

*Walter Brockmann, Paul Ludwig Geiß,  
Jürgen Klingen, Bernhard Schröder*

## **Klebtechnik**

Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren



**WILEY-  
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA



*W. Brockmann, P. L. Geiß,  
K. Klingen, B. Schröder*  
**Klebtechnik**

## ***Weitere empfehlenswerte Bücher:***

Dittmeyer, R., Keim, W., Kreysa, G., Oberholz, A. (Hrsg.)

### **Winnacker/Küchler: Chemische Technik**

**Prozesse und Produkte**

5. Auflage

8 Bände

2005

ISBN 3-527-30430-4

Gierenz, G., Karmann, W.

### **Adhesives and Adhesive Tapes**

2001

ISBN 3-527-30110-0

*Walter Brockmann, Paul Ludwig Geiß,  
Jürgen Klingen, Bernhard Schröder*

## **Klebtechnik**

Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren



**WILEY-  
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

#### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

© 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, daß diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.

**Satz** TypoDesign Hecker GmbH, Leimen

**Druck** betz-druck GmbH, Darmstadt

**Bindung** J. Schäffer GmbH, Grünstadt

**Grafik-Design** Gunter Schulz, Fußgönheim

**ISBN-13:** 978-3-527-31091-3

**ISBN-10:** 3-527-31091-6

# Inhalt

	<b>Vorwort</b>	<i>XI</i>
	<b>Autoren</b>	<i>XIII</i>
<b>1</b>	<b>Position der Klebtechnik im Bereich der Verbindungsverfahren</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Geschichtliche Entwicklung</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Adhäsion</b>	<b>11</b>
3.1	Einführung	11
3.2	Klassische Adhäsionstheorien	15
3.2.1	Polarisationstheorie	18
3.2.2	Diffusionstheorie	20
3.2.3	Chemische Wechselwirkungen bei der Adhäsion	21
3.3	Das Verhalten adhäsiver Verbindungen	26
3.4	Neue Denkansätze zur Adhäsion	27
3.5	Schlussfolgerungen	29
<b>4</b>	<b>Übersicht über Klebstoffe und Primer</b>	<b>31</b>
4.1	Klassifizierung von Klebstoffen	31
4.2	Physikalisch härtende Klebstoffe	33
4.2.1	Kontaktklebstoffe	33
4.2.2	Plastisole	34
4.2.3	Schmelzklebstoffe	35
4.2.4	Permanent klebrige, nicht härtende Klebstoffe	35
4.3	Chemisch härtende Klebstoffe	36
4.3.1	Zweikomponenten-Klebstoffe	37
4.3.2	Warmhärtende Einkomponenten-Klebstoffe	37
4.3.3	Kalthärtende Einkomponenten-Klebstoffe	38
4.3.4	Mikroverkapselte Klebstoffe	39
4.4	Primer	39
4.5	Allgemeine Verarbeitungshinweise	40
<b>5</b>	<b>Aufbau und Eigenschaften der Klebstoffe und Primer</b>	<b>41</b>
5.1	Haftklebstoffe	41
5.1.1	Einführung	41
5.1.2	Chemie der Haftklebstoffe	42

5.1.3	Physikalische Eigenschaften der Haftklebstoffe	45
5.1.4	Zeitabhängiges Verhalten von Haftklebstoffen	45
5.1.5	Klebrigkeit (Tack)	47
5.1.6	Schälwiderstand	47
5.1.7	Kriechverhalten (Creep)	47
5.2	Kontaktklebstoffe	48
5.2.1	Zusammensetzung der Kontaktklebstoffe	48
5.2.2	Verhalten und Anwendungen der Kontaktklebstoffe	49
5.3	Schmelzklebstoffe	50
5.3.1	Thermoplastische Schmelzklebstoffe	51
5.3.2	Heißsiegel-Klebstoffe	52
5.3.3	Plastisole	53
5.3.4	Schmelzkleblacke	53
5.3.5	Reaktive Schmelzklebstoffe auf Polyurethanbasis	53
5.3.6	Reaktive Epoxidharz-Schmelzklebstoffe	54
5.3.7	Trends in der Schmelzklebstoff-Technik	54
5.4	Phenolharz-Klebstoffe	55
5.4.1	Chemie der Phenolharz-Klebstoffe	55
5.4.2	Verhalten und Anwendungen der Phenolharz-Klebstoffe	58
5.5	Epoxidharz-Klebstoffe	59
5.5.1	Chemie der Epoxidharze	59
5.5.2	Reaktionen von Epoxidharzen	60
5.5.3	Eigenschaften von Epoxidharz-Klebstoffen	62
5.6	Polyurethanklebstoffe	63
5.6.1	Chemie der Polyurethane	63
5.6.2	Verwendete Rohstoffe	65
5.6.3	Struktur und Eigenschaften der Polyurethanklebstoffe	66
5.6.4	Füllstoffe und Additive bei Polyurethanklebstoffen	67
5.7	Acrylatklebstoffe	67
5.7.1	Physikalisch härtende Acrylate	67
5.7.2	Chemisch härtende Acrylate	68
5.8	Silicone	82
5.8.1	Einkomponenten-Systeme	82
5.8.2	Zweikomponenten-Systeme	83
5.8.3	Kondensationsvernetzung	83
5.8.4	Additionsvernetzung	83
5.9	Klebstoffe auf Naturstoffbasis	84
5.9.1	Einführung	84
5.9.2	Klebrohstoffe aus der Natur	86
5.9.3	Moderne Klebstoffe auf Naturstoffbasis	89
5.9.4	Zukünftige Entwicklungen	91
5.10	Aufbau der Primer und Haftvermittler	92
5.10.1	Primer	93
5.10.2	Haftvermittler	94
5.11	Füllstoffe	97

<b>6</b>	<b>Gestaltung, Herstellung und Qualitätssicherung von Klebverbindungen</b>	<b>99</b>
6.1	Gestaltung und Dimensionierung	99
6.1.1	Wechselwirkung von Polymerverhalten und Spannungszustand	100
6.1.2	Gestaltung von Klebverbindungen	102
6.1.3	Dimensionierung von Klebverbindungen	105
6.2	Oberflächenvorbehandlung	109
6.2.1	Mechanische Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung	110
6.2.2	Chemische Verfahren zur Oberflächenvorbehandlung	111
6.2.3	Physikalische Verfahren	111
6.2.4	Voraussetzungen für die Entstehung der Adhäsion	113
6.2.5	Schutz der behandelten Oberflächen	114
6.3	Applikationsverfahren	114
6.3.1	Verarbeitungskonzepte für Klebstoffe	115
6.3.2	Qualitätssicherung	122
<b>7</b>	<b>Prüfverfahren und Eigenschaften von Klebverbindungen</b>	<b>125</b>
7.1	Einleitung	125
7.2	Prüfverfahren für strukturelle Klebverbindungen	125
7.2.1	Zug- und Druckversuch	126
7.2.2	Prüfung unter Scherbelastung	127
7.2.3	Schälbeanspruchung und Rissausbreitungsversuche	128
7.2.4	Biegeprüfung	130
7.2.5	Prüfung der Schlagfestigkeit	130
7.2.6	Bruchbildbewertung	132
7.2.7	Thermomechanische Kennwerte von Klebstoffen	134
7.2.8	Beständigkeitsprüfung von Klebverbindungen	136
7.3	Prüfverfahren für Haftklebstoffe	140
7.3.1	Einführung	140
7.3.2	Probenherstellung	141
7.3.3	Einfluss der Viskoelastizität von Haftklebstoffen	142
7.3.4	Übersicht über standardisierte Prüfverfahren für die Haftkraft	142
7.3.5	Schlussfolgerung	150
7.4	Mechanisches Verhalten von Klebverbindungen	150
7.4.1	Zugscherfestigkeit unter zügiger Beanspruchung	151
7.4.2	Zugscherfestigkeit unter langfristig ruhender und wechselnder Beanspruchung	156
7.4.3	Schälfestigkeit	158
7.4.4	Schlagfestigkeit	160
7.5	Langzeitverhalten von Klebverbindungen	161
7.5.1	Aluminiumklebungen	162
7.5.2	Stahlklebungen	181
7.5.3	Glasklebungen	187

7.5.4	Kunststoffklebungen	188
7.6	Ergebnisse aus Schadensuntersuchungen	189
7.6.1	Ablösung der Blattschenverklebung an Rotorblättern	190
7.6.2	Vollständiger Abriss des Rotorblattprofils	192
7.6.3	Bondline Corrosion in der Wabenstruktur von Tragflügeln	194
7.6.4	Delamination einer Luftfahrzeug-Heckleitwerkbeplankung	195
7.6.5	Temperaturschaden an der Flügelbeplankung eines Heckrotors	197
7.6.6	Temperaturbedingte Delamination eines Glasfaser-Patches	198
7.6.7	Konstruktionsfehler einer Verklebung von Filterelementen	199
7.6.8	Mängel der Peel-Ply-Oberflächenvorbehandlung	200
<b>8</b>	<b>Anwendungen der Klebtechnik</b>	<b>205</b>
8.1	Einleitung	205
8.2	Transportwesen	205
8.2.1	Flugzeugbau	206
8.2.2	Kraftfahrzeugbau	222
8.2.3	Kleben im Eisenbahnwesen	237
8.2.4	Schiffbau	239
8.3	Bauwesen	239
8.3.1	Flächenklebstoffe	240
8.3.2	Einsatz von Klebstoffen in der Befestigungstechnik des Bauwesens	242
8.3.3	Verbund-Spreizdübel	244
8.3.4	Bauwerksverstärkung durch geklebte Oberflächenbewehrung	245
8.3.5	Strukturelles Kleben im Stahl- und Fassadenbau	245
8.4	Kleben im Holzbau	247
8.4.1	Einleitung	247
8.4.2	Holzstruktur	249
8.4.3	Konsequenzen der Holzstruktur	250
8.4.4	Grenzschicht	251
8.4.5	Klebstoffsysteme	252
8.4.6	Klebstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe	252
8.4.7	Holzverbunde	256
8.4.8	Die Königsdisziplin: Konstruktiver Holzleimbau (Ingenieur-Holzbau)	257
8.4.9	Vorgefertigte Elemente	260
8.5	Kleben in der Papier und Verpackungsindustrie	262
8.5.1	Einleitung	262
8.5.2	Packmittelherstellung	263
8.5.3	Aufrichten und Verschließen von Trays und Kartons	271
8.5.4	Palettensicherung	276
8.5.5	Etikettierung	277
8.5.6	Zigarettenherstellung	284

- 8.5.7 Herstellung von Produkten aus Tissuepapier 285
- 8.5.8 Grafische Anwendungen 290
- 8.5.9 Briefumschläge und Mailing 302
- 8.5.10 Wiederverwendung und Recycling von Papier und Verpackungen 304
- 8.5.11 Gesetzliche Auflagen 309
- 8.5.12 Ausblick 310
- 8.6 Kleinindustrie und Handwerk 311
- 8.6.1 Verbinden 311
- 8.6.2 Schützen, Spleißen und Maskieren 320
- 8.6.3 Dämpfen 325
- 8.6.4 Kennzeichnen 326
- 8.7 Elektronikindustrie 328
- 8.7.1 Thermisch leitfähige Klebstoffe 328
- 8.7.2 Elektrisch leitfähige Klebstoffe 329
- 8.7.3 Underfill-Materialien 331
- 8.7.4 Funktionelle Klebebänder 331
- 8.7.5 Spacer 332
- 8.7.6 Labeling 333
- 8.8 Optische Industrie 333
- 8.8.1 Allgemeine Anforderungen an Klebstoffe in der optischen Industrie 333
- 8.8.2 Befestigungskitte zur Bearbeitung von optischen Bauteilen 334
- 8.8.3 Optisches Feinkitten 335
- 8.8.4 Kleben von Optikteilen in Fassungen 337
- 8.9 Maschinen- und Apparatebau 338
- 8.9.1 Maschinenbau 338
- 8.9.2 Haushaltsgeräteindustrie 339
- 8.9.3 Motoren- und Getriebebau 339
- 8.9.4 Konstruktionen aus rostfreiem Stahl 341
- 8.10 Textilindustrie 342
- 8.10.1 Historisches zu Gummi-Textil-Verbundwerkstoffen 342
- 8.10.2 Der Anteil der Textilfasern am Lebensstandard der Industriegesellschaft 343
- 8.10.3 Sektor »Technische Textilien« 343
- 8.10.4 Kleben von textilem Verstärkungsmaterial für die Kautschukindustrie 344
- 8.10.5 Besonderheiten des Klebstoffauftrages in Abhängigkeit von der Faser 348
- 8.10.6 Haftsysteme in der Kautschukmischung (Direkthaftung) 350
- 8.10.7 Mechanismen der Adhäsion 351
- 8.10.8 Alterungserscheinungen von RFL-gedippten Textilien 353
- 8.11 Schuhindustrie 354
- 8.12 Straßenwesen 356
- 8.12.1 Verkehrszeichen 357

8.12.2	Fahrbahnmarkierung	359
8.12.3	Kraftfahrzeugkennzeichen	361
8.13	Oberflächendesign	361
8.13.1	Oberflächendesign und Oberflächenschutz	361
8.13.2	Fahrzeugwerbung	362
8.13.3	Öffentliche Verkehrsmittel	363
8.13.4	Gebäude und Fassaden	365
8.14	Medizin	366
8.14.1	Medizinprodukte mit kurzzeitigem, oberflächlichem Körperkontakt	366
8.14.2	Medizinprodukte mit Körperkontakt bis zu 30 Tagen	367
8.14.3	Medizinprodukte mit Körperkontakt über 30 Tage	367
8.15	Kleben in der Natur	370
8.15.1	Aufbauprinzipien biologischer Verklammerungsstrukturen	370
8.15.2	Kleben bei Lebewesen im Wasser	371
8.15.3	Kleben bei landlebenden Insekten	379
8.15.4	Haftung und Verklammerung bei Pflanzen	380
8.15.5	Haftung durch Oberflächenreplikation	381
8.16	Wenig bekannte Klebanwendungen	381
8.16.1	Folien für Windkraftrotoren	381
8.16.2	Adhäsive Elastomerverbunde	383
8.16.3	Glühbirnen	385
8.16.4	Kleben in der Kunst, Schmuckherstellung und Archäologie	386
8.16.5	Lösbare Klebverbindungen	389
<b>9</b>	<b>Zukunftstrends</b>	395
9.1	Wirtschaftliche Trends	395
9.2	Technische Trends	396
<b>10</b>	<b>Forschung und Entwicklung in der Klebtechnik: Eine Übersicht</b>	399
<b>11</b>	<b>Literatur</b>	409
<b>12</b>	<b>Register</b>	419

## Vorwort

Die wissenschaftlich fundierten Kenntnisse über die Grundlagen des Klebens und seine vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten sind wegen der Interdisziplinarität des Fachgebiets in der internationalen und auch in der deutschsprachigen Literatur leider breit gestreut und damit oft schwer auffindbar. Bis heute bestehen aber noch einige wesentliche Wissenslücken – speziell im Bereich der adhäsiven Wechselwirkungen und bezüglich des Langzeitverhaltens der polymeren Klebstoffe unter mechanischen und gleichzeitig einwirkenden physikalischen und chemischen Beanspruchungen. Die Konzeption zuverlässiger Klebungen, insbesondere für Langzeiteinsätze, erfordert daher heute noch neben Grundlagenkenntnissen aus langjähriger Beschäftigung mit dem Kleben empirisch gewonnenes Wissen, das die vorhandene Literatur nur unzureichend vermittelt.

Das vorliegende Buch zeigt in kompakter und leicht verständlicher Weise, was die Klebtechnik heute und in Zukunft in den verschiedenartigen Anwendungsbereichen leisten kann. Dazu haben sich Fachleute mit langjähriger klebtechnischer Erfahrung aus der angewandten Forschung und der Industrie zusammengetan, um ihr Wissen über das Kleben in übersichtlicher Form zusammenfassend zu dokumentieren. Basierend auf den wichtigsten Grundlagen führt das Buch den Leser in praxisrelevante Fragestellungen, wie z.B. die Auswahl geeigneter Prüfverfahren, und dann in sehr unterschiedliche Anwendungsgebiete der strukturellen Hochleistungsklebtechnik des Flugzeug- und Fahrzeugbaus sowie des Bauwesens, ebenso wie die der nichtstrukturellen Klebtechnik, beispielsweise im Verpackungsbereich oder in der Kaschiertechnik. Beschrieben werden raffinierte Klebtechniken der Natur und adhäsive Verbindungen, etwa zwischen Stahl und Gummi, die wir alle nutzen, über die aber fast niemand nachdenkt, wenn er seine Autoreifen aufpumpt oder von seinem komfortabel leisen Auto erzählt; auch die gezielte Lösbarkeit geklebter Verbindungen findet Aufmerksamkeit. Diese für das Kleben typische Vielfalt ist bisher nicht zusammenhängend betrachtet worden, obwohl das sehr lehrreich und spannend ist.

Der Leser erfährt, dass die oft skeptisch betrachtete Klebtechnik, bei richtiger Entwicklung und Ausführung der Klebungen, eine ungemein leistungsfähige Fügetechnik ist und bekommt Hilfestellung, klebtechnische Aufgaben erfolgreich zu bearbeiten.

Wir danken dem Verlag für seine Bereitschaft und große Hilfe zur Veröffentlichung dieses Buches und hoffen, dass es ein nützlicher Beitrag zum Fortschritt der Klebtechnik sein wird.

März 2005

*Die Verfasser*

## Autoren

**Prof. Dr. Walter Brockmann**

Brunnenstr. 71

67661 Kaiserslautern

*Kapitel 1, 2, 3, 4; Abschnitte 5.2, 5.4, 5.9, 5.10, 5.11, 7.2.6, 7.2.8, 7.3, 7.4, 7.5, 8.2.1, 8.2.2 Einführung, 8.2.3, 8.2.4, 8.16.4, 8.16.5, 9.2*

**Prof. als Juniorprofessor****Dr. Paul Ludwig Geiß**

TU Kaiserslautern

AWOK

Postfach 3049

67653 Kaiserslautern

*Kapitel 6; Abschnitte 7.1, 7.2.1, 7.2.3, 7.2.4, 7.2.5, 7.2.7, 7.2.8, 8.1, 8.3, 8.16.2, 9.1*

**Dr. Jürgen Klingen**

3 M Deutschland GmbH

Corporate Research Laboratory

Carl-Schurz-Str. 1

41453 Neuss

*Abschnitte 5.1, 5.6, 5.8, 8.6, 8.7, 8.12, 8.16.1*

**Dr. Bernhard Schröder**

Naturwissenschaftlich und

Medizinisches Institut (NMI) an der

Universität Tübingen

Marktwiesenstr. 55

72770 Reutlingen

*Kapitel 10, Abschnitte 5.3, 5.5, 8.9, 8.14, 8.16.3, 8.16.5.2*

**Unter weiterer Mitarbeit von:**

***Dr. Jürgen von Czarnecki***

Wehrwissenschaftliches Institut für  
Werk-, Explosiv- und Betriebsstoffe  
(WIWEB)  
Landshuter Str. 70  
85435 Erding  
*Abschnitt 7.6*

***Dr. Stanislav Gorb***

Max-Planck-Institut für  
Metallforschung  
Evolutionary Biomaterials Group  
Heisenbergstr. 3  
70569 Stuttgart  
*Abschnitt 8.15*

***Dr. Jens Kiesewetter***

Mehler Industrietextilien GmbH  
Edelzeller Str. 44  
36043 Fulda  
*Abschnitt 8.10*

***Stefan Mattle***

APM Technica AG  
Max-Schmidheiny-Str. 202  
9435 Heerbrugg  
Schweiz  
*Abschnitt 8.8*

***Dipl.-Chem. Jörg Naß***

Wellomer GmbH  
Röntgenstr. 9  
67133 Maxdorf  
*Abschnitt 5.6*

***Dr. Herrmann Onusseit***

Henkel KGaA  
Henkelstr. 67  
40191 Düsseldorf  
*Abschnitt 8.5*

***Dr. Willi Schwotzer***

Collano AG  
6203 Sempach-Station  
Schweiz  
*Abschnitt 8.4*

***Dr. Detlef Symietz***

Dow Automotive  
Wollerauer Str. 15–17  
8807 Freienbach  
Schweiz  
*Abschnitt 8.2.2.1*

***Dr. Stefanie Wellmann***

Wellomer GmbH  
Röntgenstr. 9  
67133 Maxdorf  
*Abschnitt 5.7*

## 1

## Position der Klebtechnik im Bereich der Verbindungsverfahren

Unter Kleben versteht man das flächige Verbinden gleicher oder verschiedenartiger Werkstoffe unter Verwendung einer meist artfremden Substanz, die an den Oberflächen der zu verbindenden Teile haftet und die Kräfte von einem Füge teil in das andere überträgt. Mit dem Begriff Klebstoff wird gemäß DIN EN 1692 ein nichtmetallischer Stoff bezeichnet, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt. Das Kleben zählt zu den stoffschlüssigen und im klassischen Sinne nicht ohne Zerstörung lösbaren Verbindungstechniken. In jüngster Zeit sind Entwicklungen zu einer gezielten Lösbarkeit geklebter Verbindungen unter bestimmten Bedingungen zu beobachten (s. Abschnitt 8.16.5). Beispiele sind das Kleben als Montagehilfe ohne spätere Funktion oder auch der Aspekt des stofftrennenden Recyclings, der zunehmend an Interesse gewinnt.

Das Kleben ist das mit Abstand universellste Verbindungsverfahren. Durch Kleben lassen sich praktisch alle technisch nutzbaren Werkstoffe miteinander und untereinander flächig und stoffschlüssig verbinden.

Die Klebtechnik bietet dem Konstrukteur gestalterische Freiheit und lässt sich in nahezu allen Bereichen der Industrie in vorhandene Fertigungsabläufe der Einzel- oder Massenproduktion problemfrei integrieren. Der Durchbruch zur Hochleistungs-Verbindungstechnik gelang durch den Ersatz der ursprünglich benutzten natürlichen Bindemittel-Ausgangsstoffe durch synthetische Stoffe. Mit der Einführung der Phenolharz-Klebstoffe gegen Ende der 1920er Jahre und der Entwicklung der Epoxidharze und Polyurethane in den 1940er Jahren wurde es möglich, Klebstoffe synthetisch herzustellen (s. Kapitel 2).

Die sich heute noch immer weiter entwickelnde Polymerchemie ermöglicht den gezielten Aufbau von Klebstoffen, die mit organischen und anorganischen Materialien eine feste adhäsive Bindung eingehen können. Diese Klebstoffe erfüllen hinsichtlich Festigkeits- und Verformungseigenschaften genau definierte Anforderungen, die sich aus der Konfiguration der Klebverbindung ergeben. Die Probleme mit der Klebstoffaushärtung, die bei hochfesten Systemen oftmals längere Zeiten erforderte, wurden von der Klebstoffchemie weitestgehend überwunden. Skepsis gegenüber der Langzeitbeständigkeit geklebter Verbindungen unter schädigenden Umwelteinflüssen ist bei fachgerechter Konzeption nicht mehr gerechtfertigt.

Das Kleben tritt nur selten in Konkurrenz zu anderen in der Industrie üblichen Verbindungstechniken. Der Bau einer stählernen Brücke mit Hilfe der Klebtechnik macht ebenso wenig Sinn wie das Kleben eines Krangerüstes. Für den Leichtbau von Autokarosserien mit Stahl, Aluminium, Glas und Kunststoffen bieten sich allerdings außerordentlich interessante Anwendungsmöglichkeiten der Klebtechnik. Insbesondere bietet sich die Klebtechnik zum großflächigen Verbinden verschiedener Werkstoffe an, beispielsweise bei der Herstellung von Sandwich-Strukturen.

Die Möglichkeiten der Klebtechnik und deren Vor- und Nachteile im Vergleich zu anderen Verbindungstechniken sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Ein Vorteil des Klebens ist, dass zum Herstellen der Verbindung keine oder nur wenig Wärme benötigt wird. Die stoffliche Struktur der zu verbindenden Fügeteile wird durch den Klebprozess makroskopisch nicht beeinflusst und durch Wärmeeinbringung hervorgerufene Verformungen oder Eigenspannungen treten selten auf. Auch oberflächenveredelte oder beschichtete Werkstoffe lassen sich ohne Wärmezufuhr problemlos verbinden. Einer beliebigen Kombination von Werkstoffen sind daher unter diesen Gesichtspunkten keine Grenzen gesetzt.

Die im Vergleich zu anorganischen Werkstoffen wie Metallen oder Glas relativ geringe Wärmebeständigkeit der Klebfuge ist ein wichtiger Nachteil dieses Fügeverfahrens. Für Klebungen hoher Leistungsfähigkeit ist eine stoffgerechte Fertigungstechnik unerlässlich. Dies gilt sowohl für die Fertigungsabläufe als auch für

**Tabelle 1** Eigenschaften von Klebverbindungen

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
keine Wärmebeeinflussung der Fügeteile	begrenzte Warmfestigkeit
gleichmäßige Spannungsverteilung	Veränderung der Klebfugen-Eigenschaften bei Langzeiteinsätzen möglich
flächige Verbindungen möglich	Reinigung und Oberflächenvorbehandlung der zu verbindenden Teile in vielen Fällen erforderlich
unterschiedliche Werkstoffe verbindbar	präzises Einhalten der Fertigungsbedingungen erforderlich
Verbinden sehr dünner Fügeteile	oft spezielle Klebvorrichtungen zum Fixieren der Verbindung erforderlich
gas- und flüssigkeitsdichtes Fügen, keine Spaltkorrosion	zerstörungsfreie Qualitätsprüfung nur bedingt möglich
Verhinderung von Kontaktkorrosion	
keine präzisen Passungen der Fügeflächen erforderlich	
gute Dämpfungseigenschaften der Verbindung, hohe dynamische Festigkeit	

die Umgebung, in der Klebverbindungen hergestellt werden, da die Adhäsion in der Regel erst während des Fertigungsprozesses entsteht und die Fertigungsparameter einen entscheidenden Einfluss auf die Güte einer Klebung ausüben können. Gleiches gilt fast immer auch für die Kohäsion der Klebschicht, deren technische Eigenschaften sich (außer bei selbstklebenden Haftklebstoffen) erst während des Fertigungsprozesses nach einem unterschiedlich gearteten Erstarrungsvorgang herausbilden. Hier wirken sich die Fertigungsparameter in den meisten Fällen ebenfalls deutlich auf die Qualität des endgültigen Verbundes aus. Dadurch unterscheidet sich das Kleben deutlich von anderen klassischen Verbindungstechniken, beispielsweise den Schraubverbindungen, deren Qualität nur in geringem Umfang vom eigentlichen Fügeprozess beeinflusst wird.

Weil die Adhäsionsmechanismen und die Langzeiteigenschaften der Klebstoffe noch nicht vollständig bekannt sind, lassen sich Klebverbindungen bis heute rechnerisch nicht exakt modellieren, was allgemein als Nachteil empfunden wird. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Erfahrungswerte ist mittlerweile aber die sichere Konzeption geklebter Strukturen mit ausreichender Zuverlässigkeit möglich.



## 2

### Geschichtliche Entwicklung

Die Klebtechnik ist, soweit man weiß, eines der ältesten Verbindungsverfahren, die der Mensch benutzt. Seit etwa 4000 v. Chr. verwendeten die Mesopotamier Asphalt zu Bauzwecken. 3000 v. Chr. stellten die Sumerer Leim aus tierischen Häuten her und nannten dieses Produkt Segin. Etwa 1000 Jahre später existierten in Ur geklebte Figuren, was anhand einer gefundenen Widderstatue aus Holz dokumentiert wird, die mit Asphaltklebstoff und Goldbeschichtung versehen ist. 1475 v. Chr. war nachweislich in Ägypten das Leimen bekannt, da sich im Grab des Rekhmara in Theben ein Gemälde aus dieser Zeit befindet, in dem der Leimprozess dargestellt wird. Damals wurden vermutlich tierische Leime benutzt. Auch im Grab von Nehanon und Ipuki aus der gleichen Zeit ist das Verleimen eines Schreins bildlich dargestellt.

In der Felsenkammer oberhalb des Totentempels der Hatschepsut in Der-el-bahari (Grab des Tut Ench Amun) fand sich eine Leimtafel, deren Eigenschaften man in den 1920er Jahren untersuchte. Sie zeigte absolut das gleiche Verhalten wie der Hautleim, der zur Zeit der Studie noch produziert wurde, obwohl die Tafel 3500 Jahre alt war. Daraus kann man den Schluss ziehen, dass die Klebstoffe über Jahrtausende hinweg bis auf wenige Ausnahmen nur geringfügig weiterentwickelt wurden.

In der Sammlung der Gesetze und religiösen Überlieferungen des nachbiblischen Judentums, dem Talmud, wird erwähnt, dass die Israeliten der damaligen Zeit bereits Casein als Bindemittel für Pigmente benutzten. Caseine wurden erst später im größeren Umfang als Leime eingesetzt.

Auch in Griechenland war der Leim bekannt. Die berühmte Sage von Dädalus und Ikarus, deren Handlung zwischen 2000 und 1600 v. Chr. spielt, basiert auf dem Versagen von Klebverbindungen, wobei hier als Klebstoff Wachs genannt wird (Abbildung 1). 371 bis 268 v. Chr. erwähnt Theophrast in seiner »Geschichte der Gewächse« Folgendes: »Bei der Zimmermannsarbeit hält der Leim am besten die Fichte zusammen. Man sagt, dass sie nicht einmal reiße, wenn sie geleimt sei.«

Gaius Sekundus Plinius d. Ä. schreibt in seinem Buch »Naturalis Historiae« im Jahr 79 n. Chr., die Türen des Tempels der Diana/Artemis in Ephesus, nach dem Brand 356 v. Chr. wieder aufgebaut 324 v. Chr., seien nach 400 Jahren »wie neu« gewesen. »Es ist zu vermerken, dass die Türflügel vier Jahre in der Leimzwinde gestanden haben.« Auch an anderen Stellen macht er bemerkenswerte Notizen über Leime [1]. Im Buch XVI sagt er beispielsweise in Verbindung mit der Beschreibung



**Abbildung 1** Der Sturz des Ikarus. Kupferstich zu Ovids »Metamorphosen« aus dem 18. Jahrhundert (Bildarchiv Preußischer Kulturbesitz, Berlin)

von Holzarten: »Magna autem et glutinatio propter ea, quae sectilibus laminis aut alio genere operiuntur.« (»Wichtig ist aber auch das Verleimen wegen der Dinge, die mit geschnittenen Brettern oder auf andere Weise bedeckt werden.«) Kurz darauf folgt die tiefgründige und noch heute bedenkenswerte Feststellung: »Quaedam et inter se cum aliis insociabilia glutino, sicut robur, nec fere cohaerent nisi similia natura, ut si quis lapidem lignumque coniungat.« (»Einige (Hölzer) lassen sich sowohl untereinander als auch mit anderen nicht verleimen, wie z. B. die Steineiche, und sie haften fast nie aneinander, außer wenn sie von Natur aus ähnlich sind. Dies gilt auch für Stein und Holz.«)

Im Altgriechischen bezeichnete man den Holzleim als Xylokolla (ξύλοκολλα), den Stierleim als Taurokolla (ταυροκολλα), den Fischleim als Ichthykolla (ιχθυκολλα) und den Leimsieder als Kollepsos (κολλεπσος). Theodorus von Samos erwähnt bereits 530 v. Chr. das »Zusammenleimen der Metalle«, was wahrscheinlich bildhaft für eine feste Verbindung gemeint ist. Man kann daraus aber schließen, dass die Erfahrung mit Klebstoffen recht gut war.

Theophilus, vermutlich ein schreibkundiger Mönch, erwähnt in seinen Unterlagen im Jahre 950 n. Chr. den Caseinleim, der offenbar schon den alten Israeliten bekannt gewesen ist. Verwendet wurde dieser Leim auch noch in ersten geklebten technischen Konstruktionen der Neuzeit, beispielsweise beim Bau der Starrluftschiffe von Schütte-Lanz zwischen 1908 und 1919. Die Luftschiffe besaßen eine mit Casein geklebte Holzkonstruktion als Traggerüst. Einen Eindruck davon vermitteln die Abbildungen 2 und 3.



**Abbildung 2** Luftschiffträger aus verleimtem Aspenholz. Bauart Schütte-Lanz um 1915



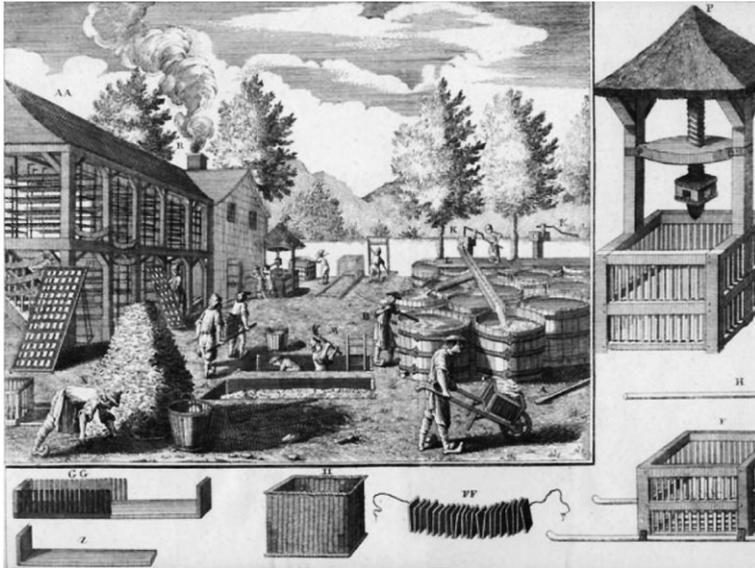
**Abbildung 3** Knoten zwischen räumlichem Ring- und Längsträger in geklebter Holzbauweise. Bauart Schütte-Lanz um 1915

Die Leimverbindungen versagten oft im rauen, feuchten Betrieb der Marine-luftschiffer. Auch das Räuchern der geleimten Teile in Formalindämpfen zur nach-träglichen Vernetzung (s. Abschnitt 5.9.3.2) sowie zusätzliche Schutzlackierungen brachten nur geringfügige Verbesserungen.

Theophilus beschreibt auch gemahlenes Hirschhorn als Füllstoff für Tierleime und den Hausenblasenleim, von dem in späteren Jahren die Beluga-Qualität besonders gelobt wurde. Erwähnt sei vielleicht noch ein Zitat zur Klebtechnik aus dem frühen Mittelalter, das sich in den »Merseburger Zaubersprüchen« findet: »Bein ze beine, bluot ze bluote sollen sie gelimida sin.« Beschrieben wird eine medizinisch-klebtechnische Reparatur im Sinne der allgemeinen Verbindung.

Die Klebstoffindustrie begann sich im 17. und 18. Jahrhundert zu entwickeln (Abbildung 4). Eine besonders interessante Darstellung von Henry Louis Duhamel du Monceau, »Le arte de faire differents sorts de collées«, Paris 1771, wurde ein Jahr später in Deutschland in der preußischen Akademie der Wissenschaften unter dem Titel »Die Kunst verschiedene Arten von Leim zu machen« publiziert. Duhamel du Monceau nennt verschiedene Rezepte für unterschiedliche Leime und weist auch darauf hin, dass man Knoblauch auf Holz als Haftvermittler verwenden könne, indem man das Holz vor dem Klebstoffauftrag mit Knoblauch ab-reibt. Haftvermittler hat es also auch schon früh gegeben. Der chemische Aufbau des Knoblauchextraktes lässt gute Wirksamkeit vermuten (s. Abschnitt 5.10.2).

Alles in allem entwickelten die Klebstoffe sich also langsam, wenngleich sie viel-fältig genutzt wurden. Größere Fortschritte folgten im 19. Jahrhundert. Selbstkle-bende Massen und Pflaster für medizinische Anwendungen wurden ab Mitte des Jahrhunderts entwickelt und eingesetzt [2]. Als Erfinder der auf Naturkautschuk basierenden Haftklebstoffe gilt Horace H. Day. Ein entsprechendes US-Patent von William H. Shecut und Horace H. Day über die Verbesserung von Klebstoffpflas-tern stammt aus dem Jahre 1845 [3]. Ein deutsches Patent für ein Pflaster, be-schichtet mit auf Naturkautschuk basierendem Haftklebstoff, wurde im Jahre 1882 an den Drogisten Paul C. Beiersdorf erteilt.



**Abbildung 4** Leimfabrik um die Mitte des 18. Jahrhunderts nach Duhamel du Monceau.

Obwohl sich die Eigenschaften der frühen Haftklebstoffe durch diese Erfindungen und durch verschiedene zusätzliche Entwicklungsaktivitäten verbesserten, konnten die Anforderungen für industrielle Anwendungen lange nicht erfüllt werden. Der Durchbruch dazu gelang Richard G. Drew von der amerikanischen Minnesota Mining and Manufacturing Company (3M) in den 1920er Jahren. Er entwickelte das erste auf Krepppapier basierende Abdeckklebeband für den Lackierprozess in der Automobilindustrie [4]. Im Jahre 1926 eröffnete Drew das erste 3M-Klebebandlabor und entwickelte später ein Cellophan-Klebeband für Verpackungsanwendungen. Dieses gilt als das erste transparente Klebeband auf dem Markt, das vielfältige Anwendungen in Büro und Haushalt fand [5]. Obwohl Haftklebstoffe bis in die 1950er Jahre eher ein wenig beachtetes Dasein fristeten, sind sie heute die Klebstoffgruppe mit den größten Wachstumsraten (s. Abschnitt 5.1).

In der Zwischenzeit hatte 1889 Ferdinand Sichel in Hannover den ersten gebrauchsfertigen Pflanzenleim erfunden. 1909 begann das Zeitalter synthetisch hergestellter Polymere mit Leo Hendrik Baekelands Phenolharz-Patent. Die Herstellung von Polyvinylacetat, einem bis heute vielfältig verwendeten synthetischen Rohstoff für Klebstoffe, wurde 1914 von Victor Rollett und Fritz Klatt patentiert. Kommerzielle Bedeutung erlangte Polyvinylacetat erst in den 1920er Jahren. Seit 1919 ist Harnstoffharz bekannt, das aber erst seit 1929 in Klebstoffen eingesetzt werden konnte, nachdem ein Verfahren zur Härtung entwickelt worden war. Seit den 1930er Jahren werden Carboxymethyl- und Methylcellulose als Malerleime und Tapetenkleister verwendet. 1931 publizierte Wallace Hume Carothers die Herstellung von Polychlorbutadien, das aber erst in den 1950er und 1960er Jahren Bedeutung gewann.

Einige alte Rezepte werden auch von Alexander Matting [6] wiedergegeben. Besonders berühmt war der so genannte Marineleim, der aus Kautschuklösungen mit Schellack- oder Asphaltzusätzen hergestellt wurde. Ein weiteres interessantes Rezept ist das zur Herstellung von Kittungen aus 60 % Bleiglätte (PbO), 30 % flüssigem Phenolformaldehydharz und 10 % Magnesiumcarbonat, womit man nach heutigen Kenntnissen sehr beständige Klebfugen erzeugen konnte.

Berühmt in der Geschichte der Klebstoffe ist auch das so genannte »Atlas-Ago-Verfahren« in der Schuhherstellung, das 1912 patentiert wurde. Dabei werden Klebstoffe auf Celluloidbasis verwendet. Der heute noch bekannte »Kauritleim« (BASF) – ein Harnstoff-Kondensationsprodukt, das sich heiß und kalt aushärten ließ – wurde ab Ende der 1920er Jahre von den damaligen IG Farben produziert. Seit 1928 gibt es den Klebstoff »Tegofilm« (Goldschmidt) auf Phenolharzbasis. Mit diesem vollsynthetischen, heiß härtenden Klebstoff ließ sich vor allem Sperrholz absolut wasserbeständig verbinden. Dies gelang später auch mit kalt härtenden Systemen ähnlicher Art und ist heute noch üblich (s. Abschnitt 5.4). Damit wurden die alten Casein- und Blutalbuminleime weitgehend verdrängt.

Ein Durchbruch im Sinne des konstruktiven Klebens nicht nur von Holz, sondern auch von Metallen gelang Anfang der 1940er Jahre Norman Adrian de Bruyne mit der Erfindung der polyvinylformal-modifizierten Phenolharz-Klebstoffe [7], die einen erheblichen Beitrag zur Verbesserung von Flugzeugstrukturen leisteten und wegen der ausgezeichneten Alterungsbeständigkeit besonders für Aluminiumklebungen noch heute geschätzt werden (s. Abschnitt 8.2.1). Ihr Name »REDUX« leitet sich aus Research at Duxford (dem Ursprungsort) her. Bemerkenswert in den Konzepten von de Bruyne ist die Kombination unterschiedlicher Polymersysteme in Klebstoffen, die vorher nur in Haftklebstoffen systematisch genutzt worden war.

Der Name »Araldit« (CIBA) für Epoxidharze hat mittlerweile ebenfalls historischen Wert. Er ist mit Eduard Preiswerk verbunden, der 1944 die vielfältigen Verklebungsmöglichkeiten auch von Metallen mit dem 1937 von Pierre Castan synthetisierten, mit Phthalsäureanhydrid gehärteten Epoxidharz herausfand [8]. Castan wollte seine Epoxidharze für zahnärztliche Zwecke einsetzen, gab die Versuche aber dem Vernehmen nach wegen unzureichender Wasserbeständigkeit der Adhäsion der Harze zu anderen Werkstoffen auf. Epoxidharz-Klebstoffe zählen bis heute sowohl als kalt härtende als auch als warm härtende Systeme zu Standardprodukten der strukturellen Klebtechnik (s. Abschnitt 5.5.1).

Zu nennen sind als Markstein in der Klebstoffgeschichte schließlich die von Otto Bayer bereits 1937 patentierten Polyurethane. Beachtung in der Klebstoffherstellung fanden sie erst in den 1950er Jahren. Heute gehören sie wegen ihrer vielfältigen Modifikationsmöglichkeiten zu den wichtigsten Basisstoffen in der Klebstoffindustrie (s. Abschnitt 5.6).

Ein interessanter Kommentar zur frühen Klebtechnik findet sich in einem 1933 herausgegebenen Buch [9]: »Besitzer wirklich guter Rezepturen von Spezialklebstoffen werden sich hüten, sie urbi et orbi bekanntzugeben.« Dabei ist die Klebstoffindustrie bis heute geblieben.

Diese kurze geschichtliche Rückschau kann naturgemäß nur unvollständig sein. In den nachfolgenden Kapiteln finden sich detailliertere Informationen zur Entwicklung und zu den Eigenschaften der jeweiligen Klebstoffgruppen.

## 3

# Adhäsion

### 3.1

#### Einführung

Adhäsion, d. h. das makroskopisch zweidimensionale (flächige) Aneinanderhaften artgleicher oder artfremder Substanzen, ist eines der wichtigsten stofflichen Phänomene in Natur und Technik. Begrenzt man die Betrachtung auf die Technik, so hält Adhäsion zwischen Mörtel und Ziegelstein ein Gebäude aus römischer Zeit bis heute zuverlässig zusammen. Ein Autoreifen funktioniert nur, wenn das Gummi mit dem Gewebe aus organischen Stoffen oder Stahldrähten adhäsiv absolut sicher zusammenhält; Korrosionsschutz durch Lacke auf unseren Autos wäre ohne Adhäsion nicht möglich und auch das Papier, auf dem Bücher immer noch gedruckt werden, ist ein adhäsiv gebundener Faserverbundwerkstoff. Betrachtet man die Adhäsion als *conditio sine qua non* für alle Arten der Klebtechnik, erscheint es vernünftig, den Gesamtkreis adhäsiver Phänomene einzugrenzen und sich auf die nähere Betrachtung meist höhermolekularer organischer Substanzen (die meisten Klebstoffe) sowie auf technisch nutzbare anorganische Werkstoffe wie Metalle, Glas, Stein und Keramiken sowie organische Stoffe, d. h. Kunststoffe, Holz und Textilien, zu beschränken.

Die Erfahrung aus langjähriger Adhäsionsforschung lehrt, dass es sinnvoll ist, die Entstehung adhäsiver Verbindungen und ihr Verhalten im Verbund differenziert zu betrachten. Der Grund dafür ist, drastisch ausgedrückt, dass adhäsive Systeme praktisch niemals dort trennbar sind oder versagen, wo die Adhäsion tatsächlich entstanden ist. Den viel zitierten so genannten Adhäsionsbruch gibt es nicht, wenn die adhäsiven Partner bei der Entstehung der Adhäsion einander nahe genug gekommen sind, um interatomare oder intermolekulare Wechselwirkungen im Sinne eines belastbaren Verbundes aufzubauen.

Damit ist im Grunde genommen bereits konstatiert, dass mechanische »Verzahnung« als Ursache der Haftung, die beispielsweise beim Verkleben von Holz oder Papier, porösen oder quellbaren Stoffen durchaus nützlich sein kann, nicht im Vordergrund unserer Betrachtung stehen soll, weil sie – wie man heute sehr genau weiß – für die meisten nicht porösen, technisch nutzbaren Werkstoffe praktisch bedeutungslos ist.

Technisch nutzbare Wechselwirkungskräfte zwischen Atomen und Molekülen treten nur auf, wenn die beteiligten Bindungspartner sehr nahe zusammen kom-

Tabelle 2 Wechselwirkungskräfte in Grenzschichten

**Wechselwirkungskräfte in Grenzflächenschichten**

Kräfte	physikalische Bindungen			Wasserstoffbrücken-Bindungen	chemische Bindungen		
	permanente Dipole	induzierte Dipole	Dispersionskräfte		kovalente		ionische
Reichweite	0,3–0,5 nm			0,3–0,5 nm	0,1–0,2 nm		
Bindungsenergie (KJ/mol)	<20 (Keesom-energie)	<2 (Debye-energie)	0,1–40 (London-energie)	<50	60–700		600–1000
theoretisch berechnete Adhäsionskräfte (MPa)	200–1750	35–300	60–360	500	17500	5000	30
Experimentell gemessene Verbundfestigkeiten (MPa)	15–25						

men. Ihre Reichweite beschränkt sich, wie in Tabelle 2 gezeigt, auf einen Bereich von kleiner als 1 nm.

Allenfalls adhäsive Wechselwirkungen in Form von Ladungsverschiebungen, die zu einer elektrischen Doppelschicht beitragen, können über etwas größere Abstände wirksam sein. Die für physikalische Bindungen, Wasserstoffbrückenbindungen und chemische Bindungen messbaren Bindungsenergien sind bekannt und in Tabelle 2 jeweils mit ihrer Größenordnung angegeben. Errechnet man aus ihnen die theoretisch möglichen Adhäsionskräfte bezogen auf eine Flächeneinheit in Megapascal, ergeben sich meistens Werte, die deutlich höher sind als die Festigkeiten von Klebstoffen auf organischer Basis. Deren theoretische Festigkeit, errechnet aus der Bindungsenergie von Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen bei dichtester Packung im Polymer, sollte in der Größenordnung von 500 MPa liegen. Natürlich sind die tatsächlich messbaren Festigkeitswerte für adhäsive Verbunde und auch die für polymere Werkstoffe kleiner als die theoretisch errechneten, weil ideale Stoffkombinationen und Strukturen nicht zu erwarten sind. Geht man aber davon aus, dass das Verhältnis zwischen theoretischen und praktischen Werten für Adhäsion und Klebstoff etwa gleich ist, wird bereits hier klar, dass die meisten möglichen adhäsiven Wechselwirkungen für einen zuverlässigen Verbund eines geklebten Systems ausreichen müssen. Dieses sehr einfache Postulat bestätigt sich in der langjährigen Erfahrung der Klebtechnik dadurch, dass, wie bereits erwähnt, in belasteten adhäsiven Verbunden die (eigentliche) Adhäsion praktisch niemals versagt. Streng genommen könnte man die Betrachtung des Phänomens Adhäsion mit dieser Feststellung beschließen, würde dann allerdings das oft sehr komplexe Verhalten adhäsiver Systeme weder verstehen noch systematisch optimieren können, was heute in vielen Fällen durchaus möglich ist. Dies allerdings erfordert zusätzliche Grundkenntnisse, die im Folgenden vermittelt werden sollen.

Stellt man Klebverbindungen her, wird von außen in der Regel keine oder nur wenig Energie zugeführt. Der Klebstoff kommt in diesem Fall den zu verbindenden Festkörpern nur nahe genug, wenn er ihn benetzt. Als Benetzung bezeichnet man das oft gut beobachtbare Phänomen eines Flüssigkeitstropfens auf einer Festkörperoberfläche. Abhängig vom Zustand der Oberfläche, der Art der Flüssigkeit und (wie oft vergessen) auch von der in der Umgebung vorhandenen Materie, bildet dieser Tropfen einen Randwinkel zwischen Tropfenoberfläche und Festkörperoberfläche aus, der theoretisch zwischen  $0^\circ\text{C}$  (vollständige Spreitung) und  $180^\circ\text{C}$  (vollständige Nichtbenetzung) liegen kann (Abbildung 5).

Bestimmt wird dieser Randwinkel thermodynamisch exakt durch die beim Zur-Ruhe-Kommen des Tropfens wirkenden Grenzflächenspannungen des Festkörpers zur Umgebung, der Flüssigkeit zur Umgebung und der Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Festkörper, die im Falle des ruhenden Tropfens im Gleichgewicht sein müssen. Technisch nutzbare Adhäsion zwischen der benetzenden Flüssigkeit und dem Festkörper, d. h. genügende molekulare oder atomare Nähe im Sinne des oben Gesagten, entsteht nur, wenn dieser Randwinkel  $90^\circ$  oder kleiner ist. Dieses Kriterium ist nur dann erfüllt, wenn die Grenzflächenspannung des Festkörpers zur Umgebung gleich oder größer als diejenige des Tropfens zur Umgebung ist. Vorweg sei hier angemerkt, dass die Oberflächenspannungen gebräuchlicher organischer Klebstoffe zwischen 30 und 60 mN/m liegen; Wasser hat eine Oberflächenspannung von 72 mN/m, während anorganische Werkstoffe wie Glas und Metalle durch Oberflächenspannungen oberhalb von

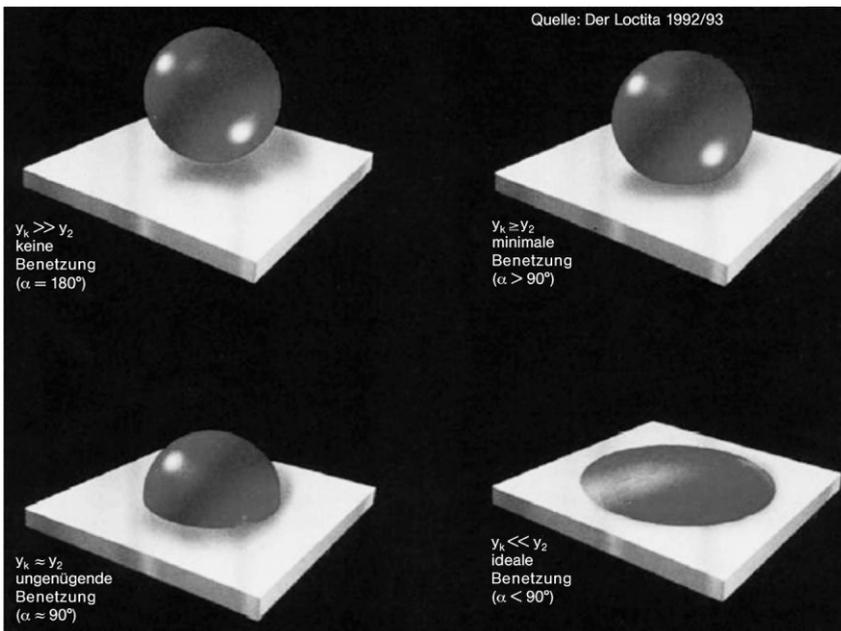


Abbildung 5 Prinzip der Benetzung

Tabelle 3 Oberflächenspannungen verschiedener Stoffe

Werkstoff	$\sigma^d$ [mN/m]	$\sigma^p$ [mN/m]	$\sigma$ [mN/m]
Metalle	–	–	1000–5000
Eisen	–	–	1400
Keramik	–	–	500–1500
Quecksilber	–	–	484
Glas	–	–	300
Glimmer	27,3	39,8	67,1
PA6	36,8	10,7	47,5
PVC	37,7	7,5	45,2
POM	36,0	6,1	42,1
PS	41,4	0,6	42,0
PETP	37,8	3,5	41,3
PE-HD	35,0	0,1	35,1
Epoxidharz	19,5	13,2	32,9
PP	30,5	0,7	31,2
Paraffinwachs	25,5	0	25,5

500 mN/m gekennzeichnet sind und unpolare organische Materialien, zu denen auch das Polyethylen und das Polypropylen zählen, bei Werten unterhalb von 30 mN/m liegen. Polytetrafluorethylen (PTFE) ist der Festkörper mit der niedrigsten bekannten Oberflächenspannung überhaupt (17 mN/m). Eine Konsequenz aus diesen Werten ist, dass einige Kunststoffe von Klebstoffen ohne Hilfsmaßnahmen nicht benetzt werden und damit als schwer klebbar einzustufen sind. Einige andere, beispielsweise Epoxidharze, Phenolharze und Polyester mit Oberflächenspannungen im Bereich von 60 mN/m, sind unter dem Aspekt der Benetzung bereits klebbar; anorganische Substanzen sind, vorausgesetzt, dass sie nicht von spannungsarmen Verunreinigungen bedeckt werden, im Hinblick auf das Benetzungskriterium unproblematisch. Tabelle 3 vermittelt einen Überblick über die Oberflächenspannungen verschiedener Stoffe. Die nichtpolaren und polaren Anteile sind der Vollständigkeit halber mit angegeben, sollen aber erst später diskutiert werden.

Für den Bereich der Klebtechnik kann zunächst also festgehalten werden: Eine Benetzung des Festkörpers durch den Klebstoff ist ein notwendiges Kriterium für das Entstehen der Adhäsion. Damit wird auch klar, dass einfache Benetzungsmessungen an einem Festkörper mit unbekannter Oberflächenspannung in Verbindung mit Flüssigkeiten definierter Oberflächenspannung erste Hinweise geben können, ob eine Adhäsion möglich ist oder nicht. Es muss allerdings bereits hier konstatiert werden, dass die Benetzung keinesfalls als hinreichende Voraussetzung für die Adhäsion gelten darf, was die nachfolgenden Betrachtungen verdeutlichen werden.