

TIM JÜNTGEN

# Klebtechnik

Klebgerechte Konstruktionen  
und Anwendungen  
in der Praxis



Ein Fachbuch von

**konstruktions**  
**praxis**



Der **Onlineservice InfoClick** bietet unter <https://vogel-fachbuch.de/infoclick/> nach Codeeingabe zusätzliche Informationen und Aktualisierungen zu diesem Buch.

# InfoClick

## In 2 Schritten zum Onlineservice

1. Einfach <https://vogel-fachbuch.de/infoclick/> aufrufen.
2. Den unten stehenden Zugangscode in die Suchleiste eingeben und bestätigen.

Sofern Aktualisierungen oder Zusatzinformationen zu Ihrem Buch bereitstehen, werden diese anschließend unterhalb der Eingabemaske aufgeführt.



Ihr persönlicher Zugang  
zum Onlineservice



339304990001

Prof. Dr.-Ing. Tim Jüntgen

# **Klebtechnik**

**Klebgerechte Konstruktionen und  
Anwendungen in der Praxis**

Vogel Communications Group

**Prof. Dr.-Ing. TIM JÜNTGEN**

Jahrgang 1970

studierte Maschinenbau mit Schwerpunkt Kunststofftechnik an der RWTH Aachen. Nach mehrjähriger Tätigkeit von 1999 bis 2003 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) in Aachen promovierte er schließlich zum Dr.-Ing. an der RWTH Aachen. Von 2003 bis 2005 war er bei der Engelmann Automotive GmbH, Wedemark, in verschiedenen leitenden Positionen im Bereich der Automobilzulieferindustrie tätig. In den Jahren 2005 bis 2010 arbeitete er in der Konsumgüterindustrie als Leiter Forschung und Entwicklung / Patentwesen bei der Firma M+C Schiffer GmbH, Neustadt/Wied (Fernthal). Seit Dezember 2010 ist Dr. Jüntgen als Professor an der Hochschule Amberg-Weiden tätig und lehrt dort unter anderem Kunststofftechnik/Kunststoffverarbeitungstechnik, Konstruktion, Werkzeugbau und Klebtechnik.

*Für Silvi, Jana, Inga, Nina und Max*

*«Wer nicht neugierig ist, erfährt nichts.»*  
JOHANN WOLFGANG VON GOETHE (1749–1832)

**Weitere Informationen:**

**[www.vogel-fachbuch.de](http://www.vogel-fachbuch.de)**

 <http://twitter.com/vogelfachbuch>

 [www.facebook.com/vogel-fachbuch](http://www.facebook.com/vogel-fachbuch)

 [www.vogel-fachbuch.de/rss/buch.rss\\_](http://www.vogel-fachbuch.de/rss/buch.rss_)

ISBN 978-3-8343-3393-3

1. Auflage. 2019

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Copyright 2019 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

## Vorwort

Das vorliegende Fachbuch entstand in den vergangenen beiden Jahren als Essenz aus jahrelangen persönlichen klebtechnischen Aktivitäten in Industrie und Wissenschaft. Die Basis hierfür bilden einerseits zahlreiche interessante Berührungspunkte, Untersuchungen, Versuche und Tätigkeiten zum Kleben in der industriellen Forschung & Entwicklung sowie in der Anwendungstechnik und Produktion verschiedener Einrichtungen und Unternehmen. Andererseits hat die intensive wissenschaftliche Beschäftigung mit der Klebtechnik in Lehre und Erwachsenenbildung zum Entstehen dieses Werkes maßgeblich beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt den vielen, hier nicht einzeln genannten Firmen, Partnern, Kollegen und Mitarbeitern aus Wirtschaft und Wissenschaft, die mich bereits im Rahmen meiner Vorlesung «Grundlagen und Verfahren der Klebtechnik» und dem dazugehörigen Klebtechnik-Praktikum an der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Amberg-Weiden sowie bei meinen klebtechnischen Seminaren stets in hervorragender Weise unterstützt haben und auch weiterhin unterstützen. Im Zusammenhang mit dem hier vorliegenden Fachbuch danke ich allen Beteiligten sehr für die vielen interessanten Gespräche, lehrreichen Diskussionen und wertvollen Anmerkungen. Ohne diesen ausgiebigen Wissens- und Erfahrungsaustausch wäre das vorliegende Werk so nicht möglich gewesen. Vielen Dank auch für die Bereitstellung und Freigabe von Bild- und Informationsmaterial, das in diesem Fachbuch sehr gute Verwendung gefunden hat.

Ein ganz spezieller Dank geht schließlich an meine Frau Silvi und meine Kinder Jana, Inga, Nina und Max für ihre unendliche Geduld sowie die liebevolle und immerwährende Unterstützung zu jeder Zeit. Ihr seid die Besten!

Amberg

Tim Jüntgen



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1 Fertigungsverfahren, Fügeverfahren und Verbindungsarten</b> .....	11
1.1 Kleben und Dichten .....	14
1.2 Chronik des Klebens .....	14
1.2.1 Kleben – Vorbild Natur .....	16
1.2.2 Kleben – Begriffe und Definitionen .....	17
1.2.3 Vor- und Nachteile des Klebens .....	18
<b>2 Grundlagen des Klebens</b> .....	25
2.1 Voraussetzungen für das Kleben .....	25
2.1.1 Oberflächenenergie, Oberflächenspannung und Benetzung .....	26
2.1.2 Oberflächenrauigkeit .....	38
2.1.3 Bindungskräfte in Klebungen .....	40
2.2 Versagensarten von Klebungen (Brucharten) .....	44
2.2.1 Adhäsionsbruch .....	47
2.2.2 Kohäsionsbruch .....	48
2.2.3 Grenzschichtbruch .....	50
2.2.4 Mischbruch .....	51
<b>3 Aufbau, Einteilung und Arten von Klebstoffen</b> .....	55
3.1 Aufbau von Klebstoffen .....	55
3.2 Einteilung von Klebstoffen .....	60
3.3 Arten von Klebstoffen .....	62
3.3.1 Lösemittelhaltige Klebstoffe .....	65
3.3.2 Dispersionsklebstoffe (Leime / Weißleime) .....	71
3.3.3 Thermoplastische Schmelzklebstoffe (Hotmelts und Lowmelts) .....	74
3.3.4 Reaktionsklebstoffe .....	78
3.3.4.1 Reaktive Schmelzklebstoffe .....	79
3.3.4.2 Cyanacrylat-Klebstoffe (CA-Klebstoffe, «Sekundenkleber») .....	80
3.3.4.3 Strahlungshärtende Klebstoffe .....	82
3.3.4.4 Anaerob härtende Klebstoffe .....	89
3.3.4.5 Reaktionsklebstoffe auf Methylmethacrylat-Basis (MMA) .....	92
3.3.4.6 Durch Polyaddition härtende Reaktionsklebstoffe .....	96
3.3.4.7 Silikone .....	108
3.3.5 Haftklebstoffe .....	111
3.3.6 Zusatzprodukte (Haftvermittler und Primer) .....	113
3.4 Klebstoff(vor-)auswahl .....	115
<b>4 Technologie des Klebens</b> .....	117
4.1 Vorbereitung der Fügeteile .....	118
4.1.1 Oberflächenvorbereitung .....	118
4.1.1.1 Säubern und Entfetten .....	119
4.1.1.2 Passendmachen .....	122
4.1.2 Oberflächenvorbehandlung .....	122

4.1.2.1	Mechanische Oberflächenvorbehandlung .....	122
4.1.2.2	Physikalische Oberflächenvorbehandlung .....	123
4.1.2.3	Chemische Oberflächenvorbehandlung .....	129
4.1.2.4	Elektrochemische Oberflächenvorbehandlung .....	129
4.1.3	Oberflächennachbehandlung .....	130
4.1.3.1	Klimatisierung .....	130
4.1.3.2	Einsatz von Haftvermittlern .....	130
4.1.3.3	Auftrag von Primern .....	130
4.1.3.4	Applikation von Oberflächenschutzfolien .....	131
4.2	Vorbereitung des Klebstoffs .....	131
4.2.1	Bevorraten und Lagern .....	131
4.2.2	Fördern .....	133
4.2.3	Mischen .....	138
4.2.3.1	Statisches Mischen .....	138
4.2.3.2	Statisch-dynamisches Mischen .....	145
4.2.3.3	Dynamisches Mischen .....	145
4.3	Klebstoffauftrag und Fixierung der Fügeteile .....	146
4.3.1	Dispenser-Dosiersysteme .....	147
4.3.2	Ventilformen .....	148
4.3.3	Schmelzaufbereitung und Schmelzedosierung .....	149
4.3.3.1	Schmelzaufbereitung .....	149
4.3.3.2	Schmelzedosierung .....	153
4.3.4	Elektronikverguss .....	154
4.3.4.1	Glob-Top .....	154
4.3.4.2	Dam & Fill .....	155
4.3.4.3	Underfill .....	156
4.3.5	Fixierung der Fügeteile .....	158
4.4	Abbinden / Aushärten des Klebstoffs .....	159
<b>5</b>	<b>Kleben metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe .....</b>	<b>161</b>
5.1	Allgemeine konstruktive Richtlinien .....	161
5.2	Berechnung von Klebverbindungen .....	172
5.3	Kleben unterschiedlicher Substrate .....	176
5.3.1	Kleben von Metallen .....	176
5.3.2	Kleben von Kunststoffen .....	186
5.3.3	Kleben von Glas .....	190
<b>6</b>	<b>Anwendungen der Klebtechnik .....</b>	<b>193</b>
6.1	Luft- und Raumfahrt .....	194
6.1.1	Flugzeugbau .....	194
6.1.2	Raumfahrt .....	195
6.2	Fahrzeugbau .....	195
6.2.1	Personenkraftwagen .....	196
6.2.2	Nutzfahrzeuge und Lastkraftwagen .....	202
6.2.3	Schienenfahrzeuge .....	206
6.3	Maschinen- und Anlagenbau .....	210
6.4	Elektrotechnik / Elektronik .....	211
6.5	Medizintechnik .....	211

<b>7 Prüfung und Qualitätssicherung</b> .....	215
7.1 Zerstörende Prüfverfahren für Klebungen .....	216
7.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren für Klebungen .....	225
7.3 Prüfung von Klebstoffeigenschaften .....	228
7.4 Normen, Technische Regeln, Richtlinien und Merkblätter .....	231
7.4.1 DIN 2304: Klebtechnik – Qualitätsanforderungen an Klebprozesse .....	234
7.5 Qualitätssicherung .....	237
<b>8 Kleben in Kombination mit anderen Fügeverfahren (Hybridfügen)</b> .....	241
8.1 Schrauben und Kleben .....	241
8.2 Nieten und Kleben .....	242
8.3 Clinchen und Kleben .....	243
8.4 Clipsen und Kleben .....	245
8.5 Punktschweißen und Kleben .....	245
8.6 Bördeln / Falzen und Kleben .....	246
8.7 Schrumpfen / Pressen und Kleben .....	247
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	249
<b>Formelzeichen</b> .....	253
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	255
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	267



# 1 Fertigungsverfahren, Fügeverfahren und Verbindungsarten

Die Klebtechnik stellt für viele Anwendungsfälle eine zuverlässige und wirtschaftliche Alternative zu den etablierten und traditionellen Fügeverfahren – wie beispielsweise Schweißen, Löten, Schrauben, Nieten oder Clinchen – dar.

Mithilfe eines geeigneten und auf den jeweiligen Anwendungsfall ausgelegten Klebstoffs lassen sich quasi alle technisch relevanten Konstruktionswerkstoffe (Metalle, Kunststoffe, Keramiken, Gläser, Hölzer usw.) stoffschlüssig miteinander verbinden. Dies gilt nahezu uneingeschränkt für sortenreine Klebungen von Substraten aus einer Werkstoffgruppe, also für das Kleben identischer oder zumindest artgleicher bzw. sehr ähnlicher Materialien. Viele Baugruppen für technische Produkte bestehen heutzutage jedoch aus zum Teil sehr unterschiedlichen Werkstoffen (Multi-Material-Mix). Hier müssen mitunter diverse Füge­teile mit teilweise sehr unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften, beispielsweise Metall und Kunststoff, haltbar und beständig zusammengefügt werden. Anders als beim Mischmaterialschweißen (von Metallen oder Kunststoffen) gelingen beim so genannten Mischmaterialkleben stoffschlüssige Verbindungen, auch wenn die thermischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der zu verbindenden Substrate recht stark voneinander abweichen.

Mit modernen industriellen Klebstoffen und mittels ausgereifter Klebprozesse können so langzeitig und/oder hoch beanspruchte Konstruktionen für anspruchsvolle Einsatzbedingungen realisiert werden. Die Klebtechnik bietet unter anderem die besten Voraussetzungen zur konsequenten Realisierung von belastbaren Leichtbaukonstruktionen, die im Zuge der zunehmenden Mobilität und einer nachhaltigen Ressourcenschonung in heutiger Zeit immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Um optimale Ergebnisse mit der Klebtechnik zu erreichen, benötigt der Klebstoffanwender zunächst einmal ein solides Basiswissen. Ein gewisses chemisches Grundverständnis im Hinblick auf die unterschiedlichen Klebstoffarten und deren Verfestigungsmechanismen ist nicht zuletzt für die zielgerichtete und richtige Auswahl des für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Klebstoffs unerlässlich. Darüber hinaus spielt die klebgerechte Konstruktion in Abhängigkeit der zu klebenden Substrate eine Schlüsselrolle für den erfolgreichen Einsatz der Klebtechnik. Schließlich ist auch die Kenntnis der sach- und fachgerechten Durchführung einer Klebung – unter exakter Einhaltung von allen notwendigen Arbeitsschritten – für die Qualitätssicherung zwingend erforderlich. Eine ganzheitliche Betrachtung des gesamten Klebsystems ist die Grundlage für eine erfolgreiche Klebung.

Hierzu soll das vorliegende Fachbuch dem Konstrukteur und dem Klebstoffanwender entsprechende Hilfestellungen für nachfolgende Aspekte geben und somit zur erfolgreichen Realisierung von Klebungen beitragen:

- Grundlagen des Klebens,
- Konzeption und Konstruktion einer Klebung,
- Klebstoffauswahl,
- Durchführung einer Klebung.

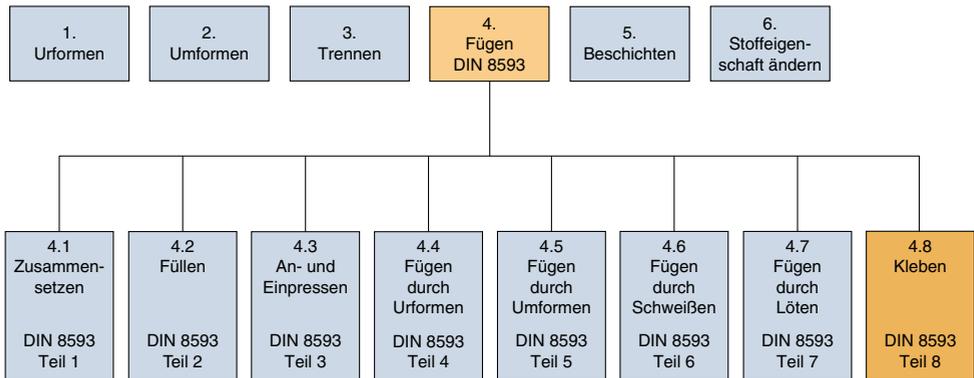
Fertigungsverfahren werden gemäß DIN 8580:2003-09 (1) in sechs Hauptgruppen eingeteilt (Bild 1.1). Eine dieser Hauptgruppen befasst sich umfassend mit dem **Fügen** als ein wesentliches Fertigungsverfahren.



### DEFINITION

Gemäß DIN 8580:2003-09 (1) wird unter Fügen das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken mit geometrisch bestimmter Form oder das Zusammenbringen von Werkstücken mit einem formlosen Stoff verstanden. Hierbei wird ein Zusammenhalt geschaffen und im Ganzen vermehrt [2].

Die DIN 8593-8:2003-09 (3) spezifiziert das Fügen in insgesamt acht getrennten Teilen (siehe Bild 1.1), wobei sich der achte Teil mit dem Thema Fügen durch Kleben beschäftigt.



**Bild 1.1** Einordnung des Klebens in die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [1] und DIN 8593 [3]

In der Verbindungstechnik werden Fügeverfahren und Verbindungsarten grundsätzlich nach ihren physikalischen Wirkprinzipien Kraftschluss (Reibschluss), Formschluss und Stoffschluss unterschieden. In Tabelle 1.1 sind diese Wirkmechanismen mit ausgewählten Beispielen sowie den jeweiligen Eigenschaften der Verbindung gegenübergestellt.

**Tabelle 1.1** Verbindungsarten

Physikalisches Wirkprinzip	Beispiele	Eigenschaft der Verbindung
Kraftschluss (Reibschluss)	Schrauben (mit Drehmomentbelastung), Schrumpfen, Klemmen, Knoten, Nageln, ...	in der Regel lösbar
Formschluss	Schrauben (ohne Drehmomentbelastung), Nieten, Nähen, Ta-ckern, Heften, Bördeln / Falzen, Schwalbenschwanz, Nut-Feder, Passfeder, ...	(bedingt) lösbar oder unlösbar
Stoffschluss	Vulkanisieren, Löten, Schweißen, Kleben, ...	in der Regel unlösbar

Das Kleben ist demzufolge den stoffschlüssigen Verbindungsarten hinzuzurechnen. Bei den meisten Klebungen werden üblicherweise (dauerhaft) unlösbare Verbindungen angestrebt. Es gibt allerdings auch Anwendungsfälle, bei denen eine gezielte und rückstandslose Lösbarkeit der Klebung zu einem bestimmten Zeitpunkt durchaus gewünscht ist, zum Beispiel bei Haftnotizzetteln. Ein weiteres allgemeines Beispiel sind Anwendungsfälle, bei denen defekte

Einzelteile oder Baugruppen möglichst problemlos reparaturbedingt ausgetauscht werden sollen.

In Tabelle 1.2 sind die wichtigsten Kennzeichen der Verbindung für ausgewählte kraft-, form- und stoffschlüssige Verbindungsarten qualitativ einander gegenübergestellt.

**Tabelle 1.2** *Eigenschaftsmerkmale verschiedener Fügeverfahren [4]*

Kennzeichen der Verbindung	Art des Fügeverfahrens						
	kraftschlüssig			formschlüssig	stoffschlüssig		
	Nieten	Schrauben	Schrumpfen	Bördeln	Schweißen	Löten	Kleben
Werkstoffkombinationsmöglichkeiten	++	++	+	+	--/–	–/+	++
konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten	–	○	--	–	++	++	++
Oberflächenvorbereitungsaufwand	+	+	+	+	○/+	○	○
Wärmebeeinflussung der Füge­teile	++	++	○/–	++	--	–/○	++
Aussehen der Fügefläche/-naht	–	--	□	+	○/+	+	++
Korrosionsbeständigkeit	□	□	□	□	+	○	++
Lösbarkeit der Verbindung	+	+	–	--	--	○	+/○
thermische Beständigkeit	+	++	○	+	++	○/+	○
mechanische Festigkeit	○	○	○/++	–	++	○/+	○/+
Verhalten bei statischer Last	+	+	++	+	++	++	○
Verhalten bei dynamischer Last	--	–	+	–	+	+	++
zerstörungsfreie Prüfbarkeit	++	++	□	+	○/+	○	–

++ : sehr gut / sehr hoch    + : gut / hoch    ○ : mittel    – : schlecht / gering    -- : sehr schlecht / sehr gering  
□ : keine Aussage möglich

Wie aus Tabelle 1.2 ersichtlich ist, kann die Klebtechnik im Vergleich zu anderen Fügeverfahren in vielen Kategorien ihre Stärken ausspielen. Neben den vielfältigen Werkstoffkombinationsmöglichkeiten, den konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten und der in der Regel ausbleibenden Wärmebeeinflussung der Füge­teile sind unter anderem das unauffällige (teilweise sogar unsichtbare) Aussehen der Fügenähte, die exzellente Korrosionsbeständigkeit sowie das positive Verhalten bei dynamischer Belastung bei anderen Fügeverfahren nicht im gleichen Maße oder nur mit zusätzlichem Aufwand erreichbar. Eher nachteilig bei Klebungen sind die meist obligatorische Oberflächenvorbereitung, die im Allgemeinen schlechte thermische Beständigkeit sowie das schlechtere Verhalten bei statischer Belastung. Eine große Herausforderung bei der Klebtechnik bleibt die zerstörungsfreie Prüfbarkeit von Klebungen. Nur zerstörende Prüfungen führen in der Klebtechnik zu konkreten Festigkeitswerten und somit zu quantifizierbaren Qualitätsattributen.

## 1.1 Kleben und Dichten

Kleben ist zweifelsohne eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts [5]. Es existiert praktisch kein Wirtschafts- oder Industriebereich, in dem auf die Kleb- und/oder Dichtungstechnik gänzlich verzichtet wird.

Kleb- und Dichtstoffe werden häufig gemeinsam thematisiert, obwohl sie sehr unterschiedliche Hauptzwecke verfolgen. Beim Kleben geht es in erster Linie um Kraftübertragung und beim Dichten primär um Abdichten gegenüber Fluiden oder Festkörpern. Jeder Klebstoff kann, wenn er richtig appliziert wurde, auch abdichten und jeder Dichtstoff kann bis zu einem gewissen Grad auch kleben [6].

Im Allgemeinen sind Klebungen sehr viel einfacher auszuführen als Dichtungen. Eine nicht umlaufend und somit nicht dichtend ausgeführte Klebung kann dennoch für die jeweilige Klebanwendung ausreichend hohe Klebkräfte entfalten. Besitzt hingegen eine Dichtraupe eine einzige ungewollte Unterbrechung (eine nahezu beliebig kleine Fehlstelle), kann damit schon der eigentlichen Hauptzweck «Dichten» nicht mehr erfüllt werden.

Die deutsche Kleb- und Dichtstoffindustrie gilt weltweit als Technologieführer. Mit einem Marktanteil von etwa 16% ist sie Weltmarktführer und mit einem Klebstoffverbrauch von 27% und einem Klebstoffproduktionsanteil von mehr als 36% behauptet die deutsche Kleb- und Dichtstoffindustrie auch deutlich den Spitzenplatz in Europa [7].

**Tabelle 1.3** Produktion von Kleb- und Dichtstoffsystemen in Deutschland (2015) [8]

Klebstoffe (1000 t)	820
Dichtstoffe (1000 t)	171
zementäre Bauklebstoffe (1000 t)	402
Gesamtproduktion (1000 t)	1393
Klebebänder (Mio. m <sup>2</sup> )	1034

Da der Fokus des vorliegenden Buches auf konstruktiven Klebstoffen und konstruktiven Klebungen liegt, werden Dichtstoffe im Folgenden nur noch am Rande bzw. in Abgrenzung zu den Klebstoffen thematisiert.

## 1.2 Chronik des Klebens

Die Geschichte des Klebens beginnt bereits in der frühesten Epoche der Menschheitsgeschichte – der Steinzeit. Bis zum Beginn des Zeitalters der Klebstoffe auf Basis synthetisch hergestellter Rohstoffe im Jahr 1909 hatten Klebstoffe eine natürliche Rohstoffbasis (zum Beispiel Birkenpech, Harz, Blut, Eiweiß / Glutin, Kasein, Zucker, Stärke, ...). Heutzutage ist das Polyvinylacetat (PVAC) der für die Klebstoffherstellung meist verwendete synthetische Rohstoff [9; 10].

In Tabelle 1.4 sind die wesentlichen Meilensteine der Geschichte des Klebens chronologisch aufgeführt.

**Tabelle 1.4** Chronik des Klebens [9; 10]

jüngere Steinzeit (ca. 8000 v. Chr.)	Birkenpech/-harz (erster Klebstoff der Menschheitsgeschichte) dient Neanderthalern und steinzeitlichen Homo sapiens bei der Waffen- und Werkzeugherstellung.
um 4000 v. Chr.	Mesopotamier verwenden Asphalt für den Tempelbau.
um 3000 v. Chr.	Sumerer kochen aus Tierhäuten eine Art Glutleinim aus, den sie für den Haus- und Tempelbau sowie zur Herstellung von festem Straßenbelag nutzen. Weitere Klebstoffe in der Bauwirtschaft sind tierisches Blut und Eiweiß.
um 1600 v. Chr.	Mesoamerikanische Mayas mischen Latex mit pflanzlichen Erzeugnissen und verarbeiten diese Mischungen so zu prähistorischen Kautschukprodukten für unterschiedliche Verwendungszwecke [11; 12].
um 1500 v. Chr.	Ägypter verwenden tierische Leime für Furnierarbeiten, z.B. für Grabtafeln.
um 500 v. Chr.	Casein wird als Bindemittel für Pigmente benutzt.
um 1400	Azteken nutzen die Klebewirkung des Blutes und mischen Tierblut unter Zement für den Bau von Tempelbögen.
um 1500	Mit der Erfindung des Buchdrucks wächst die Bedeutung von Klebstoff.
1690	Eröffnung der ersten handwerklichen Leimfabrik in den Niederlanden
um 1830	Naturkautschuk ist ein üblicher Kleberohstoff.
1839	Entdeckung der Vulkanisation (Umsetzung von Naturkautschuk mit Schwefel) durch CHARLES GOODYEAR
1888	Entwicklung des ersten gebrauchsfertigen Tapetenkleisters
um 1909	Beginn des Zeitalters der Klebstoffe auf Basis synthetisch hergestellter Rohstoffe; Patentanmeldung zur Phenolharz-Härtung (LEO BAEKELAND)
1914	Patentierung des Polyvinylacetats (bis heute für die Klebstoffherstellung meist verwendeter synthetischer Rohstoff)
1923	Henkel verkauft erstmals einem benachbarten Unternehmen einen Klebstoff.
1932	Entwicklung des ersten gebrauchsfertigen, glasklaren Kunstharz-Klebstoffs: UHU
1935	Entwicklung des transparenten «Beiersdorf Kautschuk Klebefilms»: tesa (ab 1940)
1953	Erfindung eines anaeroben Klebstoffs: Loctite (ab 1956)
1956	Markteinführung des ersten Pattex-Produkts (Kontaktklebstoff)
1958	Entwicklung des ersten Sekundenklebstoffs auf Basis von Cyanacrylat
1960	Beginn der industriellen Produktion von Klebstoffen für die Metall- und Kunststoffbearbeitung
1969	Markteinführung des ersten Klebestifts: Pritt
1980	Beginn des Siegeszugs der «Post-it»-Haftnotizzettel
1997	Henkel übernimmt Loctite (Weltmarktführer für Konstruktionsklebstoffe)
2008	Über 1500 Unternehmen stellen weltweit ca. 30 000 verschiedene Klebstoffe her.

### 1.2.1 Kleben – Vorbild Natur

In der Natur gibt es in Fauna und Flora unzählige Beispiele für effektives Kleben. Viele Tiere und Pflanzen setzen

- zum Nestbau,
- zum Beutefang,
- zur Sicherung der Fortpflanzung und
- zur Ersten Hilfe

Kleb- und Baustoffe ein, die mit unseren modernen synthetischen Stoffen eng verwandt sind (Tabelle 1.5).

**Tabelle 1.5** Kleben – Vorbilder aus der Natur [10; 13]

Tier-/Pflanzenart	Beispiele	Pendant / Ähnlichkeit
Termiten	Turmbau mit Hilfe von Erde, Holz und zerkautem Pflanzenmaterial sowie Speichel	Beton
Florfliegen	Eier auf Blattunterseiten von Pflanzen kleben	Sekundenklebstoff
Bienen	Bienenwachs = langkettige Makromoleküle	Schmelzklebstoffe
(Feld-)Wespen	Nestbau aus mit den Mundwerkzeugen mechanisch zerkleinerten, eingespeichelten und verdauten Zellulosefasern aus Holz usw.	Tapetenkleister
Schwalben	Nestbau in Dachüberhängen an senkrechten Hauswänden mit Hilfe von Erde, Lehm und Speichel	Mörtel
Kleiber	Verkleinerung der Eingangslöcher verlassener Spelthöhlen mit Hilfe von Lehm und Speichel	Mörtel
Geckos	Problemloses Erklimmen von glatten (senkrechten) Glaswänden des Terrariums	Van-der-Waals-Kräfte (Anziehung aufgrund elektrischer Ladungsunterschiede)
Sonnentau (Drosera; fleischfressende Pflanze)	Insektenfang mit Hilfe von kleinen klebrigen Tröpfchen aus Klebdrüsen an den Blattoberflächen	Haftklebstoff
Vogelfängerbaum (Heim-erliodendron brunonianum)	Ausscheiden eines süßen, klebrigen Safts aus Früchten, der Vögel anlockt und Samen temporär im Gefieder der Vögel festklebt → Sicherung der Fortpflanzung	Latexsaft
bestimmte Muscheln (z.B. Miesmuscheln) und Krebsarten (z.B. Seepocken, Entenmuscheln, ...)	Festsetzen an Felsen oder Schiffrümpfen (sogenanntes «Fouling»)	Dispersionsklebstoffe

Bild 1.2 zeigt eine Wespe auf den Brutwaben eines entstehenden Wespennests. Das Anfangsnest der Wespe besteht in der Regel aus nur etwa 7 bis 20 Brutwaben. Diese kugelförmige Nesthülle wird meist an dunklen Stellen bzw. Hohlräumen kopfüber angeheftet. Später übernehmen Arbeiterinnen den weiteren Aufbau des Nests [14].



**Bild 1.2** Brutwaben eines Wespenests

## 1.2.2 Kleben – Begriffe und Definitionen

Um im Nachfolgenden Kommunikations- und Verständnisprobleme zu vermeiden, ist eine durchgängige und einheitliche Terminologie unerlässlich. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle zunächst einmal die ersten wichtigen Begriffe zum Thema Kleben [15] vorgestellt und definiert.

### DEFINITIONEN

Das **Kleben** ist das (flächige) Verbinden gleicher oder verschiedenartiger Materialien mit Hilfe der Klebstoffschicht, die an den Oberflächen der zu verbindenden Fügeteile (Substrate) haftet.

Ein **Klebstoff** ist gemäß DIN EN 923:2016-03 (16) ein nichtmetallischer Stoff, der Fügeteile (Substrate) durch Adhäsion (Flächenhaftung) und Kohäsion (innere Festigkeit) verbinden kann.

Ein **Fügeteil** bzw. ein **Substrat** ist ein Körper, der an einen anderen Körper geklebt werden soll oder geklebt ist.

Die **Adhäsion** (siehe auch Abschnitt 2.1.3.1) bezeichnet die Flächenhaftung, die an der Oberfläche der klebstoff- und fügeteilseitigen Grenzschicht infolge von (allgemeinen) Anziehungskräften wirksam wird. Zusammen mit der Kohäsion bestimmt die Adhäsion die Festigkeit der Klebung.

Die **Kohäsion** (siehe auch Abschnitt 2.1.3.2) bezeichnet die innere Festigkeit des abge bundenen Klebstoffs. Zusammen mit der Adhäsion bestimmt die Kohäsion die Festigkeit der Klebung.

Das **Abbinden** bzw. **Aushärten** ist das physikalische bzw. chemische Verfestigen der in der Regel beim Klebstoffauftrag flüssigen bis pastösen Klebschicht.

Die **Abbindezeit** bzw. **Aushärtezeit** ist die Zeitspanne, innerhalb der der Klebstoff nach dem Zusammenbringen der Fügeteile (Substrate) eine für die bestimmungsgemäße Beanspruchung erforderliche Festigkeit erreicht hat bzw. bis ein gewisser Reaktionsfortschritt erfolgt ist.

Eine **Klebung** (früherer Sprachgebrauch: Klebverbindung) ist eine mit einem Klebstoff hergestellte Verbindung von Fügeteilen (Substraten).

Die **Klebfläche** ist die zu klebende oder die bereits geklebte Fläche eines Fügeteils (Substrats) bzw. einer Klebung.

Die **Klebfuge** ist der Zwischenraum zwischen zwei Klebflächen, der durch eine Klebschicht ausgefüllt ist. Bei den im konstruktiven Bereich üblichen Dünnschichtklebungen beträgt die Dicke der Klebfugen typischerweise lediglich 0,1 bis 0,3 mm. Beim elastischen Dickschichtkleben sind hingegen Klebfugendicken von mehreren Millimetern bis hin zu sogar 10 bis 20 mm durchaus üblich.

Die **Klebschicht** ist entweder die nach der Klebstoffapplikation noch nicht abgebundene Klebstoffschicht oder die abgebundene Klebstoffschicht zwischen den Fügeteilen (Substraten).

**Kleber** ist ein umgangssprachliches Wort für Klebstoff. In Analogie zum Schweißer, der eine Verschweißung ausführt, ist der Kleber somit vielmehr die Person, die eine Klebung vornimmt, als der Klebstoff an sich.

### 1.2.3 Vor- und Nachteile des Klebens

Das Kleben bietet gegenüber klassischen Fügeverfahren zahlreiche Vorzüge. Teilweise ergeben sich mit der Anwendung der Klebtechnik überhaupt erst Möglichkeiten zum Fügen von Substraten, die sonst gar nicht sinnvoll zu verbinden sind.

Ein wesentlicher Vorteil des Klebens ist die Möglichkeit, höchst unterschiedliche Fügeteile sehr materialschonend und – wenn gewünscht – auch langzeitbeständig miteinander zu verbinden. Während beispielsweise beim Schweißen in der Regel nur gleiche oder zumindest sehr ähnliche Materialien (Stahl–Stahl, Aluminium–Aluminium, ...) stoffschlüssig miteinander gefügt werden können, eröffnet die Klebtechnik nun auch Verbindungsmöglichkeiten für nahezu beliebige Mischmaterialkombinationen. Metalle, Kunststoffe, Verbundwerkstoffe (zum Beispiel glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK), oder kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), Keramiken, Gläser, Hölzer, ... können sowohl innerhalb ihrer Werkstoffgruppe als auch werkstoffgruppenübergreifend mittels Kleben gefügt werden.

Für nicht schmelzbare Kunststoffe, die sich aufgrund ihrer vernetzten chemischen Struktur überhaupt nicht schweißen lassen (Elastomere und Duroplaste), bietet das Kleben somit eine interessante Verbindungsmöglichkeit.

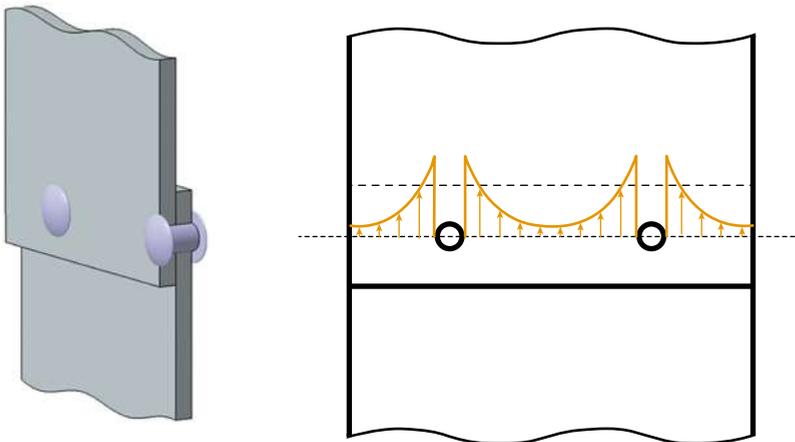
Auch sehr dünne Substrate (zum Beispiel Folien) und/oder extrem spröde Fügeteile (zum Beispiel Gläser) lassen sich klebtechnisch zuverlässig verbinden. Selbiges gilt für wärmeempfindliche Substrate, da viele Klebstoffe bei Raum- bzw. Umgebungstemperatur «kalt» verfestigen. Selbst warmhärtende Klebstoffe erfordern für die Aushärtung in der Regel nur sehr moderate Temperaturen (ca. 60...180 °C), die für den Großteil von allen denkbaren Substraten keine besondere Belastung darstellen.

Des Weiteren lassen sich Werkstoffe bzw. Metalle unterschiedlicher elektrochemischer Eigenschaften ohne Gefahr der Kontaktkorrosion problemlos fügen (siehe auch Abschnitt 6.2.1).

Ein weiterer bedeutsamer Vorteil der Klebtechnik ist die Möglichkeit zur (nahezu) «unsichtbaren» Verbindung, insbesondere bei transparenten Substraten, wie beispielsweise Acryl- oder Quarzglas. Während herkömmliche Fügeelemente (Nägel, Schrauben, Nieten, ...) nur in nicht-transparenten Fügeteilen weitestgehend versteckt werden können, bleiben beim Kleben hier im Hinblick auf Ästhetik, Design und Funktion keine Wünsche offen.

Neben den optischen Eigenschaften spielen auch die Kraft- und Spannungsverteilungen innerhalb der Fügezone bzw. in der Fügeverbindung eine wichtige Rolle. Im Sinne einer möglichst spannungsarmen und verzugsfreien Fügeverbindung soll in einem Verbund eine bestenfalls gleichmäßige Kraft- und Spannungsverteilung angestrebt werden.

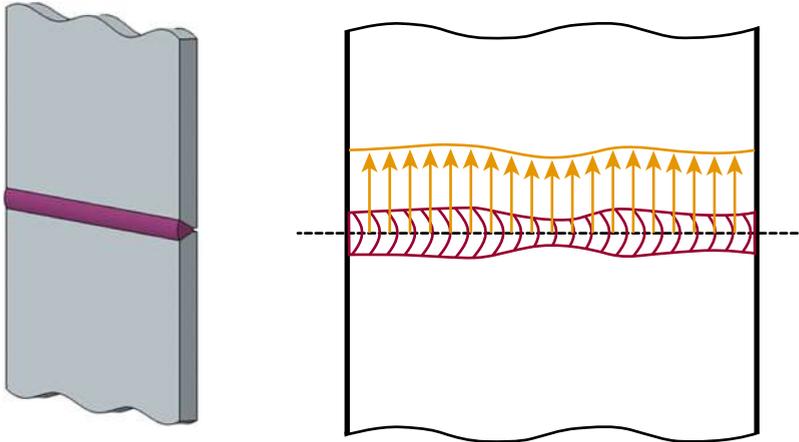
Bild 1.3 (links) zeigt exemplarisch eine Nietverbindung. Für Schraubverbindungen gelten die nachfolgenden Aussagen analog. Ein derartiger punktförmiger Teileverbund benötigt eine bestimmte Anzahl an Durchgangslöchern zum anschließenden Einbringen der Niete bzw. Schrauben. Es existieren zwar auch im Bereich Schrauben und Niete Verbindungsmethoden, die auf Vorlöcher komplett verzichten, zum Beispiel loch- und gewindeschneidende FDS (**Flow Drill Screws**) oder Stanz- und Blindniete ohne Vorlöcher, aber als Endresultat befinden sich doch Löcher in den Fügeteilen. Wie im rechten Teil von Bild 1.3 zu erkennen ist, ergeben sich bei mechanischer Belastung des Verbunds an den Bohrungsändern ausgeprägte lokale Spannungsspitzen, während die Spannungen genau zwischen zwei Bohrungen ein lokales Minimum annehmen. Insgesamt ergibt sich also ein ungleichmäßiger, parabelförmiger Spannungsverlauf zwischen zwei Bohrungen. Kommt es zu einer unzulässig hohen mechanischen Belastung dieses Verbunds, sind eine Rissentstehung und Rissausbreitung an den Bohrungsändern im Bereich der größten Spannungsspitzen sehr wahrscheinlich. Eine Materialaufdickung ist als Gegenmaßnahme zwar denkbar, für die konsequente Umsetzung des Leichtbaugedankens jedoch nicht zielführend. Zudem macht sich der relativ hohe Bearbeitungsaufwand bei der Herstellung der Durchgangslöcher im Zuge der Vorbereitung der Füge Teile negativ bemerkbar. Werden zudem zu viele Bohrungen zu dicht nebeneinandergesetzt, kommt dies einer Perforation und somit einer signifikanten Schwächung der Substrate gleich.



**Bild 1.3** Spannungsverteilung in einer mechanischen Verbindung [Quelle: CHRISTOPH HALLER in Anlehnung an 4; 15]

Eine deutliche Verbesserung der Situation im Hinblick auf die Kraft- bzw. Spannungsverteilung ergibt sich, wenn anstelle des mechanischen punktförmigen Teileverbunds ein thermischer Verbund in Form einer Schweiß- oder Lötverbindung gewählt wird. In Bild 1.4 (links) ist beispielhaft eine Schweißverbindung dargestellt. Einschränkungen ergeben sich hier automatisch aufgrund der Tatsache, dass sich ausschließlich identische oder zumindest (sehr) ähnliche Werkstoffe miteinander verschweißen lassen. Die Gleichmäßigkeit der Kraft- bzw. Spannungsverteilung steht und fällt al-

lerdings mit der Gleichmäßigkeit der Schweißnahtausführung. Speziell bei händisch ausgeführten Schweißnähten sind gewisse Ungleichmäßigkeiten kaum zu vermeiden. Häufig treten während Schweiß- oder Lötvorgängen lokal sehr hohe Temperaturen auf, was zu Gefüge- und somit auch zu maßlichen Veränderungen führen kann. Hinzu kommen thermisch bedingte Eigenspannungen und Verzug, was auch heutzutage beim Schweißen im Wesentlichen unabwendbar ist.



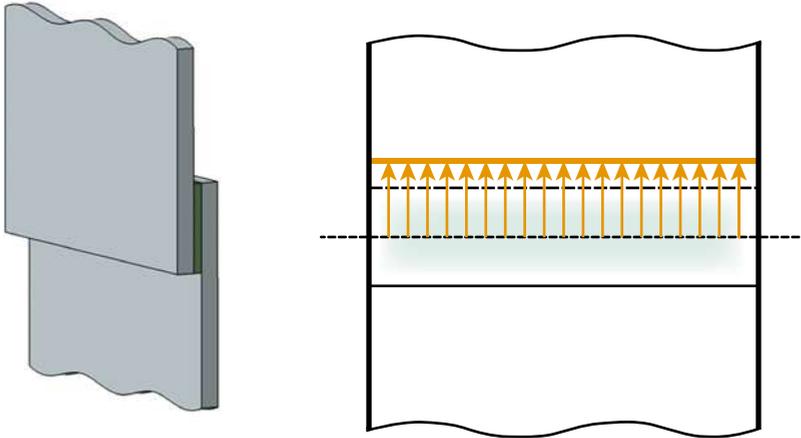
**Bild 1.4** Spannungsverteilung in einer thermischen Verbindung [Quelle: CHRISTOPH HALLER in Anlehnung an 4; 15]

Die in Bild 1.5 gezeigte Überlappungsklebung stellt einen Flächenverbund dar, bei dem die Füge Teileigenschaften optimal ausgenutzt werden. Bei einem richtig konstruierten Flächenverbund verteilt sich die angreifende Last gleichmäßig über eine Fläche und verhindert damit örtliche Überlastungen der Füge Teile. Unter der Voraussetzung einer gleichmäßig dicken Klebfuge ermöglicht der Flächenverbund somit bei klebgerechter Belastung der Klebung eine flächige Kraftübertragung sowie eine absolut gleichmäßige Spannungsverteilung ohne lokale Spannungsspitzen. Wie die konstante Klebfugendicke sichergestellt werden kann, wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert. Die klebgerechten Belastungsarten von Klebungen werden später in Abschnitt 5.1 detailliert behandelt.

Eine gleichmäßige und definierte Klebfugendicke (bei strukturellen Klebungen in der Regel ca. 0,1...0,3 mm) lässt sich folgendermaßen realisieren:

- Anbringen definierter Erhöhungen an den Substraten im Bereich der Klebfuge,
- Einlegen von Drähten mit definiertem Durchmesser als Abstandshalter in die Klebfuge,
- Verwendung von Klebstoffen mit kugelförmigen Füllstoffen mit definiertem Durchmesser als Abstandshalter.

Das Anbringen definierter Erhöhungen an den Füge teilen kann unmittelbar mit der Herstellung der Substrate erfolgen. Bei spritzgegossenen Füge teilen können in den Formteilkavitäten beispielsweise definierte Vertiefungen eingebracht werden, so dass an den gewünschten Stellen der Substrate – im Bereich der späteren Klebfugen – passende Erhöhungen direkt bei der Formgebung mit Kunststoff ausgespritzt und so definiert abgeformt werden. Das Modifizieren von Kavitäten ist in der Regel jedoch nur für eine spätere Serien- bzw. Massenproduktion sinnvoll.



**Bild 1.5** Gleichmäßige Spannungsverteilung in einer chemischen Verbindung [Quelle: CHRISTOPH HALLER in Anlehnung an 4; 15]

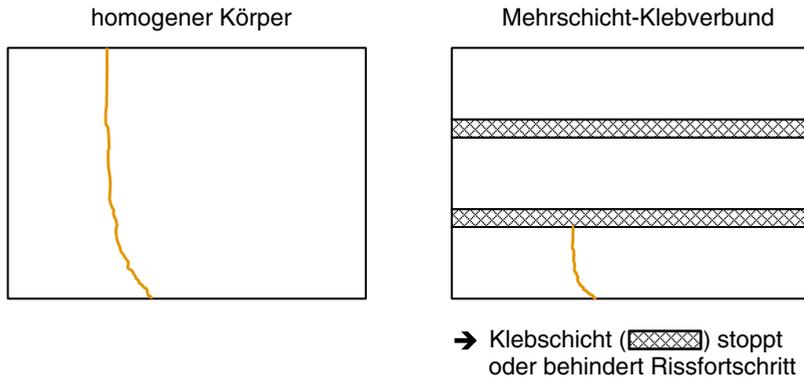
Sollen Klebfugen optional in unterschiedlich definierten Dicken oder nur für kleine Losgrößen (ggf. auch Losgröße Eins) realisiert werden, so bietet sich das Einlegen von dünnen Drähten mit definiertem Durchmesser (zum Beispiel 100  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$  oder 300  $\mu\text{m}$ ) als Abstandhalter in der Klebfuge an. Wie empirische Untersuchungen [17] gezeigt haben, sollen Drähte vorzugsweise mit ihrer Längsmittelachse in Belastungsrichtung und nicht quer dazu in der Klebfuge positioniert werden. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn im Belastungsfall gewisse Schäl- und Biegebeanspruchungen in der Klebfuge (vgl. Abschnitt 5.1) später unvermeidbar sind.

Sind bereits kugelförmige Füllstoffe, zum Beispiel Glaskugeln, als Abstandhalter in dem flüssigen Klebstoff enthalten, so braucht der Anwender keine weiteren Vorkehrungen zum Erzeugen einer gleichmäßigen Dicke der Klebfuge mehr treffen. Die genaue Abstimmung von Füllstoffdimensionen auf die für den jeweiligen Klebstoff optimale Klebfugendicke obliegt hier allein dem Klebstoffhersteller.

Zwar müssen die Fügeflächen für Klebungen zum Teil aufwendig vorbereitet werden, es entfällt allerdings die Notwendigkeit, Durchgangslöcher für Nieten oder Schrauben herzustellen. Somit kommt es zu keiner Materialverletzung durch Löcher. Darüber hinaus kommt die Klebung im Vergleich zur mechanischen Verbindung mit einer geringeren Anzahl erforderlicher Bauteile aus, da Nieten, Schrauben, Stifte usw. hier überflüssig werden. Ein positiver Nebeneffekt ist die zusätzliche Gewichts- und Energieersparnis, die das Kleben insbesondere für Leichtbaukonstruktionen interessant macht.

Beim Kleben treten aufgrund der relativ niedrigen Verarbeitungstemperaturen in der Regel keine thermischen Gefügebeeinflussungen und auch kein thermisch bedingter Fügeteilverzug auf. Somit kommt es nicht zu ungewünschten Gefüge- und Maßveränderungen oder gar zu Werkstoffschädigungen.

Insbesondere Dickschichtklebungen tragen darüber hinaus zu einer hohen dynamischen Festigkeit sowie einer hohen Schwingungsdämpfung bei. Klebschichten in einem Mehrschicht-Kleverbund können außerdem einen unerwünschten Rissfortschritt stoppen oder effektiv behindern (siehe Bild 1.6 rechts).



**Bild 1.6** Rissausbreitung in unterschiedlichen Körpern bzw. Verbunden [4; 15]

Generell können Klebstoffe, neben der eigentlichen Hauptaufgabe «Fügen von Bauteilen», oftmals wichtige Zusatzfunktionen erfüllen:

- Toleranzausgleich,
- Dichtfunktion,
- Korrosionsschutz,
- Isolierung gegen Wärme,
- Isolierung gegen Elektrizität,
- gezielte Kontaktierung von elektronischen Bauelementen,
- Schwingungsdämpfung,
- Geräuschkämpfung,
- ...

Kleben in Kombination mit konventionellen Fügemethoden, wie beispielsweise Nieten, Clinchen, Schrauben, Bördeln / Falzen, Punktschweißen usw. (sogenanntes *redundantes Fügen*; siehe Kapitel 8), führt zudem häufig zu einer Festigkeitserhöhung sowie einer redundanten Sicherheit.

Den zahlreichen und vielfältigen Vorteilen von Klebungen stehen natürlich auch gewisse Nachteile entgegen.

Wie bereits weiter oben erwähnt, ist die Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile für das Kleben zum Teil recht aufwendig. Dies gilt im besonderen Maße für *niederenergetische Kunststoffoberflächen* (siehe Abschnitt 2.1.1 und Kapitel 5).

Des Weiteren sind die vorgegebenen Prozessparameter (zum Beispiel definierte Verarbeitungs-, Applikations- und Aushärtebedingungen, ...) in der Regel genauestens einzuhalten, um qualitativ hochwertige und reproduzierbare Klebungen zu erreichen.

Bei einigen Klebstoffen macht sich der Einfluss der Zeit auf den Verfahrensablauf nachteilig bemerkbar. So erfordern beispielsweise Dispersionsklebstoffe oder wärmehärtende Reaktionsklebstoffsysteme zum Teil recht lange Aushärtezeiten, die oftmals bis zu 24, 48 oder 72 Stunden betragen können. Diese Einschränkung gilt allerdings nicht allgemein für alle Klebstoffsysteme. UV-Licht-härtende Klebstoffe oder Cyanacrylate (Sekundenklebstoffe) erreichen Handling- oder Endfestigkeit bereits nach wenigen / einigen Sekunden, bei extrem reaktiven Klebstoffen sogar schon nach Sekundenbruchteilen.

Kunststoffe und verfestigte technische Klebstoffe unterscheiden sich von den chemischen Strukturen nicht oder nur unwesentlich. Insofern zeigen Kunststoffe und Klebstoffe hinsichtlich ihrer Eigenschaftsprofile viele Gemeinsamkeiten, wie beispielsweise eine begrenzte thermische Belastbarkeit bzw. Formbeständigkeit, Kriechneigung (Retardation), Alterungsabhängigkeit (durch Witterung und/oder andere Umgebungseinflüsse), ...

Speziell bei mechanischer Belastung von Klebungen ist darauf zu achten, Schäl- und Spaltkräfte in der Klebfuge auf ein Minimum zu reduzieren oder besser gänzlich zu vermeiden. Dieses Ziel lässt sich unter anderem durch geschickte und klebgerechte Konstruktion der Baugruppen erreichen (siehe Kapitel 5).

Als weitere Nachteile im Zusammenhang mit Klebungen sind die gelegentlich begrenzten Reparaturmöglichkeiten und zum Teil aufwendige Kontrollverfahren zur Prüfung und Qualitätssicherung (siehe Kapitel 7) zu nennen.

Zudem ist der Nachweis der Gebrauchssicherheit einer Klebung im Vergleich zu dem Nachweis bei alternativen Fügeverfahren oftmals deutlich aufwendiger und schwieriger. Die Auslegung und Berechnung von Schraubverbindungen gelingen seit mehr als zwei Jahrzehnten sehr zuverlässig gemäß VDI-Richtlinie 2230 «Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen» [18]. Es ist allerdings absolut notwendig, im Bereich der Klebtechnik genau einen solchen Nachweis zu führen, um nicht zuletzt beim Anwender das erforderliche Vertrauen und die nötige Akzeptanz für die Klebtechnik zu schaffen. Dies gilt insbesondere dann, wenn bislang auf alternative Fügetechniken gesetzt wurde und die Klebtechnik erst als neues Feld erschlossen werden soll. In diesem Zusammenhang gewinnt die neue Verarbeitungs- bzw. Anwendernorm, die DIN 2304-1 [19], zunehmend an Bedeutung. Auf diese neue Norm wird in Abschnitt 7.4.1 noch ausführlich eingegangen.

Zusammenfassend sind die technischen und wirtschaftlichen Vor- und Nachteile von Klebungen in der nachfolgenden Tabelle 1.6 noch einmal übersichtlich gegenübergestellt.

**Tabelle 1.6** Vor- und Nachteile des Klebens

Vorteile	Nachteile
materialschonende und langzeitbeständige Verbindungsmöglichkeiten für vielfältige Mischmaterialkombinationen, sehr dünne Fügeteile, wärmeempfindliche Substrate sowie Werkstoffe unterschiedlicher elektrochemischer Eigenschaften	häufig aufwendige Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile
«unsichtbare» Verbindungsmöglichkeit	genaue Einhaltung der Prozessparameter
gleichmäßige Spannungsverteilung	zum Teil lange Aushärtezeiten
keine oder nur geringe thermische Gefügebeeinflussungen	begrenzte thermische Belastbarkeit bzw. Formbeständigkeit
kein thermisch bedingter Bauteilverzug	Kriechneigung des Klebstoffs
Gewichts- und Energieeinsparungen	Alterungsabhängigkeit der Klebschicht
hohe dynamische Festigkeit	geringe Schäl-/Spaltfestigkeit
hohe Schwingungsdämpfung	begrenzte Reparaturmöglichkeiten
Zusatzfunktionen: Toleranzausgleich, thermische / elektrische Isolierung, Korrosionsschutz, Dichtfunktion, Kontaktierung, Schwingungsdämpfung, Geräuschdämpfung, ...	komplizierte Festigkeitsberechnung
Festigkeitserhöhung durch redundantes Fügen	aufwendige Kontrollverfahren



## 2 Grundlagen des Klebens

### 2.1 Voraussetzungen für das Kleben

Um gewünschte Klebresultate erzielen zu können, ist eine Vielzahl von Einflussfaktoren zu berücksichtigen (Bild 2.1).



**Bild 2.1** Einflussfaktoren auf die Qualität bzw. Festigkeit einer Klebung

Erwartungsgemäß hat der Klebstoff einen signifikanten Einfluss auf die Qualität bzw. Festigkeit einer Klebung. Zunächst einmal müssen die optimale Klebstoffart (Abschnitt 3.3) und aus dieser Gruppe der ideale Klebstofftyp für eine Klebaufgabe ausgewählt werden, was alleine aufgrund der etwa 30 000 am Markt erhältlichen Klebstoffe eine Herausforderung für sich darstellt.

Im Hinblick auf den oder die Fügeartikelwerkstoffe hat die Qualität der Klebflächen für die Klebung herausragende Bedeutung.

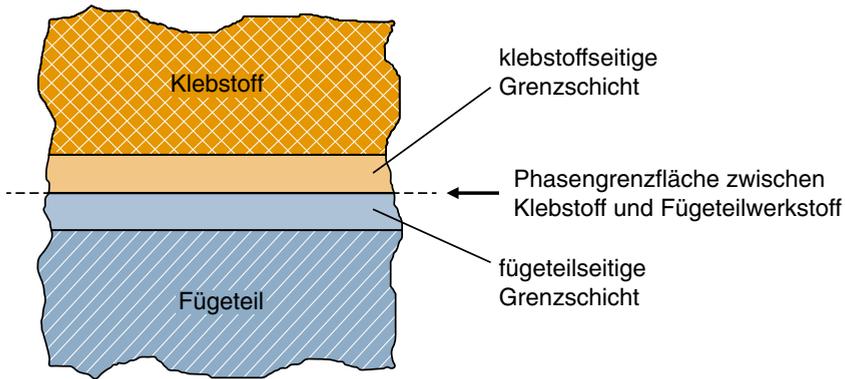
#### MERKSATZ

Klebstoffe haften allgemein auf Oberflächen!



Somit ist es prinzipiell nicht ausschlaggebend, welche Materialien miteinander verklebt werden sollen, sondern vielmehr, wie die Klebflächen in Bezug auf Qualität, Rauigkeit, Oberflächenenergie usw. beschaffen sind. Bild 2.2 zeigt den schematischen Aufbau einer Klebung.

Für eine Verbindung entscheidend sind die klebstoff- und fügeteilseitigen Grenzschichten, die mitunter nur eine oder wenige Moleküllagen dick sind, sowie die Phasengrenzfläche zwischen dem Klebstoff und dem Fügeartikelwerkstoff. Insbesondere bei nicht durchlässigen oder nicht saugfähigen Fügeteilen ist es einleuchtend, dass tieferliegende Substratschichten keinen maßgeblichen Einfluss auf die Klebung haben können.



**Bild 2.2** Schematischer Aufbau einer Klebung [Quelle: CHRISTOPH HALLER in Anlehnung an 15]

Ein Paradebeispiel für Haftung auf vermeintlich «schwierigen» Oberflächen findet sich in der Natur: Miesmuscheln sind beispielsweise in der Lage, sich selbst an sehr glatten Oberflächen zu halten. Mit Hilfe ihres extrem starken biologischen «Muschel-Klebstoffs» aus Eiweißen und Proteinen sowie ihren so genannten Byssusfäden erreichen Miesmuscheln sogar auf PTFE-Oberflächen (Teflon) einen extrem guten Halt [20]. Teflon ist nicht zuletzt als ideale Antihafbeschichtung bekannt, was zunächst einmal im Widerspruch zur Klebbarkeit steht. Dieses Beispiel untermauert somit die These, dass sich prinzipiell alles kleben lässt – auf die «richtige» Oberfläche kommt es an. Gegebenenfalls müssen die Klebflächen von Substraten im Vorfeld klebgerecht vorbereitet und/oder vorbehandelt werden (siehe Abschnitt 4.1). Grundsätzlich sollen Klebflächen definiert, reproduzierbar und (bei Kunststoffen) aktiviert sein.

Eine weitere wichtige Voraussetzung für qualitativ hochwertige und haltbare Klebungen ist die konstruktive Gestaltung. Auf die klebgerechte Konstruktion wird detailliert in Kapitel 5 eingegangen.

## 2.1.1 Oberflächenenergie, Oberflächenspannung und Benetzung

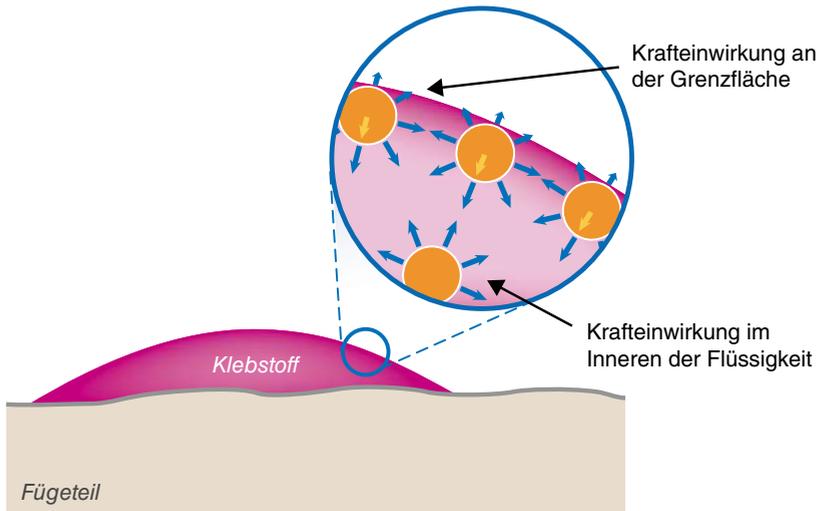
### Oberflächenenergie

In einer Flüssigkeit bzw. in einem flüssigen, noch nicht verfestigten Klebstoff heben sich die zwischen den Molekülen wirkenden Kräfte im Inneren der Flüssigkeit auf, da jedes Molekül rundherum von gleichartigen Molekülen umgeben ist (siehe Bild 2.3). An der Oberfläche hingegen fehlen die nach außen gerichteten Kräfte, so dass sich eine resultierende Kraft in das Innere der Flüssigkeit ergibt.



#### DEFINITION

Moleküle an der Oberfläche einer Flüssigkeit besitzen eine potenzielle Energie – die so genannte **Oberflächenenergie** [4; 21; 22].



**Bild 2.3** Anziehungskräfte der Moleküle in einem flüssigen Klebstoff [Quelle: DELO Industrie Klebstoffe, Windach, nach 22]

### Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung ist die Ursache dafür, dass Flüssigkeiten immer das Bestreben haben, ihre Oberfläche zu verringern und so den Zustand der kleinstmöglichen potenziellen Energie einzunehmen. Aus diesem Grund sind Flüssigkeitsoberflächen stets Minimalflächen. Die Kugelform bietet minimale Oberfläche bei maximalem Volumen [21]. Demzufolge nimmt Wasser die energetisch günstige Tropfenform an, wenn keine weiteren Kräfte auf das Wasser wirken. Selbst schwere Flüssigkeiten, wie zum Beispiel Quecksilber, sind bekanntermaßen in der Lage, auf den meisten Oberflächen kleine und stabile Tropfen auszubilden.

Die Oberflächenspannung des Wassers verhindert beispielsweise auch das Einsinken von Wasserläufern oder anderen Insekten, wenn sie sich auf Wasseroberflächen befinden (Bild 2.4).



**Bild 2.4** Wasserläufer auf einer Wasseroberfläche

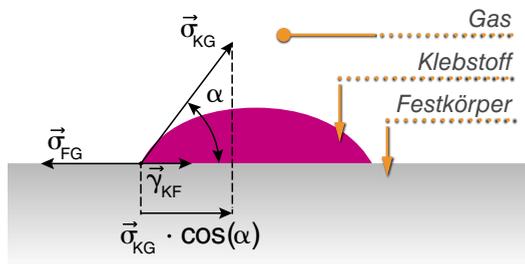
### Benetzung

Die Benetzung der Fügeflächen mit Klebstoff ist ein notwendiges Kriterium für die Ausbildung von Adhäsionskräften (siehe Abschnitt 2.1.3). Ein flüssiger Klebstoff muss die Fügeflächen der

Substrate im Idealfall vollständig benetzen, um die Voraussetzung für ein Maximum an Adhäsionspunkten in der Fügezone zu schaffen. Eine ausreichende Benetzung der Fügeiteiloberflächen ist demnach die wichtigste Voraussetzung für die Ausbildung von Adhäsionskräften [4]. Entscheidend für die Benetzbarkeit ist das Verhältnis von Oberflächenenergien der zu benetzenden Substrate und der Oberflächenspannung des Klebstoffs.

Die Oberflächenenergie eines Festkörpers lässt sich mit Hilfe des Benetzungswinkels, häufig auch als Kontakt- oder Randwinkel bezeichnet, bestimmen. Der Benetzungswinkel  $\alpha$  ist der Winkel, den ein waagrecht liegender Flüssigkeitstropfen auf einer Festkörperoberfläche zu dieser Oberfläche ausbildet (Bild 2.5). Diese Methode des liegenden Tropfens ist eine Standardanordnung für die optische Messung des Benetzungswinkels  $\alpha$ . Der Klebstofftropfen ruht dabei auf der Substratoberfläche [21].

Der Zusammenhang zwischen der Oberflächenenergie der Fügeiteile, der Oberflächenspannung des Klebstoffs und dem Benetzungswinkel  $\alpha$  lässt sich mit der Youngschen Gleichung (nach THOMAS YOUNG) beschreiben [23].



- $\alpha$  = Benetzungswinkel
- $\sigma_{FG}$  = Oberflächenenergie des Fügeiteils
- $\sigma_{KG}$  = Oberflächenspannung des flüssigen Klebstoffs
- $\gamma_{KF}$  = Grenzflächenspannung zwischen Fügeiteiloberfläche und dem flüssigen Klebstoff

**Bild 2.5** Kräftegleichgewicht am liegenden Tropfen [Quelle: DELO Industrie Klebstoffe, Windach, nach 4; 22]

$$\sigma_{FG} = \gamma_{KF} + \sigma_{KG} \cdot \cos \alpha$$

(Gl. 2.1)

- $\sigma_{FG}$  Oberflächenenergie des Fügeiteils
- $\gamma_{KF}$  Grenzflächenspannung zwischen der Fügeiteiloberfläche und dem flüssigen Klebstoff
- $\sigma_{KG}$  Oberflächenspannung des flüssigen Klebstoffs
- $\alpha$  Benetzungswinkel (Kontakt-/Randwinkel)
- F Fügeiteil
- G Gasatmosphäre der Umgebung
- K Klebstoff (flüssig)

Um die für das Kleben erforderliche gute Benetzung der Substratoberflächen mit flüssigem Klebstoff zu ermöglichen, muss die Oberflächenspannung des flüssigen Klebstoffs  $\sigma_{KG}$  stets kleiner sein als die Oberflächenenergie des Fügeiteils  $\sigma_{FG}$  (vgl. Bild 2.6).