

Betriebsfestigkeitsversuche an Stahlklebeverbindungen

Von Ernst Witte und George Petit,
Braunschweig-Völkenrode *)

DK 620.1:620.17:621.792.3

Nach der Betriebsfestigkeit bemessene Metallklebeverbindungen entsprechen in hohem Maße den Erfordernissen des Leichtbaues.

Die bisherigen Untersuchungen beschränkten sich mehr oder weniger auf die vornehmlich im Flugzeugbau zur Anwendung gelangenden Leichtmetallverklebungen. Aus diesem Grund wurden im Institut für landtechnische Grundlagenforschung der FAL, Braunschweig-Völkenrode umfangreiche Versuche an für den Landmaschinenbau interessanteren Stahlklebeverbindungen durchgeführt.

1. Einleitung

Die Zuverlässigkeit landtechnischer Maschinen, Apparate und Geräte ist wegen der zum Teil extrem kurzen und zeitlich gebundenen Einsatzmöglichkeit von hoher Bedeutung und trägt zur qualitativen Verbesserung der landwirtschaftlichen Produktionsmittel bei. Sie wird weitgehend durch die Sicherheit schwingbeanspruchter Konstruktionen gegenüber Ermüdungsbrüchen bedingt. Diese Sicherheit ist gewährleistet, wenn die höchsten im Betrieb zu erwartenden Beanspruchungen unterhalb einer dauernd ertragbaren Festigkeitsgrenze, der sogenannten Dauerschwingfestigkeit bleiben. Für die Mehrzahl schwingbeanspruchter Konstruktionen ist eine derartige Bemessung jedoch unbefriedigend. Wirtschaftlichkeitsüberlegungen und vor allem die extremen Forderungen des Leichtbaues zwingen dazu, daß bei der Bemessung auch Beanspruchungen oberhalb der Dauerschwingfestigkeit zugelassen werden müssen. Das ist immer dann möglich, wenn die Betriebsbelastung neben der statischen Dauerlast aus regellosen aperiodischen Schwingkräften unterschiedlicher Amplitude besteht, so daß die Dauerschwingfestigkeit innerhalb der Gesamtbeanspruchung nur mehr oder weniger häufig überschritten

wird. Notwendigerweise besitzen die so bemessenen Konstruktionen nur eine begrenzte Lebensdauer. Aus diesem Grund ist zur Sicherung der geforderten Lebensdauer die Kenntnis des Festigkeitsverhaltens von Werkstoffen, Verbindungsmitteln und Bauteilen unter Betriebsbelastung unerlässlich. Es wurden zahlreiche Verfahren zur Vorhersage der Lebensdauer bei statistischer Schwingbeanspruchung auf Grund von Wöhlerkurven entwickelt [1]. Am bekanntesten und in ihrer Anwendung am einfachsten ist die lineare Schadensakkumulationshypothese [2, 3]. Die Gültigkeit der Schadenshypothesen ist jedoch umstritten [4], sie können bei Vorlage von Wöhlerkurven nicht mehr als rohe Schätzwerte für die Lebensdauer liefern. Als gute Annäherung der Versuchsbedingungen an die wirklich auftretende Beanspruchung hat sich der Betriebsfestigkeitsversuch erwiesen [5, 6].

Ein für den neuzeitlichen Leichtbau unentbehrlich gewordenes Verbindungsmittel stellt das Metallkleben dar [7 bis 13]. Es ist im Laufe seiner Entwicklung, die noch keineswegs abgeschlossen ist, wenn auch schon die Grenzen klar erkennbar sind, zu einem vollwertigen Fügeverfahren herangereift. Gegenüber den anderen nicht lösbaren Verbindungsmitteln, Nieten, Schweißen und Löten besitzt das Metallkleben eine Reihe von Vorteilen wie z.B.:

- Gleichmäßigere Spannungsverhältnisse
- Möglichkeit zur Verbindung von Bauteilen unterschiedlicher Werkstoffe
- Keine Beeinflussung des Fügepartikels durch Wärme bei der Herstellung der Verbindung
- Dichtigkeit der Verbindung gegen Durchtritt von Flüssigkeiten und Gasen
- Hohe Eigendämpfung.

Den Vorteilen stehen aber auch Nachteile gegenüber, die nicht unerwähnt bleiben dürfen, wie z.B.:

- Notwendigkeit der sorgfältigen Reinigung der Fügeflächen
- Möglichkeit von Festigkeitseinbußen durch Alterungseinflüsse
- Geringe thermische Beständigkeit
- Zeitbedarf für den Aushärtungsprozeß, der sich in Großserienfertigungen nur schwierig unterbringen läßt.

Trotz dieser Nachteile wird das Fügeverfahren Metallkleben künftig immer mehr an Bedeutung gewinnen, insbesondere für Fachrichtungen die ohne Anwendung von Leichtbaugrundsätzen nicht mehr denkbar sind.

*) *Dipl.-Ing. E. Witte ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Ing. G. Petit Versuchsingenieur im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft*

Bedingt durch die vom Flugzeugbau ausgelöste Entwicklung, beschränken sich die bisherigen Erfahrungen und Kenntnisse über das Schwingfestigkeitsverhalten von Metallklebeverbindungen vor allem auf die für die Landtechnik weniger interessanten Leichtmetallklebeverbindungen [14 bis 27]. Eine Ergänzung der vorliegenden Ergebnisse durch Schwingfestigkeitsversuche an Stahlklebeverbindungen erscheint deshalb wünschenswert.

2. Versuchsprogramm

Folgende Zielsetzungen waren für die Gestaltung des Versuchsprogrammes bestimmend:

- Allgemeine Erkenntnisse zum Schwingfestigkeitsverhalten von Stahlklebeverbindungen
- Feststellung der Eignung verschiedener Kleber für schwingbeanspruchte Verbindungen
- Experimentelle Ermittlung des Einflusses der Form des Belastungskollektives auf die Betriebsfestigkeit
- Klärung der Auswirkungen verschiedener Spannungszustände, die sich aus Probenform und Beanspruchungsart ergeben.

Die Wahl der Probenform erfolgte unter dem Gesichtspunkt, daß die vorgesehenen Schwingfestigkeitsversuche sowohl allgemeine Aussagen als auch Rückschlüsse auf praktische Verhältnisse erlauben sollten. Aus diesem Grund wurden neben Doppellaschenverbindungen auch Rohrverbindungen untersucht. Für das vielseitig einsetzbare Konstruktionselement Rohr ist vor allem bei dynamischer Beanspruchung ein kerbarmes Fügeverfahren von entscheidender Bedeutung.

An den Rohrverbindungen können auch Versuche mit Wechselast durchgeführt werden, die sich bei den Doppellaschenverbindungen wegen der Gefahr des Ausknickens verbieten.

Eine übersichtliche Zusammenstellung der durchgeführten Versuche zeigt **Tafel 1**.

Für die Bemessung der Probekörper waren die nachstehend aufgeführten Kriterien ausschlaggebend. Die Probekörper sollten eine für die praktische Anwendung brauchbare Größe besitzen. Dabei sollte die maximale Prüfkraft der zum Einsatz gelangenden Prüfmaschine möglichst ausgenutzt werden, da Meßwertfehler und Regelabweichung der Maschine in der Nähe der maximalen Prüfkraft relativ am geringsten sind und sich mit kleiner werdenden Kräften vergrößern. Zur Vermeidung von Fügeiteilbrüchen mußte die Schwingfestigkeit der Fügeiteile mit Sicherheit größer sein als die der Klebeverbindung. Aber auch die Streckgrenze durfte nicht überschritten werden, weil ein Fließen der Fügeiteile eine vorzeitige Zerstörung der Klebeverbindung zur Folge hätte [20]. In diesem Fall wäre ebenso wie bei Fügeiteilbrüchen keine Aussage über das Schwingfestigkeitsverhalten der Klebschicht möglich.

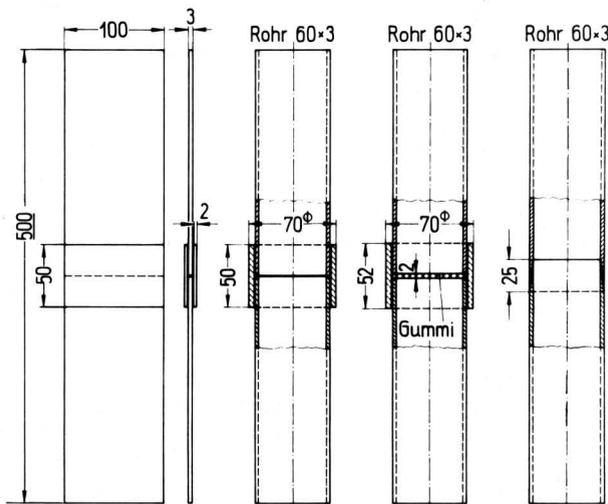


Bild 1. Form und Abmessungen der Probekörper.

Probenform		Rohr- muffe	Rohr- schäftung	Doppellasche		
				Kleber	Metallon K	Metallon E 2602
Beanspruchung	statisch					
	Wöhler	schwellend				
		wechselnd				
	Normalverteilt	schwellend				
	log. Normalverteilt	schwellend				

Tafel 1. Versuchsprogramm

3. Versuchstechnik

3.1 Art der Probekörper

3.1.1 Form und Abmessungen

Als Probenform wurde eine Doppellaschenverbindung (Form 1), eine Rohrverbindung mit Außenmuffe (Form 2 a) und eine geschäftete Rohrverbindung (Form 3) gewählt, deren Abmessungen **Bild 1** zu entnehmen sind. Für die Versuche mit Wechselast wurde die Muffenverbindung etwas abgewandelt (Form 2 b). Eine Gummilage zwischen dem Rohrstoß sollte eine Kontaktwirkung verhindern und sicherstellen, daß auch die Druckkräfte ausschließlich in den dafür vorgesehenen Klebfugen übertragen wurden.

3.1.2 Werkstoff der Fügeiteile

Dem aus vorgenannten Gründen unerwünschten Fließen der Fügeiteile kann durch Wahl eines Werkstoffes mit hoher Streckgrenze begegnet werden.

Deshalb wurde als Fügeiteilwerkstoff für die Doppellaschenverbindung ein kaltgewalztes Karosserieblech nach DIN 1623 aus St 13-03 verwandt, dessen Streckgrenze $\sigma_S \approx 250 \text{ N/mm}^2$ und dessen Bruchfestigkeit $\sigma_B \approx 350 \text{ N/mm}^2$ beträgt.

Für die Rohrverbindungen wurde kaltgezogenes, nahtloses Stahlrohr nach DIN 2391 aus St 35-29 mit einer Streckgrenze $\sigma_S \approx 550$ N/mm² und einer Bruchfestigkeit $\sigma_B \approx 580$ N/mm² gewählt.

3.1.3 Kleber

Die zur Anwendung gelangenden Kleber wurden aus der Vielzahl von bekannten Metallklebstoffen nach folgenden Gesichtspunkten gewählt. Zum einen sollten sie für die Verklebung von Stahl besonders geeignet sein und zum anderen den Bedingungen des praktischen Einsatzes im Landmaschinenbau bestmöglichst genügen.

Vornehmlich wurde das Kunstharz Araldit AV 129 mit dem Härter HY 956 verwandt, ein einfach zu verarbeitender, pastenförmiger, kalthärtender Konstruktionskleber auf Epoxidharzbasis.

Zum Vergleich wurden bei den Doppellaschenverbindungen außerdem noch die Epoxidharze Metallon K und Metallon E 2602, sowie das modifizierte Polyesterharz Agomet U 3 verwendet. Diese Kleber sind ebenfalls pastenförmig, kalthärtend und aus Harz und Härter zusammengesetzt.

3.2 Herstellung der Probekörper

3.2.1 Vorbehandlung der Klebflächen

Eine Klebverbindung wird durch Füge teil, Grenzschicht und Klebschicht gebildet. Während Füge teil und Klebschicht sich im wesentlichen durch die physikalischen Eigenschaften der Einzelstoffe kennzeichnen lassen, stellt sich die Grenzschicht als ein komplexes System physikalischer, chemischer und technologischer Faktoren dar.

Die Adhäsionsverhältnisse, und damit auch die Güte einer Klebung, werden durch die Oberflächenbehandlung der Füge teile vor dem Kleben entscheidend beeinflusst. Daher ist diesem Fertigungsverfahren besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Als eine geeignete Oberflächenbehandlung wird für Stahl ein gründliches Säubern und Entfetten und ein zusätzliches schwaches mechanisches Aufrauhen der Oberflächen durch Schmirgeln, Bürsten oder Sandstrahlen empfohlen [9, 11].

Im vorliegenden Fall wurden die zu verklebenden Flächen der Füge teile nach dem Entfetten mit Tetrachlorkohlenstoff von Hand mit Schmirgelleinen Korngröße 100 leicht aufgeraut. Es folgte ein nochmaliges Entfetten mit sauberem Tetrachlorkohlenstoff. Danach wurden die Füge teile in warmer Tritallösung gebürstet, mit warmem fließendem Wasser abgespült und mit warmer Luft getrocknet.

3.2.2 Kleben und Lagern

Um eine Beeinflussung der Festigkeit der Klebeverbindungen durch Klimaschwankungen auszuschließen, wurden die Probekörper in einem klimatisierten Raum bei 20°C und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit verklebt und bis zur Versuchsdurchführung gelagert.

Nachdem die Füge teile die Raumtemperatur angenommen hatten, wurde der Kleber mit einem Spachtel auf die Klebeflächen aufgetragen. Danach wurden die Füge teile in besonderen Vorrichtungen zusammengelegt und genau positioniert. Bei der Doppellaschenverbindung wurde von der Vorrichtung zusätzlich mittels einer Feder ein geringer Anpreßdruck von 0,05 N/mm² ausgeübt.

Die Klebfugendicke betrug bei den Doppellaschenverbindungen rund 0,05 mm. Die Muffen der Rohrverbindungen wurden mit einem Übermaß von 0,2 mm fein gedreht, womit sich eine Klebfugendicke von 0,1 mm ergab. Die geschäfteten Rohrverbindungen wurden vor dem Einlegen in die Vorrichtung von Hand mit einer leichten Drehung zusammengedrückt, die sich dabei ergebende Fugendicke betrug gleichfalls rund 0,1 mm.

Obgleich für die verwendeten Kleber schon nach einer Aushärtezeit von einigen Tagen keine merkliche Steigerung der Festigkeit mehr zu erwarten war, lagerten die Probekörper bis zur Versuchsdurchführung mindestens vierzehn Tage.

Die vorstehend beschriebenen Bedingungen für die Herstellung der Probekörper wurden sorgfältig eingehalten um die Streuung der Versuchsergebnisse möglichst klein zu halten.

3.3 Versuchsdurchführung

3.3.1 Prüfmaschine

Für die Versuche stand ein 200 MN-Schenk-Universal-Pulser in Tischausführung [28] zur Verfügung. Die Prüfmaschine ist mit einem Schnellantrieb ausgerüstet, der die Prüfkraft nach dem Resonanzprinzip erzeugt. Weiterhin besitzt sie einen hydraulisch arbeitenden Langsamantrieb zur Erzeugung einzelner seltener auftretender hoher Belastungen und einen lochstreifengesteuerten Programmautomaten zur selbsttätigen Durchführung von Blockprogrammversuchen. Die Prüffrequenzen ergeben sich im Schnellantrieb aus der Probensteifigkeit. Sie können je nach den gegebenen Verhältnissen 600 bis 4000 Lastwechsel pro Minute betragen, eine Veränderung ist nur im geringen Maße durch Aufsetzen von Zusatzmassen möglich. Im vorliegenden Fall ergaben sich je nach Beanspruchungshöhe und Probenform Prüffrequenzen von 2200:3200 LW/min. Im Langsamantrieb können 3 bis 40 Lastwechsel pro Minute ausgeführt werden.

Bild 2 zeigt eine in die Prüfmaschine eingespannte Doppellaschenverbindung und **Bild 3** eine Rohrmuffenverbindung.

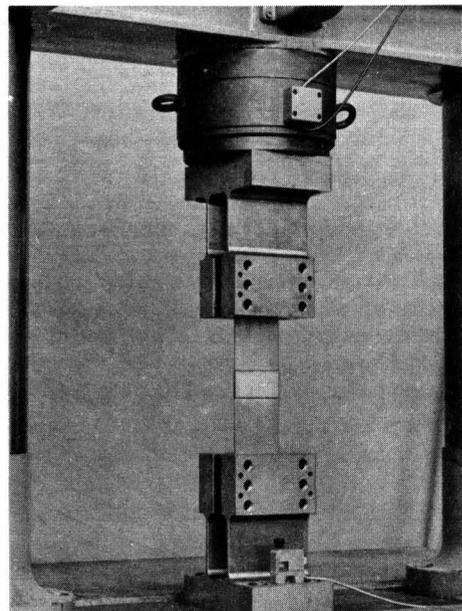


Bild 2. In die Prüfmaschine eingespannte Doppellaschenverbindung.

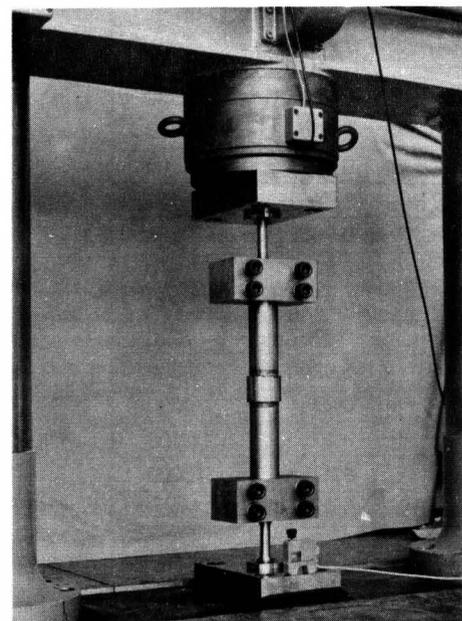


Bild 3. In die Prüfmaschine eingespannte Rohrmuffenverbindung.

3.3.2 Beanspruchungskollektive und deren Wiedergabe im Versuch

Als Grundlage für die Betriebsfestigkeitsversuche dienen Beanspruchungskollektive. Aus der fast unbegrenzten Vielfalt von Beanspruchungskollektiven zeichnen sich, mehr oder weniger idealisiert, einige typische und häufig vorkommende Kollektivformen ab, die im folgenden zur Anwendung gelangen sollen, Bild 4.

Die gleichbleibenden Schwingungsamplituden des Wöhlerversuches können durch ein Beanspruchungskollektiv mit rechteckiger Begrenzung dargestellt werden, die sich als die obere Grenzkurve aller möglichen Kollektivformen erweist. Der Wöhlerversuch läßt sich somit als Sonderfall des Betriebsfestigkeitsversuches auffassen.

Die als "normalverteilt" bezeichnete Kollektivform entspricht in etwa der Häufigkeitsverteilung einer streng regellosen, also rein zufallsbestimmten, stationären Schwingbeanspruchung. Sie wird beispielsweise bei Fahrzeugbauteilen erhalten, wenn man die Messung der Beanspruchung unter stationären Betriebsbedingungen, d.h. auf einer Fahrbahn mit einheitlicher Beschaffenheit bei gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit und Beladung durchführt.

Die durch "logarithmisch normalverteilt" gekennzeichnete Kollektivform kann man sich durch Überlagerung mehrerer normalverteilter Kollektive entstanden denken. Sie ergibt sich, wenn die Messung der Beanspruchung bei instationären Betriebsbedingungen geschieht. Im Falle eines Fahrzeugbauteiles, beispielsweise bei einer Meßfahrt auf unterschiedlich beschaffenen Fahrbahnen mit veränderlicher Geschwindigkeit und mit wechselnder Beladung.

Wegen seiner grundlegenden Bedeutung bietet sich das normalverteilte Beanspruchungskollektiv als Einheitskollektiv für alle Betriebsfestigkeitsversuche an, die von ihrer Aufgabenstellung her nicht an ein Sonderkollektiv gebunden sind [29]. Die Verwendung eines Einheitskollektives bietet Vorteile. Es fördert z.B. die Vergleichbarkeit der aus unterschiedlichen Gründen durchgeführten Betriebsfestigkeitsversuche. Weiterhin können bereits vor Inbetriebnahme eines Bauteiles ohne Kenntnis des tatsächlich auftretenden Beanspruchungskollektives Lebensdauerwerte geschätzt werden.

Außer durch die Form werden die Beanspruchungskollektive durch den Kollektivumfang, der sich aus der Summenhäufigkeit der Lastwechsel H ergibt, und die größte im Kollektiv auftretende Ober-spannung τ_o sowie die zugehörige Mittelspannung τ_m gekennzeichnet.

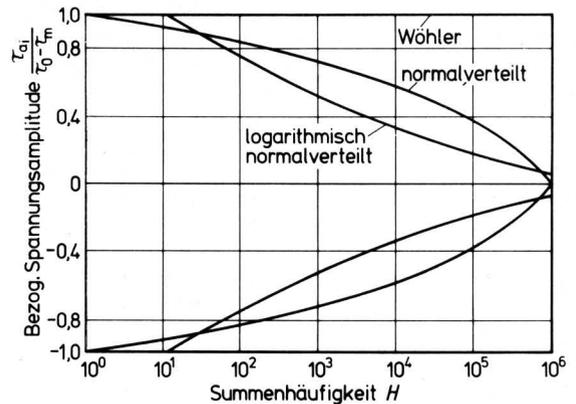


Bild 4. Formen der zur Anwendung gelangenden Beanspruchungskollektive.

Abgesehen von dem Fall der gleichbleibenden Spannungsamplituden des Wöhlerversuches werden die stetigen Amplitudenkollektive zur Wiedergabe im Betriebsfestigkeitsversuch durch eine Treppenkurve mit acht diskreten Stufen ersetzt [5, 29]. Die Spannungsamplituden τ_{ai} und die Häufigkeiten h_i in den einzelnen Stufen sind dabei so bestimmt, daß sie unter Berücksichtigung der versuchstechnischen Forderungen eine möglichst gute Näherung des stetigen Kollektives liefern.

Kollektiv: Normalverteilung			
Stufe i	bezogene Spannungsamplitude τ_{ai}/τ_a	Lastwechsel LW	Antriebsart
4a	0,725	680	langsam
3a	0,850	70	
2a	0,950	4	
1	1,000	1	
2b	0,950	4	
3b	0,850	70	
4b	0,725	680	
5b	0,575	7000	
6b	0,425	23000	schnell
7b	0,275	70000	
8	0,125	302500	
7a	0,275	70000	
6a	0,425	23000	
5a	0,575	5000	

Kollektiv: logarithmische Normalverteilung			
Stufe i	bezogene Spannungsamplitude τ_{ai}/τ_a	Lastwechsel LW	Antriebsart
5a	0,470	702	langsam
4a	0,610	147	
3a	0,740	35	
2a	0,870	10	
1	1,000	9	
2b	0,870	10	
3b	0,740	36	
4b	0,610	148	
5b	0,470	703	schnell
6b	0,340	5600	
7b	0,220	24200	
8	0,100	442500	
7a	0,220	24300	
6a	0,340	3600	

Tafel 2. Teilfolgen des Beanspruchungsablaufes beim Betriebsfestigkeitsversuch

Eine betriebsähnliche Durchmischung der verschiedenen hohen Spannungsamplituden wird durch eine periodische Aufeinanderfolge der acht Stufen in sogenannten Teilfolgen erreicht. Der Versuch beginnt in der ersten Teilfolge mit einer mittleren Stufe von der aus die Spannungsamplituden stufenweise bis zu ihrem Höchstwert ansteigen, dann bis in die kleinste Stufe abfallen und erneut ansteigen. Um den Versuchsablauf den Betriebsverhältnissen soweit wie möglich anzunähern, ist die Unterteilung des Gesamtkollektives in möglichst kleine, sich wiederholende Teilfolgen anzustreben. Der Aufteilung in gleiche Teilfolgen sind jedoch wegen der kleinen Zahl der im Gesamtkollektiv auftretenden größten Spannungsamplituden Grenzen gesetzt, wenn man nicht unterschiedliche Teilfolgen in Kauf nehmen will. Die Antriebsart der einzelnen Stufen wird durch die kleinste Lastwechselzahl bestimmt, die noch zuverlässig mit dem Schnellantrieb der zur Anwendung gelangenden Prüfmaschine eingeregelt werden kann. Unter Umständen empfiehlt es sich, die erste Schnellantriebsstufe einer Teilfolge über niedrigere Zwischenstufen einzuregeln. Im vorliegenden Fall werden in den ersten Schnellantriebsstufen jeweils 2000 Lastwechsel für den Anlauf des Schnellantriebes zugeschlagen. Der durch die Teilfolgen festgelegte Beanspruchungsablauf beim Betriebsfestigkeitsversuch ist für die verschiedene Verwendung findenden Beanspruchungskollektive **Tafel 2** zu entnehmen.

3.3.3 Versuchsauswertung und Darstellung der Ergebnisse

Unter Annahme von logarithmisch normalverteilten Bruchlastwechselzahlen hat sich für die statistische Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen das nachstehend angegebene Verfahren bewährt [6, 29]. Entsprechend ihrer Bruchlastwechselzahl wird jeder Probe eines Beanspruchungsniveaus eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{ij} = 100 (3m - 1) / (3n - 1) [\%]$ zugeordnet [30]. Darin bedeuten n die Gesamtzahl der Proben eines Beanspruchungsniveaus und m die Ordnungszahl der Probe, die sich aus den erreichten Bruchlastwechseln ergibt. Die Probe mit der größten Lebensdauer erhält die Ordnungszahl 1, diejenige mit der zweitgrößten die Ordnungszahl 2 usw. bis zur n -ten Probe. Mit Hilfe der linearen Regression wird dann eine analytische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Bruchlastwechselzahl und der Überlebenswahrscheinlichkeit gewonnen. Damit wird die Angabe von Schätzwerten für Bruchlastwechselzahlen zu vorgegebenen Überlebenswahrscheinlichkeiten ermöglicht.

Im vorliegenden Fall wurde die statistische Auswertung noch durch eine Wichtung der Meßwerte verfeinert [31]. Damit wird die zunehmende Unsicherheit der Meßwerte einer Stichprobe mit wachsender Entfernung vom Mittelwert berücksichtigt und die Überbetonung der Extremwerte verhindert.

Die zur Bestimmung der Bruchlastwechselzahl von Betriebsfestigkeitsversuchen notwendige Schätzung des Schädigungsanteiles der noch durchlaufenen Stufen der letzten Teilfolge erfolgte trotz bestehender Unzulänglichkeiten nach der modifizierten linearen Schadensakkumulationshypothese [32]. Dabei wird die zur Berechnung der akkumulierten Schädigung benutzte Wöhlerlinie zur Erfassung kleiner Spannungsamplituden durch eine fiktive Linie in den Bereich unterhalb der Dauerschwingfestigkeit fortgesetzt.

Die nach der vorstehend beschriebenen Methode für die verschiedenen Beanspruchungsniveaus ermittelten Lastwechselzahlen mit bestimmter Überlebenswahrscheinlichkeit werden in einem doppellogarithmischen Netz aufgetragen, dessen Achsenmerkmale die Bruchlastwechselzahl und die höchste vom Beanspruchungskollektiv erreichte Oberspannung sind. Die aufgetragenen Punkte werden durch die sogenannte Lebensdauerlinie, bzw. im Fall gleichbleibender Spannungsamplituden durch die Wöhlerlinie verbunden, die sich im praktisch interessierenden Zeitfestigkeitsbereich in der Regel durch eine Gerade annähern und analytisch durch die Potenzgleichung $LW = 10^6 (\tau_0 / \tau_O 10^6)^{-k}$ beschreiben läßt [5,6,29]. Damit ergeben sich als wichtige Kenngrößen zur Bewertung der Er-

gebnisse von Schwingfestigkeitsversuchen im Zeitfestigkeitsbereich: der Exponent k als Maß für die Neigung der Lebensdauer- bzw. Wöhlerlinien und die Bezugsspannung $\tau_0 10^6$ als ertragbare Beanspruchungshöhe für eine Bruchlastwechselzahl von 10^6 .

Die Versuchsauswertung bis hin zur graphischen Darstellung der Ergebnisse in Form von Lebensdauer- bzw. Wöhlerlinien wurde für den Einsatz einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage programmiert. *)

Durch die rechnerische Auswertung der Versuche wurde eine subjektive Beurteilung weitgehend ausgeschlossen.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Statische Versuche

Die durch zügige Belastung bis zum Bruch ermittelte statische Festigkeit der verschiedenen Klebverbindungen ist in **Tafel 3** angegeben. Dargestellt sind Mittelwerte aus mindestens drei Einzelversuchen, deren Streuung von unbedeutender Größe war. Zur Kennzeichnung der Bruchfestigkeit dient die sich als Quotient aus der Bruchlast und der Klebfläche ergebende mittlere Schubspannung τ_B in der Klebfuge. Der Anstieg der Bruchfestigkeit von der Doppellaschenverbindung über die Rohrmuffenverbindung zur Rohrschäftverbindung spiegelt die in den Klebfugen der verschiedenen Probeformen auftretenden Spannungsverhältnisse wieder. Obgleich mit den bisher entwickelten rechnerischen Verfahren die Spannungsverteilung in einer Klebfuge nur unzulänglich beschrieben wird, sollen die vorliegenden Ergebnisse [33, 34] zumindest zu einer qualitativen Beurteilung der verschiedenen Klebverbindungen herangezogen werden.

Die Klebfugen der Doppellaschenverbindung werden in erster Linie durch Schubspannungen beansprucht. Wegen der außerordentlichen Krafteinleitung in die Laschen treten außerdem noch schädigend wirkende Normalspannungen auf. Sowohl für die Schubspannungen wie auch für die Normalspannungen ergeben sich an den Überlappungsenden hohe Spannungsspitzen.

Eine ähnliche Spannungsverteilung ergibt sich für die Rohrverbindung mit Außenmuffe. Auf Grund des sich günstig auswirkenden Schaleneffektes der Rohrverbindung sind die Spannungsspitzen jedoch weniger ausgeprägt als bei ebenen Doppellaschenverbindungen, obgleich die Verbindung wegen der einseitig angeordneten Muffe zusätzlich durch ein Versatzmoment beansprucht wird.

Eine noch günstigere Spannungsverteilung zeigt die geschäftete Rohrverbindung. Obwohl die Klebfugen wegen der zur Kraft-

Probenform	Rohr- muffe	Rohr- schäftung	Doppellasche			
			Agomet U 3	Metallon K	Metallon E 2602	
Kleber	Araldith AV 129					
τ_B [N/mm ²]	20,7	23,4	15,9	13,9	12,3	10,9

Tafel 3. Statische Festigkeit von Stahlklebverbindungen

richtung geneigten Fügeflächen auch primär durch Normalkräfte beansprucht werden, überwiegt doch die günstige Beeinflussung des Spannungszustandes durch die zentrale Anordnung der Fuge und durch die nach den Überlappungsenden hin auslaufende Fuge-teildicke. Zusammen mit den schon bei der Rohrmuffenverbindung erwähnten Vorteilen ergibt sich eine Spannungsverteilung mit nur noch schwach ausgebildeten Spannungsspitzen an den Überlappungsenden.

Messungen [35] haben ergeben, daß die wirklich auftretenden Spannungsspitzen sehr viel kleiner sind, als sie sich nach den rechnerischen Verfahren ergeben. Ursache dafür ist, daß sich der Kleber bei einer Belastung nicht rein elastisch verhält, wie es in den Berechnungsverfahren angenommen wird, sondern daß ein plastischer

*) Für die Unterstützung bei der Programmierung sind die Verfasser Herrn H. Hake zu großem Dank verpflichtet.

Verformungsanteil hinzukommt, der den Spannungsabbau bewirkt. Dieses elastisch-plastische Verhalten ist wiederum lastabhängig und läßt sich daher rechnerisch nur schwer erfassen.

Die rechnerischen Verfahren zusammen mit den durchgeführten Messungen lassen erkennen, daß die Spannungsverteilung in der Klebfuge und damit die Festigkeit einer Klebverbindung in entscheidendem Maße von den geometrischen Verhältnissen, wie Dicke der Fügeteile, Klebschichtdicke, Länge der Überlappung usw., und den Verformungseigenschaften des Klebers bestimmt wird. Zusammen mit den schon eingangs erwähnten die Festigkeit beeinflussenden Faktoren ergibt sich eine so große Zahl von Abhängigkeiten, daß der Versuch, zu einem allgemeingültigen Bemessungsverfahren für statisch beanspruchte Metallklebverbindungen zu gelangen, auf erhebliche noch nicht überwundene Schwierigkeiten stößt. Aus begrifflichen Gründen sind für dynamisch beanspruchte Klebverbindungen die Schwierigkeiten noch größer. Man wird hier auch für die fernere Zukunft nicht auf aussagekräftige Versuche verzichten können.

4.2 Schwingfestigkeitsversuche

Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche werden auf den Bildern 5 bis 16 dargestellt. Dabei sind auf der Abszisse des doppellogarithmischen Netzes die Lastwechselzahlen LW und auf der Ordinate die höchste im Kollektiv auftretende Oberspannung τ_o abgetragen. Die sich auf den verschiedenen Beanspruchungsniveaus ergebenden Bruchlastwechselzahlen der Probekörper werden durch kurze senkrechte Striche markiert. Auf jedem Beanspruchungsniveau wurden neun Probekörper geprüft. Sämtliche Probekörper brachen in der Klebfuge. Die Lebensdauerlinien im Zeitfestigkeitsbereich sind für drei verschiedene Überlebenswahrscheinlichkeiten, nämlich P_{ij} gleich 10 %, 50 % und 90 % eingetragen. τ_m bezeichnet die Mittelspannung, die für das jeweilige Beanspruchungsniveau konstant war und bei den Zugschwellversuchen $\tau_m = \tau_o/2$ und bei den Wechsellastversuchen $\tau_m = 0$ betrug. Der Zusammenhang zwischen der höchsten Oberspannung im Kollektiv τ_o , dem höchsten Spannungsausschlag im Kollektiv τ_a und der Mittelspannung τ_m ergibt sich aus der Beziehung $\tau_a = \tau_o - \tau_m$.

In den Bildern sind außerdem noch für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{ij} = 50\%$ die Bezugsspannung in der Gleichung der Lebensdauerlinie $\tau_o 10^6$, das ist die ertragbare Oberspannung für 10^6 Lastwechsel und der Exponent k , der die Neigung der Lebensdauerlinie kennzeichnet, angegeben.

Um nachzuweisen, daß auch für Metallklebverbindungen die Lebensdauerlinien im Zeitfestigkeitsbereich bei doppellogarithmischer Auftragung durch eine Gerade angenähert werden können, wurden bei den Doppellaschenverbindungen Versuche auf mehreren Beanspruchungsniveaus durchgeführt. Zur Bestimmung der Lebensdauerlinien aller anderen Verbindungsformen wurden dann nur noch Versuche auf zwei verschiedenen Beanspruchungsniveaus durchgeführt.

Das beachtenswerteste Ergebnis sind die hohen k -Werte, die sich insbesondere bei Anwendung des normalverteilten bzw. logarithmisch-normalverteilten Beanspruchungskollektives ergeben. Vergleichsweise liegen k -Werte für geschraubte oder genietete Stahlverbindungen mit niedriger Formzahl in der Nähe von 7 und für geschweißte Stahlverbindungen mit hoher Formzahl in der Nähe von 4. Allgemein läßt sich die Bedeutung des Exponenten k wie folgt formulieren: Der Festigkeitsabfall bei einer Schwingbeanspruchung gegenüber der statischen Festigkeit ist um so geringer, je größer der k -Wert ist. Der Idealfall wäre eine waagerechte, in Höhe der statischen Festigkeit verlaufende Lebensdauerlinie mit einem die Neigung kennzeichnenden Exponenten $k = \infty$.

Auffällig ist, daß für alle untersuchten Verbindungsformen die Wöhlerlinien steiler verlaufen als die Lebensdauerlinien bei Belastung mit einem normalverteilten Kollektiv. Da die lineare Schadensakkumulationshypothese eine von der Kollektivform unabhängige, konstante Steigung aller Lebensdauerlinien einschließlich der Wöhlerlinie beinhaltet, ist sicher, daß sie nicht

für die untersuchten Klebverbindungen gültig ist. Offenbar wird die Schädigung der Verklebung nicht so sehr durch die wenigen Lastwechsel im Bereich hoher Beanspruchung als vielmehr durch die vielen Lastwechsel im mittleren Beanspruchungsbereich des Kollektives hervorgerufen.

4.3 Vergleich der verschiedenen Versuche

Zum besseren Vergleich zeigen die Bilder 17 bis 19 die Lebensdauerlinien verschiedener Klebverbindungen. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden nur die Lebensdauerlinien für 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit dargestellt.

Der Einfluß der Kollektivform auf das Schwingfestigkeitsverhalten der Doppellaschenverbindungen ist Bild 17 zu entnehmen. Es zeigt sich erwartungsgemäß, daß die Lebensdauer bzw. die ertragbare Spannung mit Änderung der Kollektivform in der Reihenfolge Kollektiv mit gleichförmiger Amplitude, normalverteiltes Kollektiv, logarithmisch-normalverteiltes Kollektiv ansteigt. Dabei wird die Neigung der Lebensdauerlinien in derselben Reihenfolge flacher. Die Lebensdauerlinie für das logarithmisch-normalverteilte Kollektiv liegt auffallend nahe an der statischen Festigkeit.

Bild 18 zeigt das Ergebnis von Wöhlerversuchen an Doppellaschenverbindungen, die mit verschiedenen Klebern hergestellt wurden. Das Bild läßt erkennen, daß nicht ohne weiteres von der Festigkeit bei zügiger Beanspruchung auf die Schwingfestigkeit geschlossen werden kann. Während bei der statischen Beanspruchung der Konstruktionskleber Araldith AV 129 die besten Festigkeitswerte zeigt, liefert bei der Schwingbeanspruchung Agomet U 3 die günstigsten Ergebnisse. Die Ursache dafür liegt in dem besseren Verformungsvermögen des Klebers begründet, durch das an den Überlappungsenden auftretende Spannungsspitzen ausgeglichen werden können. Spröde und wenig verformbare Kleber eignen sich für schwingbeanspruchte Klebverbindungen nicht so gut als zähe [17].

Die sich für die verschiedenen Rohrverbindungen ergebenden Lebensdauerlinien sind im Bild 19 zusammengestellt. Die Steigerung der Schwingfestigkeit von der Doppellaschenverbindung über die Rohrverbindung mit Außenmuffe zur geschäfteten Rohrverbindung entspricht in etwa den Verhältniswerten der statischen Bruchfestigkeit. Ähnlich wie bei metallischen Werkstoffen ist der ertragbare Spannungsausschlag für eine Wechselbeanspruchung größer als für eine Zugschwellbeanspruchung.

Selbstverständlich wächst auch hier die Lebensdauer beim Übergang vom Wöhlerversuch zum normalverteilten Kollektiv.

5. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der vorstehend beschriebenen Versuche zeigen, daß Klebverbindungen bei schwingbeanspruchten Stahlkonstruktionen mit Vorteil einsetzbar sind.

Erwartungsgemäß wächst die Lebensdauer bei Änderung der Kollektivform vom Grenzfall einer Beanspruchung mit gleichförmiger Amplitude über das normalverteilte zum logarithmisch normalverteilten Kollektiv.

Von den verwendeten Klebstoffen weisen die zähen Typen ein besseres dynamisches Tragverhalten als die spröden auf.

Bedingt durch die Spannungsverteilung in der Klebfuge ergibt sich für die verschiedenen Probenformen ein Anstieg der Lebensdauer in der Reihenfolge: Doppellaschenverbindung, Rohrverbindung mit Außenmuffe, geschäftete Rohrverbindung.

Besonders bemerkenswert ist die flache Neigung der Wöhler- und Lebensdauerlinien. Für andere Verbindungsmittel, z.B. Schweißen, ergibt sich ein wesentlich steilerer Verlauf. Das bedeutet, für Metallklebverbindungen der Festigkeitsabfall bei Schwingbeanspruchung im Zeitfestigkeitsbereich geringer ist als für andere Verbindungsmittel.

Dieses günstige Verhalten der Klebverbindungen sollte zur Anwendung in der Praxis ermuntern. Voraussetzung ist allerdings, daß man sich mit den typischen Anforderungen der Technologie des Metallklebens vertraut macht und in der Lage ist, diese Bedingungen in der Fertigung einzuhalten.

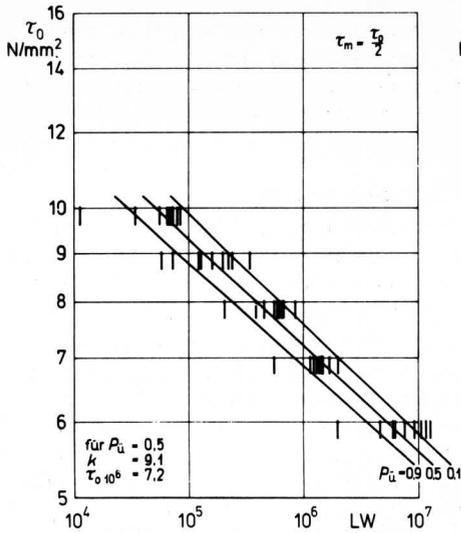


Bild 5. Wöhler.

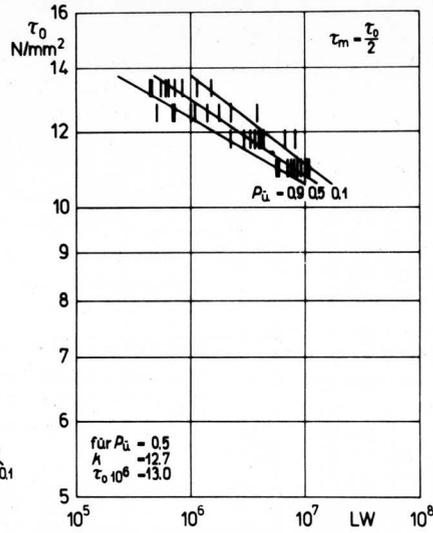


Bild 6. Normalverteilung.

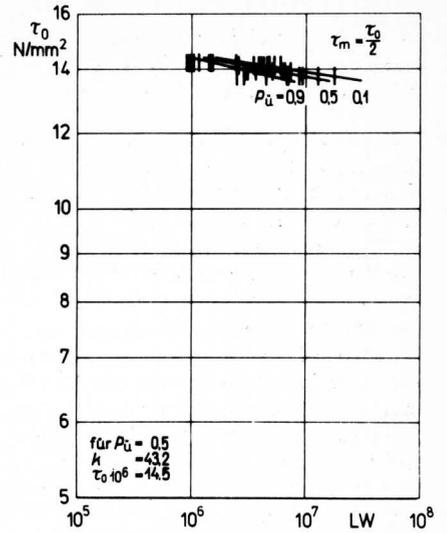


Bild 7. Logarithmische Normalverteilung.

Bild 5 bis 7. Lebensdauerlinien von geklebten Doppellaschenverbindungen, Araldit AV 129, Zugschwellbelastung.

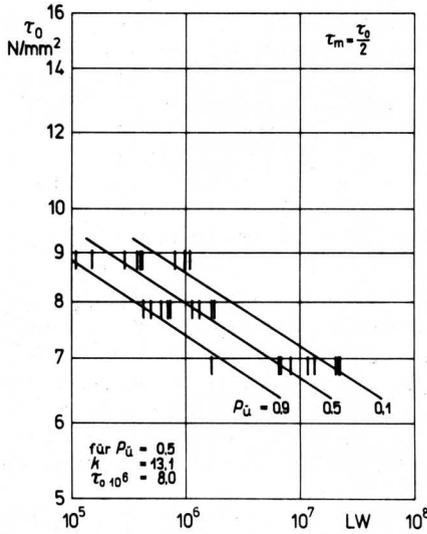


Bild 8. Agomet U 3.

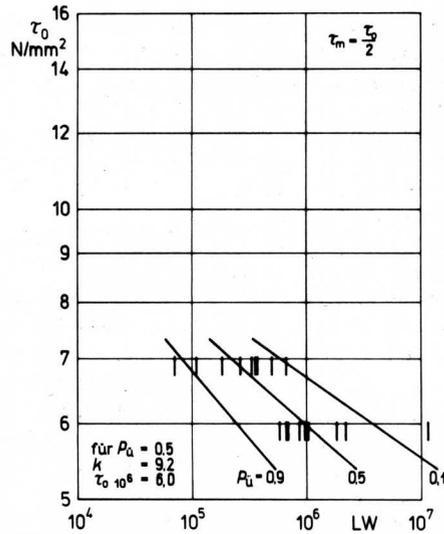


Bild 9. Metallon K.

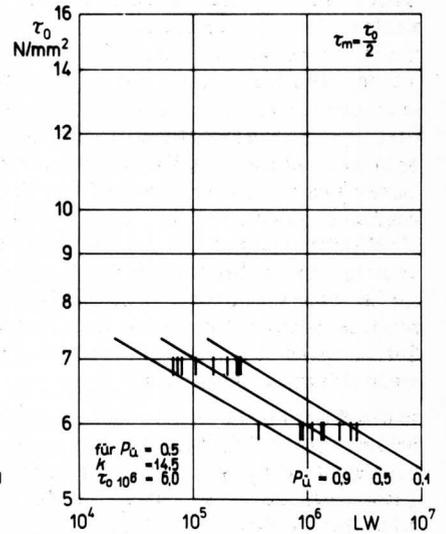


Bild 10. Metallon E 2602.

Bild 8 bis 10. Lebensdauerlinien von geklebten Doppellaschenverbindungen, Wöhler, Zugschwellbelastung.

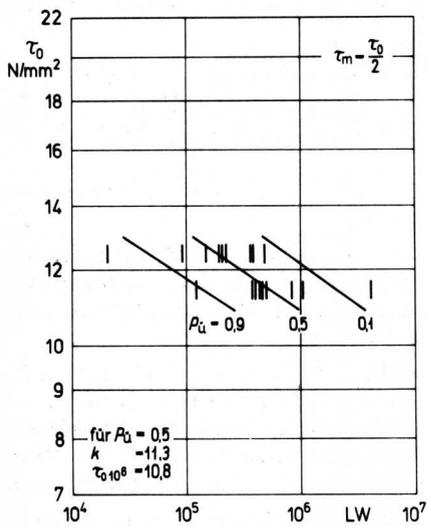


Bild 11. Wöhler, Zugschwellbelastung.

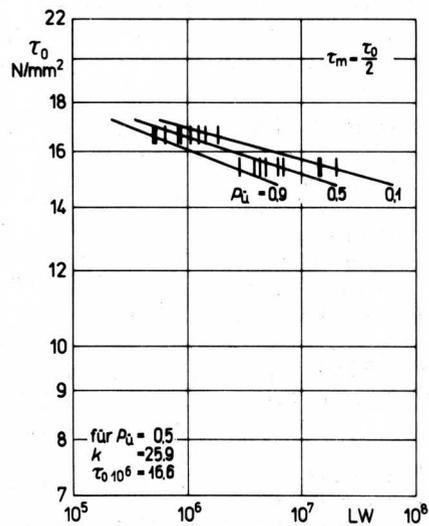


Bild 12. Normalverteilung, Zugschwellbelastung.

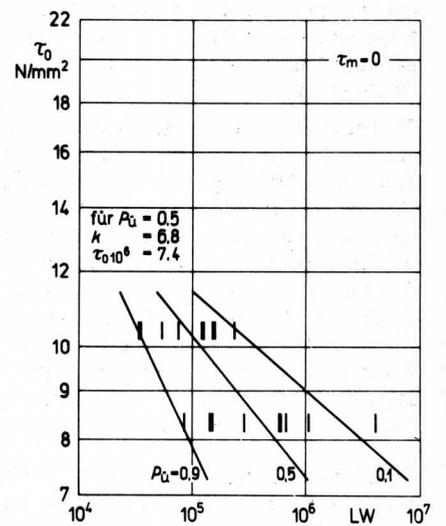


Bild 13. Wöhler, Wechselbelastung.

Bild 11 bis 13. Lebensdauerlinien von geklebten Rohrmuffenverbindungen, Araldit AV 129.

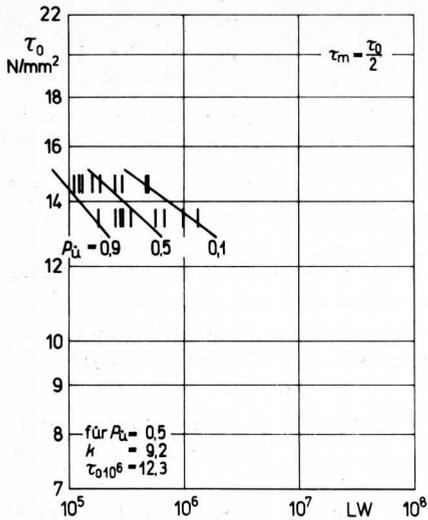


Bild 14. Wöhler, Zugschwellbelastung.

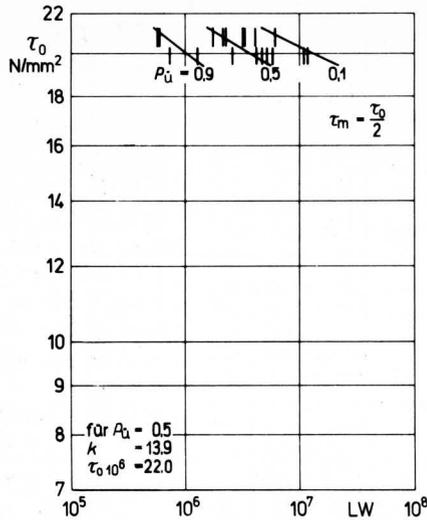


Bild 15. Normalverteilung, Zugschwellbelastung.

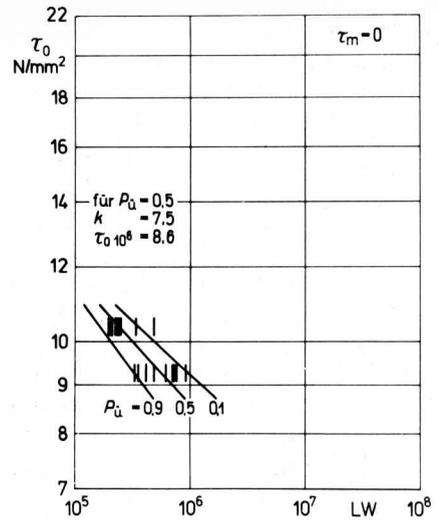


Bild 16. Wöhler, Wechselbelastung.

Bild 14 bis 16. Lebensdauerlinien von geklebten Rohrschäftverbindungen, Araldit AV 129.

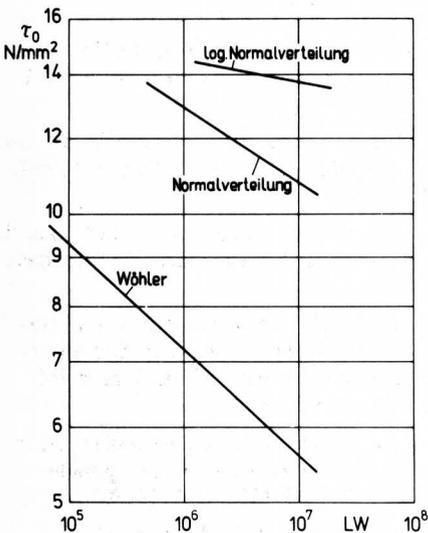


Bild 17. Lebensdauerlinien von geklebten Doppellaschenverbindungen für verschiedene Kollektivformen, Araldit AV 129, Zugschwellbelastung.

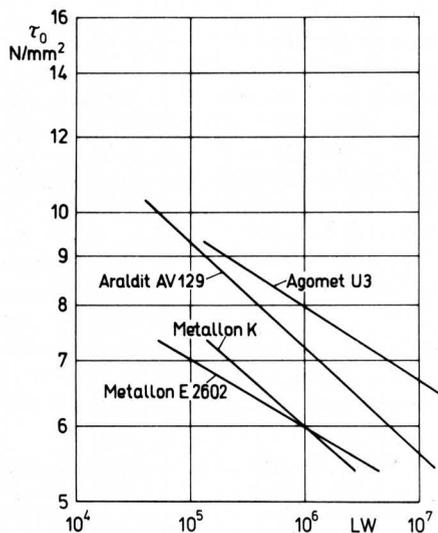


Bild 18. Lebensdauerlinien von geklebten Doppellaschenverbindungen für verschiedene Klebersorten, Wöhler, Zugschwellbelastung.

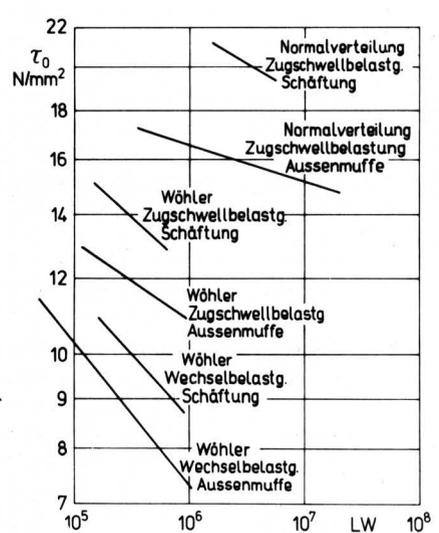


Bild 19. Lebensdauerlinien von geklebten Rohrverbindungen, Araldit AV 129.

Verwendete Formelzeichen

H		Summenhäufigkeit der Lastwechsel des Beanspruchungskollektivs
h _i		Lastwechsel der i-ten Stufe
k		Exponent zur Kennzeichnung der Neigung der Lebensdauer- bzw. Wöhlerlinien
LW		Lastwechselzahl
m		Ordnungszahl der Probe
n		Gesamtzahl der Proben eines Beanspruchungsniveaus
P _ü		Bruchwahrscheinlichkeit
τ _a	N/mm ²	größte im Beanspruchungskollektiv auftretende Spannungsamplitude
τ _{ai}	N/mm ²	Spannungsamplitude der i-ten Stufe

τ _B	N/mm ²
τ _m	N/mm ²
τ ₀	N/mm ²
τ ₀ 10 ⁶	N/mm ²
σ _B	N/mm ²
σ _S	N/mm ²
i	
τ	N/mm ²
σ	N/mm ²

Bruchspannung

in allen Stufen eines Beanspruchungskollektivs konstante Mittelspannung
 größte im Beanspruchungskollektiv auftretende Oberspannung
 Bezugsspannung zur Kennzeichnung der Lebensdauer- bzw. Wöhlerlinien (ertragbare Beanspruchungshöhe für eine Bruchlastwechselzahl von 10⁶)
 Bruchspannung
 Spannung an der Streckgrenze
 Index zur Kennzeichnung der Stufen des Beanspruchungskollektivs
 mittlere Schubspannung in der Klebfuge
 Normalspannung in den Füge teilen

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *O'Neill*: A review of some cumulative damage theories. Report ARL/SM 326 (1970).
- [2] *Miner, M.A.*: Cumulative damage in fatigue. J. Appl. Mech. 12 (1945) S.A. – 159/A – 169.
- [3] *Palmgren, A.*: Die Lebensdauer von Kugellagern. VDI-Z. 68 (1924) S. 339/41.
- [4] *Späth, W.*: Bemerkungen zur kumulativen Schädigungshypothese. Konstruktion 17 (1965) S. 170/74.
- [5] *Gaßner, E.*: Betriebsfestigkeit. Eine Bemessungsgrundlage für Konstruktionsteile mit statistisch wechselnden Betriebsbeanspruchungen. Konstruktion 6 (1954) H. 3, S. 97/104.
- [6] *Gaßner, E.*: Zur Aussagefähigkeit von Ein- und Mehrstufen-Schwingversuchen. Teil 1 : Einstufenversuche Materialprüfung 2 (1960) Nr. 4, S. 121/28.
- [7] ● *Brockmann, W.*: Grundlagen und Stand der Metallklebtechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1971 (VDI-Taschenbücher T 22.).
- [8] ● *Matting, A.*: Metallkleben. Berlin: Springer-Verlag 1969.
- [9] *Merkblatt 382*: Das Kleben von Stahl. Düsseldorf: Beratungsstelle für Stahlverwendung 1965.
- [10] ● *Schwarz, H. u. H. Schlegel*: Metallkleben und glasfaserverstärkte Plaste in der Technik. 6. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik 1970 (Technisch-wissenschaftliche Abhandlung des Zentralinstituts für Schweißtechnik der DDR, Halle (Saale) (Nr. 30).
- [11] *VDI-Richtlinie 2229*: Metallkleben, Hinweise für Konstruktion und Fertigung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1969.
- [12] *Winter, H. u. H. Meckelburg*: Die Klebtechnik von Schwermetall- und Nichtmetall-Werkstoffen. Schweißen und Schneiden 10 (1958) H. 11, S. 423/33.
- [13] *Winter, H. u. H. Meckelburg*: Untersuchungen zur Verklebung von Stahl. Stahlbau 30 (1961) H. 1, S. 16/23.
- [14] *Althof, W.*: Festigkeitsverhalten von überlappten Metallklebungen unter schwingender Beanspruchung bei Raumtemperatur und bei + 100°C. DLR Forschungsber. 66-47. Braunschweig 1966.
- [15] *Althof, W.*: Festigkeit von Metallklebverbindungen bei schwingender Beanspruchung. Mitt. Dt. Forschungsges. Blechverarb. u. Oberflächenbehdg. 19 (1968) Nr. 5, S. 48/51.
- [16] *Braig, W.*: Festigkeit von Metallklebern und Metallklebverbindungen, insbesondere Zeitstand- und Schwingbeanspruchung. Diss. TH Stuttgart 1964.
- [17] *Cornelius, E.A. u. W. Mehl*: Zug- und Zugschwellfestigkeit einer warmfesten Aluminium-Blech-Klebeverbindung bei Temperaturen bis 300 °C. Aluminium 37 (1961) Nr. 3, S. 150/53.
- [18] *Cornelius, E.A. u. W. Mehl*: Die Zug- und Zugschwellfestigkeit einer Blechklebeverbindung hoher Tragfähigkeit über 24 Monate. Aluminium 37 (1961) Nr. 6, S. 346/50.
- [19] *Draugelates, U.*: Das Verhalten von Metallklebverbindungen unter schwingender Last. Adhäsion 10 (1966) H. 9, S. 337/42.
- [20] *Eichhorn, F. u. W. Braig*: Festigkeitsverhalten von Metallklebverbindungen. Materialprüf. 2 (1960) Nr. 3, S. 79/87.
- [21] *Hahn, K.F. u. H.D. Steffens*: Dauerfestigkeitsuntersuchungen an geklebten Aluminium-Bauteilen. Aluminium 33 (1957) Nr. 12, S. 783/88.
- [22] *Matting, A. u. U. Draugelates*: Die Schwingfestigkeit von Metallklebverbindungen. Adhäsion 12 (1968) Nr. 1, S. 5/22; Nr. 3, S. 110/34. und Nr. 4, S. 161/76.
- [23] *Mehl, W.*: Untersuchungen an Klebeverbindungen von Aluminium- und Tiefziehblechen bei statischen und dynamischen Beanspruchungen. Diss. TU Berlin 1960, D 83.
- [24] *Schlegel, H.*: Zeitstand- und Dauerfestigkeit von Metallklebverbindungen. Mitt. Zentralinst. f. Schweißtech. Halle (Saale) 4 (1962) Nr. 5, S. 441/48.
- [25] *Späth, W.*: Zum Ermüdungsverhalten von Klebverbindungen. Adhäsion 15 (1971) H. 7, S. 228/31.
- [26] *Winter, H. u. H. Meckelburg*: Dynamische Untersuchungen an Metallklebverbindungen. DFL Bericht F 59-01. Braunschweig 1959.
- [27] *Winter, H. u. H. Meckelburg*: Dynamische Untersuchungen an Metallklebverbindungen. Aluminium 36 (1960) Nr. 1, S. 17/25.
- [28] *Kreiskorte, H. u. T. Haas*: Programmgesteuerte Schwingprüfmaschinen. Schenck-Mitteilungen Heft 12, Darmstadt 1965.
- [29] *Haibach, E. u. W. Lipp*: Verwendung eines Einheitskollektivs bei Betriebsfestigkeits-Versuchen. Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Technische Mitteilungen TM Nr. 15/65, Darmstadt 1966.
- [30] *Rossow, E.*: Eine einfache Rechenschiebernäherung an die den normal scores entsprechenden Prozentpunkte. Z. f. wirtsch. Fertigung 59 (1964) Nr. 12, S. 596/97.
- [31] *Bliss, C.I.*: The calculation of the dosage-mortality curve. Annals of Applied Biology 22 (1935) S. 134/67.
- [32] *Haibach, E.*: Modifizierte lineare Schadensakkumulations-Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung. Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Technische Mitteilungen, TM Nr. 50/70, Darmstadt 1970.
- [33] *Lubkin, J.L. u. E. Reissner*: Stress distribution and design data for adhesive lap joints between circular tubes. Trans. ASME 78 (1956) S. 1213/21.
- [34] *Volkersen, O.*: Neuere Untersuchungen zur Theorie der Klebverbindungen. In: Jahrbuch 1963 der WGLR, S. 299/306, Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn 1964.
- [35] *Ulmer, K.*: Spannungsverteilung in Metallklebverbindungen. WGLR-Bericht 1 (1964) S. 70/90.