

FCI  
FONDS DER  
CHEMISCHEN  
INDUSTRIE



Industrieverband  
Klebstoffe e.V.

Themengebiet: Schule, Ausbildung, Bildung

Unterrichtsmaterial Klebstoffe

# Die Kunst des Klebens

Titelfoto: Tropfenapplikation eines lichthärtenden Klebstoffs © DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co KGaA  
Das Motiv zeigt einen Klebstoffdosiersversuch mit dem geprüft wird, ob nach dem 1000sten Tropfen noch exakt die gleich Menge appliziert wird und Geometrie und Position stimmen.

Dieses Unterrichtsmaterial ist in Zusammenarbeit mit dem Industrieverband Klebstoffe e. V. entstanden und steht auch unter [www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds) zum Download bereit.

Die CD-ROM enthält Vorschläge für Experimente und Arbeitsblätter. Zudem sind die Abbildungen des Textheftes hinterlegt. Zur Anwendung der CD-ROM: Sie müssen nicht online sein, sondern lediglich Ihren Browser aktivieren.



ARBEITSBLÄTTER	THEMA	NIVEAU	KAPITEL
1	KLEBVORAUSETZUNGEN	SEK I / SEK II	4.2
2	MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DER KLEBTECHNIK	SEK I / SEK II	7
3	SCHÄLBEANSPRUCHUNG	SEK II	7.1
4	KLEBSTOFFRECHERCH	SEK I / SEK II	5.4.3

EXPERIMENTE	THEMA	NIVEAU	KAPITEL
1	CASEINLEIM	SEK I	2.1
2	STÄRKEKLEISTER	SEK I	2.1
3	GELATINELEIM UND KLEBSTOFF AUS GUMMIBÄRCHEN	SEK I	2.1
4	ADHÄSION UND KOHÄSION	SEK I / SEK II	3.1
5	KLEBKRÄFTE	SEK I / SEK II	3.3
6	TROPFFENFORMEN	SEK I / SEK II	3.3
7	UNSAUBERE OBERFLÄCHEN (AUSWIRKUNGEN)	SEK I / SEK II	4
8	TYNDALL-EFFEKT	SEK I / SEK II	5
9	SCHMELZKLEBSTOFF - THERMOPLAST	SEK II	5.1+5.4.2
10	GLYPTALHARZ-KLEBSTOFF - DUROMER	SEK II	5.1
11	TOPFZEIT BEI 2-KOMPONENTENKLEBSTOFFEN	SEK II	5.3.1
12	POLYURETHAN-KLEBSTOFF/DESMOPHEN/DESMODUR	SEK II	5.3.1
13	REAKTIVKLEBSTOFF	SEK II	5.3.1
14	NACHWEIS VON ESSIGSÄURE BEI DER VERNETZUNG VON SILIKON	SEK II	5.3.2
15	SCHNELLPOLYMERISATION VON SEKUNDENKLEBSTOFF	SEK II	5.3.3
16	SCHRAUBENSICHERUNG MIT ANAEROB HÄRTENDEM KLEBSTOFF	SEK II	5.3.3
17	KLEBESTIFT	SEK I	5.4
18	LÖSEMittel IN „ALLESKLEBERN“	SEK II	5.4.1
19	GELÖSTE KUNSTSTOFFE (POLYSTYROL)	SEK I / SEK II	5.4.1
20	„ALLESKLEBER“ AUS POLYVINYLACETAT	SEK II	5.4.1
21	POLYVINYLALKOHOL	SEK II	5.4.1
22	VERGLEICH DER KLEBKRAFT BEI VERSCHIEDENEN KLEBEBÄNDERN	SEK I / SEK II	5.4.3
23	ZUGBEANSPRUCHUNG	SEK I / SEK II	7.1

<b>1 DIDAKTISCHE GRUNDLAGEN</b>	<b>6</b>
<b>2 EINLEITUNG</b>	<b>8</b>
2.1 Kleben – alte Kunst und junge Wissenschaft	10
2.2 Ideenklau aus der Natur	12
<b>3 DAS ABC DES KLEBENS</b>	<b>14</b>
3.1 Adhäsion	14
3.2 Kohäsion	15
3.3 Benetzung	16
<b>4 OBERFLÄCHENBEHANDLUNG</b>	<b>20</b>
4.1 Reinigung	20
4.2 Mechanische Verfahren	21
<b>5 DIE VIELFALT DER KLEBSTOFFE</b>	<b>22</b>
5.1 Kunststoffklassen	23
5.2 Verfestigungsmechanismen von Klebstoffen	26
5.3 Chemisch härtende Klebstoffe	27
5.3.1 Polyadditionsklebstoffe	28
5.3.2 Polykondensationsklebstoffe	33
5.3.3 Polymerisationsklebstoffe	34
5.4 Physikalisch abbindende Klebstoffe	38
5.4.1 Trocknende Klebstoffsysteme	39
5.4.2 Abkühlende Klebstoffsysteme	43
5.4.3 Haftklebstoffe	44

<b>6</b>	<b>SCHUTZMASSNAHMEN</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>DIE KLEBSTOFFAUSWAHL</b>	<b>48</b>
7.1	Prüfmethoden	48
7.2	Beanspruchung und Gestaltung von Klebverbindungen	50
<b>8</b>	<b>DIE VERBINDUNGSTECHNIK DES 21. JAHRHUNDERTS</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>BEISPIELE - DIE ZUKUNFT HAT SCHON BEGONNEN</b>	<b>54</b>
	<b>GLOSSAR</b>	<b>56</b>
	<b>LITERATUR</b>	<b>57</b>
	<b>IMPRESSUM</b>	<b>58</b>

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde im gesamten Textheft die männliche Sprachform gewählt. Im Glossar können die mit \* markierten Begriffe nachgeschlagen werden.

Das Thema Klebstoffe ist traditionell ein Teil der naturwissenschaftlichen Lehrpläne, insbesondere des Chemielehrplanes, und zwar sowohl für die Sekundarstufe I als auch für die Sekundarstufe II. Dies spiegelt die große und zunehmende Bedeutung der vielen Klebstoff-Varianten in unserem Alltag und in der Industrie wider.

Die vier dem Kompetenzbereich Fachwissen zugeordneten Basiskonzepte können im Rahmen des Themas Klebstoffe alle gezielt angesprochen werden. So spielen die chemische Reaktion und die Stoff-Teilchen-Beziehungen zum Beispiel bei der Herstellung von Kunststoffen für verschiedene Klebmaterialien oder bei den chemisch härtenden Klebstoffen eine Rolle.

Struktur-Eigenschafts-Beziehungen stehen bei der Auswahl eines geeigneten Klebstoffs für definierte Fügeteile im Vordergrund. Und auch energetische Aspekte sind relevant, etwa bei der Anwendung von Zweikomponentenklebstoffen.

Im Oberstufenunterricht lassen sich darüber hinaus Aspekte der Polymerchemie wie die Reaktionstypen Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition am Beispiel der Klebstoffe anwendungsbezogen behandeln.

Im Rahmen der Erkenntnisgewinnung geht es um die Anwendung naturwissenschaftlicher Methoden. Die in diesem Unterrichtsmaterial aufgenommenen Experimente sind alle erprobt und können in verschiedenen Jahrgängen zum Einsatz kommen. Die meisten der Experimente können von den Schülern selbst durchgeführt werden. Die Arbeitsblätter enthalten darüber hinaus Aufträge, die zur quantitativen und qualitativen Bewertung einiger mit der Chemie und der Physik von Klebstoffen unmittelbar verbundenen Aspekte herausfordern.

Auch ist das Thema Klebstoffe in hohem Maße dafür geeignet, die Kommunikations- und Bewertungskompetenzen der Schüler zu stärken, denn sie sind gefordert, sich aktuelle Entwicklungen auf diesem dynamischen und forschungsgeprägten Gebiet zu erschließen und sich miteinander darüber auszutauschen.

Ein weiterer Vorteil dieses Themas ist zweifellos, dass alle Schüler verschiedene Typen von Klebstoffen kennen und auch schon angewendet haben dürften. Sie besitzen also Vorkenntnisse und Erfahrungen, die mit Hilfe systema-

tisch angelegter Fragen, Beobachtungen und Beschreibungen in tragfähige fachliche Konzepte erweitert, umgeformt oder durch diese ersetzt werden können.

So bestehen gute Chancen, altersgemäße naturwissenschaftliche Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten sichtbar werden zu lassen und anschlussfähige und vernetzte Konzepte bei den Schülern zu entwickeln.





Wussten Sie schon, dass Sie einen ständigen Begleiter haben? Einen Begleiter, ohne den Ihr Leben buchstäblich haltlos wäre, ohne den nicht einmal der Boden unter Ihren Füßen stabil wäre! Fliese? Parkett? Teppichboden? Alles garantiert geklebt!

Die Klebtechnik hat sich zu einer Zukunftstechnologie entwickelt, ohne die (fast) nichts läuft. Klebstoffe fügen Dinge aus unserem Alltag ebenso wie hoch komplizierte Spezialprodukte aneinander. Und trotzdem werden sie oft unterschätzt. Ihr größter technischer Vorteil ist nämlich gleichzeitig auch ein gewisser Nachteil: Sie sind unsichtbar.

Daher können sich auch die wenigsten Menschen vorstellen, wie viel Klebstoff in alltäglichen Gebrauchsgegenständen steckt. Allein in Deutschland wurde 2014 knapp eine Million Tonnen Klebstoff produziert, Tendenz steigend. Deutschland ist sogar Kleb-Europameister: Der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch lag im Jahr 2012 bei 9,2 Kilogramm!

Ohne dass wir uns dessen bewusst sind, umgeben uns im Alltag viele verschiedene Klebstoffe und klebtechnische Anwendungen, etwa an Schuhen, Handys und anderen elektronische Geräten, an Büchern und Zeitschriften, Möbeln, Fensterscheiben, Flaschenetiketten, Preisschildern, Verpackungen, Zahnkronen, Windeln und Pflastern.



sie bei Bewegungen mitgehen, zusätzlich noch Wasser vertragen und Wundflüssigkeit oder Blut aufnehmen können. Viele Anforderungen an ein nur scheinbar einfaches Produkt.



Pflaster zum Beispiel sind „Allerweltsprodukte“, jeder braucht sie hin und wieder. Sie müssen vor allem die Wunde abdecken und vor Verunreinigungen schützen. Dazu müssen sie auf der Haut kleben, aber sie müssen auch schmerzfrei wieder lösbar sein. Gleichzeitig sollen





Klebstoffe sind aber nicht nur im Alltag zu finden. Auch in der Industrie sind sie aus der Produktion nicht mehr wegzudenken. Ein Beispiel dafür ist das größte serienfertige Passagierflugzeug Airbus A380 – das derzeitige High-tech-Produkt der zivilen Flugzeugindustrie. Bei dessen Entwicklung wollte man die Betriebskosten pro Passagier und Flugzeug deutlich reduzieren. Dieses Ziel erreichte man durch den Einsatz von sogenannten Verbundwerkstoffen, das sind Materialien, die aus Schichten von glasfaserverstärktem Kunststoff und Aluminium bestehen, die mit Hochleistungsklebstoffen miteinander verbunden werden.

Zur Realisierung immer effizienterer Windkraftanlagen werden die Rotorblätter komplett geklebt. Dafür wurden hochdynamisch belastbare Strukturklebstoffe entwickelt, die bei Umlaufgeschwindigkeiten von bis zu 300 km/h extremen Belastungen standhalten müssen.

Richtig eingesetzt können Klebstoffe also alles langzeitbeständig zusammenfügen. Nur den sogenannten „Alleskleber“ gibt es nicht, genauso wenig wie es eine Universalschraube oder -niete gibt.



## 2.1 Kleben – alte Kunst und junge Wissenschaft

Klebstoffe sind keine neue Erfindung. Schon vor vielen Tausend Jahren kamen Menschen auf die Idee, mit klebenden Naturstoffen Gegenstände aneinander zu befestigen. Diese natürlichen Klebstoffe stellten sie damals aus Tierhäuten und Tierknochen oder aus Pflanzen her.

In der jüngeren Steinzeit, also etwa 5000 vor Christus, bedienten sich die Menschen eines Birkenharzes zum Befestigen von Speer- und Beilspitzen. So fand man bei der Entdeckung des Gletschermannes „Ötzi“ im Jahre 1991 unter seinen Ausrüstungs- und Kleidungsstücken ein aus einem Eibenstämmchen gefertigtes Beil, dessen Klinge mit dem Klebstoff Birkenpech sowie mit Lederstreifen befestigt worden war.

Klebstoff aus Tierblut mit Eiweiß als Bindemittel diente den Menschen bereits 3500 vor Christus als Untergrund bei Höhlenmalereien. Um 2000 vor Christus begann man dann in Vorderasien Gelatineleime\* zur Möbelherstellung zu verwenden. Im Mittelalter war es das Handwerk des Vogelfängers, mit Leimruten kleine Vögel zu fangen. Die Vögel wurden mit Beeren und Früchten angelockt und verfangen sich in den klebrigen Ästen. Die deutsche Redewendung „jemanden auf den Leim gehen“ stammt daher.



Im 17. Jahrhundert erhielt der Klebstoff dann große Bedeutung in vielen Haushalten. Denn erstmals kamen chinesische Papiertapeten nach Europa und waren groß in Mode. Für diese wurde Anfang des 17. Jahrhunderts der notwendige Klebstoff, der Tapetenkleister, entwickelt. Ein anschauliches Beispiel dafür, wie gesellschaftliche Veränderungen zur Entwicklung neuer Materialien führen. Doch nicht nur für das Anbringen der Tapete an der Wand wurde und wird Klebstoff verwendet, auch in den Tapetendruckereien wurden damals große Mengen Leim benötigt. Dazu gehörte beispielsweise der Perga-

mentleim, der aus Pergamentschnitzeln hergestellt wurde. Er diente als weiße Grundierung des Papiers für die Tapeten, um so die Brillanz der aufgedruckten Farben zu erhalten. Auch andere Leime wie der sogenannte „Flandrische Leim“ aus Tierhäuten oder Fischleim wurden eingesetzt. 1748 wurde in England das erste Patent auf einen Fischleim vergeben.

Aufgrund der großen Nachfrage entstanden zu Beginn des 18. Jahrhunderts in vielen Städten Leimsiedereien. Oft waren sie in der Nähe von Ledergerbereien zu finden, da der Leim aus den dort anfallenden Abfallprodukten gekocht wurde. Die Firma Gillon fils & Thorailleur in Paris, eine florierende Tapetenfabrik, verbrauchte um 1850/60 täglich 1500 Kilogramm Leim!

### LEHRER-INFO

Natürliche Klebstoffe

Experiment 1: Caseinleim

Experiment 2: Stärkekleister

Experimente 3a, 3b: Gelatineleim und Klebstoff aus Gummibärchen

In den letzten gut 100 Jahren machte die chemische Industrie auf dem Gebiet der Klebstoffe große Fortschritte und brachte bahnbrechende Entwicklungen hervor. 1910 wurde das erste rein künstliche, das heißt nicht auf Naturstoffen basierende Polymer, das Phenol-Formaldehyd-Harz, synthetisiert und kam unter dem Namen Bakelit auf den Markt. Basis der folgenden Aufschwungszeit waren die von Hermann Staudinger (1881 – 1965) in der 1920er Jahren vorgestellten Grundlagen der Makromolekularchemie.



Ericssons Bakelittlefon 1931

Nach der Entwicklung von Bakelit ging es rasant weiter:

TABELLE 1

### Meilensteine in der Entwicklung von Klebstoffen

1931	Die erste stabile Kunststoffdispersion, also eine feine Verteilung eines Kunststoffes in einem Lösemittel, wurde entwickelt.
1936	Pierre Castan erfand mit den Epoxiden* eine bis heute wichtige Klebstoffgruppe für u. a. den Fahrzeug- und Flugzeugbau.
1937	Erste Synthese von Polyurethanen*, die heute breite Anwendung in der Automobilindustrie finden.
1940	Die Methacrylat-Klebstoffe*, die u. a. bei der Verklebung von Metallen und Kunststoffen zum Einsatz kommen, wurden patentiert.
1953	Die ersten anaerob härtenden Klebstoffe kamen auf den Markt.
1958	Ein „Sekundenklebstoff“, das Cyanacrylat, kam in den USA auf den Markt.
1968	Die Entwicklung der feuchtigkeithärtenden Polyurethane, mit deren Nachfolgern auch heute noch Autoscheiben eingeklebt werden, begann.
1970	Erste UV-lichthärtende Acrylat-Formulierungen* (strahlenhärtende Klebstoffe), Entwicklung von silanmodifizierten Klebstoffen auf Polyether-Basis in Japan (MS-Polymere).
1980	Die reaktiven Schmelzklebstoffe* wurden erstmals vorgestellt.
Ende der 1980er Jahre	Hochfeste Klebstoffe wurden entwickelt, die sogar das Kleben beölter Bleche erlauben.
Ab 1990	Entwicklung von diversen Klebstoffen mit multiplen Härtungsmechanismen, die zunächst durch UV-Strahlung an- und anschließend über Luftfeuchtigkeit aushärten.
1993	Entwicklung von Klebstoffen, deren Härtung durch Sauerstoff eingeleitet wird (aerob härtende Klebstoffe).
1995	Entwicklung von silanvernetzenden Polyurethan-Prepolymeren* (SMP-Klebstoffe).
Ab 2000	Entwicklung wiederlösbarer Klebstoffsysteme mit hoher Klebfestigkeit für Reparatur und Recycling
Ab 2012	Farbreaktionen, mit deren Hilfe der Zustand eines Klebstoffes (frisch, überlagert, ausgehärtet) visuell erkannt werden kann.
2014	Vorapplizierbare, chemisch aushärtende Strukturklebstoffe. Hierbei werden Bauteile bereits vom Lieferanten mit einem festen Klebstoff, der in diesem Zustand nicht klebrig ist, versehen, der dann in dem späteren Montageprozess schnell aushärtet.

Eine besondere Herausforderung für die Chemiker bestand von Beginn an darin, die Aushärtung der Klebstoffe genau zu steuern. Dazu wurden ab den 1980er Jahren verschiedene Klebstoffe mit kombinierten Härtungsmechanismen auf den Markt gebracht.

Seit der Jahrtausendwende konzentriert sich die Klebstoffindustrie neben der Beschleunigung von Aushärtungsreaktionen und der Erhöhung der Fertigungsprozesssicherheit unter anderem auch auf die Entwicklung wiederlösbarer Klebstoffsysteme. Diese sollen Reparaturen und sortenreines Recycling ermöglichen. In den letzten

Jahren gab es vor allem auf dem breiten Gebiet der Haftklebstoffe viele Innovationen weit über den bekannten Alltagsbereich (etwa Etikette oder selbstklebende Notizzettel) hinaus. Die neuen Einsatzbereiche reichen buchstäblich von A-Z, vom Auto bis zum Zug. So müssen im Automobilbereich zum Beispiel Zierleisten, Schilder für Typenbezeichnungen etc. im Außenbereich mindestens 15 Jahre, im Schienenfahrzeugbau sogar 30 Jahre halten.



## 2.2 Ideenklau aus der Natur

Kleben ist keine Erfindung des Menschen. In der Natur ist das Kleben schon seit eh und je fest verankert. Ohne Haftung – Grundlage jedes Klebens! – wäre sogar Leben überhaupt nicht möglich: Denn nur durch die Haftung kann die befruchtete Eizelle sich in der Gebärmutter einnisten. Die Natur war, ist und bleibt somit Vorbild und Ideengeber für uns Menschen, wenn es um Klebtechnik geht.

Bienen setzen beispielsweise auf das Prinzip der Schmelzklebstoffe. Sie erwärmen die Wachsmoleküle in ihrem Körper und formen aus dem flüssigen Material ihre Waben. Sobald das Wachs auf Raumtemperatur abkühlt, wird es fest und haftet auf dem Untergrund. Bienenwachs verhält sich also im Prinzip wie ein technischer Schmelzklebstoff: Es besteht aus langkettigen Molekülen, die sich bei Körpertemperatur der Biene ineinander verhaken, aber trotzdem gut beweglich bleiben. Kühlt das Gewirr aus Molekülketten ab, erstarrt es und wird fest.





Besonders faszinierend ist auch der Klebstoff der Miesmuschel, mit dessen Hilfe sie sich an Felsen oder Schiffsrümpfen festsetzt. Dabei muss der von der Miesmuschel produzierte Klebstoff unglaublich viel aushalten: Hohe Salzkonzentrationen, hohe Wellen und hohe Fließgeschwindigkeiten des Wassers sind Herausforderungen, denen viele synthetisch hergestellte Klebstoffe nicht gewachsen sind. Die Miesmuschel hingegen meistert die Anforderungen ihrer Lebensumgebung problemlos. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass Miesmuscheln sogar auf mit Teflon beschichteten Flächen Halt finden. Selbst für moderne Klebstoffe ist das fast unmöglich. Das Klebprotein, das die Miesmuscheln dazu aus einer Drüse ausscheiden, ist vielen technischen Klebstoffen also noch weit überlegen.

Die Miesmuscheln produzieren einen Unterwasserklebstoff, der unter Wasser aushärtet und langzeitbeständige Haftung ausbildet. Der natürliche Superklebstoff besitzt zudem eine hohe Festigkeit, ist gleichzeitig aber auch elastisch. Aus diesem Grund gibt es eine Reihe von Forschungsprojekten, in denen versucht wird, den Klebstoff der Miesmuschel zu synthetisieren. Damit könnten dann in der Medizin Knochen geklebt, Bänder fixiert, Netzhäute repariert oder Zahnersatz befestigt werden.

Ein weiteres Beispiel aus der Natur finden wir bei den Termiten: Die Soldaten unter den Termiten sind für die Verteidigung der gesamten Population zuständig. Dazu versprühen sie eine klebrige Flüssigkeit, die sie in ihrem Körper produzieren, mit einer Drüse an der Vorderseite ihres Kopfes auf die Angreifer, wodurch diese außer Gefecht gesetzt werden. Abgesehen vom Schutz vor Feinden dient der Leim den Termiten auch zum Schutz vor Wind und Wetter. Denn mit dem Klebstoff können sie aus Erde, Pflanzenresten und Holz meterhohe stabile Türme errichten.

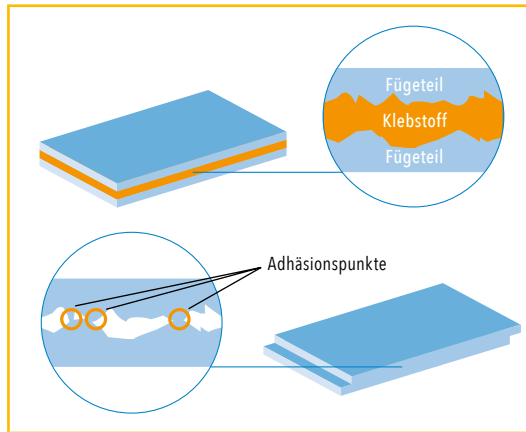
Die Natur ist also nicht nur Vorbild für den Klebstoff selbst, sondern auch für dessen Anwendung. So sind beispielsweise die von der Tierwelt abgeschauten Mechanismen der Klebstoffabsonderung Vorbilder für automatisierte Fertigungsprozesse, in denen ohne entsprechende Düsen ein reproduzierbarer Klebstoffauftrag oder die Produktion vieler Gebrauchsgegenstände gar nicht möglich wären.



Kleben ist definiert als das Verbinden zweier Fügeteile mit einem Klebstoff. Der Klebstoff bildet dabei das Verbindungselement zwischen den beiden Fügeteilen, die ohne ihn nicht aneinander haften könnten.

ABBILDUNG 1

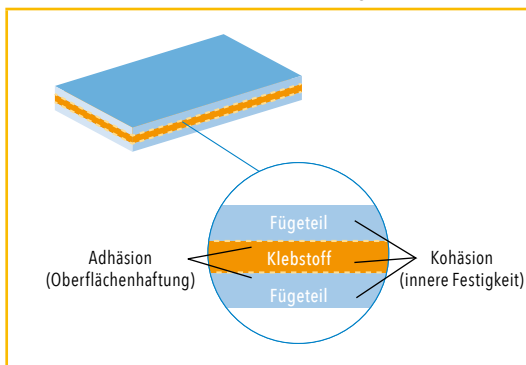
### Haftung zweier Fügeteile mit und ohne Klebstoff



Ein Klebstoff ist ein nichtmetallischer Werkstoff, der Körper durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) verbinden kann (Definition nach DIN EN 923).

ABBILDUNG 2

### Schematischer Aufbau einer Klebung



## 3.1 Adhäsion

Der Begriff Adhäsion leitet sich vom lateinischen Wort „adhaerere“ (anhaften) ab. Unter Adhäsion versteht man das Anhaften gleicher oder verschiedenartiger Stoffe aneinander.

Die Adhäsionsfähigkeit zweier Stoffe beruht dabei auf Anziehungskräften im atomaren Bereich. In den meisten Fällen geht die Adhäsion auf physikalische Wechselwirkungen zwischen Molekülen oder Atomen an den Oberflächen der beiden Fügeteile zurück. Da diese Kräfte jedoch sehr klein sind, benötigt man sehr viele, um eine ausreichend belastbare Klebverbindung herstellen zu können. In einigen ausgewählten Kombinationen von Klebstoff und Fügeteil können sich zudem chemische Bindungen als Adhäsionskräfte bilden, die dann zehn- bis 100-mal stärker sind als die physikalischen Wechselwirkungen. Somit zeigen Klebungen, die chemische Bindungen als Adhäsionskräfte aufweisen, im Vergleich zu solchen, die lediglich auf physikalischen Wechselwirkungen beruhen, nicht nur höhere Festigkeiten, sondern auch eine bessere Langzeit- und Feuchtigkeitsbeständigkeit.

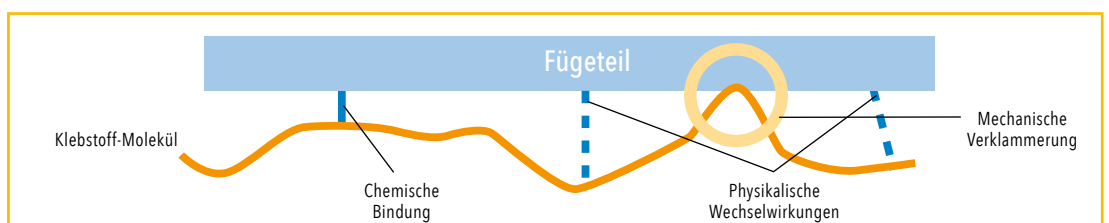
Beispiele für Kombinationen, in denen chemische Bindungen im Bereich der Adhäsion auftreten können sind: Silikon und Glas, Polyurethan und Holz oder Epoxidharz und Aluminium.

### LEHRER-INFO

Experiment 4: Adhäsion und Kohäsion

ABBILDUNG 3

### Adhäsionskräfte



### 3.2 Kohäsion

Der Begriff Kohäsion leitet sich vom lateinischen Wort „cohaerere“ (zusammenhängen) ab und beschreibt die Bindungskräfte zwischen Atomen und Molekülen, die innerhalb eines Stoffes wirksam sind. Die Ursache für die Kohäsion von Stoffen allgemein und somit auch von Klebstoffen sind wie im Fall der Adhäsion folgende Bindungen und Wechselwirkungen:

- 1) Chemische Bindungen innerhalb der Klebstoff-Moleküle, das heißt zwischen den einzelnen Atomen
- 2) Physikalische Wechselwirkungen zwischen den Klebstoff-Molekülen, zum Beispiel Van-der-Waals-Wechselwirkungen.

Hinzu kommen:

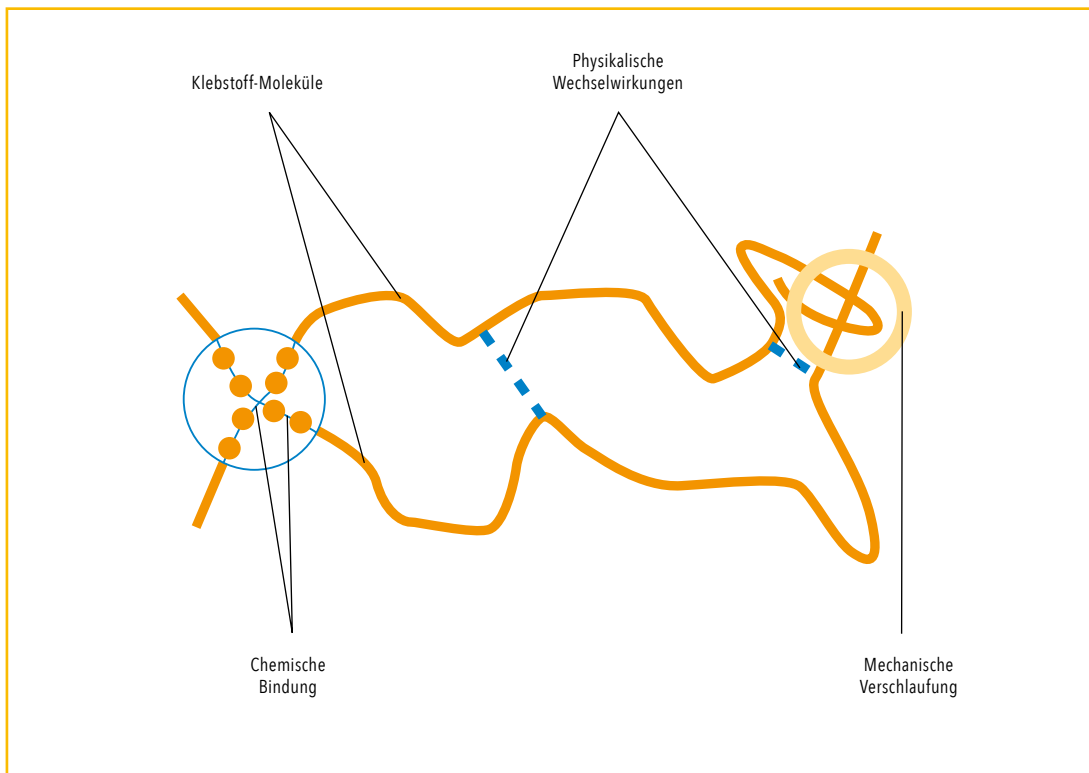
- 3) Verschlaufungen\* der Moleküle, die bei großen Molekülen vorkommen und eine mechanische Verklammerung untereinander bewirken.

Festkörper besitzen im Vergleich zu Flüssigkeiten eine deutlich höhere Kohäsion, Gase hingegen nahezu keine. Die jeweilige Stärke der Kohäsionskräfte hat damit einen großen Einfluss auf die Eigenschaften von flüssigen und festen (Kleb-)Stoffen.

Im unausgehärteten Klebstoff bestimmen diese beispielsweise sein Fließverhalten, eine für die Verarbeitung sehr wichtige Eigenschaft. Fast alle Klebstoffe sind beim Auftrag flüssig, werden jedoch während der Härtung fest und können dann zum Beispiel mechanische Beanspruchungen aufnehmen. Die Kohäsion nimmt also bei der Verfestigung zu. Dabei werden zusätzliche physikalische Wechselwirkungen und/oder chemische Bindungen gebildet.

ABBILDUNG 4

#### Kohäsionskräfte



### 3.3 Benetzung

Im Abschnitt „Adhäsion“ wurde beschrieben, dass diese auf atomaren Kräften zwischen zwei Stoffen beruht. Da diese Kräfte nur eine sehr geringe Reichweite besitzen, muss die Entfernung zwischen den beiden Stoffen an der Oberfläche bzw. Kontaktfläche geringer als 1 Nanometer (nm) sein.

Haben sich zwei Stoffe/Körper so weit aneinander ange-nähert, dass der Abstand geringer als ein Nanometer ist, kommt es fast automatisch zur Ausbildung dieser letztlich für die Haftung verantwortlichen Kräfte.

#### HINWEIS

Ein Nanometer ist der milliardste Teil eines Meters oder der millionste Teil eines Millimeters. Er verhält sich zu einem Meter wie eine Haselnuss zum Erdball und passt 100.000 Mal in den Punkt am Ende dieses Satzes.

Bei den winzigen Abständen zwischen den Füge-teilen leuchtet es ein, dass die Oberflächen der Füge-teile beim Kleben eine große Rolle spielen.

Die Grundanforderung an eine Oberfläche, die geklebt werden soll, ist, dass sie sauber ist. Auch ihre Rauigkeit ist von Bedeutung. So ist die extreme Rauigkeit einer Oberfläche auf atomarer Basis ein Grund für eine mangelnde Haftung von Festkörpern aneinander; das heißt die einzelnen Atome sind bei so einer „Berg-und-Tal-Landschaft“ zu weit voneinander entfernt, als dass es zu einer ausreichenden Zahl von Kontakten kommen kann, bei denen sich eine Anziehung ausbilden könnte (vgl. Abbildung 1).

#### HINWEIS

Auch sehr glatt erscheinende Oberflächen, wie die einer CD, sind auf atomarer Ebene rau!

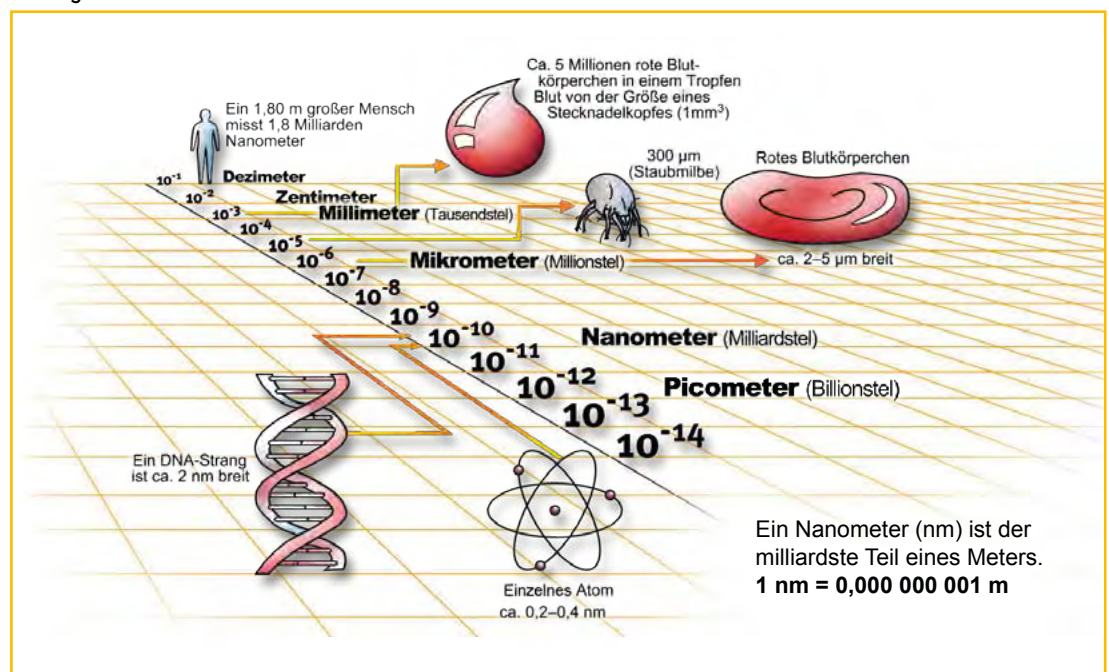
#### LEHRER-INFO

Experiment 5: Klebkräfte

Klebstoffe bieten sich hier als Mittler an, da sie bei der Verarbeitung flüssig sind. So können sie sich den Unebenheiten der Füge-teiloberfläche gut und flächig anpassen und nach der Verfestigung Kräfte übertragen.

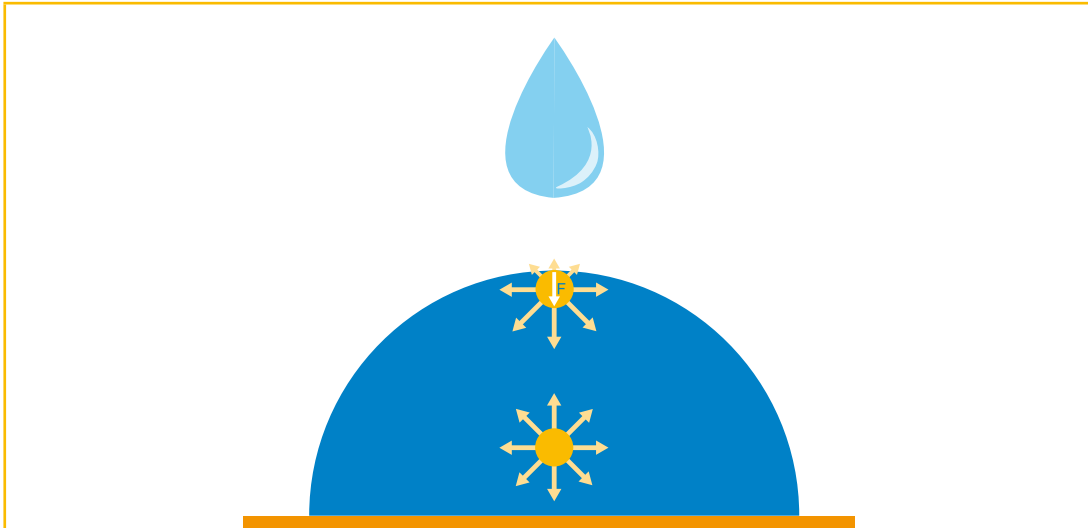
#### ABBILDUNG 5

#### Winzige Welten





Wassertropfen – Entstehung der Oberflächenspannung



Dieses gute „Anschmiegen“ des Klebstoffs an eine Oberfläche nennt man „Benetzen“. Kann ein Klebstoff eine Oberfläche gut benetzen, so erreicht er „Berge und Täler“ gleichermaßen, und es kommt zu einem flächigen Kontakt zwischen Klebstoff und Fügeteilen. Hat der Klebstoff die Fügeteiloberfläche gut benetzt, können sich zwischen Klebstoff und Fügeteil die oben beschriebenen Wechselwirkungen ausbilden und zu einer guten Adhäsion führen.

HINWEIS

Die Benetzung ist für die Adhäsion eine notwendige, jedoch nicht allein ausreichende Voraussetzung. Eine gute Benetzung gibt keinerlei Hinweise darauf, wie gut und zeitbeständig die Haftung zwischen Klebstoff und Fügeteil ist.

Neben der Beschaffenheit der Oberfläche spielt auch die Oberflächenschicht des Fügeteils eine Rolle. So kann verrosteter Stahl zwar gut benetzt und geklebt werden, allerdings sitzt der Rost nur lose auf der Oberfläche, so dass sich diese Schicht bereits bei einer nur mäßigen mechanischen Beanspruchung mit dem Klebstoff ablöst.

Da die Benetzung die grundlegende Voraussetzung für die Ausbildung adhäsiver Wechselwirkungen zwischen den Fügeteilen ist, liegt es auf der Hand, dass das Interesse an der Messung und Bewertung der Benetzung und Benetzbarkeit groß ist. Verschiedene Verfahren stehen

hier zur Auswahl. Im einfachsten Fall wird der sogenannte „Wassertropfentest“ durchgeführt.

Dabei wird ein Wassertropfen auf die zu untersuchende Oberfläche aufgetragen. Je nach Kombination der Flüssigkeit mit dem Feststoff können sich unterschiedliche Tropfenformen ausbilden.

LEHRER-INFO

Experiment 6: Tropfenformen / Benetzen von Werkstoffoberflächen – Oberflächenspannung

Mit dem Wassertropfentest können keine Zahlenwerte, sondern nur vergleichende Ergebnisse, zum Beispiel vor und nach einer Reinigung der Oberfläche, erhalten werden. Was aber ist die Ursache für dieses so unterschiedliche Benetzungsverhalten?

Von zentraler Bedeutung sind hier ausschließlich die Oberflächenspannungen flüssiger und fester Stoffe.

Unter Oberflächenspannung versteht man die an einer Oberfläche wirkenden Kräfte, die bestrebt sind, die Oberfläche zu verkleinern. Je größer die Oberflächenspannung zum Beispiel einer Flüssigkeit ist, desto größer sind die Kräfte, die einen Tropfen dieser Flüssigkeit zusammenhalten.



Die Moleküle in einem Wassertropfen ziehen sich prinzipiell alle mit der gleichen Kraft an. Teilchen im Inneren des Tropfens, die in alle Richtungen von weiteren Wassermolekülen umgeben sind, erfahren somit in alle Richtungen die gleichen Anziehungskräfte. Wassermoleküle, die am Rand des Tropfens liegen, werden hingegen nur von den innen liegenden Teilchen angezogen, denn um den Wassertropfen befindet sich Luft. Die Summe dieser Anziehungskräfte resultiert in einer nach innen gerichteten Kraft, die dazu führt, dass die Oberfläche des Tropfens versucht, sich zu einer Kugel zusammenzuziehen. Die Kugelform ist am günstigsten, da hier die Oberfläche bei einem gegebenen Volumen minimal ist.

Will man einen Feststoff mit einer Flüssigkeit (zum Beispiel Wasser oder Klebstoff) benetzen, kommt es aber nicht nur auf die Oberflächenspannung der Flüssigkeit (= Oberflächenspannung<sub>Flüssigkeit</sub>) an, sondern genauso auf die vergleichbaren Kräfte an der Oberfläche des zu benetzenden Feststoffs (= Oberflächenspannung<sub>Feststoff</sub>). Bei der Betrachtung der Benetzbarkeit sind also immer sowohl der flüssige Klebstoff als auch die Fügeteile zu berücksichtigen. Grundsätzlich gilt: Je mehr die Oberflächenspannung<sub>Feststoff</sub> die Oberflächenspannung<sub>Flüssigkeit</sub> übersteigt, desto besser ist die Benetzung der Flüssigkeit auf dem Feststoff.

#### HINWEIS

Um eine gute Benetzung mit einer Flüssigkeit zu erzielen, muss die Oberflächenspannung der Fügeteiloberfläche größer sein als die der Flüssigkeit.

$$\text{Oberflächenspannung}_{\text{Feststoff}} > \text{Oberflächenspannung}_{\text{Flüssigkeit}}$$

TABELLE 2

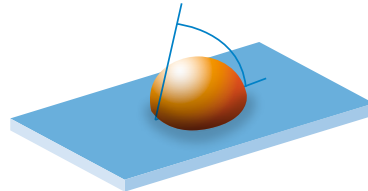
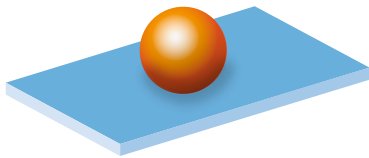
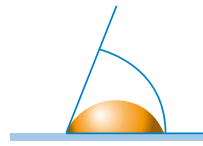
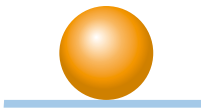
#### Oberflächenspannungen verschiedener Werkstoffe in mN/m

Polytetrafluorethylen	18.5
Silikone	20
Naturkautschuk	24
Polypropylen	29
Polyethylen	31
Polymethylmethacrylat	33 ... 44
Polystyrol	33 ... 35
Polycarbonat	34 ... 37
Acrylnitril-Butadien-Styrol	35 ... 42
Polyvinylchlorid	40
Polyethylenterephthalat	43
Polyamid 6,6	46
Epoxidharz	47
Polyamid	49 ... 57
Polyimid	49 ... 51
Wasser	72.8
Glas	290
Aluminium	1200
Eisen	2550

Je nach Oberflächenspannungsverhältnis zwischen Flüssigkeit und Fügeteil findet man verschiedene Tropfenformen, die durch den sogenannten Randwinkel  $\alpha$  charakterisiert sind. Der Randwinkel  $\alpha$  stellt also ein Maß für die Benetzung dar.

Tropfenform mit Randwinkel

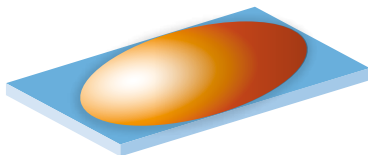
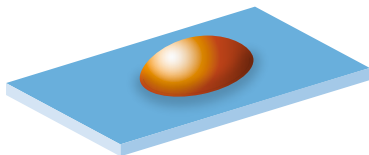
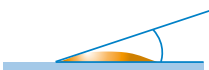
Kontakt mit Randfläche  
**(schlecht)**



Keine Benetzung

Schlechte Benetzung  
 $\alpha > 30^\circ$

Kontakt mit Randfläche  
**(gut)**



Gute Benetzung  
 $\alpha < 30^\circ$

Spreitung

*Ist der Randwinkel  $\alpha$  kleiner als  $30^\circ$ , liegt eine gute Benetzung und damit die Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Kleben vor.*

Auch der „beste“ Klebstoff kann zu einer nicht geeigneten Oberfläche keine ausreichende Haftung aufbauen. Deshalb ist die Vorbehandlung der Fügeiteiloberfläche von entscheidender Bedeutung.

Ziele der Oberflächenbehandlung:

- in der Produktion Klebbedingungen zu schaffen, die eine gleichbleibende Qualität der Klebungen garantieren (Reproduzierbarkeit),
- Verbesserung der Langzeitbeständigkeit,
- Verbesserung der Benetzbarkeit,
- Verbesserung der Klebbarkeit (Adhäsion).

Methoden zur Oberflächenvorbehandlung sind unter anderem die Reinigung, das Schleifen und das Strahlen von Oberflächen, das Beflammen von Kunststoff-Oberflächen sowie die Verwendung von Primern.

## METALLE

Als oberste Schichten findet man in der Regel Verunreinigungen und angelagerte Wassermoleküle. Bei Metallen befindet sich unter diesen beiden Schichten oft die Reaktionsschicht. Dabei handelt es sich meist um das entsprechende Metalloxid (zum Beispiel Aluminiumoxid oder bei niedriglegiertem Stahl Eisenoxid und -hydroxid, also Rost). Soll das Fügeiteil geklebt werden, so müssen die o. g. ersten drei Schichten vor dem eigentlichen Klebprozess entfernt werden.

## KUNSTSTOFFE

Auch bei Kunststofffügeiteilen müssen Verschmutzungen und angelagertes Wasser vor dem Kleben durch eine Reinigung entfernt werden. Kunststoffe – insbesondere Thermoplaste – haben im Vergleich zu Metallen niedrigere Oberflächenspannungen, die eine Benetzung des Kunststofffügeiteils mit dem Klebstoff in vielen Fällen erschweren. Ziel der Oberflächenbehandlung bei Kunststoffen ist daher in den meisten Fällen eine Erhöhung der Oberflächenspannung.

ABBILDUNG 8

### Methoden der Oberflächenbehandlung

Oberflächen- vorbereitung	Oberflächen- vorbehandlung	Oberflächen- nachbehandlung
Reinigen, Entfetten, Passendmachen der Oberflächen	Mechanische, chemische, physikalische Verfahren	Klimatisierung, Primer, Haftvermittler, Haftreiniger

#### 4.1 Reinigung

Das Entfetten und Reinigen ist für die meisten Klebungen als Minimalforderung anzusehen. Auch vor und nach abtragenden mechanischen Vorbehandlungsverfahren (Schleifen, Strahlen etc.) ist eine Reinigung vorzunehmen. Wichtig ist, dass die Reinigung der Fügeiteile alle Verunreinigungen auf der Oberfläche zuverlässig entfernt, damit beim anschließenden Kleben tatsächlich auf dem „festen“ Fügeiteil und nicht auf der relativ leicht ablösbaren Oberflächenschicht geklebt wird.



## 4.2 Mechanische Verfahren

Sie dienen vor allem dem Abtrag von Fremd- und Oxidschichten sowie der Freilegung einer sogenannten frischen Oberfläche. Die Wahl eines abtragenden mechanischen Vorbereitungsverfahrens orientiert sich an dem Grundsatz: So kräftig wie nötig – aber so mild wie möglich!

### ● Schleifen

Schleifen ist grundsätzlich für alle Metalle außer für galvanisierte, verzinkte oder anderweitig beschichtete Oberflächen geeignet, da hier durch das Schleifen die aufgebraute Schicht verletzt werden würde. Duomere und je nach Material auch Elastomere können ebenfalls geschliffen werden.

### ● Strahlen

Beim Strahlen wird die Bauteiloberfläche durch die kinetische Energie des Strahlmittels (zum Beispiel Glaskugeln) gereinigt. Das Strahlmittel wird mit Druckluft auf die Oberfläche „geschossen“ und trägt dort festsitzende Verschmutzungen ab. Die Art des Strahlmittels und die Korngröße haben einen Einfluss auf das Ergebnis. Das Strahlen ist für alle unbeschichteten Metalle und für Duomere geeignet.

### ● Beflammen (Kreidl-Verfahren)

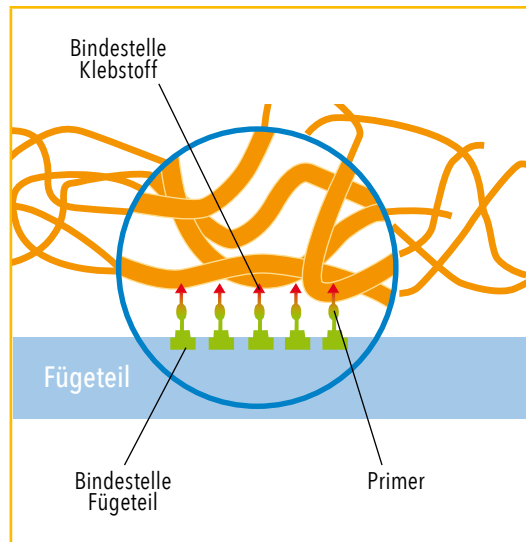
Das Beflammen wird bei thermoplastischen Kunststoffen (etwa Polyethylen und Polypropylen) angewendet, um die Oberflächenspannung zu erhöhen. Bei diesem Verfahren kommt die Fügeiteiloberfläche wenige Sekunden mit einer sauerstoffhaltigen (und daher blauen) Propan- oder Acetylenflamme in Kontakt. Dabei werden kurzfristig Temperaturen zwischen 200 °C und 400 °C erreicht. Auf diese Weise werden energiereiche Sauerstoffatome in die Oberfläche eingebaut so dass sich die Oberflächenspannung erhöht. Das verbessert die Benetzbarkeit und die Haftung.

### 🔗 LEHRER-INFO

Experiment 7: Die Auswirkung unsauberer Oberflächen  
Arbeitsblatt 1: Klebvoraussetzungen

### 🔗 ABBILDUNG 9

Wirkungsweise eines Haftvermittlers



### ● Primer (Haftvermittler)

Die Verbesserung der Adhäsion mittels eines Primers (Haftvermittler) ist in den Fällen notwendig, in denen Klebstoff und Fügeteil zwar grundsätzlich in der Lage sind, Bindungen einzugehen, allerdings nicht miteinander. Der Primer nimmt hier die Funktion eines Haftvermittlers ein. Bei den sogenannten „Silan-Primern“ beispielsweise handelt es sich um thermoplastische Polymere, die an ihren Enden zwei unterschiedliche reaktive Gruppen enthalten: Das ist erstens eine Alkoxy-Silangruppe (zum Beispiel bei Methoxy-Silanen  $\text{CH}_3\text{-O-Si-}$ ), die analog zu den später beschriebenen Silikonen unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit Alkohole (im genannten Beispiel folglich Methanol:  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) abspaltet und dabei eine Silanol-Gruppe ( $\text{HO-Si-}$ ) bildet. Diese geht mit einer Hydroxygruppe zum Beispiel einer Metalloberfläche ( $\text{Me-OH}$ ) unter Abspaltung von  $\text{H}_2\text{O}$  eine chemische Bindung ( $\text{Me-O-Si-}$ ) ein und stellt dabei die chemische Adhäsion zur Oberfläche her. Zweitens geht eine an den verwendeten Klebstoff angepasste Gruppe (bei Epoxidharzklebstoffen folglich eine Epoxygruppe) eine chemische Verbindung mit dem Klebstoff ein. Somit stellen die Primer einen „chemischen Adapter“ zwischen Fügeiteiloberfläche und Klebstoff dar.

Wer kennt das nicht? Der frisch angeklebte Handtuchhaken liegt nach zwei Tagen wieder auf dem Boden, der Henkel der geklebten Kaffeetasse übersteht die erste Spülmaschinenwäsche nicht, oder das schicke Wandtattoo löst sich bereits nach kurzer Zeit ab. Ärgerlich, aber vermeidbar, wenn man für die jeweilige Anwendung den richtigen Klebstoff auswählt, bei der Behandlung der Oberflächen keine Fehler macht und den Klebstoff richtig anwendet.

Gibt man den Begriff „Klebstoff“ in eine Suchmaschine ein, wird eine unübersehbare Anzahl von Informationen und Produkten angezeigt. Da kann man schnell den Überblick verlieren.

Es ist daher sinnvoll, die Klebstoffe zu klassifizieren, um so Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede besser verstehen zu können.

Eine erste Einteilung der Klebstoffe kann entsprechend ihrer chemischen Basis durchgeführt werden. Man unterscheidet Klebstoffe, die eine organische, und Klebstoffe, die eine anorganische Basis aufweisen. Dazwischen stehen als dritte Gruppe die Silikone, die sowohl anorganische als auch organische Bestandteile enthalten.

Außerdem kann dabei noch zwischen Klebstoffen unterschieden werden, die eine natürliche organische oder eine synthetische organische Basis besitzen. Beispiele für Klebstoffe auf natürlicher organischer Basis sind Baumharz und Bienenwachs. Diese Klebstoffe haben auch heute noch spezielle Einsatzgebiete, werden an dieser Stelle allerdings nicht weiter thematisiert.

Anorganische Klebstoffe sind temperaturbeständiger als organisch synthetische Klebstoffe, aber gleichzeitig sehr spröde. Beispiele anorganischer Klebstoffe sind Zement, Mörtel, Wasserglas\* und Gips.

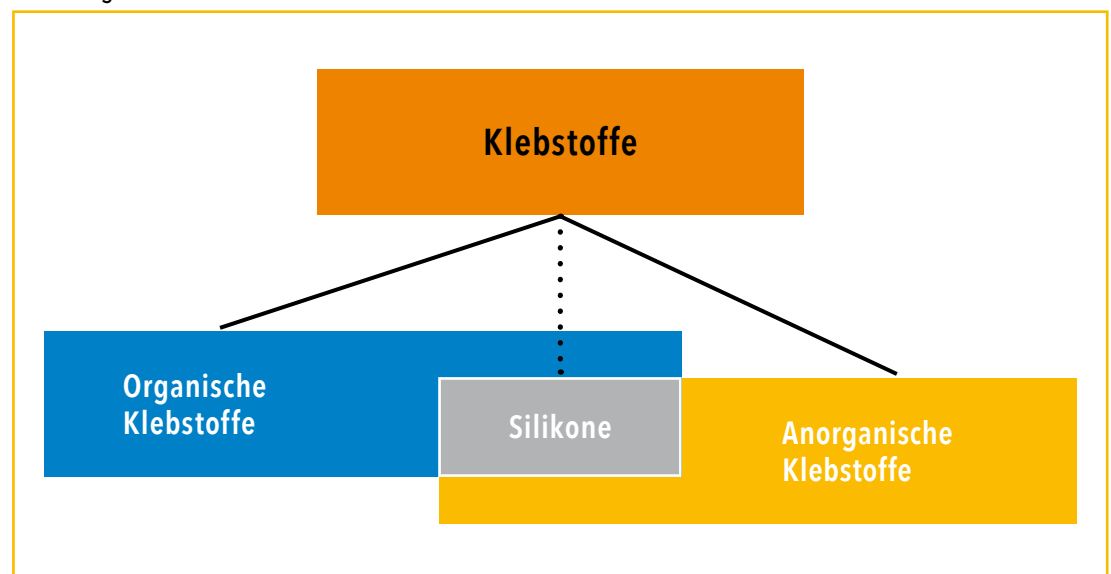
Im Folgenden werden ausgewählte Klebstoffe aus den Gruppen der Silikone und synthetischen organischen Klebstoffe näher betrachtet. So unterschiedlich die Eigenschaften und die Verarbeitung dieser Klebstoffe auch sein mögen, eines haben sie alle gemeinsam: Sie sind synthetische Kunststoffe.

### HINWEIS

Vereinfacht formuliert ist Klebstoffchemie ein wichtiger Bereich der Kunststoffchemie.

### ABBILDUNG 10

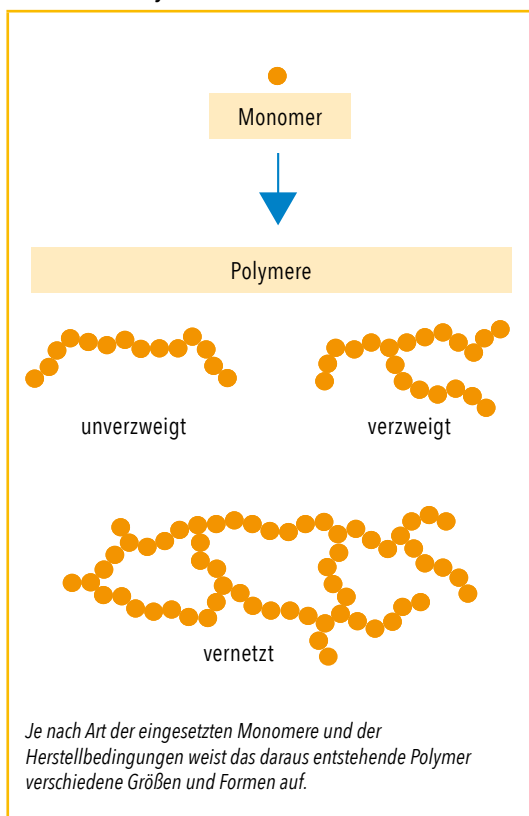
Einteilung der Klebstoffe nach chemischer Basis



Chemisch gesehen sind Kunststoffe Polymere. Diese Bezeichnung stammt aus dem Griechischen und bedeutet so viel wie „aus vielen Teilen bestehend“. Tatsächlich handelt es sich bei Polymeren um „Riesenmoleküle“, sogenannte Makromoleküle. Diese können fadenförmig, verzweigt oder auch vernetzt sein. Grundbausteine der Polymere sind einfachere gleichartige Moleküle, die Monomere, die sich durch chemische Reaktionen zu den Polymeren verbinden. Im einfachsten Fall ist ein Polymer aus immer der gleichen Art Monomer aufgebaut; möglich ist aber auch ein Aufbau aus verschiedenen Arten von Monomeren.

ABBILDUNG 11

Monomer - Polymer



LEHRER-INFO

Experiment 8: Tyndall-Effekt

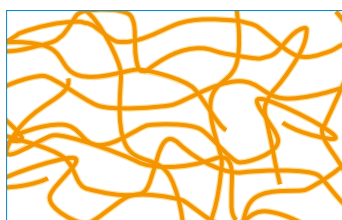
5.1 Kunststoffklassen

Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Kunststoffe gilt ihr mechanisches und thermisches Verhalten. Dadurch ergeben sich drei Kunststoffklassen.

ABBILDUNG 12

Kunststoffklassen

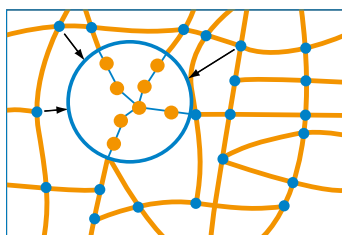
Thermoplaste - nicht vernetzt



Thermoplastketten (Schema)

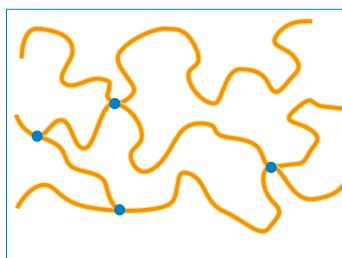
Cyanacrylate (Sekundenklebstoffe)  
Strahlenhärtende Klebstoffe  
Alle physikalisch abbindenden\* Klebstoffe wie Schmelzklebstoffe, Lösemittelhaltige Nassklebstoffe, Kontaktklebstoffe, Dispersionsklebstoffe

Duomere - stark vernetzt



Epoxidharzklebstoffe  
Phenolharzklebstoffe  
Anaerob härtende Klebstoffe

Elastomere - schwach vernetzt



geknäult

Silikone  
Polyurethanklebstoffe

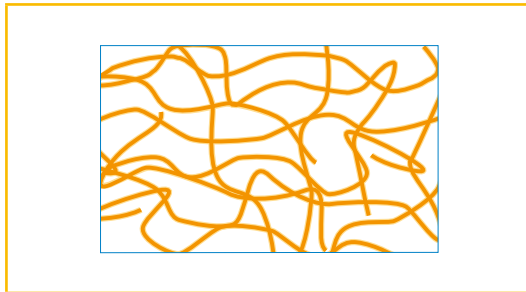


### ● Thermoplaste

Erwärmt man einen Thermoplast, so werden die Moleküle in Bewegung gebracht. Je stärker die Erwärmung ist, desto mehr beginnen die Ketten zu schwingen, bis durch die Bewegung der Abstand zwischen ihnen so groß wird, dass die physikalischen Wechselwirkungen aufbrechen. Der Kunststoff schmilzt. Genau diesen Prozess nutzt man bei den Schmelzklebstoffen.

◇ ABBILDUNG 13

#### Aufbau Thermoplaste



Die Polymere der Thermoplaste liegen je nach Art der eingesetzten Monomere linear oder verzweigt vor. Dabei ist die unterschiedliche Schmelztemperatur der verschiedenen Thermoplaste in der unterschiedlichen Struktur der Polymere begründet.

Neben der Temperatur haben auch Lösemittel einen Einfluss auf den Thermoplast. Die Lösemittelmoleküle setzen sich zwischen die Polymerketten und drücken diese auseinander, wodurch ebenfalls physikalische Wechselwirkungen zerstört werden. Der Kunststoff quillt und löst sich im weiteren Verlauf.

Auch eine lang anhaltende, in eine Richtung wirkende mechanische Belastung führt zu Veränderungen bei den physikalischen Wechselwirkungen. Die Polymerketten fangen an, aufgrund der mechanischen Belastung aneinander abzugleiten. Dabei werden physikalische Wechselwirkungen aufgebrochen und zum Teil an einer anderen Stelle neu gebildet. Diesen Vorgang nennt man „Kriechen“.

Beispiele für Thermoplaste sind Polyethylen, das für Schläuche, Folien und Gehäuse verwendet wird, oder Polystyrol, aus dem zum Beispiel Joghurtbecher hergestellt werden.



### ◇ LEHRER-INFO

Experiment 9: Schmelzklebstoff – Thermoplast

#### THERMOPLASTE

Struktur: lineare oder verzweigte Polymerketten, die miteinander verschlauft sind. Eigenschaften: schmelzbar, schweißbar, quellbar, löslich in bestimmten Lösemitteln, neigen zum Kriechen.

### ● Duomere

Duomere (lateinisch „durus“ = hart) sind spröde und hart, die Polymere liegen in einem engmaschig verknüpften dreidimensionalen Netzwerk vor, das kaum noch Verformungen zulässt. An den Vernetzungspunkten befinden sich chemische Bindungen.

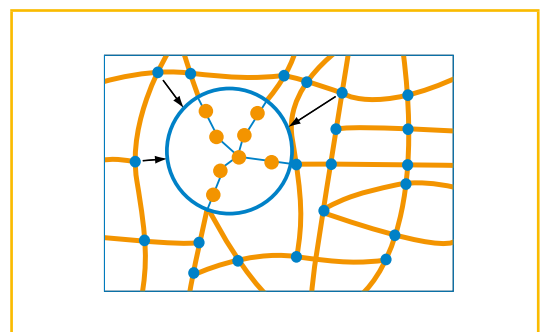
Bei chemischen Bindungen (hier: kovalenten Bindungen) teilen sich die Bindungspartner die Bindungselektronen. Damit ist eine chemische (kovalente) Bindung 10- bis 100-mal stärker als eine physikalische Wechselwirkung und durch äußere Einflüsse deutlich weniger zu beeinflussen.

Selbst bei mechanischer Beanspruchung unter hoher Temperatur behalten Duomere ihre Form. Dieses Verhalten wird „Temperaturstandfestigkeit“ genannt. Werden sie jedoch über einen bestimmten Temperaturbereich hinaus erhitzt, dann brechen Bindungen in und zwischen den Molekülen, und das Duomer zersetzt sich.

Beispiele für Duomere sind Polyester als Matrixharz für Bootsrümpfe oder Rotorblätter für Windkraftanlagen.

◇ ABBILDUNG 14

#### Netzwerk eines Duomers







### LEHRER-INFO

Experiment 10: Glyptalharz-Klebstoff – Duromer

### DUROMERE

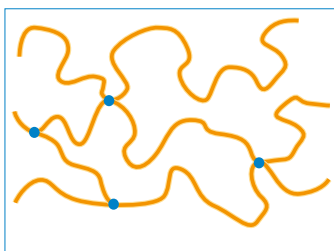
Struktur: engmaschiges dreidimensionales Netzwerk.  
Eigenschaften: nicht schmelzbar, nicht schweißbar, schwach quellbar, nicht löslich, keine Kriechneigung, temperaturstandfest

### Elastomere

Die Kunststoffklasse der Elastomere steht quasi zwischen den Thermoplasten und den Duromeren. Elastomere sind gummielastisch-flexibel, weisen allerdings auch ähnlich wie die Duromere eine Netzstruktur auf. Bei den Elastomeren ist dieses Netz allerdings viel weitmaschiger und somit weniger gespannt. Außerdem kann es Bereiche zwischen Vernetzungspunkten geben, in denen die Polymerkettenabschnitte aufgeknäueln oder miteinander verschlauft sind. Dadurch sind die fixierten Polymere bis zu einem gewissen Grad gegeneinander verschiebbar.

### ABBILDUNG 15

Netzwerk eines Elastomers



Wie bei den Duromeren werden auch bei den Elastomeren die Vernetzungspunkte durch chemische Bindungen gebildet; in den aufgeknäuelten Polymerbereichen kommen jedoch wie bei den Thermoplasten auch physikalische Wechselwirkungen zum Tragen.

Beispiele für Elastomere sind Butadien-Kautschuk, der zum Beispiel in Fahrzeugreifen eingesetzt wird, und Silikone, die zum Beispiel als Dichtungsmittel Verwendung finden.



### ELASTOMERE

Struktur: weitmaschiges dreidimensionales Netz mit zum Teil aufgeknäuelten Polymerkettenabschnitten.

Eigenschaften: nicht schmelzbar, nicht schweißbar, quellbar in bestimmten Lösemitteln, nicht löslich, gummielastisch-flexibel.

Die Einteilung der synthetisch organischen Klebstoffe und der Silikone in eine der drei vorgestellten Kunststoffklassen ist nicht immer eindeutig, da sich während der Härtung chemische Veränderungen ergeben können. Allerdings muss man zwischen dem Zustand vor und nach der Härtung unterscheiden, denn um die Oberfläche benetzen zu können, müssen Klebstoffe bei der Verarbeitung/beim Auftrag flüssig sein (Benetzung: siehe Kapitel 3). Um aber im fertigen Produkt auch belastbar zu sein, muss der Klebstoff fest werden, das heißt den Aggregatzustand wechseln.

## 5.2 Verfestigungsmechanismen von Klebstoffen

Man unterscheidet physikalisch abbindende Klebstoffe und chemisch härtende Klebstoffe.

Bevor auf die weiteren Details einiger chemisch härtenden und physikalisch abbindenden Klebstoffe eingegangen wird, müssen einige zentrale Begriffe geklärt werden.

### Ein- und zweikomponentige Klebstoffe

Verarbeitungsfertige Kunststoffe liegen entweder in einer Kartusche bzw. Gebinde als Einkomponenten-Klebstoffe oder in zwei Kartuschen bzw. Gebinden als Zweikomponenten-Klebstoffe vor.

Der Begriff „Komponente“ hat also im klebtechnischen Zusammenhang eine andere Bedeutung als in der Chemie, wo eine Komponente als ein Bestandteil eines Gemischs definiert ist. Bei einem Zweikomponenten-Klebstoff sind die chemischen Reaktionskomponenten (Harz und Härter, s. u.) räumlich getrennt und reagieren beim Zusammengeben miteinander. Beim chemisch härtenden Einkomponenten-Klebstoffen dagegen sind die chemischen Reaktionskomponenten (Harz und Härter, s. u.)

nicht räumlich getrennt, sondern chemisch blockiert. Auf Grund dieser Tatsache liegen die chemischen Reaktionskomponenten nebeneinander gemischt in einem Behältnis als Einkomponenten-Klebstoff vor und reagieren im Gegensatz zu den oben genannten Zweikomponenten-Klebstoffen erst unter spezifischen Bedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit oder UV-Strahlung.

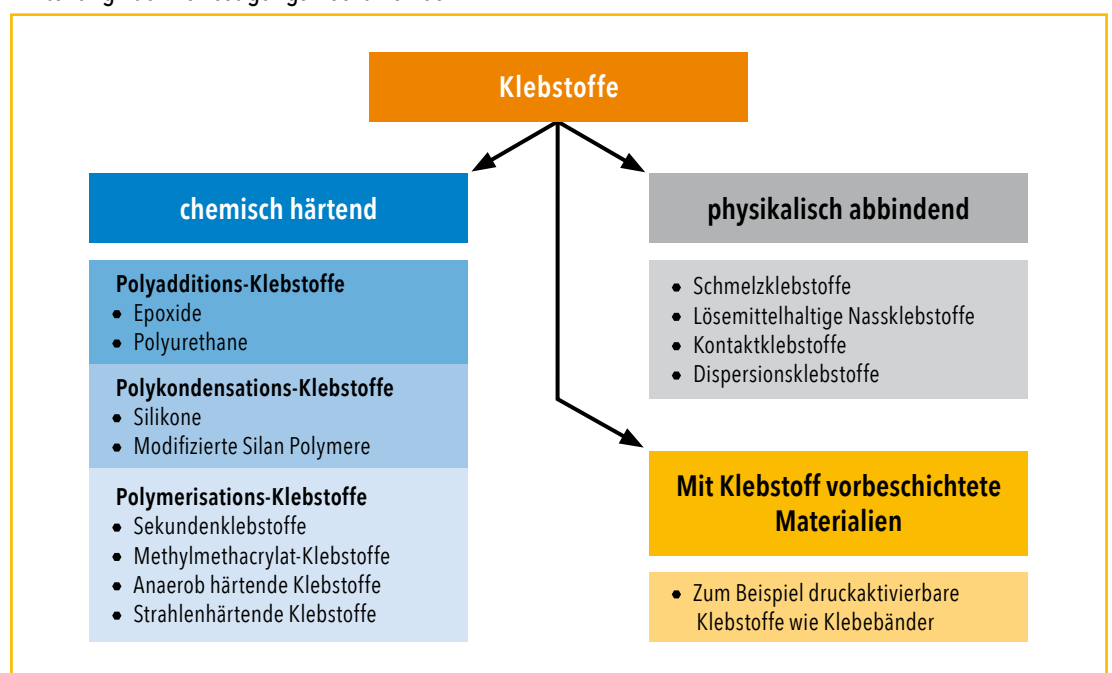
Bei physikalisch abbindenden Klebstoffen liegt das Klebstoffpolymer grundsätzlich in einem Gebinde als Einkomponenten-Klebstoff vor. Es verfestigt sich infolge physikalischer Vorgänge, etwa der Verdunstung des Lösemittels und den daraus resultierenden Wechselwirkungen der Klebstoff-Polymere untereinander.

### Harz und Härter

Gerade bei den chemisch härtenden Klebstoffen stößt man im technischen Datenblatt immer wieder auf die Begriffe „Harz“ und „Härter“. Sie sind für das Verständnis der Verarbeitung wie der Aushärtung von entscheidender Bedeutung. In den Anfängen der Klebtechnik benutzte man zum Fügen der Teile eine klebrige Masse, die man „Harz“ nannte. In der Mehrzahl handelte es sich aus heutiger Sicht um physikalisch abbindende Klebstoffe. Die mit diesem „Harz“ erreichte Festigkeit war ausrei-

ABBILDUNG 16

Einteilung nach Verfestigungsmechanismus





chend. Wollte man bei anderen Anwendungen den Klebstoff fester haben, so gab man zu dem Harz eine weitere Substanz, die das Harz durch weitergehende Polymerisation oder Vernetzung der Klebstoffmoleküle härter machte. Diese zweite Substanz wurde entsprechend ihrem Einfluss „Härter“ genannt.

Die Begriffe „Harz“ und „Härter“ haben eine längere Tradition als die der Einkomponenten- (1K) bzw. Zweikomponenten-Klebstoffe (2K). Beide haben sich zum Teil nebeneinander historisch entwickelt und führen daher manches Mal zur Verwirrung. Wie oben beschrieben werden Klebstoffe, die als Kombination von Harz und Härter in getrennten Gebinden auf den Markt kommen, den 2K-Klebstoffen zugeordnet werden.

### 5.3 Chemisch härtende Klebstoffe

Während des Aushärtungsprozesses wird das Klebstoffpolymer durch chemische Reaktionen zwischen den Bestandteilen gebildet. Die reagierenden Komponenten werden dabei als Harz und Härter bezeichnet und werden als Klebstoffvorstufen in zwei getrennten Gebinden auf den Markt gebracht. Die Vorstufen können dabei als Monomer oder als größeres Molekül, das bereits aus mehreren Monomeren aufgebaut ist, als sog. Prepolymer\*, vorliegen. Prepolymere können eine höhere Viskosität als die entsprechenden Monomere besitzen. So hat man die Möglichkeit, über die Verwendung von Monomeren oder Prepolymeren als Ausgangssubstanzen, Einfluss auf das Fließverhalten des noch unausgehärteten Klebstoffes zu nehmen.

Der chemische Aufbau der eingesetzten Härter- und Harzmoleküle bestimmt nicht nur die Kunststoffklasse (Thermoplast, Duromer, Elastomer), zu der der Klebstoff aushärtet, sondern auch die Klebstoffart (zum Beispiel Epoxid oder Polyurethan). Im Gegensatz zu der Gruppe der physikalisch abbindenden Klebstoffe, zu der vorwiegend Thermoplaste gehören, findet man bei den chemisch härtenden alle drei Kunststoffklassen wieder. Die unterschiedlichen Reaktionswege zur Polymerbildung (Polyaddition, Polykondensation, Polymerisation) führen zu einer Unterteilung der chemisch härtenden Klebstoffe.

ABBILDUNG 17

#### Unterteilung der chemisch härtenden Klebstoffe

##### Polyadditions-Klebstoffe

- Epoxide
- Polyurethane

##### Polykondensations-Klebstoffe

- Silikone
- Modifizierte Silan Polymere

##### Polymerisations-Klebstoffe

- Sekundenklebstoffe
- Methylmethacrylat-Klebstoffe
- Anaerob härtende Klebstoffe
- Strahlhärtende Klebstoffe



### 5.3.1 Polyadditions-Klebstoffe

Zu den Klebstoffen, die durch eine Polyaddition aushärten, gehören Epoxidklebstoffe und die Polyurethane, wobei hier auf die 2K-Epoxide und die 1K-feuchtigkeitshärtenden Polyurethane näher eingegangen werden soll.

Charakteristisch für Klebstoffe, die nach dem Mechanismus der Polyaddition aushärten, ist eine abwechselnde Anordnung von Harz- und Härtermolekülen im entstehenden Polymer. Dabei bestimmt das stöchiometrische Verhältnis der reaktiven Stellen in den Vorstufenmolekülen das Mischungsverhältnis. Damit es zu einer optimalen Reaktion zwischen Harz und Härter kommen kann, ist dieses Mischungsverhältnis exakt einzuhalten und bei der Verarbeitung auf eine gute Durchmischung der beiden Anteile zu achten.

Das jeweils richtige Mischungsverhältnis muss man dem vom Hersteller beigefügten technischen Datenblatt (Verarbeitungshinweisen) entnehmen. Bei Nichteinhaltung der Vorgaben kann die Aushärtung nicht so ablaufen wie geplant.

#### ◆ Epoxidharze

Systeme auf Epoxidharzbasis gehören zu den am meisten verarbeiteten Konstruktionsklebstoffen.

Ob im Fahrzeug- oder im Flugzeugbau, bei Rotorblättern von Windkraftanlagen oder im Haushalt – fast überall trifft man auf Epoxide. In der Mikroelektronik werden sie mit Zusätzen als elektrisch leitfähige Klebstoffe verwendet; man benutzt sie als Wärmeleiter. Epoxide gibt es sowohl als ein- wie auch als zweikomponentige Systeme. Wir wollen uns hier auf die zweikomponentigen Systeme beschränken.

#### STECKBRIEF 2K-EPOXIDHARZE

##### Beschreibung

- Polyadditions-Klebstoff
- Härtet zum Duromer aus
- 2K-Systeme, raumtemperaturhärtend

##### Verarbeitung

- Aushärtung in einigen Stunden bis Tagen bei Raumtemperatur
- Beschleunigung der Härtung und Steigerung der Festigkeit und Beständigkeit durch Erwärmen bei gleichzeitiger Abnahme der Elastizität
- Reaktionsstart durch Zusammengeben und Vermischen der Komponenten
- Relativ empfindlich gegenüber Mischungsfehlern

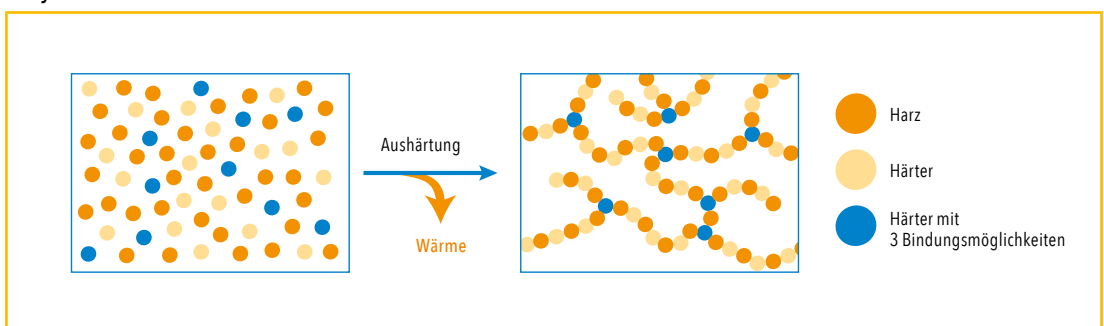
##### Eigenschaften im Verbund

- Hochfeste Verbindungen erreichbar; höchste Festigkeiten bei heißhärtenden 1 K- Systemen
- Vergleichsweise geringe Flexibilität
- Dauertemperaturbelastbarkeit je nach Typ 100 °C bis max. 220 °C
- Geringe Neigung zum Kriechen

Bei Epoxiden liegen Harz und Härter getrennt vor; entweder in einer Doppelkartusche oder in vollständig getrennten Gebinden. Bringt man Harz und Härter zusammen, so startet die Aushärtereaktion der gleichberechtigten Reaktionskomponenten bereits bei Raumtemperatur. Je nach Art von Harz und Härter dauert es bis zur vollständigen Aushärtung einige Stunden bis Tage. Eine

ABBILDUNG 18

#### Polyaddition schematisch



Beschleunigung der Aushärtung bei gleichzeitiger Zunahme der Festigkeit und Beständigkeit wird durch Zufuhr von Wärme erreicht, wobei es jedoch wichtig ist, sich nach den Vorgaben des technischen Datenblattes zu richten. Epoxide härten immer zum Duomer aus, was ihre hohen Festigkeiten, ihre eher geringe Flexibilität, aber auch ihre relativ gute Beständigkeit gegen Feuchtigkeit, viele Chemikalien und Umwelteinflüsse erklärt.

Der erste wichtige Punkt auf der Zeitachse ist die sogenannte Topfzeit (Verarbeitungszeit). Sie beschreibt die Zeitspanne, während der der Klebstoff verarbeitet werden muss, und startet ab dem Zeitpunkt, an dem beide Komponenten das erste Mal in Kontakt kommen. Die Topfzeit kann je nach Klebstoff von einigen Minuten bis zu mehreren Stunden reichen und wird direkt von der Geschwindigkeit der Reaktion zwischen Harz und Härter bestimmt. Spätestens zum Ende der Topfzeit muss der Fügevorgang vollständig abgeschlossen sein, da die Viskosität des aushärtenden Klebstoffs derart zugenommen hat, dass die Benetzung der Werkstoffoberfläche nur eingeschränkt oder gar nicht mehr möglich ist.

Der Gelpunkt beschreibt den Wechsel des Aggregatzustandes von flüssig/viskos zu fest. Der nächste wichtige

Bereich ist die Handfestigkeit. Der Klebstoff ist zu diesem Zeitpunkt zwar noch nicht vollständig ausgehärtet, aber schon so fest, dass weitergearbeitet werden kann, ohne die Klebung zu stark zu belasten. Zu beachten ist, dass die Topfzeit sowohl von der Temperatur als auch von der Ansatzmenge abhängig ist. Je höher die Temperatur, desto schneller laufen chemische Reaktionen, zu denen auch die Aushärtungsreaktionen gehören ab, und die Topfzeit verkürzt sich.

Beim Erreichen der Endfestigkeit sind alle, unter den Aushärtebedingungen möglichen chemischen Reaktionen nahezu abgeschlossen, die maximal mögliche Festigkeit ist erreicht.

**LEHRER-INFO**

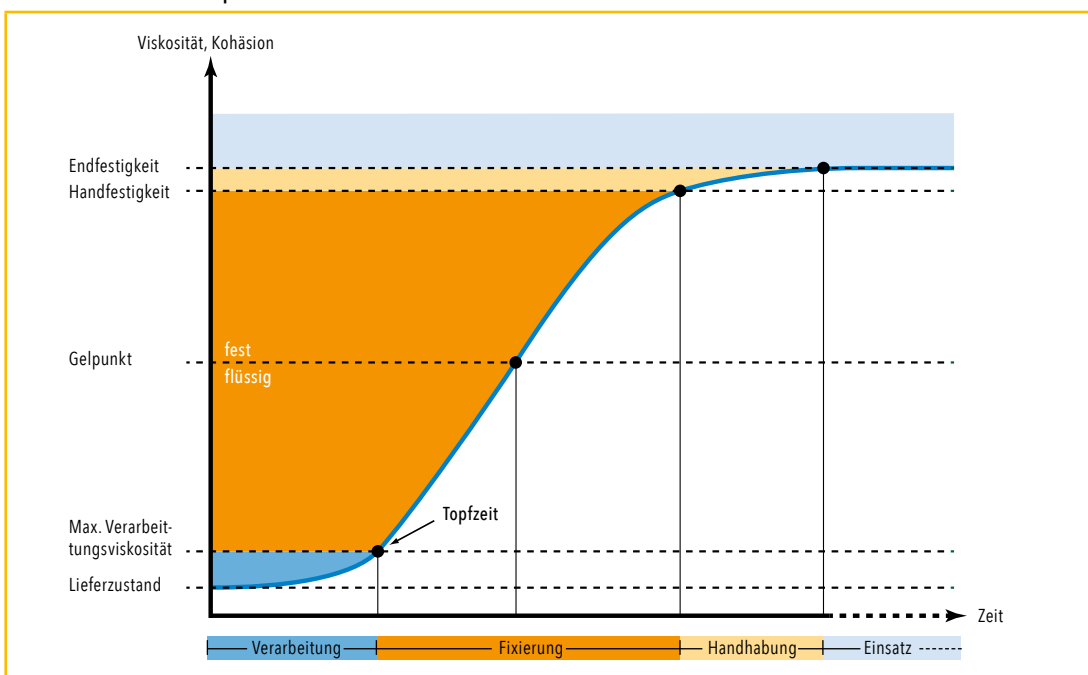
Experiment 11: Topfzeit bei 2-Komponentenklebstoffen

**HINWEIS**

Faustregel: Pro 10 °C Temperaturerhöhung halbiert sich die Topfzeit.

**ABBILDUNG 19**

Reaktionsverlauf 2K-Epoxyd



### ● Polyurethane

Wie bei Epoxiden stehen auch bei Polyurethan-Klebstoffen Systeme mit einer einkomponentigen oder zweikomponentigen Verarbeitung zur Verfügung. Darüber hinaus kann man Polyurethane auch als Dispersionsklebstoff oder als lösemittelhaltigen Nassklebstoff finden. Hier soll sich auf die hochelastischen 1K-Polyurethanklebstoffe beschränkt werden.

#### 🔍 LEHRER-INFO

Experiment 12: Polyurethanklebstoff/Desmophen/Desmodur

Experiment 13: Reaktivklebstoff

Ein großer Einsatzbereich von elastomeren Polyurethanen sind Scheibenklebungen im Automobilbereich und im Schienenfahrzeugbau. Im Auto sind die Scheiben so zum tragenden Bauteil geworden. Eingeklebte Scheiben erhöhen die Torsionssteifigkeit, das heißt den Widerstand gegen Drehbewegungen der Karosserie, wodurch die Blechstärke reduziert und Gewicht eingespart werden kann. Besonders zu beachten ist bei Polyurethanen deren UV-Empfindlichkeit, die zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften (Versprödung) führt. Zum Schutz vor UV-Strahlung sind deshalb geklebte Scheiben etwa im Auto mit einer schwarzen Keramikschrift umrahmt.

### STECKBRIEF 1K-POLYURETHANE, FEUCHTIGKEITSHÄRTENDE POLYURETHANKLEBSTOFFE

#### Beschreibung

- Polyadditions-Klebstoffe
- 1K-Systeme, feuchtigkeitshärtend, härten zum Elastomer aus

#### Verarbeitung

Feuchtigkeitshärtende 1K-Systeme

- Härtingsbedingungen: oft zwischen + 5 bis + 40 °C, 40 – 70 % rel. F.
- Härtung von außen nach innen (anisotrop) mit einer Geschwindigkeit von einigen mm in den ersten Tagen, danach langsamer
- Beschleuniger: schnelle und gleichmäßige Aushärtung unabhängig von der Luftfeuchtigkeit (isotrop)
- Klebschicht nach Aushärtung gummielastisch-flexibel
- Reparatur auf aufgeschnittener Klebstoffschicht möglich

#### Eigenschaften im Verbund

- Niedrig- bis mittelfeste Verbindungen
- Sehr flexibel (max. Bruchdehnung im Zugversuch bis 600 %)
- Dauergebrauchstemperaturen von ca. – 40 °C bis 100 °C



RegioShuttle (StadlerRail) – ein dieselbetriebenes Schienenfahrzeug: Alle äußerlich sichtbaren Elemente (Dachsegmente, Außenhautpaneele, Bugmaske, Scheiben) mit Ausnahme der Puffer und des Fahrwerks sind mit feuchtigkeitshärtendem 1K – Polyurethan-Klebstoff geklebt

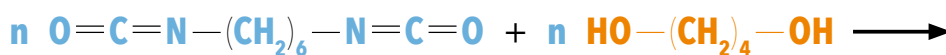


Die in diesem Bereich eingesetzten Polyurethane sind vielfach 1K-Systeme, die durch Feuchtigkeit aushärten. Diese Klebstoffe sind sehr zähflüssig (hochviskos) und beinhalten in der Kartusche ein Polyurethan-Prepolymer mit endständigen Isocyanat-Gruppen als dem einen der beiden Reaktionspartner. Bei der Aushärtung reagiert ein Teil der Isocyanat-Gruppen mit Luftfeuchtigkeit und bildet dabei Amine. Hierbei wird in geringen Mengen Kohlenstoffdioxid frei. Die Amin-Gruppen reagieren dann mit den verbliebenen Isocyanat-Gruppen über Polyadditionsreaktionen und härten so den Klebstoff aus. Das frei werdende Kohlenstoffdioxid wird zu einem Großteil durch in dem Klebstoff enthaltenen Ruß (s. u.) adsorbiert, so dass eine unerwünschte Blasenbildung nahezu vollständig unterdrückt wird.

Je nach Kombination von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ist die Reaktion unterschiedlich schnell. Da die Luftfeuchtigkeit von außen zuerst in Kontakt mit dem aufgetragenen Klebstoff kommt, startet die Aushärtereaktion von außen nach innen (also anisotrop), und es bildet sich eine Haut aus bereits gehärtetem Klebstoff. Weiter innen ist der Klebstoff noch unausgehärtet. Für den Anwender bedeutet dies, dass er hier die „Hautbildezeit“ bei der Verarbeitung beachten muss. Sie kann – analog zur Topfzeit bei den 2K-Epoxiden – dem technischen Datenblatt entnommen werden. Ist die Hautbildezeit abgelaufen, ist die entstandene Haut bereits so dick, dass die Benetzung des zweiten Fügeparts nicht mehr stattfinden und dadurch keine Adhäsion entstehen kann.

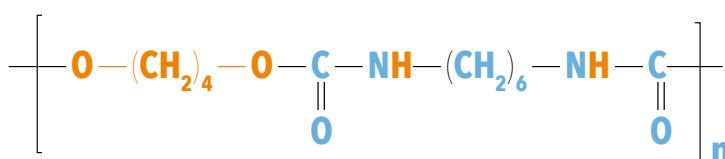
ABBILDUNG 20

#### Bildung von Polyurethanen



Hexamethylendiisocyanat

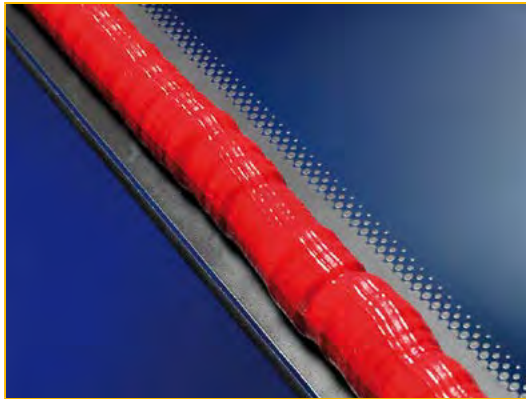
1,4-Butylenglykol



Polyurethan

ABBILDUNG 21

Aufgetragene Klebstoffraupe

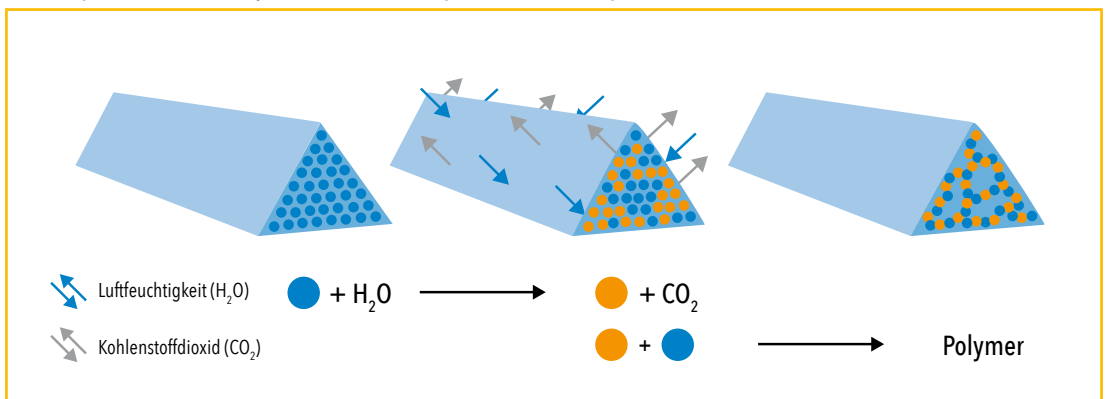


Ist eine schnellere Aushärtung notwendig, kann die Aushärtung durch das Beimischen eines feuchtigkeitsenthaltenden Gels beschleunigt werden. Die Härtung erfolgt dann wie bei einem 2K-Klebstoff gleichzeitig auch im Inneren. (Es handelt sich dann praktisch um ein 2-komponentiges-System).

Nach der Aushärtung ist die Klebung gummielastisch-flexiblen, deshalb werden 1K-feuchtigkeitshärtende Klebstoffe dort eingesetzt, wo Materialien mit stark unterschiedlichem Temperatursdehnungsvermögen verbunden werden müssen, etwa beim Kleben von Glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) auf Stahl oder bei der Reparatur von Autoscheiben.

ABBILDUNG 22

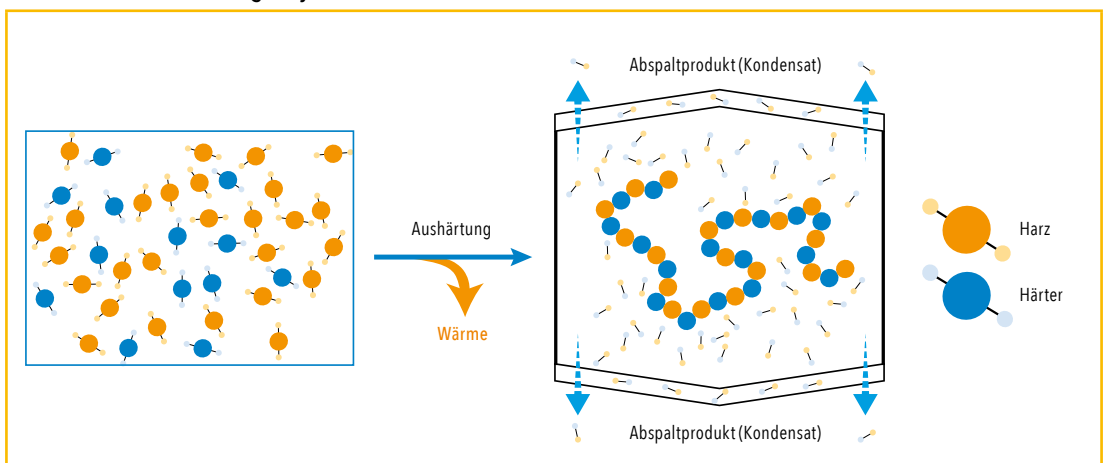
Härtung der Klebstoffraupe unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit



Bei der Aushärtung reagieren die Prepolymere mit Luftfeuchtigkeit zum Polymer. Hierbei wird in geringen Mengen CO<sub>2</sub> frei.

ABBILDUNG 23

Schematische Darstellung Polykondensation





### 5.3.2 Polykondensationsklebstoffe

Typische Vertreter von Polykondensationsklebstoffen sind Silikone. Man kennt sie von Dusch- oder Badewannenabdichtungen in Dehnungsfugen oder vom Kleben von Aquarien. Neben den Silikonem sind auch silanmodifizierte Klebstoffe, die zum Beispiel beim Legen von Parkett zum Einsatz kommen, typische Vertreter der Polykondensationsklebstoffe. Sie enthalten die gleichen funktionellen Aushärtegruppen wie die Silikone, sind aber im Gegensatz zu diesen rein organisch aufgebaut. Wie bei der Polyaddition entsteht auch bei der Polykondensation ein Polymer, das aus einer abwechselnden (alternierenden) Reihenfolge von Harz- und Härtermolekülen besteht. Bei jeder einzelnen Reaktion der Polykondensation entsteht ein kleines Abspaltprodukt (z. B. Wasser, Alkohol- oder Essigsäure).

Liegt eine zweikomponentige Verarbeitung vor, muss auch hier das vom Klebstoffhersteller angegebene Mischungsverhältnis exakt eingehalten werden.

#### ● Silikone

Wie kein anderer Klebstoff bleiben Silikone auch bei tiefen Temperaturen (-70 bis -100 °C) hochelastisch. Darüber hinaus sind sie äußerst temperaturbeständig (-100 bis +200 °C Dauergebrauchstemperatur, kurzfristig bis +300 °C bei entsprechender Rohstoffauswahl), witterungsbeständig, und selbst chemisch aggressive Substanzen, UV-Strahlung oder Ozon können dieser Klebstoffart kaum schaden. Allerdings lassen sich Silikone aufgrund ihrer sehr geringen Oberflächenspannung nicht lackieren oder beschichten.

#### ○ LEHRER-INFO

Experiment 14: Nachweis von Essigsäure bei der Vernetzung von Silikon

#### STECKBRIEF 1K-SILIKONE

##### Beschreibung

- Polykondensations-Klebstoff
- 1K-Systeme, feuchtigkeitshärtend, meist unter Abspaltung von Essigsäure oder Alkohol
- Reagieren zum Elastomer aus

##### Verarbeitung

- Härtingsbedingungen: + 5 bis + 40 °C, 5 - 95 % rel. F.
- Durchhärtung: wenige mm/24 h

##### Eigenschaften im Verbund

- Niedrigste Verbindungen (Zugscherfestigkeit meist um 1 N/mm<sup>2</sup> (MPa))
- Hervorragende Flexibilität auch bei niedrigen Temperaturen
- Dauergebrauchstemperatur -100 bis 200 °C, kurzfristig bis 300 °C
- Nicht überlackierbar oder beschichtbar
- Nicht auf aufgeschnittener Klebstoffschicht reparaturfähig

Silikone gibt es sowohl als 1K-Systeme, die in Gegenwart von Luftfeuchtigkeit bei Raumtemperatur aushärten, wie auch als 2K-Systeme, die unabhängig von der Luftfeuchtigkeit aushärten. Die 1K-Silikone können im Bereich von 5 bis 95 Prozent relativer Luftfeuchte aushärten. Dabei sind Temperaturen zwischen + 5 und + 40 °C notwendig. Die Luftfeuchtigkeit hat hier die Aufgabe, die an Harz und Härter angehängten Schutzmoleküle (Essigsäure, Alkohole etc.), auch Vernetzer genannt, abzuspalten und damit die Polykondensations-Aushärtereaktion zu ermöglichen. Auch hier findet entsprechend zu den 1K-Polyurethanen die Aushärtung anisotrop von außen nach innen statt, was zur Folge hat, dass auch hier die Hautbildungszeit berücksichtigt werden muss. Die vollständige Vernetzung und Durchhärtung hängt von der Schichtdicke ab und kann mehrere Tage in Anspruch nehmen. Im Vergleich zum 1K-Polyurethan ist die Aushärtung von Silikonem langsamer.



Silikondichtstoff

### 5.3.3 Polymerisationsklebstoffe

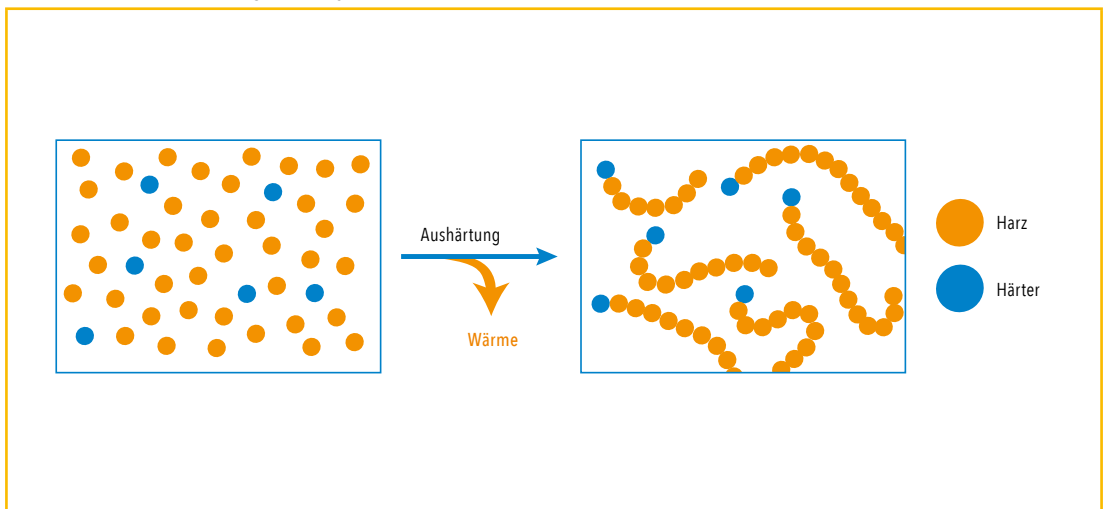
Bei den Polymerisationsklebstoffen findet man unter anderem einen Klebstoff, der den meisten Menschen aus dem Alltag bekannt ist und mit dem zu Werbezwecken auch schon mal ein Auto an die Decke gehängt wird: der Sekundenklebstoff, im Fachjargon: das Cyanacrylat.

Daneben gehören zu dieser Klebstoffgruppe die anaerob härtenden Klebstoffe (zum Beispiel für Schraubensicherungen) oder die strahlenhärtenden Klebstoffe, die bei-

spielsweise der Zahnarzt bei der Verarbeitung von Kunststofffüllungen verwendet. Die Polymerisation verläuft als Kettenreaktion. Im ersten Schritt wird ein reaktiver Härter zum Beispiel durch Erwärmung, Zugabe eines Aktivators oder durch Licht aktiviert. Der aktivierte Teil reagiert mit einem weiteren Harzmolekül. Dabei wird wiederum die Aktivierung an das neue Harzende übertragen usw. Diese Reaktion läuft so lange ab, bis kein verfügbares Harzmolekül mehr vorliegt.

ABBILDUNG 24

Schematische Darstellung der Polymerisation





### ◆ Cyanacrylat-Klebstoffe

Diese werden auch als Sekundenklebstoffe oder „Superklebstoffe“ bezeichnet, denn tatsächlich erreicht man mit ihnen innerhalb von Sekunden handfeste Klebungen; die Endfestigkeit wird allerdings auch hier erst nach einigen Stunden erreicht.

Sekundenklebstoffe eignen sich zum Kleben vieler Werkstoffkombinationen. Typische Anwendungsbereiche sind Lautsprechermembranen oder Stoßklebungen von Gummiprofilen.

Sekundenklebstoffe benötigen zur Aushärtung Wasser. Das kann zum Beispiel Luftfeuchtigkeit oder auf dem Füge teil adsorbierte Feuchtigkeit sein. Die Geschwindigkeit der Aushärtung wird durch den Kontakt mit basischen Untergründen gesteigert. Umgekehrt verzögern saure Beimischungen oder sauer reagierende Untergründe die Aushärtung.

#### 📌 LEHRER-INFO

Experiment 15: Schnellpolymerisation von Sekundenklebstoff

### STECKBRIEF SEKUNDENKLEBSTOFFE

#### Beschreibung

- 1K-Klebstoff aus der Gruppe der Polymerisations-Klebstoffe
- Härter:
  - a) Luftfeuchtigkeit (spontan > 70 % rel. F., optimal: 40–80 % rel. F.) oder
  - b) Feuchtigkeit auf Füge teiloberflächen
- Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit durch Kontakt mit basischen Untergründen (> pH 7); saure Untergründe (< pH 7) wirken verzögernd
- reagiert zum Thermoplast aus

#### Verarbeitung

- Bei mehr als 80 % relativer Feuchte oder stark basischen Füge teilen Gefahr der Schockhärtung
- Max. Klebschicht 0,2 mm
- Nicht modifizierte Produkte sind sehr dünnflüssig, maximale Spaltüberbrückung ca. 0,05 mm (höhere Schichtdicken bedürfen verdickte Systeme)

#### Eigenschaften im Verbund

- Mittelfeste bis hochfeste Verbindungen
- Geringe Flexibilität
- Geringe Wärme- und Feuchtigkeitsbeständigkeit

Die Cyanacrylat-Klebstoffe sind ziemlich bruchfest, relativ spröde, feuchtigkeitsempfindlich und besitzen eine geringe Wärmebeständigkeit (in der Regel bis ca. 80 °C).

### ● Anaerob härtende Klebstoffe

Diese einkomponentigen Klebstoffe härten unter Ausschluss von (Luft-)Sauerstoff aus (anaerob). Anaerob härtende Klebstoffe werden häufig zum Sichern von Schraubverbindungen eingesetzt.



Um eine Aushärtung bereits im Liefergebinde zu vermeiden, muss der Klebstoff also Kontakt mit Sauerstoff haben. Er wird deshalb in luftdurchlässigen Kunststoffflaschen abgefüllt, die nicht vollständig gefüllt sind und vor der Füllung mit Sauerstoff durchspült werden.

Erst in sauerstofffreier Umgebung, also wenn die Füge­teile gefügt sind, härtet der Klebstoff aus. Neben dem Luftabschluss benötigt diese Klebstoffart Eisen- oder Kupferionen, um auszuhärten. Diese können von metallischen Oberflächen kommen oder in Form von Aktivatoren gezielt zugesetzt werden.

#### STECKBRIEF ANAEROB HÄRTENDE KLEBSTOFFE

##### Beschreibung

- 1K-Klebstoff aus der Gruppe der Polymerisations-Klebstoffe
- Aushärtung nur unter Sauerstoffabschluss und Metallkontakt (besonders Kupfer und Eisen)
- Härtet zum Duromer aus

##### Verarbeitung

- Blockierung der Härtung durch (Luft-)Sauerstoff
- Verwendung für Klebungen, bei denen auf Grund der Geometrie der Füge­teile Sauerstoffabschluss gewährleistet ist (zum Beispiel Welle-Nabe-Geometrie, Gewin­desicherung, Flüssig­dichtung)
- Maximaler Klebspalt: ca. 0,3 mm

##### Eigenschaften im Verbund

- Auf die jeweilige Anwendung angepasste Festigkeit
- Sehr geringe Flexibilität, relativ spröde
- Max. Dauereinsatztemperatur bis ca. 150 °C
- Hochfeste Systeme nur bei Temperaturen von 300–400 °C demontierbar

#### LEHRER-INFO

##### Experiment 16: Schraubensicherung mit anaerob härtendem Klebstoff

Anaerob aushärtende Klebstoffe verfestigen sich zu Duromeren. Mit ihnen lassen sich demgemäß hohe Festigkeiten mit guter Temperaturbeständigkeit erreichen. Die Festigkeit kann durch die Klebstoffzusammensetzung auf die jeweilige Anwendung (dauerfeste, bzw. wieder lösbare Verbindung) angepasst werden. In einigen Fällen lassen sich Füge­teile, die mit anaerob härtenden Klebstoffen verbunden wurden, erst bei Temperaturen von 300 bis 400 °C wieder lösen.

Da eine Aushärtung nur unter Sauerstoffabschluss ablaufen kann, kann mit dieser Klebstoffart nur eine relativ geringe Spaltbreitenüberbrückung (maximaler Klebspalt: < 0,3 Millimeter) erzielt werden. Anaerob härtenden Klebstoffen kommen neben ihrer fügenden Aufgabe oft gleichzeitig Dichtfunktionen zu. Außerdem sind sie im ausgehärteten Zustand sehr beständig gegen Öle, Lösemittel und Feuchtigkeit. All diese Eigenschaften schätzt man unter anderem im Fahrzeugbau, wenn es zum Beispiel um die Montage von Motoren oder Getrieben geht. Dort werden sie beispielsweise beim Getriebe­einbau als Flüssig­dichtungen verwendet, die zwar eine hohe Kohäsionsfestigkeit, jedoch nur eine geringe Adhäsion zu den geschliffenen Dichtflächen aufweisen. Die geringe Adhäsion ist in diesem Anwendungsgebiet von Vorteil, da sie im Reparaturfall eine leichtere Demontage ermöglichen.

Darüber hinaus finden anaerob härtende Klebstoffe ein vielfältiges Einsatzgebiet als Schraubensicherungen. Sie verhindern ein ungewolltes Lösen der Schraub­verbindung, zum Beispiel durch Vibrationen.



### ● Strahlenhärtende Klebstoffe

Häufig verwendet werden diese Klebstoffe zum Ankleben künstlicher Fingernägel, zum Einkleben von Kunststoff-Zahnfüllungen, zum Kleben von Glas (Optik, Glasdesign) oder zum Fügen transparenter Kunststoffe.



Bei strahlenhärtenden Klebstoffen erfolgt die Aktivierung durch einen sogenannten Photoinitiator. Die Polymerisation startet also durch Bestrahlung mit Licht (zum Beispiel mit UV-Licht) einer bestimmten Wellenlänge. Durch die Energie des UV-Lichts zerfällt der Photoinitiator (Härter) in sogenannte Radikale, die dann die Polymerisation starten. Die Wellenlänge und die Dosis des UV-Lichts müssen dabei genau auf das eingesetzte Klebstoffsystem abgestimmt sein; außerdem muss mindestens eines der Fügeteile für die Strahlen durchlässig sein. Die Härtingszeiten können im Bereich von einer Sekunde bis zu einigen Minuten liegen.

Strahlenhärtende Klebstoffe härten je nach Rohstoffeinsatz zum Thermoplast oder Duromer aus, wobei der Grad der Vernetzung durch die eingesetzten Rohstoffe im Klebstoff einstellbar ist. Die Rohstoffauswahl bestimmt ebenfalls die Elastizität und die Verformbarkeit des ausgehärteten Klebstoffs.

Mit strahlenhärtenden Klebstoffen lassen sich hohe Zug-scherfestigkeiten\* erreichen, sie sind ausgelegt für eine Dauereinsatztemperatur von  $-30\text{ °C}$  bis max.  $+120\text{ °C}$ .

#### STECKBRIEF STRAHLENHÄRTENDE KLEBSTOFFE

##### Beschreibung

- 1K-Klebstoffe aus der Gruppe der Polymerisations-Klebstoffe, Licht bestimmter Wellenlänge aktiviert den Härter
- Härtet zum Thermoplast, seltener zum Duromer aus

##### Verarbeitung

- Härtingszeit im Bereich von einer Sekunde bis zu einigen Minuten
- Dosis beachten
- Klebung mit einem strahlungsdurchlässigen Fügeteil

##### Eigenschaften im Verbund

- Hochfeste Verbindungen möglich
- Flexibilität über Rohstoffauswahl in gewissem Rahmen einstellbar
- Dauereinsatztemperatur bis ca.  $120\text{ °C}$

## 5.4 Physikalisch abbindende Klebstoffe

Bei physikalisch abbindenden Klebstoffen liegt der Klebstoff bereits in der vom Klebstoffhersteller bereitgestellten Verpackung als Polymer vor. Physikalisch abbindende Klebstoffe sind grundsätzlich 1K-Klebstoffe.

### ABBILDUNG 25

#### Unterteilung der physikalisch abbindenden Klebstoffe



Das Verfestigen erfolgt bei diesen Klebstoffen nicht durch eine chemische Reaktion, sondern mittels eines physikalischen Prozesses. Dieser kann das Abkühlen beim Schmelzklebstoff sein oder auch das Verdunsten eines Lösemittels (zum Beispiel Wasser, Alkohole) wie bei den Nassklebstoffen, den Kontaktklebstoffen oder den Dispersionsklebstoffen. Während des Abbindevorgangs erhöhen sich die physikalischen Wechselwirkungen zwischen den Polymerketten, was dazu führt, dass sie am Ende des Abbindens fest sind.

Da das eigentliche Klebstoffpolymer schon vorliegt, lassen sich in dieser Klasse nur Kunststoffe verarbeiten, die sich in den flüssigen Zustand überführen lassen: Dies sind vor allem lösliche und thermoplastische Polymere. Die physikalisch abbindenden Klebstoffe können in weitere Untergruppen eingeteilt werden:

#### ● Abkühlende Klebstoffe

Zu ihnen gehören die Schmelzklebstoffe. Das bekannteste Beispiel eines natürlichen Schmelzklebstoffes ist das Bienenwachs, das bei Körpertemperatur der Biene flüssig ist und beim Abkühlen erstarrt. Ein weiteres Beispiel sind die mittels Heißklebepistole zu verarbeitenden „Klebesticks“ (vgl. Experiment 9).

#### ● Trocknende Klebstoffe

Dazu gehören der lösemittelhaltige Nassklebstoff, der Kontaktklebstoff, aber auch der Dispersionsklebstoff. Auch diese drei Klebstoffarten kennt fast jeder. So werden beispielsweise Etiketten mittels eines wasserbasierenden Klebstoffs aufgebracht, und zumindest früher, vor der berechtigten Diskussion um die enthaltenen organischen Lösemittel, fand der lösemittelhaltige Nassklebstoff in Kindergarten und Schule bei Bastelarbeiten ein vielfältiges Einsatzgebiet. Muss einmal der Absatz eines Schuhs erneuert werden, kommt ein Kontaktklebstoff zum Einsatz. Einen Dispersionsklebstoff schließlich hat jeder schon einmal benutzt, der mit Holzleim gearbeitet hat.

### LEHRER-INFO

#### Experiment 17: Klebestift

Eine Sonderstellung unter den physikalisch abbindenden Klebstoffen nehmen die mit Klebstoff vorbeschichteten Materialien ein. Bei diesen Klebsystemen wird vom Hersteller vor der eigentlichen Anwendung der Klebstoff auf ein Trägermaterial aufgetragen, dort bindet er ab und verbleibt in sehr hochviskoser, dauerhaft klebriger Flüssigkeit. In der Anwendung beim Kunden folgt in der Regel kein weiterer Aushärte- oder Abbindeprozess, sondern lediglich der Adhäsionsaufbau zu den zu verbindenden Fügeteilen. Die sogenannten Haftklebstoffe kommen zum Beispiel als Klebeband oder Selbstklebetikett zum Einsatz.



### 5.4.1 Trocknende Klebstoffsysteme

Bei den trocknenden Klebstoffsystemen unterscheidet man zwischen solchen, die organische Lösemittel enthalten, und anderen, die wasserbasiert sind.

#### STECKBRIEF: NASSKLEBSTOFFE

##### Beschreibung

- Einkomponentiger Klebstoff
- Lösung von Thermoplasten in organischen Lösemitteln bzw. von unterschiedlichen Polymeren in Wasser
- Abbinden durch Verdunsten des Lösemittels oder Wassers aus der Klebfuge

##### Verarbeitung

- Fügen des nassen Klebfilms
- Nach dem Fügen muss Lösemittel (durch Fügeiteile) entweichen können
- Diffusionsklebung bei lösemittelbasierten Systemen möglich

##### Eigenschaften im Verbund

- Geringe Anfangsfestigkeit
- Mittelfeste Verbindung
- Max. Dauereinsatztemperatur bis zum Erweichungsbereich

#### • Lösemittelhaltige Nassklebstoffe

Lösemittelhaltige Klebstoffe haben ein breites Einsatzgebiet und sind vergleichsweise einfach zu verarbeiten. Allerdings sind sie aus Arbeits-, Gesundheits- und Umweltschutzgründen als kritisch anzusehen und werden daher zunehmend ersetzt. Als Lösemittel kommen unter anderem Ester (z. B. Ethylacetat), Ketone (z. B. 2-Butanon) oder auch Tetrahydrofuran (THF) zum Einsatz. Der Lösemittelgehalt kann bis zu 85 Prozent betragen.

Da hier verschiedene thermoplastische Polymere zum Einsatz kommen können, ist auch die Bandbreite der Eigenschaften von lösemittelhaltigen Nassklebstoffen recht hoch, deshalb wird diese Klebstoffart umgangssprachlich als „Alleskleber“ bezeichnet.

Das Abbinden erfolgt bei allen Varianten auf die gleiche Weise: In dem Maß, wie das Lösemittel entweicht, zum Beispiel verdunstet, nähern sich die Polymere einander an. Es werden physikalische Wechselwirkungen zwischen ihnen aufgebaut, und schließlich ist der Klebstoff fest. Eine Voraussetzung für den erfolgreichen Ablauf dieses Vorgangs ist mindestens ein lösemitteldurchlässiges Fügeiteil.

Mit lösemittelhaltigen Nassklebstoffen können nicht nur Adhäsionsklebungen, also „normale Klebungen“, sondern auch Diffusionsklebungen durchgeführt werden. Diese werden umgangssprachlich auch als „Kaltschweißen“ bezeichnet. Mit Diffusionsklebungen können nur Kunststoffe verbunden werden, die eine gewisse Löslichkeit in dem für den Klebstoff verwendeten Lösemittelgemisch zeigen. Beide Fügeiteile sollten dabei aus dem gleichen Kunststoff bestehen.

Beim Diffusionskleben wird die oberste Schicht beider Fügeiteile mit einem organischen Lösemittel angelöst. Durch das Anlösen werden die Polymerketten beweglich. Nach dem Ablüften des überschüssigen Lösemittels werden die „gequollenen“ Oberflächen mit Druck ineinandergedrückt. Die Polymerketten der beiden Fügeiteiloberflächen durchdringen sich und verschlaufen\* miteinander. Nach dem Entweichen des restlichen Lösemittels bilden sich physikalische Wechselwirkungen zwischen den Polymerketten und es entsteht bei optimaler Verarbeitung eine Kohäsionszone zwischen den beiden Fügeiteilen. Da bei diesem Verfahren keine Adhäsionszone entsteht und die Polymerketten der Oberflächen in das gegenüberliegende Fügeiteil diffundieren, spricht man hier vom Diffusionskleben.

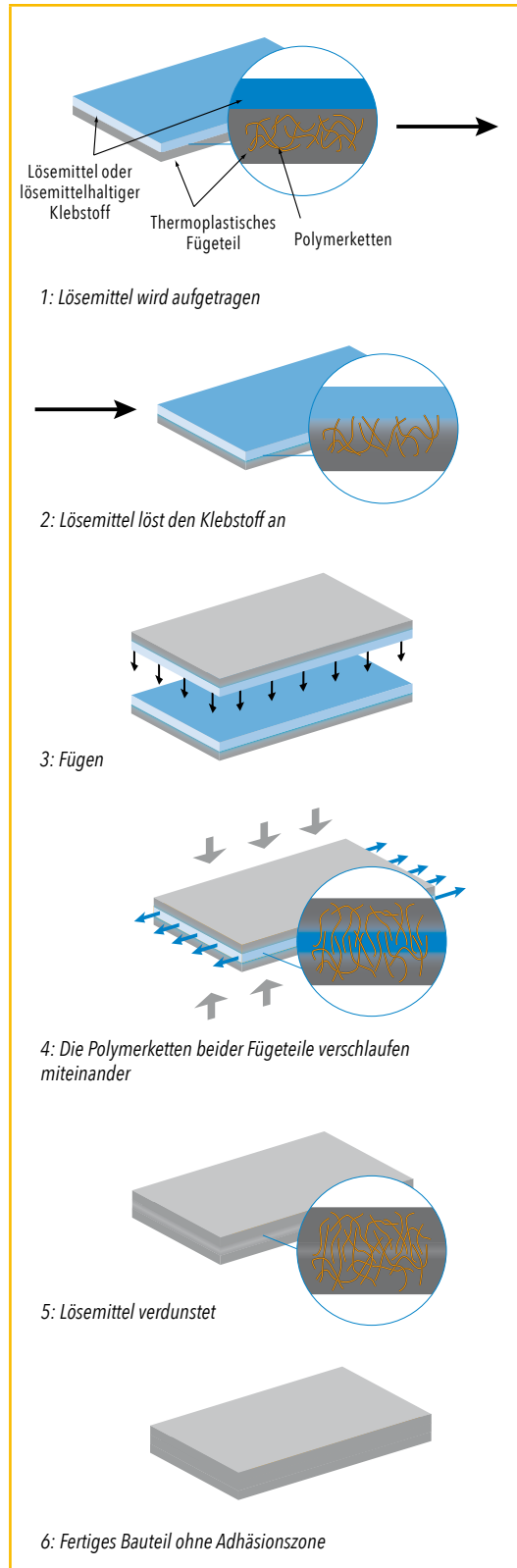
#### 🔗 LEHRER-INFO

- Experiment 18: Lösemittel in „Allesklebern“
- Experiment 19: Gelöste Kunststoffe (Polystyrol)
- Experiment 20: „Alleskleber“ aus Polyvinylacetat
- Experiment 21: Polyvinylalkohol



ABBILDUNG 26

Diffusionskleben schematisch



Wasserbasierte Nassklebstoffe

Die Gruppe der wasserbasierten Nassklebstoffe umfasst verschiedene Untergruppen: Klebstoffe auf Basis tierischer Proteine (Glutinleime oder Caseinleime), Klebstoffe auf Basis pflanzlicher Naturprodukte (Stärke oder Zellulose) sowie Klebstoffe auf synthetischer Basis, zum Beispiel Polyvinylalkohol (PVOH). Die Ausbildung der Klebschicht erfolgt auch bei den wasserbasierten Nassklebstoffen aufgrund der Verdunstung bzw. der Aufnahme des Wassers durch die Fügeiteile. Die Verarbeitung des wasserbasierten Nassklebstoffs erfolgt dann analog zur Verarbeitung des lösemittelbasierten, das heißt man fügt den nassen Klebstofffilm.

Kontaktklebstoffe (lösemittel- oder wasserbasiert)

Kontaktklebstoffe bilden eine der universellsten Klebstoffgruppen und eignen sich für die Klebung zahlreicher Materialien wie Kunststoff, Holz, Gummi, Leder, Filz, Kork, Weichschaumstoff oder Metall. Bei den Kontaktklebstoffen liegt das Kunststoffpolymer als Lösung in einem organischen Lösemittel oder als Dispersion in Wasser vor. Meist kommen dabei Elastomere zum Einsatz, seltener Thermoplaste. Im Unterschied zum Nassklebstoff erfolgt bei Kontaktklebstoffen das Trocknen, das heißt das Verdunsten des Löse- bzw. Dispersionsmittels, nicht erst nach dem Fügen.

STECKBRIEF KONTAKTKLEBSTOFFE

Beschreibung

- Einkomponentiger Klebstoff
- Weitvernetztes Elastomer oder Thermoplast gelöst in einem organischen Lösemittel oder dispergiert in Wasser
- Abbinden durch Verdunsten des Lösemittels aus der Klebfuge

Verarbeitung

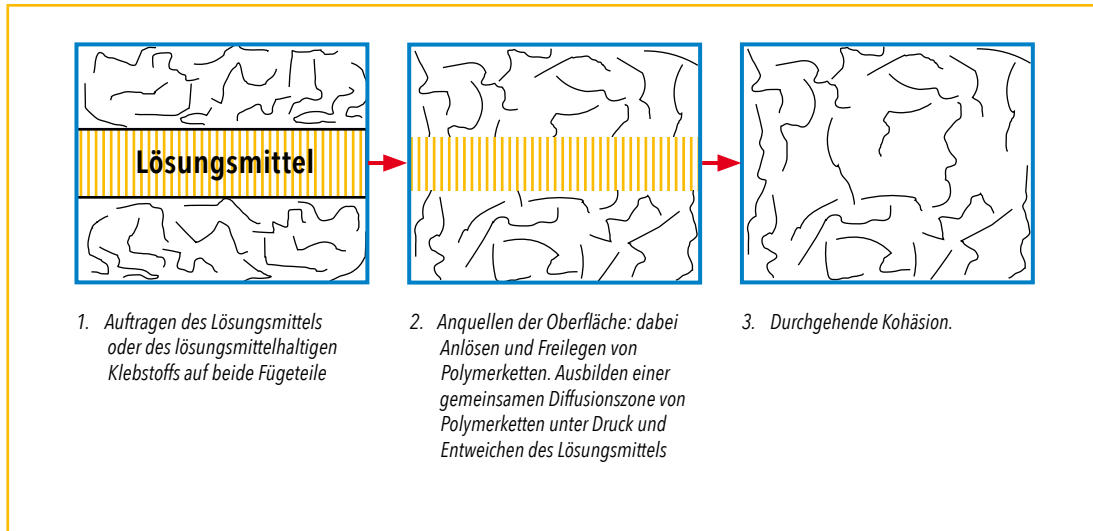
- Auftrag auf beide Fügeiteile
- Fast vollständiges Abdunsten des Lösemittels vor dem Fügen (Fingertest)
- Mit hohem Anpressdruck fügen

Eigenschaften im Verbund

- In der Regel sofortiges Erreichen der Handfestigkeit nach dem Fügen → sofort belastbar
- Mittelfeste Verbindung
- Dauereinsatztemperatur bis max. 100 °C
- Relativ hohe Flexibilität



Kontaktkleben schematisch



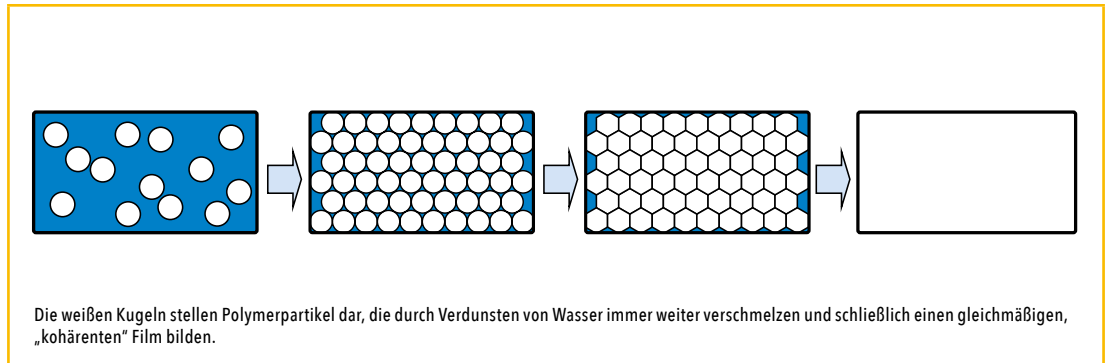
Bei der Verarbeitung eines Kontaktklebstoffs wird auf beide Fügeteile Klebstoff aufgetragen. Anschließend lässt man einen Großteil des Lösemittels verdunsten. Es muss dabei eine Mindestablüftzeit eingehalten werden. Eine Möglichkeit zu testen, ob bereits ausreichend Lösemittel verdunstet ist, ist der sogenannte „Fingertest“. Dabei berührt man mit einem sauberen Finger eine Ecke der Klebung. Zieht der Klebstoff keine Fäden mehr, kann gefügt werden. Auch die Maximalablüftzeit darf nicht überschritten werden, da danach bereits zu viel Lösemittel verdunstet ist und die Polymerketten nicht mehr ausreichend beweglich sind, um eine belastbare Klebung

aufzubauen. Zwischen Mindest- und Maximalablüftzeit, kann man fügen. Dies sollte dies mit einem möglichst hohen Anpressdruck geschehen, da die Polymere der Klebstofffilme auf den beiden Fügeteilen so die Möglichkeit haben, gegenseitig ineinander einzudringen und so eine durchgängige Kohäsion im Klebstofffilm zu erreichen.

Nach dem Fügen ist die Verbindung sofort belastbar. Wird also beispielsweise ein Schuhabsatz repariert, kann man den Schuh nach dem Anpressen wieder anziehen und damit gehen.



### Filmbildung Dispersionsklebstoffe



#### ● Dispersionsklebstoffe

Dispersionen wie auch Emulsionen sind Zweiphasensysteme, das heißt zwei nicht oder nur in geringem Umfang miteinander mischbare Stoffe (Feststoff oder Flüssigkeit in einer anderen Flüssigkeit) liegen nebeneinander vor. Dabei ist die eine Flüssigkeit oder der Festkörper sehr fein verteilt und wird durch sogenannte Emulgatoren in Schwebe gehalten.

Besonders geeignet sind Dispersionsklebstoffe, um großflächige Verbundsysteme aus wasserdurchlässigen Materialien zu kleben. Daher finden sie häufig Verwendung in der Papierverarbeitung, in der Verpackungsherstellung und in der Möbelindustrie.

Bei den Dispersionsklebstoffen werden die Polymerpartikel des Klebstoffpolymers -zum Beispiel unterstützt durch Emulgatoren - durch sie umgebende Wassermoleküle auseinandergehalten, so dass sie in diesem Schwebezustand noch keine Klebwirkung entfalten können.

Sobald das Wasser verdunstet oder von einem oder beiden Fügeteilen aufgenommen wird, erhöht sich die Konzentration der Polymerpartikel, sie nähern sich immer mehr einander an, bis sie ineinanderfließen. Dieser Prozess wird als Filmbildung bezeichnet. Während der Filmbildung bindet der Klebstoff ab; oft erkennt man einen Wechsel von Milchig-Weiß nach Transparent. Für diesen Prozess bedarf es einer Mindesttemperatur, der sogenannten Mindestfilmbildungstemperatur.

Beim Fügen werden die Fügeteile aufeinandergespresst, wobei die Presszeit von der Temperatur abhängt; in der Regel liegt sie im Minutenbereich.

Mit Dispersionsklebstoffen lassen sich keine hohen Zugschersicherheiten erreichen, und sie verfügen gemäß ihrer thermoplastischen Natur nur über eine eingeschränkte Temperaturbeständigkeit. Außerdem sind sie aufgrund der eingelagerten Emulgatoren feuchtigkeitsempfindlich. Allerdings zeichnen sie sich durch eine hohe, in gewissem Rahmen vom Hersteller einstellbare Flexibilität aus.

#### STECKBRIEF DISPERSIONSKLEBSTOFFE

##### Beschreibung

- Einkomponentiger Klebstoff
- Polymerpartikel, die in Wasser dispergiert sind
- Abbinden zum Thermoplast (Filmbildung) durch Verdunstung des Wassers aus der Klebfuge

##### Verarbeitung

- Fügen des nassen Klebstofffilms
- Wasser muss aus der Klebfuge (durch das Fügeteil) entweichen können

##### Eigenschaften im Verbund

- Geringe Anfangsfestigkeit
- Mittelfeste Verbindung
- Mittlere bis hohe Flexibilität
- Feuchtigkeitsempfindlich aufgrund eingelagerter Hilfsstoffe (Emulgatoren)

### 5.4.2 Abkühlende Klebstoffsysteme

Diese Klebstoffe werden bei Temperaturen, die deutlich über der Umgebungstemperatur liegen, aufgetragen und binden durch Abgabe von Wärme (Abkühlen) ab.

#### ● Schmelzklebstoffe

Sehr große Einsatzgebiete der Schmelzklebstoffe sind die Verpackungs-, die Möbel- und Holzindustrie.

Bei Schmelzklebstoffen handelt es sich um Systeme, deren feste thermoplastische Polymere wie zum Beispiel Polyamid zunächst aufgeschmolzen werden müssen. Danach wird die Schmelze auf das Füge­teil aufgetragen. Beim anschließenden Abkühlen erfolgt der Kohäsionsaufbau des Klebstoffs. Dieser Prozess läuft meist sehr schnell ab; hängt aber von einigen Einflussparametern ab:

- dem eingesetzten Polymer mit seinem spezifischen Erweichungs- und Schmelzbereich,
- dem Temperaturunterschied zwischen Klebstoff und Umgebung, da eine erhöhte Umgebungstemperatur den Verfestigungsvorgang verlangsamt und eine eher niedrige Umgebungstemperatur die Verfestigung beschleunigt, und
- der Wärmeleitfähigkeit des Füge­teils, die bei Metallen, Kunststoffen, Gläsern und Keramiken unterschiedlich ist.

### STECKBRIEF SCHMELZKLEBSTOFFE

#### Beschreibung

- Einkomponentiger Klebstoff
- Klebstoff auf Basis unterschiedlicher Thermoplaste
- Bei Raumtemperatur Feststoff

#### Verarbeitung

- Auftrag als Schmelze nach dem Erwärmen oder als Feststoff mit anschließendem Erwärmen
- Sehr schneller Kohäsionsaufbau durch Abkühlen
- Vorsicht bei kalten Füge­teilen oder solchen mit hoher Wärmeleitfähigkeit (Metalle) → schnelles Abkühlen und daher eventuell keine ausreichende Benetzung möglich

#### Eigenschaften im Verbund

- Mittelfeste bis hochfeste Verbindung
- Geringe bis hohe Verformbarkeit
- Durch Wärme lösbare und wiederherstellbare Verbindung
- Max. Dauereinsatztemperatur bis zum Erweichungsbereich des Thermoplasten (hier bis max. 180 °C)

#### 📌 LEHRER-INFO

#### Experiment 9: Schmelzklebstoff - Thermoplast

Daher ist besonders bei Füge­materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit wie Metallen darauf zu achten, dass der Abkühlprozess nicht zu schnell verläuft. Dies würde dazu führen, dass der Klebstoff wieder fest wäre, bevor er die Oberfläche richtig benetzen konnte.



Schmelzklebstoffe

### 5.4.3 Druckaktivierbare, vorbeschichtete Klebsysteme (sogenannte Haftklebstoffe)

Haftklebstoffe sind im Alltag allgegenwärtig und werden äußerst vielseitig eingesetzt.

Das Spektrum ihres Einsatzgebietes reicht von Wundpflastern über Etiketten bis hin zu den verschiedenartigen Klebebändern für handwerkliche und industrielle Zwecke. Den Haftklebstoff gibt es nicht – genauso vielfältig wie die Anwendungsbereiche von druckaktivierbaren Klebsystemen sind auch die verwendeten Klebstoffarten. Nur eines ist allen gemein: Haftklebstoffe liegen als fertige, das heißt polymere Klebstoffe vor, die vom Hersteller in der Regel als Film auf ein flexibles Trägermaterial aufgebracht wurden. Die Besonderheit dieser Klebstoffe im Gegensatz zu allen anderen besteht darin, dass sie im Gebrauch nicht abbinden oder aushärten, sondern weich bleiben.

#### LEHRER-INFO

Experiment 22: Vergleich der Klebkraft bei verschiedenen Klebebändern

Da die Haftklebstoffe druckaktivierbare Klebsysteme sind, muss bei der Verarbeitung gewährleistet werden, dass sich der Klebstoff wirklich auf der Oberfläche verteilen kann, um diese auch zu benetzen.

Deshalb muss beim Auftragen in Abhängigkeit von der Weichheit des Haftklebstoffs ein Anpressdruck von mindestens 0,2 MPa (das entspricht einem leichten Anpressdruck von ca. 2 kg/cm<sup>2</sup>) aufgebracht werden. Außerdem können weniger weiche Haftklebstoffe raue Oberflächen nur schlecht benetzen.

#### STECKBRIEF HAFTKLEBSTOFFE

##### Beschreibung

- Einkomponentiger Klebstoff ohne Härter
- Hochviskose Flüssigkeit (meist auf einem Trägermaterial)

##### Verarbeitung

- Oft als Klebeband, aber auch als dem zu klebenden Bauteil in seiner Geometrie angepasstem Stanzteil
- Benetzung abhängig von der Oberflächenrauheit und dem Anpressdruck beim Fügen
- Benötigen Anpressdruck

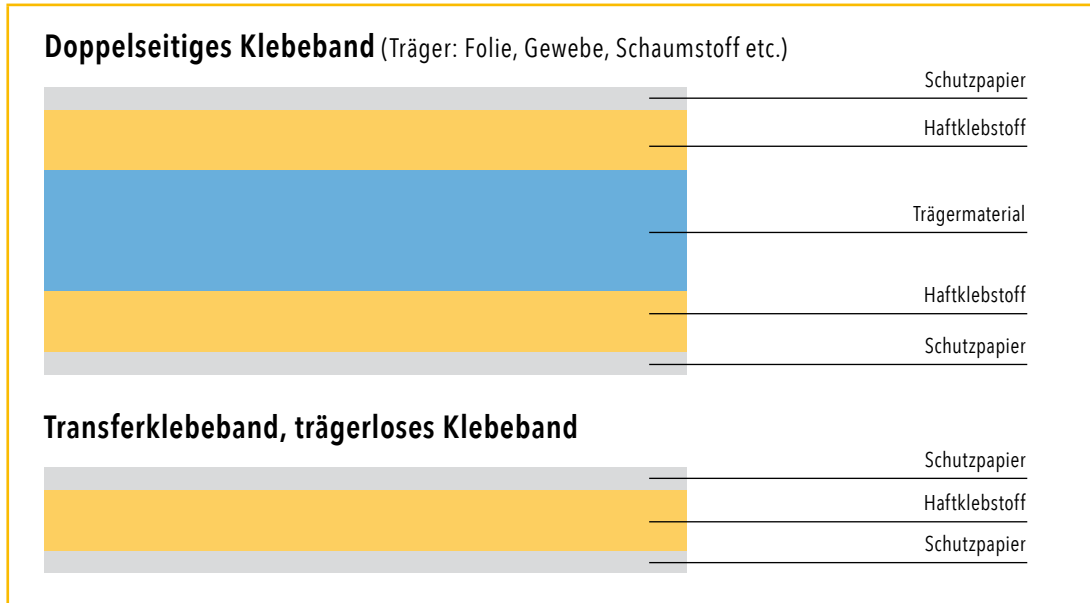
##### Eigenschaften im Verbund

- Sofortige Adhäsion und Kohäsion
- Wiederablösbare Systeme: gute Anfangshaftung, geringe Endfestigkeit
- Nicht wiederablösbare Systeme: geringere Anfangshaftung, hohe Endfestigkeit
- Hohe Schälfestigkeit (Klebrigkeit)  
→ geringe Scherfestigkeit
- Hohe Scherfestigkeit  
→ geringe Schälfestigkeit (Klebrigkeit)
- Festigkeit stark abhängig von der Temperatur



Ein Tape-Art Bild des Künstlers NO CURVES, das den Architekten Ettore Sottsass darstellt.

Aufbau von Haftklebebändern



In diesem Kapitel wurden sehr unterschiedliche Klebstoffe mit ihren Aushärtereaktionen besprochen. In der unten stehenden Tabelle sind noch einmal alle Klebstoffe zusammengefasst.

LEHRER-INFO

Arbeitsblatt 4: Klebstoffrecherche

TABELLE 3

Aushärtereaktion	Klebstofftyp	
<b>Physikalisch abbindende Klebstoffe</b>	Schmelzklebstoffe	
	Nassklebstoffe	
	Kontaktklebstoffe	
	Dispersionsklebstoffe	
	Haftklebstoffe	
<b>Chemisch härtende Klebstoffe</b>		
	Polyadditionsklebstoffe	2K-Epoxidharze
		1K-Polyurethane
	Polykondensationsklebstoffe	Silikone
	Polymerisationsklebstoffe	Sekundenklebstoffe
		Anaerob härtende Klebstoffe
	Strahlenhärtende Klebstoffe	

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. 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.

Ziel von Schutzmaßnahmen ist es, dass bei Verwendung insbesondere von lösemittelhaltigen bzw. reaktiven Klebstoffen die Sicherheit und die Gesundheit der Verwender sichergestellt sind und die Umwelt nicht geschädigt wird.

Tätigkeiten mit Gefahrstoffen dürfen erst aufgenommen werden, wenn alle notwendigen Schutzmaßnahmen umgesetzt sind. Es gibt eine gesetzlich vorgeschriebene Hierarchie der Schutzmaßnahmen. Danach muss:

- zunächst geprüft werden, ob das als gefährlich eingestufte Produkt durch ein weniger gefährliches ersetzt werden kann.
- Kann auf den Einsatz von Gefahrstoffen nicht verzichtet werden, so sind technische und/oder organisatorische Maßnahmen zu treffen. Zu den technischen Maßnahmen gehören zum Beispiel Absaugvorrichtungen, organisatorische Maßnahmen können beispielsweise Rauchverbote oder Zugangsbeschränkungen sein.

- Sollte sich die Gefährdung durch diese Maßnahmen nicht ausreichend reduzieren lassen, kann die Benutzung persönlicher Schutzausrüstung wie Schutzhandschuhe, -brillen, -anzüge oder Atemschutzgeräte vorgeschrieben werden.
- Bei der Verwendung brennbarer Stoffe können zudem ergänzende Maßnahmen gegen Brand- und Explosionsgefahren erforderlich sein.

Welche potenziellen Gefahren von einem Klebstoff ausgehen, findet man im sogenannten Sicherheitsdatenblatt. Sicherheitsdatenblätter sind vom Lieferanten für jeden Klebstoff in der jeweils aktuellen Version und in der Sprache des jeweiligen Landes zur Verfügung zu stellen. Sie sind stoffbezogen, gehen also nicht auf die spezielle Situation an einem bestimmten Arbeitsplatz ein, richten sich vor allem an den Arbeitgeber und enthalten zum Beispiel Informationen über mögliche Gefahren, Erste-Hilfe-Maßnahmen, Handhabung, Lagerung, persönliche Schutzausrüstungen, Transport und Entsorgung.

Neben dem Sicherheitsdatenblatt können auch die Verpackung bzw. das Etikett des Klebstoffs und das technische Datenblatt als Informationsquelle herangezogen werden. Allerdings sind die Informationen hier viel weniger ausführlich.





Die Auswahl eines geeigneten Klebstoffs für eine bestimmte Anwendung in der Industrie ist keineswegs so einfach, wie manche Darstellungen, wie man sie zum Beispiel im Baumarkt finden kann, dem Anwender suggerieren.

Bevor der Klebstoff (und auch die geeignete Oberflächenbehandlung) ausgewählt werden, ist es wichtig, sich darüber Gedanken zu machen, was die Klebung aushalten muss.

Zuallererst muss man sich mit den Beanspruchungen auseinandersetzen, denen das Bauteil im Einsatz ausgesetzt sein wird. Dazu gehört die Frage nach mechanischen (dynamischen und statischen) Belastungen ebenso wie nach Temperaturen, Feuchtigkeit, anderen chemischen Substanzen oder auch UV-Strahlung. Außerdem sollte die Anforderungsliste Informationen zu den Fügeteilen, den Produktionsbedingungen, zu Vorgaben des Arbeits- und Umweltschutzes, zur Langzeitbeständigkeit und zur Qualitätssicherung sowie zu den gewählten Testverfahren und den Kosten beinhalten.

Sind alle Informationen zusammengetragen, kann eine Vorauswahl des Klebstoffs und der Oberflächenbehandlung anhand von technischen Datenblättern, Erfahrungen und Literatur erfolgen. Anschließend werden Klebproben gefertigt und getestet. Auch Alterungstests mit anschließender Prüfung werden meist durchgeführt. Dabei sind die Festigkeit sowie die Verformbarkeit und deren Änderungen im Zuge einer Alterung die wichtigsten Größen, um die Beanspruchbarkeit einer Klebung zu bewerten. Nach Auswertung der Prüfergebnisse wird der für diese Anwendung geeignetste Klebstoff ausgewählt.

### HINWEIS

Für die Sicherheit der Klebung bzw. des geklebten Produktes muss sichergestellt werden, dass die Beanspruchbarkeit größer ist als die tatsächliche Beanspruchung.

### LEHRER-INFO

Arbeitsblatt 2: Möglichkeiten und Grenzen der Klebtechnik

## 7.1 Prüfmethoden

Insbesondere bei Klebanwendungen im Hightech-Bereich ist es zwingend notwendig, die Festigkeit der Klebung zu prüfen. Denn stürzt zum Beispiel ein Papierflieger ab, so ärgert sich vielleicht der Erbauer, versagen hingegen Klebungen an einer Passagiermaschine, führt das zu einer Katastrophe.

Festigkeiten können mit rein mechanischen Prüftests ermittelt werden. Will man dagegen die Langzeitbeständigkeit einer Klebverbindung überprüfen, muss eine Kombination aus Tests, die mögliche Umgebungseinflüsse simulieren, und einer anschließenden mechanischen Prüfung gewählt werden.

Bei der mechanischen Prüfung wird die Klebverbindung so lange belastet, bis sie bricht. Die Art des Bruchs kann Aufschluss über die Qualität der Klebung geben oder Hinweise liefern, ob bei der Fertigung dieser Klebverbindung Fehler aufgetreten sind.

- Adhäsionsbruch – der Klebstoff löst sich vom Fügeteil ab
- Kohäsionsbruch – ein Bruch im Klebstoff
- Fügeteilbruch – Bruch außerhalb der Klebfläche im Fügeteil oder
- Mischbruch – eine Kombination der Brucharten

Als günstiger Hinweis auf eine qualitativ hochwertige Klebung kann in der Regel ein Kohäsionsbruch (oder Fügeteilbruch) gewertet werden, da man in diesem Falle Fehler bei der Oberflächenbehandlung weitgehend ausschließen kann.

Adhäsionsbrüche lassen oft auf einen Oberflächenvorbereitungsfehler schließen, zum Beispiel Verunreinigungen, Kondenswasserbildung, zu geringe Oberflächenspannung, Korrosion.



Verschiedene Bruchbilder



• Zugscherversuch nach DIN EN 1465

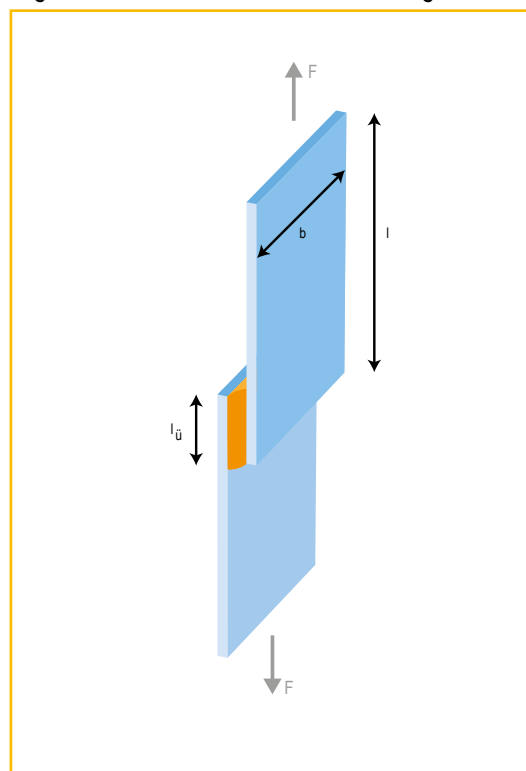
Der Zugscherversuch ist der am weitesten verbreitete Standardprüfversuch zur Ermittlung der Festigkeit. Die Klebung wird dabei mit Scherkräften belastet, die parallel zur Klebfläche angreifen.

Abbildung 31 stellt Zugscherversuch schematisch dar. Je größer die Zugkraft, desto weiter wird die Probe auseinander gezogen, bis nach Überschreiten einer Maximalkraft  $F_{max}$  der Bruch eintritt.

Die Verbundfestigkeit in  $N/mm^2$  (MPa) wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\begin{aligned} \text{Verbundfestigkeit} &= \frac{\text{Bruchkraft [N]}}{\text{Klebfläche [mm}^2\text{]}} \\ &= \frac{\text{Bruchkraft [N]}}{\text{Überlappungslänge [mm]} \times \text{Probenlänge [mm]}} \end{aligned}$$

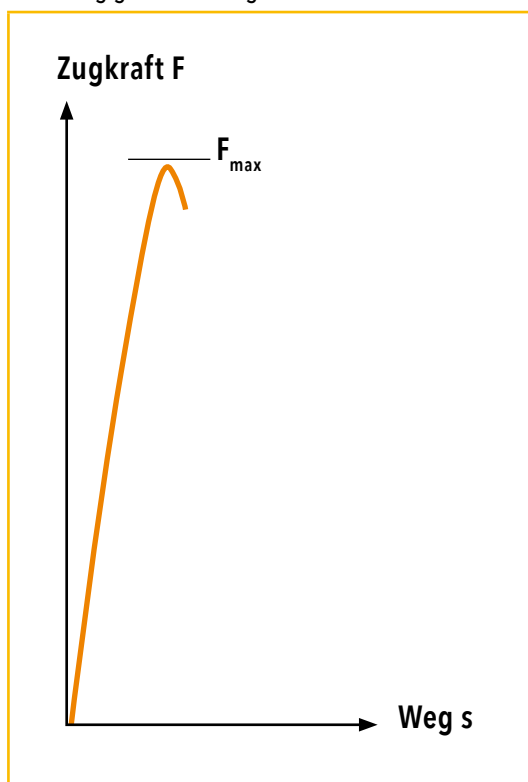
Zugscherversuch, schematische Darstellung



Für die Bestimmung des Kennwertes sollten mindestens fünf Einzelproben geprüft und deren Werte gemittelt werden.

#### ABBILDUNG 32

Grafische Darstellung der Zugkraft in Abhängigkeit vom Weg



#### LEHRER-INFO

Experiment 23: Zugbeanspruchung  
Arbeitsblatt 3: Schälbeanspruchung

## 7.2 Beanspruchung und Gestaltung von Klebverbindungen

Neben anderen Klebstoffeigenschaften interessiert den Anwender vor allen Dingen, wie hoch die Festigkeit der Klebverbindung ist, welchen Belastungen sie standhält und welche Beanspruchungen vermieden werden sollten.

Durch verschiedene Beanspruchungen können sich mit der Zeit die Eigenschaften von geklebten Materialverbunden maßgeblich verändern und/oder beeinträchtigt werden. Dazu gehören

- thermische Beanspruchung
- mechanische Beanspruchung
- Strahlung, hier vor allen Dingen UV-Strahlung
- Feuchtigkeit

### • Mechanische Beanspruchung

Klebung können im Wesentlichen folgenden Arten von statischen mechanischen Beanspruchungen unterliegen: Schäl-, Zug- und Schub- bzw. Scherbeanspruchung. Dynamische mechanische Beanspruchungen wie Schwingung, Schlag und Crash sollen hier nicht betrachtet werden, da die Komplexität dieser Beanspruchungen den Rahmen dieses Textes sprengen würde.

Schälbeanspruchungen führen zu einer nahezu linienförmigen hohen Beanspruchung des Klebstoffs in der Klebfuge, die die Festigkeit der meisten Klebstoffe um ein Vielfaches übersteigt. Daher ist darauf zu achten, dass Schälbeanspruchungen bei einer Klebung unbedingt vermieden werden.

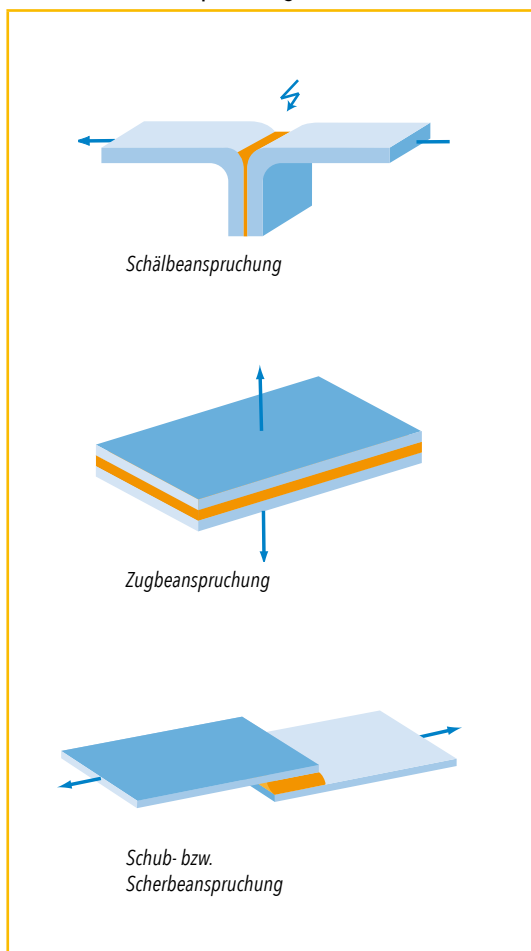
Zugbeanspruchungen dagegen, da sie senkrecht zur Fügeebene wirken, sind für Klebverbindungen prinzipiell nicht problematisch. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass Zugbeanspruchungen in Klebungen üblicherweise bei Stoßklebungen, bei denen Fügeteile stumpf voreinandergeklebt werden, zu finden sind. Solche Verbindungen haben meist Klebflächen, die nur über die Änderung der Fügeteildicke zu vergrößern sind. Die vollständige konstruktive Ausnutzung der Fügeteilfestigkeit ist bei solchen Verbindungen meist nicht möglich, da diese die Zugfestigkeit des Klebstoffs (der bei Stoßklebungen ja nur auf einer kleinen Fläche wirken kann) in der Regel übersteigt.

Die günstigste Belastung ist die Scher- bzw. Schubbeanspruchung, bei der die Kraft parallel zur Klebfläche wirkt. Diese Belastung ist bei überlappenden Klebungen zu finden, bei denen meist ausreichend große Klebflächen vorhanden sind. Kann mit der vorhandenen Klebfläche keine ausreichende Kraft übertragen werden, kann diese durch eine Erhöhung der Überlappungslänge relativ einfach vergrößert werden.

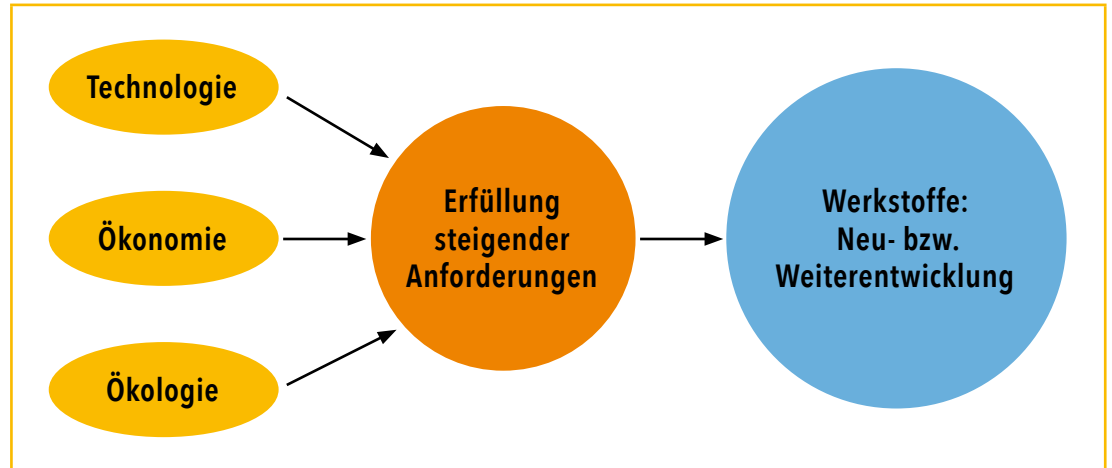
Gegenüber Druckbeanspruchungen sind Klebverbindungen relativ unempfindlich.

ABBILDUNG 33

### Mechanische Beanspruchungen



Erfüllung steigender Anforderungen durch neue Werkstoffe



Kleben die Verbindungstechnik des 21. Jahrhunderts? Ist das nicht etwas zu hoch gegriffen?

Egal, welches Produkt wir betrachten, ob Auto, Flugzeug, Handy oder Tablet, die Anforderungen, die wir daran stellen, steigen ständig und werden dies auch in Zukunft tun. Steigende Anforderungen können beispielsweise sein: geringeres Gewicht (insbesondere bei Autos, Flugzeugen oder Zügen), höhere Funktionalität (etwa beim Tablet oder Smartphone), bessere Qualität, schickeres Design.

Die Frage ist also: Wie können unsere steigenden Anforderungen in technologischer, ökonomischer und ökologischer Hinsicht überhaupt erfüllt werden? Die Antwort darauf lautet: durch neue Werkstoffe!

Um die Anforderungen der Zukunft erfüllen zu können, werden wir mehr und mehr neue und moderne Werkstoffe einsetzen müssen: neue Kunststoffe, faserver-

stärkte Kunststoffe wie Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) und Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK), neue Metalllegierungen, neue Gläser und Keramiken. Aber: Diese Werkstoffe nutzen uns nur, wenn sie sich auch verbinden lassen, sowohl mit sich selbst als auch mit anderen, auch „alten“ Werkstoffen“ (wie zum Beispiel Stahl).

Und hier spielt die Klebtechnik eine wichtige Rolle: Die traditionellen Verbindungstechniken haben wohlbekannte Nachteile. Bei hitzebasierten (thermischen) Verfahren wie dem Schweißen, bei dem die Oberflächen der Werkstoffe aufgeschmolzen werden, verändert der Werkstoff innerhalb einer Wärmeeinflusszone beim Abkühlen (Verfestigen) seine spezifischen Eigenschaften. Bei mechanischen Verfahren wie dem Nieten oder dem Schrauben wiederum bohrt man in die zu verbindenden Werkstücke Löcher hinein. Der Werkstoff wird also beschädigt und damit geschwächt.

Wesentliche Gründe, warum die Klebtechnik eine Schlüsselstellung einnimmt:

- Über das bei fachgerechtem Einsatz dieser Füge-technik langzeitbeständige Verbinden gleicher Materialien hinaus ist es klebtechnisch möglich, nahezu alle Werkstoffkombinationen langzeitbeständig zu verbinden.
- Durch das Kleben bleiben die Werkstoffeigenschaften unverändert erhalten: Der Klebprozess ist im Vergleich zum Schweißen (oder Löten) relativ wärmearm. Eine Verletzung der Fügeteile wie beim Nieten oder Schrauben findet nicht statt.
- Die Möglichkeit, Werkstoffe zu kombinieren und die Werkstoffeigenschaften zu erhalten, führt dazu, dass neue Bauweisen (zum Beispiel Leichtbauweisen, höhere Funktionalitäten etc.) realisiert werden können.

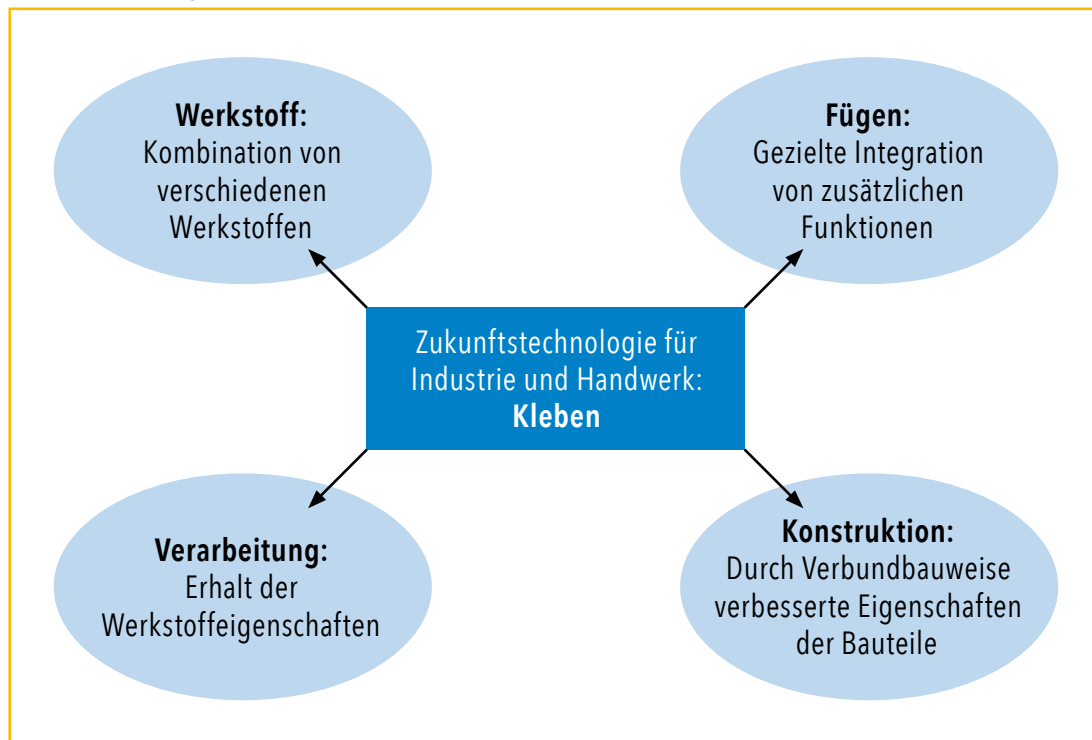
- Des Weiteren ist es möglich, durch die Klebtechnik gezielt, über das eigentliche Verbinden hinausgehende Eigenschaften wie Gas- und Flüssigkeitsdichtigkeit, elektrische und thermische Leitfähigkeit, Ausgleich unterschiedlicher Fügeteilausdehnungen bei mechanischer Last oder Temperaturänderungen, Korrosionsschutz unter anderem in das Bauteil zu integrieren.

Die Verbindungsmöglichkeit aller Werkstoffe mit sich selbst und anderen bei gleichzeitigem Erhalt der Eigenschaften der jeweiligen Werkstoffe führt zu neuen Bauweisen, weil die Werkstoffeigenschaften ungeschmälert für die Erfüllung der steigenden Anforderungen genutzt werden.

Genau aus diesem Grund wird die Klebtechnik zur Verbindungstechnik Nummer 1 im 21. Jahrhundert!

ABBILDUNG 35

### Schlüsseltechnologie Kleben



### ● Vom Fernsprechapparat zum Smartphone

Denken wir an die alten Telefone zurück, die damals Fernsprechapparate hießen und fest an einem Ort installiert waren.



Diese Telefone waren ziemlich groß und schwer und obendrein konnte man mit ihnen „nur“ telefonieren; dass es einmal Smartphones geben könnte, war damals unvorstellbar und gehörte in die Kategorie Science Fiction.

Erst die Möglichkeit, immer kleinere elektrische und elektronische Komponenten herzustellen, führte dazu, dass 1983 das erste kommerzielle Mobiltelefon auf den Markt kam. Fast ein Kilo schwer, rund 4000 Dollar teuer und so groß wie ein moderner Toaster, aber auch mit diesem Gerät konnte man nur telefonieren. In den folgenden Jahrzehnten setzte eine rasante Entwicklung mit weiterer Miniaturisierung ein. Heute können wir mit unseren Mobiltelefonen oder Smartphones telefonieren, im Internet surfen, E-Mails verschicken, Fotos machen und vieles mehr.

Ohne Kleben würde es Smartphones, wie wir sie kennen, überhaupt nicht geben. Elektrisch leitfähige Klebstoffe ermöglichen, dass die elektronischen Bauteile beispielsweise nicht mehr auf die Platine gelötet werden müssen und dadurch kleiner sein können. Weitere Beispiele, bei denen Klebstoffe zum Einsatz kommen, sind die eingebauten Mikrolautsprecher, der LED-Blitz zum Fotografieren oder das Flüssigkristall-Display (LCD).

Die von hinten beleuchtete LCD-Schicht kann mit dem Abdeckglas (zum Beispiel dem Touchscreen) flächig verklebt werden. Dazu muss ein optisch klarer Klebstoff verwendet werden, damit es, egal aus welchem Winkel auf das Display geschaut wird, nicht zu Verzerrungen kommt. Weiterhin darf der Klebstoff natürlich nicht vergilben, was durch bestimmte Zusatzstoffe verhindert

wird. Ist der Klebstoff nach der Härtung nicht ausreichend flexibel, kann es zu Displaydefekten kommen, die durch auftretende Spannungen hervorgerufen werden. Der verwendete Klebstoff muss darüber hinaus in der Lage sein, auf den unterschiedlichen zu verklebenden Materialien zuverlässig und dauerhaft zu haften. Aber auch die Verarbeitungseigenschaften spielen bei der Auswahl eines geeigneten Klebstoffs eine Rolle. Beispielsweise wird häufig, um Mischungsfehler auszuschließen und die Verarbeitung zu vereinfachen, ein einkomponentiger Klebstoff gewünscht, der aus Fertigungsgründen innerhalb von Sekunden aushärten soll.

Diese Anforderungen schränken die Auswahl möglicher Klebstoffe stark ein. Typische Klebstoffe für Displayklebungen sind spezielle strahlenhärtende Klebstoffe. Auch von der Füge-technik her gesehen handelt es sich bei Mobiltelefonen also um Hightech. Nur sieht man diese wie so oft bei Klebanwendungen nicht.



### ● (H)ausgedruckt

Nicht nur zu Hause ausdrucken, sondern gleich ein ganzes Haus drucken – das ist nicht mehr Science-Fiction, sondern Realität. So wurde Anfang 2014 in Amsterdam ein ganzes Haus in Originalgröße gedruckt.

Weltweit sind inzwischen mehr als 30 verschiedene Verfahren des 3-D-Druckens bekannt. Grundlage für das auch Rapid Prototyping oder Fabbig genannte Verfahren sind am Computer entwickelte dreidimensionale Modelle. Ein Programm zerlegt ihre Daten in einzelne zweidimensionale Schichten, die der Printer anschließend Lage für Lage aufeinander „druckt“ – im Prinzip wie bei einem herkömmlichen Tintenstrahlgerät.



Als Werkstoffe lassen sich verschiedene Kunststoffe, Kunstharze, Keramiken und sogar Metalle verwenden. Bei einem der 3-D-Druckverfahren entstehen die einzelnen Schichten aus feinem Pulver und Klebstoff. Die unterste Schicht ist eine Pulverschicht auf dem Druckbett, auf die der Grundstock aus Klebstoff aufgetragen wird. Eine Rakel legt die frische, sehr feine Pulverschicht über das erste Bild. Der Vorgang wiederholt sich so lange, bis das 3D-Modell fertig ist.

Spannende Lösungen könnte die Technik insbesondere für medizinische Zwecke bieten. So ließen sich beispielsweise noch während einer Operation passgenaue Implantate aus Keramikpulver und Klebstoff als Knochenersatz herstellen.

#### ● „Abschaltbare“ Klebstoffe

Lösbare Klebverbindungen gehören zum Alltag: Pflaster, die leicht von der Haut abgezogen oder Preisschilder, die von Produkten wieder entfernt werden können. Wie sich extrem feste Klebverbindungen einfach lösen lassen, haben Forscher des Fraunhofer Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen herausgefunden.

Pflaster oder Preisschilder sind Beispiele für leicht trennbare Klebverbindungen. In der modernen Fertigung aber – vom Mikroteil bis zum Flugzeugflügel – haben Klebverbindungen hohen Anforderungen zu genügen. Sie müssen extrem fest sein, dauernd Vibrationen, dem Angriff durch Feuchte sowie Temperaturschwankungen standhalten können. Gefragt sind Klebstoffe, die auf Knopfdruck aushärten und sich umgekehrt ohne Zerstörung der geklebten Teile wieder lösen lassen.

Forscher des Fraunhofer IFAM haben „abschaltbare“ Klebstoffe entwickelt – in Fachkreisen auch als Debonding-on-Demand-Klebstoffe bezeichnet –, die genau das erfüllen.

Und so funktioniert's: Das kontrollierte Härten und Lösen der Klebverbindungen erfolgt mittels elektromagnetischer Wechselfelder. Dabei werden in den Klebstoff eingearbeitete superparamagnetische Nanopartikel selektiv angeregt. Sie wirken als Antenne für die Wechselfelder. Während der selektiven Erwärmung erfolgt die Aushärtung, und der Klebstoff bildet eine feste Verbindung. Beim erneuten Erhitzen auf deutlich höhere Temperaturen trennt er sich wieder, weil der Klebstoff durch die Wärme zerstört wird.

Es gibt aber noch eine zweite Art der Klebstoffzusammensetzung, die es möglich macht, eine Klebverbindung zu lösen – und zwar durch die Kombination aus elektrischer Spannung und Temperatur. Der Klebstoff wird, wie jeder herkömmliche, aufgetragen. Die Klebung verbindet beide Füge-teile. Sollen die Teile getrennt werden, wird die Verbindung auf 65 Grad erwärmt und eine elektrische Spannung von 48 Volt angelegt.

Wer nun glaubt, Klebstoffe, die sich auf Knopfdruck trennen lassen, seien weniger leistungsstark, irrt. Im Gegenteil. Die Industrie hätte viele Vorteile davon. Würde sich eine dieser Methoden langfristig durchsetzen, könnte das eine Weichenstellung für die sortenreine Trennung im Recycling bedeuten.

## A

**Abbinden** – beschreibt den Übergang vom flüssigen in den festen Zustand.

## E

**Epoxide** – sind eine chemische Stoffgruppe sehr reaktionsfähiger organischer Verbindungen, die die Epoxid-Gruppierung (Ring bestehend aus drei Atomen, davon zwei C- und ein O-Atom) enthalten.

## F

**Formulierung** – ein Gemisch, das aus einer Wirksubstanz sowie Hilfsstoffen besteht, die nach einer Rezeptur (durch Zusammenmischen in definierten Mengen) hergestellt wird.

## G

**Gelatineleim** – natürlicher Klebstoff, der aus tierischen Abfällen durch Auskochen gewonnen wird.

## M

**Methacrylate** – zweikomponentige Reaktionsklebstoffe, bei denen das eingesetzte Monomer Methylmethacrylat durch radikalische Kettenreaktion polymerisiert wird.

## P

**Prepolymer** – Moleküle, die aus mehreren Bausteinen (Monomeren) entstanden sind, aber noch nicht groß genug sind, um als Polymer bezeichnet zu werden.

**Polyurethan** – entsteht bei der Polyaddition zwischen einem Polyol (Alkoholverbindung mit mehrere Hydroxylgruppen per Molekül) und einem Di- oder Polyisocyanat.

## S

**Schmelzklebstoff** – auch Heißklebstoffe genannt, sind lösungsmittelfreie Produkte, die heiß erarbeitet werden, und beim Abkühlen die Verbindung herstellen.

## V

**Verschlaufung** – ist eine physikalische Vernetzung von zwei oder mehr Polymerketten, Verschlaufungen sind deutlich schwächer als chemische Vernetzungen und können sowohl durch Brown'sche Molekularbewegungen als auch durch äußere Krafteinwirkung gelöst werden.

## W

**Wasserglas** – Schmelze aus erstarrten, glasartigen, also amorphen, wasserlöslichen Natrium-, Kalium- und Lithiumsilikaten oder ihre wässrigen Lösungen.

## Z

**Zugscherfestigkeit** – Festigkeit einer Verklebung, bei der Kräfte parallel zur Klebstoffschicht wirken.



Walter Brockmann, Paul Ludwig Geiß,  
Jürgen Klingen, Bernhard Schröder  
Klebtechnik – Klebstoffe,  
Anwendungen und Verfahren  
WILEY – VCH Verlag, Weinheim, 2005

Sina Ebnesajjad (Ed.),  
Handbook of Adhesives and Surface Preparation  
Elsevier Inc. Oxford UK, 2011

Wilhelm Endlich,  
Kleb- und Dichtstoffe in der modernen Technik  
Vulkan-Verlag, Essen, 4. Auflage, 1998

Fonds der Chemischen Industrie im Verband der  
Chemischen Industrie e. V.,  
Folienserie 27, Kleben/Klebstoffe, Frankfurt am Main,  
2001

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

Gerd Habenicht,  
Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen  
Springer-Verlag, 6. Auflage, Berlin Heidelberg, 2009

[http://www.henkelhaus.de/wissen/lexikon/  
haftklebstoff/index.html](http://www.henkelhaus.de/wissen/lexikon/haftklebstoff/index.html)

Otto-Diedrich Hennemann, Walter Brockmann,  
Hansgeorg Kollek (Hrsg.),  
Handbuch Fertigungstechnologie Kleben,  
Carl Hanser Verlag, München, 1992

Hildegard Hutzenlaub, Historische Tapeten in Hessen  
von 1700 bis 1840, Inauguraldissertation, Johann  
Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, 2004.

Industrieverband Klebstoffe e. V. (Hrsg.),  
Handbuch Klebtechnik 2014  
Springer-Vieweg / Springer Fachmedien Wiesbaden  
GmbH, 2014

Georg Krüger (Hrsg.),  
Haftklebebänder, selbstklebende Folien  
und Etiketten  
Carl Hanser Verlag, München, 2012

Günter Lehder, Reinald Skiba,  
Taschenbuch Arbeitssicherheit,  
Erich Schmidt Verlag, Berlin, 12. Auflage, 2011

Heinrich Olligs (Hrsg. ),  
Tapeten: Ihre Geschichte bis zur Gegenwart  
Bd. 3 Technik und wirtschaftliche Bedeutung,  
Klinkhardt & Biermann, Braunschweig, 1969

Hermann Onusseit (Hrsg.),  
Praxiswissen Klebtechnik Band 1: Grundlagen  
Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm, Heidelberg, 2008

Hermann Onusseit,  
Adhesive Technology – Basic Principles  
Beuth Verlag, Berlin, 2012

Manfred Pröbster,  
Elastisch kleben – aus der Praxis für die Praxis  
Springer-Vieweg/Springer Fachmedien Wiesbaden  
GmbH, 2013

Lucas F-M. da Silva, David A. Dillard, Bamber Black-  
man, Robert D. Adams (Ed.),  
Testing Adhesive Joints – Best Practice  
WILEY – VCH Verlag, Weinheim, 2012

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

#### Herausgeber

Fonds der Chemischen Industrie im Verband  
der Chemischen Industrie e. V. (FCI)  
Mainzer Landstraße 55  
60329 Frankfurt am Main  
www.vci.de/fonds  
Tel.: +49 (0) 69 2556 0

#### In Kooperation mit

Industrieverband Klebstoffe e.V.  
Völklinger Straße 4  
40219 Düsseldorf  
Tel.: +49 (0) 211 6 79 31 10

#### Redaktion und Gesamtkoordination

Birgit Kullmann, FCI, Frankfurt

#### Autoren

Beate Brede, Dr. Daniela Harkensee, Prof. Dr. Andreas  
Groß, Dr. Tanja Warratz, Fraunhofer-Institut für Ferti-  
gungstechnik und Angewandte Materialforschung  
(IFAM), Bremen

#### Fachliche Beratung

Dr. Axel Heßland, Industrieverband Klebstoffe e.V.,  
Düsseldorf  
Christoph Küsters, 3M Deutschland GmbH, Neuss  
Dr. Dirk Lamm, tesa SE, Hamburg  
Dr. Hartwig Lohse, Klebtechnik Dr. Hartwig Lohse e.K.,  
Itzehoe  
Dr. Hermann Onusseit, Onusseit Consulting, Haan

#### Methodisch-didaktisches Konzept

Martin Haverkamp, Prof. Dr. Bernd Ralle, Technische  
Universität Dortmund

#### Wissenschaftliche und fachdidaktische Beratung

Prof. Dr. Bernd Ralle, Technische Universität Dortmund

#### Bildnachweis

© DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA (Titelfoto)  
© DUS architects (S. 55)  
© EUKALIN SPEZIAL-KLEBSTOFF FABRIK GMBH (S. 43)  
Fotolia: © air (S. 8), © Anterovium (S. 8), © norman blue  
(S. 6, 9), © donatas (S. 35), © flairimages (S. 37),  
© fotomek (S. 25), © Himmelssturm (S. 24), © HLPhoto  
(S. 13), © JPchret (S. 41), © Kadmy (S. 6, 31), © lolloj (S. 10),  
© Alexandr Makarov (S. 7, 39), © Anton Maltsev (S. 18),  
© Photo-K (S. 8), © PhotoSG (S. 8), © Pixelot (S. 7, 34),

© Dagmar Richardt (S. 7, 25), © robertdering (S. 6, 8),  
© Igor Stepovik (S. 37), © stockphoto-graf (S. 54),  
© THesIMPLIFY (S. 54);  
© Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Ange-  
wandte Materialforschung IFAM, Bremen (S. 12);  
© Henkel AG & Co. KGaA (S. 36, 51);  
© NO CURVES, EttoreSottsass (S. 44);  
PantherMedia: © Lieres (S. 46), © wavebreakmediamicro  
(S. 38);  
© StadlerRail (S. 30);  
Thinkstock: © darios44 (S. 7, 12);  
© Wacker Chemie AG (S. 7, 33);  
© Weicon GmbH & Co. KG (S. 20, 27);  
© zentilia-iStock (S. 28)

#### Abbildungen:

Vorlagen für 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18,  
19, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 31, 32, 33  
von Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung (IFAM), Bremen  
Grafiken und Bilder in Experiment 23 und Arbeitsblatt 3  
© Wiebke Böschen  
Alle anderen Fotos und Abbildungen Verband der  
Chemischen Industrie e. V.

#### Neuaufgabe

November 2015  
26.000 Exemplare  
Alle Rechte vorbehalten.

Das Unterrichtsmaterial ist über das Internet abrufbar  
www.vci.de/fonds

#### Gestaltung

mon idée, Marketing/Kommunikation, Monika Nieth,  
Königstein  
zündung GmbH Werbeagentur, Frankfurt am Main

#### Druck

Schmidt printmedien GmbH, Ginsheim-Gustavsburg

Gedruckt auf Papier aus nachhaltiger Waldwirtschaft.



