontakt und Sauerstoffausschluss. Die Verschraubung ermöglicht die Polymerisation in idealer Form. Die Aushärtung der Edelstahlverschraubung erfolgt aufgrund der geschlossenen Chromoxid-Oberflächenschicht (Passivierungsschicht) langsamer und/oder unvollständig. Der notwendige Metallionenkontakt ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ) kommt nicht bzw. zu selten zustande. Ggf. erwärmen (30 Minuten/120°C). Lässt eine Schraubensicherung sich bei Raumtemperatur auch mit einem Schraubenschlüssel nicht lösen, so ist die Verschraubung auf ca. 150°C zu erwärmen und dann zu lösen (Erweichung des Klebstoffs).

**Zu Versuch 25** Durch die Luftfeuchtigkeit werden endständige Isocyanat-Gruppen in Amino-Gruppen umgewandelt, die dann mit verbliebenen Isocyanat-Gruppen reagieren und den Klebstoff zum Elastomeren aushärten. Die Aushärtung erfolgt anisotrop, d. h. von außen nach innen, was durch das Durchschneiden der Klebstoffraupe nachvollzogen werden kann. Durch Variation von Temperatur und Luftfeuchtigkeit kann die Aushärtung und deren Geschwindigkeit beeinflusst werden.

**Zu Versuch 26** Das Essigsäure abspaltende Silicon erzeugt Korrosion auf dem Stahlblech. Aufgrund ihrer geringen Oberflächenspannung sind Silicone schwer lackierbar bzw. beschichtbar.

## 1-K-Klebstoff

Einkomponenten-Klebstoff. Hierbei handelt es sich um einen Klebstoff, der unter der Einwirkung von Temperatur, Licht, Feuchtigkeit oder dem Ausschluss von Luft hart wird und hierzu keine zweite Substanz als Zusatz benötigt. Deshalb brauchen 1-K-Klebstoffe vor der Verarbeitung nicht angemischt zu werden. Die 1-K-Klebstoffe werden daher in nur einem Behältnis (Gebinde) angeliefert.

## 2-K-Klebstoff

Bezeichnung für Zweikomponenten-Klebstoffe. Dies sind Klebstoffe, die zur Entfaltung ihrer Klebwirkung mit anderen Stoffen zusammengebracht werden müssen. Hierzu werden sie in mindestens 2 Behältnissen (Gebinden) angeliefert und müssen in der Regel vor der Verarbeitung gemischt werden.

## Adhäsion

Bindungskräfte zwischen der Oberfläche des Fügeteils und der Klebstoffschicht. Diese Oberflächenhaftungskräfte sind für die Festigkeit der Klebung im Zusammenspiel mit den inneren Kräften der Klebung (Kohäsionskräften) entscheidend. **Beispiel:** Ein an einer Fensterscheibe anhaftender Wassertropfen wird durch eine Kraft (Anhaftkraft) am Herunterfließen gehindert.

## Applikation

Auftrag oder Einsatz des Klebstoffs während des Klebvorganges.

## Arbeitsplatzgrenzwert

Für eine Reihe von Stoffen, insbesondere von Gasen, flüchtigen Verbindungen, die als Dämpfe in der Umgebungsluft vorliegen, und für Aerosole und Stäube sind durch ein unabhängiges Expertengremium Obergrenzen für die Exposition am Arbeitsplatz festgelegt (maximale Arbeitsplatzkonzentration, MAK-Wert). Diese Konzentrationsbegrenzungen werden danach festgelegt, dass bei Einhaltung der Grenzwerte gesundheitliche Risiken als ausgeschlossen angesehen werden können. Die MAK-Werte werden durch Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) als Luftgrenzwerte in geltendes Recht überführt.

## Beizen

Oberflächenvorbereitungsverfahren bei Metallen: Hierzu werden die Füge Teile mit nicht oxidierenden Säuren (Salzsäure, verdünnte Schwefelsäure) behandelt, wodurch eine vorhandene Oberflächenschicht, nach längeren Einwirkungszeiten auch der Grundwerkstoff, abgetragen wird. Auf diese Art wird die Oberfläche der Füge Teile aufgeraut und aktiviert.

## Coronaverfahren

Methode zur Oberflächenvorbereitung von Kunststoffen: Aus Elektroden austretende Elektronen, die durch einen Lichtbogen „sichtbar“ werden, ionisieren Luftmoleküle ( $O_2$  und  $N_2$ ). Auf der Kunststoffoberfläche entstehen durch Einbau von derart aktivierten Sauerstoff-Atomen polare Strukturen, die die Benetzungs- und Haftungseigenschaften verbessern.

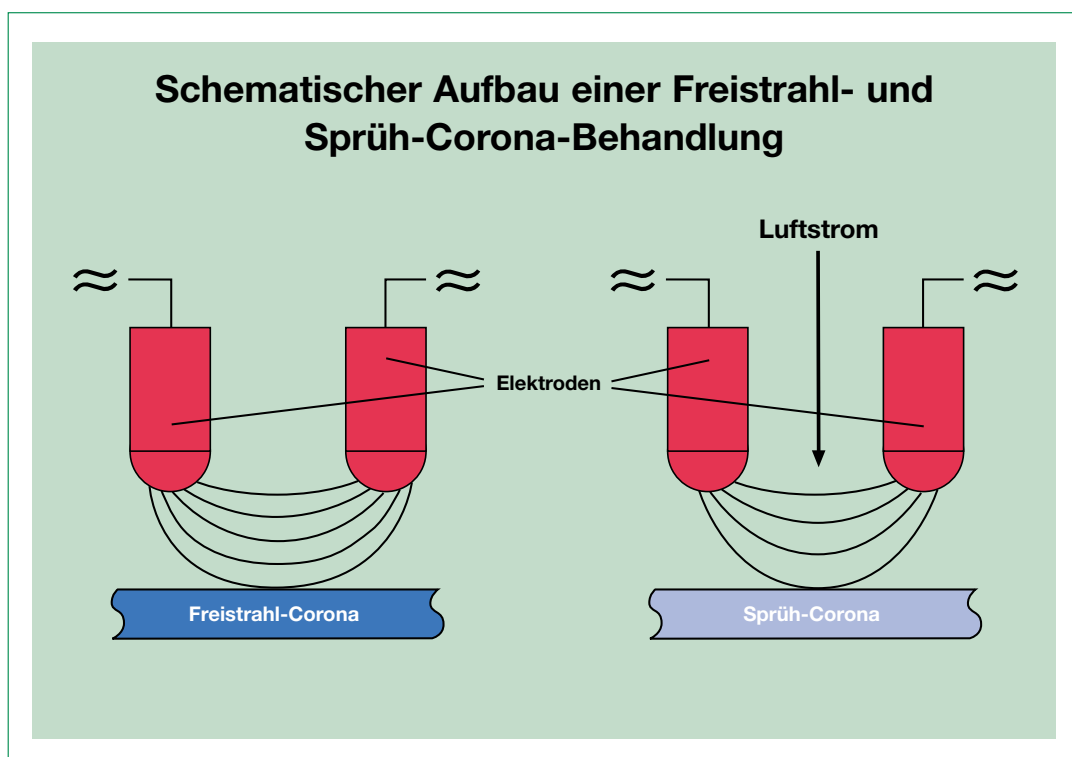


Abbildung 66



### Cw-Wert

Der dimensionslose Widerstandsbeiwert Cw beschreibt die aerodynamische Güte (Luftwiderstand) eines Körpers, die durch dessen Form bestimmt wird.

### Dauerbelastbarkeit

Die Dauerbelastbarkeit einer Klebung beschreibt die Spannung, mit der eine Klebung ohne Unterbrechung belastet werden kann, ohne dass es zu einer Beeinträchtigung des Verbundes kommt.

rensymbolen zu versehen (Abb. 67). Zusätzlich dazu sind die entsprechenden Gefahrensätze (R-Sätze) und Sicherheitsratschläge (S-Sätze) aufzuführen (Abb. 68). Für gefährliche Stoffe und Zubereitungen müssen Sicherheitsdatenblätter erstellt und gewerblichen, industriellen Verarbeitern bzw. dem Handel zur Verfügung gestellt werden.

### Exposition

Ein Stoff kann über verschiedene Aufnahmewege in den Körper gelangen. Die Kontaktmöglichkeiten

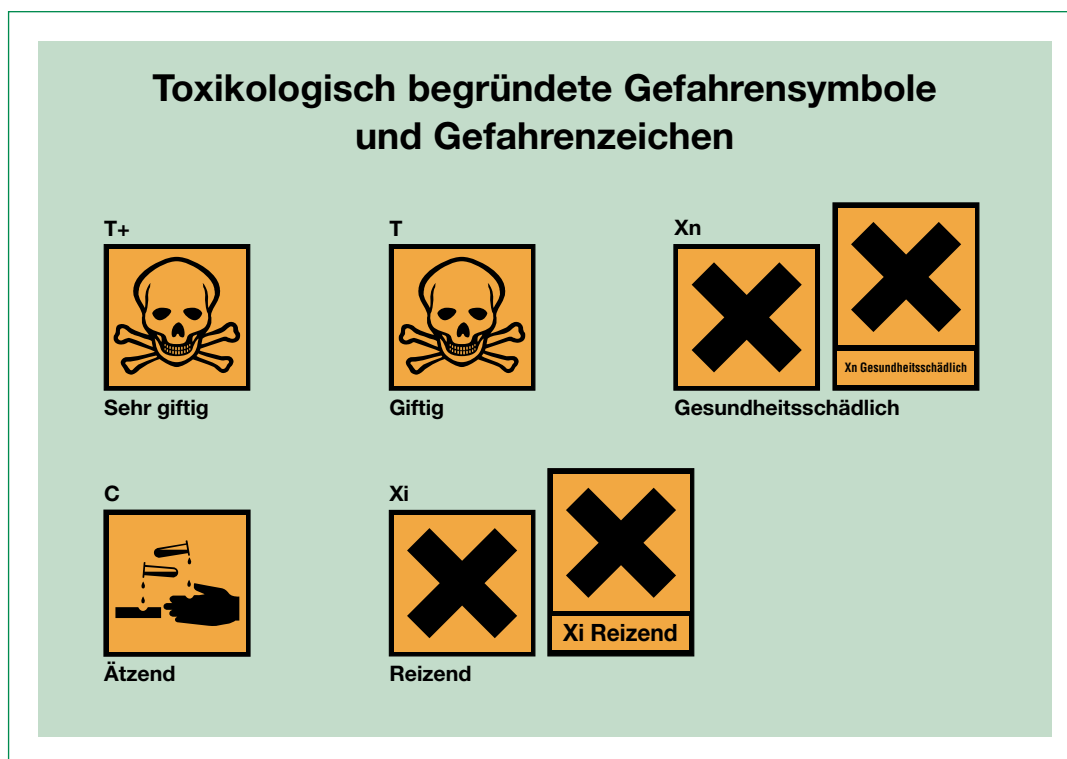


Abbildung 67

Sie liegt deutlich unter der maximalen (Zug-) Scher-/ Schubfestigkeit. So legt man zur Auslegung von Klebungen mit feuchtigkeitsvernetzenden 1-K-Polyurethanen 3 %, bei kalthärtenden 2-K-Epoxidharzklebstoffen 5 % und bei heißhärtenden 1-K-Epoxidharzklebstoffen 30 % der Anfangszugscherfestigkeit zugrunde.

### Einstufung/Kennzeichnung

Die vorgeschriebenen Untersuchungsmethoden, die Art der Ausführung, die Bewertung der Daten und die daraus resultierende Einstufung und Kennzeichnung von Gefährdungspotenzialen sind im Chemikalienrecht festgelegt. In der Europäischen Union werden Einstufung und Kennzeichnung, die Informationspflichten gegenüber dem Anwender sowie die Maßnahmen zum Umgang durch Richtlinien geregelt. Eine Vielzahl von Stoffen ist durch die EU rechtsverbindlich eingestuft und entsprechend zu kennzeichnen. In Deutschland sind die Richtlinien weitgehend in der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) in nationales Recht umgesetzt. Stoffe oder Zubereitungen mit einem Gefährdungspotenzial sind je nach dem Grad und der Art der Gefährdung mit Gefah-

(Aufnahmeweg, Exposition) von Stoffen sind das Verschlucken, der Kontakt mit der Haut (dermal) oder über die Schleimhäute (z. B. Auge) und durch Einatmen (Abb. 69). Die Kontaktmöglichkeiten sind von den physiko-chemischen Eigenschaften des Stoffes bzw. der Zubereitung sowie von den Verwendungs- und Verarbeitungsbedingungen abhängig.

Die verbreitetste Kontaktmöglichkeit besteht durch Exposition der Haut. Auch Gase, Dämpfe (in Luft gelöste Flüssigkeiten) und Aerosole (flüssige und feste Partikel in der Luft) können über die Umgebungsluft mit der Haut in Kontakt kommen. Durch Einatmen können Gase, Dämpfe, Flüssigpartikel und feste Partikel (Stäube) aus der Umgebungsluft aufgenommen werden.

### Fügeteile

Feste Körper, die mit anderen verbunden sind oder verbunden werden sollen.

### Gasphasenfluorierung

Oberflächenvorbehandlungsverfahren von Kunststoffen, das die Benetzbarkeit von Kunststoffen



## Expoxidharzzubereitung XYZ



**Xi = reizend**

Enthält Epoxidharz (MG:  $\text{Ø} \leq 700$ ). Hinweise des Herstellers beachten.

### Gefahrenhinweise:

- Reizt die Augen und die Haut. Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich.

### Sicherheitsratschläge:

- Darf nicht in die Hände von Kindern gelangen.
- Berührung mit der Haut vermeiden.
- Bei Berührung mit der Haut sofort mit viel Wasser und Seife abwaschen.
- Geeignete Schutzhandschuhe tragen.
- Bei Verschlucken sofort ärztlichen Rat einholen und Verpackung oder Etikett vorzeigen.

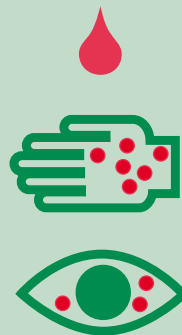
Postalisch ausreichende Hersteller-Adresse und Telefon-Nr.

Abbildung 68

## Exposition



Das Verschlucken eines Stoffes (oral)



Die Aufnahme über die Haut oder über die Schleimhäute (dermal)



Das Einatmen (inhalativ)

Abbildung 69  
Folie 36

verbessert und ihre Oberfläche aktiviert. Die Füge-teile werden einer Fluorgas-Stickstoff-Mischung (ca. 0,1 bis 5 % Fluor in Stickstoff) ausgesetzt, so dass Fluor-Atome in die Kunststoffoberfläche eingebaut werden, ohne dass hierbei die makromolekularen Strukturen zerstört werden.

### Gefährdungspotenzial

Mögliche unerwünschte Eigenschaften von Substanzen (Gefährdungspotenzial) werden auf der Basis von toxikologischen Untersuchungen beschrieben:

- akute Giftwirkungen, tödliche Dosis (LD50)
- Vergiftungserscheinungen durch wiederholte Aufnahme
- krebserzeugende Wirkung
- Auslösung von Erbschäden
- Verminderung der Fruchtbarkeit, Entwicklungsstörungen in der Schwangerschaft
- Hautreizungen/Verätzungen
- Reizungen der Schleimhäute, z. B. der Augen oder der Atemwege
- Verursachung von Allergien (Sensibilisierung) bzw. Auslösung allergischer Reaktionen

### Holzlaminaträger

Verschiedene Schichten aus Holz werden miteinander verklebt (laminiert). Aufgrund der geringen Dichte der Einzelschichten können sie gebogen und in dieser Form laminiert werden. Dadurch sind neue Designs möglich.

### Kataplasma

Bei dieser Prüfmethode befindet sich die Probe in einer geschlossenen Atmosphäre, so dass die gebildeten Korrosionsprodukte nicht abgeführt werden können. Die verklebte Probe wird mit einem wassergetränkten Wattebausch in eine Aluminiumfolie gewickelt und in eine Polyethylenfolie luftdicht eingeschweißt. Dann wird sie folgendem Prüfzyklus unterzogen:

21 Tage Lagerung bei 70 °C,

16 Tage Lagerung bei -30 °C.

Zwei Stunden nach Testende erfolgt die Ermittlung der Klebfestigkeit.

### MS-Polymere

Modifizierte Siloxane, sie entstehen bei der Aushärtung alkoxyisilanmodifizierter Polypropylenglykole durch Einwirkung von Feuchtigkeit unter Abspaltung von Alkohol.

### Niederdruckplasma

s. Plasmaverfahren

### Plasmaverfahren

Unter einem Plasma versteht man einen ionisierten Zustand eines Gases, in den es bei kontinuierlicher Zugabe von Energie gelangen kann. In diesem Zustand wird ein Teil der Gasmoleküle in positiv und negativ geladene Teilchen aufgespalten. Die Zahl der positiv und negativ geladenen Teilchen ist in einem Plasma gleich hoch, es ist elektrisch neutral. Die angelegte Wechselfrequenz beschleunigt die Teilchen. Bei genügender Beschleunigung werden beim Aufprall auf Kunststoffoberflächen chemische Bindungen aufgebrochen und die Oberfläche chemisch

Haftklebstoffe				
	Kautschuklösungen	Acrylatdispersionen	Schmelzklebstoffe	Acrylatlösungen
Tack (Klebrigkeit)	+	O	O	O
Schälfestigkeit	+	O	+	O
Scherfestigkeit RT	+	+	+	+
Scherfestigkeit bei erhöhter Temperatur	O	+	-	+
Stanzverhalten	O	+	O	+
Klebstoffaustritt	O	+	O	+
UV-Beständigkeit	-	+	-	+
Wärmebeständigkeit	O	+	O	+
Weichmacherverhalten	-	O	-	+
Farbe/Transparenz	O	+	O	+
Kälteverhalten	+	O	O	O
Feuchtigkeitsbeständigkeit	+	O	+	+
Wasserbeständigkeit	+	-	+	+

+ = herausragendes Eigenschaftsmerkmal    O = erfüllt übliche Erwartungen  
- = ungeeignet, wenn Einzeleigenschaft im vorgesehenen Anwendungsfall wichtig ist

Tabelle 7

### Kohäsion

Die Kräfte, die den Klebstoff innerlich zusammenhalten. Die Kohäsion beschreibt den Zusammenhalt von Molekülen (Klebstoffpolymeren). Grundlage dieser Kräfte sind Anziehungskräfte und Verklammerungen (Verknäuelungen) von Molekülen bzw. der Ketten von Kunststoff-Großmolekülen (Polymerketten).

### Kriechbeständigkeit

Die Fähigkeit eines Klebstoffs, über einen längeren Zeitraum gegenüber äußeren mechanischen Kräften zu bestehen und sich nicht oder kaum zu verformen.

### Laminieren

Schichtweises Verbinden von – meistens – großflächigen, flexiblen Fügeteilen (z. B. Folien, Gewebematten) mittels Klebstoff zu einem Verbundwerkstoff.

verändert. Je nach Auslegung des Plasmaverfahrens (Arbeitsgas, Druck, Energie) ergibt sich die Möglichkeit, Oberflächen zu reinigen (Plasmareinigung), zu aktivieren (Plasmaaktivierung) oder zu beschichten (Plasmapolymerisation). Eine Plasmavorbereitung wird schwerpunktmäßig bei polymeren Werkstoffen durchgeführt, ist aber zur Plasmareinigung und zur plasmapolymeren Beschichtung auch bei Metallen einsetzbar. Bei Plasmen werden im Allgemeinen die nicht thermischen (Niederdruck- bzw. Niedertemperaturplasmen) und die thermischen (Hochtemperaturplasmen) Verfahren unterschieden. Im Rahmen der Oberflächen-Vorbereitungen kommen vorwiegend die Niederdruck-Plasmaverfahren zum Einsatz. Ihre typischen Anwendungstemperaturen liegen zwischen ca. 30 bis 100 °C. Die Wirkung der Plasmabehandlung beschränkt sich dabei auf die oberflächennahen Bereiche in einer Tiefe von wenigen nm.

### Plastifizierung

(Weichmachung) bedeutet die Verschiebung des thermoplastischen Bereiches zu niederen Temperaturen – entweder durch eine Copolymerisation (innere Weichmachung) oder (was in der Praxis überwiegend angewandt wird) durch Zusatz von Weichmachern (äußere Weichmachung). Bei der äußeren Weichmachung treten die polaren Gruppen des kleinen, beweglichen Weichmachers mit den polaren Gruppen des Polymeren (Ausnahmen: Polyolefine, Kautschuk) in Wechselwirkung. Die Polymerketten werden dadurch aufgelockert und beweglicher; gleichzeitig nehmen Weichheit und Dehnung des weich gemachten Kunststoffes zu. Man spricht dabei auch von Scharnier- u. Abschirmweichmachern. Polar, d. h. dipolbildend, wirken vor allem die Sauerstoff-Atome der COOR-Gruppen; daher sind z. B. Dicarbonsäureester als Weichmacher besonders geeignet. In einigen Fällen kommen noch Phosphor- u. Schwefel-Atome dazu. (Kurzzeichen der Weichmacher vgl. auch DIN 7723)

### Plastisole

Klebstoff, bei dem PVC-Bestandteile in einem flüssigen Weichmacher dispergiert sind. Zum Härten des Klebstoffs wird nun die Temperatur auf ca. 150–160 °C erhöht. Nun nimmt der Weichmacher das PVC-Pulver in sich auf – der Klebstoff wird fest.

### Primer

Spezielle Zubereitungen (etwa stark verdünnte 10- bis 20%ige Lösungen des später verwendeten Klebstoffs), die auf frisch behandelte Oberflächen aufgebracht werden. Ziel: Verbesserung der Benetzung der Fügeiteile und zusätzlich Schutz vor Verunreinigungen. Hierdurch werden ebenfalls die Haftungseigenschaften des Klebstoffs verbessert und Alterungsvorgänge der Klebung durch Konservierung verringert.

### Prüfverfahren

Die Wahl der Art des Prüfverfahrens richtet sich nach den Eigenschaften der zu prüfenden Klebverbindung: Anfangsfestigkeiten können mit rein mechanischen Prüftests ermittelt werden (z. B. Zugscherversuch, Schälversuch, Keilttest). Will man dagegen die Langzeitbeständigkeit einer Klebverbindung überprüfen, muss eine Kombination aus Auslagerungen, die mögliche Umgebungseinflüsse simulieren, und einer anschließenden mechanischen Prüfung gewählt werden.

### Punktschweißen

Elektrisches Widerstandsschweißverfahren. Beim Widerstandsschweißen wird die Wärme ausgenutzt, die der elektrische Strom beim Übergang eines Widerstandes erzeugt, z. B. beim Stromübergang zwischen zwei Blechen. Beim Punktschweißen werden einzelne Punkte, nicht wie beim herkömmlichen Schweißen ganze Nähte, geschweißt.

### Punktschweißkleben

Das Punktschweißkleben ist die im KFZ-Rohkarosseriebau eingesetzte Standardfügetechnik. Zunächst wird der 1-K-Epoxidharzklebstoff aufgetragen, die Bauteile dann punktgeschweißt und der Klebstoff zusammen mit dem Lack am Ende der Fertigung ausgehärtet.

### PUR

Abkürzung für Polyurethan

### Rheometer

Gerät zur Bestimmung von Viskositäten (besondere Art eines „Viskosimeters“), Beispiele für unterschiedliche Rheometertypen siehe Abb. 70.

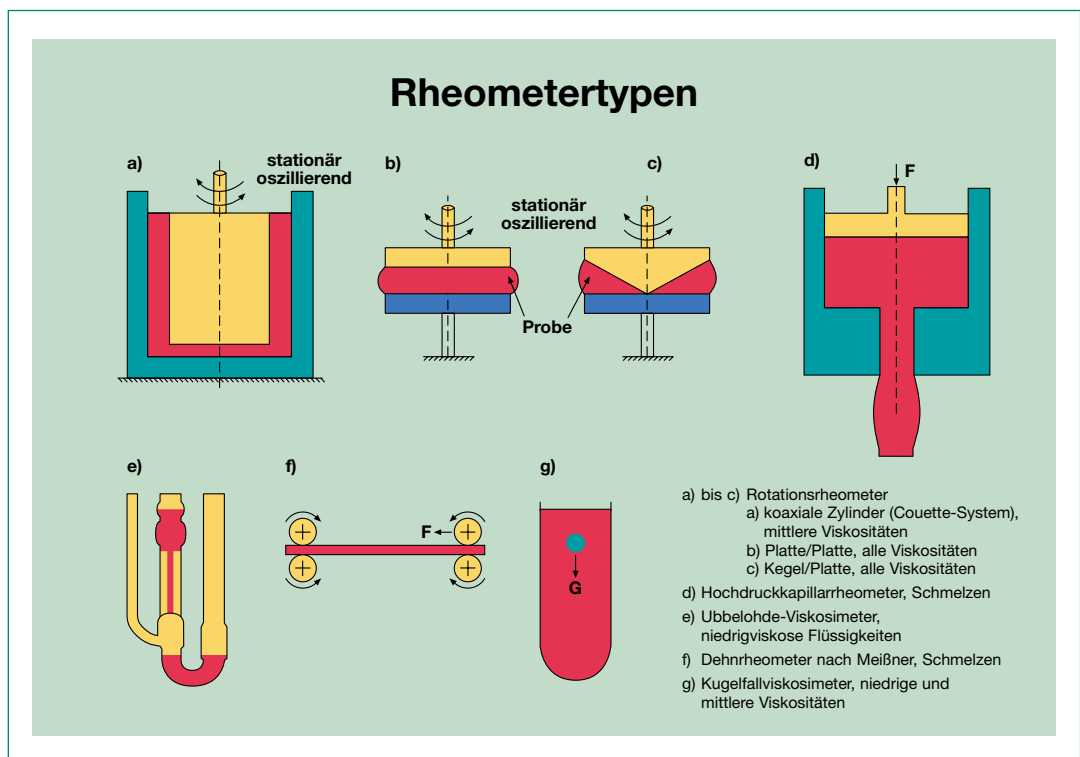


Abbildung 70

### **Schälbelastung**

Linienförmige Belastungen, die nur auf einer Linie wirksam werden (Bsp.: Abziehen/Abschälen einer Folie). Der Widerstand von Klebverbindungen gegen abschälende Kräfte wird im Rollenschälversuch oder im Winkelschälversuch nach DIN EN 1464 ermittelt. Beim Rollenschälversuch werden ein starres und ein flexibles Füge teil, beim Winkelschälversuch werden zwei flexible Füge teile benötigt. Die Versuche werden vorwiegend zum vergleichenden Beurteilen von Klebstoffen und Klebungen sowie zum Überwachen von Oberflächenvorbereitungsverfahren eingesetzt (Bruchbildanalyse).

### **Scherfestigkeit/Schubfestigkeit**

Diese Klebfestigkeit gibt die maximale Schubspannung, d. h. Schubkraft pro Fläche, an, die eine Klebung aushält. Dabei wird die Höchstkraft (Bruchlast) in N durch die Klebfläche in mm<sup>2</sup> dividiert. Sie wird nach DIN EN 1465 ermittelt (vgl. mit Zug-scherfestigkeit; vgl. auch Dauerbelastbarkeit).

### **Silicone**

Von dem amerikanischen Chemiker F.S. Kipping eingeführte Bezeichnung für Polymere, in denen Siliciumatome über Sauerstoffatome ketten- oder netzartig verknüpft und die restlichen Valenzen des Siliciums durch Kohlenwasserstoffreste abgesättigt sind. Je nach dem Vernetzungsgrad unterscheidet man Siliconöle (linear), -kautschuke (wenig vernetzt) und -harze (stark vernetzt).

### **Siloxane**

Systematische Bezeichnung für Sauerstoffverbindungen des Siliciums. Polyorganosiloxane werden in der Technik meist als Silicone bezeichnet.

### **Spaltüberbrückung**

Die Fähigkeit eines Klebstoffs, einen größeren (> 0,2 mm) Fügespalt zu überbrücken. Der Klebstoff muss den Spalt im ausgehärteten Zustand voll ausfüllen.

### **Tack**

(engl.) Eigenklebrigkeit.

### **Thixotropie**

Bezeichnung für die Erscheinung, dass Gele sich bei Einwirkung mechanischer Kräfte – z. B. beim Rühren, Schütteln, unter Ultraschalleinwirkung – verflüssigen, nach Aufhören der mechanischen Beanspruchung aber wieder verfestigen. Zum Beispiel sind moderne, nicht tropfende Lacke thixotrop: Sie lassen sich leicht streichen und sind während des Streichens leichtflüssig. Im Ruhezustand ist ihre Zähigkeit jedoch bedeutend größer, so dass es zu keiner Tropfen- oder Tränenbildung kommen kann. Dies wird durch Zugabe so genannter Thixotropiermittel (z. B. Bentoniten, Kaolinen, Alginsäure, bes. aber SiO<sub>2</sub>-Qualitäten) erreicht.

### **Topfzeit**

Zeitspanne, während der ein Reaktionsklebstoff nach dem Mischen sinnvoll verarbeitet werden

kann (Verarbeitungszeitraum). Sie hängt von der Aushärtungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von äußeren Rahmenbedingungen (Temperatur und Ansatzmenge) ab und ist für ein erfolgreiches Kleben genauestens zu beachten. Ist die Topfzeit überschritten, ist der Klebstoff für eine optimale Benetzung bereits zu viskos.

### **Toxikologie**

Während die physikalischen Stoffeigenschaften (z. B. Brennbarkeit, Explosionsfähigkeit, Selbstentzündlichkeit) zu spezifischen Gefahren (Brand, Verpuffung, Explosion) führen können, ist es die Aufgabe der Toxikologie, mögliche stoffinduzierte Schädwirkungen chemischer Stoffe bzw. chemischer Stoffmischungen auf Lebewesen zu untersuchen, zu erkennen und zu bewerten. Am Anfang steht die gut begründete Beurteilung von möglichen unerwünschten Wirkungen. Erst eine genügend hohe Dosis eines Stoffes löst im Körper Wirkungen aus. Die niedrigste Dosis, die noch Wirkungen auszulösen vermag, wird Schwellenwert genannt. Die meisten Wirkungen sind schwellenwertabhängig. Für die wenigen nicht von einem Schwellenwert abhängigen Wirkungen werden gesonderte Betrachtungen zur Risikominimierung vorgenommen. In einem zweiten Schritt wird überlegt, welche Kontaktmöglichkeiten mit Produkten bestehen. Dazu werden die Bedingungen des vorhersehbaren Gebrauchs, aber auch des möglichen Missbrauchs einbezogen. Zur Erstellung von Sicherheitsbewertungen werden nun die gewonnenen Erkenntnisse zusammengeführt. Bei einem ausreichenden Sicherheitsabstand zwischen Schwellenwert und Ausmaß des Kontaktes wird ein Produkt als sicher bewertet.

### **Verarbeitungstemperatur**

Temperatur des Klebstoffs bzw. Temperatur der Umgebung während der Verarbeitung.

### **Viskosität**

Fließeigenschaften bzw. innere Spannungen von Substanzen. Dickflüssige oder dünnflüssige Stoffe werden demnach als „hochviskos“ oder „niedrigviskos“ bezeichnet. Die Maßeinheit hierfür ist mPa s. Ein kleiner Zahlenwert beschreibt eine dünnflüssige, niedrigviskose Flüssigkeit, z. B. Wasser: 1 mPa s; ein hoher Zahlenwert eine hochviskose dickflüssige Substanz wie z. B. dickflüssiges Öl mit ca. 2000 mPa s.

### **Weichmacher**

Weichmachungs-, Plastifikations-, Plastifizierungs-, Elastifizierungsmittel. Bezeichnung für flüssige oder feste, indifferente organische Substanzen mit geringem Dampfdruck, überwiegend solche esterartiger Natur. Sie treten ohne chemische Reaktion, vorzugsweise durch ihr Löse- u. Quellvermögen, mit Polymeren in physikalische Wechselwirkung. Weichmacher verleihen den Polymeren bestimmte angestrebte physikalische Eigenschaften, wie z. B. erniedrigte Einfrieretemperatur, erhöhtes Formveränderungsvermögen, erhöhte elastische Eigen-

schaften, verringerte Härte (vgl. auch DIN 55945). Ein idealer Weichmacher sollte geruchlos, farblos, licht-, kälte- und wärmebeständig, möglichst wenig flüchtig, nicht gesundheitsschädlich, wasserbeständig, schwer brennbar und mit Polymeren u. Hilfsstoffen mischbar sein sowie ein gutes Gelierverhalten aufweisen. Eine weitere Eigenschaft der Weichmacher ist ihre Fähigkeit zur Migration. Das Migrationsverhalten ist insbesondere für die physiologische Unbedenklichkeit von Lebensmittelverpackungen von großer Bedeutung.

### **Zugfestigkeit**

Die Zugfestigkeit gibt die maximale Zugspannung, d. h. Zugkraft pro Fläche, an, der ein Werkstoff bzw. eine Klebung standhält. Die kritische Zugspannung führt zum Bruch. Die Bruchfestigkeit wird in MPa angegeben.

### **Zugscherfestigkeit**

Die Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebung wird mit Hilfe einer Scherbelastung einer einschnittigen Überlappungsverbindung zwischen Fügeteilen durch Einwirkung einer Zugkraft bestimmt, die parallel zur Klebfläche und zur Hauptachse der Probe wirkt (DIN EN 1465). Als Ergebnis wird die gemessene Kraft oder die Bruchspannung festgehalten. Dabei wird die Höchstkraft in N durch die Klebfläche in mm<sup>2</sup> dividiert (identisch mit Scherfestigkeit; vgl. auch Dauerbelastbarkeit).

Klebfestigkeiten aus der Praxis  
(Zugscherfestigkeiten):

- |                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| • Luft- und Raumfahrt            | 30 bis 40 MPa |
| • industriell, konstruktiv       | 15 bis 25 MPa |
| • industriell, nicht konstruktiv | 5 bis 10 MPa  |
| • Dichtmassen                    | < 5 MPa       |

## Abbildungen und Folien

			Seite
Abb. 1,	Folie 1	Werkstoffe und technische Entwicklung: das Rad	6
Abb. 2,	Folie 2	Verbindungssystematik	7
Abb. 3,	Folie 3	Zukunftstechnologie Kleben	8
Abb. 4,	Folie 4	Flaschenetikettierung	8
Abb. 5		Beil aus der jüngeren Steinzeit, Kleben im alten Ägypten, Aztekische Bauwerke	11
Abb. 6		Seepocke	13
Abb. 7,	Folie 5	Querschnitt einer Klebung	14
Abb. 8,	Folie 6	Die Beiträge zur Kohäsionsfestigkeit eines Klebstoffs	16
Abb. 9		Methoden der Oberflächenbehandlung	18
Abb. 10		Einteilung der Klebstoffe nach der chemischen Basis	19
Abb. 11,	Folie 7	Einteilung der organischen Klebstoffe und Silicone nach dem Verfestigungsmechanismus	19
Abb. 12,	Folie 8	Physikalisch abbindende Klebstoffe	20
Abb. 13		Grundstoffe von Schmelzklebstoffpolymeren	21
Abb. 14		Auftrag durch Schmelzklebstoffpistolen	21
Abb. 15		Grundstoffe für lösungsmittelhaltige Nassklebstoffe	22
Abb. 16,	Folie 9	Stabilisierung der Klebstoffpartikel durch Hilfsstoffe und Emulgatoren	23
Abb. 17,	Folie 10	Filmbildung einer Polyacrylatdispersion in der Klebfuge	24
Abb. 18		In Haftklebstoffen verwendete Kautschuke	25
Abb. 19		Aufbau von Haftklebebandern	26
Abb. 20,	Folie 11	Abbindemechanismus der Plastisole	27
Abb. 21,	Folie 12	Chemisch härtende Klebstoffe	27
Abb. 22,	Folie 13	Verschiedene Ester der $\alpha$ -Cyanacrylsäure/ $\alpha$ -Cyanacrylsäureester: Ladungsverteilung	28
Abb. 23,	Folie 14	Aushärtung durch anionische Polymerisation	29
Abb. 24		Hydrolyse des Cyanacrylats	29
Abb. 25,	Folie 15	Aushärtung durch radikalische Polymerisation des MMA	30
Abb. 26,	Folie 16	Radikalische Polymerisation von TEGMA/ Abfangen durch $O_2$ und Bildung reaktionsträger TEGMA-Peroxid-Radikale	31
Abb. 27,	Folie 17	Härtungssystem anaerob härtender Klebstoffe	31
Abb. 28		Schrauben sichern mit anaeroben Klebstoffen	32
Abb. 29		Glasdesign und Glasbau	33
Abb. 30,	Folie 18	Vorkondensation von Phenol mit Formaldehyd	33
Abb. 31,	Folie 19	Aushärtereaktion des Phenolformaldehydharzes	34
Abb. 32		Bremsbeläge	34
Abb. 33		Hohe Kettenbeweglichkeit der Silicone durch stark unterschiedliche Bindungswinkel	35
Abb. 34,	Folie 20	Blockierung von Siloxanen mit Vernetzern	36
Abb. 35,	Folie 21	Hydrolyse und Polykondensation vernetzender Siloxane	36
Abb. 36		Kondensationsvernetzung von 2-K-RTV-Siliconen	37
Abb. 37,	Folie 22	Herstellung und Aushärtung der Polyimide	38
Abb. 38,	Folie 23	Polyaddition von Diaminen (2) an Bisphenol-A-bis-Epoxid (1)	39
Abb. 39,	Folie 24	Aushärtungsverlauf eines 2-K-Epoxidharzklebstoffs bei Raumtemperatur	40
Abb. 40,	Folie 25	Bildung von Polyurethanen	41
Abb. 41		Isocyanate als Härter für 2-K-Systeme	41
Abb. 42		Deblockierung eines Isocyanates in der Wärme	42
Abb. 43,	Folie 26	Aktivierung des isocyanatgruppenhaltigen Prepolymers durch Feuchtigkeit	42
Abb. 44		Hochgeschwindigkeitsfahre	43
Abb. 45		Kohäsionszunahme eines mit Feuchtigkeit härtenden reaktiven Polyurethan-Schmelzklebstoffs	43
Abb. 46,	Folie 27	Beanspruchungsarten einer Klebung	44
Abb. 47,	Folie 28	Zugscherversuch	46
Abb. 48		Keilttest	46
Abb. 49		Schälversuch	47



		Seite
Abb. 50	Dachkonstruktion aus Holzlaminatträgern	48
Abb. 51, Folie 29	Klebstoffanwendungen im Karosseriebau	49
Abb. 52	Direct Glazing	50
Abb. 53, Folie 30	Kleben im Flugzeugbau	51
Abb. 54	Nahverkehrszug in Leichtbauweise	51
Abb. 55, Folie 31	Klebstoffanwendung im Containerbau	52
Abb. 56, Folie 32	Punktförmiger Klebstoffauftrag auf einer Leiterplatte	53
Abb. 57	Kleben von Digital Versatile Discs (DVD)	53
Abb. 58, Folie 33	Klebungen im Elektromotorbau	54
Abb. 59	Folienlaminierung: Fertigprodukte	55
Abb. 60	Beispiele selbstklebender Verbandmaterialien	55
Abb. 61	Eingeklebtes Hüftgelenks-Implantat	56
Abb. 62	Die drei Dimensionen einer nachhaltigen zukunftsverträglichen Entwicklung	57
Abb. 63, Folie 34	Risikobewertung	58
Abb. 64	Substitution von lösungsmittelhaltigen Klebstoffen in der Bauklebstoffindustrie 1985–1997	61
Abb. 65, Folie 35	Klebstoffe beim Endverbraucher	62
Abb. 66	Schematischer Aufbau einer Freistrah- und Sprüh-Corona-Behandlung	73
Abb. 67	Toxikologisch begründete Gefahrensymbole und Gefahrenbezeichnungen	74
Abb. 68	Epoxidharzzubereitung XYZ	75
Abb. 69, Folie 36	Exposition	75
Abb. 70	Rheometertypen	77

## Tabellen

		Seite
Tabelle 1	Geschichte des Klebens	12
Tabelle 2	Adhäsionskräfte	15
Tabelle 3	Typische Viskositätswerte	17
Tabelle 4	Dispersionsklebstoffe	24
Tabelle 5	Weitere wasserbasierte Klebstoffe	25
Tabelle 6	Einfluss der Molekülstruktur auf den Schmelzbereich	38
Tabelle 7	Haftklebstoffe	76

Gerd Habenicht,  
Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen,  
Springer Verlag, Berlin 3/1997

Stefanie Wellmann,  
Anaerobe Klebstoffe – Härtingsmechanismen und Eigenschaften,  
Dissertation, Universität Bielefeld 1993

Andreas Groß,  
Modellreaktionen zum Härtingsverhalten von Epoxidharz-Klebstoffen,  
Dissertation, Universität Bielefeld 1987

O.-D. Hennemann, W. Brockmann, H. Kollek (Hrsg.),  
Handbuch Fertigungstechnologie Kleben,  
Carl Hanser Verlag, München 1992

O.-D. Hennemann, A. Groß, M. Bauer,  
Innovationen durch vielseitige Füge-technik,  
in: Spektrum der Wissenschaft, 9/1993, S. 84–89

A. J. Kinloch,  
Adhesion and Adhesives, Science and Technology,  
Chapman and Hall, London 1987

Wilhelm Endlich,  
Fertigungstechnik mit Kleb- und Dichtstoffen, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft,  
Braunschweig/Wiesbaden 1995

A. Groß, O.-D. Hennemann, H. R. Meyer,  
Kleben als innovative Verbindungstechnik für die Montage,  
in: H.-J. Warnecke, R. D. Schraft (Hrsg.), Handbuch Handhabungs-, Montage-  
und Industrierobotertechnik,  
Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech 1996, S. 4/1 - 4/34

Fonds der Chemischen Industrie im Verband der Chemischen Industrie e.V.,  
Folienserie Nachhaltige zukunftsverträgliche Chemie, Frankfurt am Main 2000

Fonds der Chemischen Industrie im Verband der Chemischen Industrie e.V.,  
Folienserie Nr. 25, Neue Werkstoffe, Frankfurt am Main 1992

## Stichwortverzeichnis

<b>A</b>		<b>E</b>	
Ablüftzeit	9, 22	Eigenschaften, rheologisch	17
Acrylatdispersion	24	Einkomponenten-Klebstoffe (1-K-Klebstoffe)	28
Acrylsäureester	12	1-K-Epoxidharze, heißhärtend	38
Adhäsion	14ff	1-K-Polyimide	38
Adhäsionsbruch	45	1-K-Polyurethanklebstoffe, heißhärtend	40
Adhäsionskräfte	15	1-K-Polyurethanklebstoffe, feuchtigkeitsvernetzend	40, 51
Adhäsionszone	14	1-K-Polyurethanschmelzklebstoffe, reaktiv	42
Alkoholabspaltung	37	1-K-Siliconklebstoffe	35
Aminal	31	Emulgator	23
Amine	36	Endfestigkeit	28, 40, 43
Anfangsfestigkeit	22, 43	Epoxidharzklebstoff	40, 49f, 53
Anpressdauer	22	Essigsäureabspaltung	36
Anpressdruck	22	Exposition	58
Arbeitshygiene	57	Expositionsanalyse	60
Aushärtungsmechanismus	27		
Aushärtzeit	30		
<b>B</b>		<b>F</b>	
Beanspruchung, mechanisch	44	Feuchtigkeit	28, 35, 42f
Benetzbarkeit	16	Feuchtigkeitsbeständigkeit	28, 45
Benetzung	16	Fibrin	56
Beschleuniger	30	Filmbildung	23, 24
Bindemittel	14	Fischleim	25
Bisphenol A	38f	Folienlaminierung	54
blockiert, chemisch	28, 40	Formaldehyd	33
blockiert, mechanisch	28	Fügeteil	45
Bruchfläche	45	Fügeteilbruch	45
		Fügeteiloberfläche	16
		Fügeverfahren	7, 44f
<b>C</b>		<b>G</b>	
Casein	25	Gefährdungspotenzial	58
Caseinleim	9, 25	Gelpunkt	40
Cumolhydroperoxid	31	Glutinleime	25
Cyanacrylat, Hydrolyse	28f	Grenzschicht, adhäsiv	14
Cyanacrylatpolymer	28f		
Cyanacrylsäureester	28		
<b>D</b>		<b>H</b>	
Dauereinsatztemperatur		Haftklebstoffe	24f, 55
(Dauergebrauchstemperatur)	35, 38, 40, 44	Haftvermittler	16
Diamine	39	Handfestigkeit	22, 28
Diamine, aromatisch	37	Harnstoff-Formaldehyd-Harz	48
Dibenzoylperoxid	30	Härter	28, 30, 39, 40f
Dichtmittel	35f	Harz	28, 30, 38, 40
Dickschichtklebung	36	Hautbildung	36
Diffusionsklebung	9	Hautbildungszeit	41
Diisocyanat	41	Hautleime	25
Dimethacrylsäureester	30	Holzlaminatträger	48, 76
Dispersionsklebstoff	23f	Hotmelts	20
Dispersionsmittel	11	Hydroxypolysiloxan	37
Doppelkartusche	30		
Druckbeanspruchung	44f		
		<b>I</b>	
		Isocyanat	40f
		Isocyanat, chemisch blockiert	40
		Isocyanat-Endgruppen	40

<b>K</b>		<b>P</b>	
Kaltverschweißung	9	Peroxid	30f
Kataplasma	45, 76	Phenol	33
Kautschuke	24	Phenolformaldehydharze	33, 48
Kautschukklebstoffe	22	Phenolharzklebstoffe	33
Keilbelastung	45	Photoinitiatoren	32
Keiltest	45	Plastisole, Plastisolklebstoffe	26, 49
Kieselsäureester	37	Polyacrylate	24
Klebfuge	27	Polyadditionsklebstoffe	38
Klebstoff, anaerob härtend	30f, 54	Polyester, ungesättigte	12
Klebstoff, chemisch härtend	27	Polyimide	37f
Klebstoff, elektrisch leitfähig	39, 53	Polykondensation	33f
Klebstoff, physikalisch abbindend	20	Polykondensationsklebstoffe	33ff
Klebstoff, strahlenhärtbar	32	Polymethylmethacrylat (PMMA)	22
Klebstoff, wasserbasiert	24	Polyamine	39
Klebstofffilm	6, 9, 49	Polyamidoamine	39
Klimaauslagerung, feuchtwarm	45	Poly-Glykole, Polyole	40
Klimawechseltest	45	Polyorganosiloxane (s. Silicone)	35
Kohäsion	14f	Polystyrol	9
Kohäsionsbruch	45	Polyurethanklebstoffe (PUR)	40ff
Kohäsionskräfte	15	Polyurethanschmelzklebstoffe, reaktiv	42f
Kohäsionszone	15	Polyurethanprepolymer mit Hydroxyl-Endgruppen	40
Kondensationsreaktion	33, 37	Polyurethanprepolymer mit Isocyanat-Endgruppen	40
Kondensationsvernetzung	32, 34ff	Polyvinylacetat (PVAc)	22, 24, 48, 54
Konstruktion, klebgerecht	44f	Polyvinylchlorid (PVC)	9, 22
Konstruktionsklebstoff	39	Polyvinylidenchlorid	24
Kontaktklebstoff	9, 22	Pressure sensitive adhesives	25
Kontaktklebzeit	22	Presszeit	23
Kraftübertragung	7	Primärreaktion, photochemisch	32
Kriechen	23, 26, 40	Primer	16, 18
<b>L</b>		Prüfung von Klebverbindungen	45
Langzeitbeständigkeit	40, 45	Prüfverfahren	45
Leimsieden	10	Punktschweißkleben	49, 77
Lösungsmittel	21	PVAL-Klebstoffe	24f
Luftfeuchtigkeit	28, 35f, 41f	Pyromellithsäureanhydrid	37
<b>M</b>		<b>Q</b>	
Metallklebung	38, 39, 42	Quellschweißen	22
Metallkontakt	30	<b>R</b>	
Methacrylatklebstoff (MMA-Klebstoff)	30, 56	Radikalbildner	30f
Methylmethacrylat (MMA)	30	Radikale, aktive	31
Mindesttrockenzeit	21	Radikalkettenpolymerisation	30
Mischungsfehler	39	Reaktionsklebstoffe	27
Mischungsverhältnis	30	Reaktionsklebstoffe, hochtemperaturbeständig	38
MS-Polymere	50, 52, 76	Resol	33
Melamin-Formaldehyd-Harze	48	Resorcin (m-Dihydroxybenzol)	34
<b>N</b>		Resorcin-Formaldehydharze	34, 48
Nassklebstoffe, lösungsmittelhaltig	21	Rheologie	16
Nassklebzeit	22	Risikobewertung	58
N, N-Dimethyl-p-toluidin	30	Rollenschälversuch	45, 78
<b>O</b>		<b>S</b>	
Oberfläche	16	Salzsprühtest	45
Oberflächenbehandlung	17f	Sauerstoffabschluss	30
Oberflächenschicht	18	Schälbeanspruchung	44
Oberflächenspannung	16	Schälversuch	46
		Schälwiderstand	46, 78
		Scherbeanspruchung	44
		Scherfestigkeit	78
		Schmelzbereich (Erweichungsbereich)	20f

Schmelzklebstoffe	20f, 48, 54		
Schmelzklebstoffe, reaktiv	42		
Schubbeanspruchung	44		
Schutzmaßnahmen	58		
Schwitzwassertest	45		
Sekundenklebstoffe	28		
Sicherheitsdatenblätter	60		
Silicone	35, 78		
Siliconpolymere	35		
Siloxane	78		
Siloxane, vernetzend	36		
Sol-Gel-Prozess	27		
Spaltüberbrückung	78		
Spreiten	17		
Stärkeleim	25		
<b>T</b>			
Tapetenkleister	11		
TDI-Prepolymer	40		
Technische Merkblätter	60		
TEGMA-Peroxidradikale	31		
TEGMA-Radikale	31		
Temperaturbeständigkeit	26, 35, 38, 39f		
Tetraethylenglykoldimethacrylat (TEGMA)	30f		
Thixotropie	17, 78		
Topfzeit	39, 78		
Torsionsbeanspruchung	44		
Toxikologie	58, 78		
<b>U</b>			
Übergangszone	14		
Umweltaspekte	60		
UV-Beständigkeit	35		
<b>V</b>			
van-der-Waals-Kräfte		15	
Verdickungsmittel		17	
Verklammerung, mikromechanisch		15	
Verknäuelungen (Polymermoleküle)		21	
Verpackungsklebstoffe		54	
Vinylacetat-Copolymere		24	
Viskosität		17	
Vulkanisierbarkeit		10	
<b>W</b>			
Weichmacher		26, 49, 78	
Winkelschälversuch		78	
<b>Z</b>			
Zeit, offene		21	
Zugbeanspruchung		44f	
Zugscherfestigkeit		79	
Zugscherversuch		25	
Zweikomponenten-Klebstoffe:			
2-K-Epoxidharze, kalthärtend		38f	
2-K-Polyurethanklebstoffe, kalthärtend		40	
2-K-Reaktionsklebstoffe		27	
2-K-Siliconklebstoffe		37	

## Herausgeber



Fonds der Chemischen Industrie im Verband der Chemischen Industrie e.V.,  
Karlstraße 21, 60329 Frankfurt

In Kooperation mit



Industrieverband Klebstoffe e.V.,  
Ivo-Beucker-Straße 43, 40237 Düsseldorf

Erstauflage: November 2001

Alle Rechte vorbehalten

Das vorliegende Textheft zur Informationsserie „Kleben/Klebstoffe“ ist zusammen mit einer interaktiven CD-ROM erschienen. Auf der CD-ROM befinden sich neben dem Textheft als PDF-Datei alle 70 Abbildungen als PowerPoint-Dateien und alle Formelumsetzungen als ChemWindow-Dateien.

Eine Auswahl von 36 Abbildungen/Formeln kann zusätzlich als Overheadfolien-Set beim Fonds der Chemischen Industrie angefordert werden.

Die gesamte Informationsserie ist außerdem über das Internet abrufbar ([www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)).

## Autoren und Beratung

Dr. Norbert Banduhn, Henkel KGaA, Düsseldorf

Beate Brede, Fraunhofer IFAM Klebtechnisches Zentrum, Bremen

Dr. Gerhard Gierenz, Solingen

Prof. Dr. Andreas Groß, Fraunhofer IFAM Klebtechnisches Zentrum, Bremen

Dr. Axel Heßland, Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf

Dr. Irene Janssen, TU Dresden, Dresden

Prof. Dr. Heinz Wambach, Bezirksregierung Köln, Köln

Dr. Wolfgang Weber, FCI, Frankfurt

## Bildquellennachweis

Die für die Gestaltung der Abbildungen/Folien verwendeten Bildmaterialien wurden freundlicherweise von folgenden Unternehmen und Instituten zur Verfügung gestellt:

3 M Deutschland GmbH (Abb.: 14)

Ciba Speciality Chemicals PLC (Abb.: 55, 57)

DELO Industrieklebstoffe GmbH & Co. KG (Abb.: 28, 29)

Fauner/Endlich, Angewandte Klebtechnik (Abb.: 5)

Fraunhofer IFAM (Abb.: 4, 6, 8, 32, 47, 48, 49, 50, 53, 60)

Henkel KGaA (Abb.: 4, 51, 52, 54, 56, 59)

Lürssen Werft Bremen (Abb.: 44)

Südtiroler Archäologiemuseum (Abb.: 5)

VANTICO Ltd. (Abb.: 53, 54)

## Konzeption & Design



BARMWATER GmbH & Co. Werbeagentur KG · Tel.: 02 11/51 58 04-0 · Fax: 02 11/51 58 04-20  
Gneisenaustraße 39 · D-40477 Düsseldorf · e-mail: [info@barmwater.de](mailto:info@barmwater.de) · [www.barmwater.de](http://www.barmwater.de)

## Druckvorstufe/Druck und Verarbeitung, CD-Produktion



MedienPark Moers AG · Heinrich-Hertz-Straße 11 · D-47445 Moers  
Tel.: 0 28 41/5 40 41 · Fax: 0 28 41/5 35 18 · [www.medienpark-moers.de](http://www.medienpark-moers.de)





---

# Der Fonds der Chemischen Industrie im Internet

[www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)



Auf den Internetseiten des Fonds der Chemischen Industrie (FCI) finden Sie alle zur Zeit zur Verfügung stehenden Informationsserien aufgelistet. Selbstverständlich können Sie sich dort auch über Fördermaßnahmen sowie forschungs- und bildungspolitische Positionen informieren.

Besuchen Sie uns im Internet und senden Sie uns Ihre Fragen und Anmerkungen per Mail an:  
**fonds@vci.de**