



Aluminium-Zentrale e.V.

ALUMINIUM MERKBLATT V6

4. Auflage

Kleben von Aluminium



Bildnachweis

Oben links

Auftragen des Klebers zum Verkleben des Raumschutzes im Laderaum eines Nutzfahrzeuges

Oben rechts

Aluminium-Dachrahmenkonstruktion eines Nutzfahrzeuges

Unten links

Blech vom Coil wird auf die Aluminium-Dachrahmenkonstruktion geklebt

Unten rechts

Aluminiumgerippe eines Verkaufsfahrzeuges, dessen Verkleidung vollständig verklebt wird

Fotos: Sika Chemie GmbH, Bad Urbach

Autor: Dr. Werner Gruber, Henkel KGaA, Düsseldorf

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung in die Klebtechnologie	4
2. Reaktionsklebstoffe	5
2.1 Polykondensationsklebstoffe	6
2.2 Polyadditionsklebstoffe	7
2.3 Polymerisationsklebstoffe	8
3. Kleben von Aluminium	10
3.1 Oberflächenvorbehandlung	13
3.2 Auswahl der Klebstoffe	18
3.3 Konstruktive Gestaltung der Klebverbindungen	20
3.4 Hinweise zur Herstellung der Klebverbindung	25
4. Eigenschaften der Klebverbindung	27
4.1 Strukturaufbau einer Klebschicht	27
4.2 Statische Beanspruchung	27
4.3 Quasistatische Beanspruchung	27
4.4 Dynamische Beanspruchung	29
5. Prüfen von Klebverbindungen	29
6. Einsatzbereiche von Aluminium	31
7. Beispiele für Aluminium-Verklebung	32
7.1 Kleben im Fahrzeugbau	32
7.2 Kleben von Aluminium in der Autoreparatur	35
7.3 Fassadenverkleidungen	37
7.4 Herstellung von Sandwich-Elementen	38
7.5 Herstellung von Isoliermaterialien	39
7.6 Kleinflächige Aluminium-Konstruktionen	40
7.7 Folienkaschierungen	41
Anhang	42
8. Literaturverzeichnis	43

1. Einführung in die Kle 技术

Die Technologie „Konstruktives Kleben“ ist heute, verglichen mit dem Schweißen, Löten, Nieten, Schrauben oder Durchsetzfügen, das universalste Verbindungsverfahren. Es lassen sich nahezu alle technisch nutzbaren Werkstoffe miteinander und untereinander flächig und stoffschlüssig fügen, wobei der eigentliche Fügeprozeß dem Konstrukteur praktisch keine gestalterischen Einschränkungen auferlegt, was bei anderen Verbindungstechniken durchaus der Fall ist. Zudem kann der Fügeprozeß Kleben wärmearm oder wärmefrei durchgeführt werden, die Struktur der zu fügenden Werkstoffe wird praktisch nicht verändert.

Das Konstruktive Kleben ist eine Hochleistungsverbindungstechnik und wird in praktisch allen Bereichen der Industrie zur Fertigung von Einzel- oder Massenproduktionen eingesetzt, was Anwendungen aus den Bereichen der Luft- und Raumfahrttechnik, des Kraftfahrzeugbaus, des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und der Mikroelektronik überzeugend belegen können.

Die Akzeptanz der Technologie **Konstruktives Kleben** als Alternative zu den traditionellen Verbindungstechniken wurde aber erst durch die Entwicklung geeigneter funktionsfähiger Reaktionsklebstoffe ermöglicht.

Das Kleben zählt nach DIN 8580 zu den stoffschlüssigen Fertigungsverfahren. Folgende Vorteile sind besonders erwähnenswert:

- **Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe**
- **Großflächige Verbindung dünner Materialien**
- **Gleichmäßige Spannungsverteilung**
- **Hohe Schwingungsdämpfung**
- **Erhöhter Korrosionswiderstand (Vermeidung von Spaltkorrosion)**

- **Wärmearmes Verbindungsverfahren**
- **Automatisierbares Fügeverfahren**

Die Anwendung der Kle 技术 ermöglicht die Realisierung neuartiger Konstruktionslösungen, wie beispielsweise die Sandwich- und Wabenkernbauweise im Flug- und Fahrzeugbau. Der häufig mögliche Verzicht auf enge Maßtoleranzen kann die wirtschaftliche Fertigung unterstützen.

Dem gegenüber stehen folgende Nachteile:

- **Ungünstiges Zeitstand- und Alterungsverhalten bei Medieneinwirkung**
- **Starke Temperaturabhängigkeit der mechanischen Verbindungseigenschaften und relativ niedrige Temperaturbelastbarkeit**
- **Geringe Festigkeiten bei Schälbeanspruchung**
- **Notwendige Vorbehandlung der zu verklebenden Oberflächen**

DIN 16920 definiert Klebstoffe als nichtmetallische Stoffe, die Fügeteile durch Haftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden können. Die Festigkeit der Verbindung wird außer von den mechanischen Eigenschaften der Klebschicht und deren Haftung zum Fügeteil in starkem Maße von der geometrischen Gestaltung und dem Verformungs- und Festigkeitsverhalten der Fügeteile bestimmt.

Die Adhäsion des Klebstoffes hängt stark vom Oberflächenzustand der Fügeteile ab, der durch entsprechende Vorbehandlungen, wie mechanische Bearbeitung oder Beizen, beeinflußt werden kann.

Literatur zu den Grundlagen, der Technologie und zu Anwendungen des Klebens ist im Schrifttumverzeichnis (1–10) aufgeführt.

2. Reaktionsklebstoffe

Für die konstruktive Verklebung von Metallen und insbesondere Aluminium kommen fast ausschließlich Reaktionsklebstoffe in Frage.

Reaktionsklebstoffe sind Produkte, die während der Anwendung härten (polymerisieren) und erst dann ein Polymer mit typischen Eigenschaften bilden. Im Gegensatz dazu enthalten die traditionellen physikalisch abbindenden Klebstoffe, wie die bestens bewährten wässrigen Klebstoffe auf natürlicher Basis (Stärke, Dextrine, Caseine), die Dispersionen (Vinylacetat-Copolymere, Polyurethane, Acrylate), die Haft- oder Kontaktklebstoffe sowie die Hotmelts bereits das fertige Polymer, das nach dem Abdunsten des Wassers oder des Lösungsmittels bzw. nach der Applikation aus der Schmelze seine klebtechnischen Eigenschaften entfaltet. Der Vorteil dieser Klebstoffe liegt insbesondere darin, daß sie für den Anwender relativ leicht zu handhaben sind und für die Werkstoffe Papier, Holz und Leder hervorragend geeignet sind. Für konstruktive Verklebungen der Werkstoffe Metall/ Kunststoff ist das Leistungsspektrum dieser

physikalisch abbindenden Klebstoffe jedoch nicht ausreichend, in diesem Fall trifft die Wahl auf die Reaktionsklebstoffe. Mit Reaktionsklebstoffen ist ein anderes Leistungsspektrum einstellbar.

Konstruktive Verklebungen sind dadurch gekennzeichnet, daß Kräfte übertragen werden müssen. Zwar ist die Klebefuge bei den Materialien Metall und Kunststoff immer das schwächste Glied, trotzdem gelingt es, durch geeignete Konstruktionen, Vorbehandlung und Auswahl des geeigneten Klebstoffsystems, dauerhafte Verklebungen zu realisieren.

Zwar ist das Festigkeitsniveau bei Raumtemperatur oder Gebrauchstemperatur, gemessen als Zugscherkraft für eine erfolgreiche Verklebung äußerst wichtig, für eine dauerhafte Verbindung müssen jedoch noch weitere Anforderungen wie ausreichende Schälfestigkeit, Schlag- und Biegefertigkeit, Flexibilität, Medienbeständigkeit und insbesondere Alterungsbeständigkeit erfüllt werden. Je nach Anforderung existiert ein entsprechendes Lastenheft, um langfristig dauerhafte Verklebungen zu gewährleisten, die die Nutzungsdauer, z.B. des Autos, überschreiten.

Physikalisch abbindende Klebstoffe			Reaktionsklebstoffe	
Aushärtung ohne chemische Reaktion			Aushärtung mit chemischer Reaktion	
Lösemittel-haltig	auf Basis Wasser	Lösemittel-frei	Polymerisation Polyaddition	Polykondens- sation
Kontakt- klebstoffe	Dispersionen	Schmelz- klebstoffe	Epoxide	Silikone
Alleskleber	Stärke		Polyurethane	Phenol-Harze
Haftklebstoffe	Kasein		Cyanacrylate	
			Acrylate	

Abb. 1: Klebstoff-Einteilung

Diese hohen Anforderungen können nur High Performance Reaktionsklebstoffe erfüllen, wobei es ganz entscheidend ist, welche Monomerbausteine zum Einsatz kommen und wie die Vorbehandlung der Fügepartner erfolgte.

Zum Aufbau dieser Polymere, die die erwähnten Anforderungen erfüllen, kommen die klassischen Polymerisationsverfahren: Polykondensation, Polyaddition und Polymerisation in Frage. Die Polykondensation finden wir bei den Phenol-Harzen und den Siliconen, die Polyaddition bei den Epoxiden und Polyurethanklebstoffen und die Polymerisation bei den Acrylaten, Cyanacrylaten und ungesättigten Polyester.

2.1 Polykondensationsklebstoffe

Phenolharze bauen auf den vielfältigen Polykondensationsreaktionen zwischen Phenolen und Aldehyden auf. Von technischer Bedeutung sind vor allem die Phenol-Formaldehydharze, die nach dem molaren Verhältnis von Aldehyd/ Phenol bei der Vorkondensation von > 1 als Resolharze und von < 1 als Novolakharze bezeichnet werden.

Vinyl-Phenol-Harze (Redux)

Die Vinyl-Phenol-Harze waren nach dem 2. Weltkrieg die ersten Klebstoffe, die im europäischen Flugzeugbau mit Erfolg eingesetzt wurden und auch heute noch eingesetzt werden. Sie sind durch ein ausgezeichnetes Festigkeitsniveau inklusive hoher Schärfestigkeit bei hervorragender Alterungsbeständigkeit gekennzeichnet. Die Härtung erfolgt bei erhöhter Temperatur und unter Druck. Nach Auftrag des Resolharz-Primers auf das Aluminium wird im zweiten Schritt das Polyvinylformalharz appliziert.

Während Phenolresolharze als Funktion von Temperatur, Zeit und pH-Wert ohne weitere Zusätze zu Duromeren vernetzt werden können, benötigen Phenolnovolakharze in einem zweiten Schritt einen zusätzlichen Vernetzer, wie das Hexamethylentetramin. Die eigentliche Härtung erfolgt mit Pressen und Haltevorrichtungen im Autoklaven. Dies ist der kritische Punkt für den Anwender. Die Polykondensationsklebstoffe haben sich deswegen nur bedingt durchsetzen können. Doch da wo es möglich war, die für die Härtung erforderlichen Bedingungen einzurichten, leisten diese Klebstoffe Hervorragendes. Nicht von ungefähr haben diese Klebstoffe in der Luft- und Raumfahrt als Konstruktionsklebstoffe für Aluminium und dessen Legierungen einen ausgezeichneten Ruf, kann man doch damit eine überlegene Langzeitbeständigkeit gegen Korrosion und mechanische Belastung erreichen. Gleichzeitig hat man mit diesen Phenolharzen die längsten Erfahrungen.

Nitril-Phenol-Harze

Film-Klebstoffe

Die Nitril-Phenol-Harze sind Polymerblends aus Nitrilkautschuk und Phenol-Harzen und werden meist als Film-Klebstoffe oder Bänder gehandhabt.

Sie sind mit Abstand die am häufigsten eingesetzten trägerunterstützten Klebstoffe für konstruktive Aluminiumverbindungen. Festigkeiten und Alterungsbeständigkeit sind hervorragend. Aluminiumverbindungen können bis 180°C belastet werden. Für die Anwendung sind jedoch ein hoher Anpreßdruck ($0,4\text{--}0,7 \text{ MPa}$) und 150°C erforderlich, weswegen der Einsatz oft limitiert ist. Derartige Filme oder Bänder werden vorwiegend im US-Flugzeugbau eingesetzt. Sowohl Vinyl-Phenol-Harze als auch Nitril-Phenol-Harze sind im Alterungsverhalten den Epoxid-Klebstoffen überlegen.

Neben den Phenolharzen gibt es noch die Silikonharze als Kondensationsklebstoffe. Silikone werden wegen ihres Eigenschaftsniveaus vorwiegend als Dichtungsmassen verwendet, mit Ausnahme spezieller silanmodifizierter Polymere, die als einkomponentige Klebstoffe für elastische Verklebungen ausgezeichnete Eigenschaften aufweisen.

Silanmodifizierte Kleb- und Dichtstoffe (MS-Polymer)

Silanmodifizierte Kleb-/Dichtstoffe auf Basis von MS-Polymeren zählen zu den Neuentwicklungen der letzten Jahre. Sie sind als 1-Komponenten-Systeme konzipiert und härten durch Zutritt von Luftfeuchtigkeit aus. Die Hauptschlüsselelemente betragen, abhängig vom jeweiligen System, zwischen 10 und 20 Minuten. Die Aushärtungsgeschwindigkeit kann je nach Gegebenheit bis zu 5 mm/Tag betragen. Aufgrund ihres chemischen Aufbaues zeigen die MS-Kleb-/Dichtstoffe gute Witterungs- und Alterungsbeständigkeit sowie ein nahezu universelles Haftspektrum ohne Primer. Insbesondere bei kritischen Untergründen bieten MS-Kleb-/Dichtstoffe oftmals noch Problemlösungen wo andere Systeme bereits versagen. In frischem Zustand sind MS-Dichtstoffe sowohl mit wässrigen als auch lösungsmittelhaltigen Lacken überstreichbar.

MS-Polymer-Klebstoffe werden zum elastischen Abdichten von Fugen und Nähten, sowie kraftschlüssigen Verklebungen von Teilen im Waggon- und Containerbau, Apparatebau, in der Metall- und Blechverarbeitung, Kunststoff-Technik, Klima- und Lüftungstechnik, sowie in der Reinraumtechnik eingesetzt.

2.2 Polyadditionsklebstoffe

Das Eigenschaftsspektrum eines Reaktionsklebstoffes wird durch das relativ hohe Molgewicht und den Vernetzungs-

grad bestimmt. Dieser Zustand ist mit Polykondensationsklebstoffen nur mit einem erheblichen Aufwand erreichbar. Einfacher lässt sich dagegen die Polyaddition durchführen, die reaktiven Partner ergeben schon unter Raumtemperaturbedingungen in Abhängigkeit vom Molverhältnis der jeweiligen Partner hohe Molgewichte. Eine ideale Voraussetzung für Reaktionsklebstoffe. Tatsächlich haben sich deswegen die Epoxide und Isocyanate als wichtigste Bausteine für Reaktionsklebstoffe etabliert. Bedingt durch ihre einfache Handhabung zählen heute die Epoxid- und Polyurethanklebstoffe zu den am häufigsten eingesetzten Reaktionsklebstoffen.

Epoxid-Klebstoffe

Konstruktive Metallverklebungen werden hauptsächlich mit ein- und zweikomponentigen Epoxid-Klebstoffen durchgeführt. Hierbei werden Zugscherfestigkeiten von bis zu 40 MPa erreicht. Epoxide sind die am weitest verbreiteten Metallklebstoffe. Mit einkomponentigen, bis 180°C härtenden Epoxid-Klebstoffen sind die belastbarsten Verbindungen möglich. Jedoch können die zu fügenden Teile aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen nicht immer dieser Temperatur ausgesetzt werden. Von Vorteil sind dann die bei Raumtemperatur härtenden zweikomponentigen Epoxid-Klebstoffe, bei denen durch Zuführung von Wärme die Aushärtungsgeschwindigkeit und die Festigkeit erhöht werden können. Zweikomponentige Epoxidharze weisen eine Temperaturbeständigkeit von –30 bis 100°C auf. Mit speziellen einkomponentigen Epoxid-Klebstoffen lassen sich Wärmebestandsfestigkeiten bis 180°C erzielen.

Epoxid-Klebstoffe werden überwiegend im Bereich der konstruktiven Metallverklebung, z. B. im Behälter- und Gehäusebau sowie für Aluminiumkonstruktionen eingesetzt.

Unter Preis-/Leistungsgesichtspunkten können diese Klebstoffe Hervorragendes leisten und stärken das Vertrauen der Anwender in die Klebetechnik, vorausgesetzt er beachtet alle Vorschriften des Herstellers, von der geeigneten Vorbehandlung der Substrate, dem geeigneten Klebstoffauftrag bis hin zu den empfohlenen Aushärtungsbedingungen. Derartige Epoxide oder Polyurethansklebstoffe werden sowohl als einkomponentige und zweikomponentige Klebstoffe eingesetzt.

Die zweikomponentigen Epoxide oder Polyurethane haben den entscheidenden Vorteil, daß sie unkritisch hinsichtlich Lagerstabilität sind und eigenschaftsmäßig gezielt einstellbar sind. Sie müssen aber im richtigen vorgegebenen Mischungsverhältnis eingesetzt werden. Dagegen entfällt jegliches Mischen bei den einkomponentigen Klebstoffen, jedoch ist eine Wärmeaushärtung bei $\sim 180^{\circ}\text{C}$ zwingend erforderlich.

Polyurethan-Klebstoffe

Klebstoffe auf Basis Polyurethan liegen als einkomponentige und zweikomponentige Systeme vor. Einkomponentige Polyurethan-Klebstoffe bestehen aus isocyanathaltigen Prepolymeren, die durch Zutritt von Luftfeuchtigkeit aus härten. Zur Erzielung von hohen Klebfestigkeiten und zur Vermeidung von Blasenbildung wird unter Druck in geeigneten Preßeinrichtungen ausgehärtet. Die Aushärtezeit kann durch Zufuhr von Wärme verkürzt werden.

Einkomponentige Polyurethan-Klebstoffe werden zur Herstellung von Sandwichelementen aus porösen Materialien (Holz, Polystyrolhartschaum, Polyurethanhartschaum u. w.) und Schichtstoffplatten (Kunststoffen) oder Metallen (Aluminium) eingesetzt, die anschließend für Trennwände, Türen oder Seitenwände von Wohnwagen Verwendung finden.

Zweikomponentige Polyurethan-Klebstoffe bestehen aus einer Polyol-Komponente (Harz) und einer Isocyanat-Komponente (Härter), die in einem vorgegebenen Mischungsverhältnis zu mischen und dann zu verarbeiten sind. Wichtige Kriterien für den Anwender sind das Mischungsverhältnis (von 1:1 bis 1:10), die Topfzeit (von wenigen Minuten bis zu Stunden je nach vorgegebener Taktzeit) und die Verarbeitungskonsistenz des Klebstoffs (Viskosität von gut fließfertig bis zu standfest).

Zweikomponentige Polyurethan-Klebstoffe werden für flächige Verklebungen bei Fahrzeugaufbauten (Sandwichbauweise), Fassadenelementen, Schiff- und Containerbau eingesetzt.

Mit den Epoxiden oder Polyurethanen sind fast alle polaren Werkstoffe dauerhaft zu verbinden, die Palette reicht von den Metallen bis hin zu den vielfältigsten Kunststoffen. Welchem dieser 2 Systeme der Vorzug gegeben wird, hängt von zahlreichen Parametern ab. Grundsätzlich kann man sagen, daß Epoxide die dauerbeständigen Metallverbunde und Polyurethane die flexibelsten Kunststoffverbunde ermöglichen. Temperaturmäßig sind mit Epoxiden verklebte Materialien am stärksten belastbar, während Verbunde mit Polyurethansklebstoffen selbst bei -150°C , z. B. in Flüssiggastankern, noch funktionsfähig sind.

2.3 Polymerisationsklebstoffe

Die Polymerisation ungesättigter Verbindungen ist die am häufigsten angewandte Methode zum Aufbau von Polymeren. Die Übertragbarkeit auf die Formulierung von Reaktionsklebstoffen lag deswegen nahe. Insbesondere mit (Meth-)acrylaten und ungesättigten Polyester lassen sich zahlreiche zweikomponentige Klebstoffe, die aus Harz und Härter bestehen, formulieren.

Derartige Reaktionsklebstoffe härteten relativ schnell bei Raumtemperatur und zeigten ein ausgezeichnetes Haftungsspektrum. Ihr Einsatz ist weit verbreitet. Wegen der ungünstigen Mischungsverhältnisse zwischen Harz und Härtner von 1 : 10 und größer, hat es nicht an Versuchen gefehlt, die Anwendung zu vereinfachen.

Zweikomponentige Acrylat-Reaktionsklebstoffe

Zweikomponentige Acrylat-Klebstoffe (als A/B-Klebstoffe, No-Mix-Klebstoffe oder 2. Generation Acrylics auch bekannt) sind schnell aushärtende Reaktionsklebstoffe, die insbesondere für Metall/Metall- oder Metall/Kunststoff-Verklebungen geeignet sind. Neue zweikomponentige Polyurethandi-methacrylat-Klebstoffe stellen eine Weiterentwicklung der Acrylat-Klebstoffe hinsichtlich Arbeitshygiene dar.

Je nach Einstellung härteten die neuen A/B-Systeme (im Koaxial-Mischrohr gemischt oder Raupe auf/ neben Raupe aufgetragen schon nach 25–30 Sekunden bzw. ca. einer Minute. Die Endfestigkeit von ca. 25 MPa (je nach Oberflächenbehandlung) an Aluminium wird schon nach Stunden erreicht.

Derartige Klebstoffe kommen für kleinflächige Verklebungen oder bei kurzen Taktzeiten auch für großflächige Verklebungen zur Anwendung. Der Vorteil gegenüber den Epoxiden oder Polyurethan-Klebstoffen liegt in der schnellen Aushärtung bei Raumtemperatur. Insbesondere für Aluminium-Verklebungen, z. B. im Fensterbau, Maschinenbau, Werkzeugbau haben sich die Acrylat A/B-Klebstoffe bewährt.

In diese Richtung zielen No Mix-Klebstoffe, bei denen der Polymerisationsstarter als Primer vor dem Fügen aufgetragen wird oder die sogenannten A/B-

Klebstoffe, die Raupe auf Raupe appliziert werden können und anschließend rasch aushärten.

Trotz zuverlässiger Misch- und Dosier-technik besteht die Forderung nach leicht zu applizierenden, einkomponen-tigen Klebstoffen. Mit den Cyanacrylaten ist diese Forderung erfüllbar. Dieser Reaktionsklebstoff ist einkomponentig verarbeitbar und härtet bei Raumtempe-ratur schnell aus.

Die Reaktionsklebstoffe haben heute ein Leistungsniveau erreicht, das weit-gehend den Anforderungen gerecht wird, d. h., die weitere Entwicklung wird deswegen weniger in einer weiteren Festigkeitssteigerung liegen, sondern bei der Erweiterung des Einsatzbereiches zu höheren Temperaturbereichen. Hier werden organisch aufgebaute Klebstoffe aber an ihre natürlichen Grenzen stoßen.

Neue Forderungen hinsichtlich verbesserten Langzeitverhaltens bei gleichzeitig leichter Demontierbarkeit im Recycling-fall werden kommen, desgleichen die Optimierung der bisherigen Dosier- und Mischtechnik, die Applikation sowie die gezielte Oberflächenvorbehandlung, angepaßt auf den Klebstoff für schwer zu verklebende Werkstoffe.

Cyanacrylat-Klebstoffe

Cyanacrylat-Klebstoffe sind flüssige, einkomponentige Reaktionsklebstoffe, die auf zahlreichen Oberflächen, wegen der allgegenwärtigen Luftfeuchtigkeit, härteten. Die Härtung erfolgt z. B. auf gesandstrahlten oder gepickelten Alu-miniumblechen schon nach ca. 1 Minute und ist nach ca. drei Stunden weitgehend abgeschlossen. Die Endfestigkeiten liegen je nach Oberflächenvorbehandlung zwischen 20 und 25 MPa.

Cyanacrylat-Klebstoffe werden vor allem für das Verbinden kleiner, gut

anliegender Flächen eingesetzt, z. B. für die Serienfertigung in der Elektroindustrie, Elektronik, Meß- und Regeltechnik, in der feinmechanischen, kunststoff- und gummiverarbeitenden und optischen Industrie und in der Uhrenindustrie.

Der große Vorteil der Cyanacrylat-Klebstoffe liegt in der Kombinationsklebung, z. B. Aluminium und Elastomer, wo es außer dem Kleben kaum Alternativen gibt.

Mit Sicomet hergestellte Klebverbindungen zeichnen sich durch gute mechanische Festigkeit, hohes Haftvermögen an den meisten unporösen Materialien, ausreichende Temperaturbeständigkeit, verbesserte Elastizität, gute Alterungs- und Witterungsbeständigkeit sowie Chemikalienresistenz aus.

Die spezifischen Eigenschaften von Cyanacrylaten sind deswegen aber auch von anderen Industriezweigen erkannt worden, z. B. im Metall- und Werkzeugbau, als Elektrodenklebstoff in Betriebswerkstätten und Schlossereien. Ebenso für die Fertigung der verschiedensten Teile als Montagehilfe, für die Verklebung von Gummiprofilen und Rollringen und stark beanspruchten Gummi/Metall-Bindungen, im Maschinen- und Apparatebau sowie in der Automobil-, Schiffs- und Flugzeugindustrie.

Allgemein wird die Leistungsfähigkeit der heute verfügbaren High Performance Reaktionsklebstoffe unterschätzt, weil der Anwender eine Verbindungstechnologie unter Festigkeitsaspekten auswählt, und diese bei der Klebtechnologie mit 20–30 N/mm² ihm als nicht ausreichend erscheint. Trotzdem gibt es gerade auf anspruchsvollen Gebieten, wie dem Auto- oder Flugzeugbau, überzeugende Beispiele, wo Reaktionsklebstoffe mehr leisten können, als man ihnen zutraut.

Geklebte Stahl- oder Aluminiumkarosserien laufen seit Jahren ohne Probleme und haben gegenüber ihren geschweißten Konkurrenten überraschend gute Eigenschaften. Dämpfungsvermögen und Ermüdungsfestigkeit der geklebten Stahlkarosserien sind deutlich besser als die der geschweißten, und auch das Deformationsverhalten, d. h. die Unfallsicherheit, ist ungewöhnlich gut.

High Performance Reaktionsklebstoffe sind heute die Basis für die Technologie **Konstruktives Kleben**. Trotz aller ingenieursmäßigen Vorbehalte wegen der noch fehlenden absoluten Berechenbarkeit der Klebverbindungen wird die chemische Verbindungstechnologie alternativ zum Schweißen, Nieten, Durchsetzfügen oder Schrauben einzustufen sein, dank der Leistungsfähigkeit der heutigen High Performance Reaktionsklebstoffe.

Die Klebtechnologie ist die universellste Verbindungstechnologie für viele Materialien.

Die Grenzen/Limitierungen dieser Technologie sollten jedoch erkannt werden, um Fehler zu vermeiden.

3. Kleben von Aluminium

Aluminium gehört mit seinen vielfältigen Legierungen zu den am meisten untersuchten Metallen in der Klebtechnik. Der Grund liegt in der umfangreichen Anwendung in der Luft- und Raumfahrtindustrie, dem Fahrzeug- und Behälterbau.

Klebetechnisch stellt das Aluminium aber eine Besonderheit im Vergleich zu anderen Metallen dar. Während es bei Eisen-Werkstoffen nach entsprechender Vorbehandlung eine direkte Adhäsion zwischen dem Eisen und dem Klebstoff gibt, ist dies wegen der typi-

ischen Oberflächeneigenschaften beim Aluminium anders.

Die Materialeigenschaften des Aluminiums werden durch die Art der Aluminium-Oberflächenbeschaffenheit, d. h. durch die Eigenschaften der Aluminium-oxidschicht bestimmt. Auch nach einer Oberflächenvorbehandlung bildet sich das Aluminiumoxid sofort zurück. Die Adhäsion erfolgt also zwischen Klebstoff und Aluminiumoxid (siehe auch Abb. 2). Dies ist der gravierende Unterschied zum Eisen-Werkstoff, mit entsprechenden Konsequenzen für die Qualität der Verklebung. Je nachdem, wie die Aluminiumoxidschicht ausgeprägt ist, wird sich dies entscheidend auf die Adhäsion und deren Alterungsverhalten auswirken.

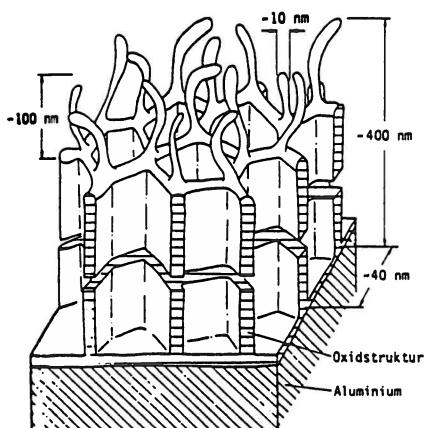


Abb. 2: Schematische Darstellung einer Aluminium-Oberfläche, die nach dem Phosphorsäure-Anodisieren erhalten wurde (aus 6)

Da Oxidschichten üblicherweise polar sind, wie es der Fachmann bezeichnet, ist eine Affinität zum Wasser gegeben. Wasser kann aber die Aluminiumoxid-Struktur nachhaltig verändern, mit verheerenden Folgen für die Adhäsion, d. h.

für die Klebung. Viele Versuche haben dies eindrucksvoll gezeigt. Umgebungsfeuchtigkeit, Schwitzwasser oder noch verheerender Seewasser beeinflussen in Abhängigkeit von der jeweiligen Aluminiumvorbehandlung die Klebung in entscheidendem Maße. Wegen dieser Problematik ist es verständlich, daß die Oberflächenbehandlung, d. h. der Aufbau gezielter Aluminiumstrukturen, während der Oberflächenbehandlung von entscheidender Bedeutung für die Qualität einer Aluminiumverbindung ist.

Die in der Luftfahrtindustrie verwendeten chemischen Vorbehandlungsverfahren für die Aluminiumoberflächen bestehen neben alkalischen Entfettungs- und Beizprozessen im wesentlichen aus einem Ätzprozeß in einer wässrigen Chromschwefelsäure bei erhöhten Temperaturen. Bereits diese Vorbehandlung liefert eine gute und gegenüber Feuchtigkeit stabile Haftung von Klebverbindungen. Häufig wird jedoch an diesen Ätzprozeß noch ein Anodisieren in Chromsäure oder auch in Phosphorsäure angeschlossen. Dies führt zu einer weiteren Steigerung der Beständigkeit.

Die chemischen und elektrochemischen Vorbehandlungsverfahren bilden auf den Aluminiumoberflächen Oxidschichten mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften und Strukturen. Dies lässt sich sowohl mit dem Rasterelektronenmikroskop nachweisen, als auch mit dem Transmissionselektronenmikroskop. Dabei können erfahrungsgemäß die guten Haftungseigenschaften mit der hohen Porosität der Oxidschichten in Verbindung gebracht werden. Die Oxidschichtdicke variiert dabei zwischen einigen hundert Nanometern und etwa 1 bis 2 μm im Falle der Anodisierverfahren. Die hohe Porosität, die nur in der Größenordnung von einigen Nanometern liegt, legt nun die Vermutung nahe, daß es zu einer submikroskopischen

mechanischen Verklammerung zwischen dem Klebstoff oder dem korrosions-hemmenden Primer und dem Fügeteil kommt. Dies kann jedoch nur erfolgen, wenn der Klebstoff auch ausreichend tief in die feine Morphologie der Oxide eindringen kann, was anhand von Raster-elektronenmikroskopie nachgewiesen werden konnte.

Gerade diese letzte Erkenntnis zeigt eine ganz besondere Problematik der Ad-häsionsforschung auf. Eine Oberfläche ist im Gegensatz zur Wortbedeutung kein zweidimensionales Gebilde, sondern ein dreidimensionales. Sie ist genau genommen ein Oberflächenvolumen. Dieses Volumen umfaßt nun nicht nur die oberste Lage der Oxidschicht, sondern in diesem Falle auch der sie bedeckende Klebstoff. Damit besteht ein sehr enges Wechselspiel zwischen dem Grundwerk-stoff, dem darauf erzeugten oder ge-wachsenen Oxid auf dem darauf appli-zierten Klebstoff. Es ist daher zwingend erforderlich, einen solchen Verbund immer als Einheit zu betrachten und nicht in seine Einzelkomponenten Metall, Oxid oder Klebstoff aufzuteilen. Zwi-schen allen Partnern dieses Verbundes bestehen immer sehr starke Wechsel-wirkungen, die von entscheidendem Einfluß auf das mechanisch technolo-gische Verhalten sind.

Interessanterweise ist die Aluminium-legierung AlCuMg2pl als Fügeteilwerk-stoff in DIN 23283 zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit vorgeschrieben.

Die Anwendungen im Luftfahrzeugbau sind ein eindrucksvolles Beispiel für er-folgreiche Verklebungen angesichts der erheblichen Belastungen und Lebens-daueranforderungen.

Allerdings darf nicht übersehen werden, daß wegen der begrenzten Stückzahl die zwingend erforderlichen Vorbehand-lungen des Aluminiums auch durchge-

führt werden können. Diese zum Teil sehr aufwendigen Prozesse, wie z.B. das Anodisieren der Oberflächen, wur-den vom Flugzeugbauer in die Fertigung integriert, um die Klebtechnologie erfolg-reich anzuwenden.

Generell kann man aber festhalten, daß für Aluminiumverklebungen, die über einen längeren Zeitraum klimatischen Bedingungen wie Feuchtigkeit, Tem-pe-ratur oder Medieneinflüssen ausgesetzt sind, eine effiziente Vorbehandlung der Klebflächen unumgänglich ist. Die einge-setzten Verfahren lassen sich einteilen in

- mechanische
- chemische
- physikalisch-chemische

Verfahren.

Rein mechanische Vorbehandlungen, wie das Sandstrahlen oder Schmirgeln, sind für einfache Verklebungen ohne Anforderungen an die Witterungs- und Alterungsbeständigkeit ausreichend. Es ist aber darauf zu achten, daß z. B. die gesandstrahlten Fügeteile nach einer weiteren Reinigung/Entfettung mit üb-lichen Lösungsmitteln sofort verklebt werden.

Die chemischen bzw. kombiniert physi-kalisch-chemischen Vorbehandlungs-verfahren sind dagegen die effektivsten. Sie sind Voraussetzung für witterungs- und alterungsbeständige Verklebungen.

Für die Verklebung von Aluminium sind im Prinzip viele Klebstoffe geeignet, für konstruktive Verklebungen ist jedoch die Auswahl schon geringer. Bei kon-struktiven Verklebungen müssen Kräfte übertragen werden, weswegen übliche Haftklebstoffe oder Hotmelts weniger geeignet sind. In diesem Fall kommen die Reaktionsklebstoffe zur Anwendung, wie Phenolharze, Epoxide, Polyurethane,

Acrylate, MS-Polymeren oder Cyanacrylate. Mit allen Klebstoffen lassen sich ausreichende Festigkeiten erzielen, vor ausgesetzt, eine geeignete Vorbehandlung hat stattgefunden. Hinsichtlich der Witterungs- und Altersbeständigkeit bestehen aber große Unterschiede. In diesem Fall reduziert sich die Auswahl auf wenige Klebstoff-Systeme.

Folgende Prioritätenliste entsprechend den Praxiserfahrungen aus bestimmten Branchen lässt sich aufstellen:

- **Phenol-Harze**
- **Heißhärtende Epoxide (180 °C)**
- **Warmhärtende Epoxide und kautschukmodifizierte Epoxide**
- **PVC/Epoxy-Hybrid-Systeme**
- **Zweikomponentige raumtemperaturhärtende Epoxide**
- **Zweikomponentige raumtemperaturhärtende Polyurethane**
- **Acrylate**
- **Ein- und zweikomponentige MS-Polymer basierende Kleb- und Dichtstoffe**

Für die Luftfahrtindustrie gehören auch heute noch die Phenolharze zu den bevorzugten Klebstoffen, da mit diesen Systemen die längsten Langzeiterfahrungen vorliegen. Für den Automobilbau dagegen haben die heißhärtenden Epoxid-Klebstoffe die größte Bedeutung, da diese im Vergleich zu den Phenolharzen (Autoklaven-Aushärtung) einfacher anzuwenden sind. In den folgenden Kapiteln 3.1 – 3.4 sind die einzelnen Stufen für eine erfolgreiche Aluminium-Verklebung aufgelistet.

3.1 Oberflächenvorbereitung

Metallische Oberflächen sind nie „sauer“, was insbesondere für das Aluminium zutrifft. In der Regel sind die Oberflächen mit

- **Verschmutzungen (Fette, Öle, Verarbeitungshilfsmittel)**
- **Adsorptionsschichten**
- **Oxiden**

belegt. Diese Schichten wirken sich ungünstig auf eine gute Adhäsion und Langzeitbeständigkeit der Klebverbindungen aus. Sie müssen daher vor dem Klebstoffauftrag entfernt werden, wozu sich verschiedene Methoden bewährt haben (Abwischen, Abbürsten, Schleifen etc.)

Weiter ergibt sich die Notwendigkeit, die Fügeteile „passend zu machen“, beispielsweise zu entgraten. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Adhäsionsfähigkeit der Fügeteiloberflächen sind grobe Verunreinigungen auf den Klebeflächen, wie Schmutz, Farbreste, Zunder, Rost o. ä., immer zu entfernen. Erst im Anschluß an dieser Oberflächenvorbereitung kann eine gezielte, an den jeweiligen Fügeteilwerkstoff angepaßte Oberflächenbehandlung erfolgen. Verfahren zur Säuberung von Oberflächen können ein Reinigen und Entfetten mit wäßrigen oder lösungshaltigen Medien sein.

– Lösungsmittelhaltige Reinigung

Unter der Oberflächenvorbereitung mit lösungsmittelhaltigen Medien versteht man das Reinigen und Entfetten der zu klebenden Werkstoffe, z. B. mit MEK, Aceton oder Waschbenzin. Die heutigen Umwelt- bzw. Arbeitsschutzbedingungen schränken den Einsatz von organischen Lösungsmitteln aber immer mehr ein. Aus diesem Grunde werden in Zukunft Reinigungsmittel auf wäßriger Basis obige Lösungsmittel ersetzen.

– Wäßrige Reinigung

Wäßrige Reinigungsmittel, deren Arbeitstemperaturen normalerweise bei 60 bis 90 °C liegen und die gegebenenfalls mittels zusätzlicher Elektrolyse wir-

ken, bestehen aus alkalischen, neutralen oder auch sauren Lösungen mit entsprechenden Tensidzusätzen zur Verbesserung der Reinigungswirkung. In jedem Fall ist zur restlosen Entfernung gegebenenfalls entstehender Reaktionsprodukte ausreichend mit entionisiertem Wasser nachzuspülen und zu trocknen.

Für weniger beanspruchte Verklebungen kann diese Methode ausreichend sein, für konstruktive Verklebungen mit Langzeitbeständigkeit muß eine weitere Oberflächenbehandlung erfolgen. Hier unterscheidet man zwischen der mechanischen und chemischen Oberflächenvorbehandlung.

– Mechanische Oberflächenvorbehandlung

Die mechanische Oberflächenvorbehandlung erfolgt durch Bürsten, Schmirgeln oder Schleifen (ohne Schmiermittel), und besonders günstig ist das Strahlen mit fettfreiem Strahlmittel und ölfreier Druckluft. Für Schleif- und Strahlmittel werden Korngrößen von 100 bis 150 μm und nur bei kerbempfindlichen oder sehr dünnen Fügeteilen solche von 400 bis 600 μm empfohlen.

Es ist darauf hinzuweisen, daß nicht alle Strahlmittel auf den verschiedenen Fügeteilwerkstoffen gleich gute Ergebnisse bringen. Hierbei spielen sowohl der Werkstoff als auch die Form des Strahlgutes eine Rolle. Aus korrosionstechnischen Gesichtspunkten sollten nur Fe-freie Strahlmittel verwendet werden.

Nach dem mechanischen Behandeln sind Staubablagerungen sorgfältig, z. B. mit ölfreier Druckluft, zu entfernen.

Bei platierten Werkstoffen besteht die Gefahr, die Plättierschicht zu durchbrechen. Darauf ist bei der Wahl des Vorbehandlungsverfahrens zu achten.

Die mechanische Oberflächenvorbehandlung dient bei Metallen insbesondere zur Vergrößerung der Oberfläche durch Erhöhung der Rauigkeit. Während dies bei Eisen die Verklebbarkeit eindeutig begünstigt, ist sie bei Aluminium, wenn es um gute Langzeitbeständigkeit geht, noch nicht ausreichend. In diesem Fall ist eine chemische Oberflächenvorbehandlung wesentlich effektiver.

– Chemische Oberflächenvorbehandlung

Die chemische Vorbehandlung stellt einen erheblicheren Eingriff in die Oberflächenstruktur der Klebfläche dar als das Reinigen und Entfetten mit Lösungsmitteln oder mit wässrigen Reinigungsmitteln. Die Vorbehandlungsmethode besticht jedoch durch hohe Reproduzierbarkeit der Vorbehandlungsgüte sowie hervorragende Langzeitbeständigkeit der Klebung. Chemische Oberflächenbehandlungen erfordern eine sorgfältige Vorbereitung, Durchführung und Entsorgung. Dem chemischen Vorbehandlungsprozeß muß eine Oberflächenreinigung vorausgegangen sein.

Chemische Oberflächenvorbehandlungen erzeugen auf der Aluminiumoberfläche eine schützende Konversionschicht. Für Aluminium kommen das Chromatieren, chromfreie Verfahren (z. B. Spritzphosphatieren mit fluoraktiven Bondern) oder auch das Anodisieren (dünne anodisch erzeugte Oxidschichten) infrage. Die Konversionschicht muß eine genügende Schichtdicke von ca. 1–2 μm haben, um eine ausreichende Haftung des Klebstoffes mit entsprechender Langzeitbeständigkeit zu ermöglichen. Derartige chemische Oberflächenvorbehandlungen werden auch als Beizen bezeichnet, die sowohl alkalisch als auch mit sauren Lösungen (Dekapieren) durchgeführt werden.

Tabelle 1: Alterungsbeständigkeit von 1K- und 2K-Epoxidklebstoffen in Abhängigkeit von der Oberflächenvorbehandlung

Oberflächenvorbehandlung	Klebstoff		Alterungsbeständigkeit in Tagen im Seeküsten-Klima
Dampfentfettung Dampfentfettung	2K-Epoxy 1K-Epoxy	RT 180 °C	70–80 71–270
Chromschwefelsäurebad Chromschwefelsäurebad	2K-Epoxy 1K-Epoxy	RT 180 °C	270–760 760–1440
Alodine 1200 (Gelb- Alodine 1200 (chromatierung)	2K-Epoxy 1K-Epoxy	RT 180 °C	1158–1440 > 2920

Alodine: Fa. Parker-Amchem (USA)

Substrat: Al von Fa. Alcoa.

Bei den sauren Beizprozessen haben sich für Aluminiumteile, die verklebt werden sollen, 3 verschiedene Prozesse etabliert:

- 30-minütige Behandlung bei 60 °C in einem Chromschwefelsäurebad (CSA-Picklingbeize)
- 10-minütige Behandlung bei 65 °C in einem modifizierten Chromschwefelsäurebad FPL-Beize (Forest-Product Laboratory Methode, USA)
- 1-minütige Behandlung bei 80 °C in einer 6 % igen wässrigen Lösung von phosphorsauren Salzen (Chemoxal-Verfahren)

Das FPL-Beiz-Verfahren ist dem Pickling-Beizen in seiner Wirkung ähnlich, der wesentliche Unterschied besteht in der kürzeren Beizzeit. Als alleiniges Ober-

flächenvorbehandlungsverfahren ist es aber dem Pickling-Beizen unterlegen.

– Anodisieren

Im Anschluß an das Beizen müssen z. B. im Flugzeugbau die Aluminiumbleche einem Anodisierprozeß unterworfen werden, um die Aluminiumoxidschichten zu strukturieren.

Hierfür gibt es 3 Verfahren:

- Phosphorsäure-Anodisierung (PAA)
- Schwefelsäure-Anodisierung (SAA)
- Chromsäure-Anodisierung (CAA)

Das Phosphorsäure-Anodisieren ist einfacher und umweltfreundlicher als das Chromsäure-Anodisieren. Die mit PAA erreichbaren Adhäsionseigenschaften der Fügeteiloberflächen unterscheiden sich nur wenig von den chromsäure-anodi-

Tabelle 2: Anfangsfestigkeit von 1K- und 2K-Epoxid in Abhängigkeit von der Oberflächen-Vorbehandlung

Vorbehandlung	1K/2K	Festigkeit MPa
Dampfentfetten Dampfentfetten	1K 2K	30 15
Sandstrahlen Sandstrahlen	1K 2K	34 14
Chromsäure-Anodisieren Chromsäure-Anodisieren	1K 2K	37 20

Substrat: Al von Fa. Alcoa

Tabelle 3: Anfangsfestigkeit von unterschiedlich vorbehandeltem Aluminium und unterschiedlicher Aluminiumoxid-Schichtdicke

	Schichtdicke (μm)	Festigkeit (MPa)
Phosphorsäure-Anodisierung	1,3–2,0	45
	2,5	41
Schwefelsäure-Anodisierung	3,0	39
	7,5	34
	15,0	31
	20,0	24

Klebstoff: Nitrilmodifiziertes 1K-Epoxid (15 min. 200 °C Härtung)

Substrat: Al von Fa. Alcoa

sierten Oberflächen. Die dünneren Oxidschicht, die sich bei PAA bildet, ist im Gegensatz zum CAA gegen mechanische Beschädigungen empfindlich, was die Handhabung der Teile erschwert. PAA-Oberflächen sind unbedingt durch Auftragen einer Primers zu schützen. Der Korrosionswiderstand von CAA vorbehandeltem Aluminium ist im Vergleich zu den anderen Verfahren am optimalsten.

Die Haftung der Klebstoffe ist von der Reaktivität, Dicke, Porendichte und Struktur der erzeugten Oxidschicht, sowie der Art der Porenversiegelung (Primern) abhängig. Mit Primer konservierte Fügeteile können bis zu 14 Tage zwischengelagert werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß, je höher die Anforderungen an das Alterungsverhalten sind, desto aufwendiger sind die durchzuführenden Vor-

behandlungsmethoden. Letztendlich favorisiert jeder Aluminiumverarbeiter bei der Verklebung die geeignete Methode, die wirtschaftlich ist und ihm in Bezug auf das Bauteil die größte Sicherheit gibt. Dies gilt im wesentlichen für den Luftfahrzeugbau. Die Effektivität der einzelnen Oberflächenvorbehandlungen ist in den Tabellen 1–4 dargestellt.

Im Automobilbau kann bei der Stückzahl und dem Kostendruck kein allzu hoher Aufwand betrieben werden. So gibt es Beispiele, daß Entfetten und eine Zinkphosphatierung für die angestrebte Zielsetzung ausreichend ist.

In jüngster Zeit haben sich 2 weitere einfachere Oberflächenvorbehandlungsmethoden etabliert, die insbesondere für kleinere Serien im Maschinenbau und im Autoreparatur-Sektor geeignet sind.

Tabelle 4: Festigkeiten auf unterschiedlich vorbehandeltem Aluminium, verklebt mit einem nitrilmodifizierten 1K-Epoxid

Dampfentfettung	29 MPa
Chromschwefelsäurebehandlung	36 MPa
Chromschwefelsäurebehandlung + Anodisieren	38 MPa
Phosphorsäurebehandlung + Anodisieren	41 MPa
Schwefelsäurebehandlung + Anodisieren	27 MPa
Boing Prozeß (Phosphorsäure-Anodisierung)	45 MPa

Substrat: Aluminium-Legierung 6061-T6

Es sind die sogenannten tribochemischen Verfahren, die insbesondere die Langzeitbeständigkeit verbessern.

– Silicoater-Verfahren

Eine neu entwickelte Möglichkeit zur Steigerung der Adhäsion zwischen Klebstoff und Fügeteil ist die Silanisierung der Oberflächen mit dem sogenannten Silicoater-Verfahren. Der erste Schritt dieses Verfahrens ist das Strahlen der Oberfläche mit Edelkorund. Anschließend wird auf diese gestrahlte Oberfläche eine Siliciumoxid-Kohlenstoffschicht mittels Flammpyrolyse aufgebracht. Dieser zentrale Vorgang des Silicoater-Verfahrens erfolgt mit einem speziell hierfür erhältlichen „Silicoater-Gerät“. In einem abschließenden Arbeitsschritt wird ein Silan-Haftvermittler auf die beschichtete Oberfläche aufgetragen. Dieser Haftvermittler muß speziell an den verwendeten Klebstoff angepaßt sein. Er bewirkt chemische Wechselwirkungen zur Siliciumoxid-Kohlenstoffschicht und zum Klebstoff.

– Saco-Verfahren

Das Saco-Verfahren ist in seiner Wirkung dem Silicoater-Verfahren ähnlich.

Die Oberflächenvorbehandlung wird mit einem Vorstrahlprozeß eingeleitet. Mit Korund wird die Oberfläche vorbereitet und vergrößert. In einem Schritt wird ein „Spezialstrahlmittel“ auf die Oberfläche gestrahlt. Dabei reagiert die keramische Beschichtung dieses „Spezialstrahlmittels“ mit der Oberfläche des Fügeteils und bildet auf ihr eine keramische Schicht. Im letzten Prozeßschritt wird eine auf den Klebstoff abgestimmte Silanlösung aufgetragen, die wie beim Silicoater-Verfahren einen chemischen Verbund zum Klebstoff herstellt.

Wie effektiv ist das Saco-Verfahren zu den anderen möglichen Verfahren? In einem Versuch wurden verklebte Aluminiumbleche einem korrosiven Salzsprühtest (SSDIN 50021) ausgesetzt. Beim Zugscherversuch nach DIN 53283 verloren die blank verklebten und sandgestrahlten Probekörper relativ schnell an Festigkeit. Die Saco-Vorbehandlung schneidet dagegen ähnlich günstig ab wie das Pickling-Verfahren. Nach einem geringfügigen Abfall während der ersten ein bis zwei Monate blieb die Klebfestigkeit nahezu konstant. Das Verfahren stellt somit eine Alternative zu den

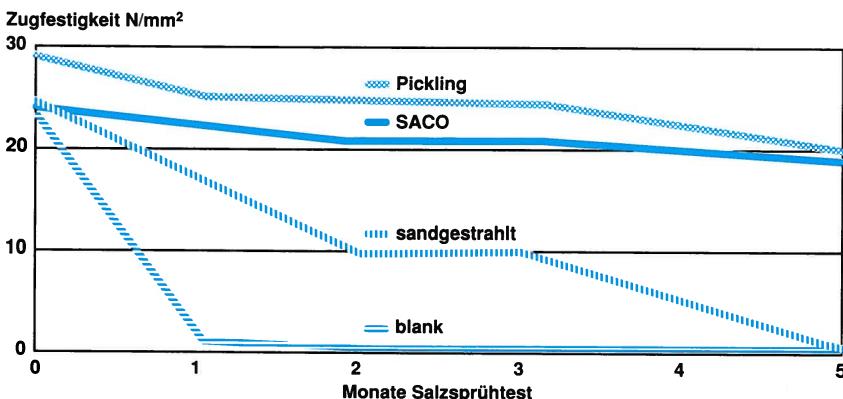


Abb. 3: Klebfestigkeiten von Al-Al-Prüfkörpern nach Alterung im Schwitzwassertest
Klebstoff: einkomponentiges Epoxid
(Literatur 11)

umwelt- und gesundheitsgefährdenden Chromschwefelsäureverfahren (Pickling) dar.

Der gegenwärtige Standard zur Oberflächenvorbehandlung in der Luftfahrtindustrie stellt sich wie folgt dar: Die Oberflächenvorbehandlung von Aluminium in der Luftfahrtindustrie beginnt mit einer Entfettung in einem nur vernachlässigbar abtragenden, schwach alkalischen Bad ($\text{pH} \sim 9$), dem zur Entfernung fest haftender Oxidbeläge ein stark alkalisches Beizbad ($\text{pH} > 11$) folgt. Die anschließende Behandlung in einer chromschwefelsäuren Lösung trägt, wie das alkalische Beizbad, etwa $3 \mu\text{m}$ Material ab. Dieser Schritt wird in Europa als Pickling-Beizen (CSA) durchgeführt, in den USA als FPL-Beizen. Abschließend werden die Bleche im europäischen Flugzeugbau derzeit in Chromsäure anodisiert (CAA), wobei auf der Plattierung aus Reinaluminium eine porige Oxidschicht mit einer Dicke von 2,5 bis $4 \mu\text{m}$ erzeugt wird. Dem Anodisieren folgt die Trocknung bei 40°C , so daß eine Verdichtung des Oxides nicht stattfindet. Das in den USA angewendete PAA liefert etwa das gleiche Maß an Festigkeit und Langzeitbeständigkeit wie

CAA und arbeitet mit einfacheren Spannungs- und Temperaturverläufen. Beim PAA gelten als Nachteil die Handhabungseigenschaften der nicht geprimerten Bleche, die empfindlich gegen mechanische Beschädigungen sind. Soweit zu den aufwendigen Methoden in der Luftfahrtindustrie, die aber, wie die Praxis zeigt, ausgezeichnete Klebergebnisse liefern.

3.2 Auswahl der Klebstoffe

Die Auswahl des geeigneten Klebstoffes bei entsprechender Oberflächenvorbehandlung ist für den vorgesehenen Anwendungszweck von entscheidender Bedeutung. Je anspruchsvoller die Anwendung hinsichtlich Langzeitbeständigkeit und Beanspruchung ist, um so kritischer ist die Auswahl zu treffen.

Im Prinzip sind zunächst viele Klebstoffgruppen geeignet, wenn keine großen Anforderungen hinsichtlich Alterungsbeständigkeit gestellt werden. Doch auch innerhalb der jeweiligen Klebstoffgruppen gibt es je nach der verwendeten Formulierung durch den Klebstoffhersteller Unterschiede im Eigenschaftsniveau, siehe dazu Tabelle 5.

Tabelle 5: Alterungsbeständigkeit verschiedener Epoxide

Epoxid	Härtung	Alterungsbeständigkeit im Schwitzwassertest	
		Zeit	Restfestigkeit (%)
Nr. 1	RT	> 2 Jahre	100
Nr. 2	RT	> 2 Jahre	50
Nr. 3	RT	630 Tage	0
Nr. 4	180°C	520 Tage	0
Nr. 5	180°C	2 Jahre	0
Nr. 6	180°C	> 2 Jahre	100
Film	180°C	> 2 Jahre	100

Aluminium: Legierung von Fa. Alcoa
Vorbehandlung: Chromschwefelsäure-Bad

Aus den zahlreichen Untersuchungen für den Luftfahrtbau und neuerdings für den Karosseriebau liegen umfangreiche Erfahrungen vor, auf die man jederzeit zurückgreifen kann, selbst wenn die Voraussetzungen (Oberflächenvorbehandlung, Klebstoffeinsatz) nicht immer gegeben sind.

Entscheidend ist, daß man für den Flugzeugbau Tests entwickelt hat, anhand derer sich die Einsatzfähigkeit bestimmter Klebstoffe abschätzen läßt. Im Kurzzeit-test unterscheiden sich die Klebstoffe oft wenig, bei entsprechendem Langzeittest kann man aber sehr wohl zwischen den verschiedenen Klebstoffgruppen und auch bestimmten Klebstofftypen differenzieren (Abb. 4). Diese Testergebnisse sind auf allgemeine Aluminiumverklebungen übertragbar.

Entscheidend für die richtige Klebstoffauswahl wird es aber immer sein, das

Anforderungsprofil (Lastenheft) und die Langzeitbeständigkeit mit dem jeweiligen Klebstoff und der entsprechend erforderlichen Oberflächenvorbehandlung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten abzustimmen.

Für übliche konstruktive Aluminiumverklebungen sind die heißhärtenden Epoxide die erste Wahl. Üblicherweise werden diese, um ausreichende Festigkeiten zu erreichen, 20 bis 30 min. bei 180°C gehärtet. Für spezielle Anwendungen z. B. beim SMD-Kleben in der Mikroelektronik gibt es auch bei 80°C innerhalb von 2–5 min. härtende Epoxide. Doch sollten diese für konstruktive Aluminium-Verklebungen weniger berücksichtigt werden. Auch zweikomponentige, bei Raumtemperatur austärtende Epoxide sind für konstruktive Verklebungen geeignet. Bei gleichzeitiger Wärmeaushärtung wird die Alterungsbeständigkeit erhöht.

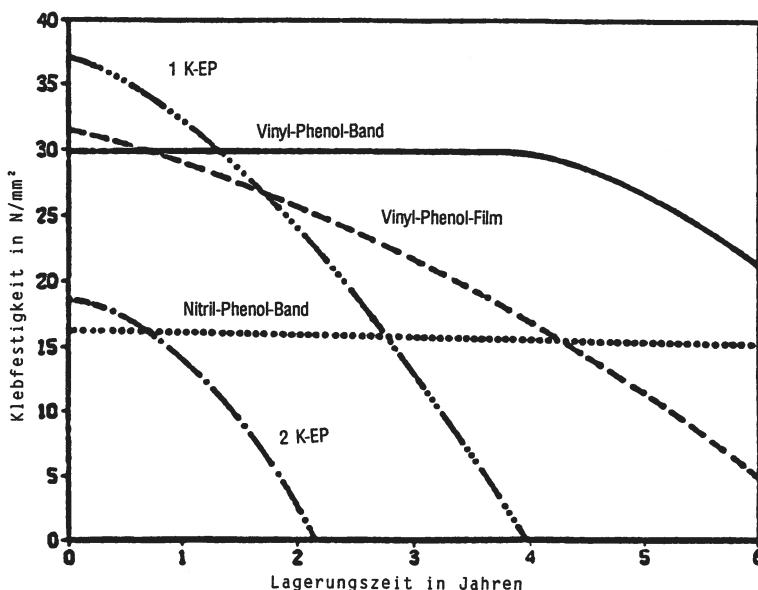


Abb. 4: Alterungsverhalten verschiedener Klebstoffe

Vom Klebstoff wird für viele Anwendungen und speziell im Automobilbau für die Herstellung von Aluminium-Karosserien gefordert, daß er dauerhafte Verbindungen ermöglicht. Es muß aber immer wieder darauf hingewiesen werden, daß weniger der Klebstoff als vielmehr der Oberflächenzustand bzw. die Oberflächenvorbehandlung von entscheidender Bedeutung für die Alterungsbeständigkeit der Verklebungen ist. Prinzipiell kann gesagt werden, daß je aufwendiger die Oberflächenbehandlung, je günstiger die Alterungsbeständigkeit ist. Hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit sind die Phenolharze und die Epoxide die effektivsten Klebstoffsysteme, wobei einkomponentige, heißhärtende Epoxide günstiger sind als zweikomponentige, raumtemperaturhärtende Epoxide. Polyurethanklebstoffe kommen an die Alterungsbeständigkeit der Epoxidklebstoffe nicht heran, können aber trotzdem bei Sandwich-Verklebungen Hervorragendes leisten. Auch die Cyanacrylate und Acrylat A/B Systeme erreichen nicht das Alterungsbeständigkeitsniveau der Epoxide. Sie werden aber oft dort eingesetzt, wo kleinfächige Verklebungen mit anderen Werkstoffen schnell realisiert werden müssen.

Für die Auswahl des geeigneten Klebstoffsystems ist es zunächst wichtig, den Oberflächenzustand des Aluminiums zu kennen, die jeweilige Anforderung vor der Konstruktion und die Art der Applikation des Klebstoffes.

So ist oft die Forderung nach einem Roboterauftrag vorhanden, d. h. der Klebstoff muß verpumpbar sein. Mit einkomponentigen, heißhärtenden Epoxiden ist man immer auf der sicheren Seite.

Probleme mit der Förderung per Roboter oder mit vorzeitiger Aushärtung wegen Überschreitung der Potlife bestehen

nicht, man muß lediglich Fixieren und in einem Ofen härteten. Zweikomponentige Epoxid-Klebstoffe können auch noch allgemein empfohlen werden. Es ist aber darauf zu achten, daß das Mischungsverhältnis eingehalten wird und die Potlife nicht überschritten wird. Eine Warmnachhärtung verbessert das Eigenschaftsniveau.

Da in vielen Fällen der Einsatz von Epoxid-Klebstoffen nicht in die Fertigung integriert werden kann (keine Heißhärtung, oder es wird eine schnelle Härtung bei RT gefordert), empfehlen sich dann alternative Reaktionsklebstoffe, wobei hier aber die Kombinationsklebung mit anderen Werkstoffen bevorzugt ist. Cyanacrylat- und Acrylatsysteme (als NoMix oder A/B Auftrag) sind hier bestens erprobt und haben sich in der Anwendung bewährt.

Der Einsatz von Cyanacrylat-Klebstoffen sollte im Temperaturbereich unter 80°C bleiben, da andernfalls ein Versagen der Bauteile nicht auszuschließen ist. Dies gilt auch für die Polyurethan-Klebstoffe. Mit Acrylat-Klebstoffen geklebte Bauteile sollten den Temperaturbereich oberhalb 120°C meiden. Spezielle Epoxid-Klebstoffe (einkomponentig) können durchaus bis 180°C eingesetzt werden.

3.3 Konstruktive Gestaltung von Kleverbindungen

Die erfolgreiche Anwendung des Klebens hängt von der klebgerechten Konstruktion und Fertigung sowie von der Art der Beanspruchung ab. Normalerweise wird eine Beanspruchung der Klebschicht auf Schub angestrebt. Zugbeanspruchungen und besonders Schälbeanspruchungen sollten vermieden werden. Für die in Abb. 5 dargestellten Kleverbindungen bedeutet dies, daß die Verbindungsformen a und c für die angegebene Belastung günstig sind. Bei den Verbindungen b und d läßt sich bei metal-

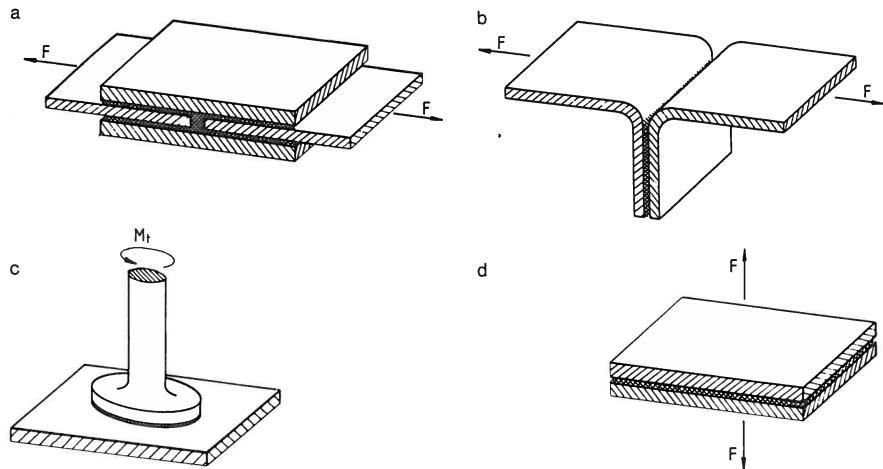
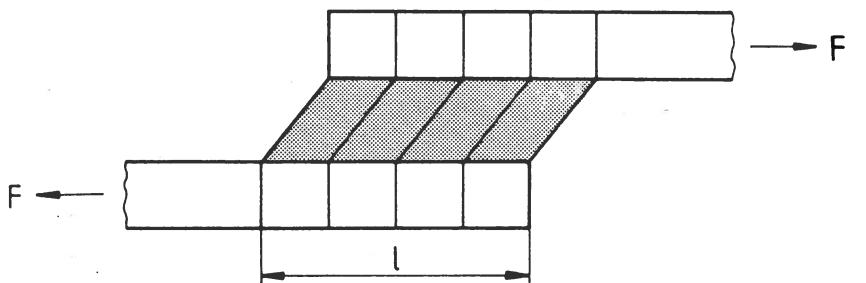
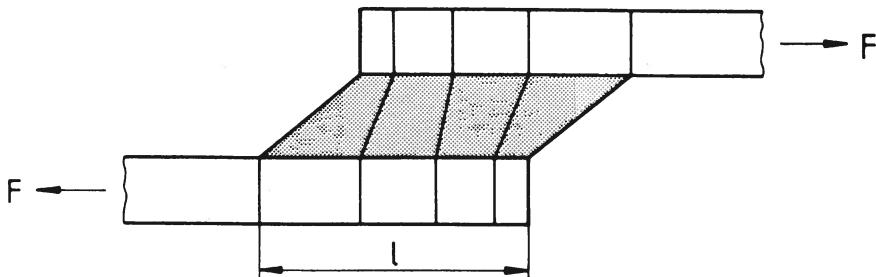


Abb. 5: Beanspruchungsrichtungen bei Klebverbindungen



a) starres Fügeteilverhalten (gleichmäßige Schubspannungsverteilung in der Klebschicht)



b) reales Fügeteilverhalten (ungleichmäßige Schubspannungsverteilung in der Klebschicht)

Abb. 6: Klebschicht- und Fügeteilverformungen bei einer überlappten Klebverbindung (unrealistische Klebschichtdicke aus Gründen der Anschaulichkeit)

lischen Fügeteilen die Festigkeit der Werkstoffe nicht ausnutzen, d. h. bei Klebverbindungen sind diese Beanspruchungsfälle zu vermeiden.

Die Belastung von Klebverbindungen führt in der Klebschicht und in den Fügeteilen zu örtlichen Spannungskonzentrationen. Die Zerstörung einer Klebverbindung beginnt an den Stellen der höchsten Spannungen (Rißbildung). Die Ursache ungleichmäßiger Spannungsverteilungen wird im folgenden am Beispiel der einfach überlappten Klebverbindung, Abb. 6, erklärt.

Bild 6a zeigt, daß sich die als starr angenommenen Fügeteile bei einer auf Schub beanspruchten Klebschicht einer Klebverbindung nicht verformen. Die Klebschicht wird dabei gleichmäßig verformt. Das Verhalten realer Fügeteile, bei denen die belastungsabhängige Fügeteildehnung im allgemeinen nicht vernachlässigt werden kann, führt zu ungleichmäßigen Verformungen der Klebschicht und zu einer entsprechend ungleichmäßigen Schubspannungsverteilung (Bild 6b).

Der Spannungsverlauf im Fügeteil ist in Bild 7 dargestellt.

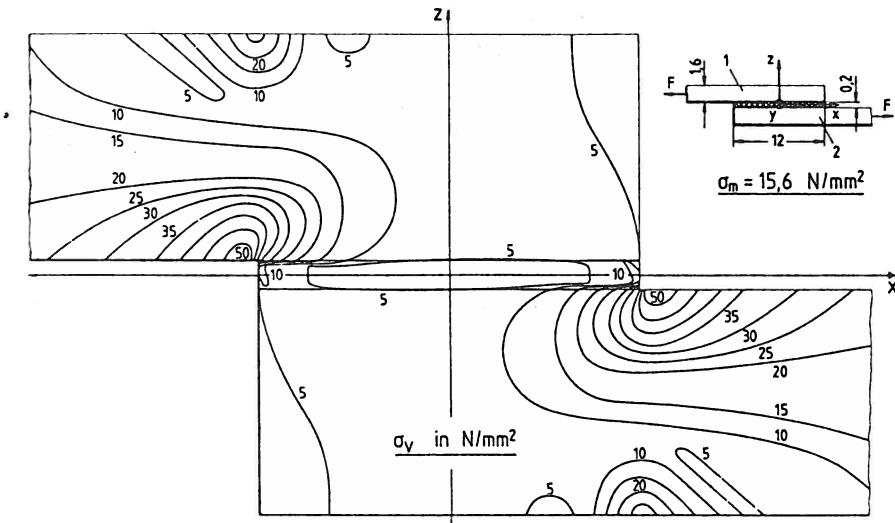


Abb. 7: Spannungsverteilung in einer überlappten Klebverbindung

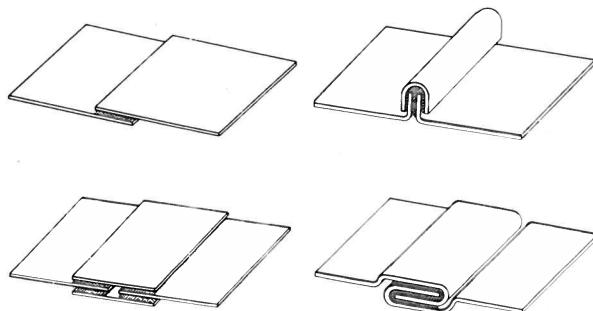


Abb. 8: Konstruktionsbeispiele für Blechverbindungen

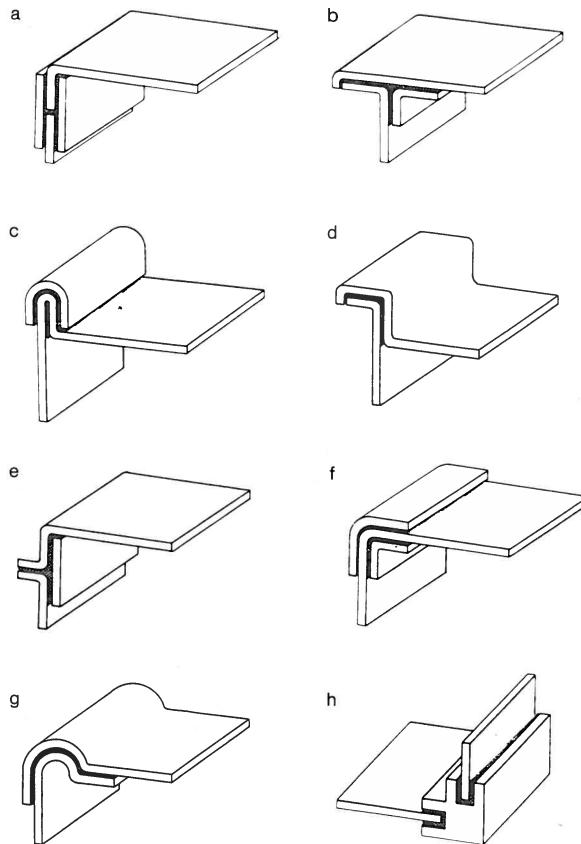


Abb. 9: Kleben von Eckverbindungen

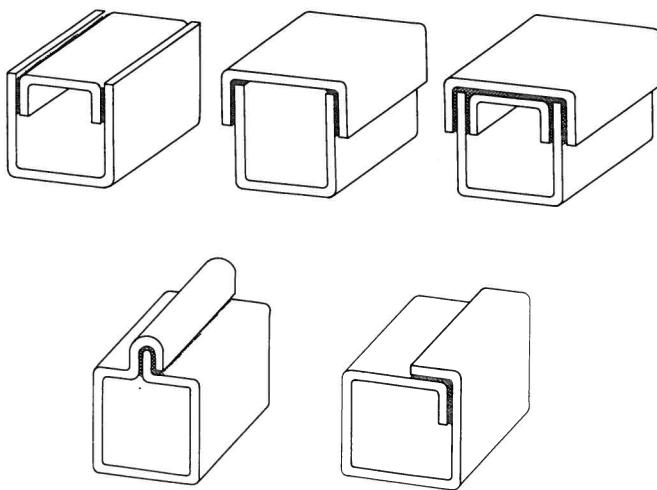


Abb. 10: Konstruktionen zur Erzeugung geschlossener Profile

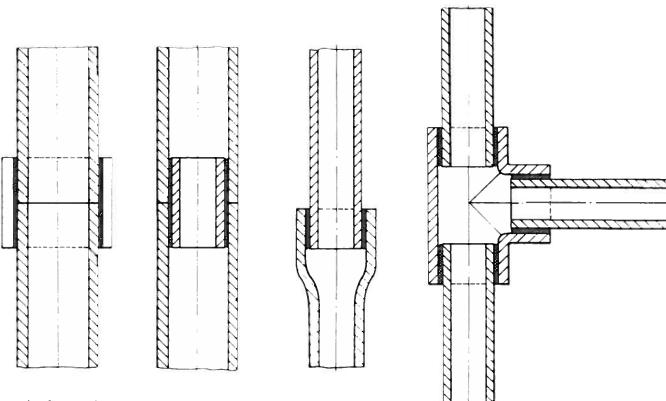


Abb. 11: Beispiele für Rohrverbindungen

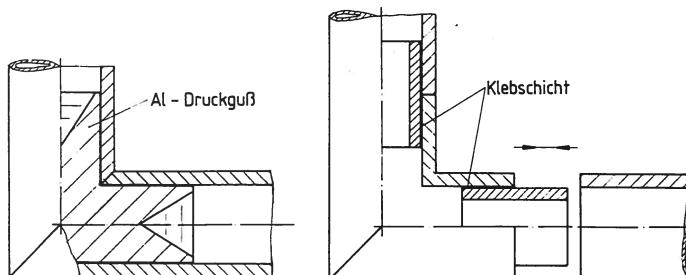


Abb. 12: Rohr-Eckverbindungen

Die Beanspruchung der Klebschicht ist im Bereich der Überlappungsenden der Fügeteile am größten, da aufgrund der hohen Spannungen hier die Fügeteilverformungen sehr groß sind, wodurch eine entsprechend große Klebschichtverzerrung bewirkt wird.

Die Spannungsspitzen führen dazu, daß eine Vergrößerung der Überlappungslänge bei überlappten Klebverbindungen keine proportionale Steigerung der übertragbaren Kräfte bewirkt. Die Klebfestigkeit sinkt mit zunehmender Überlappungslänge. Die ersten Schädigungen in der Verbindung werden bereits bei niedrigeren Spannungen festgestellt.

Die Gestaltung von Klebverbindungen sollte so erfolgen, daß sie primär auf Schub beansprucht werden. Hinweise dafür sollen die folgenden Konstruktionsbeispiele geben.

a) Blechverbindungen

Bei Blechverbindungen empfehlen sich die schon erwähnten überlappten Verbindungen und die Falzverbindungen, Abb. 8.

b) Eckverbindungen

Verbindungsformen für das Kleben dünnwandiger Teile sind aus Abb. 9 ersichtlich. Die Konstruktionsbeispiele geben Hinweise zur Erzielung von Eckverbindungen bzw. Eckversteifungen.

c) Geschlossene Profile

Konstruktionen zur Erzeugung geschlossener Profile sind Abb. 10 zu entnehmen.

Weiterhin sind Rohrverbindungen zu den geschlossenen Profilen zu zählen.

Beispiele für Rohrverbindungen sind in Abb. 11 dargestellt.

Rohrprofile aus Aluminium finden weite Verbreitung u. a. in der Möbelindustrie

und im Bauwesen (z. B. Fensterrahmenfertigung). In Abb. 12 sind typische Rohr-Eckverbindungen dargestellt. Wichtiges Konstruktionsmerkmal des Aluminium-Druckguß-Verbindungsstück ist die kegelförmigen Ausdrehungen an beiden Enden, um so einen Steifigkeitssprung im Übergangsbereich zwischen Verbindungsstück und Außenteil zu verhindern.

Läßt es sich nicht vermeiden, daß eine Klebverbindung auf Schälung beansprucht wird, sollte man an der Krafteinleitungsseite besondere konstruktive Maßnahmen vorsehen. Dies könnte, wie in Abb. 13 dargestellt, z. B. eine Vergrößerung der Klebfläche oder eine zusätzliche Befestigung durch Niet oder Schraube sein.

3.4 Hinweise zur Herstellung von Klebverbindungen

Der erfolgreiche Einsatz der „Fertigungstechnologie Kleben“ erfordert weiterhin die Einhaltung definierter und reproduzierbarer Randbedingungen, wie:

Mischen, Dosieren, Applizieren

Nach der Vorbehandlung der Fügeteile erfolgt der Klebstoffauftrag, und zwar je nach Klebstoff systemspezifisch und je nach Einsatzgebiet manuell oder automatisiert.

Für den manuellen Auftrag von dünnflüssigen und pastösen Klebstoffen können, je nach Beschaffenheit (Viskosität etc.) und Gebinde des Klebstoffes, Spachtel, Kartusche, Spritzpistole o. ä. verwendet werden. Die Ausführung der Kartusche und der Spritzpistole hängt im wesentlichen von der Art des Klebstoffes ab, d. h. ob er ein- oder mehrkomponentig ist, (im letzteren Fall ist eine Mischeinrichtung erforderlich). Anzumerken ist außerdem, daß die Verwendung von Folienklebstoffen eine spezielle Auftragstechnologie erfordert. Der Klebstoffauftrag kann auch automatisiert erfolgen.

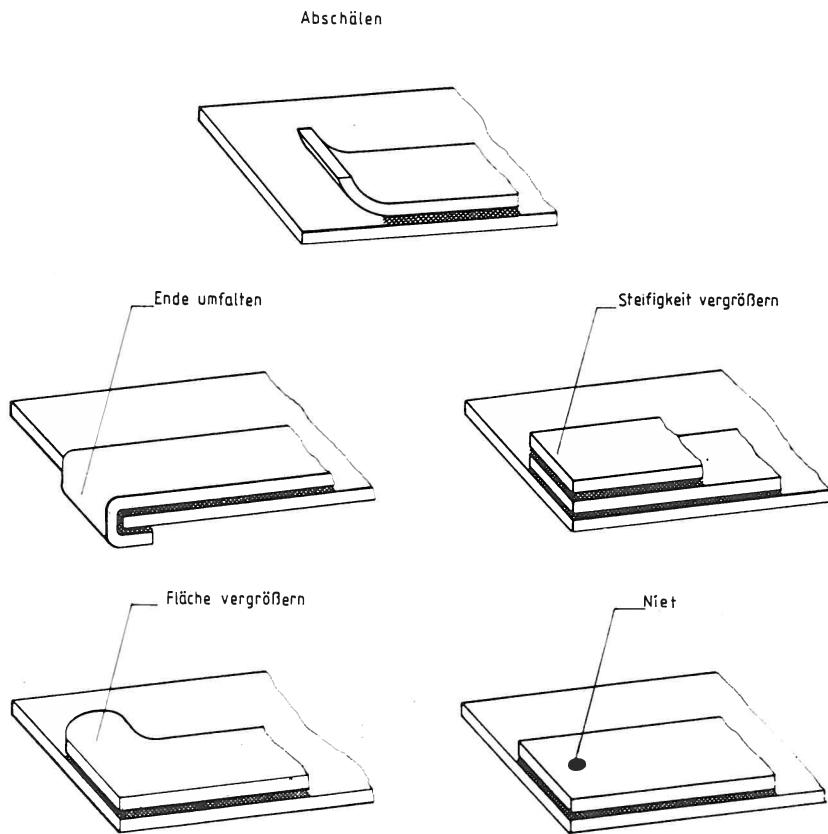


Abb. 13:

Aushärtung

Bei der Aushärtung des Klebstoffes werden die Vorrichtungen zur Fixierung der Fügeteile, zur reproduzierbaren Einstellung der Klebschichtdicke, zur Erzeugung des notwendigen Druckes und der erforderlichen Aushärtetemperatur in der Klebverbindung benötigt. Als Aushärteeinrichtungen kommen dafür in Frage:

- Durchlaufofen
- Umluftofen
- Heizpresse
- Autoklave
- IR-Strahler
- Induktionsgeräte

In diesem Zusammenhang zu beachtende Fertigungsparameter sind

- Klebschichtdicke
- Aushärtungsbedingungen
- Aufheizrate
- Abkühlrate

Der Einfluß der Klebschichtdicke auf das mechanische Verhalten (Festigkeits- und Verformungsverhalten) hängt sehr stark vom strukturellen Aufbau der Klebschicht ab und variiert mit den unterschiedlichen Aushärtebedingungen. Außerdem gibt es eine optimale Schichtdicke, denn mit zunehmender Schicht-

dicke nimmt die Klebfestigkeit ab. So gibt es für jedes Klebstoff-System entsprechend der zugrunde liegenden Klebstoff-Formulierung bevorzugte Aushärtungsbedingungen bei gegebener Schichtdicke. Auch die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten bei der Fertigung beeinflussen das mechanische Verhalten. Generell kann gesagt werden, daß längere Aufheiz- und Abkühlzeiten günstiger sind. Hinweise für die günstigsten Fertigungsrandbedingungen können in der Regel den technischen Datenblättern über die Klebstoffe entnommen werden.

4. Eigenschaften der Klebverbindungen

Für den kalkulierbaren Einsatz der Fügetechnologie ist es wichtig, das Verhalten der Verbindungen unter Betriebsbeanspruchungen zu kennen bzw. abschätzen zu können. Dies ist anhand von Kennwerten und -funktionen möglich, die jeweils bestimmte Verbindungs- oder Werkstoffeigenschaften beschreiben.

4.1 Strukturaufbau einer Klebschicht

Für das mechanische Verhalten einer Klebung sind die Verformungs- und Festigkeitseigenschaften der Klebschicht bestimend. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen geben hier einen Einblick in den Aufbau einer Klebschicht im Grenzbereich zum Füge teil.

Der heterogene Strukturaufbau der Klebschicht führt zu verschiedenen Eigenschaften der Klebschichtebenen und zu unterschiedlichem Verhalten bei mechanischer, thermischer und hygrothermischer Beanspruchung.

4.2 Statische Beanspruchung

Das Langzeitverhalten von Klebstoffen ist stark zeit- und temperaturabhängig und wird außerdem von den Umgebungsmedien beeinflußt. Eine charak-

teristische Eigenschaft der Klebschicht bei statischer Beanspruchung ist das Kriechen des Polymers. Dies bedeutet eine zeitlich zunehmende Verformung bei konstanter Last. Der Kriechvorgang läßt sich in drei grundsätzliche Zeitbereiche einteilen, den primären, sekundären und tertiären Teil. Bei dem Einsatz einer Klebverbindung ist darauf zu achten, daß der Kriechprozeß aufgrund zu großer Verformungen nicht zu einem funktionellen Versagen des Bauteils führt. Außerdem ist zu vermeiden, daß beim Kriechen der tertiäre Bereich erreicht wird, da dies unweigerlich zum Bruch führt. Temperaturerhöhung und der Kontakt der Klebschicht mit flüssigen oder dampfförmigen Medien verstärken im allgemeinen die Kriechneigung.

Das strukturelle Versagen einer Klebverbindung beginnt im allgemeinen mit einer Rißbildung. Schreitet dieser Riß soweit fort, daß die noch verbleibende Klebfläche der Belastung nicht mehr standhalten kann, kommt es zum Bruch der Verbindung. Das Wachstum eines solchen Risses wird durch die Umgebungsbedingungen und die Spannungsverteilung in der Klebschicht beeinflußt. Abb. 14 zeigt das Spannung-Verformung-Verhalten einer Klebverbindung, der sog. dicken Zugscherprobe in Anlehnung an DIN 54451, vor und nach einer Klimalagerung. Bereits bei einer während der Lagerung mechanisch unbelasteten Probe ist der o. g. Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeit zu erkennen.

4.3 Quasistatische Beanspruchung

Das mechanische Verhalten einer Klebverbindung hängt von der Wahl des Klebstoffes ab. Anhand des Anwendungsfalls muß die Entscheidung getroffen werden, ob ein eher zähes oder ein sprödes Produkt verwendet wird.

Abb. 15. zeigt hierzu 2 charakteristische Spannung-Verformung-Kurven. Bei

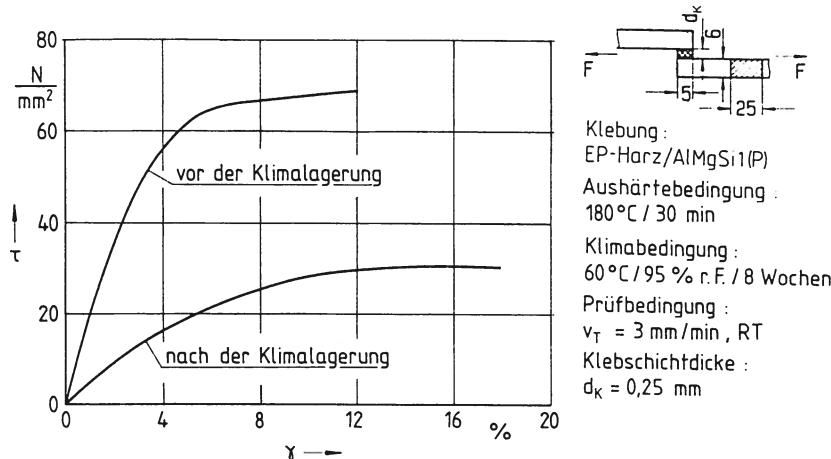


Abb. 14: Spannung-Verformung-Verhalten einer Klebverbindung vor und nach der Klimalagerung

dem mit Epoxid-Harz Nr. 1 bezeichneten Produkt handelt es sich um einen Klebstoff mit geringem Verformungsvermögen (spröde), das Epoxid-Harz Nr. 2 hingegen verfügt über ein duktiles Werkstoffverhalten. Bei der Klebstoffauswahl darf die Festigkeit nicht das einzige Kriterium sein. Bei sehr verformungsfähigen Fügeteilen bzw. Bau- teilen sind Produkte mit höherer

Verformungsfähigkeit besser geeignet, da hierbei kritische Klebstoffbeanspruchungen durch plastische Verformungen abgebaut werden.

Das Versagen einer Klebverbindung kann unterschiedliche Ursachen haben. Bei ungenügender Haftung zwischen Fügeteil und Klebstoff kommt es zum Adhäsionsbruch. Eine zu geringe Eigen-

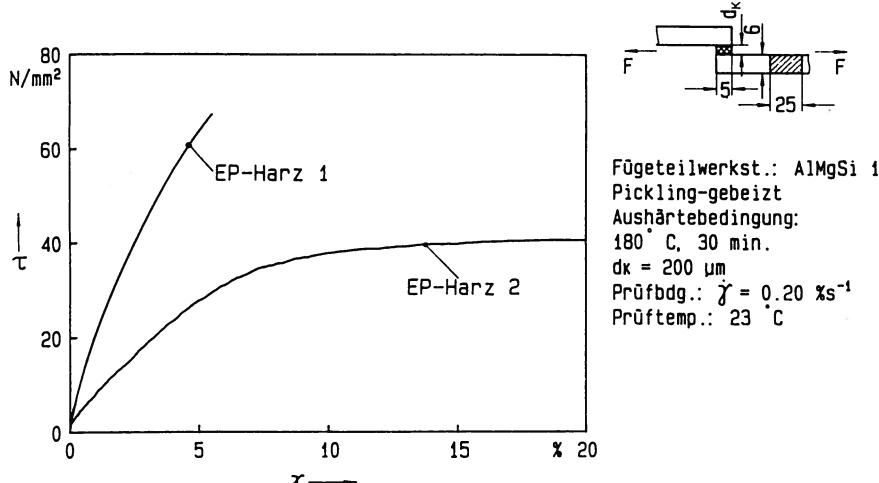


Abb. 15: Mechanisches Verhalten zweier Klebstoffe

festigkeit des Klebstoffes führt zum Kohäsionsbruch. Die dritte Art des Bruches ist eine Kombination aus beiden. Das Versagen beim Mischbruch läßt sich also auf Adhäsions- und Kohäsionsversagen zurückführen. Eine weitere Versagensmöglichkeit ist die nicht ausreichende Fügeteilfestigkeit.

4.4 Dynamische Beanspruchung

Die in Abb. 15 aufgezeigten Unterschiede im mechanischen Verhalten von Klebstoffen lassen sich bei dynamischer Beanspruchung wie folgt bewerten. Für den Einsatz bei schwingender und schlagartiger Belastung eignet sich im allgemeinen ein Klebstoff mit duktilem Verhalten (im Bild Epoxid-Harz Nr. 2) besser als ein Klebstoff mit geringer Verformungsfähigkeit. Die Anwendung der Kle 技术 im Bereich dynamischer Beanspruchung bietet sich z. B. aufgrund der bei einigen Klebstoffen vorhandenen Dämpfungseigenschaften besonders an. Weiterhin ist bekannt, daß die Festigkeiten schwingend beanspruchter Klebverbindungen im Vergleich zu anderen Fügeverfahren gut sind.

5. Prüfen von Klebverbindungen

Zur Beurteilung bzw. Kontrolle von Klebverbindungen stehen eine Anzahl von genormten und nichtgenormten Prüfverfahren zur Verfügung, die nach Abb. 16 in zerstörende und zerstörungsfreie Verfahren unterteilt werden können.

Unter zerstörenden Prüfverfahren versteht man Methoden, bei denen die zu prüfende Verbindung beschädigt bzw. zerstört wird. Die genannten Normen legen dabei Probenform und Prüfparameter fest. Aus dieser Vielzahl ist, je nach Anwendungsfall, die passende Norm auszuwählen. Die Verfahren kommen überwiegend nur für Vergleichsuntersuchungen, z. B. bei verschiedenen Fügeteilwerkstoffen, Klebstoffen etc., zum Einsatz. Dabei kann es sich innerhalb der Fertigung nur um Stichproben handeln. Am Übergang zu den zerstörungsfreien Prüfmethoden, bei denen die Klebverbindung (das Bauteil) unbeschädigt bleibt, stehen bedingt zerstörende Prüfmethoden, deren Einsatz eine Belastung und dabei eine begrenzte Schädigung der Verbindung notwendig macht.

Prüfung von Klebverbindungen		
Zerstörend		Zerstörungsfrei
statisch/quasistatisch	dynamisch	
Zugscherfestigkeit DIN 53283		
Schubspg.-Gleitung-Verhalten DIN 54451		
Zugfestigkeit DIN 53288	Dauerschwingfestigkeit DIN 53285	Akustisch, z. B. Ultraschall
Druckscherfestigkeit DIN 54452		Elektrische Verfahren
Zeitstandfestigkeit DIN 53284		Optische Verfahren
Schälfestigkeit DIN 53282		
DIN 53289		

Abb. 16

Die zerstörungsfreien Prüfmethoden

- **Impedanzprüfung**
- **Ultraschallprüfung**
- **Durchstrahlung**
- **Wärmeleitungsmessung**
- **Holographie**

sind zumeist nur bei einiger Erfahrung auf dem jeweiligen Gebiet einsetzbar, da die Ergebnisse der Prüfung häufig Interpretationsprobleme bereiten.

Alternativ zu der in Abb. 16 getroffenen Einteilung ergibt sich auch die Möglichkeit, die Prüfverfahren nach der Art der Beanspruchung der Klebschicht einzuteilen (Abb. 17).

Als weitere Möglichkeit der Prüfung von Klebstoffen bieten sich Verfahren an, die mit Klebstoffsubstanzproben durchgeführt werden. Hierbei werden die Proben nur aus ausgehärtetem Klebstoff hergestellt. Diese Art der Untersuchung lässt jedoch nur begrenzte Schlüsse auf das Verhalten einer Klebverbindung zu, da dieses durch die Klebfugengrenzschicht erheblich beeinflusst wird. Zu nennen sind hier z. B. der Zugversuch an Klebstoffsubstanzproben, der Torsionsschwingungsversuch (DIN 53445) und die DSC-Analyse.

Die Vielzahl der vorhandenen Prüfmethoden werden ergänzt durch Versuche, die z. B. bauteilspezifisch ausgelegt werden müssen. Bei der Durchführung solcher Versuche sollte jedoch darauf geachtet werden, daß die Prüfbedingungen möglichst einer Norm angenähert werden, um zumindest grobe Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Ergebnissen zu erzielen.

Prüfung von Klebverbindungen			
Schälbeanspruchung der Klebschicht	Normalbeanspruchung der Klebschicht	Schubbeanspruchung der Klebschicht	
			DIN
Winkelschälversuch	DIN 53282	Zugversuch	DIN 53288
Rollenschälversuch	53289		Zugscherversuch
Keilstest	65448		Zeitstandversuch
			Dauerschwingversuch
			Zugscherversuch
			Druckscherversuch
			Torsionscherversuch

Abb. 17

6. Einsatzbereiche von Aluminium

Aufgrund seiner herausragenden Eigen-schaften

- **geringes spezifisches Gewicht**
- **sehr gute Recyclingfähigkeit**
- **hohe Witterungs- und Korrosions-beständigkeit**
- **gute Wärmeleitfähigkeit**
- **hohe elektrische Leitfähigkeit**
- **hohe Festigkeit bei gleichzeitig guter Verformbarkeit**

ist Aluminium ein Werkstoff für viele Industriebranchen.

Heute ist die Automobilindustrie in Deutschland mit einem Anteil von 30 % am Gesamtverbrauch bedeutender Abnehmer für Aluminium. So wurden 1995 allein im Verkehrssektor 471.000 t verarbeitet.

Ob Fahrrad, Motorrad, Jet, Auto oder Bahnen und Busse: Kaum eines dieser Mobile kommt heute ohne Aluminium aus. Insbesondere die Gewichtsreduzierung und die damit einhergehende Treibstoffersparnis, aber auch die extrem hohe Belastbarkeit sorgen für den verstärkten Einsatz des Leichtmetalls im Verkehrs-wesen.

Während z. B. in europäischen PKW durchschnittlich 65 kg Aluminium über-wiegend schwerere Materialien ersetzen, sind es in amerikanischen Autos bereits 75 kg. Mit steigender Tendenz: Immerhin bedeuten 100 kg eingespartes Gewicht eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs um rund 0,6 Liter pro 100 km.

Den zweiten Platz belegt die Baubranche mit einem Anteil von 16% am Gesamtverbrauch in der BRD. 1995 wurden rund 251.200 t Aluminium für die Um-setzung außen- und innenarchitekto-

nischer Ideen verwendet. Hier zählen besonders die Langlebigkeit, Witterungs-beständigkeit und der geringe Wartungs-bedarf, Eigenschaften, die Aluminium zu einem attraktiven Baustoff machen.

Darüber hinaus hilft das Leichtmetall ver-stärkt bei der Nutzung regenerativer Energien: zum Beispiel in Wärmetau-schern, Sonnenkollektoren und Wind-energieanlagen.

Mit einem Verbrauch von rund 109.900 t Aluminium in 1995 steht die Verpak-kungsindustrie an dritter Stelle in der bundesdeutschen Gesamtbilanz. Alu-minium als Verpackungsmaterial erfüllt vielfältigste Anforderungen, die weit über die klassischen Funktionen einer Verpackung hinausgehen: Insbesondere für Nahrungsmittel, wo es auf den Erhalt der Frische, der Qualität der Ware und auf Hygiene ankommt, ist Aluminium meist als Hauptbestandteil eines Folien-verbundes unentbehrlich.

Es schützt wie ein Tresor: Aluminium ist geschmacks- und geruchsneutral und bewahrt Aroma, Vitamine sowie alle anderen ernährungsphysiologischen Be-standteile der Lebensmittel. Darüber hin-aus bietet Aluminium bei äußerst gerin-gem Materialeinsatz sichere Barrieren gegen Licht, Gase, Feuchtigkeit, Mikro-organismen und Fremdstoffe. Aluminium ist sowohl gegen Hitze wie gegen Kälte unempfindlich und gesundheitlich völlig unbedenklich. Darüber hinaus erweist sich das Leichtmetall als idealer Partner bei Verbundmaterialien. So hält mit Aluminium kaschiertes (verklebtes) Papier oder Kunststoff zum Beispiel Kaffee und Zigaretten frisch und sorgt bei Tütensuppen für eine lange Haltbarkeit. Insgesamt überzeugt Aluminium durch ein Minimum an Materialeinsatz, dem ein Maximum an Verpackungsleistung gegenübersteht.

Die aufgelisteten Industriebranchen haben die Vorteile des Aluminiums klar erkannt. Eine wesentliche Voraussetzung war aber, die Beherrschung der Fügetechnik, zu dem mit Sicherheit auch die Klebbarkeit gehört. Wie die folgenden Beispiele zeigen, sind es genau die, hinsichtlich des Einsatzes an Aluminium aufgelisteten Branchen, die heute die Klebetechnik erfolgreich anwenden.

7. Beispiele für Aluminium-Verklebungen/Anwendungen außerhalb des Flugzeugbaus

Der Flugzeugbau soll bei dieser Aufstellung außer Betracht bleiben, da hier, wie schon oft erwähnt, hauptsächlich Phenolharz-Klebstoffe und Klebefilme zur Anwendung kommen. Diese Klebstoffe müssen unter speziellen Bedingungen gehärtet werden, die auf andere Branchen/Anwendungen unter ökonomischem Gesichtspunkt nicht übertragbar sind.

7.1 Kleben im Fahrzeugbau

Im modernen Fahrzeugbau gehören Klebverbindungen zum Stand der Technik. Es kommen zahlreiche Klebstoffe zum Einsatz, die auf den jeweiligen Anwendungsfällen abgestimmt sind. Für konstruktiv-strukturelle Anwendungen kommen beispielhaft hochfeste Epoxid-Klebstoffe in Kombination mit punktförmigen Verbindungen – wie dem Punktschweißen, Nieten oder Clinchen – zum Einsatz. Für Bördelnahtverklebungen von Türen, Front- und Heckklappen werden die jeweiligen Epoxid- oder PVC-Plastisole alleine ohne zusätzliche mechanische Befestigung erfolgreich eingesetzt. Desgleichen werden die Fahrzeug-Scheiben großserienmäßig in die Karosserie eingeklebt mit zähelastischen Polyurethanklebstoffen.

Mit ein Grund für den steigenden Einsatz von Klebstoffen im Fahrzeugbau ist

sicherlich die Tatsache, daß sich mittels Kleben Leichtbaulösungen umsetzen lassen. Dies gilt insbesondere in Kombination mit mechanischen und/oder thermischen Fügeverfahren. Die für den Leichtbau vorzugsweise verwendeten Dünngleicherbindungen reagieren relativ empfindlich auf punktförmige Krafteinleitung, die z. B. beim Punktschweißen, Nieten, Clinchen etc. auftreten. Dagegen wird mit einer zusätzlich flächig aufgebrachten Verklebung eine günstigere Spannungsverteilung erzielt. Die statische und dynamische Festigkeit der Verbindung wird dadurch erheblich gesteigert. Ein hoher Schubmodul des Klebstoffs wirkt sich zudem positiv auf die Verbindungssteifigkeit aus (siehe Abb. 6). Des Weiteren erreicht man durch die Dichteigenschaften des Klebstoffs einen Korrosionsschutz für die Punktverbindung im Verbindungsflansch.

Mit dem Werkstoff Stahl stößt man derzeit an die Grenzen des Leichtbaupotentials. Alternative Werkstoffe, wie zum Beispiel die Leichtmetalle und unverstärkte/verstärkte Kunststoffe, bieten neue Möglichkeiten der Gewichtsreduzierung im Fahrzeugbau.

Mit dem Audi A8, dessen Karosserie gänzlich aus Aluminium besteht, leistete Fa. Audi einen wichtigen Beitrag zur optimalen Gewichtsreduzierung. Der Aluminium Space-Frame des A8 bietet den Vorteil, daß in die Aluminium-Strangpreßprofile in Verbindung mit den Aluminium-Gußknoten zusätzliche Funktionen integriert werden können. Der Einsatz von Aluminium machte es jedoch erforderlich, die bekannten Fügetechniken an den „neuen Werkstoff“ anzupassen. Neben dem MIG-Schweißen wird das Punktschweißen, die mechanischen Fügeverfahren Stanznieten und Clinchen sowie die Klebetechnik für Aluminiumverbindungen eingesetzt.

Insbesondere ist bei Aluminium-Klebverbindungen sicherzustellen, daß der spezifische Durchgangswiderstand der Klebstoffe so hoch ist, daß „Kontaktkorrasion“ zwischen Polymerschicht und Aluminium infolge von Potentialdifferenzen zwischen Klebstoffbeimengungen und Aluminium-Substrat ausgeschlossen werden kann.

Mit dem Werkstoff Aluminium können Gewichtseinsparungen von bis zu 50 % gegenüber Stahl erzielt werden.

Karosseriestrukturen aus Aluminium haben bei verbesserter Korrosionsbeständigkeit und Steifigkeit eine günstigere Unfallenergieaufnahme gegenüber Stahl. Das Konzept der Klebverbindung, kombiniert mit dem Punktschweißen, erhöht die Steifigkeit der Struktur und reduziert die Spannungskonzentration an den Schweißpunkten. Mit diesem Schritt wurden die Probleme beim Bau von Fahrzeugstrukturen aus Aluminium gelöst, obwohl Aluminium gegenüber Stahl einen geringeren Elastizitätsmodul und eine höhere Ermüdungsempfindlichkeit bei Spannungskonzentrationen aufweist. Von Klebstoffen, die diese hohen Anforderungen erfüllen, wird gefordert, daß dauerhafte Verbindungen mit guter Schälfestigkeit in einem Temperaturbereich von -40°C bis $+90^{\circ}\text{C}$ erzielt werden. Darüber hinaus müssen derartige Klebstoffe per Roboter applizierbar und für das Punktschweißen geeignet sein.

Das sollte nicht nur unmittelbar nach dem Auftrag, sondern noch mehrere Stunden später möglich sein, damit auch zuvor in ganze Karosseriekonstruktionen montierte Montagegruppen punktgeschweißt werden können, d. h. der Klebstoff muß bei erhöhter Temperatur und nicht bei Raumtemperatur härten. Sogenannte kautschukmodifizierte einkomponentige, heißhärtende Epoxid-Klebstoffe sind hier die geeigneten Klebstoffe.

Typische Aushärtungszeiten liegen bei 20–30 min. bei 180°C . Entscheidend für die erfolgreiche Verklebung sind die Werkstoffspezifikation des Aluminiums und die Oberflächenvorbehandlung. Hinsichtlich der Werkstoffspezifikationen kommt bei Aluminiumblech

- mittlere Festigkeit
- gute Verformbarkeit
- gute Korrosionsbeständigkeit
- gute Punktschweißfestigkeit

infrage. Von entscheidender Bedeutung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit ist der Einsatz bandbeschichteter Aluminiumbleche. Diese müssen lagerbeständig sein und das Punktschweißen eher erleichtern als stören, hinsichtlich Haftfestigkeit und Alterungsbeständigkeit mit und ohne Klebstoff ausgezeichnete Werte geben und gleichzeitig als Vorbehandlung für das spätere Lackieren dienen. Derartige Beschichtungen werden durch eine Behandlung mit Phosphorsäuren erreicht und werden vom Aluminiumhersteller direkt geliefert.

Der richtigen Klebstoffauswahl kommt bei diesem Verfahren ebenfalls eine entscheidende Funktion zu, unterscheiden sich doch möglicherweise die Klebstoffe weniger im Kurzzeitverhalten als vielmehr im Langzeitverhalten unter Beanspruchung (siehe Abb. 4 und Tab. 5), was wiederum für den Anwender von entscheidender Bedeutung ist. Dem Anwender obliegt es daher, durch geeignete Tests (Salzsprühtests, Klimawechseltests u. a.) den geeigneten Klebstoff auszuwählen.

Neben dem Alterungsverhalten der Klebverbindung sind auch spezielle Anforderungen hinsichtlich Schubfestigkeit und Schubsteifigkeit zu stellen. Ein Grundversuch stellt hier in Anlehnung an die „dicke Zugscherprobe nach DIN 54451“ die Ermittlung des Schubspannung-

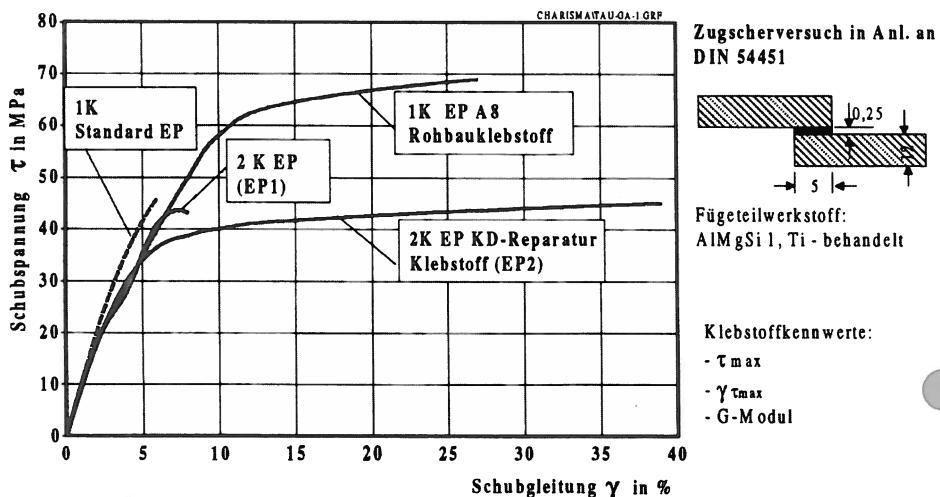


Abb. 18: aus Literatur 12

Gleitungsverhaltens dar. Ziel ist es, einen Klebstoff einzusetzen, der eine hohe Schubspannung bei hoher Gleitung ermöglicht (siehe Abb. 18). Dieses Verhalten bestimmt das Arbeitsaufnahmevermögen der Klebverbindung.

Folgendes Lastenheft muß der Klebstoff erfüllen:

1. Klebstoffeigenschaften
 - Zugscherfestigkeit
 - Schälfestigkeit
 - Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten
2. Adhäsionsbeständigkeit
 - Keiltest
 - 1) unter Klima-Korrosionswechsel
 - 2) unter verschärfter Freibewitterung
3. Klebfestigkeit und Beständigkeit
 - statische Festigkeit
 - 1) $-20^{\circ}\text{C}/\text{RT}/+80^{\circ}\text{C}$
 - 2) nach Klima-Korrosionswechselfest: 30/60/90/180/360 Tage

- 3.3) nach $50^{\circ}\text{C}/100\%$ r.F.: 30/90/180/360 Tage
- 3.4) nach verschärfter Freibewitterung mit Last: 180/360 Tage
- Schlagfestigkeit (Schlagscherzugversuch)
Zugscherprobe
- 3.5) $-20^{\circ}\text{C}/\text{RT}/+80^{\circ}\text{C}$
- 3.6) nach Klimakorrosionswechseltest: 90 Tage
- Dynamische Festigkeit (Dauerschwingversuch)
Zugscherprobe
- 3.7) ohne Alterung
- 3.8) nach Klimakorrosionswechselfest: 90 Tage

Ein einkomponentiger Epoxid-Klebstoff, der dieses Lastenheft erfüllt, ist z. B. TEROKAL 4520. Er ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

Charakteristik

Pastöser, heißhärtender Einkomponenten-Klebstoff mit guter Standfestigkeit. Er ist frei von Lösungsmitteln und weist gute Haftung auf vorbehandeltem Aluminium auf. Aushärtung 30 min. bei 180°C .

Technische Daten

Viskosität bei 20°C	ca. 65.000 mPas
Meßgerät:	Bohlin CS
Meßsystem:	Platte/Platte 20 mm O, 20 s
Standfestigkeit:	gut
Schweißbarkeit:	gut
Korrosionsbeständigkeit	
Salzsprühtest nach DIN 50021: (5%ige Salzlösung, 35°C, 1.000 h)	keine Unterrostung, keine Haftungsverluste
Zugscherfestigkeit: (in Anlehnung an DIN 53283 auf Stahl)	ca. 20 MPa
E-Modul DIN 53457 bei RT:	2,7 + 0,3 GPa
Schubmodul G DIN 54451 bei RT:	ca. 530 MPa
Gleitung DIN 54451 bei RT:	ca. 13 %
Schubspannung DIN 54451:	ca. 38 MPpa
Verarbeitungstemperatur:	15°C bis 30°C
Gebrauchstemperatur:	-40°C bis 90°C
kurzfristig (bis 1h):	120°C
10 Runden Schwitzwassertest 20 Mpa DIN 5017	

Alterungsverhalten auf Aluminium-Blech

Aluminium	AC 100 (AlMgSi1 Alusuisse)
Alterungstests	
Anfangsfestigkeit	27 MPa
500 Std. SSDIN 50021	23 MPa
1.000 Std. SSDIN 50021	23 MPa
Klimawechseltest	23 MPa
Härtung:	30 min./180°C
Zugscherfestigkeit (DIN 53283):	
Aluminium, Blechstärke	AC 110: 1,5 mm

7.2 Kleben von Aluminium in der Autoreparatur

Aluminium leistet als Werkstoff in der Automobilherstellung einen wesentlichen Beitrag zur Gewichtsreduzierung. Für die Herstellung des Aluminium Space-Rahmens sowie für die Verbindung von Aluminiumblechen untereinander oder mit dem Aluminium-Rahmen werden als Fügetechniken neben dem MIG-Schweißen, Punktschweißen, Stanznieten und Clinchen auch die Klebetechnik eingesetzt.

So vorteilhaft die Klebetechnik in der Serienfertigung auch ist, im Reparaturfall muß sie auch funktionieren, obwohl in der Werkstatt andere Bedingungen vorliegen, als an der Produktionslinie:

Während in der Serienfertigung – unabhängig von der Aluminiumlegierung – ein simultanes System aus Tauch- und Konversionsbehandlung als Oberflächenvorbehandlungsmethode angewandt wird und ein heißhärtender Epoxid-Klebstoff zum Einsatz kommt, ist

beides in der Werkstatt nicht möglich. Die Entwicklung eines Oberflächenvorbehandlungsverfahrens und die Bereitstellung eines geeigneten Klebstoffes, welche speziell den Anforderungen im Kundendienst, d. h. geringen Investitionskosten, sowie einfache und sichere Handhabung genügen, waren also unumgänglich.

Als ein mögliches Verfahren hat sich das modifizierte Saco-Verfahren (Lit. 12) etabliert, das eine mechanische Applikation eines Organo-Silans durch Sandstrahlen auf die Oberfläche beinhaltet. Bei dieser Methode wird ein Teil der Beschichtung fest in die Oberfläche eingebaut. Man erhält so eine hochreine und aktive Oberfläche, die zusätzlich noch mit einem Silan-Haftvermittler ausgerüstet ist, um eine feuchtigkeitsstabile Verbindung zum Klebstoff herzustellen (siehe auch Abb. 3).

Umfangreiche Untersuchungen haben erwiesen, daß eine derartige Methode sich sehr gut für die Reparatur von Aluminium-Karosserien eignet und ausreichende Haftung und Alterungsbeständigkeit bietet.

Während in der Serienfertigung ein bei 180°C härtender 1K-Epoxid-Klebstoff eingesetzt wird, wird im Reparaturfall ein 2K-Epoxid raumtemperaturhärtend eingesetzt. An diesen Epoxid-Klebstoff werden hohe Anforderungen hinsichtlich

- Adhäsionsbeständigkeit (Keiltest)
- Klebfestigkeit und Beständigkeit (Klimawechseltest)
- Dynamische Festigkeit (Klima-Korrosionswechseltest)

gestellt. Typische Epoxide, die diese Forderungen erfüllen, sollen bei hoher Schubspannung eine hohe Schubgleitung aufweisen. Ein derartiges Verhalten bestimmt das Lastaufnahmevermögen der Klebverbindung (siehe auch Abb. 18).

Im Reparaturfall ist folgende Vorgehensweise möglich:

Die beschädigten Teile werden herausgetrennt und ein entsprechendes Aluminiumteil angepaßt. Das Karosserieteil wird im Bereich der Verklebung so stark abgestzt, daß das neu aufzuklebende Teil das gleiche Niveau erreicht. Nach Entfernung des Lacks wird mit den Saco-Schleifkörnern gearbeitet, wobei auch schwierige Geometrien vorbehandelt werden können. Nachträglich wird der Haftvermittler aufgepinselt, dessen Trägerlösemittel nach etwa einer Minute abgedampft ist. Anschließend kann der Klebstoff aufgetragen und das Reparaturteil fixiert werden. Die so ausgeführten Reparaturen weisen eine ideale Korrosions- und Langzeitbeständigkeit auf. Die bisher schwierig auszuführenden Reparaturen von Aluminiumkarosserien haben damit eine Möglichkeit erfahren, um in jeder Werkstätte ohne aufwendige Fertigungsschritte durchgeführt werden zu können.

Zweikomponentige Epoxid-Klebstoffe, die diesen Anforderungen genügen, sind z. B. Terokal 5045 und 5046.

Charakteristik:

Thixotroper Klebstoff, der 1:1 gemischt wird und sowohl kalt als auch warm gehärtet werden kann. Der ausgehärtete Klebstoff ist hart, aber nicht spröde.

Technische Daten:

Putzlife: 90 min.
Anfangsfestigkeit: nach 6 Std.
Endfestigkeit: 3 Tage, 20°C
oder
30 min., 100°C

Zugscherfestigkeit
Kalthärtung 16–20 MPa
Warmhärtung > 20 MPa
Schubmodul G ~ 430 MPa
Einsatzbereich: –40°C bis +80°C
kurzzeitig bis 140°C

Alterungsverhalten in Abhängigkeit von der Aluminium-Vorbehandlung

		Zugscherfestigkeit (MPa)		
		Anfangs-festigkeit	SS 500 h DIN 50021	SS 1000 h DIN 50021
Aluminium AlMgSi0,5				
unvorbehandelt	11	11	13	
alkalisch gewaschen mit Ridolene 1402	16,3	11	13,1	
grün chromatiert	11,9	15	12,1	
gelb chromatiert	14,9	13,4	14,5	
chromfrei passiviert	13	11,9	10,7	
anodisiert	10,9	12,1	10,9	

Klebstoff: Terokal 5045

Aluminium: AlMgSi0,5

SSDIN 50021: Salzsprühtest

7.3 Fassadenverkleidungen

Verkleidungselemente für Fassaden von Wohnhäusern, Büro- und Verwaltungsgebäuden können aus den verschiedensten Materialien sein (Glas, Stahl, Aluminium, Beton, Naturstein, Keramik, Holz etc.). Ein Beispiel für die Entwicklung eines neuen Fassadensystems einschl. passender Unterkonstruktion ist die Aluminium-Leichtbauplatte Metawell. Metawell hat den Vorteil der Gewichtersparnis (leichtere Konstruktion möglich) und des geringeren Verzugs bei Temperaturschwankungen (bessere Optik bei Fassaden). Daß Metawell auch durch Verwendung eines Klebstoffs hergestellt wurde, sei nur am Rande erwähnt. Beim neuen Fassadensystem Metawell kommt der MS-Kleb- und Dichtstoff Terostat 9360 A/9370 B für die Umlaufverklebung zum Einsatz. Durch die hiermit erfolgende Aufdoppelung der Metawellplatte im Randbereich wird eine besonders hohe Verwindungssteifigkeit erzielt. Auch bei Temperaturwechseln bleibt die Planizität der Fassadenelemente (in Längen bis zu 6 m) erhalten, da durch die hohe Elastizität des Klebstoffs keine Spannungsspitzen auftreten.

Der Vorteil dieser auf Basis eines silan-modifizierten Polymers (MS-Polymer) formulierten Klebstoffes ist das universelle Haftspektrum, insbesondere auf Metallen und Kunststoffen, womit sich der Einsatz von Primern erübrigert.

Ähnlich den Polyurethan-Klebstoffen besitzen MS-Kleb- und Dichtstoffe eine hohe Klebkraft. Sie sind UV-stabil und können deshalb besonders gut im Außenbereich verwendet werden. Für die Abdichtung und Versiegelung der Fassadenelemente wird zusätzlich noch der MS-Dichtstoff Terostat 935 verwendet.

Die **zweikomponentigen MS-Polymer-Klebstoffe** sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

Charakteristik:

Hochviskose, standfeste Zweikomponenten-Klebstoffe, die im Verhältnis 1 : 10 gemischt aushärten/vernetzen. Sie sind lösungsmittel-, isocyanat- und siliconfrei. Nach dem Vermischen beginnt unabhängig von der Luftfeuchtigkeit die Vernetzung zu einem elastischen Material mit breitem Haftspektrum. Bereits nach

1 Stunde Reaktionszeit bei Raumtemperatur liegen Festigkeiten vor, die bei Einkomponentensystemen erst nach Tagen erreicht werden. Die Haftung auf metallischen oder lackierten Untergründen ist ausgezeichnet, eine hohe Anfangsfestigkeit („position tack“) ist gegeben.

Topfzeit: ca. 10 min.
Tackfreiheit: nach 20–30 min.
Zugfestigkeit: ~ 3,5 MPa
(DIN 53504)
Zugscherfestigkeit: ~ 2 MPa
(DIN 53288)
Substrate: AlMg1SiCu
Schichtdicke: 2 mm
Temperatur-
einsatzbereich: – 40°C bis + 100°C

7.4 Herstellung von Sandwich-Elementen

Zur Gewichtseinsparung und zur Erzielung bestimmter physikalischer und mechanischer Eigenschaften werden aus den verschiedensten Materialien Sandwich-Elemente hergestellt. Die Klebetechnik ist hier oft die einzige mögliche Verbindungstechnik. In vielen Fällen kommen Aluminiumfolien oder -platten als Deckmaterial zur Anwendung.

Sandwich-Konstruktionen unter Einsatz von mindestens einem Aluminium-Bau teil haben technische Bedeutung bei

LKW-Aufbauten
Wohnwagen-Außenwänden
Tankerisolierungen
Containerisolierungen
Fassadenverkleidungen

wenn bestimmte Isolierungseffekte erzielt werden sollen. Aluminium, das nicht oberflächenvorbehandelt wurde, kommt wegen der geforderten Langzeitbeständigkeit der Sandwich-Konstruktionen nicht zum Einsatz. Da der Sandwich-Hersteller aber keine effektive

Oberflächenvorbehandlung durchführen kann, erhält er entsprechend vorbehandeltes Aluminium oder Aluminiumlegierungen. Anodisierte oder mit Phosphorsäure vorbehandelte Aluminiumoberflächen sind mit Polyurethanklebstoffen am schwierigsten zu verkleben. Dagegen sind geprimerte oder sulfatierte, lackierte oder beschichtete Aluminiumoberflächen für die Verklebung mit Polyurethan-Klebstoffen bestens geeignet.

Für die geforderte Langzeitbeständigkeit ist aber der Einsatz eines Primers dringend zu empfehlen. Hinsichtlich der Materialien zum Aufbau der Sandwiches liegen gute Ergebnisse mit den vielfältigsten Materialien wie Holz, PUR-Schaum, PVC oder Steinwolle vor.

Für den Verarbeiter ist es wichtig zu wissen, daß z. B. alle Macroplast-PUR-Klebstoffe im Prinzip geeignet sind, und daß er die Auswahl des Klebstoffes entsprechend seiner Fertigungsbedingungen (Viskosität, offene Zeit, Potlife, 1K- oder 2K-Systeme) treffen kann. Als ein Beispiel kann die Herstellung von Gefriercontainern für den Schiffs- und Landverkehr betrachtet werden. Die Seitenwände dieser Container bestehen aus einem Sandwich aus Aluminium/Polyurethanschaumstoff. Die Bleche bestehen aus millimeterdicker 5052-Legierung von sehr großem Format: 2,6 x 12,5 Meter, um Übergänge auf den großen Flächen zu vermeiden. Sie werden mit bereits vorlackierter Außenseite geliefert sowie einer Grundierung auf der mit Schaumstoff beklebten Seite. Die Grundierung hat den Vorteil, eine gleichbleibende Qualität der zu klebenden Oberflächen zu garantieren.

Diese Wände werden auf der Innenseite durch, als „Omega“ gestaltete, Aluminiumprofile verstärkt, welche auch auf die aus 5052 bestehenden Bleche geklebt

sind. Die Herstellung dieser Wände durch Kleben – auf sehr großflächige Bleche aus 5052 – erübrigt das Vernieten, dessen Arbeitsgang viel länger dauert. Außerdem hat das Nieten zwei Nachteile: Es verursacht thermische Brücken zwischen den Innen- und Außenwandungen des Containers und kann eine Infiltration von Feuchtigkeit durch die Nietlöcher zur Folge haben. Durch das Kleben werden die Leistungen der Gefriercontainer erheblich verbessert.

Zweikomponentige Polyurethan-Klebstoffe, die für derartige Anwendungen geeignet sind, sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

Charakteristik:

Lösungsmittelfreie Systeme aus Harz und Härter, die im Mischungsverhältnis 5:1 angewandt werden und je nach Anwendung zwischen wenigen Minuten oder Stunden härten.

Mischungsviskosität: $\sim 5.000 \text{ mPas}$

Zugscherfestigkeit: $\sim 15 \text{ N/mm}^2$
(EN 1465)

Aushärtecharakteristik

Zeit	1 Tag	3 Tage	7 Tage
Zugscherfestigkeit (MPa)	4	10	14

Temperaturbeständigkeit

Temperatur	-40°C	0°C	20°C	60°C	80°C
Zugscherfestigkeit (MPa)	23	20	14	3	2

7.5 Herstellung von Isoliermaterialien

Eine spezielle Art der Sandwich-Konstruktion sind die verschiedensten Isoliermaterialien. Diese aus Schäumen, wie z. B. Polystyrolschaum und Aluminium als Außenschicht hergestellten Verbunde haben größte technische Bedeutung. Für die verschiedensten Isoliermaterialien wird beispielsweise mehr Aluminium verwendet, als in der gesamten Flugzeugbranche. Isoliermaterialien gegen Wärme-/Kälteverluste haben daher große wirtschaftliche Bedeutung. Derartige Verbunde können durch Ausschäumen starrer Aluminiumteile oder durch Verklebung vorgefertigter Schaum-/Isoliermaterialien mit vorbehandelten Aluminiumblechen oder -folien und

anderen Materialien hergestellt werden. Im ersten Fall ist die Verbundhaftung zwischen dem Schaum und dem Aluminiumwerkstoff für konstruktive Anwendungen oft nicht geeignet. Die besten Haftungsergebnisse erhält man daher, wenn man die Schaummaterialien gegen Aluminium, z. B. mit speziellen Kontaktklebstoffen oder besser Polyurethan-Klebstoffen, verklebt. Diese Methode ist hinsichtlich des Einsatzes der verschiedensten Deckmaterialien äußerst flexibel. Aber auch hier gilt die Regel, daß gute Alterungsbeständigkeit, insbesondere gegen Feuchtigkeit, nur mit vorbehandeltem oder lackiertem Aluminium erzielbar ist.

7.6 Kleinflächige Aluminium-Konstruktionen

Generell kann gesagt werden, daß Epoxide bei konstruktiven Verklebungen die Klebstoffe der Wahl sind, daß aber in speziellen Fällen auch alternative Systeme angewandt werden, insbesondere dann, wenn eine schnelle Anfangsfestigkeit erzielt werden soll. Hier sind dann die Cyanacrylate oder die A/B Acrylate die Produkte der Wahl, da sie schnell austüren. Die Alterungsbeständigkeit der Verklebung hängt dann in entscheidendem Maße von der Aluminium-Oberflächen-Beschaffenheit ab.

In den verschiedensten Bereichen, wie Fensterherstellung, Elektrotechnik, Haushaltsgeräteherstellung werden oft Bauteile aus Aluminium eingesetzt, die z. B. mit anderen Werkstoffen verklebt oder mit Elastomeren abgedichtet werden müssen. In diesen Fällen werden bevorzugt Cyanacrylat-Klebstoffe eingesetzt, da diese einfach und schnell die „Hilfsverklebungen“ ermöglichen und gute Haftung zu Kunststoffen oder Elastomeren aufweisen. Die Sicomet-Typen 85 und 7000 haben sich hier bestens bewährt. Auch für andere Verklebungen verschiedenster Bauteile aus Aluminium können diese Klebstoffe verwendet werden, vorausgesetzt die Bauteile sind kleinflächig. Bei größerflächigen Bauteilen härteten die Cyanacrylate schon während der Applikation aus.

In der Elektrotechnik kommen auch Verklebungen aus Aluminiumdruckguß vor. In diesem Fall eignen sich wegen der kurzen Taktzeiten bestimmte Acrylat-Klebstoffe, wie Omnifit A/B 2488 Systeme.

Acrylat A/B Systeme werden auch erfolgreich im Fensterbau und bei der Türenfertigung zur Verklebung der Eckverbindungen der Aluminiumprofile eingesetzt, sowie im Aufzugbau beim Einbau der Aluminiumverkleidungen.

Für die Verklebungen im Behälter- oder Gehäusebau aus Aluminium werden überwiegend 2K-Epoxide eingesetzt.

Die Verbindung von Aluminiumprofilen mit Kunststoff-Isolierleisten, die wegen ihrer wesentlich günstigeren Wärmedämmung für den Bau von Fenstern und Türen Verwendung finden, wird ebenfalls mit Acrylatklebstoffen durchgeführt. In diesem Fall werden bis zu 6 m lange Aluminiumprofile unter einer Klebstoffauftragsvorrichtung hindurchgeführt und anschließend mit den Isolierstegen verbunden. Bereits nach kurzer Zeit sind die Teile transportfähig und können weiterverarbeitet werden, dank der schnell härtenden Acrylate.

Bei der Produktion von Polyurethan-Fensterrahmen werden Aluminiumprofile mit Polyurethan umschäumt. Zur Verbindung dieser Profile mit Eckwinkeln und zum Abdichten der Gehrungsschnittflächen sind ebenfalls schnell härtende reaktive Acrylatsysteme im Einsatz.

Weitere Beispiele für Aluminiumverklebungen sind die Herstellung von Rohrverklebungen für Markisen, Möbel und Straßenlaternen.

Zweikomponentige Acrylate (auch als A/B-System gekennzeichnet) sind für viele dieser Anwendungen geeignet.

Charakteristik:

Zweikomponentige Acrylat A/B-Systeme auf Basis von Polyurethanmethacrylat sind wesentlich geruchsärmer als analoge Systeme auf Basis von Acrylaten. Die Systeme sind je nach Anwendungsfall gezielt einstellbar hinsichtlich Viskosität und Aushärtegeschwindigkeit. Sie sind sowohl per Static-Mixer, als auch Raupe auf Raupe per Hand applizierbar. Das Mischungsverhältnis ist 1:1, geringfügiges Über- oder Unterdosieren hat keinen gravierenden Einfluß auf die Klebeigenschaften.

schaften. Entscheidender ist die Temperatur in Bezug auf die Topfzeit. Sie beträgt für das schnellste System bei 15°C 30–40 sec. und bei 20°C 25–35 sec.

Zugscherfestigkeit auf gesandstrahlttem Al (DIN 53283): 25 MPa
Zugscherfestigkeit nach Wechselklima-Lagerung; 10 Cyclen; 12 h / – 20°C / 12 h / + 100°C: 25 MPa

Einkomponentige Cyanacrylate, die für die vielfältigsten Anwendungen geeignet sind, sind durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet.

Charakteristik:

Cyanacrylate auf Basis des Methylester haben eine ausreichende Haftung zum Aluminium. Sie sind schnell aushärtende, lösungsmittelfreie Reaktiv-Klebstoffe, die innerhalb von Sekunden härten.

Anfangsfestigkeit:
EPDM-Elastomere (vernetztes Ethylen-Propylen-Elastomere) 3–4 sec.
Al (gebeizt) 30–60 sec.
Zugscherfestigkeit auf Al (gebeizt) nach DIN 53283: 25 MPa

Cyanacrylat-Klebstoffe zeigen ihr breites Anwendungsspektrum bei der Kombinationsverklebung verschiedenster Materialien (Elastomere, Gummi, Kunststoffe) mit Metallen (Aluminium, Stahl), da sie auf fast allen Materialien aushärten und haften.

7.7 Folienkaschierungen

Verbundfolien, hergestellt durch Kaschieren von unterschiedlichen Folien, sind für die Lebensmittelverpackung unverzichtbar. Sie garantieren mechanischen und thermischen Schutz des Lebensmittels und gewährleisten, daß keine Inhalts-

stoffe durch Migration verloren gehen. Verbundfolien mit äußersten Barriereeigenschaften werden aus Aluminium-Folien mit siegelbaren Kunststoff-Folien hergestellt.

Für die Kaschierung der Aluminium-Folie mit den entsprechenden Kunststoff-Folien kommen neben lösungsmittelhaltigen Polyurethanklebstoffen wie z. B. Liofol UK 3640/UK 6800 zunehmend wässrige 2K-Polyurethanklebstoffe oder lösungsmittelfreie 2K-Polyurethanklebstoffe zur Anwendung. Eine Vorbehandlung des Aluminiums ist in diesem Fall nicht erforderlich. Gearbeitet wird von Rolle zu Rolle, wobei der Klebstoff über Walzen appliziert wird.

Neben der Kaschierung von aluminiumhaltigen Verbunden für die Lebensmittel-Verpackung gibt es auch zahlreiche technische Lamine, die unter Einsatz von Aluminium hergestellt und verwendet werden. Zur Isolierung von elektrischen Kabeln werden Verbunde aus Aluminium/Polyester oder Aluminium/Polypropylen eingesetzt, die mit Hilfe von lösungsmittelhaltigen Polyurethanklebstoffen wie Liofol UK 2626/UK 5000 hergestellt werden.

Für Flächenisolierungen werden ebenfalls Aluminium/Polyester-Verbunde, gegebenenfalls mit Heizschaltelementen, eingesetzt, die mit Liofol UK 2255/UR 5008 hergestellt werden. Auch für gedruckte Schaltungen kommen spezielle Aluminium/Polyester-Verbunde (mit Liofol UR 3649/UR 6255) zur Anwendung. Einfache Papier/Alu-Verbunde zur Wärmeisolierung werden mit Liofol A 8064 durch Naßkaschierung hergestellt.

Die **Polyurethan-Klebstoffe**, die für diese Folienkaschierungen eingesetzt werden, können je nach vorhandener Kaschiermaschine lösungsmittelhaltig, wässrig

oder lösungsmittelfrei sein. In allen Fällen ist das Polyurethan aus lebensmittelrechtlich zugelassenen Rohstoffen aufgebaut. Die lösungsmittelhaltigen zweikomponentigen Systeme werden vor der Anwendung gemischt. Der eigentliche Folienverbund wird mit Geschwindigkeiten von bis zu 300 m/min. unter Einsatz der Polyurethan-Klebstoffe hergestellt.

Anhang

Beispiele zur Oberflächenbehandlung von Aluminium

– Picklingbeize (CSA)

Entfetten und Beizen in einem Chromschwefelsäurebad folgender Zusammensetzung:

Ansatz für etwa 0,8 l:

652 ml H₂O

75 g Na₂Cr₂O₇ (Natriumdichromat)

150 ml H₂SO₄ (Schwefelsäure,

Dichte 1,82)

Beim Ansetzen der Lösung ist die Säure vorsichtig in das Wasser zu geben!

Einbeizen:

Zusetzen von 0,5 g/l Aluminium

+ 1,5 g/l Kupfersulfat

Beizen:

Temperatur: 60°C

Zeit: 30 min.

Verdampftes Wasser ist regelmäßig zu ersetzen.

Beseitigung:

Sondermüll (Chromatabfälle), kennzeichnungspflichtige Behälter!

Besondere Gefahren:

Siehe Schwefelsäure/Natriumdichromat; kann Krebs erzeugen.

– FPL-Beizen

Ansatz für 1 l:

500 ml destilliertes Wasser

+ 50 g Na₂Cr₂O₇ x 2H₂O

+ vorsichtig 300 g H₂SO₄ (konz.) mit dest. H₂O auf 1 l auffüllen

Einbeizen:

1,5 g AlCuMg 2pl/1 l Beize auflösen

Beizen:

Temperatur: + 65°C

Zeit: 10 min.

Verdampftes Wasser ist regelmäßig zu ersetzen!

Beseitigung und besondere Gefahren siehe Picklingbeize.

– Chromsäure-Anodisieren (CAA)

Ansatz für etwa 1 l:

40 g Chrom(VI)-oxid (CrO₃)

+ 1 l dest. H₂O

Katode: Edelstahl (V2A)

Temperatur: 40°C (+/- 2°C)

Zeit:

von 0 bis 40 V in 10 min.

40 V 20 min.

von 40 bis 50 V in 5 min.

50 V 5 min.

Verdampftes Wasser ist regelmäßig zu ersetzen.

Beseitigung:

Sondermüll (Chromatabfälle), kennzeichnungspflichtiger Behälter.

Besondere Gefahren:

Chrom(VI)-oxid erzeugt Krebs! – Siehe Extrablatt Chromate!

Schutzmaßnahmen:

Siehe Säuren und Laugen. Beim Anodisieren unbedingt Atemschutzmaske tragen! Nicht mit Stahl oder Eisen in Berührung kommen lassen (Ausnahme Edelstahl V2A).

– Phosphorsäure-Anodisieren (PAA)

Ansatz für etwa 1 l:

129 g 85%ige H_3PO_4 pro 1 l

Katode:
Edelstahl (V2A)

Temperatur:
RT

Zeit:
22 min. bei 15 V

Achtung:
Nach dem Anodisieren schließt sich ein Spülen in destilliertem H_2O bei + 40°C (10 min.) an!

Beseitigung:
Wenn der Cu-Gehalt nicht zu hoch ist, können kleinere Mengen nach der Neutralisation direkt entsorgt werden. Andernfalls ist die Phosphorsäure als Sondermüll zu behandeln. Enthält Phosphat.

8. Literaturverzeichnis

1. Matting, A.:
Metallkleben
Springer-Verlag, Berlin 1969
2. Brockmann, W.:
Grundlagen und Stand der Metallklebetechnik
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1971
3. Schliekelmann, R. J.:
Metallkleben – Konstruktion und Fertigung in der Praxis
Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf 1972
4. Adams R. D. and W. C. Wake:
Structural Adhesive Joints in Engineering
Elsevier Applied Science Publishers 1984
5. Kinloch, A. J.:
Adhesion and Adhesives – Science and Technology
Chapman and Hall, London, New York 1987
6. Habicht, G.:
Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen
Springer-Verlag, Berlin 1990
7. Skeist, I.:
Handbook of Adhesives
Chapman and Hall 1990
8. Hennemann, O., Brockmann, W. und Kollek:
Fertigungstechnologie Kleben
Hansa-Verlag 1992
9. Dean Minford, J.:
Handbook of Aluminium Bonding Technology and Data
Marcel Dekker inc. 1993
10. Gruber, W.:
Reaktionsklebstoffe
Nachrichten aus Chemie und Technik 43 (1995) 1287-1291
11. Kotting, G., Koran, P., Saller, R.:
Strahlen oder Schleifen plus Beschichten
Adhäsion 1994 Nr. 12 S. 26–30
12. Brandes, B.:
Metalle kleben in der Kfz-Werkstatt
Adhäsion 1996 Nr. 5 S. 12–17

Ihr Partner für's Kleben



Industrieklebstoffe für:

Kaschierungen
Etiketten
Zigaretten
Verpackungen
Bücher
Hygieneartikel
Holz- und Möbelverarbeitung
Kabelverbindungstechniken
Gummi-Metall-Verbindungen
Schuhe
Anlagen- und Fahrzeugbau
Isolierglasscheiben
Elektro- und Elektronikanwendungen
Tapeten
u. v. a.

Henkel KGaA · A1-Industrieklebstoffe · D-40191 Düsseldorf
Tel.: 0211/797-0 · Fax 0211/7982358





Technische Merkblätter

- A 1 Aluminium-Dachdeckung und -Wandbekleidung
- A 2 Aluminium-Dachdeckung – Doppelfalz- und Leistendach
- A 5 Reinigen von Aluminium im Bauwesen / A 5 Cleaning of Aluminium in the Building Industry
- A 6 Folien und dünne Bänder aus Aluminium als Funktionsträger für Dämmelemente und Dichtungsbahnen im Bauwesen
- A 7 Richtlinie für die Verlegung von Aluminium-Profiltafeln
- A 8 Aluminium-Wellprofile
- A 9 Verbindungen von Profiltafeln und dünnwandigen Bauteilen aus Aluminium
- A 11 Bemessung von Aluminium-Trapezprofilen und ihren Verbindungen. Berechnungsbeispiele

- B 1 Biegen von Aluminium-Halbzeug in der handwerklichen Praxis
- B 2 Spanen von Aluminium

- E 1 Aluminium in der Elektrotechnik und Elektronik

- K 5 Einfache Spannungs nachweise

- O 2 Chemische Oxidation, Chromatieren, Phosphatieren von Aluminium
- O 3 Beschichten von Aluminium
- O 4 Anodisch oxidiertes Aluminium
- O 5 Schleifen und Polieren von Aluminium
- O 6 Beizen und Entfetten von Aluminium
- O 8 Galvanische und chemische Überzüge

- V 1 Gasschmelzschweißen von Aluminium
- V 2 Lichtbogenschweißen von Aluminium
- V 4 Löten von Aluminium
- V 5 Nieten von Aluminium
- V 6 Kleben von Aluminium

- W 1 Der Werkstoff Aluminium / W 1 The Metal Aluminium
- W 2 Aluminium-Knetwerkstoffe
- W 3 Formguss von Aluminium-Werkstoffen
- W 7 Wärmebehandlung von Aluminiumlegierungen
- W17 Aluminiumschäume »Herstellung, Anwendung, Recycling«
- W18 Aluminium in der Verpackung »Herstellung, Anwendung, Recycling« / W 18 Aluminium in the Packaging Industry »Manufacture , Use, Recycling«

Einweisung: Weitere Literatur rund um das Thema Aluminium finden Sie auf unserer Homepage unter www.aluinfo.de in der Rubrik „Shop“.