

# Strukturelles Kleben

Dr.-Ing. Wolfgang Fleischmann  
Henkel AG & Co. KGaA

28. April 2010

## 1 Einführung

Der Begriff „Strukturklebstoff“ wird im allgemeinen Sprachgebrauch für hoch belastete Klebstoffe verwendet, die dauerhafte Klebeverbindungen gewährleisten müssen und im Versagensfall erhebliche Schäden an Personen, Sachwerten oder Umwelt verursachen können. Die Anforderungen an eine Strukturklebung werden in der Regel durch technische Spezifikationen vorgeschrieben. Diese enthalten neben einer detaillierten Charakterisierung des Klebstoffes auch Angaben zur geforderten Festigkeit unter Betriebsbedingungen, wie beispielsweise Belastungsart und Belastungsgeschwindigkeit, Betriebstemperaturen und Umgebungsmedien, Lebensdauer der Verbindung, sowie Angaben zu den gewünschten Verarbeitungs- und Prozessbedingungen. Zur Sicherstellung der geforderten Funktionalität erfolgt eine Auslegung der Verbindung nach ingenieurtechnischen Prinzipien, die Berechnung und experimentelle Validierung beinhalten. Qualitätssicherungsmaßnahmen begleiten den Herstellungsprozess um eine einwandfreie Fertigung der Verbindung sicherzustellen.

## 2 Strukturklebstoffe – Eine Übersicht

Chemisch reagierende Polymersysteme bilden die Basis für Strukturklebstoffe. Die Aushärtereaktion kann durch Zufuhr von Wärme, Vermischen von Harz und Härter, Luftfeuchtigkeit oder UV-Strahlung erfolgen. Bei anaeroben Klebstoffen wird die Abbindereaktion durch Metallionen und Sauerstoffausschluss erzeugt.

Die wichtigsten Strukturklebstoffe sind:

- Epoxidharze
- Anaerobe Klebstoffe
- Phenolharze
- Cyanacrylate
- Methlymethacrylate
- Polyurethane
- Silikone

In diesem Beitrag sollen nur die Epoxidharze und anaeroben Klebstoffe näher betrachtet werden.

## **2.1 Epoxidharzklebstoffe**

Epoxidharzklebstoffe besitzen sehr hohe Festigkeiten. Sie gehören zu den am meisten verbreiteten Klebstoffen für strukturelle Klebungen. Ob im Fahrzeug- oder Flugzeugbau sowie im Bausektor, Epoxidharzklebstoffe trifft man überall. Ihr großer Vorteil liegt darin, dass sie sich für Metallklebung eignen und darüber hinaus auch auf vielen Kunststoffen eine gute Haftung aufweisen. Sie besitzen eine sehr gute Beständigkeit gegen physikalische und chemische Einflüsse, zeigen allerdings im Allgemeinen vergleichsweise geringe Flexibilität. Für schlagbelastete Verbindungen wurden deshalb zäh-elastische Varianten entwickelt. Dabei werden gummielastische Polymere in den Klebstoff eingebracht, die bei der Aushärtung Kügelchen im  $\mu\text{m}$ -Bereich bilden. Das Versagen einer Klebeverbindung erfolgt durch das stetige Wachsen von Rissen in der Klebstoffmatrix und die Gummipartikel wirken als Rissstopper. Als Duomere zeigen Epoxide nur eine geringe Neigung zum Kriechen und zeichnen sich durch eine hohe Langzeitbeständigkeit aus. Je nach Typ halten sie einer Temperaturbelastung zwischen 100 °C und max. 200 °C auf Dauer stand.. Ein weiterer Vorteil von Epoxiden ist der geringe Härtungsschrumpf. Damit erzielt man geringe Eigenspannungen im Klebstoff, wie auch die Unterdrückung von Durchschlagseffekten, die insbesondere bei der Verklebung von dünnwandigen Blechen auf Stützkonstruktionen bedeutsam ist. Epoxidharzklebstoffe sind als warmhärtende 1- komponentige, kalthärtende 2- komponentige oder reaktive Hotmelt Systeme verfügbar.

Bei **1-K Epoxidharzklebstoffen** handelt es sich um Systeme, bei denen schon bei der Herstellung Harz- und Härterkomponente im korrekten Verhältnis miteinander vermischt werden und die erst nach Temperaturerhöhung reagieren. Diese Systeme werden als einkomponentige, reaktionsfähige Prepolymersysteme geliefert. Die Aushärtung bei Raumtemperatur wird entweder durch ein erst bei höherer Temperatur wirksames Katalysatorsystem oder durch Auswahl einer erst bei höherer Temperatur reaktionsfähigen

zweiten Amin-Komponente verhindert. Die Temperaturschwelle für die Initiierung der Reaktion kann anwendungsspezifisch formuliert werden und beginnt bei etwa 80 °C. Sonderprodukte für die Elektronikindustrie reagieren schon bei niedrigeren Temperaturen, erfordern jedoch bis zur unmittelbaren Verarbeitung die Einhaltung einer durchgängigen Tiefkühlkette mit Lagertemperaturen von -40 °C. Im Karosseriebau hingegen liegt die Reaktionstemperatur der Klebstoffe im Bereich von 140 – 180 °C, da hier die Klebstoffaushärtung mit der KTL Lacktrocknung kombiniert wird.

Die **kalthärtenden 2-K-Epoxidharzsysteme** bestehen aus einer Harz Komponente und einer Härter Komponente. Als Epoxidharz werden Polymerbausteine verwendet, die an den Molekülen die sogenannte Epoxidgruppen tragen. Meist werden dazu die Reaktionsprodukte aus Bisphenol-A und Epichlorhydrin eingesetzt, die nach dem Vermischen mit dem Härter, der Amino- oder Mercaptogruppen enthält, einen stabilen Duroplasten bilden. Diese Systeme härten je nach Formulierung der Klebstoffkomponenten über einige Minuten bis hin zu einigen Tagen bei Raumtemperatur aus. Beim Festlegen der Ansatzmenge muss, wie bei allen 2-k-Systemen beachtet werden, dass die chemische Aushärtungsreaktion sofort nach dem Zusammengeben und dem Vermischen der Komponenten beginnt. Mengen die nicht innerhalb der Topfzeit verarbeitet werden können, müssen entsorgt werden. Eine Anhebung der Temperaturen bewirkt auch bei 2-komponentigen Systemen zum einen eine Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit, zum anderen kann eine weitere Vernetzung der Epoxidgruppen erfolgen, was zu einer Steigerung von Festigkeit und Beständigkeit der Klebung führt.

**Epoxidharz-Schmelzklebstoffe** sind reaktive Schmelzklebstoffe und werden direkt vor der Verarbeitung in der jeweilig benötigten Menge aufgeschmolzen und bei Temperaturen zwischen 60 und 80 °C aufgetragen. Bereits während der Abkühlung der Klebstoffe verfestigen sich diese und machen eine Handhabung möglich. Nach dem Abbinden bilden sich Duromere, und damit ein nicht wieder schmelzbares Polymernetzwerk. Sie besitzen im Vergleich zu den thermoplastischen Schmelzklebstoffen eine wesentlich höhere innere Festigkeit. Einsatz finden diese Systeme vorwiegend im Automobilbau.

## **2.2 Anaerobe Klebstoffe**

Anaerobe Klebstoffe basieren auf modifizierten Acrylsäure-Estern, z. B. TEGMA (Tetraethylglykoldimethacrylat). Es handelt sich um 1-komponentige Klebstoffe, die nicht gemischt werden müssen, ebenso sind keine Topfzeit zu beachten. Sie härten unter Ausschluss von Sauerstoff und Anwesenheit von Metallionen aus. Die Vernetzung läuft nach dem Mechanismus einer radikalischen Polymerisation ab. Solange Sauerstoff vorhanden ist, wird diese Reaktion inhibiert, indem die Radikale durch Sauerstoff abgefangen werden und so nur reaktionsträge Peroxid-Radikale gebildet werden. In diesem Zustand liegt der Klebstoff im

Anlieferungszustand vor. Um nicht vorzeitig auszuhärten, muss der Klebstoff bis zum Gebrauch in seiner Verpackung Kontakt mit Sauerstoff haben. Hierzu bedient man sich luftdurchlässiger Kunststoffflaschen, die nur halb gefüllt werden.

Wird der Klebstoff in eine enge Klebfuge zwischen zwei Substraten eingebracht, so wird er durch die Geometrie der Füge Teile von der Umgebungsluft abgeschlossen. Damit liegen sauerstofffreie Verhältnisse vor und die Reaktion kann beginnen. Für einen raschen Reaktionsverlauf ist es jedoch ferner notwendig, dass Metallionen, vorzugsweise Kupfer oder Eisen, vorhanden sind. Diese Metallionen können entweder direkt aus den zu verbindenden metallischen Oberflächen der Substrate stammen oder bei kupfer- und eisenfreien Füge teilen von einem flüssigen Aktivator, mit dem gelöste Metallsalze vor dem Fügen auf die Oberflächen aufgebracht werden. Die Vernetzung anaerober Klebstoffe läuft in einem komplexen Kreisprozess, bestehend aus Metallkomplexbildung, Metallionenreduktion und Radikalbildung ab, der sich sehr rasch selbst regeneriert und damit eine effektive und vollständige Aushärtung der Klebfuge gewährleistet.

Anaerob ausgehärtete Klebstoffe sind Duromere und können hohe Festigkeiten und große Temperaturbeständigkeit erzielen. Die mit besonders hochfesten, anaerob härtenden Klebstoffen verbundenen Fügepartner lassen sich erst bei Temperaturen von 300 bis 400°C wieder lösen. Allerdings sind diese Klebverbindungen sehr spröde, so dass sie nicht für flexible Füge Teile geeignet sind. Die Aushärtung erfolgt ausschließlich im gefügten Bereich, wobei nur eine geringe Spaltbreitenüberbrückung erzielt werden kann. Eine sinnvolle Obergrenze für die Spaltbreite liegt im Bereich 0,25 mm. Anaerobe Klebstoffe sind häufig relativ dünnflüssig. Durch Kapillarwirkung dringen sie deshalb bis in die kleinsten Zwischenräume und Rautiefen ein und erzeugen damit einen hundertprozentigen Stoffschluss mit einer entsprechend hohen Lasttragfähigkeit.

Anaerob härtende Klebstoffe werden neben ihrer fügenden Funktion als Klebstoff gleichzeitig oft als Dichtstoff verwendet, da sie sehr beständig gegen Öle, Lösungsmittel und Feuchtigkeit sind. Auf Grund all dieser Eigenschaften werden anaerobe Klebstoffe bei Klebungen im Motorenbereich im Fahrzeugbau eingesetzt. Weitere typische Anwendungsgebiete sind im allgemeinen Maschinenbau das Kleben von rotations-symmetrischen Füge teilen wie Wellen- und Zahnradklebungen an Elektromotoren, Flanschklebungen, sowie ihr Einsatz zur Schraubensicherung.

### **3 Konstruktionsbetrachtungen bei strukturellen Klebeverbindungen**

Festigkeit und Langzeitbeständigkeit von strukturellen Klebeverbindungen werden vorrangig durch folgende Parameter beeinflusst:

- Klebstoff
- Werkstoff
- Einsatzbedingungen
- Klebfugengeometrie
- Belastung

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Klebstoffs bestimmen Adhäsionsvermögen und die innere Festigkeit einer Klebeverbindung. Die Werkstoffe, deren Oberfläche sowie die Einsatzbedingungen beeinflussen die Klebstoffauswahl unmittelbar. Ebenso hängt die Langzeitbeständigkeit direkt stark von diesen Kriterien ab.

Die Klebfugengestaltung wird als wichtigster Parameter für den optimalen Einsatz eines ausgewählten Klebstoffs angesehen. Die Gestaltung muss den Limitationen des Klebstoffs (z.B. Durchhärtetiefe, Spaltfüllung) angepasst und dahingehend optimiert werden, die ungünstigsten Belastungen für Klebeverbindungen (Spalt- und Schälbelastungen) zu vermeiden.

#### **3.1 Konstruieren von Klebeverbindungen**

Der Konstruktionsprozess für eine Klebeverbindung hat 2 Hauptziele:

- Eine kontrollierte Materialbeanspruchung
- Eine montagegerechte Konstruktion

Bei der Kontrolle der Materialbeanspruchung wird auf die spezifischen Eigenschaften der Klebstoffe Rücksicht genommen um ein Optimum an Verbindungsqualität zu erzeugen. Wesentlicher Unterschied zu allen anderen Füge-techniken ist, daß das Kleben ein flächiger Verbindungsprozess ist und unter Scherung oder Druck die besten Leistungen entfaltet.

Neben festigkeitsbezogenen Überlegungen sind auch Klebstoffspezifika hinsichtlich des Montage- und Verarbeitungsprozesses zu beachten. Hierzu zählen die Verarbeitung des flüssigen oder pastösen Klebstoffs. Eine saubere und definierte Auftragung trägt nicht nur zu Qualität der Verbindung bei, sondern ist auch ein wesentlicher Bestandteil der Arbeitsplatzhygiene und unterstützt damit die generelle Akzeptanz des Verfahrens. Fügeprozess und Klebstoffaushärtung sind ebenfalls wichtige Auswahlkriterien. Typische Fragen hierbei sind: Ist die Fügefläche für den Klebstoffauftrag leicht zugänglich? In welcher

Lage befindet sich dabei das Werkstück? Besteht die Gefahr des Ablaufens des Klebstoffes vor dem Fügen? Kann der Fügeprozess innerhalb der „Offenzeit“ des Klebstoffs vollzogen werden? Nach welcher Zeit muß eine Handfestigkeit zur schadlosen Weiterverarbeitung des Werkstücks gegeben sein? Welche maximalen Temperaturen sind bei der Aushärtung zulässig? Kann das Werkstück überhaupt erwärmt werden?

Die auf Klebeverbindungen einwirkenden Kräfte führen abhängig von der Wirkrichtung zu unterschiedlichen Arten von Spannungen. Die Belastungen können auf die drei Grundlasten Zug, Druck und Scherung zurückgeführt werden. Schäl- und Spaltbelastungen können als Kombination dieser Grundlasten betrachtet werden. In Falle reiner Zug- und reiner Druckbelastung ist die Spannungsverteilung in der Klebefuge sehr gleichmäßig. Somit wirkt auf jeden Teil der Klebefläche dieselbe Belastung und zur Berechnung der Spannungen wird die Kraft einfach durch die Fläche geteilt. In der Realität treten reine Zug- und Druckbeanspruchungen nur sehr selten auf, meist trifft man Scher-, Schäl- der Spaltbelastungen an. Die hierbei auftretenden Spannungen sind ungleichmäßig im Klebespalt verteilt und schwieriger zu berechnen als bei der einfachen Zug- und Druckbelastung. Bei einer auf Scherung belasteten Klebeverbindung bauen sich an den Enden der Klebefuge Spannungsspitzen auf, während im mittleren Bereich der Klebstoff weniger belastet wird. Besonders hohe, linienförmig konzentrierte Lastspitzen formieren sich bei Schälbelastungen und sind insbesondere bei Dünnschichtklebungen mit hochfesten Klebstoffen und geringer Verformungsfähigkeit zu vermeiden. Ist diese Belastung aus konstruktiven Gründen unumgänglich, ist zu prüfen, ob alternativ eine elastische Dickschicht-Klebung möglich ist, die durch ihr Verformungsvermögen in der Lage ist Spannungsspitzen in beträchtlichem Maße abzubauen.

### **3.2 Gestaltung ebener Klebeverbindungen**

Eine optimale Klebfugengestaltung zeichnet sich durch eine gleichförmige Spannungsverteilung aus. Aus diesem Grund müssen Konstrukteure gute Kenntnisse darüber besitzen, wie in Klebfugen die Spannungsverteilung bei Einwirken von Kräften erfolgt. Bild 1 zeigt die Spannungsverteilung bei verschiedenen Lastarten. Beim Konstruieren von Klebeverbindungen sind einige Leitlinien zu beachten.

#### **Die Spalt- und Schälbeanspruchung ist auf ein Mindestmaß zu reduzieren**

Die Spannungsverteilung in Bild 1 läßt erkennen, daß Schäl- und Spaltbeanspruchungen nach Möglichkeit auszuschließen sind. Bild 2 zeigt einige Vorschläge, wie Schäl- oder Spaltbelastungen in günstigere Belastungen umgewandelt werden können.

## Belastungsarten und ihre Spannungsverteilung in der Klebefuge

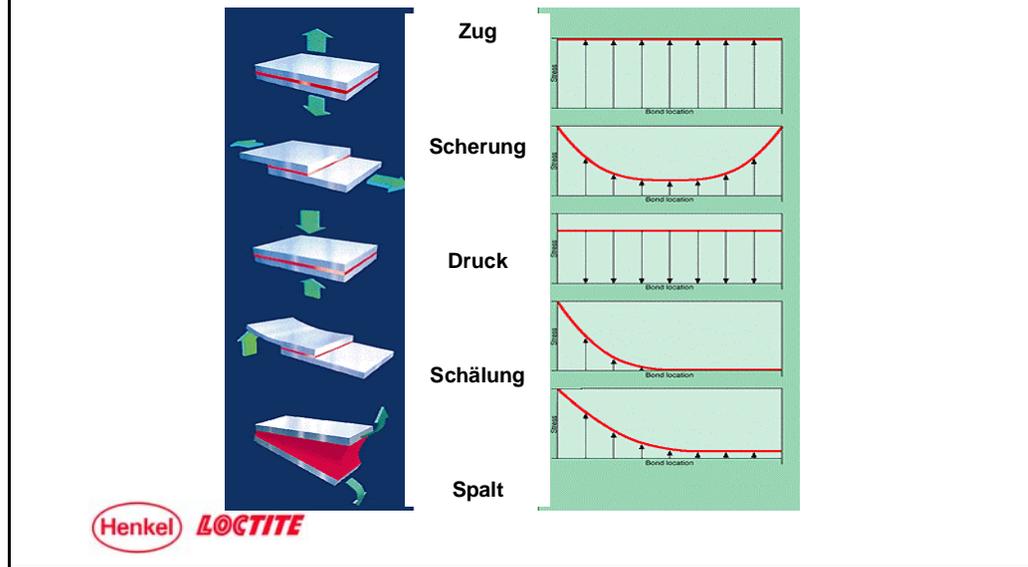


Bild 1: Die häufigsten Belastungsarten und ihre Spannungsverteilung in der Klebefuge

## Schälbeanspruchung und konstruktive Gegenmaßnahmen

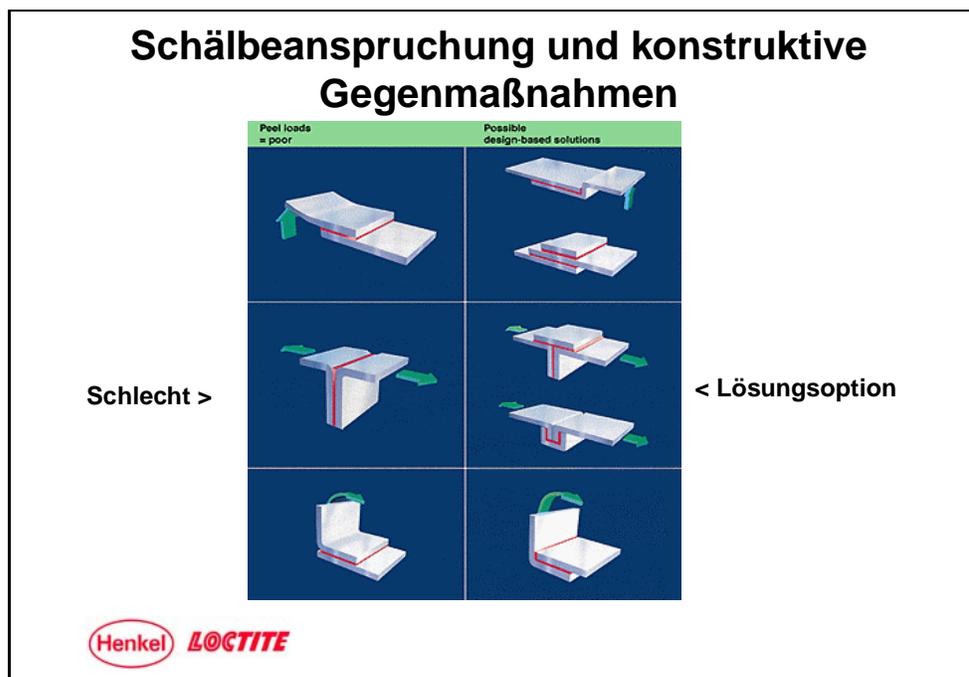


Bild 2: Schälbeanspruchungen und konstruktive Gegenmaßnahmen

### Die Klebefläche ist bis zum Höchstmaß zu vergrößern

Ein weitere einfache, aber sehr wichtige Möglichkeit, Klebfugen zu verbessern oder eine Konstruktion so zu verändern, daß sie sich für das Kleben eignet, ist, die Klebefläche zu vergrößern. Häufig ist die Klebefläche so klein, daß eine zu hohe Schäl- oder Spaltbelastung

aufgebracht wird. Die Steifigkeit der Bauteile und des Klebstoffs beeinflusst die Bruchlast von Klebeverbindungen. Im allgemeinen gilt: Je steifer ein Bauteil, desto geringer der Einfluß der Klebfugengeometrie auf die Festigkeit der Klebung.

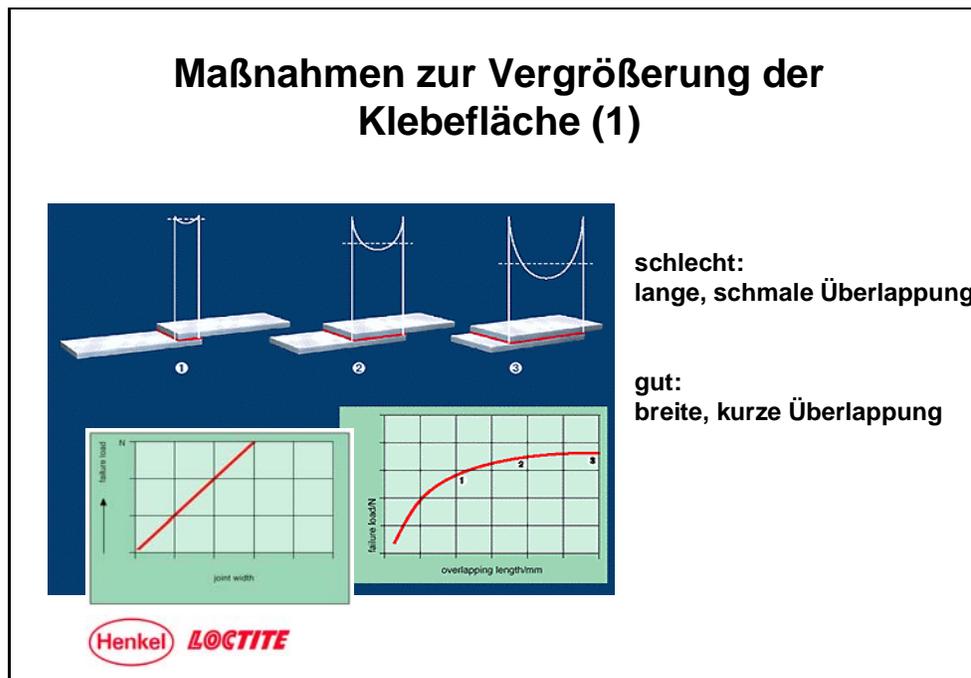


Bild 3: Vergrößerung der Klebefläche: Die Bruchlast erhöht sich proportional mit der Vergrößerung der Klebfugenbreite. Eine Erhöhung der Überlappungslänge führt zu einer unterproportionalen Erhöhung der Bruchlast

Bild 3 zeigt, daß mit Erhöhung der Überlappungslänge der Durchschnittswert der Schubspannung verringert wird, und dies führt zu einer unterproportionalen Erhöhung der Bruchlast. Sind größere Klebeflächen erforderlich, um die Belastung zu tragen, ist es sinnvoller, die Breite der Klebfuge zu vergrößern als deren Überlappungslänge.

Mit größerer Klebstoffschichtstärke können Klebeverbindungen gegenüber Scherbeanspruchungen besser elastisch nachgeben. Die zusätzliche Dicke verteilt die Scherbelastung über einen größeren Bereich. Dies führt zu einer geringeren spezifischen Verformung des Klebstoffs und folglich zu einer Verringerung von Spannungsspitzen. Dies ist mit der Verwendung eines Klebstoffs mit geringerem E-Modul vergleichbar; in beiden Fällen entsteht eine stärker elastisch nachgebende Klebeverbindung.

### Optimierung überlappter Klebefugen

Exzentrische Krafteinleitungen sind zu vermeiden: Eine einfach überlappte Klebeverbindung zeigt aus verschiedenen Gründen keine gleichmäßige Schubspannungsverteilung. Ein Grund sind die exzentrisch angreifenden Kräfte, die bei einer solchen Verbindung ein Biegemoment verursachen. Dieses Biegemoment ruft zusätzliche Zugspannungen hervor, insbesondere an

den Endpunkten der Klebung. Wie Bild 5 zeigt, lassen sich die negativen Auswirkungen des Biegemoments auf unterschiedliche Weise verringern.

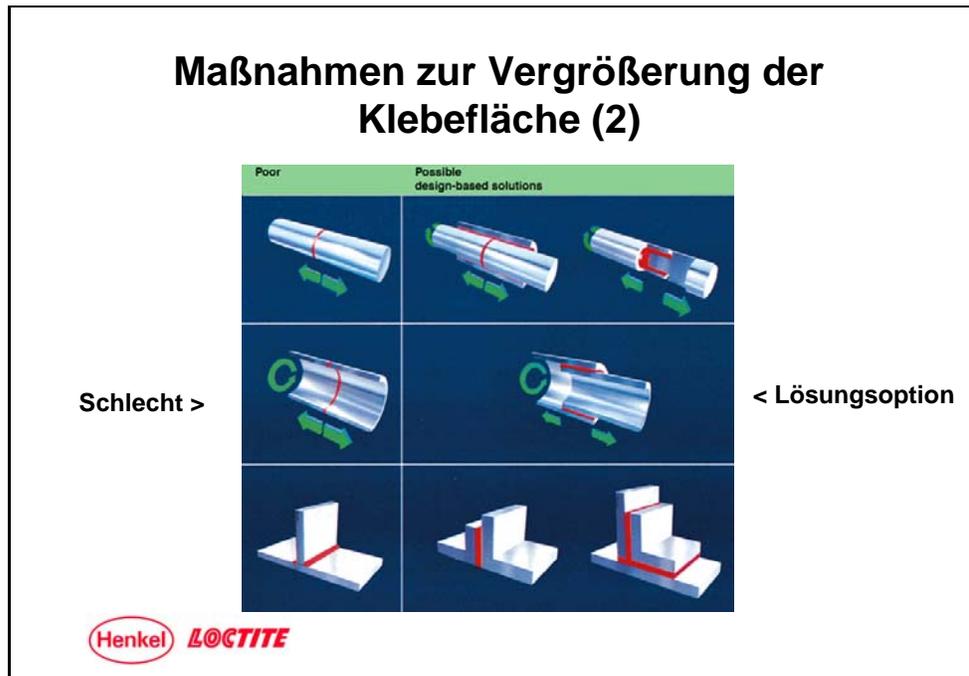


Bild 4: Günstige und weniger günstige Beanspruchungen von Klebeverbindungen

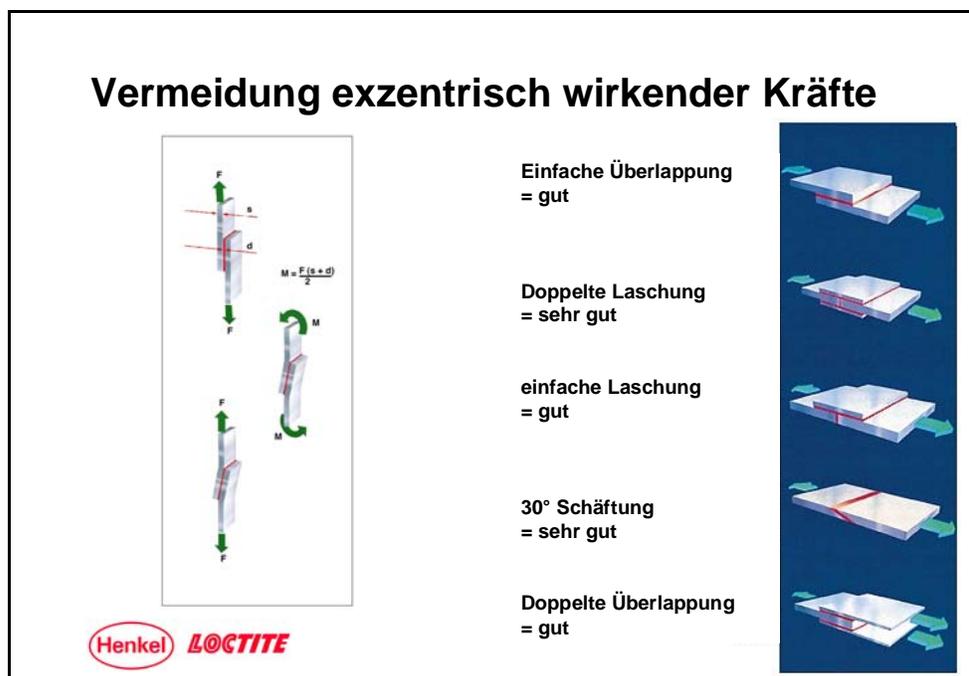


Bild 5: Deformation einer einfach überlappten Verbindung durch exzentrisch wirkende Kräfte sowie verschiedene Möglichkeiten zur Beseitigung von Problemen aufgrund exzentrisch wirkender Kräfte

Die Schubspannungsverteilung wird durch die Verbreiterung der Klebefuge nicht verändert. Dies bedeutet, daß die Bruchlast von überlappten Klebeverbindungen proportional mit der Klebfugenbreite zunimmt, d.h. eine doppelte Klebfugenbreite führt zur Verdoppelung der Bruchlast. Eine Optimierung der Fugenüberlappung bedeutet nicht einfach, die Klebefuge auf ein Höchstmaß zu verlängern, da sich die Bruchlast nicht proportional mit der Klebfugenlänge oder der Klebefläche erhöht. Aus der Verteilungskurve der Scherbeanspruchung ist ersichtlich, daß die Enden einer Klebung einer höheren Beanspruchung standhalten als die Mitte der Klebefuge. Wird die Überlappungslänge deutlich erhöht, so hat dies nur geringe oder gar keine Auswirkungen in Bezug auf die Bruchlast. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Klebefuge an der Spannungsspitze am Endpunkt der Überlappung, dort wo die Adhäsions- oder Kohäsionsfestigkeit des Klebstoffs überschritten wird, zu brechen beginnt.

### **3.3 Gestaltung zylindrischer Fügeverbindungen**

Bei diesen Verbindungen werden zylindrische Teile durch Ineinanderschieben gefügt. Ein typisches Beispiel stellen Lager in Elektromotorgehäusen dar.

Die American Standards Association (ASA) begann 1920 damit, Verfahren für Preßverbindungen zu standardisieren. Der ASA-Standard B4.1 „Preferred Limits and Fits For Cylindrical Parts" (Empfohlene Grenzen und Passungen für Wellen und Naben) wurde jedoch erst 1955 veröffentlicht. Das Verfahren beschränkte sich auf massive Teile, die die Spannungen aufnehmen können, welche von Preßpassungen hervorgerufen werden. Die ersten Anwendungen für Fügeklebstoffe wurden 1963 in der Lagerindustrie bekannt. Die Käufer neuer Lager konnten dank der Fügeklebstoffe eingelaufene Lagersitze retten - ein Segen für Benutzer von Elektromotoren, da sie ihre Gehäuse nicht mehr verschrotten mußten. Es gibt vier Verbindungsarten, die Drehmomente, Radial- und Axialkräfte, von der Welle auf die Nabe (oder umgekehrt) übertragen:

- Formschluß (z.B. Paßfedern)
- Reibschluß (z.B. Preßsitz)
- Schweißen und Löten
- Kleben

Bei geklebten Welle-Nabe-Verbindungen werden zwei Arten unterschieden:

- Geklebte Spielpassungen – Die Teile werden mit Spiel gefertigt. Der ausgehärtete Klebstoff überträgt die gesamte Last.

- Geklebte Schrumpf- oder Preßpassungen – Die Last wird gemeinsam vom ausgehärteten Klebstoff und der Reibung zwischen den Teilen aufgrund der Übermaßpassung übertragen.

In beiden Fällen wird der Klebstoff im flüssigen Zustand aufgetragen und füllt die Klebefuge vollständig aus. Der Klebstoff härtet zu einem festen Duroplast aus und stellt so eine Verbindung zwischen den Oberflächen her.

Bei der klebegerechten Gestaltung von Welle-Nabeverbindungen ist es vorteilhaft einige Grundprinzipien der Kraftübertragung und Materialbeanspruchung zu beachten. Wie für alle Klebeverbindungen gilt auch hier, daß Druck- und Schubspannungsbelastungen generell von Vorteil sind. Die an der Kraftübertragung beteiligten Werkstücke sollten die geringstmögliche Deformation erfahren. Die Werkstücke sind so zu gestalten, daß scharfe Lastübergänge vermieden werden und die Steifigkeit der Teile aneinander angepasst ist.

### Hinweise zur Konstruktion und Fügetechnik

Die Klebetechnologie vereinfacht die Konstruktion, Fertigung und Montage von Teilen. Beim Montieren von Lagern kann der Klebstoff beispielsweise bis zu einem gewissen Grad Zentrierungsfehler ausgleichen. Dadurch kann der Einbau von Wellen und Lagern spannungsfrei erfolgen, was die Lebensdauer erhöht und die Verwendung der Teile nach einem einfachen Reinigungsvorgang wieder ermöglicht. Im Vergleich zu klassischen Fügemethoden mit Übermaßpassung erlaubt Klebstoff den Einsatz von dünnwandigeren Bauteilen.

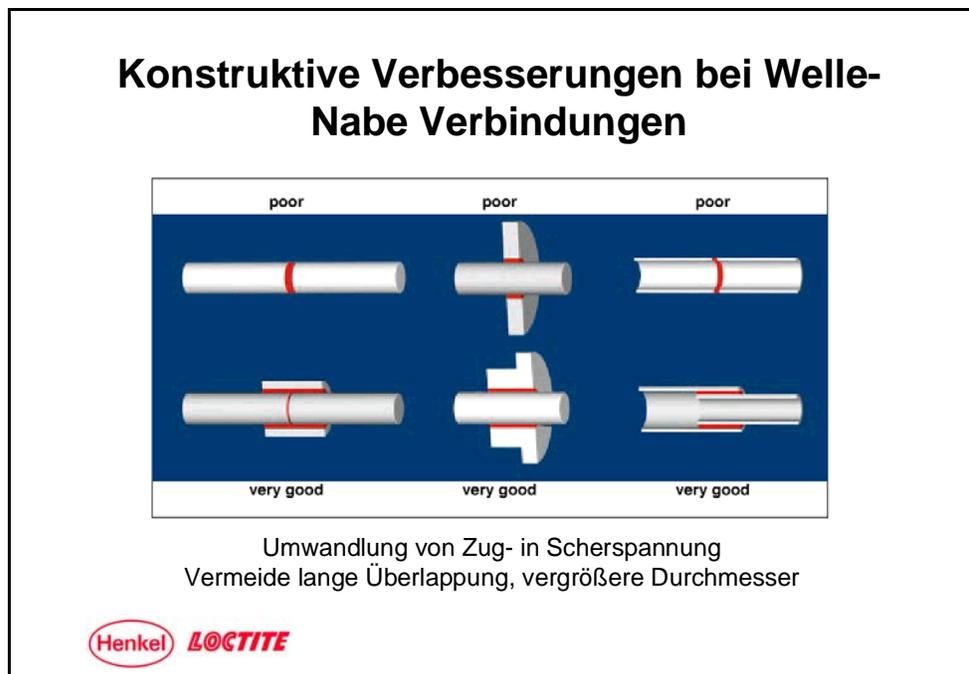


Bild 6: Konstruktive Verbesserungen bei Welle-Nabe Verbindungen

Es ist äußerst wichtig, die Lastbedingungen zu berücksichtigen, um die Konstruktion einer Klebeverbindung zu optimieren. Die meisten Verbindungen übertragen eine Kombination von Axial- und Radialkräften und Dreh- und Biegemomenten. Belastungen können statisch sein oder dynamisch wirken.

In einer Welle-Nabe-Verbindung sollten im Betrieb nach Möglichkeit Schäl- und Spaltbelastungen auf ein Minimum reduziert werden, während dafür die Druck- und Scherbelastungen, die auf den Klebstoff wirken, maximiert werden sollten. Bereits geringfügige Änderungen der Teilegeometrie können zu deutlichen Verbesserungen der Festigkeit führen.

In der Praxis sind die Spannungen in einer Welle-Nabe-Verbindung nicht gleichmäßig über die Fügelänge verteilt. Am Beginn des Fügebereiches treten Spannungsspitzen auf, was bedeutet, dass eine Verlängerung der Klebefuge nicht zu einer proportional festeren Verbindung führt. Der Konstrukteur hat aber die Möglichkeit, durch eine geeignete Teilegeometrie solchen Spannungsspitzen entgegenzuwirken.

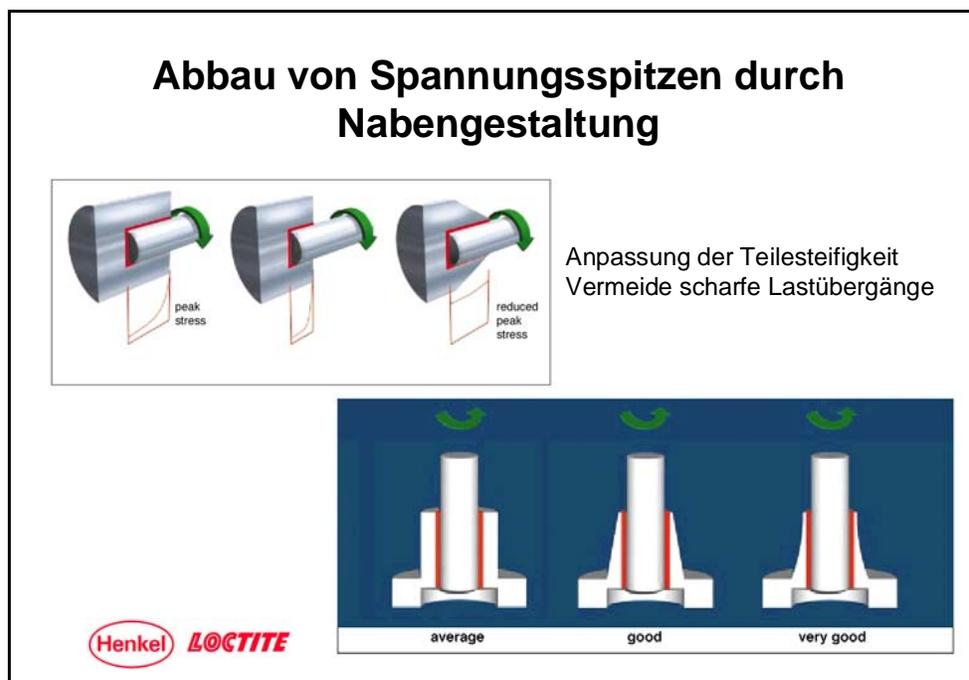


Bild 7: Abbau von Spannungsspitzen durch Nabengestaltung

Werden in Welle-Nabe-Verbindungen Werkstoffe mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten verwendet kann dies zu unerwünscht hohen Zugbelastungen für die Klebeschicht führen.

Es können drei Verfahren angewendet werden, die gewährleisten, dass die Klebeverbindung der Wärmeausdehnung standhält:

### **Zusätzliches Kleben bei Übermaßpassungen**

Klebstoffe können zur Unterstützung von Übermaßpassungen verwendet werden. Sofern ein geringfügiges Übermaß im gesamten Betriebstemperaturbereich erhalten bleibt, ist eine funktionsfähige Verbindung gegeben.

### **Spielpassung mit großem Klebespalt**

Die relativ niedrigen E-Moduli, sowie der relativ hohe Ausdehnungskoeffizient der Fügeprodukte ermöglichen eine Reduzierung bzw. Eliminierung der Zugspannung in der Klebefuge, indem Toleranzen so festgelegt werden, daß bestimmte Stärken des Klebstoffs gewährleistet sind.

### **Schrumpfgeklebte Spielpassung**

Eine schrumpfgeklebte Spielpassung ist vorzunehmen (ca. 0,05 mm Spiel bei einem Durchmesser von 50,0 mm), wenn das Außenteil einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzt als das Innenteil, wie z.B. eine Stahlwelle (oder Lager) in eine Riemenscheibe (oder Gehäuse) aus Aluminium. Der Klebstoff wird auf das Innenteil aufgetragen und das Außenteil wird erwärmt. Dann werden beide Teile zusammengefügt (üblich ist eine Temperaturdifferenz von 100°C).

Durch diese Fügemethode werden Druckspannungen in der Klebstoffschicht erzeugt. Führt die unterschiedliche Temperatúrausdehnung während des Betriebs zu einer Vergrößerung des Klebespalts, dann verringern sich die im Klebstoff wirkende Druckspannungen. Dies ermöglicht eine beträchtliche Wärmeausdehnung, bevor eine nicht mehr tolerierbare Zugbelastung auf den Klebstoff einwirkt.

Werden Klebeverbindungen hohen dynamischen (zyklischen) Belastungen ausgesetzt, muß die Dauerfestigkeit der Verbindung berücksichtigt werden. In umfangreichen Versuchsreihen wurden Wöhlerkurven ermittelt, die die Torsionsfestigkeitswerte wiedergeben.

Die in Bild 7 gegebenen Hinweise zu Nabengestaltung bedürfen einer intensiveren Erläuterung um im Einzelfall erfolgreich angewandt werden zu können. Bild 8 vergleicht die Scherspannungsverläufe einer geraden und einer angeschrägten Nabe. Die Anschrägung bewirkt ganz eindeutig eine Reduzierung der Scherspannungsspitze am Nabenende. Bild 9 zeigt für die gleichen Geometrien den Verlauf der Radialspannung. Durch das weichere Nabenende wird die Radialspannung und damit auch das durch Kraftschluss übertragbare Drehmoment reduziert. Bild 10 vergleicht die beiden Geometrien hinsichtlich ihrer Fähigkeit zu Lastübertragung. Es zeigt sich daß für einen geklebten Schiebsitz die Variante mit der

angeschrägten Nabe 40% mehr Drehmoment übertragen kann, während bei einer Übermaßpassung (Schrumpf- oder Presssitz) der Vollnabe eindeutig der Vorzug zugeben ist.

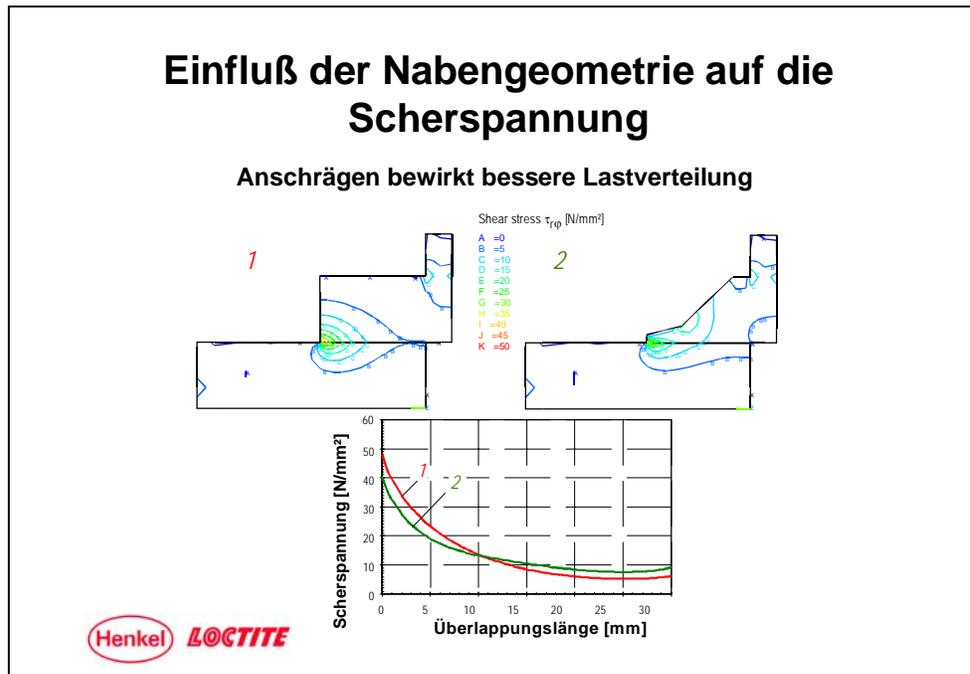


Bild 8: Scherspannungsverlauf bei 2 verschiedenen Nabengeometrien

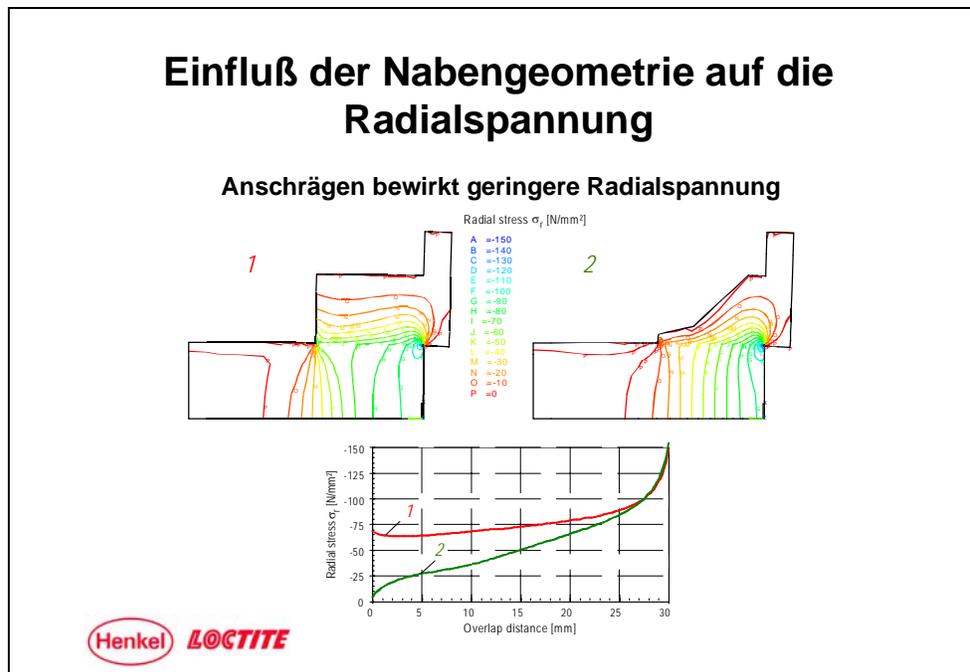


Bild 9: Radialspannungsverlauf bei 2 verschiedenen Nabengeometrien

# Auswahl der geeigneten Nabengeometrie

Wirkung der Anschrägung hängt vom Verbindungstyp ab

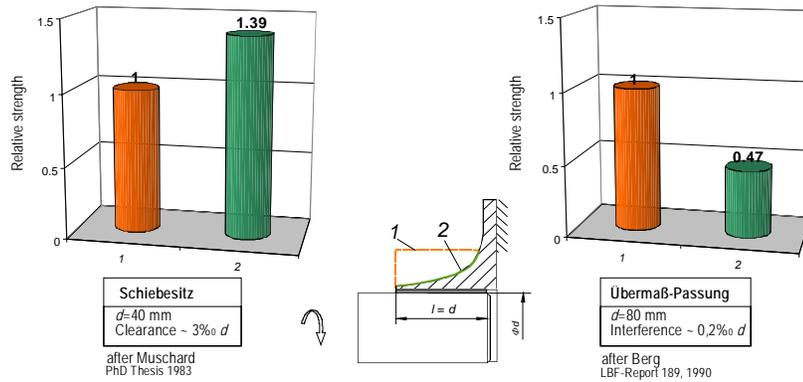


Bild 10: Auswahl der Nabengeometrie



## 4 Berechnung von Klebverbindungen

Die grundsätzlichen Ziele bei der Auslegung und Berechnung von Klebeverbindungen sind die Schaffung einer technisch und wirtschaftlich optimierten Konstruktion, der quantitativen Verifikation von Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit, sowie die Minimierung des Aufwandes für physische Tests. Bild 11 gibt einen Überblick der derzeitigen Festigkeitsberechnungsmethoden für Klebeverbindungen. Eine einfache Vergleichsspannungsrechnung mit empirischen Korrekturfaktoren erlaubt eine schnelle, wenn auch nicht sonderlich genaue Abschätzung der Belastungsfähigkeit einer Klebeverbindung. Darüber hinaus stehen analytische und numerische Methoden zur Verfügung. Die dazu erforderlichen Werkstoffkennwerte sind jedoch nur teilweise öffentlich zugänglich und werden oft anwendungsspezifisch ermittelt.

**Abschätzung der Festigkeit der Verbindung**

**Grundprinzip:**  
# wirkende Kraft/Klebefläche = Ist-Spannung  
# Ist-Spannung muß kleiner zulässige Spannung sein

**Ermittlung der zulässigen Spannung:**

**Empirische Methoden**  
# Bruchfestigkeit X empirische Korrekturfaktoren

**Analytische Methoden**  
# Bruchfestigkeit X Faktoren aus Werkstoffkennwerten

**Numerische Methoden**  
# Finite Elemente Berechnungen = Bruchfestigkeit X Faktoren aus Werkstoffkennwerten auf Differential-Ebene



Bild 11: Überblick Methoden zur Festigkeitsberechnung

Da Klebstoffe etwa 1 – 2 Größenordnungen kleinere Materialfestigkeiten aufweisen als Metalle muss zur Erzielung einer wirtschaftlichen Werkstoffnutzung eine Kompensation

über die Klebefläche erfolgen. Als günstige Klebegeometrie sind deshalb flache Überlappklebungen anzustreben, wobei die Orientierung der Last zur Teilegeometrie von Einfluss ist. Eine Besonderheit bei Klebeverbindungen ist, dass es sich hierbei nicht um homogene Werkstoffe handelt, sondern um Verbundsysteme, deren Eigenschaften sich aus denen der Füge-teile, des Klebstoffs sowie den Grenzflächeneigenschaften zusammensetzen.

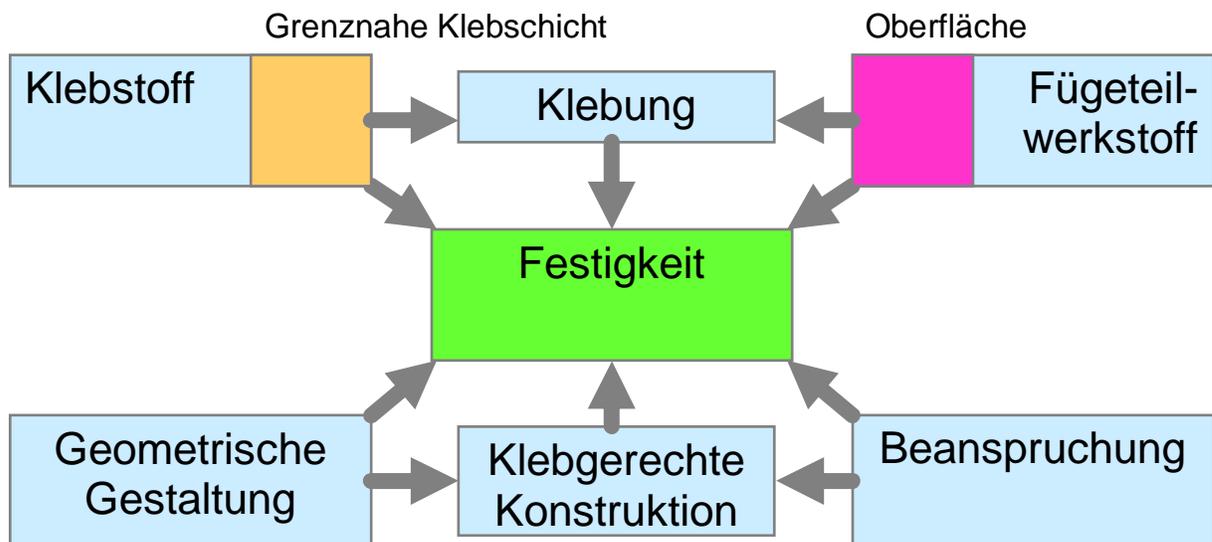


Bild 12: Einflussparameter auf die Festigkeit einer Klebung

Die auf den Verbund wirkenden Kräfte erzeugen Spannungen in der Klebung. Je nach Wirkrichtung der Kräfte relativ zur Fügeteilgeometrie werden diese als Zug-, Druck-, Schub-, oder Scherspannungen bezeichnet. Biege- und Schälspannungen sind Überlagerungen von Zug- und Scherspannungen.

Für die weitere Betrachtung ist es sinnvoll zwischen dünnen, steifen Klebschichten und dicken, elastischen Klebschichten zu unterscheiden. Dünne Klebschichten weisen eine inhomogene Spannungsverteilung auf, mit erheblichen Spannungsspitzen an den Enden der Klebung. Dicke Klebschichten können durch elastische Verformung diese Spannungsspitzen weitgehend abbauen.

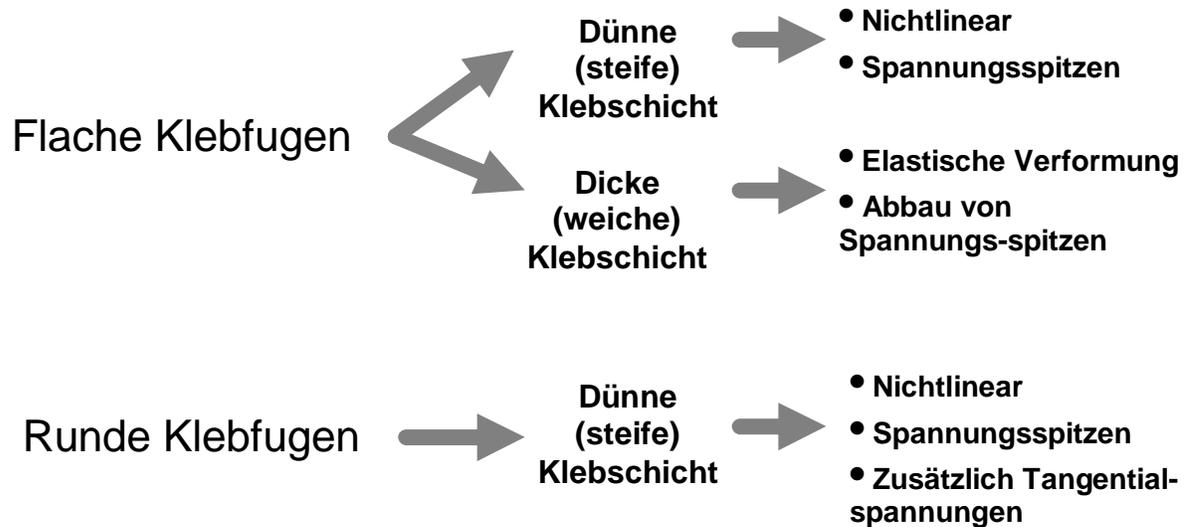


Bild 13: Geometrische Klassen von Klebfugen

Ursache der Nichtlinearität der Spannungsverteilung in dünnen Klebschichten ist die elastische Deformation der Fügeteilpartner durch die einwirkenden Kräfte. Eine grobe Abschätzung ob eine Klebschicht als „dünn/steif“ oder „dick/elastisch“ zu betrachten ist, kann mit Hilfe des Steifigkeitsfaktors nach Volkersen durchgeführt werden. Dieser berechnet sich mit  $\Delta = (G/E) * (l^2/(s*d))$ . Dabei sind  $G$  = Schubmodul des Klebstoffes,  $E$  = Elastizitätsmodul der Fügeteile,  $l$  = Überlappungslänge,  $s$  = Dicke der Fügeteile,  $d$  = Dicke der Klebschicht. Zur Erzielung eines möglichst homogenen Spannungsfeldes in der Klebschicht soll der Steifigkeitsfaktor möglichst klein sein. Für Werte  $\Delta < 0,01$  kann von einer elastischen Klebschicht ausgegangen werden. Da die Formel die mechanischen Werkstoffparameter des Verbundes wie auch dessen Geometrie beschreibt, lassen sich damit auch die grundlegenden Einflussparameter auf die Homogenität der Spannungsverteilung erkennen. Für eine gleichmäßige Belastung der Klebschicht ist ein möglichst kleines Verhältnis von  $G/E$  anzustreben. Dies bedeutet eine Kombination eines möglichst weichen, elastischen Klebstoffes mit möglichst steifen Fügeteilen. Große Überlappungslängen erhöhen  $\Delta$  und führen damit zu Spannungsspitzen, während große Fügeteilstärken und dicke Klebschichten  $\Delta$  verkleinern und zur Vergleichmässigung des Spannungsfeldes beitragen.

Die Anpassung der erzielbaren Festigkeiten an spezifische Randbedingungen erfolgt mit Abminderungsfaktoren. Bei mehreren Faktoren kommt das Multiplikationsverfahren zum Einsatz.

$$f_{\text{gesamt}} = \Pi \cdot f_n = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \dots$$

$$\sigma_{\text{max}} = f_{\text{gesamt}} \cdot \sigma_b$$

$$\tau_{\text{max}} = f_{\text{gesamt}} \cdot \tau_b$$

## 4.1 Flache Flanschflächen

### Analytische Ansätze

Der einfachste Rechenansatz berechnet die auftretende Zug-, bzw. Schubspannungen aus dem Quotienten der einwirkenden Kraft und der Klebfläche.

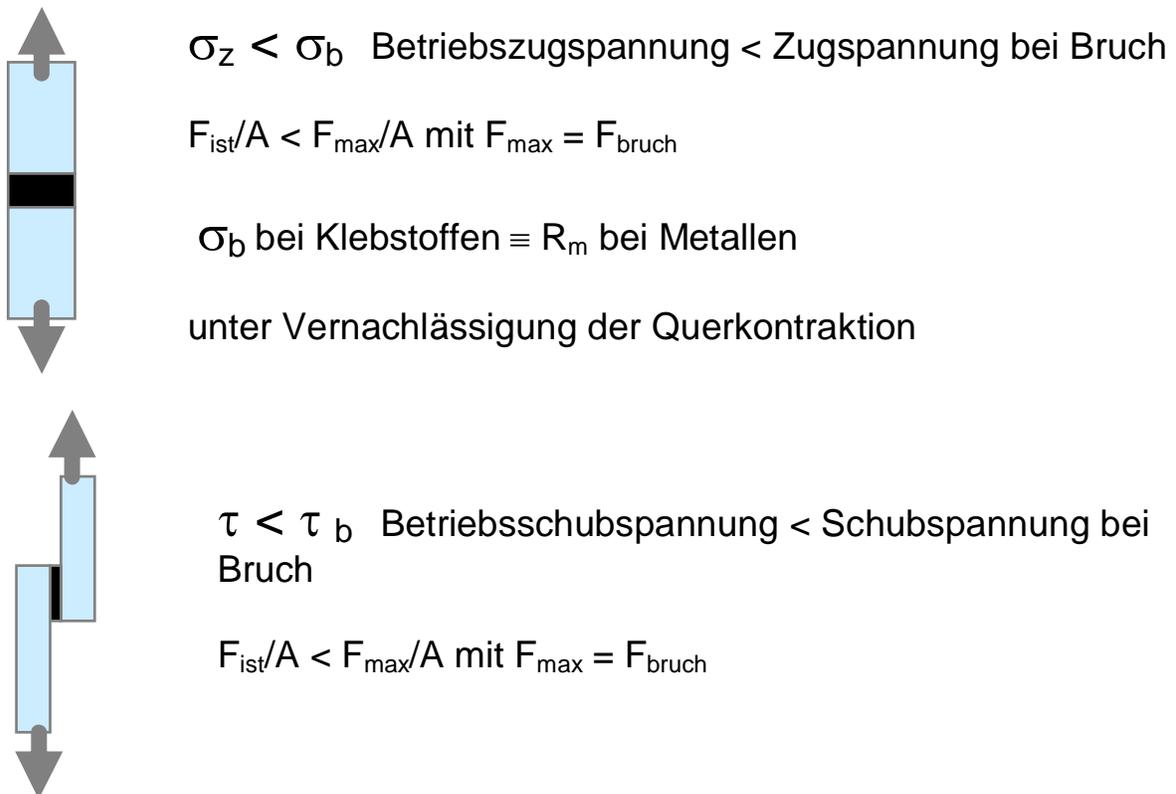
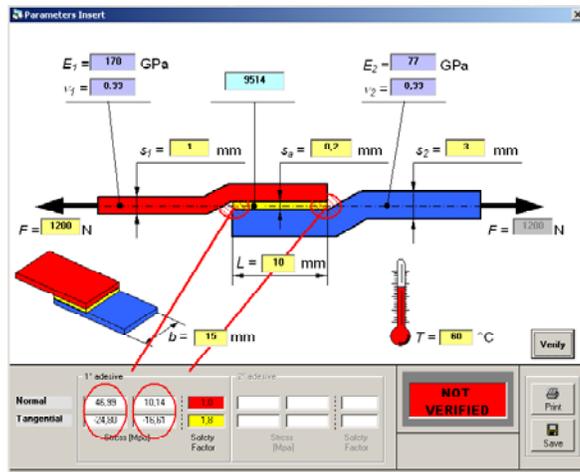


Bild 14: Einfachste, idealisierte Rechenansätze für Belastung bei Zug und Schub

Diese Vorgehensweise geht aber von idealisierten Voraussetzungen wie z.B. momentenfreie Belastung und unendlich starren Fügeteilen aus, die in der Praxis so nicht anzutreffen sind. Bei dünnen, steifen Klebschichten ist für eine realistische Betrachtung immer von elastischen Fügeteilen, einer elastisch-plastischen Klebschichtverformung und dem Auftreten von Biegemomenten auszugehen. Wird beispielsweise die oben gezeigte einfache auf Zug belastete Verbindung durch exzentrische Krafteinleitung am Rande der Klebschicht zusätzlich mit einem Biegemoment beaufschlagt so verringert sich die übertragbare Last auf 25% der ursprünglichen Bruchlast. Ähnliche Verhältnisse werden auch bei schubbelasteten Klebeverbindungen gefunden.

Erste Berechnungsansätze für schubbelastete Verbindungen gehen auf Volkersen zurück mit den vereinfachenden Annahmen einer linear-elastischen Klebschicht (Realität ist elasto-plastisch), einem homogenen Werkstoff, gleicher Geometrie und reiner Schubbeanspruchung ohne Biegemoment. Goland und Reissner ergänzten das Volkersen-Modell um den Einfluss eines Biegemoments und Hart-Smith fügten Anisotropie und Klebschichteinfluss auf die Biegung hinzu. Heutiger Stand der Technik sind die Lösungen von Bigwood und Crocombe die das nicht-lineare Verhalten der Klebschicht mit plastischer Deformation von Fügeteilen und Klebstoff berücksichtigen. Wesentliche vereinfachende Annahmen des Bigwood-Crocombe Modells sind dass die Schubspannung in der Klebschicht nicht das Biegeverhalten der Substrate beeinflusst, sowie dass Querspannungen in der Klebschicht vernachlässigt werden. Die Gleichungen des Bigwood-Crocombe Modells können für verschiedene Geometriefälle noch analytisch gelöst und mit Tabellenkalkulationsprogrammen berechnet werden. Einige Musterlösungen sind bei ESDU verfügbar, z.B. #92041 für einfach überlappte Verbindungen, #78042 und #80011 für doppelt überlappte Verbindungen und #79016 und #80039 für gestufte Geometrien. Henkel hat für eine Auswahl gängiger Loctite Hysol Strukturklebstoffe auf Basis des Bigwood-Crocombe Modells das Programm JointCalc entwickelt, das auf einfache Weise eine erste Eignungsauswahl der Klebstoffe und eine Festigkeitsabschätzung für verschiedene Anwendungsgeometrien und Einsatztemperaturen ermöglicht.

## JointCalc - Beispiel



März 2010

Wolfgang Fleischmann / TAW

26

Gemeinsamer Nachteil der analytischen Lösungen ist die Erfassung der Werkstoffparameter für Fügeteile, Klebstoffe und Geometrien in zum Teil gemeinsamen Berechnungskoeffizienten. Dies hat einen erheblichen Prüfaufwand zur Ermittlung der benötigten Datensätze zur Folge. Im Programm JointCalc sind beispielsweise mehr als 8000 Datensätze hinterlegt.



## **Finite Elemente Methoden**

Die Finite Elemente Analyse (FEA) ist eine allgemeine numerische Methode zur Beanspruchungsanalyse von Strukturen und kann auch für Klebeverbindungen eingesetzt werden. Das zu untersuchende Bauelement oder das Lösungsgebiet wird in kleine Teilregionen, die Finite Elemente, aufgeteilt. Die FEA beruht auf dem Theorem das besagt, dass belastete Strukturen sich so verformen, dass die potenzielle Energie des Systems minimiert wird. Die Deformation wird durch Knoten an den Elementen, den „nodes“, erfasst, die auch die Ankopplung an Nachbarelemente übernehmen. Zur Erfassung des korrekten Deformationsverhaltens wurde für die verschiedenen Anwendungsfälle eine Vielzahl von Grundelementtypen entwickelt. Es gibt eindimensionale (Stäbe, Balken), zweidimensionale (Dreiecke, Parallelogramme) und dreidimensionale (Tetraeder, Quader) Elemente. Die eigentliche Deformationsantwort auf eine Krafteinwirkung eines Elements wird durch Materialmodelle beschrieben. Für Klebeverbindungen an Blechteilen haben sich beispielsweise für das Stahlblech das Shell-Element Type\_6 und das Materialmodell MAT\_3 und für den Klebstoff das Solid-Element Type\_20 und das Materialmodell MAT\_138 als gut geeignet erwiesen. Ergänzend wird in nächster Zeit das Materialmodell MAT\_240, verfügbar sein, ein trilineares Modell, das eine verbesserte Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit der Klebstoffmoduli und des Klebstoffversagens bis zur vollständigen Trennung der Fügepartner ermöglicht.

Die wesentlichen Programme am Markt sind ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA, NASTRAN, PAMCRASH. Wichtiges Auswahlkriterium ist die Fähigkeit hochgradig nichtlineare Gleichungssysteme lösen zu können. Dies ist bei „FEA Add-Ons“, die in letzter Zeit als Ergänzung zu großen CAD Programmen angeboten werden häufig nicht der Fall.

Als Eingabedaten benötigen die Materialmodelle möglichst eindeutige und universell einsetzbare Kennwerte für das Klebstoffverhalten. In Gegensatz zu den analytischen Methoden werden bei der FEA die Werkstoffeigenschaften der Fügebauteile und der Klebstoffes getrennt bearbeitet. Der gängige Zugscherversuch mit dünnen Substraten nach DIN EN 1465, DIN 53283, ASTM D-1002 ist damit nicht zur Kennwertermittlung für die Scherfestigkeit geeignet, da die eigentliche Scherspannung durch Biegemomente

und Bauteildehnungen überlagert wird. Ebenso ist die dicke Zugscherprobe nach DIN EN 14869-2 und DIN 54451 bei hochfesten Klebstoffen bereits kritisch zu bewerten, da auch hier der Einfluss der Fügeiteildehnung nicht vernachlässigt werden kann.

Derzeit am besten bewährt haben sich folgende Methoden zur Eigenschaftsbestimmung der Klebstoffe:

- DMA-Sweep zur grundsätzlichen Ermittlung des Temperaturverhaltens und der Dehnratenabhängigkeit durch Erstellung einer Masterkurve
- Zugversuch nach ISO 527-2 mit optischem Extensometer zur Ermittlung der  $\sigma/\varepsilon$  Kurve, des Elastizitätsmoduls E und der Querkontraktion  $\nu$
- Scherversuch an einer Rohrprobe nach DIN EN 14869-1 zur Ermittlung  $\tau$ - $\gamma$  Kurve und des Schubmoduls G
- Bruchmechanischer TDCB (Tapered Dual Cantilever Beam) Test zur Ermittlung der Energiefreisetzungsrates GIC unter Zugbelastung
- Bruchmechanischer ENFS (Ended Notched Flexural Specimen) Test zur Ermittlung der Energiefreisetzungsrates GIIC unter in-plane Scherung unter 4-Punkt Biegung
- Bruchmechanischer MMFS (Mixed Mode Flexural Specimen) Test mit asymmetrischem Prüfling zur Ermittlung der Energiefreisetzungsrates GI/IIC unter 4-Punktbiegung

Diese Versuche sind unter Variation von Temperatur, Dehnrates und den zu erwartenden Umweltbedingungen wie Feuchte oder Medien durchzuführen. Für dynamisch langzeit beanspruchte Konstruktionen sind zusätzlich Dauerschwingversuche zur Absicherung der Lebenserwartung mit Hilfe von Wöhlerkurven anzusetzen.

Die Nutzung der FEA Methode erlaubt die Modellierung geklebter Verbindungen in einem Umfang, der mit den herkömmlichen analytischen Methoden nicht zugänglich ist. Einige der Vorteile sind die Erfassung komplexer Geometrien bis hin zur Fahrzeug-Gesamtkarosserie, die Berücksichtigung komplexen Materialverhaltens, die Einbeziehung gekoppelter Multi-Physik Probleme, die Erkennung von Problemzonen mit Stress-Singularitäten, die intuitiv nicht erkennbar sind, sowie die Simulation hoch-dynamischer Vorgänge wie z.B. Crash-Situationen.

Eine verlässliche Durchführung einer FEA-Berechnung erfordert jedoch speziell geschultes Personal und viel praktische Erfahrung in der Modellierung. Für den Einsteiger in die Welt der FEA-Berechnung sind entsprechende Trainingskurse unabdingbar. Einige der vorgenannten Anbieter von FEA Programmen bieten mittlerweile auch Vertiefungskurse zur Klebschichtmodellierung an. Einige Forschungsinstitute und Ingenieurbüros bieten FEA, sowie die zugehörige Kennwertermittlung als Dienstleistung an. Ebenso wird von den großen Herstellern von strukturellen Klebstoffen Unterstützung bei der Berechnung und Materialcharakterisierung gegeben.

## **4.2 Welle-Nabe Verbindungen**

Einfache zylindrische Verbindungen können axiale Lasten oder Drehmomente durch Übermaßpassungen, geklebte Spielpassungen oder geklebte Übermaßpassungen übertragen. Mit einigen wenigen Parametern können die zulässigen Lasten für diese Verbindungen berechnet werden.

Die statische Scherkraft, die für jedes Fügeprodukt angegeben wird, ist ein typischer Wert, der aus Testergebnissen an Stahlprüfkörpern der Standardgröße (12.5mm Durchmesser und 11mm Fügelänge) stammt. Mit diesem Wert kann man die Bruchlast der Verbindung bestimmen. Diese Bruchlast ist proportional zur Klebefläche, wird aber außerdem noch von anderen Faktoren beeinflusst, wie z.B. der Konstruktion der Verbindung und den Nutzungsbedingungen.

### **Geklebte Spielpassung**

Die axiale Bruchlast der Verbindung kann wie folgt beschrieben werden:

$$F = A \times \tau_{B2} \times f_c$$

mit  $F$  = Auspresskraft;  $A$  = Fügefläche;  $\tau_{B2}$  = Druckscherfestigkeit des Klebstoffs

$f_c$  = Produkt der Korrekturfaktoren

$f_c$  ist das Produkt aus einer Reihe von Faktoren, die festigkeitsbeeinflussende Parameter beschreiben. Die wichtigsten sind:

- Art der zu fügenden Werkstoffe
- Art der Verbindung

- Größe des Spiels/Übermaßes
- Einsatztemperatur
- Geometrie

Weitere Details zur Abschätzung dieser Faktoren finden Sie in den Tabellen auf den folgenden Seiten.

Die Fügefläche berechnet sich aus:

$$A = \pi \cdot D \cdot L$$

D = Durchmesser

L = Überlappungslänge

Somit wird die axiale Auspresskraft:

$$F = \pi \cdot D \cdot L \cdot \tau_{B2} \cdot f_c$$

Das Torsionsmoment errechnet sich mit  $r = D/2$  aus:

$$T = F \cdot r$$

### **Geklebte Übermaßpassung**

Wird ein Fügeklebstoff in Verbindung mit einer Übermaßpassung eingesetzt, dann kann die Berechnungsformel so erweitert werden, daß sie die Reibungskräfte, die durch den radialen Fugendruck erzeugt werden, beinhaltet.

Die axiale Auspresskraft wird somit:

$$F = \pi \cdot D \cdot L \cdot [(\tau_{B2} \cdot f_c) + (P \cdot \lambda)]$$

Und das Drehmoment

$$T = F \cdot r$$

mit P = radialer Kontaktdruck zwischen den Teilen;  $\lambda$  = effektiver Reibungskoeffizient .

P kann mit der klassischen Formel zur Berechnung von Preßsitzen bestimmt werden.

$\lambda$  ist nur schwerlich genau bestimmbar, jedoch ergibt die Annahme eines Wertes von 0.2 für Stahl/Stahl Paarungen meist eine realistische Abschätzung der Festigkeit.

Werden Klebstoffe bei einer Übermaßpassung angewandt, verändern sich die Korrekturwerte nicht mit Ausnahme des Montagefaktors  $f_7$ .

Ein Wert  $f_7 = 1.2$  ist typisch für Schrumpfverbindungen und  $f_7 = 0.5$  für Preßpassungen.

Hinweis: Diese Formeln sind eine Abschätzung der Festigkeit der Verbindung. Ein experimenteller Nachweis an der Originalverbindung erübrigt sich dadurch nicht.

### **Dynamische Belastung: Ermüdungsfaktor**

Die Bruchkräfte, die mit diesen Formeln errechnet werden, repräsentieren die maximal mögliche, statische Belastung der Verbindung. Wie bei den meisten Materialien und Baugruppen, kann eine dynamische Belastung bei viel niedrigeren Werten zum Versagen der Verbindung führen. Umfassende Tests haben gezeigt, daß folgende Abminderungsfaktoren als Minimum anzusetzen sind:

- 30% des statischen Wertes bei geklebter Spielpassung unter Torsionslast.
- 60% des statischen Wertes bei geklebter Übermaßpassung unter Torsionslast
- 10-15% für axial belastete Verbindungen.

Die unten stehende Grafik zeigt die typische Verbesserung, die mit geklebten Welle-Nabe Verbindungen erreicht werden kann.

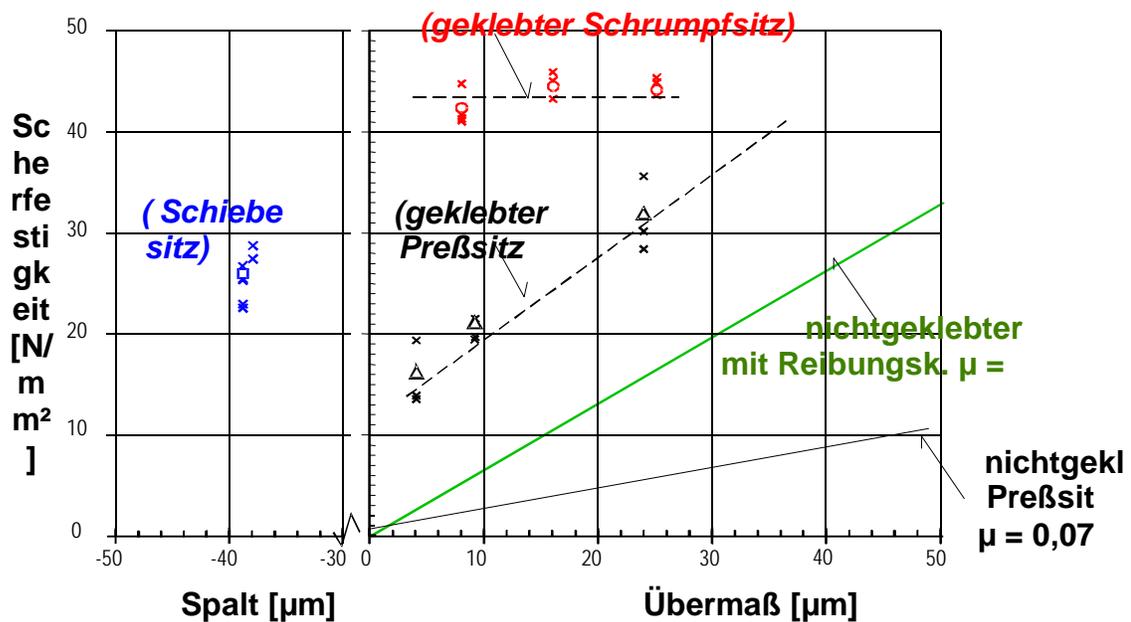


Bild 15: Scherfestigkeitsvergleich für statische Lasten

### Korrekturfaktoren

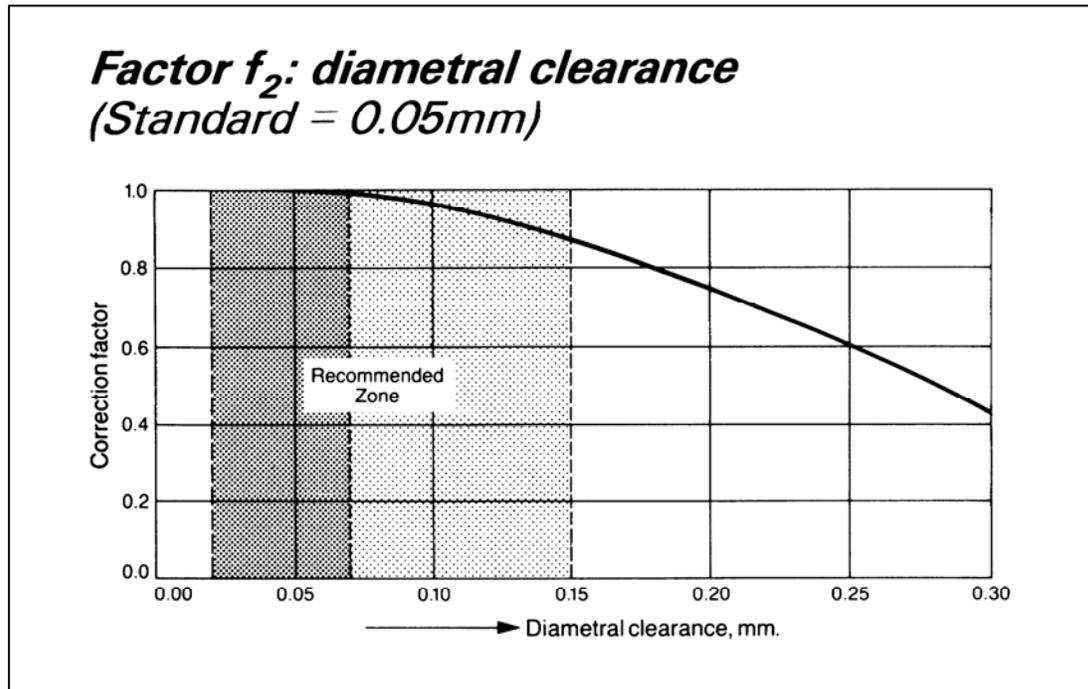
Die angegebenen Scherfestigkeiten stammen von Testergebnissen mit Standard Wellen und Naben Prüfkörpern gemäß Mil Spec. R46082A. Wo die Fügeteilgestaltung von diesen Bedingungen abweicht, sollten Korrekturen vorgenommen werden.

### Faktor $f_1$ : Werkstoff

Werkstoff	Korrekturfaktor
Flußstahl	1
Stahllegierung	0.8 bis 1
Aluminium *	0.3 bis 0.8
Gußeisen	0,8 bis 1
Kupfer und Kupferlegierungen	0.4 bis 0.7
Rostfreier Stahl	0.4 to 0.7
Zn or Cd Auflagen	0.3 bis 0.6

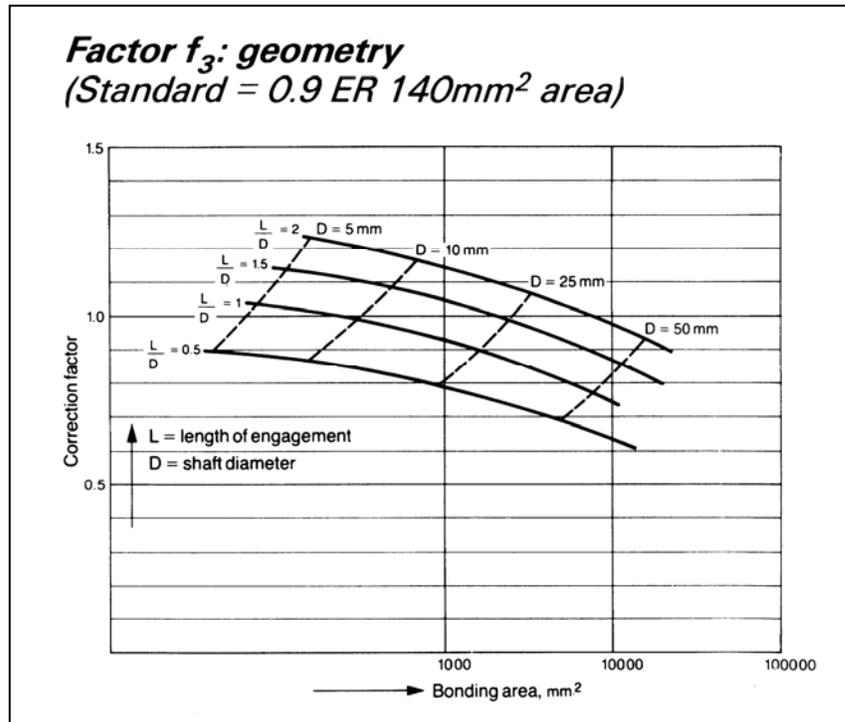
*\*handelsübliche Aluminiumlegierungen weisen ein sehr breites Spektrum in Bezug auf die chemischen und mechanischen Eigenschaften auf.*

## Faktor $f_2$ : Durchmesserspiel



Die beste Leistung wird bei einem Spiel zwischen 0,02 und 0,07mm erreicht. Bei größerem Spiel wird die Festigkeit reduziert. Vorzugsweise sollten die Konstruktionswerte der Spalte nicht die Spalttempfehlungen in den Datenblättern der Klebstoffe überschreiten. Sehr große oder kleine Spiele benötigen eine wesentlich höhere Sorgfalt bei der Montage.

### Faktor $f_3$ : Geometrie

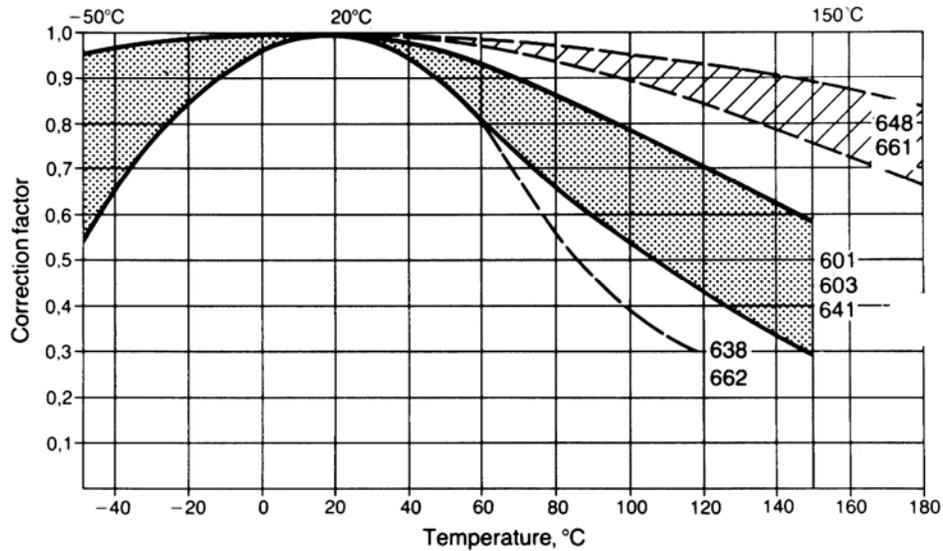


Große Flächen und stark unterschiedliche Fugelängen/Durchmesser Verhältnisse verstärken eine ungleiche Belastungsverteilung und mindern somit die effektive Festigkeit des Klebstoffs. Mit oben stehendem Diagramm können Korrekturfaktoren für eine Spanne von Konfigurationen und Oberflächengrößen abgeschätzt werden.

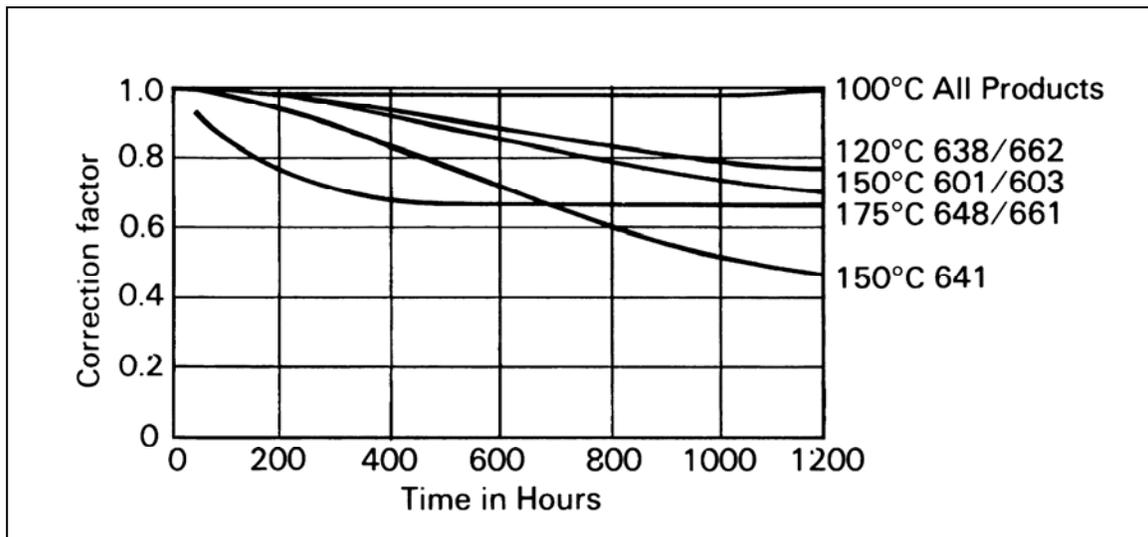
### Faktor $f_4$ : Betriebstemperatur

Die Scherfestigkeit des Klebstoffes ist bei höheren Temperaturen reduziert. Die Grafik zeigt Korrekturfaktoren für verschiedene Klebstofftypen. Der Betrieb der Verbindung bei erhöhter Temperatur über längere Zeit führt zu Alterung und Festigkeitsverlust.(siehe  $f_5$ .) Die einzelnen Klebstoffe sollten nicht bei höheren Temperaturen als in der Grafik angezeigt, eingesetzt werden.

### Factor $f_4$ : operating temperature



### Faktor $f_5$ : Wärmealterung



Die prozentual erhaltene Festigkeit nach kontinuierlichem Betrieb bei höheren Temperaturen ist für verschiedene Loctite Produkte als Korrekturfaktor in der folgenden Grafik dargestellt

### Faktor f<sub>6</sub>: Medien

Folgende Tabelle zeigt den Prozentsatz beibehaltener Festigkeit als Faktor nach 30 Tagen Medieneinlagerung bei 87°C und anschließendem Test bei 22°C

<b>Produkt</b>	601	638	641	648
	603	662		661
<hr/>				
<b>Medium</b>				
Luftreferenz	1.0	1.0	1.0	1.0
Toluol	0.7	0.9	0.7	1.0
JP-4-Jet Fuel	1.0	1.0	1.0	1.0
Alkohol	0.95	0.95	0.65	1.0
Glycol & Wasser	0.5	0.6	0.6	0.8
Mineralöl	1.0	1.0	1.0	1.0
Wasser	0.7	0.6	0.7	0.8

### Faktor f<sub>7</sub>: Montage

Montageart	Spielpassung	Preßpassung	Schrumpfpassung
Montagefaktor	1.0	0.5	1.2
Bei Spielpassung	Klebstoff füllt Klebestelle voll		
Bei Preßpassung	Etwas Klebstoff wird während der Montage abgestreift		
Bei Schrumpfpassung	Klebstoff füllt die Klebestelle und steht unter Druck- Belastung		

Die manuelle Berechnung unter Berücksichtigung all dieser Faktoren ist ausserordentlich zeitaufwendig, insbesondere wenn durch Parameter-Variation ein Optimum gesucht wird. Von Henkel Loctite ist deshalb das Rechenprogramm RetCalc entwickelt worden. Es fragt systematisch mit Hilfe strukturierter Eingabemasken die erforderlichen Betriebsparameter ab, bestimmt dann selbstständig die richtigen Korrekturfaktoren und berechnet die zu erwartenden Festigkeiten und Sicherheitsfaktoren.

Ein umfangreicher Literaturvergleich von gemessenen Werten und Berechnungsergebnissen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

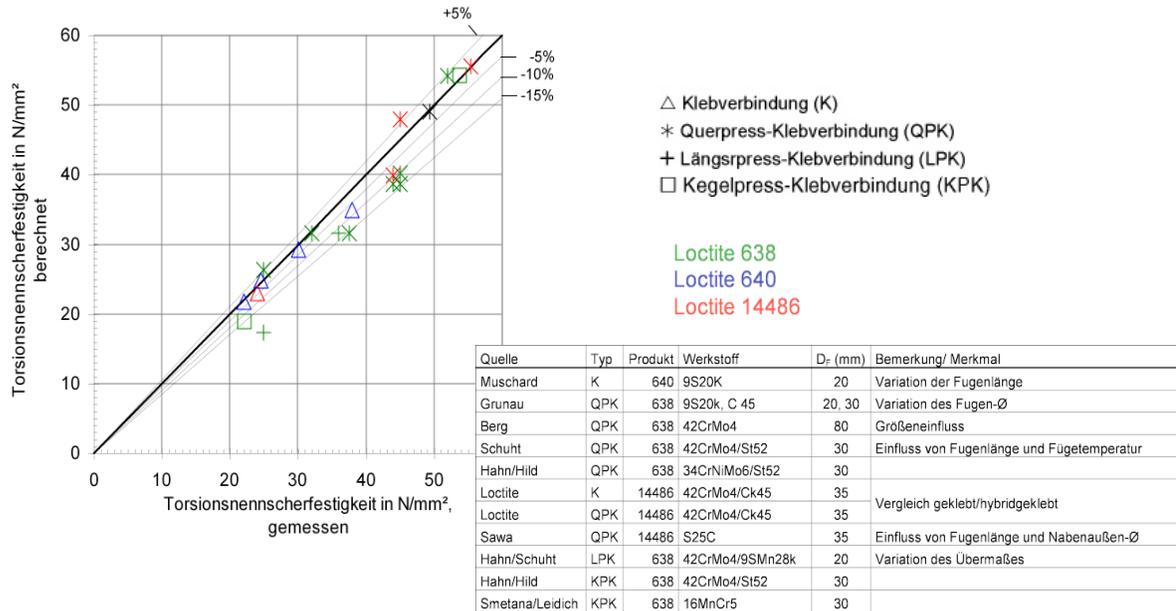


Bild 16: Verifizierung der Berechnungsergebnisse für geklebte Welle-Nabe Verbindungen

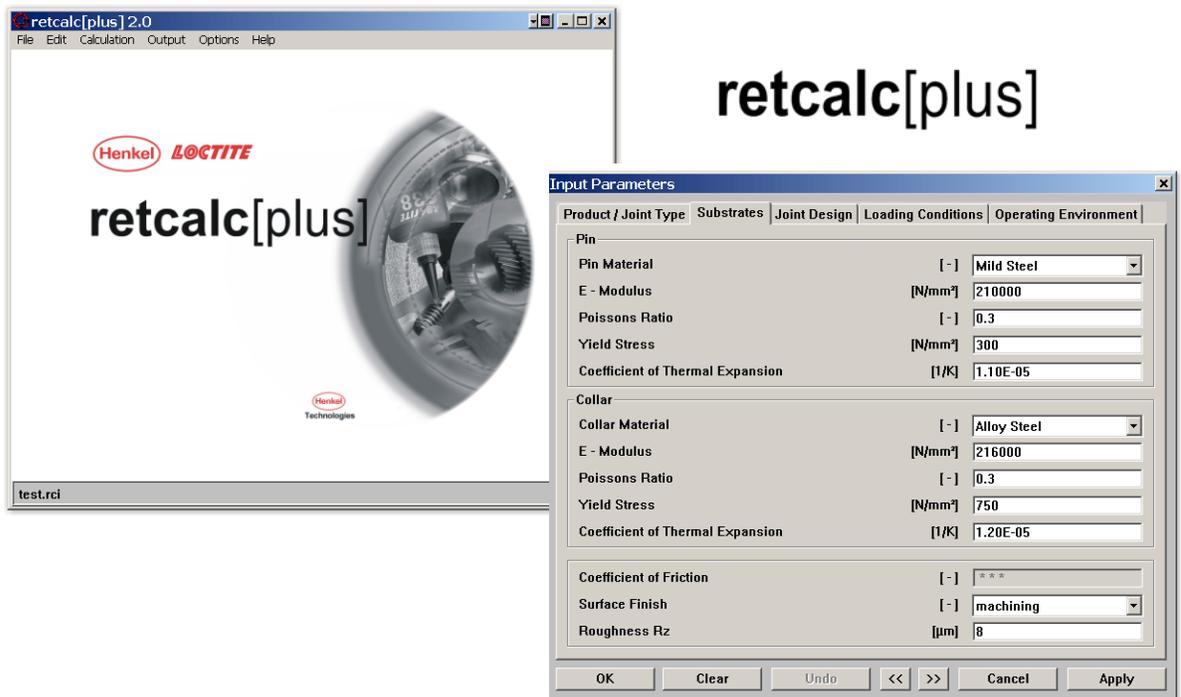


Bild 17: Berechnungsprogramm Retcalc für Welle-Nabe Verbindungen

Henkel Loctite bietet einen Berechnungsservice mit diesem Programm seinen Kunden an.

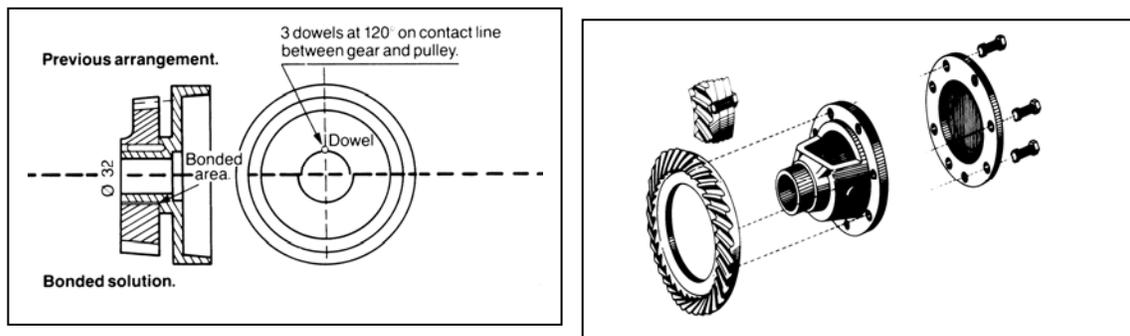
## Beispiele von Belastungsberechnungen

### (a) Zahnrad auf Kupplungsträger

Bei der Montage eines Zahnrades auf einen Kupplungsträger, wurden bei der ursprünglichen Methode drei Stifte auf die Trennlinie zwischen den beiden verbindenden Oberflächen zentriert gesetzt.

Die Stifte hatten eine Reihe von Nachteilen:

- Schwierig anzufertigende Bohrungen zwischen den Kontaktflächen, oft Ausschuß.
- Verformung der Teile wegen leichter Preßpassung und der Stifte
- nach Montage Nachbohren notwendig



Der Durchmesser der verklebten Oberflächen zwischen dem Stahlzahnrad und dem gusseisernen Kegel beträgt 32 mm und die Länge der Verbindung 15 mm. Wegen des relativ dünnen Schnitts der Teile konnte keine andere Möglichkeit als eine Verklebung zum Ersatz für die Stifte gesehen werden. Man dachte auch an Passfedern, aber die Wandstärke des Kegels war zu dünn.

Es wurde ein Fügeprodukt mit einer Scherfestigkeit von  $\tau_{B2} = 25\text{N/mm}^2$  ausgewählt. Das übertragbare Drehmoment errechnet sich mit:

$$T = \frac{\pi \times D^2 \times L}{2} \times (\tau_{B2} \times f_c)$$

Korrekturfaktoren:

$$f_1 = 0,8 \text{ (Stahl auf Gusseisen)}$$

$$f_2 = 1 \text{ (Spiel 0.025 bis 0.075)}$$

$$f_3 = 0.71 \quad (A = 1507\text{mm}^2, L/D = 0.47)$$

$$f_c = f_1 \times f_2 \times f_3 = 0.57$$

Einsetzen dieser Werte in die Formel ergibt:

$$T = \frac{3,14 \times 32^2 \times 15}{2 \times 1000} (25 \times 0,57) = 343\text{Nm}$$

Um die Berechnung zu überprüfen wurden Festigkeitstests durchgeführt. Die Verbindung versagte bei 430 Nm, was auf einen guten Sicherheitsfaktor der Berechnung hinweist. Da die in der Praxis auftretende Belastung dynamisch ist, sollte das Drehmoment nicht das 0.30-fache des berechneten (oder gemessenen) Wertes übersteigen. In diesem Fall entspricht dies einem Rechenwert von 103 Nm, bzw. 126 Nm auf Basis des Messergebnisses. Diese Werte liegen deutlich über dem benötigten Drehmoment von 18 Nm.

#### **(b) Zahnkranz auf Differentialtriebeträger**

Bei der ursprünglichen Montage eines Zahnkranzes auf ein Differentialtriebegehäuse wurde eine Halterungsplatte mit Schrauben eingesetzt.

Die Konstrukteure wollten das Gewicht und Kosten reduzieren. Das Design wurde dahingehend geändert indem man den Zahnkranz an den Differentialträger mit einem 0.25mm Übermaß aufpresste. Damit erzielte man jedoch nicht die benötigte dynamische Drehmomentenfestigkeit von 3420Nm. Eine Erhöhung der Übermaßpassung hätte die Materialfestigkeit des Zahnkranzes überfordert.

Die Konstrukteure entschieden sich deswegen für eine leichte Schrumpfpassung mit 0.004-0.12mm Übermaß in Kombination mit einem Fügeklebstoff um die benötigte Festigkeit zu erreichen.

Die Berechnung ergibt:

$$T = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{2} (P \cdot \lambda + \tau_{B2} \cdot f_c)$$

Korrekturfaktoren:

$$f_1 = 0,8 \text{ (Stahl auf Gußeisen)}$$

$$f_2 = 1,2 \text{ (Schrumpfpassung)}$$

$$f_3 = 0,6$$

$$f_4 = 0,9 \text{ (Temperatur } 120^\circ\text{C)}$$

$$f_c = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 = 0,52$$

$$\tau_{B2} \text{ für Fügeprodukt} = 25 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Klebstofffestigkeit} = 25 \times 0,52 = 13 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Mechanische Festigkeit} = P \times \lambda = 2,3 \text{ N/mm}^2$$

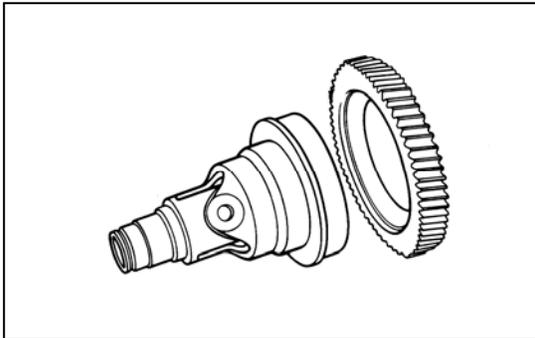
Bei Einsetzen dieser Werte in die Formel ergibt sich als statisches Drehmoment:

$$T = \frac{3,14 \cdot 140^2 \cdot 24}{2 \cdot 1000} (2,3 + 25 \cdot 0,52) = 11300 \text{ Nm}$$

$$\text{Dynamische Abminderung} = 0,35$$

$$\text{Geschätzte dynamische Dauerfestigkeit} = 11,3000 \times 0,35 = 3955 \text{ Nm}$$

$$\text{Tatsächlich benötigt} = 3420 \text{ Nm}$$



## **5 Anwendungsbeispiele**

### **5.1 Flache Flanschflächen**

In nahezu allen Industriebereichen werden heute strukturelle Klebstoffe zur Herstellung konstruktiver Verbindungen eingesetzt. Insbesondere im Leichtbau ist die Klebetechnik nicht mehr weg zu denken. Historisch betrachtet war es der Flugzeugbau bei dem die ersten Strukturklebstoffe eingesetzt wurden. Heute ist der Fahrzeugbau der Innovationstreiber dieser Technologie. Häufig wird das Kleben auch mit anderen Fügeverfahren wie dem Punktschweißen, dem Stanznieten oder dem Clinchen kombiniert um die Vorteile der jeweiligen Methoden optimal zunutzen. Man spricht in diesem Fall von Hybridfügeverfahren.

Aus der Fülle der Anwendungen können hier nur einige Beispiele exemplarisch dargestellt werden.

#### **Automobilbau**

Strukturklebungen an der Rohkarosse von Blechteilen wie z.B. Hutprofilen und Verstärkungsblechen mit dem Ziel einer erhöhten Struktursteifigkeit oder einer verbesserten Crashfestigkeit. Untersuchungen zeigen, dass geklebte oder hybridgefügte Verbindungen im Vergleich zu den nur punktgeschweissten Pendanten eine höhere Dauerfestigkeit und einen besseren Steifigkeitserhalt aufweisen und damit zum dauerhaften Fahrkomfort beitragen. Auch konnte nachgewiesen werden, dass geklebte Strukturen im Crashfall eine höhere Energieaufnahme und Verformungsfähigkeit besitzen als herkömmlich gefügte Bauteile. Die Weiterentwicklung im Leichtbau führt auch im Automobil zum vermehrten Einsatz von faserverstärkten Kunststoffbauteilen deren Integration in die Fahrzeugstruktur ohne Klebstoffe nicht denkbar wäre.

#### **Luft- und Raumfahrt**

Hier werden technologisch an die Klebstoffe, die Vorbehandlung der Werkstoffoberflächen und die Prozessführung die höchsten Anforderungen gestellt. Das

Ergebnis sind höchstbelastbare und ausserordentlich dauerhafte Verbindungen, die auch nach Jahrzehnten Betriebsdauer keinerlei Schäden und Nachlassen der Festigkeit aufweisen. Typische Anwendungen sind Verbindungen von Teilen aus hochfesten Aluminium-Leichtmetalllegierungen oder Titan am Flugzeugrumpf wie auch an Flügeln und Leitwerken. In letzter Zeit haben auch CFK-Klebungen in diesem Bereich stark an Bedeutung gewonnen. Beispielsweise werden die Versteifungs-Stringer am Seitenleitwerk des Airbus A380 mit Epoxidharz geklebt.

### **Windkraftanlagen**

Hier werden die Flügelschalen der Rotorblätter an die tragende Unterstruktur geklebt. Zum Einsatz kommen thixotropierte 2k-Epoxidharz oder auch PUR Klebstoffe mit langer Offenzeit. Bei den Substraten handelt es sich um GKF- oder GFK/CFK-Komposites. Die Betriebstemperaturen liegen im Bereich  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+80^{\circ}\text{C}$ . Klebstoffe für dieses Einsatzgebiet bedürfen der Zulassung durch den Germanischen Lloyd.

### **Allgemeiner Maschinenbau**

Das Einkleben der Endringe von Druckwalzen ermöglichte im Vergleich zum bisherigen Lötverfahren eine erhebliche Kosteneinsparung durch Wegfall von nachträglicher Richtarbeit sowie eine längere Standzeit der Walzen durch die hohe dynamische Belastbarkeit der Klebeverbindung.

### **Sportartikel**

Bei Golfschlägern werden die metallischen Schlägerköpfe in Schäfte aus Metall oder faserverstärktem Kunststoff eingeklebt. Der verwendete Epoxidharz-Klebstoff muß eine ausserordentlich hohe Schlagbeständigkeit besitzen um Aufschlagsgeschwindigkeiten von bis zu 50 m/s standzuhalten.

## **5.2 Welle-Nabe Verbindungen**

### **Lager**

Die typischen Vorteile von Klebstoffen zur Montage von Lagern sind folgende:

- Sicherungsringe und Schleifarbeiten entfallen.
- gestufte Wellen werden vermieden und identische Lager können auf Wellen mit konstantem Durchmesser montiert werden.
- Eine verbesserte Lagerausrichtung kann erreicht werden
- Die montierten Teile sind abgedichtet und somit entfallen Probleme im Hinblick auf Reibkorrosion oder elektrolytische Korrosion.
- Durch die verbesserte Lastverteilung werden Spannungsspitzen abgebaut
- Ausgleich unterschiedlicher thermischer Ausdehnung

### **Schleißringe, Liner, selbstschmierende Buchsen, Einsätze, Rohre**

Schleißringe, Beläge in jeder Stärke, Einsätze und Stopfen können mit Fügeklebstoffen dauerhaft befestigt werden.

### **Öl-imprägnierte gesinterte Buchsen**

Öl-imprägnierte gesinterte Buchsen können mit Spielpassungen besser montiert werden als mit Presspassungen. Die Haltefestigkeit ist 1,5 mal besser als die mit Presspassung. Das Verengen der Buchsenbohrung wird vermieden und somit ist das Wellenspiel etwas genauer. Das bedeutet, dass das nachträgliche Aufreiben der Bohrungen nach der Buchsenmontage entfällt. Aufreiben verstopft die Sinterporen und reduziert damit die Wellenschmierung. Buchsen können mit einer Spielpassung ohne Hilfe einer Presse genau positioniert werden.

### **Dünnwandige Komponenten**

Herkömmlich werden Liner mit Pressen montiert, jedoch sind wegen der elastischen Verformung der Teile oft Nacharbeiten erforderlich. Bei Einsatz von Rohrstützen oder anderen dünnwandigen Teilen ist ein Einpressen wegen der Empfindlichkeit der Teile schwierig. In diesen Fällen werden Klebstoffe angewandt, wie z.B. bei Vergasern, Kompressoren, Motoren, usw.

## **Getriebe, Nockenwellen und Antriebsscheiben**

Wo Getriebe, Nockenwellen oder Antriebsscheiben mit Wellen verbunden werden, finden Passfeder- oder Keilwellenverbindungen ihre Anwendung. Typische Probleme bei solchen Verbindungen sind Spiel/Ausschlagen bei Reversierbetrieb und Spannungsspitzen in den Keilnuten.

## **Nichtmetallische Teile**

Komponenten wie Handräder, Kontrollknöpfe, Buchsen, Zahnräder, Kommutatoren, usw. sind oft aus wirtschaftlichen Gründen, des Aussehens, der Elastizität oder der Abriebsfestigkeit wegen, aus nicht-metallischen Werkstoffen gefertigt. Mit anaeroben Klebstoffen können viele davon mit Metallteilen verklebt werden.

Da normalerweise anaerobe Klebstoffe nur bei Luftabschluss und dem katalytischen Effekt von Metall aushärten können, sollte für die Verklebung von nichtmetallischen Teilen der Aushärteprozess durch den Gebrauch von einem Aktivator beschleunigt werden.

## **Spielbeseitigung und Minderung von Keilnutbelastungen**

Dort wo Passfedern oder Keilwellen für Torsionsbelastung ohne Gleiten in Längsrichtung angewandt werden, kann eine Passverbindung mit Klebstoff die Lebensdauer sehr erhöhen.

Beispiel: Eine eng passende Scheibenfeder in einer 25mm Welle wurde mit einer verklebten Scheibenfeder verglichen. Die Federn der Größe 6.25mm x 34.375mm wurden entsprechend dem SAE J502 Standard montiert, der bis zu 0,02mm Spiel zuläßt. Für diesen Test wurden die Teile jedoch mit einem geringem Übermaß ausgewählt.

Nach 12 Millionen Lastwechseln mit  $\pm 200\text{Nm}$  (entsprechend 40% der maximalen Torsionsfestigkeit der Welle) auf einer Dauerprüfmaschine, hatte sich die nicht geklebte Scheibenfeder ca. 0,05mm gelockert und wies erheblichen Passungsrost und Wellenermüdungsbrüche in der Federnut auf. Die Feder mit dem Klebstoff zeigte weder Spiel noch irgendwelche Brüche.

Fügeklebstoffe verhalten sich wie eine Kunststoffschicht, die die Spalten zwischen Nabe und Welle oder Federn ausfüllt. Diese verteilen die Belastung über die gesamte Fügefläche und somit werden Spannungsspitzen (z. B. an Ecken von Keilnuten) vermieden.

### **Unterschiedliche Wärmeausdehnung**

In vielen Fällen, werden ungleiche Materialien mit unterschiedlichen Werten für die Wärmeausdehnung eingesetzt. Das kann zu Zugbelastungen in der Klebung führen, wenn die Baugruppe ihre Betriebstemperatur erreicht. Fügeprodukte können große Druckbelastungen ( $> 300 \text{ N/mm}^2$ ) aushalten jedoch keine großen Zugbelastungen. Es gibt drei Techniken, die angewandt werden können, um den Effekt von Wärmeausdehnungen zu kompensieren.

#### **1. Erwärmen der Nabe**

Die Nabe sollte auf Betriebstemperatur aufgewärmt, der Klebstoff auf die kühle einzuführende Komponente aufgetragen und dann die Teile zusammengefügt werden. Damit wird sichergestellt, daß im gesamten Betriebstemperaturbereich der Klebstoff unter Druckspannung steht. Dies gewährleistet eine dauerhafte Verbindung.

#### **2. Übermaßpassung mit Klebstoff**

Eine Übermaßpassung sollte mit Klebstoff unterstützt werden. Solange ein kleines Übermaß innerhalb des gesamten Betriebstemperaturbereiches gewährleistet ist, wird die Klebeverbindung erfolgreich sein.

#### **3. Spezifizierung der Toleranzen**

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Fügeklebstoffen liegt bei  $10 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$  ( zum Vergleich Aluminium =  $2.2 \times 10^{-5}$ ). Damit können die zulässigen Toleranzen abgeleitet werden, um die auf den Klebstoff wirkenden Zugbelastungen zu minimieren.

### **Bemerkung zur Wärmeübertragung**

Wie schon an anderer Stelle erläutert, weisen ungeklebte Presspassungen nur ca. 20 bis 30% Metall-Metall Kontakt zwischen den Fügepartnern auf. Eingeschlossene Lufttaschen sind eine gute Isolierung mit einem Wärmeleitkoeffizient von  $0.027 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$ .

Im Gegensatz hierzu, besitzt eine geklebte Passung 100% Flächenkontakt, der durch den ausgehärteten Klebstoff gebildet wird. Die Leitfähigkeit des Polymers liegt bei 0.144 W/m/°C und ist etwa fünfmal höher als die von Luft.

## 6 Literatur

- G. Habenicht: Kleben, Grundlagen – Technologie – Anwendungen, Springer Verlag
- R.D. Adams (editor): Adhesive bonding, Science, technology and applications, Woodhead Publishing Limited
- ESDU - Engineering Data Handling Unit, [www.esdu.com](http://www.esdu.com)
- W. Brockmann, P.L. Geiß, J.Klingen, B.Schröder: Klebtechnik, Klebstoffe, Anwendungen und verfahren, Wiley-VCH
- G. Habenicht: Kleben – erfolgreich und fehlerfrei, Vieweg + Teubner
- E.W. Petrie: Handbook of Adhesives and Sealants, McGraw-Hill
- Fosta-Forschungsberichte P 229, P 259, P 332, P 340, P 477, P 508, P 513, P 676 bei [www.stahl-online.de](http://www.stahl-online.de)