

## › Fünf Schritte für eine erfolgreiche Anwendung der Klebtechnologie

# Ein Leitfaden für die Praxis

Das Kleben ist eine der ältesten und wichtigsten Verbindungstechniken der Menschheit. Der älteste von Menschen eingesetzte Kleb- und Dichtstoff ist vermutlich die tonhaltige Erde, die für den Bau von Hütten verwendet wurde. Später kamen Asphalt (Erdpech), Baumharz und Holzteer (Bild 1) dazu, die vor allem für den Bau von Waffen und Werkzeugen ihre Anwendung fanden.

› **Prof. Dr. Pierre Jousset<sup>1</sup>**  
**Prof. Dr. Markus Henne<sup>2</sup>**  
**Prof. Dr. Niedermeier<sup>3</sup>**

Ca. 1500 vor Chr. gewannen die Ägypter aus einem Sud aus Sehnen, Knorpel und anderen tierischen Abfällen einen Klebstoff für furnierte Schreinerarbeiten. Seit der Antike ist der Berufsstand des Leimsieders bekannt. Aus dieser Zeit stammen auch die Begriffe «Kolla» oder «Glutinum». Später gewann die Klebtechnik im Zusammenhang mit dem Buchdruck wieder an Bedeutung: Die immer zahlreicheren Bücher mussten gebunden und mit stabilen Deckeln und Rücken versehen werden. Mit der Industrialisierung erfuhr die Klebtechnik einen regelrechten Aufschwung: Mit dem Patent zur Phenolharz-Härtung von Baekeland brach das Zeitalter der synthetisch hergestellten Klebstoffe an. Chemiker, Physiker und Ingenieure setzten sich mit den Wirkungen von Adhäsions- und Kohäsionskräften auseinander und erforschten den makromolekularen Aufbau der klebenden Substanzen. Die neu entwickelten Klebstoffe besitzen vielfältige Funktionen: Sie übertragen beispielsweise mechanische Lasten, gleichen Toleranzunterschiede aus, mindern korrosive Effekte, etc.

<sup>1</sup> Prof. Dr. Pierre Jousset, Fachbereichsleiter Verbindungstechnik, IWK, HSR Rapperswil

<sup>2</sup> Prof. Dr. Markus Henne, Fachbereichsleiter Mechanische Systeme, IWK, HSR Rapperswil

<sup>3</sup> Prof. Dr.-Ing. Michael Niedermeier, Leiter Steinbeis-Innovationszentrum Werkstoff- und Oberflächentechnologie Friedrichshafen und Leiter Werkstoffprüflabor der Hochschule Ravensburg-Weingarten RWU  
 niedermeier@stz-werkstoffe.de



Bild 1: Im Eintopfverfahren hergestelltes Birkenpech [1]

Im Alltag wird die Klebtechnik bereits im Kindesalter für Bastelarbeiten angewendet. Empirisch erfährt der Anwender, auf welchen Materialien und Oberflächen Klebstoffe haften, wie lange sie brauchen, um sich zu verfestigen und wie gut ihre Beständigkeit z.B. gegenüber Wasser ist. Diese Erfahrungen prägen das Bild der Klebtechnik – vor allem durch die Misserfolge entstehen Vorbehalte gegenüber der Zuverlässigkeit von Klebstoffen.

Auch aus dem Bereich der Bekleidung treten Klebverbindungen vor allem in den Fokus, wenn sie bereits versagt haben (Bild 2). Bei ordnungsgemäßer Funktion werden die kaschierten Klebstellen kaum beachtet.

Diese Erfahrungswerte lassen sich aber in keiner Art und Weise auf technische Klebverbindungen übertragen. Durch eine professionelle Vorgehensweise bei der Entwicklung von Klebverbindungen können die Nachteile überwunden und zusätzliche Vorteile generiert werden, welche keine andere Verbindungstechnologie mit sich bringt.

Dieser Artikel zeigt in fünf Schritten auf, welche Kriterien berücksichtigt werden müssen, damit eine erfolgreiche Verklebung entsteht:



Bild 2: Unerwünschtes Versagen einer Klebverbindung an einem Schuh

## 1. Entscheidungsprozess im Produktentwicklungsprozess

Eine Klebverbindung wird bei der Auslegung eines Produktes oder einer Struktur oft nicht in Betracht gezogen. Der Grund dafür ist mangelnde Erfahrung bei der Auslegung von Klebverbindungen, fehlende Kenntnis über die mechanischen Eigenschaften von Klebstoffen oder Zweifel an der Reproduzierbarkeit bzw. der Zuverlässigkeit des Klebprozesses. In Folge wird eine Klebverbindung vermieden oder aufgrund des Risikos eines Versagens grundsätzlich ausgeschlossen. Dies führt oft dazu, dass in einer frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses falsche Entscheidungen hinsichtlich der Verbindungstechnologie getroffen werden.

Zusätzlich bringt die Klebtechnologie neben der strukturmechanischen Verbindung von zwei Bauteilen folgende Vorteile mit sich:

- Eine Klebverbindung kann so gestaltet werden, dass sie kaum sichtbar ist. Dies eröffnet neue Möglichkeiten der Gestaltung eines Produkts.
- Die geklebte Verbindung dient zusätzlich als Dichtung gegenüber Staub und/oder Fluiden
- Die Elastizität der (Dickschicht-)Verklebung dämpft Vibrationen.

- Durch das Spaltmass in der Klebstelle kann ein Toleranzausgleich an den Fügestellen erzielt werden.
- Es können unterschiedlichste Materialien zu Multimaterialstrukturen gefügt werden.
- Die Klebschicht garantiert eine galvanische Entkopplung zwischen den beteiligten Materialien mit unterschiedlicher Elektronegativität und dient so als Korrosionsschutz.
- Ausgleich von unterschiedlichen Temperaturexpansionen von benachbarten Substraten
- Durch die linienförmige oder flächige mechanische Anbindung der Bauteile, wird der Kraftfluss weniger gestört (Reduktion von Spannungskonzentrationen).

Oft sind diese umfangreichen Anforderungen an die Fügestelle gar nicht explizit bekannt. Ist aber ein Punkt oder sind mehrere Punkte der oben aufgeführten Kriterien gefordert, drängt sich das Kleben als Verbindungstechnik auf.

Zur Veranschaulichung einer innovativen Klebertechnologie wird die Verklebung eines Busdaches betrachtet (Bild 3): Dabei wird das vorgefertigte Dach mit ca. 12 m Länge in Sandwichbauweise (Aluminium-Strukturschaum-Aluminium) mit einer Dickschichtverklebung auf die Stahlkarosserie des Busses geklebt. Die Dickschichtverklebung überträgt nicht nur die mechanischen Lasten, sondern dient dem Ausgleich von Toleranzen, erlaubt die Kompensation der unterschiedlichen Wärmedehnungen von Stahl und Aluminium und garantiert eine galvanische Entkopplung der Fügepartner als Korrosionsschutz.



Bild 3: Viskoelastische Dickschicht-Verklebung der Unterseite eines vormontierten Busdaches mit dem Klebstoff SikaForce Powerflex [2]



Bild 4: Verklebung einer Aluminium-Ronde mit Gewindestift auf Faserverbundkunststofflaminat (CFK) [3]

## 2. Gestaltung im Konstruktionsprozess

Die Gestaltung der Klebstelle wird im Konstruktionsprozess nicht ausreichend berücksichtigt. Eine optimale Gestaltung einer Verklebung ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig: Nicht nur die Geometrie und Materialisierung der Fügepartner muss berücksichtigt werden, sondern auch der Ort und die Abmessungen der Klebverbindung, damit kein Klebstoffversagen auftritt. Klebstoffe sind aus Polymeren und Füllstoffen aufgebaut, deren mechanisches Verhalten von der Belastungsrichtung abhängig ist. Bei der Gestaltung der Klebverbindung ist besonders zu beachten, dass der Klebstoff hauptsächlich auf Scherung belastet werden soll. Die kritischen Schälbelastungen sind zu vermeiden. Demzufolge kann der Verlauf der Klebnaht entscheidend für den Erfolg einer Verklebung sein.

Im Produktentwicklungsprozess definiert also nicht nur das Bauteil die Fügestelle, sondern auch umgekehrt: So kann ein

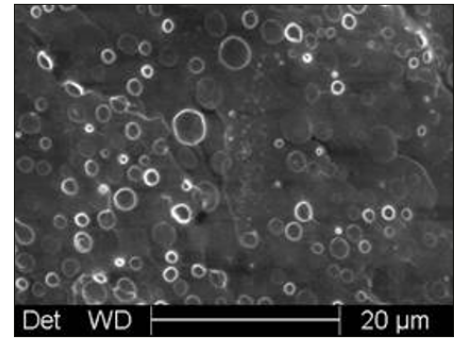


Bild 5: Weiche Polymerteilchen in der Epoxidharzmatrix eines strukturellen zähmodifizierten Klebstoffes [4]

Bauteil unter diesem Aspekt eine ganz andere Form und Gestalt annehmen als sich auf den ersten Blick anbietet.

Als Beispiel der gestaltbasierten klebtechnischen Krafteinleitung ist ein Aluminium-Insert in Bild 4 dargestellt. Der Insert wird aus einem Aluminiumblech geformt, welcher die punktuelle Last des Gewindestiftes flächig in den Faserverbundwerkstoff einleitet, um eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung zu erzielen. Die Verbindung zum Substrat wird über eine Epoxid-Dünnschichtverklebung realisiert, wobei die Klebstoffdicke von 0,2 mm über Distanzelemente gewährleistet ist.

## 3. Klebstoffauswahl

Klebstoffe können sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen. Dabei muss zwischen der viskoelastischen «toleranzausgleichenden» Dickschichtverklebung und der festigkeitsoptimierten Dünnschichtverklebung unterschieden werden.

Strukturelle Verbindungen, welche eine hohe Festigkeit haben sollen, werden meistens mit Epoxid-Klebstoffen realisiert. Dabei handelt es sich um Dünnschichtverklebungen mit Klebstoffdicken < 1 mm, welche kaum Verformungen aufnehmen können. Im Gegensatz dazu, haben elastische Verklebungen eine viel kleinere Steifigkeit und Festigkeit. Der Klebspalt beträgt dabei mehrere Millimeter, was eine gewisse Verformbarkeit zulässt. Zudem werden sie, wie bereits oben erwähnt, als Dichtmasse und zur Kompensation von thermischen Ausdehnungen und Fertigungstoleranzen der Fügepartner eingesetzt. Als Klebstoffe werden hier vorwiegend Polyurethane oder Silikone verwendet. Durch

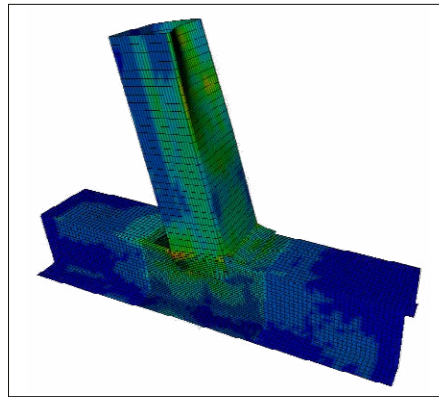


Bild 6: Validierung des mechanischen Verhaltens einer strukturellen Klebverbindung unter stossartiger Belastung, anhand Digital Twin einer T-Stoss Fallstudie

die vielfältigen Möglichkeiten der Modifikation von Klebstoffen ist der Übergang zwischen den oben genannten Gruppen fließend: Die chemische Formulierung der Klebstoffe kann für eine Anwendung und der damit zusammenhängenden Anforderungen spezifisch eingestellt werden.

Folgende Modifikationen sind möglich:

- Beifügen von Nanopartikeln zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften.
- Beifügen von Füllstoffen zur Beeinflussung der Viskosität, der Festigkeit und der Schlagzähigkeit (Bild 5).
- Beifügen von Glaskugeln, welche als Distanzhalter, zur Einhaltung des minimal erforderlichen Klebspalts, eingesetzt werden. Die Erfahrung zeigt, dass die Glaskugeln die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffes nicht beeinflussen.

#### 4. Strukturmechanische Auslegung

Die Auslegung von Klebverbindungen ist sehr aufwändig und ohne Erfahrung mit grossen Unsicherheiten behaftet. Für Klebstoffanwender sind viele Fragen bezüglich der Auslegung zu beantworten, wie z.B.:

- Wo ist die optimale Fügestelle und was sind die idealen Abmessungen (Länge, Breite, Dicke) der Klebverbindung, damit sie den realen Belastungen standhalten kann?
- Wie kann eine geforderte Lebensdauer der Klebverbindungen gewährleistet werden?

Um diese Fragen zu beantworten, gibt es zwei Ansätze: Der erste Ansatz basiert auf analytischen Methoden, die eine schnelle

und konservative Auslegung von Klebverbindungen ermöglichen. Kritische Spannungen werden anhand von Vergleichsspannungshypothesen berechnet und die Sicherheit ist durch die Verwendung von Sicherheits- und Abminderungsfaktoren gewährleistet. Diese Faktoren können aus Normen entnommen werden oder beruhen auf der Erfahrung des Anwenders.

Solche Methoden sind zum Beispiel für die Auslegung elastischer Klebverbindungen verbreitet und finden ihre Anwendung unter anderem im Schienenfahrzeugbau.

Der zweite Ansatz basiert auf numerischen Methoden, wie z.B. der Finite-Elemente-Methode. Dabei wird die Klebschicht durch Elemente oder als Kontakt zwischen zwei Bauteilen definiert. Eine mathematische Funktion, das sogenannte «Material konstitutive Modell» wird verwendet, um das mechanische Verhalten der Klebschicht zu beschreiben. Abhängig vom Problem kann das Materialmodell entweder rein linear elastisch oder auch viel komplexer sein, um Effekte wie Plastizität, Schädigung, Bruch, Dehnratenabhängigkeit, Kriechen und Relaxation, Einfluss der Temperatur, der Festigkeit sowie der Ermüdung des Klebstoffes zu berücksichtigen.

Dabei sind die Schwierigkeiten vielfältig: Erstens muss man ein geeignetes konstitutives Modell finden oder implementieren, welches fähig ist, für einen gewissen Klebstoff, die gewünschten Effekte zu beschreiben. Zweitens muss man die vom Materialmodell benötigten Materialparameter kalibrieren. Dieser Kalibrierungsprozess benötigt Laborprüfungen und es ist nicht immer möglich, die Parameter direkt aus den Prüfungsergebnissen zu bestimmen. Hier wird ein effizienter inverser

Identifikationsprozess benötigt, bei welchem die Parameter durch die Übereinstimmung der realen und der numerischen Ergebnisse angeglichen werden. Am Ende des Prozesses muss das Potenzial des kalibrierten Materialmodells mit einer Fallstudie verifiziert werden. In dieser Fallstudie wird eine Klebverbindung in einer Realstruktur simuliert und im Labor geprüft. Die Übereinstimmung der experimentellen und numerischen Ergebnisse bestätigt die Tauglichkeit des Materialmodells, das reale Verhalten der Klebverbindung vorhersagen zu können. Heute spricht man dabei von sogenannten «Digital Twins» (Bild 6).

Für eine erfolgreiche Auslegung ist ein Erfahrungsschatz von grossem Nutzen: Nur so gelingt eine effiziente und effektive Dimensionierung der Verbindungsstelle mit numerischen Methoden. Es bietet sich also an, Experten beizuziehen, welche diese einschlägige Erfahrung mitbringen. Das gesamte Paket – numerische Simulation, Laborprüfungen und Parameteridentifikation – ist dabei unabdingbar.

#### 5. Oberfläche und Applikationstechnologie

Die mechanischen Eigenschaften von Klebverbindungen werden massgeblich von der Oberfläche, respektive der Oberflächenvorbehandlung der Fügepartner beeinflusst. Das Ziel ist dabei, einen kohäsiven Bruch des Klebstoffes zu erhalten, bei welchem die maximalen mechanischen Eigenschaften des Klebstoffes ausgenutzt werden. Im Gegenteil dazu muss ein adhäsiver Bruch zwischen dem Klebstoff und des Substrats vermieden wer-



Bild 7: Plasma-Oberflächenvorbehandlung zur Verbesserung der Adhäsion

den. Um dieses Ziel zu erreichen ist es zwingend erforderlich, die Füge­teile zu reinigen, vorzubehandeln und zu beschichten. Dabei sind Sandstrahlen, die Vorbehandlung mit Aktivator­en oder Primern und die Aktivierung mit einer Plasma- oder Beflammungsanlage nur einige der Möglichkeiten, welche zur Verfügung stehen (Bild 7). Nach diesen Arbeitsschritten muss der Klebstoff auf die Substrate aufgebracht werden. Die Applizierung kann mithilfe von Robotern vollständig automatisiert werden und eignet sich sehr gut für die industrielle Fertigung. Auch die Reinigung und die Vorbehandlung von Substraten lässt sich automatisieren und ist in der Industrie Standard. Die einzelnen Verarbeitungsschritte sind klebstoffabhängig und können hier nicht generalisiert dargestellt werden. Auch hier bietet es sich an, die Expertise von dritten beizuziehen. Der Applikationsprozess, kann auch die Konstruktion der beteiligten Bauteile entscheidend beeinflussen. Zum Beispiel braucht ein Klebstoff mit einer langen Aushärtungszeit ein System, um die verklebten Substrate nach der Verklebung und bis zum Ende der Aushärtungszeit zu fixieren. Das kann mit Klammern oder mit zusätzlichen mechanischen Verbindungen, wie z.B. Schweißpunktverbindungen, erreicht werden. Umgekehrt müssen hochreaktive Klebstoffe in einer limitierten Zeit aufgebracht werden, d.h. es muss ein geeigneter Applikationsprozess entwickelt werden. Bild 8 zeigt eine Vorrichtung, welche gleichzeitig drei Raupen eines Klebstoffs aufbringt.

Die erfolgreiche Realisation einer strukturellen Klebverbindung hängt in ent-

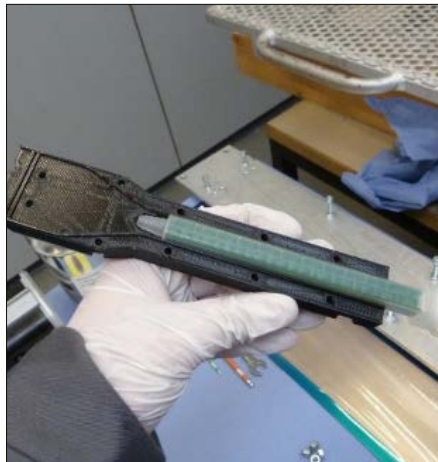
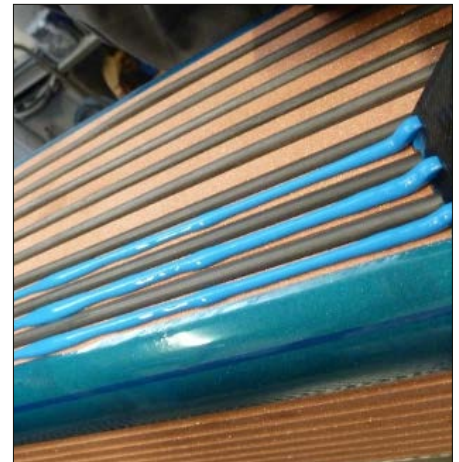


Bild 8: Entwicklung einer Klebdüse zur schnellen und simultanen Aufbringung mehrerer Klebstoffraupen [5]

scheidender Weise von diesen fünf Schritten ab: der Evaluation von Klebverbindungen in der frühen Phase der Produktentwicklung, der klebgerechten Gestaltung im Konstruktionsprozess, der Klebstoffauswahl in Abhängigkeit der Fügepartner, der strukturmechanischen Auslegung und letztlich der Applikationstechnologie.

Das Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung IWK der Hochschule für Technik Rapperswil (HSR) und das Steinbeis-Innovationszentrum Werkstoff- und Oberflächentechnologie Friedrichshafen besitzen ausgewiesenes Know-how und eine moderne Infrastruktur im Bereich der Klebstofftechnik, d.h. der Analytik, Applikationstechnik, Prüftechnik und Simulation mit all ihren Herausforderungen und bieten ihre Unterstützung an bei der Auslegung von Klebverbindungen.



#### Bildverzeichnis:

- [1] Im Eintopfverfahren hergestelltes Birkenpech, Jorre, 2008 06 30, Creative Commons
- [2] Verklebung der Unterseite eines vormontierten Busdaches mit dem Klebstoff SikaForce Powerflex, Sika, 2019
- [3] Henne Markus, Niedermeier Michael, Strukturelle Krafteinleitungselemente für kontinuierlich faserverstärkte Kunststoffe, Schlussbericht Innovationsprojekte Baden-Württemberg und Gebert-Rüf-Stiftung Schweiz, April 2009
- [4] Bildquelle und Genehmigung: Sika AG
- [5] Gestaltung einer Klebverbindung bei der Gestaltung einer Kokille (Innosuisse Projekt IWK/SMS Concast)

#### Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung  
Oberseestr. 10  
CH-8640 Rapperswil  
+41 55 222 47 70  
iwk@hsr.ch, www.iwk.hsr.ch

## Polyurethan, der Konstruktionswerkstoff für anspruchsvolle Formteile

Die **Emaform AG** unterstützt sie zielorientiert, kompetent und zuverlässig von der Entwicklung über den Prototypenbau bis zum lackierten Formteil oder der montierten Baugruppe.

- Grosse Freiheiten bei der Formgebung
- Integrieren von Funktionen
- Hohe Wiederholgenauigkeit
- Hochwertige Oberflächen
- Gute Chemikalienbeständigkeit
- Kleine bis mittlere Stückzahlen
- Kundenspezifische Logistikkösungen



**emaform ag**

Zetzwilerstrasse 760  
CH-5728 Gontenschwil  
Schweiz  
Tel. +41 62 767 20 00  
Mail: info@emaform.ch  
Web: www.emaform.ch