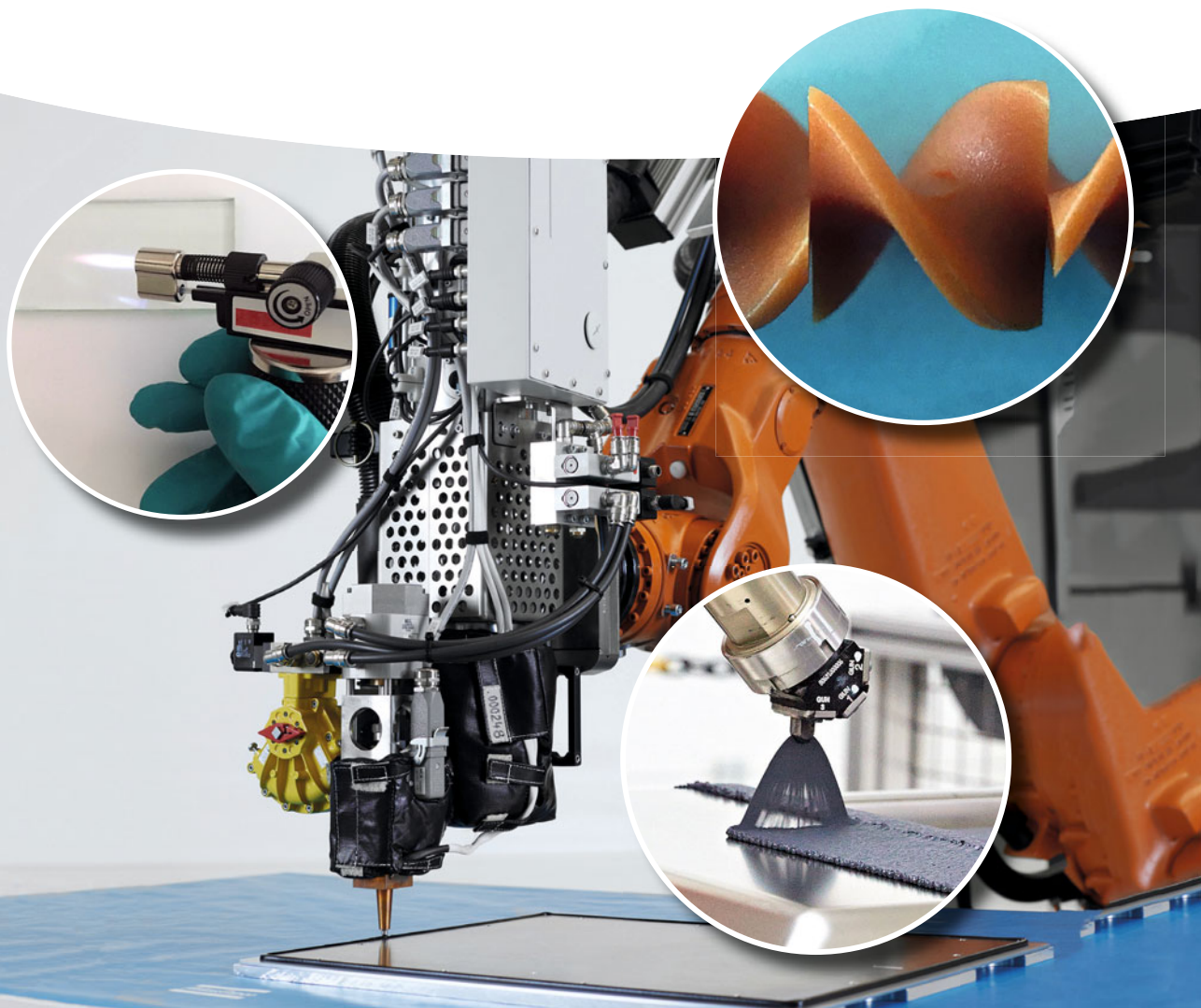


Jürgen Klingen

Fügetechnologie Kleben

Eine Anleitung für den zeitgemäßen und sicheren
Klebprozess in Industrie und Handwerk



Fügetechnologie Kleben

Fügetechnologie Kleben

eine Anleitung für den zeitgemäßen und sicheren
Klebprozess in Industrie und Handwerk

Jürgen Klingen

Autor

Jürgen Kligen

Jansweg 4
41366 Schwalmtal
Deutschland

Bildnachweise Cover:

Hintergrundbild und Kreiselement rechts
unten: Atlas Copco

Kreiselement links und rechts oben:
Jürgen Kligen

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber 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 Nationalbibliothek

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

© 2019 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, 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.

Print ISBN 978-3-527-34492-5

ePDF ISBN 978-3-527-81606-4

ePub ISBN 978-3-527-81604-0

oBook ISBN 978-3-527-81603-3

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Inhaltsverzeichnis

Vorwort IX

1	Geschichte des Klebens von der Steinzeit bis heute	1
1.1	Die Anfänge der Klebtechnik	1
1.2	Kleben vom Mittel- bis zum Industriezeitalter	2
1.3	Geschichte des Klebens 1845–1960	4
1.4	Geschichte des Klebens 1960 bis heute	8
2	Position der Klebtechnik in Industrie und Handwerk	11
2.1	Einleitung	11
2.2	Vor- und Nachteile des Klebens	12
2.3	Kleben in Industrie und Handwerk	16
2.4	Moderne Klebstoffsysteme für Industrie und Handwerk	17
3	Der Klebprozess: Qualitäts- und Projektmanagement	25
3.1	Einführung	25
3.2	Qualitätsmanagement	25
3.3	Projektmanagement	26
3.3.1	Teil 1 – Planungs-, Konzept- und Machbarkeitsphase	28
3.3.2	Teil 2 – Entwicklungs- und Einführungsphase	28
3.3.3	Gate Reviews	28
3.3.4	Die „Process Map“	31
3.4	Qualitätsanforderungen an Klebprozesse nach DIN 2304	32
4	Planung (Phase 1)	37
4.1	Einleitung	37
4.2	Erstellen des Projektauftrags für die Entwicklung eines Klebprozesses	38
4.3	Rollenbeschreibungen der für den Projekterfolg relevanten Personen	39
5	Konzept (Phase 2)	43
5.1	Einleitung	43
5.2	Grundlagen des Klebens	45
5.2.1	Adhäsion	45

5.2.2	Benetzung	47
5.2.3	Kohäsion	52
5.3	Werkstoffe und deren Oberflächen	54
5.3.1	Einleitung	54
5.3.2	Metalle	54
5.3.3	Kunststoffe	66
5.3.4	Glas	69
5.4	Beanspruchung von Klebverbunden	72
5.4.1	Langzeitverhalten von Klebverbunden	73
5.4.2	Feuchtebeanspruchung	74
5.4.3	Beanspruchung durch korrosive Medien	74
5.4.4	Temperaturwechselbeanspruchungen	76
5.4.5	Eigenspannungen in Klebungen	76
5.5	Klebtechnische Oberflächenbehandlung der Werkstoffe	79
5.5.1	Einführung	79
5.5.2	Eigenschaften der Metalloberflächen	84
5.5.3	Eigenschaften von Kunststoff- und Glasoberflächen	86
5.5.4	Klebtechnische Vorbereitung der Oberfläche	89
5.5.5	Klebtechnische Oberflächenvorbehandlung	95
5.6	Klebstoffe für Industrie und Handwerk	114
5.6.1	1K-Klebstoffe	116
5.6.2	2K-Klebstoffe	171
5.7	Kleben auf Metall-, Kunststoff- und Glasoberflächen	181
5.7.1	Kleben auf Metalloberflächen	181
5.7.2	Kleben auf Kunststoffoberflächen	189
5.7.3	Kleben auf Glasoberflächen	191
5.8	Kriterien für die Auswahl der Klebstoffe	195
5.8.1	Festlegung des Werkstoffs	196
5.8.2	Gestaltung und Dimensionierung des Klebverbundes	196
5.8.3	Beanspruchungen des Klebverbundes	198
5.8.4	Art der Oberflächenbehandlung	198
5.8.5	Art des Fertigungsprozesses	200
5.8.6	Auswahl der Klebstoffe	201
5.8.7	Praktische „Guidelines“ zur Auswahl der Klebstoffe	201
6	Machbarkeit (Phase 3)	203
6.1	Einleitung	203
6.2	Manuelle Herstellung einer Klebverbindung	204
6.2.1	Vorbereitung	204
6.2.2	Durchführung	211
6.3	Eigenschaften und Prüfverfahren	242
6.3.1	Eigenschaften von Klebverbindungen	242
6.3.2	Prüfverfahren in der Klebtechnik	257
6.4	Gestaltung und Dimensionierung von Klebverbindungen	270
6.4.1	Konstruktive Gestaltung von Klebverbindungen	270
6.4.2	Dimensionierung von Klebverbindungen	280

6.4.3	Abschließende Bemerkung zur konstruktiven Gestaltung und Dimensionierung von Klebverbindungen	287
6.4.4	Beispiele zur Dimensionierung von Klebverbindungen	287
7	Entwicklung des Klebprozesses (Phase 4)	295
7.1	Einleitung	295
7.2	Fertigungsprozess Kleben	296
7.3	Herstellungsverfahren zum Aufbau der Adhäsion	300
7.3.1	Klebstoffvorbereitung	300
7.3.2	Dosieren und Auftragen des Klebstoffs	306
7.4	Herstellungsverfahren zum Aufbau der Kohäsion	315
7.4.1	Mischen der Klebstoffkomponenten	315
7.4.2	Fügen und Fixieren	322
7.4.3	Aushärten der Klebstoffe	322
8	Einführung des Klebprozesses (Phase 5)	325
9	Moderne Anwendungen in Industrie und Handwerk	327
9.1	Einleitung	327
9.2	Kleben im Leichtbau	328
9.3	Kleben im Fassadenbau	332
9.4	Kleben auf niederenergetischen Werkstoffen	334
9.5	Kleben mit strukturellen 2K-Klebstoffen	338
9.6	Kleben mit Hochleistungsklebebandsystemen	345
	Stichwortverzeichnis	349

Vorwort

Unbestritten ist die Klebtechnik eine der Schlüsseltechnologien zur Fertigung von Produkten im 21. Jahrhundert. Die Gründe hierzu liegen in dem Bedarf an der Vereinfachung von Produktionsprozessen, modernen und innovativen Designkonzepten, Kostenreduzierung bei der Herstellung von Produkten und dem verstärkten Einsatz von Leichtbaukonstruktionen zur Einsparung von Energie.

Der Klebprozess ist jedoch ein „spezieller Prozess“, der ohne Zerstörung der durch ihn geschaffenen Produkte, den verklebten Bauteilen, nicht überprüft werden kann. Weiterhin ist dessen Gestaltung maßgeblich, ja fast ausschließlich für die Qualität des Klebverbundes verantwortlich, da beim Kleben im Gegensatz zu den alternativen Fügeverfahren wie Schweißen, Schrauben und Nieten die hierbei eingesetzten Fügmaterialien – die Klebstoffe – nicht in ihrer endgültigen Form vorliegen, sondern vom Anwender bei der Herstellung der Bauteile physikalisch und/oder chemisch verändert werden. Daraus ergibt sich, dass der hierzu eingesetzte Prozess zur Sicherstellung der erforderlichen Produktqualität von der ersten Begutachtung der beteiligten Werkstoffe bis zur erfolgreichen Fertigstellung der Verklebungen detailliert, sorgfältig und belastbar entwickelt werden muss.

Das vorliegende Buch richtet sich an Ingenieure, Chemiker, Wissenschaftler, Techniker, Meister und Studenten, die mit der Entwicklung eines solchen Prozesses beauftragt sind oder aus anderen Gründen die für ein optimal verklebtes Bauteil notwendigen Voraussetzungen und Maßnahmen kennenlernen möchten. Es beschreibt detailliert die Schritte, die für den Aufbau eines Klebprozesses zur Herstellung eines qualitativ hochwertigen Bauteils notwendig sind. Dies geschieht mithilfe eines eigens dafür entwickelten und auf die Klebtechnik zugeschnittenen 5-Phasen Projektmanagementsystems, was das Entwicklerteam im Betrieb von der ersten Idee bis zur erfolgreichen Einführung in die Fertigung des verklebten Bauteils anleitet. Hierbei werden die Anforderungen der speziell für die Klebtechnik entwickelten Norm DIN 2304 („Qualitätsanforderungen an Klebprozesse“) beachtet und stellen den Aufbau geeigneter organisatorischer Strukturen im Herstellerbetrieb die für die Klebtechnik geeignete Gestaltung des Umfelds, eine qualitativ hochwertige Fertigung und die qualitätsgerechte Ausführung sicher. Die zur Planung und Durchführung des 5-Phasen-Managementprozesses benötigten Werkzeuge und Qualitätstechniken werden durch die Six-Sigma-Methodik zur Verfügung gestellt.

Beim Durcharbeiten der Lektüre wird der Leser sozusagen an die Hand genommen und Schritt für Schritt durch diesen Managementprozess geführt. Direkt am Anfang des Buches wird in der Konzeptphase ausführlich das notwendige Basiswissen der Klebtechnik, technische Informationen zu den verwendeten Werkstoffen, die Methoden zur Oberflächenbehandlung von Substratoberflächen sowie Kenntnisse über das Verhalten der für Industrie und Handwerk geeigneten Klebstoffe vermittelt. Dadurch wird der Leser in die Lage versetzt, Klebkonzepte als Basis für die weiteren Entwicklungsschritte zu skizzieren.

In der darauffolgenden Machbarkeitsphase beginnt das praktische Arbeiten im Labor, wobei zunächst die Anfertigung und Prüfung von Labormustern aller geplanten Konzepte im Vordergrund stehen. Ziel hierbei ist es, den am besten geeigneten Kandidaten zu identifizieren und ihn anschließend nach der Herstellung und intensiven Untersuchung der entsprechenden praxisnahen Bauteile zu validieren. Am Ende der Machbarkeitsphase liegt ein für die in der Praxis auftretenden Beanspruchungen der Verklebung validiertes Konzept vor, was detailliert durch die einzusetzenden Substrate, der benötigten Oberflächenbehandlung, des geeigneten Klebstoffs und der notwendigen Herstellungsschritte beschrieben ist.

Das Ziel der nachfolgenden Entwicklungsphase ist es, für das bereits validierte Konzept einen robusten Prozess zur Herstellung des verklebten Bauteils aufzubauen. Dabei wird nach der Erstellung des für den Produktionsmaßstab geeigneten Herstellungsprozesses dessen prinzipielle Eignung durch entsprechende Pilotläufe unter Verwendung statistischer Versuchsmethoden nachgewiesen. Nach Bereitstellung der Produktionsanlagen, Erarbeitung der Standards für die Produktion und Qualitätskontrolle sowie der Einführung und Einweisung des ausführenden Personals an den Produktionsmaschinen erfolgt anschließend der Start der Produktion des verklebten Bauteils.

Dieses Buch soll einen Beitrag dazu leisten, die moderne Klebtechnik für den Anwender bei seinen vielfältigen Aufgabenstellungen beim Fügen von Bauteilen in Industrie und Handwerk noch leistungsfähiger zu machen. Dazu erfährt er, wie durch eine systematische Vorgehensweise bei der Entwicklung der entsprechenden Klebprozesse die Herstellung von qualitativ hochwertigen Verklebungen realisiert werden kann.

Ich bedanke mich beim Wiley Verlag für seine Bereitschaft, das Buch zu veröffentlichen sowie für die große Hilfe bei der Realisierung. Auch möchte ich Prof. Dr.-Ing. Paul L. Geiß von der AWOK der Technischen Universität in Kaiserslautern meinen Dank aussprechen für die interessanten und anregenden Gespräche zur Konzeption des Buches. Ich hoffe, dass es vielen Anwendern bei der Entwicklung der entsprechenden klebtechnischen Applikationen eine große Unterstützung zukommen und einen signifikanten Beitrag für die weiterhin positive Entwicklung der Klebtechnik im 21. Jahrhundert leisten wird.

Schwalmtal, Juni 2019

Dr. Jürgen Kligen
(jkligen@aboso-consulting.de,
www.aboso-consulting.de)

1

Geschichte des Klebens von der Steinzeit bis heute

1.1 Die Anfänge der Klebtechnik

Birkenpech kann wohl als der erste systematisch hergestellte Klebstoff der Menschheit bezeichnet werden. Das schwarze, teerartige Destillat, das aus der Birkenrinde unter Luftabschluss durch Verschwelung in einem Gefäß gewonnen wurde, war in der Steinzeit ein gebräuchlicher Allzweckklebstoff, der vor allem zur Schäftung von Werkzeugen und Waffen verwendet wurde. Der mit Abstand älteste Beleg für die Birkenpechherstellung und die Verwendung des Materials stammt aus Campitello in Italien (oberes Arnotal), wo zwei über etwa 200 000 Jahre alte Steinartefakte mit anhaftendem Birkenpech gefunden wurden. Auch der Mann vom Tisenjoch, Ötzi genannt, der um 3400 vor Christus starb und vor nicht allzu langer Zeit als Gletschermumie aufgefunden wurde, trug Pfeile bei sich, die aus Feuerstein und Ästen des „Wolligen Schneeballs“ bestanden und mit Pflanzenfasern verstärktem Birkenpech „verklebt“ waren (Abb. 1.1).

Bereits vor dieser Zeit, etwa 4000 Jahre vor Christus, wurde von den Sumerern ein Klebstoff entwickelt und hergestellt. Hierbei handelte es sich um eine Art Glutinleim aus Tierhäuten, Segin genannt, den sie beim Bau ihrer Häuser und



Abb. 1.1 Im Eintopfverfahren hergestelltes Birkenpech (Foto: Jorre, Wikimedia Commons).

Tempel benutzten. Zum Abdichten von Booten und im Bau wurde außerdem Naturasphalt eingesetzt, der in Mesopotamien, der Region um den heutigen Irak, reichlich vorhanden war.

Spätestens seit etwa 1500 vor Christus entdeckten die Ägypter einen Sud aus Sehnen, Knorpel und anderen tierischen Abfällen als geeigneten Klebstoff für Schreinerarbeiten. Als Zeugnis der frühgeschichtlichen Leimherstellung und Beweis für seine immense kulturelle Bedeutung findet man im Grab des Präfekten Rekhmara in Theben eine Wandmalerei, die eindeutig Männer bei der Leimverarbeitung zeigt. Das aufwendige Bild zeigt detailliert die verschiedenen Aspekte der Furnierarbeit, darunter auch die Anwendung von Gelatineleim.

Die Kunst des Leimsiedens wurde von den alten Griechen und Römern weiterentwickelt. So etablierte sich in Griechenland schon früh der Beruf des Leimkochers („Kellopsos“). Der griechische Philosoph Theophrast (371–268 vor Christus) berichtet in seiner „Geschichte der Gewächse“ über die Bindfestigkeit der Holzverleimung Folgendes: „Bei der Zimmermannsarbeit hält der Leim am besten die Fichte zusammen, wegen ihres lockeren und fortlaufenden Holzes. Eher reißt das Holz als die Leimfuge.“

Die Römer erweiterten das Spektrum der damals gebräuchlichen Leime um den durch Auskochen von Fischabfällen hergestellten Fischleim, der in unseren Breiten jedoch erst im 6. Jahrhundert nach Christus auftauchte. Für spezielle Anwendungen wurden auch Leime aus den Schwimmblasen von Fischen hergestellt. So diente der Hausenblasenleim (Hausen: Stör aus dem Schwarzen und dem Kaspischen Meer) den Goldschmieden bis in die jüngste Vergangenheit zum Verkleben (Kitten) von Edelsteinen auf Schmuckgegenständen.

1.2 Kleben vom Mittel- bis zum Industriezeitalter

In der Folgezeit des frühen Mittelalters stagnierte die Entwicklung der Klebstoffe in Mitteleuropa, sodass bis ins 15. Jahrhundert fast keine interessanten Neuerungen in der Technik des Verleimens bekannt wurden. Erst die Erfindung des Buchdrucks um 1450 durch Johannes Gutenberg aus Mainz setzte neue Aktivitäten in Gang, da für die Fertigstellung der Bücher im Buchbindergewerbe spezielle Leime benötigt wurden. Ein großer Bedarf an geeigneten Leimen entstand zusätzlich im 16. und 17. Jahrhundert durch die Renaissance der Furniertechnik. Um diesen decken zu können, entstand in Holland im Jahr 1690 die erste handwerkliche Leimfabrik (Leimsiederei); das erste Patent auf einen Fischleim für die Tischlerei wurde jedoch erst 1754, über 60 Jahre später, in England erteilt. Obwohl die Nachfrage an Holzleimen und Kleistern in dieser Zeit einen sprunghaften Anstieg verzeichnete, fanden zunächst keine nennenswerten Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Klebtechnik statt.

Kleben im frühen Industriezeitalter

Ende des 19. Jahrhunderts stieg der Bedarf an Gütern aller Art und mit der damit verbundenen Massenherstellung wuchsen die Verpackungsprobleme. Die vor-

handenen Klebstoffe erfüllten nicht die qualitativen Anforderungen, neue Produkte mussten entwickelt werden.

Im Jahr 1880 entwickelte Otto Ring, ein Berliner Kaufmann, den ersten gebrauchsfertigen Glutinleim „Syndetikon“, der sehr schnell zu einem Welterfolg wurde. Syndetikon war ein Fischleim, die genaue Rezeptur ist heute nicht mehr bekannt. Jedoch erwähnt das *Handbuch der Drogeristen-Praxis* von 1893 in dem Kapitel „Thiere, Thiertheile und Thiersekrete“, dass Syndetikon „durch Auskochen von allerlei Fischtheilen, Eingeweiden und Schwimmblasen“ zubereitet wurde.

Im Jahr 1889 erfand Ferdinand Sichel, ein Tapeziermeister aus Hannover, den ersten gebrauchsfertigen Pflanzenleim und machte den nicht ganz unkritischen Glutinleim somit überflüssig. Unter Verwendung von Pflanzenstärke als Bindemittel entstand ein haltbarer Klebstoff, der sich mit Wasser leicht anrühren und lange verarbeiten ließ. Außerdem konnte diese Neuentwicklung für den Verkauf gebrauchsfertig abgefüllt werden. Sichel hatte während seiner Ausbildung die schwierige Herstellung und Handhabung von den aus tierischen Rohstoffen hergestellten Glutinleimen kennengelernt, die für jeden Gebrauch neu gekocht und danach schnell verbraucht werden mussten. Saure Zersetzungsprodukte des Leimes hätten bei längerer Lagerung die verklebten Tapeten verfärben können.

Basisentwicklungen für die Klebtechnik

- 1905–1907 Der erste Massenkunststoff („Bakelit“) wurde von Leo Hendrik Baekeland, einem belgisch-amerikanischen Chemiker und Erfinder, entwickelt und läutete das Zeitalter der Klebstoffe auf der Basis synthetisch hergestellter Rohstoffe ein.
- 1914 Das Verfahren zur Herstellung von Polyvinylacetat (PVA), ein bis heute sehr häufig verwendeter synthetischer Rohstoff für Klebstoffe, wurde von Victor Rollett und Fritz Klatt patentiert. Das Polymer erlangte jedoch erst in den 1930er-Jahren kommerzielle Bedeutung.
- 1928 Erstmals fand die Produktion von Polyvinylchlorid (PVC) und Polymethylmethacrylat (PMMA, Plexiglas) in den USA statt.
- 1930 Polychloropren wurde von Arnold Collins zum ersten Mal unter wirtschaftlich günstigen Bedingungen im Emulsionsverfahren polymerisiert und anschließend im Jahr 1932 von der US-amerikanischen Firma DuPont unter dem Namen Duprene (ab 1938 Neoprene) auf den Markt gebracht. Weiterhin gelang in den 1930er-Jahren die erste technische Herstellung von PVA, Polystyrol (PS) und Polyacrylnitril.
- 1937 Polyurethane (PUs) wurden von einer Forschergruppe um Otto Bayer in den Laboratorien der I.G. Farben in Leverkusen zum ersten Mal synthetisiert und ab 1940 in Leverkusen produziert. Aufgrund des Zweiten Weltkriegs und der damit verbundenen Knappheit an Rohstoffen entwickelte sich der Markt für PUs jedoch zunächst nur sehr langsam. Von 1952 bis 1954 wurden Polyester-Schaumstoffe entwickelt und mit dem Einsatz von Polyetherpolyolen wuchs die Bedeutung der PUs auch für Klebstoffanwendungen rasch an. Heute gehören sie wegen ihrer vielfältigen Modifikationsmöglichkeiten

- zu den wichtigsten Basisstoffen in der Klebstoffindustrie und werden zur Herstellung von meist elastischen Klebverbunden für viele Anwendungen in Industrie und Handwerk eingesetzt.
- 1938 Epoxidharze, die sich für Lacke und Klebstoffe eigneten, wurden Ende der 1930er-Jahre von dem Schweizer Pierre Castan und dem deutschen Paul Theodor Schlack unabhängig voneinander erfunden; das entsprechende Patent wurde 1938 in der Schweiz angemeldet und 1940 erteilt. Castan, der die neuen Harze ursprünglich für zahnärztliche Zwecke nutzen wollte, setzte seine Arbeiten in den 1940er-Jahren mit der Entwicklung weiterer Varianten seiner neuen Technologie fort. Epoxidharzklebstoffe zählen heute sowohl kalt- als auch warmhärtend zu den leistungsfähigsten Systemen in der Klebtechnik und finden insbesondere zur Herstellung von hochfesten Klebverbunden in vielen Industriezweigen sowie im Handwerk breite Anwendung.

1.3 Geschichte des Klebens 1845–1960

- 1845 Das erste selbstklebende Pflaster wurde 1845 von Horace Day und William Shecut aus New York in den USA patentiert. Das Patent beschreibt eine neue und verbesserte Herstellungsmethode für ein auf Naturkautschuk und Baumwollgewebe basierendes Pflaster, das besondere Eigenschaften bei der Wundabdeckung aufweist. Das neue flexible Material war aufgrund der Perforation des Gewebes in der Lage, Schweiß und Wundflüssigkeit abzuführen. Nach der Erteilung des Patents wurden die Rechte an Thomas Allcock verkauft, der die neuen Pflaster unter dem Namen „Allcock's Porous Plaster“ vermarktete.
- 1882 Die Erteilung eines deutschen Patents an den Apotheker Paul Carl Beiersdorf für ein selbstklebendes Pflaster, das Wirkstoffe auf der Haut freisetzen konnte, war gleichzeitig die Geburtsstunde der Firma Beiersdorf in Altona (Abb. 1.2). Die Erfindung war das Ergebnis von Experimenten zur Entwicklung von Heilpflastern, die mit in heißen Salben getränktem Mull durchgeführt wurden. Oscar Troplowitz, der die Firma von Beiersdorf übernommen hatte, erkannte das Potenzial des Patents von Beiersdorf auch für wirkstofffreie Pflaster und stellte daher den Chemiker Dr. Isaac Lifschütz für die Entwicklungsarbeiten für die neuen Klebstoffe ein. Obwohl die ersten Prototypen die Haut reizten, brachte Troplowitz das Produkt auf den Markt, jedoch zum Flickern beschädigter Fahrradschläuche. Viele Jahre später mündeten diese Arbeiten in die Erfindung eines durchsichtigen Kautschuk-Klebefilms, der seit 1936 als Tesa-Film von Beiersdorf vermarktet wird.
- 1925 In diesem Jahr wurde das Abdeckklebeband von Richard Gurley Drew von der 3M Company in St. Paul, USA erfunden. Nachdem er in einer Autolackiererei während der Einführung eines wasserfesten Schleifpapiers von Problemen mit der Abdeckung von bereits fertiggestellten Teilen

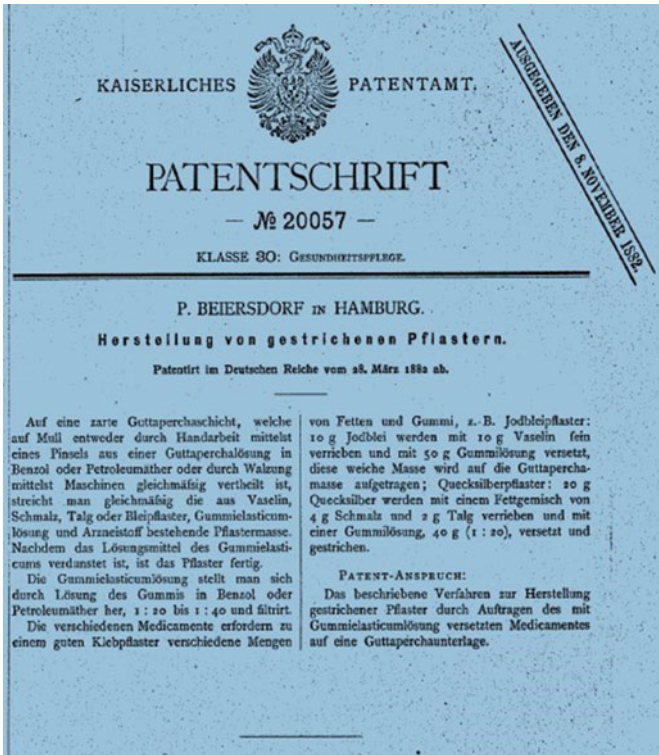


Abb. 1.2 Patentschrift zur Erfindung des Heftpflasters durch Paul Carl Beiersdorf (Foto: Dr. Jürgen Klingens, Aboso-Consulting).

bei der zweifarbigen Autolackierung erfuhr, startete er in seinem Labor umgehend Experimente mit auf pflanzlichen Ölen, Harzen und Naturkautschuk basierenden Klebstoffen. Nach 2 Jahren Entwicklung schloss Drew 1925 seine Arbeiten erfolgreich ab und präsentierte den Autoherstellern in Detroit das erste Abdeckklebeband (heute oft Kreppklebeband genannt), einen fünf Zentimeter breiten Papierstreifen mit einer dünnen Klebeschicht (Abb. 1.3). Die Kunden in der Automobilindustrie waren so begeistert, dass sie direkt drei Lkw-Ladungen bestellten.

1930 Fünf Jahre nach dem Abdeckklebeband erfand Richard Gurley Drew das erste transparente Klebeband (Abb. 1.4). Gedacht war es für Bäcker, Fleischverarbeiter und Lebensmittelhändler, die auf der Suche nach einem Verschluss für ihre Cellophan-Verpackungen waren. Am 8. September 1930 wurde die erste Testsendung ausgeliefert und die wirtschaftliche Depression brachte dem neuen Produkt einen ungeahnten Erfolg. In Zeiten der Sparsamkeit wurde es für die vielfältigsten Reparaturen sowie für viele Anwendungen in Büro und Haushalt eingesetzt. Im Zweiten Weltkrieg war die Nachfrage nach „Scotch“-Klebebändern so groß, dass das Unternehmen mit der Lieferung nicht mehr nachkam und sich in Anzeigen dafür entschuldigte.



Abb. 1.3 Die erste Anwendung von Scotch-Abdeckklebebandern (Foto: 3M).



Abb. 1.4 Dose mit „Scotch Cellophane Tape“ aus den 1950er-Jahren (Foto: Dr. Jürgen Klingens, Aboso-Consulting).

1936 Die Erfolgsstory von Tesa-Film ist sehr stark mit dem Namen Hugo Kirchberg verbunden. Direkt nach seinem Start bei Beiersdorf in Hamburg im Jahr 1934 hatte es sich der Bürokaufmann aus Eisenach zur Aufgabe gemacht, den bis dahin erfolglosen „Beiersdorf-Kautschuk-Klebefilm“ von 1896 zum Erfolg zu führen. Kirchberg glaubte fest an den Erfolg des Klebefilms, insbesondere für den Einsatz im Büro. So wurde schon im Januar 1935 unter der Bezeichnung „Beiersdorf-Kautschuk-Klebefilm“ ein Produkt aus transparenter Acetat-Folie auf den Markt gebracht. Da jedoch die Handhabung dieses glasklaren Klebe-

bands schwierig war, entwickelte und patentierte Kirchberg gleichzeitig einen „Behälter für mit Trockenklebstoff versehene Klebestreifenrollen“. Diese erste kombinierte Abroll-abtrenn-Vorrichtung steht heute in modifizierter Form auf beinahe jedem Schreibtisch. 1936 wurde Tesa als Marke für Selbstklebe-Produkte eingeführt und der Tesa-Klebefilm, im Jahr 1941 in Tesafilm umbenannt, avancierte zum Erfolgsprodukt für Anwendungen im Haushalt, Büro und anderen vielfältigen Einsatzgebieten.

- 1942 Mit der Erfindung der mit Polyvinylformal modifizierten Phenolharzklebstoffe gelang Dr. Norman Adrian De Bruyne Anfang der 1940er-Jahre ein Durchbruch im Sinne des konstruktiven Klebens im Flugzeugbau, nicht nur von Holz-, sondern auch von Metallwerkstoffen. So entwickelte er 1942 den ersten Hochleistungsklebstoff für den Flugzeugbau („Redux“), der einen erheblichen Beitrag zur Verbesserung von Flugzeugstrukturen lieferte. Insbesondere wegen der ausgezeichneten Alterungsbeständigkeit wird diese Klebstoffklasse noch heute beim strukturellen Kleben von Aluminium sehr geschätzt. Der Name „Redux“ leitet sich von „Research at Duxford“ ab und weist auf den Ort hin, wo diese außergewöhnlichen Produkte entwickelt wurden (Aero Research Limited in Duxford, UK).
- 1946 Die von Dr. Pierre Castan Anfang der 1940er-Jahre durchgeführten Forschungsarbeiten an Epoxidharzen bildeten die Basis für die Entwicklung eines neuartigen Klebstoffs (Araldit 194) durch den Schweizer Dr. Eduard Preiswerk von Ciba in Basel. Dieser neue Epoxidklebstoff war in der Lage, verschiedene Werkstoffe, insbesondere Metalle, zu hochfesten Verbunden zu verkleben. Der Klebstoff wurde 1946 von der Firma Ciba auf den Markt gebracht und in verschiedenen Industriezweigen sowie der Luft- und Raumfahrt erfolgreich eingesetzt. Epoxidharzklebstoffe zählen bis heute sowohl in ihrer kalt- als auch warmhärtenden Variante zu den Standardprodukten für strukturelle Verklebungen in der Klebtechnik.
- 1953 Die Erfindung der anaeroben Klebstoffe, die unter Sauerstoffabschluss aushärten, wurde im Labor von Dr. Vernon Kriehle in Hartford, USA gemacht und war gleichzeitig der Startschuss für die Firma Loctite. Beim ersten offiziellen Auftritt dieser Firma in der Öffentlichkeit im Juli 1956 läutete die Aussage „das uralte Problem mit losen Muttern und Schrauben in Maschinen und Geräten lösen zu können“ die Einführung der anaeroben Klebstoffe und den Siegeszug dieser neuen Technologie ein. Anaerobe Klebstoffe haben sich heute fest in der Klebtechnik etabliert und werden vielfältig für Befestigungen und Sicherungen von Schrauben sowie Verklebungen von Naben in Industrie und Handwerk eingesetzt.
- 1958 Der erste „Sekundenkleber“ hatte den Produktnamen „Eastman 910“. Dieser einzigartige Klebstoff wurde während des Zweiten Weltkriegs von dem amerikanischen Chemiker Dr. Harry Coover erfunden, der bei der Firma Eastman Kodak in New York an der Entwicklung von optischen Prismen für Waffensysteme arbeitete. Die extreme Klebrigkeit der von ihm eingesetzten Cyanacrylate, der Grundsubstanz des Sekundenklebers, verhinderte den Einsatz für die geplante Anwendung. Jedoch

wurden nach weiteren Entwicklungsaktivitäten bald die vielfältigsten industriellen Anwendungen für diese neue Technologie gefunden. Als „Sekundenkleber“ haben die Cyanacrylate heute einen festen Platz nicht nur in Industrie und Handwerk. Spezielle Typen kommen in der Medizin als Sprühverband zur Blutstillung bei Unfällen oder nahtlosen chirurgischen Eingriffen zum Einsatz oder helfen in der Kriminaltechnik, Fingerabdrücke sichtbar zu machen.

1.4 Geschichte des Klebens 1960 bis heute

- 1980 Die Erfindung der Post-it-Haftnotizen (Post-it[®] ist ein eingetragener Markenname von 3M) ist eher zufällig zustande gekommen. Schon Ende der 1960er-Jahre beschäftigte sich der 3M Wissenschaftler Dr. Spencer Silver im Zentrallabor der 3M Company in St. Paul, USA mit der Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Herstellung von Klebstoffen. Das Ergebnis seiner Bemühungen war unerwartet und zunächst eher enttäuschend. Er bekam Materialien, die nur leicht klebten und sich, ohne Rückstände zu hinterlassen, von vielen Oberflächen wieder leicht abnehmen ließen. Eine praktische Anwendung wurde zunächst nicht gesehen und – gemäß der 3M-Philosophie – stellte Dr. Silver das Material intern anderen Wissenschaftlern vor. So auch Art Fry, der sich als Mitglied eines Kirchenchors ständig darüber ärgerte, dass ihm seine Lesezeichen in der Kirche aus den Notenheften herausfielen. So nahm er den neuen Klebstoff, trug ihn auf kleine Zettel auf und erprobte seine Erfindung gleich am nächsten Sonntag in der Kirche. Tatsächlich hafteten seine Lesezeichen zuverlässig, ließen sich aber dennoch leicht lösen, ohne die Notenblätter zu zerstören. Die Post-its waren erfunden und kamen Anfang der 1980er-Jahre in den USA und auch in Deutschland auf den Markt. Heute gehören sie zur Standardausrüstung eines jeden Büros und werden auch fast in jedem Haushalt zur Übermittlung von Kurzinformationen eingesetzt.
- 1980 Um der Nachfrage nach doppelseitigen Klebebändern für stark herausfordernde Anwendungen nachkommen zu können, wurde von der Firma 3M in St. Paul, USA Ende der 1970er-Jahre eine neuartige Klebebandtechnologie entwickelt. Ab den 1980er-Jahren kamen diese neuartigen Haftklebebänder für Hochleistungsverklebungen auf den Markt. Diese „Acrylic Foam Tapes“ (VHB[™] Tapes) sind durch ihre viskoelastischen Eigenschaften äußerst anpassungsfähig, bauen sehr leicht Spannungen im Klebverbund ab und haben gegenüber den flüssigen Klebstoffen den Vorteil der leichteren Verarbeitung. Die

Bänder werden unter dem Markennamen VHB (Very High Bond) vermarktet und werden heute in vielen Bereichen der Industrie als auch im Handwerk erfolgreich eingesetzt. Anwendungsbeispiele sind die Verklebungen von Fassaden an Hochhäusern, Dichtungen in Autotüren, Dachkonstruktionen für Lkw-Auflieger und die Fertigung von Solarmodulen.

- Ab 1990 Aushärtbare Haftklebebänder werden von 3M entwickelt und das erste Produkt 1997 unter der Bezeichnung „Structural Bonding Tape“ auf dem Markt eingeführt. Diese doppelseitigen Haftklebebänder härten nach dem Aufbringen thermisch bei etwa 140 °C für etwa 20 min zu struktureller Festigkeit aus und vereinen die Vorteile eines Klebstoffs (hohe Festigkeit) mit den Vorteilen eines Klebebandes (unmittelbarer Adhäsionsaufbau und einfache Handhabung). Die Technologie findet heute unter anderem umfangreich bei der Verklebung von Spiegelsockeln an Windschutzscheiben Verwendung, wobei die für die Herstellung der Windschutzscheibe benötigte Wärme für die Aushärtung des Klebebandes genutzt wird.
- 1998 Zum Fügen von Fahrzeugstrukturen im Rohbau werden neue zähelastifizierte warmhärtende 1K-Epoxidklebstoffe von der Firma Dow in den Automobilbau eingeführt und erfreuen sich seitdem großer Beliebtheit. Sie sind so entwickelt, dass sie beölte Feinbleche direkt, also ohne Reinigung der Oberfläche, strukturell verkleben können. Diese Klebstoffe werden auch oft im sogenannten Hybridverfahren in Kombination mit zum Beispiel dem Punktschweißen für den Bau von Rohkarosserien und Anbauteilen wie Türen, Klappen und Hauben eingesetzt.
- 2016 Zur Lösung der auf unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten basierenden Verzugsprobleme im Automobilbau, die insbesondere bei den Materialkombinationen der neuen modernen Leichtbaukonstruktionen zutage treten, wurde die Entwicklung eines neuartigen raumtemperaturaushärtenden 2K-Epoxidklebstoffs von der Firma 3M abgeschlossen und auf dem Markt eingeführt. Anders als die warmhärtenden 1K-Klebstoffe, deren Festigkeitsaufbau erst bei 180 °C beginnt, härten die neuen Zweikomponenten-Produkte schon bei Raumtemperatur aus. Durch eine induktive Schnellhärtung direkt nach dem Klebstoffauftrag für weniger als 1 min bei etwa 130 °C ist es möglich, schon sehr früh eine ausreichende Handhabungsfestigkeit zu erreichen. Dies gilt als entscheidender Vorteil, da durch den wesentlich früheren Festigkeitsaufbau schon in der frühen Fertigungsphase Spannungen im Bauteil vermieden werden, was zu einem qualitativ hochwertigeren Prozess mit weniger Ausschuss führt und so die Fertigungskosten senkt.

2

Position der Klebtechnik in Industrie und Handwerk

2.1 Einleitung

Die Klebtechnik bietet für den Anwender in Industrie und Handwerk den großen Vorteil, dass sie dem Konstrukteur eines Bauteils große gestalterische Freiheit ermöglicht und sich in nahezu allen Bereichen in vorhandene Fertigungsabläufe der Einzel- oder Massenproduktion problemfrei integrieren lässt.

Das Kleben zählt zu den stoffschlüssigen und im klassischen Sinne nicht ohne Zerstörung lösbaren Verbindungstechniken. Darunter 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 auf das andere überträgt. Durch Kleben lassen sich praktisch alle technisch nutzbaren Werkstoffe miteinander und untereinander flächig und stoffschlüssig verbinden.

Der Klebstoff ist ein nichtmetallischer Stoff, der Füge teile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbindet und so im Verbund Kräfte übertragen kann. Durch seine chemische Zusammensetzung und den zum Zeitpunkt des Auftragens vorliegenden physikalischen Zustand muss er in der Lage sein, auf dem zu verbindenden Substrat eine Benetzung der Oberflächen zu ermöglichen.

Um als Klebstoff wirksam sein zu können, muss ein Material zwei Grundvoraussetzungen erfüllen:

- 1) Um sich zum Aufbau der intermolekularen Wechselwirkungen den Unebenheiten der Fügeoberflächen bis auf molekulare Dimensionen im Nanometerbereich annähern zu können und so einen Stoffschluss mit den starren Füge teiloberflächen zu ermöglichen, benötigt der Klebstoff zu einem bestimmten Zeitpunkt während des Fügevorganges eine hohe molekulare Beweglichkeit. Er sollte daher in dieser Phase die Eigenschaften einer Flüssigkeit mit möglichst niedriger Viskosität haben.
- 2) Um Zug-, Scher- und Schälkräfte in der Anwendung übertragen und den diversen Umwelteinflüssen widerstehen zu können, benötigt der Klebstoff später in der Klebschicht eine geringe molekulare Beweglichkeit. Er sollte sich somit nach dem Aushärten wie ein Festkörper verhalten.

Die Entwicklung von synthetischen Stoffen als Ersatz für die bis dahin verwendeten natürlichen Bindemitteln, die vor etwa 100 Jahren begann, verhalf der Kleb-

technik als Hochleistungsverbindungstechnik zum Durchbruch. So wurde die synthetische Herstellung von Klebstoffen durch die Einführung von Phenolharzklebstoffen gegen Ende der 1920er-Jahre und der Entwicklung der Epoxidharze und Polyurethane (PUs) in den 1940er-Jahren erst möglich. Noch heute sorgen Neuentwicklungen in der Polymerchemie für immer neue Klebstoffvarianten, die mit den modernen verschiedenartigsten Materialien eine feste adhäsive Bindung eingehen können und die Anforderungen hinsichtlich der Festigkeitsbeziehungsweise Verformungseigenschaften erfüllen. So gibt es zum Beispiel seit kurzem moderne hochfeste Klebstoffsysteme für den Leichtbau, die schnell aushärten und Bauteile mit exzellenten Langzeitbeständigkeiten, wie im Fahrzeug- und Flugzeugbau gefordert, erfolgreich strukturell verbinden.

Die Herstellung von verklebten Bauteilen mit einer hohen Leistungsfähigkeit erfordert eine stoffgerechte Fertigungstechnik, was sowohl für die Abläufe als auch für die Umgebung gilt, in der die Klebverbindungen hergestellt werden. Da die Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) in der Regel erst während des Fertigungsprozesses entsteht, haben die Fertigungsparameter in den meisten Fällen einen deutlichen Einfluss auf die Qualität der Verklebung. Hier liegt ein entscheidendes Unterscheidungsmerkmal zu den klassischen Verbindungstechniken wie zum Beispiel Schrauben oder Nieten, wo die Qualität der Verbindung nur im geringen Masse von dem eigentlichen Fügeprozess beeinflusst wird.

Die Mechanismen zum Aufbau der Adhäsion an der Werkstoffoberfläche und die Vorgänge bei den Langzeitbelastungen der Klebstoffe sind bis heute noch nicht vollständig aufgeklärt. Daher lassen sich Klebverbindungen nicht ganz exakt rechnerisch modellieren, was häufig als Nachteil empfunden wird. Jedoch ist es heute ohne Probleme möglich, nach sorgfältiger Planung, umfangreichem Nachweis der Belastbarkeit und Berücksichtigung der vorhandenen Erfahrungswerte geklebte Strukturen mit ausreichender Zuverlässigkeit sicher zu konzipieren.

2.2 Vor- und Nachteile des Klebens

Beim Kleben handelt es sich um ein stoffschlüssiges Fügeverfahren, wobei der Verbund nicht ohne Zerstörung lösbar ist. Hierbei wird ein Klebstoff als Zusatzwerkstoff eingesetzt, der als ein organisches Polymerprodukt wesentlich andere Eigenschaften als die bei den klassischen mechanischen Verbindungsverfahren eingesetzten metallischen Zusatzwerkstoffe aufweist. So sollte man sich bei der Planung einer Klebverbindung darüber im Klaren sein, dass ein Polymer in der Klebfuge seinen Dienst tut, das mit einer geringen Festigkeit ausgestattet ist und ein viskoelastisches Verhalten an den Tag legt. So weist es Verformungseigenschaften auf, die sich zeitabhängig und nicht linear verhalten. Auch können oberhalb einer Verformung von 1 % irreversible Werkstoffschäden entstehen, die sich bisher einer exakten mathematischen Beschreibung entziehen.

Kraftschlüssige Verbindungen, wie sie zum Beispiel bei Schrauben vorliegen, benötigen eine Normalkraft auf die miteinander zu verbindenden Flächen, die die gegenseitige Verschiebung verhindert. Diese Haftreibung ist der Grund da-



Abb. 2.1 Form- (quer zur Schiene) und kraftschlüssige Verbindungen (längs zur Schiene) bei einer Eisenbahnschiene (Foto: Dr. Jürgen Klingen, Aboso-Consulting).

für, dass sich die Schraube nicht zu drehen beginnt und der Verbund gelöst wird. Formschlüssige Verbindungen, wie zum Beispiel durch Nieten hergestellt, funktionieren durch das Ineinandergreifen von mindestens zwei Verbindungspartnern. Dadurch können sie sich nicht lösen, der eine Verbindungspartner steht dem anderen sozusagen im Weg (Abb. 2.1). Während bei den kraft- und formschlüssigen Verfahren die Verbindungsherstellung über definierte Formen und/oder Oberflächenstruktur der Fügeteile zustande kommt, liegen die Bindungsursachen bei den stoffschlüssigen Verfahren im Bereich der atomaren und/oder molekularen Ebene.

Gegenüber den klassischen Verbindungsmethoden wie Schrauben und Nieten entstehen beim Kleben keine durch Löcher verursachten Materialverletzungen. Die Spannungsverteilung ist gleichmäßig und die Dauerschwingfestigkeit sehr gut. Somit erlaubt die Klebtechnik eine optimale Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften. Für eine Bewertung des Klebens als stoffschlüssiges Fügeverfahren gegenüber den anderen ebenfalls infrage kommenden Verbindungsverfahren ist es auf jeden Fall erforderlich, die Vorteile und Nachteile der Klebtechnik zu diskutieren und gegeneinander abzuwägen.

Bei der Entscheidung, welches Fügeverfahren zum Einsatz kommen soll, spielt die jeweils erforderliche Wärmebelastbarkeit der Bauteile in der praktischen Anwendung oft eine wichtige Rolle. So kommen häufig Verfahrenskombinationen

zum Einsatz, wo die Vorteile der entsprechenden Verbindungsmethoden durch den Anwender genutzt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Kombination aus Punktschweißen und Kleben (Punktschweißkleben), was im großen Umfang in der Automobilindustrie eingesetzt wird. Hierbei sorgen die Schweißpunkte für die Wärmefestigkeit in Extremfällen sowie für die Stabilität der Verklebung während der Klebstoffaushärtung. Der Klebstoff dagegen stellt die Vermeidung von Korrosion bei der praktischen Langzeitbeanspruchung und eine gleichmäßige Kraftverteilung im Bauteil sicher.

Der Klebtechnik werden gegenüber den mechanischen Fügeverfahren folgende Vorteile zugeschrieben:

- *Keine Wärmebelastung der Werkstoffe*
Durch keine (wie bei Haftklebstoffen und raumtemperaturaushärtenden Systemen) oder eine vergleichsweise geringe Wärmezufuhr (wie bei warmaushärtenden Klebstoffen) treten im Vergleich zum Schweißen und Hartlöten keine Festigkeitsabnahmen der Werkstoffe auf. Weiterhin können durch gezielt eingesetzte Klebstoffsysteme Füge teilverformungen verursachende Wärmespannungen vermieden werden.
- *Fügen von unterschiedlichen Materialkombinationen*
Im Gegensatz zum Schweißen und Löten ist der Erfolg des Klebens nahezu unabhängig von der Art der Füge teile und bietet die Möglichkeit, Materialkombinationen sowohl aus metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen als auch Materialien mit sehr unterschiedliche Beanspruchungstemperaturen oder Oberflächenstrukturen (porös, glatt) zu verbinden.
- *Relativ gleichmäßige Spannungsverteilung im Bauteil*
Ursache hierfür sind das Fehlen von Materialschwächungen durch Niet- und Schraubenlöcher und die nicht durch Wärmeeintrag gestörte gleichmäßige Struktur der Füge teilwerkstoffe (Abb. 2.2).
- *Hohe dynamischen Festigkeit und hohe Schwingungsdämpfung*
Unter Wechselbelastung erlauben Klebschichten erhebliche elastische Deformationen, die hohe dynamische Beanspruchungen der Bauteile ermöglichen. Außerdem vermögen geklebte Verbindungen aufgrund des im Fügeverbund wesentlich geringeren Elastizitätsmoduls Schwingungen in den jeweiligen Bauteilen exzellent zu dämpfen.
- *Fügen von sehr wärmeempfindlichen Werkstoffen*
Ohne Einsatz der Klebtechnik wäre das Fügen von sehr wärmeempfindlichen Kunststoffen und Bauelementen in der Elektronik nur sehr bedingt möglich.
- *Einfaches Fügen von dünnen Substraten*
Durch Kleben können große Flächen verformungsfrei in einem Arbeitsgang verbunden werden, was zum Beispiel beim großflächigen Auftragen von Folien und der Verklebung von Wabenkernkombinationen große Vorteile bietet.
- *Gewichtersparnis im Leichtbau*
Im modernen Leichtbau ermöglicht das Kleben sowohl eine erhöhte Steifigkeit als auch eine gleichmäßigere Belastbarkeit und unterstützt so ein günstiges Verhältnis von Werkstofffestigkeit und spezifischem Gewicht.

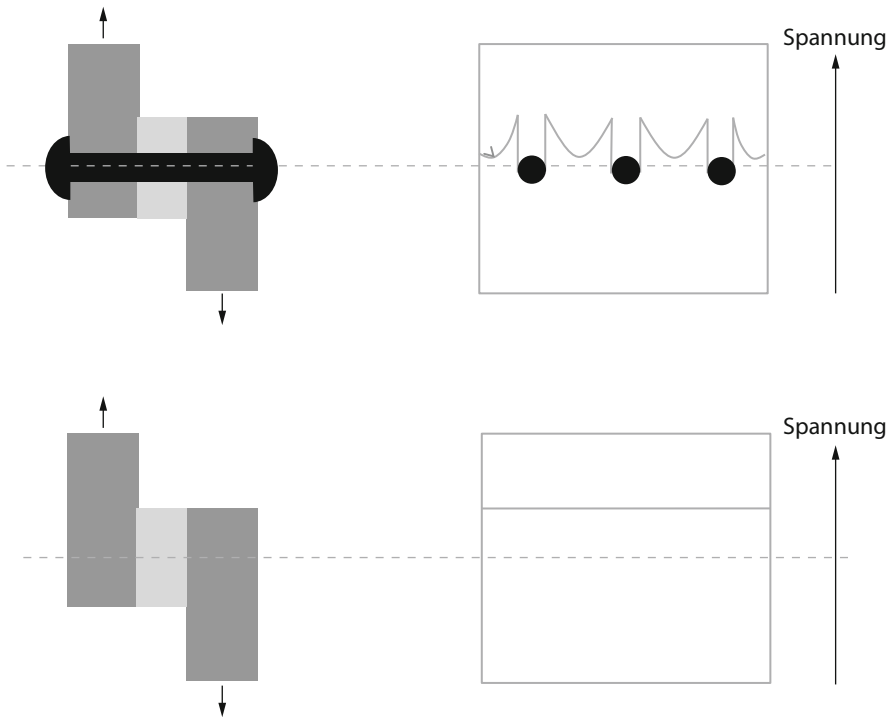


Abb. 2.2 Spannungsverteilungen in einer Niet- (ungleichmäßig) und Klebverbindung (gleichmäßig).

- *Elektrisch isolierend*
Die isolierende Wirkung der Klebschicht erwirkt, dass beim Fügen von Metallen ein direkter metallischer Kontakt zwischen den Fügeteilen und somit die Gefahr von Korrosion vermieden wird.
- *Festigkeitserhöhung beim Hybridfügen*
Bei dem sogenannten Hybridfügen übernimmt die Klebschicht eine Dichtungsfunktion und trägt so in hohem Maße durch Vermeidung der in aggressiver Umgebung auftretenden Spaltkorrosion zur Festigkeitserhöhung des Bauteils bei.
- *Automatisierung*
Der Klebstoffauftrag lässt sich durch Robotereinsatz sehr gut automatisieren, was schon über viele Jahre in der Automobilindustrie zum Beispiel beim Fügen von Autoscheiben in die Karosserie, Herstellen von Rohkarossen und dem Aufbringen von selbstklebenden Türdichtungen auf die Wagentüren hervorragend demonstriert wird.

Als Nachteile der Klebtechnik stehen dagegen:

- *Notwendigkeit der Oberflächenbehandlung der Fügeteile*
Insbesondere bei Klebverbunden mit hohen Ansprüchen an die Langzeitbeständigkeit ist eine oft aufwendige Oberflächenvorbehandlung der zu verklebenden Werkstoffe notwendig. Die Reinigung und Entfettung der Oberfläche

ist aber auch bei einfachen klebtechnischen Aufgabenstellungen eine notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Verklebung.

- *Vollständige Beherrschung des Herstellungsprozesses*
Da der Anwender bei der Herstellung eines Klebverbundes nicht in der Lage ist durch Untersuchungen während des laufenden Prozesses und auch danach eventuell auftretende Fehler nachzuweisen, muss der eingesetzte Herstellungsprozess zu 100 % beherrscht werden.
- *Begrenzte thermische Beständigkeit*
Klebstoffe liegen im Bauteil als viskoelastische Polymeren vor, die bei stark erhöhten Temperaturen nichtlinear verformt werden, was zur Zerstörung des Klebverbundes führen kann. Dadurch sind sie bei hohen Temperaturen den bei den mechanischen Fügeverfahren eingesetzten Metallen unterlegen.
- *Verzögertes Erreichen der Endfestigkeit*
Kleben benötigt mehr Zeit als alternative Fügetechnologien und die meisten Systeme liegen erst nach einem gewissen Zeitraum als Klebschichten mit ihrer vollen Endfestigkeit vor. Ausnahmen bilden die Schmelz- beziehungsweise Haftklebstoffe.
- *Alterung der Kleb- und Grenzschicht*
Durch die Umgebungsbedingungen kann eine zeitabhängige negative Beeinflussung der Klebschicht beziehungsweise der Grenzschicht erfolgen, was mit einer Abnahme der Haftkräfte verbunden ist.
- *Recycling*
Die mechanischen Fügeverfahren haben beim Recyceln einen Vorteil, da die Fügebauteile sozusagen „auf Knopfdruck“ getrennt werden können. Das ist bei Klebverbunden nicht möglich, jedoch erfolgt die thermische Entsorgung von verklebten Bauteilen problemlos.

2.3 Kleben in Industrie und Handwerk

Für die moderne Fertigung von Produkten in Industrie und Handwerk gewinnt die Klebtechnik immer mehr an Bedeutung. Der Bedarf an Klebstoffen für das Verbinden unterschiedlichster Materialien und für verschiedenste Belastungen und Einflüsse der Klebverbunde in der praktischen Anwendung hat zur Entwicklung einer breiten Produktpalette von strukturellen und elastischen Klebstoffen geführt. Ergänzend dazu werden Haftklebeprodukte, meist auf Kautschuk- und Acrylatklebstoffbasis, angeboten, die dem Anwender bei klebtechnischen Aufgabenstellungen zum Beispiel beim Schützen von Produkten, Spleißen im Produktionsprozess, Markieren beziehungsweise Kennzeichnen von Teilen und beim Dämpfen von Geräuschen unterstützen und ihm so eine erhöhte Flexibilität und effiziente Fertigung erlauben.

Insbesondere im Metallhandwerk werden ständig steigende Anforderungen an Konstruktion und Design gestellt. Um diese Anforderungen zu erfüllen, bietet sich das Kleben oft als geeignete Fügechnik an und weist gegenüber den klassischen Fügeverfahren wie Schrauben, Nieten und Schweißen einige Vorteile auf. So ist es beispielsweise durch Einsatz der Klebtechnik möglich, verschiedene Werkstoffe problemlos miteinander zu kombinieren. Auch dienen Klebstoffe oft

nicht nur dem Fügen zweier Bauteile, sondern erfüllen auch zusätzliche Funktionen wie Dichten, Korrosionsschutz, Isolierung gegen Elektrizität und Wärme sowie Dämpfen von Schwingungen.

So bietet das Kleben im Metallbau eine Vielzahl von Möglichkeiten. Hochfeste Klebstoffe werden zum Beispiel für strukturelle Bauteile sowie Schraubensicherungen, Welle-Nabe-Verbindungen beziehungsweise zum Gewinde- und Flächendichten herangezogen. Elastische Klebstoffe sorgen bei Metallverkleidungen, Fassaden und Dachelementen für die Beständigkeit gegenüber Schlag- und Biegebeanspruchungen sowie Widerstandsfähigkeit gegen Wärmeausdehnung, Vibration und Schrumpfung.

Zur Herstellung von festen Verbindungen zwischen den unterschiedlichsten Materialien in Industrie und Handwerk werden klassisch Einkomponentenklebstoffe (1K-Klebstoffe) beziehungsweise Zweikomponentenklebstoffe (2K-Klebstoffe), aber heute auch immer mehr doppelseitige Schaumklebebänder eingesetzt. Hierbei erzielen schon bei Raumtemperatur aushärtende Klebstoffe selbst auf niederenergetischen Oberflächen wie Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) strukturelle Festigkeiten und erfüllen Anforderungen, die lange ausschließlich von mechanischen Verbindungstechniken wie Schrauben, Nieten oder Punktschweißverbindungen erfüllt werden konnten. So werden heute im Markt flexibel, hart oder zähelastisch eingestellte Epoxid-, PU- und Acrylatklebstoffsysteme zum vielseitigen Kleben von Metallen wie Stahl, Aluminium, Kupfer oder Messing und vielen Kunststoffen wie Polycarbonat (PC), Polyvinylchlorid (PVC), Polymethylmethacrylat (PMMA), Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) oder glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) sowie für Glas, Keramik und Holz angeboten.

Durch die immense Entwicklungsarbeit in den letzten Jahren können mechanische Befestigungen jedoch nicht nur durch Klebstoffe, sondern auch immer mehr durch Hochleistungsklebebänder ersetzt werden. Durch ihre gute Soforthaftung, direkte Weiterverarbeitungsmöglichkeiten, spannungsfreie Verklebung auf unterschiedlichsten Materialien sowie relativ hoher Temperaturbeständigkeit haben sie sich zu einer sicheren, zuverlässigen und leistungsfähigen Alternative zu den flüssigen Klebstoffen entwickelt, die oft auch in puncto Wirtschaftlichkeit die Nase vorn hat.

2.4 Moderne Klebstoffsysteme für Industrie und Handwerk

Für Anwendungen in Industrie und Handwerk steht eine unüberschaubare Vielzahl verschiedener Klebstoffsysteme zur Verfügung, die sich in ihren Darreichungsformen, Verarbeitungseigenschaften und ihren Festigkeits- beziehungsweise Beständigkeitseigenschaften oftmals wesentlich unterscheiden (Abb. 2.3).

Dabei erfolgt die Beschreibung der Klebstoffprodukte im täglichen Sprachgebrauch häufig nach folgenden Kriterien:

- *Anwendungsmöglichkeiten*, wie beim Montage-, Etikettier- oder Metallklebstoff, Holzleim, Tapetenkleister oder Abdeckklebeband,

- *verarbeitungstechnischen Kriterien*, wie beim Haft-, Schmelz-, Kontakt-, Sekunden-, Lösungsmittel- oder 2K-Klebstoff,
- *Verarbeitungstemperatur*, wie beim Kaltleim, raumtemperatur- oder wärmehärtenden Klebstoffen,
- *Aushärtemechanismus*, wie beim anaeroben, feuchtigkeitsaushärtenden, UV-, Reaktions- oder Schmelzklebstoff,
- *Lieferform*, wie bei der Klebstoffolie, Klebeband beziehungsweise -zettel, Leimpulver oder Lösungsmittelklebstoff sowie
- *chemische Basis*, wie beim Epoxid-, Acrylat-, Cyanacrylat-, Silikon oder PU-Klebstoff.

Konstruktionsklebstoffe

Die für die Konstruktion von Bauteilen eingesetzten 1K- und 2K-Klebstoffe sind lösemittelfrei und härten bei erhöhter Temperatur (1K-Klebstoffe) oder bei Raumtemperatur (2K-Klebstoffe) aus, wobei die Härtung bei den 2K-Klebstoffen durch die Zuführung von Wärme, zum Beispiel bei 70 °C für 120 min, beschleunigt werden kann.



Abb. 2.3 Eine begrenzte Auswahl an Klebstoffen für Kleinanwendungen in Industrie und Handwerk (Foto: Dr. Jürgen Kligen, Aboso-Consulting).