Ermüdungsverhalten von Stahl- und Betonbauten: zum IVBH-Kolloquium in Lausanne: Werkstoffermüdung - ein aktuelles Thema

Autor(en): **Weibel, Jean-Pierre**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 12

PDF erstellt am: **24.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74772

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Ermüdungsverhalten von Stahl- und Betonbauten

Zum IVBH-Kolloquium in Lausanne

Erstmals veranstaltet die Internationale Vereinigung für Brücken- und Hochbau (IVBH) in der Schweiz ein Kolloquium über das Ermüdungsverhalten von Stahl- und Betonbauten (ETH Lausanne, 24. bis 26. März). Hatten sich bisher vorwiegend Wissenschaftler und Konstrukteure aus der Maschinenindustrie, insbesondere des Flugzeugbaus mit dem Fragenkomplex der Ermüdung befasst, so zeigt ein Blick auf die Referenten- und Teilnehmerliste der Veranstaltung, dass nun auch in der Bauindustrie diese Probleme ernst genommen und zu ihrer Abklärung beträchtliche Mittel investiert werden. Noch wichtiger ist das zunehmende Interesse der Bauindustrie und der Hochschulen an der Ermüdungsforschung im Bauwwesen. Im ersten der beiden folgenden Beiträge sind einige Gedanken eines Praktikers aus der Flugzeugindustrie über den heutigen Stand auf diesem Gebiet zusammengefasst. Im zweiten berichtet ein Mitarbeiter des ICOM (Institut de construction métallique) an der ETH Lausanne über einige Versuche, die am genannten Institut durchgeführt werden.

Werkstoffermüdung – ein aktuelles Thema

Von Jean-Pierre Weibel, Vufflens-le-Château

Ermüdungsprobleme – für wen?

Die Bemühungen, die Werkstoffe *immer besser auszunützen*, sei es durch *verfeinerte statische Berechnungsmethoden* oder durch *optimierte Gestaltung*, führen zwangsläufig zu einem häufigeren Auftreten von Ermüdungsphänomenen. Mancher Konstrukteur musste erfahren, dass eine statisch einwandfreie Konstruktion nicht unbedingt ein einwandfreies Verhalten in bezug auf Ermüdung gewährleistet. Ich erinnere mich an den Brief eines weltberühmten *Flugzeugherstellers*, der – gefragt über die Ermüdungsfestigkeit eines wirklich ausgezeichnet konstruierten Flugzeugtyps – hochmütig zu Antwort gab: «Wenn ihr mit diesem Flugzeug 10 000 Flugstunden erreicht habt (was enorm ist für einen Jäger), wird es früh genug sein, dieses Problem wieder aufzugreifen!» In der Zwischenzeit hat auch dieser Hersteller viel Geld in den Nachweis der Lebensdauer seiner Maschine investiert, lange bevor 5000 Flugstunden erreicht waren... Auch *Brückenbauer* und *Maschinenhersteller* mussten die Erfahrung machen, dass auch sie solchen Problemen gegenübergestellt werden können.

Es ist ein grosses Verdienst der IVBH, gleichzeitig auf diese Problematik aufmerksam zu machen und den Kontakt der Konstrukteure aus der Baubranche mit den Spezialisten zu fördern. Wie immer bei solchen Veranstaltungen werden sowohl einführende Referate wie Erfahrungsberichte zu hören sein. Es ist aber äusserst schwierig, unmittelbar aus beiden Arten von Vorträgen Nutzen zu ziehen. Deshalb ist zu wünschen, dass die Teilnehmer die Anregung mit nach Hause nehmen, mehr über ein ausserordentlich komplexes Thema zu lernen.

Was ist Werkstoffermüdung?

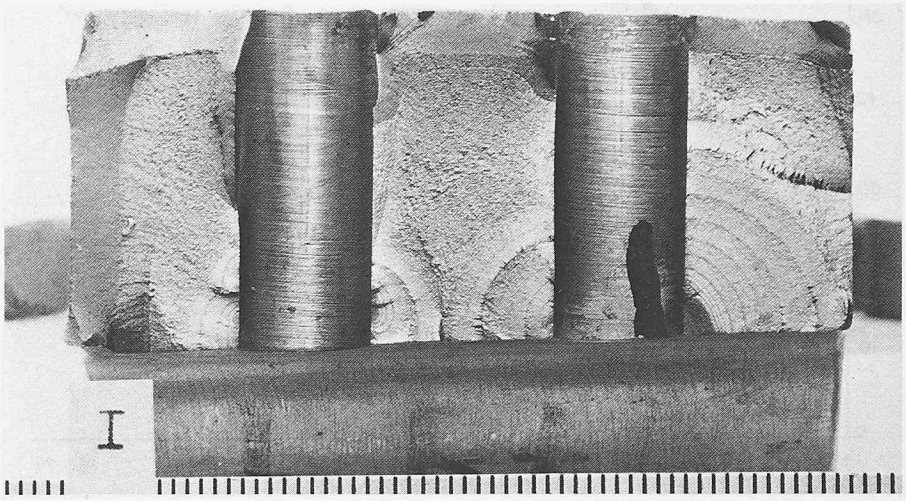
Am besten sollte man darauf antworten: Man weiss es nicht! Als physikalisches Phänomen ist die Werkstoffermüdung noch weitgehend unbekannt; so besteht zum Beispiel auch heute noch kein Modell, um die analytische Behandlung der Probleme in ihrer Gesamtheit befriedigend zu ermöglichen. Die Forschung auf diesem Gebiet hat vorwiegend experimentellen Charakter. Kurz gefasst kann man Werkstoffermüdung (englisch und französisch: fatigue) als das Verhalten bezeichnen, das bei *wiederholten Beanspruchungen zu einem Bruch unter den Werten der rein statischen Festigkeit führt*. Sie betrifft in erster Linie metallische Werkstoffe, ist aber bei anderen Materialien keineswegs unbekannt (Bild 1).

Die Fachliteratur über Ermüdung ist zwar umfangreich, besteht aber zum überwiegenden Teil aus Berichten über Einzelfälle, die deshalb nur sehr beschränkt aussagefähig sind. Für den Ingenieur und den Konstrukteur, die aufgrund der besseren Ausnützung der statischen Werkstoffeigenschaften mit Ermüdungsproblemen konfrontiert werden, ist es oft schwierig, sich bei der Bearbeitung konkreter Probleme zu orientieren. Eigentliche Lehrbücher bestehen kaum: eine knappe, leicht verständliche Einführung läuft Gefahr, viele wichtige Erkenntnisse auszulassen, während eine vertiefte Behandlung allzu komplex für ein Lehrbuch wird.

Die weitaus beste Schule, um sich mit der Werkstoffermüdung vertraut zu machen, ist die Praxis. Der *Erfahrungsaustausch* spielt eine eminent wichtige Rolle. In der Flugzeugindustrie besteht seit Jahrzehnten das *International Committee on Aeronautical Fatigue* (ICAF), dessen Hauptzweck der Austausch von technischen und wissenschaftlichen Berichten und die Veranstaltung von periodischen Symposien unter den Mitgliedstaaten ist. Dieser rege Kontakt hat sogar zu koordinierten Forschungsprogrammen geführt, deren Ergebnisse heute greifbar sind.

Die Komplexität der Probleme liegt in der *grossen Anzahl Parameter*, die auf das Ermüdungsverhalten einer tragenden Struktur Einfluss ausüben. Will man diese Faktoren, zumindest die

Bild 1. Beispiel eines Ermüdungsbruches an einem Holmgurt. Gut zu erkennen ist das zyklische Fortschreiten der Risse. Bemerkenswert ist hier der hohe Anteil des Ermüdungsbruches an der ganzen Bruchfläche (Massstab 1,8:1)



wichtigsten, aufzählen, lassen sie sich in vier Gruppen einteilen:

- *Werkstoffeigenschaften* (Festigkeit, E-Modul, chemische Zusammensetzung usw.),
- *konstruktive Eigenschaften* (Formgebung, Verbindungen usw.),
- *produktionsbedingte Eigenschaften* (z.B. Oberfläche, Toleranzen),
- *Beanspruchung* (mechanisch, thermisch, chemisch).

Allein schon die *vielfältige Wechselwirkung* der Hauptfaktoren führt dazu, dass die bei einer bestimmten Konstruktion gewonnene Erfahrung allzu oft nur beschränkt auf andere Anwendungen übertragbar ist.

An der IVBH-Tagung werden gewisse Referate bestimmten Sonderfällen gewidmet sein, bei denen unter anderem wesentliche Vereinfachungen möglich sind, indem gewisse Parameter ausser Betracht fallen. Die daraus entstandene Einfachheit mag hie und da bestechend sein, da sie eine analytische Behandlung der dargelegten Probleme ermöglicht. Sie ist aber keineswegs typisch für die Untersuchung der meisten Strukturen.

Die Behandlung von Ermüdungserscheinungen hat zwei wesentliche Phasen zu berücksichtigen:

- *vor* dem Auftreten eines Risses
- *beim Vorhandensein* eines oder mehrerer Risse.

Die *Sicherheit* in bezug auf die Ermüdung kann also darin bestehen, eine Rissbildung im Betrieb zu verhindern oder die Rissfortpflanzung unter Kontrolle zu behalten. Die Frage des *kleinsten entdeckbaren Risses* ist wohl interessant, in der Praxis hingegen sieht die Problematik etwas anders aus: Die verlangte Sicherheit kann sich nur nach der *Rissgrösse* richten, die mittels zerstörungsfreier Prüfmethoden *sicher* eine Entdeckung ermöglicht. Ein Referent aus der Maschinenindustrie hat anlässlich einer Tagung erklärt, seine Erzeugnisse müssten hundertprozentig rissfei bleiben, da sie lebenswichtig sind und im Betrieb nicht geprüft werden können. Diese *absolute Sicherheit besteht indessen bei der Ermüdung nicht.* Höchstens kann für eine bestimmte Lebensdauer eine befriedigend niedrige Bruchwahrscheinlichkeit gewährleistet werden – mit entsprechendem Prüf- und Rechenaufwand.

Sind Vereinfachungen zulässig?

Es liegt auf der Hand, für die Bearbeitung konkreter Fälle sind Vereinfachungen unumgänglich, was noch lange nicht heisst, dass sie zulässig sind! Seit sich *Wöhler* vor mehr als einem Jahrhundert mit der Festigkeit von Eisenbahnwagen-Achsen unter wiederholten Lasten befasst hat, hat es nicht an Versuchen gefehlt, einfache Beziehung zwischen den wesentlichen Parametern aufzustellen. Sie haben ausgesprochen empirischen Charakter und weisen nicht selten eine unangenehme Eigenschaft aus: ihre Anwendung kann *sowohl zu optimistischen wie zu pessimistischen Ergebnissen* führen. Damit erklärt sich der grosse Versuchsaufwand, wenn es gilt, die Sicherheit gegen einen Ermüdungsbruch im Betrieb zuverlässig zu dokumentieren. Die Wöhler-Kurve (Bild 2) resultiert aus dem ersten Versuch, die dynamischen Eigenschaften eines Materials systematisch darzustellen, nachdem erkannt wurde, dass wiederholte Beanspruchungen die Festigkeit eines Bauteiles herabsetzen. Die Kurve eignet sich gut für Vergleiche zwischen verschiedenen Werkstoffen, ist jedoch stark von den Versuchsbedingungen abhängig. Im weiteren ist sie aber ihrer experimentellen Herkunft wegen schlecht für eine analytische Behandlung der Probleme zu gebrauchen.

Die Wahl des optimalen Werkstoffes, unter Berücksichtigung einer angemessenen Sicherheit gegen Ermüdung, ist wohl für den Konstrukteur von grösster Bedeutung. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen (Gewicht!) ist es in vielen Fällen unmöglich, durch Überdimensionierung die Sicherheit so hoch anzusetzen, dass ein Ermüdungsbruch verunmöglicht wird. (Hier ist zu bemerken, dass die Anwendung eines Werkstoffes mit höherer Festigkeit keineswegs automatisch die Lebensdauer erhöht. Vielfach ist genau das Umgekehrte der Fall!) Es gilt vielmehr, eine Prognose für die sichere Lebensdauer unter bekannten Beanspruchungen zu erarbeiten. Die von *Palmgren* und *Miner* unabhängig voneinander entwickelte Hypothese setzt voraus, dass die *Beschädigung des Werkstoffes (oder des Bauteils) bei jedem Anbringen einer Beanspruchung (Lastzyklus) linear bis zum Bruch fortschreitet.* Das Kriterium für das Erreichen des Bruches lässt sich nach dieser *kumulativen Hypothese* bestechend einfach ausdrücken:

$$\sum_{0-1}^{i} \frac{n_i}{N_i} = 1$$

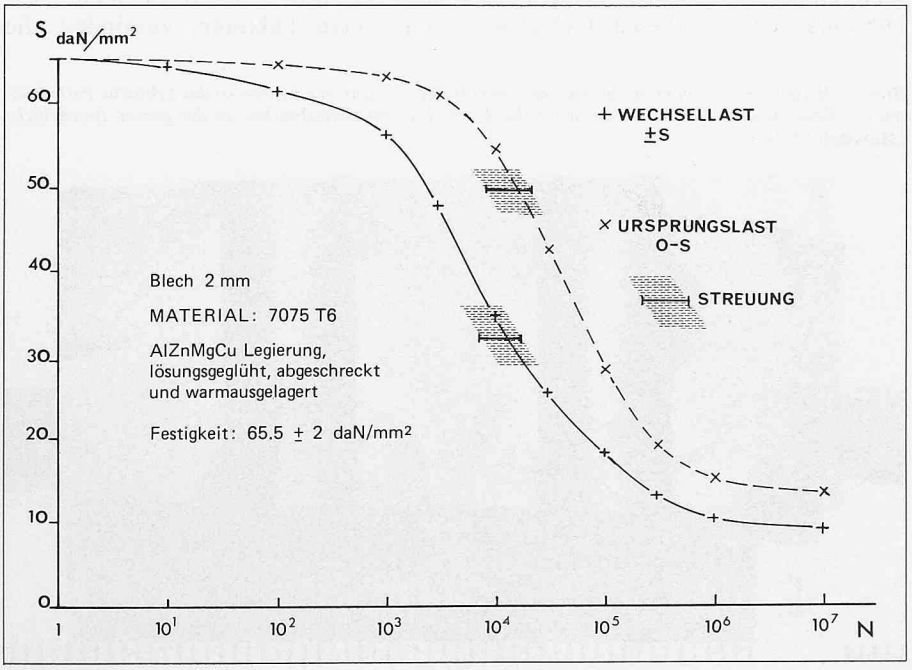
n_i: Anzahl Lastzyklen einer bestimmten Stufe

N_i: Anzahl der zum Bruch führenden Laststufen

Nach dieser Hypothese wird also die «verfügbare» Lebensdauer als eine im voraus gegebene Grösse betrachtet, die bei wiederholten Belastungen sukzessiv «verzehrt» wird. Die *Palmgren-Miner-Regel* ist jedoch mit zwei Mängeln behaftet:

- In der Praxis können beim effektiven Bruch die Werte der Formel wesentlich von 1 variieren, etwa von 0,2 bis gegen 10! Damit kann unter Umständen ihre Anwendung zu gefährlich optimistischen Lebensdauerprognosen führen.
- Sie setzt voraus, dass die Anzahl Lastzyklen bis zum Bruch für eine Reihe verschiedener Laststufen bekannt ist. Wegen der starken Streuung ist dies

Bild 2. Beispiel für Wöhlerkurven (es handelt sich jeweils um ein Band). Die aufgezeichnete Beziehung zwischen Lastamplitude und Anzahl Lastzyklen ist im höchsten Mass von den spezifischen Prüfbedingungen abhängig, haben also nur eine beschränkte Gültigkeit



nur mit einem erheblichen Versuchsaufwand möglich. Darüber hinaus sind die Ergebnisse bei ein und demselben Werkstoff von vielen Faktoren abhängig (z.B. Amplitude, Verhältnis und Vorzeichen der Lasten, Grösse und Form der Prüflinge usw.). Schliesslich sind die Ergebnisse von zwangsläufig vereinfachten Laborversuchen nur beschränkt auf mehr oder weniger komplexe Strukturen oder Bauteile übertragbar.

Es hat auch Versuche gegeben, den sicheren Anwendungsbereich der Palmgren-Miner-Formel durch Anpassungen oder Ergänzungen zu erweitern und ihre Zuverlässigkeit zu verbessern. Die einfachste Anpassung besteht darin, dass ihre Summe kleiner als 1 gewählt wird, was in zahlreichen Fällen zu einer Überdimensionierung in bezug auf Ermüdung führt und vereinzelt doch nicht zur gewünschten Sicherheit führt. Wenn diese Formel oder ihre Varianten trotz erkannten Unzulänglichkeiten doch immer wieder anzutreffen sind, liegt es einfach am Fehlen einer besseren einfachen Beziehung.

Es kann im Rahmen dieses Beitrages nicht auf die zahlreichen anderen Methoden zur rechnerischen Lebensdauerprognose eingegangen werden. Auch ist es unmöglich, die metallurgischen Aspekte der Ermüdungsforschung zu behandeln.

Sicherheit gegen Ermüdung: Krisen und Erfolge

Das Vorhandensein der Werkstoffermüdung als Faktor der Sicherheit gegen Bruch ist schon lang bekannt, u.a. durch schwerwiegende Unfälle:

- Am 14. Juni 1891 stürzte die *Eisenbahn-Stahlbrücke bei Münchenstein* unter einem Schnellzug ein. Zehn Jahre früher hatte Hochwasser ein Lager derart beschädigt, dass die Brückenecke um 75 cm eingesunken war. Darauf war die Brücke repariert, revidiert und einer Belastungsprobe unterstellt worden. Weiter war sie 1890 in Hinblick auf schwerere Lokomotiven verstärkt worden. Wahrscheinlich ist die Katastrophe die Folge von im Jahre 1881 erlittenen Beschädigungen, die unbemerkt blieben und Anlass zum Auftreten von Ermüdungsschäden waren. Nicht selten sind Ermüdungsbrüche auf unvorhergesehene Lastfälle zurückzuführen: statisch sind sie unbedeutend, ihre Wiederholung jedoch bei weitem nicht vernachlässigbar.
- Im Jahre 1934 ist eine *Curtiss Condor* der Swissair infolge Ermüdungsbruch eines lebenswichtigen Bauteiles abgestürzt (Bild 3).

Bild 3. Am 27. Juli 1934 stürzte die im gleichen Jahr angeschaffte Curtiss Condor der Swissair bei einem Linienflug Berlin–Zürich in der Nähe von Tuttlingen (Württemberg) ab. Ursache war das Versagen einer Flügelstrebe infolge Ermüdungsbruchs, das zur Separation eines Flügels führte. Unter den 11 Opfern befand sich die erste Flughostess Europas, Nelly Diener

Die Ermüdungsforschung ist jedoch erst in den fünfziger Jahren auf sehr breiter Basis vorangetrieben worden, nachdem zwei englische Strahlverkehrsflugzeuge vom Typ *Comet* (Bild 4) unter fast identischen Verhältnissen einige Minuten nach dem Start abgestürzt waren, ohne dass ihre Besatzungen über die Art des Unfalles etwas meldeten. Die ausserordentlich umfangreiche Untersuchung dieser Abstürze führte zum Schluss, dass die Kabine beider Flugzeuge infolge eines *rasch fortschreitenden Ermüdungsrisses* an einer Fensterecke geborsten war. Bei der Untersuchung wurden Ermüdungsversuche mit einem ganzen Flugzeug durchgeführt (unter anderem wurde in der in ein Wasserbecken getauchten Kabine der innere Überdruck infolge Klimatisierung simuliert).

Im Flugzeugbau ist man mehr als irgendwo auf die optimale Ausnützung des Strukturgewichtes angewiesen. Der statische Sicherheitsfaktor gegen Bruch beträgt, je nach Bauvorschriften, 1,4 bis 1,5 (mit Zuschlägen für einzelne Bauteile). Damit kommt der Absicherung gegen Ermüdungsbrüche eine primäre Rolle zu. Überdies ist die Ermüdungsbeanspruchung sehr komplex; von sinusförmigen Lastzyklen mit konstanter Amplitude ist man weit entfernt! Es können sogar andere Einflüsse wie Temperatur oder salzhaltige Meeresluft mitspielen.

Obwohl die Berechnungsmethoden der Spannungsanalyse ständig verfeinert werden – man denke an die Methode der *finiten Elemente* –, ist man dazu übergegangen, die Sicherheit mit zwei wesentlichen (und kostspieligen) Methoden zu dokumentieren:

- hochrealistische Ermüdungsversuche,
- *Fail-Safe*-Konzept.

Diese Entwicklung ging *nicht ohne Kontroverse* vor sich. Insbesondere wurde lange das *Safe-Life*-Konzept verfochten. Im wesentlichen bestand es darin, dass für lebenswichtige Bauteile

Bild 4. Am 10. Jan. 1954 und am 8. April desselben Jahres stürzten zwei De Havilland Comet unter beinahe identischen Bedingungen ab; anschliessend fand die umfangreichste Flugunfalluntersuchung aller Zeiten statt. Erst nach viereinhalb Jahren konnte das erste Düsenverkehrsflugzeug der Welt wieder in Betrieb genommen werden. Imerhin handelte es sich beim Comet 4 (Bild) weitgehend um eine Neukonstruktion

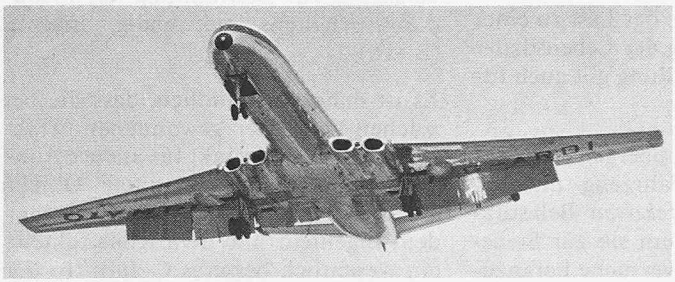
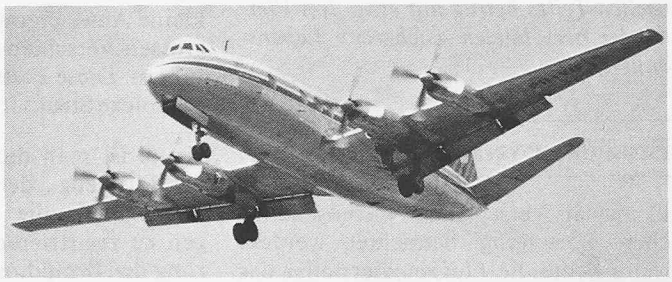


Bild 5. Am Silvesterabend 1968 stürzte in Australien eine Vickers Viscount (Bild) infolge Flügelbruchs im Reiseflug ab. Die berechnete Lebensdauer des Holmuntergurtes des rechten Flügels wurde um etwa 25 Prozent unterschritten; eine kleine Fabrikationsabweichung war nicht als ermüdungsmässig relevant erkannt worden. Wegen des angewandten Safe-Life-Konzepts bestand keinerlei Sicherheitsreserve für das wichtige Bauteil



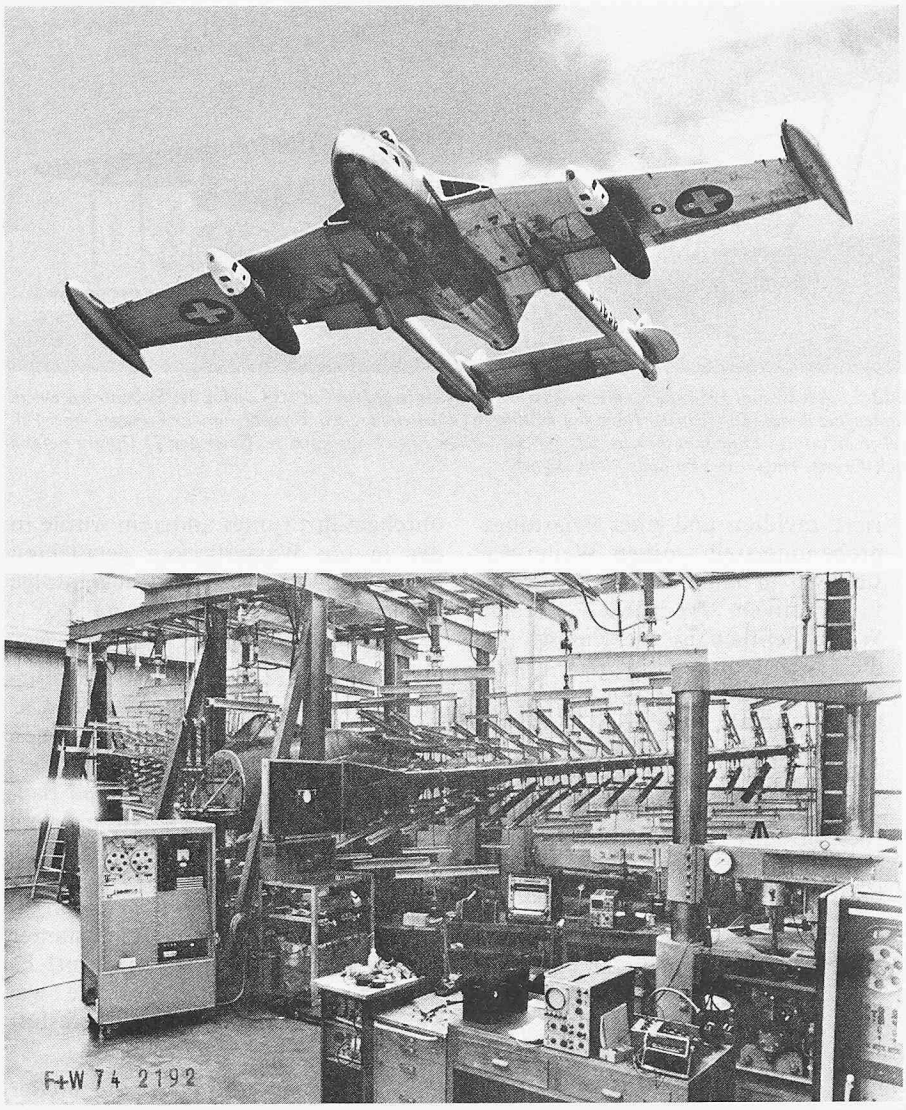


Bild 6. Änderungen in der Einsatzartz der DH-112 Venom der Schweizer Flugwaffe (oben) führten zur Wiederholung des umfangreichen Ermüdungsversuches (unten), da frühere Erkenntnisse ungültig wurden. Durch intensive Forschungs- und Überwachungsarbeiten gelang es dem Eidg. Flugzeugwerk Emmen, die vom Hersteller mit 500 Flugstunden angegebene Lebensdauer des Flugzeuges auf etwa 2000 Stunden zu erhöhen

eine «sichere» Lebensdauer aufgrund von Teilversuchen und von theoretischen Überlegungen berechnet wurde. Nach Ablauf dieser «sicheren» Lebensdauer (gemessen in Betriebsstunden oder in Lastzyklen) musste das betroffene Element ersetzt werden.

Es zeugt von der schier unüberwindbaren Komplexität einer solchen Prognose, unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Faktoren, dass seinerzeit eine australische Vickers Viscount (Bild 5) auf dem Reiseflug in etwa 9000 m Höhe ins Meer abstürzte, weil sich bei einem Flügelanschluss ein Ermüdungsbruch ereignete; die *Betriebszeit des kritischen Teiles betrug nur etwa drei Viertel der berechneten «sicheren» Lebensdauer...*

Ermüdungsversuche

Es mag als Versagen der wissenschaftlichen Forschung betrachtet werden, wenn heute die Flugzeughersteller das Ermüdungsverhalten ihrer Konstruktionen durch *möglichst realistische Versuche mit vollständigen Strukturen* ausweisen. Das erwähnte Fehlen eines zuverlässigen physikalischen Modells für den Ermüdungsvorgang sowie das geforderte sichere Verhalten im Betrieb erklären den Zugriff zu dieser kostspieligen experimentellen Untersuchung.

Allgemein sind genaue statistische Unterlagen über die Beanspruchung im Betrieb Grundbedingungen sowohl für die Auslegung der Struktur wie für den Nachweis ihrer Sicherheit gegen Ermüdung. Beim Betrachten einer Wöhler-Kurve (Bild 2) sieht man, dass bereits kleine Abweichungen der Last zu einer grossen Verschiebung der Lebensdauer führen. Diese Feststellung gilt auch für komplexe Strukturen.

Heute ist man dazu übergegangen, in der Flugzeug-, der Fahrzeug- und der Bauindustrie die *effektiven* Belastungen zu registrieren, um sie zur Steuerung der Ermüdungsversuche heranzuziehen. Bei der Entwicklung neuer Konstruktionen sind gewisse Annahmen zu treffen, da unter Umständen ein Versuch laufen muss, *bevor* das Objekt im Betrieb ist. Diese Hypothesen sind möglichst schnell zu verifizieren.

Wesentliche Erkenntnisse des *Grossversuches* betreffen auch die Überwachung der Struktur im späteren Betrieb: Prüfmethoden, Zugänglichkeit, Periodizität der Inspektion, Einfluss allfälliger Änderungen der Belastung usw. Die Auswirkung eventuell notwendiger Verstärkungen kann auch beobachtet werden.

Die beim Grossversuch gewonnenen Erfahrungen dürfen nicht als endgültig betrachtet werden. Wenn auch die Struktur im Laufe des Betriebes nicht verändert wird, kann ihre Beanspruchung in einem späteren Zeitpunkt wesentlich variieren, was die Grösse und die Häufigkeit der Lasten anbelangt. Diese Erscheinung ist auch bei der Beurteilung der statischen Festigkeit von Bauwerken bekannt: Je komplexer die Belastung, desto schwieriger ihre Überwachung. Es ist daher sehr wichtig, alle wesentlichen Kriterien zu definieren und regelmässig zu überprüfen. So sind bei einem Fahrzeug Gewicht und Gewichtsverteilung direkt unter Kontrolle zu behalten, aber wie können zum Beispiel Abweichungen in der Fahrbahnbeschaffenheit zahlenmässig einfach erfasst werden?

Diese Unsicherheit im sogenannten *Lastspektrum* gilt vermehrt für das Flugzeug, wo im wesentlichen nur Gewicht und häufig Normalbeschleunigungen (Lastfaktor) überwacht werden. Variationen in der Einsatzhöhe (Einfluss der reliefbedingten Böigkeit!) oder in den asymmetrischen Manövern lassen sich normalerweise kaum erfassen. Abweichungen dieser Art haben schon dazu geführt, dass wohl vorausgesehene Ermüdungsschäden viel früher als erwartet auftraten und nicht unbedingt rechtzeitig entdeckt wurden. Es kann aber durchaus geschehen, dass Beschädigungen an einem anderen Ort auftreten, als im - nicht mehr repräsentativen - Versuch festgestellt wurde. Wir haben es erfahren, dass eine Verschiebung in der Einsatzart eines Flugzeuges die Wiederholung (mit einem neuen Lastspektrum) eines kostspieligen Grossversuches zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens notwendig machte (Bild 6).

Es ist daher verständlich, dass die bei solchen Versuchen gewonnenen Erfahrungen nur beschränkt für andere Konstruktionen als das getestete Objekt Gültigkeit haben. Sie vermitteln aber dem Ingenieur und dem Konstrukteur ein wesentlich besseres Gefühl für die

Gestaltung in bezug auf Ermüdung. Damit tragen sie doch zur Verbesserung von künftigen Bauwerken bei. Wenn schon die Gestaltung erwähnt wird, möchten wir hier von weiteren Ausführungen zu diesem Thema absehen, das für sich ein ganzes Buch verdienen würde. Es ist jedoch zu bemerken, dass hier die neuen SIA-Normen für Stahlbau 161 dem Konstrukteur eine ermüdungsgerechte Gestaltung erleichtern. Dies ist von grosser Bedeutung, da eine schlechte Gestaltung das Auftreten von Ermüdungsschäden begünstigen kann, auch in Bauwerken, die im wesentlichen nur eine statische Dimensionierung verlangen. Das Gleiche gilt auch für die Qualität der Ausführung der verschiedensten Objekte.

Fail-Safe-Konzept

Es gibt wohl Bauteile, die während ihrer ganzen Verwendungsdauer nicht versagen dürfen, weil ihr Bruch katastrophale Folgen haben würde: man denke an eine Radachse. Hier ist, wie schon erwähnt, die Bruchwahrscheinlichkeit auf ein vertretbares Minimum herabzusetzen und auch zu demonstrieren. Im Rahmen der Ermüdungsprobleme ist dies jedoch ein nicht allzu häufiger Fall.

Vielmehr wird im allgemeinen danach getrachtet, die Folge von Ermüdungsschäden unter *Kontrolle* zu behalten. Das Fail-Safe-Konzept ist als Antwort auf diese Bemühungen entstanden. In realistischer Art lässt es das Auftreten von Rissen zu. Es verlangt aber, dass ein Ermüdungsschaden bei den periodischen Inspektionen der Struktur entdeckt wird: Die *Periodizität* muss dafür Gewähr leisten, dass *ein entstandener Riss bis zur nächsten Inspektion keine katastrophalen Folgen hat.* Dies wird erreicht, indem das kritische Bauteil beim Auftreten eines Schadens durch eine *Ersatzstruktur* entlastet wird, was eine *gewisse Verdoppelung der tragenden Struktur und eine Verlagerung der Last* voraussetzt.

Trotz geschickter Auslegung der Struktur für verschiedene Lastfälle bedeutet diese *Doppelfunktion* wichtiger Bauteile einen Nachteil in bezug auf das Gewicht, wenn die volle Last getragen werden muss. Im Flugzeugbau kennt man einen Kompromiss, indem von der beschädigten Struktur bis zur nächsten Inspektion *eine Tragfähigkeit von nur 75 Prozent der sicheren Last verlangt wird.* Dieses Zugeständnis beruht unter anderem darauf, dass die maximal zulässige Last – eben die sogenannte sichere Last – nur selten im Betrieb erreicht wird. Damit wird auch klar, dass niemals von einer absoluten Sicherheit die Rede sein kann, sondern eine *genügend kleine Wahrscheinlichkeit eines Versagens angestrebt* wird.

Es darf nicht verschwiegen werden, dass die Fail-Safe-Methode auch mit verschiedenen Risiken verbunden ist und ihre Anwendung eine äusserst sorgfältige Analyse verlangt. Ein Verkehrsflugzeug hat trotz Fail-Safe-Analyse in der Luft sein Höhenleitwerk verloren, was zum Absturz führte: die effektive Lastverteilung nach dem Versagen eines Anschlusses entsprach nicht den Annahmen des Herstellers. Die vorgesehene Ersatzstruktur übernahm keine Last und erfüllte die ihr zugewiesene Rolle nicht (Bild 7).

Trotzdem bleibt die Fail-Safe-Methode eine ausgezeichnete Art, die Sicherheit gegen Ermüdung *wie auch in bezug auf statische Überbeanspruchungen* zu gewährleisten. Ihre Effizienz wächst mit der Erfahrung und dem Können des Konstrukteurs.

Bruchmechanik

Nicht alle Konstruktionen rechtfertigen die bittere Feststellung eines Flugzeugkonstrukteurs: «Wir müssen mit Rissen leben!» Jedoch ist diese Bemerkung weitgehend realistisch. Deshalb befassen sich viele Forscher mit dem Studium der *Rissfortpflanzung*. Im wesentlichen handelt es sich darum, das Wachstum der Risse, ob sie unvermeidlich sind oder nicht, in einer definierten Spanne der Betriebszeit unter Kontrolle zu halten. Es ist z.B. sehr wichtig zu wissen, ob ein Riss sich einigermassen stabilisieren wird oder sehr rasch einen tragenden Querschnitt derart schwächen wird, dass unter den zulässigen Beanspruchungen ein Bruch entsteht.

Wiederum ist die Rissfortpflanzung von zahlreichen Parametern abhängig. Neben den Werkstoffeigenschaften spielen Dimensionen und Proportionen der Bauteile wie die Lastverteilung wichtige Rollen. Die Bruchmechanik hat zum Ziel, Beziehungen zwischen diesen Faktoren zu formulieren, um die Rissfortpflanzung zu berechnen, insbesondere ihren Gradienten (gemessen an der Anzahl Lastzyklen).

Diese Methode basiert auf dem Gleichgewicht zwischen der Verformungsenergie, die zur Rissfortpflanzung führt, und jener Energie an der Oberfläche der neu entstandenen Bruchfläche. Damit lässt sich unter anderem die kritische Risslänge berechnen: wird sie überschritten, zum Beispiel unter der Einwirkung normaler Betriebslasten, schreitet der Riss spontan fort, da sein Zuwachs die totale Energie verringert. Die Hypothese, dass die Rissfortpflanzung nichts anderes darstellt als eine Energieverlagerung, ist erstmals etwa im Jahre 1920 von *Griffith* aufgestellt worden. Anpassungen dieser Theorie erwiesen sich neuerdings als notwendig: so musste dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Verformung an der Rissfront lokal plastisch ist, sogar bei den sprödesten Werkstoffen.

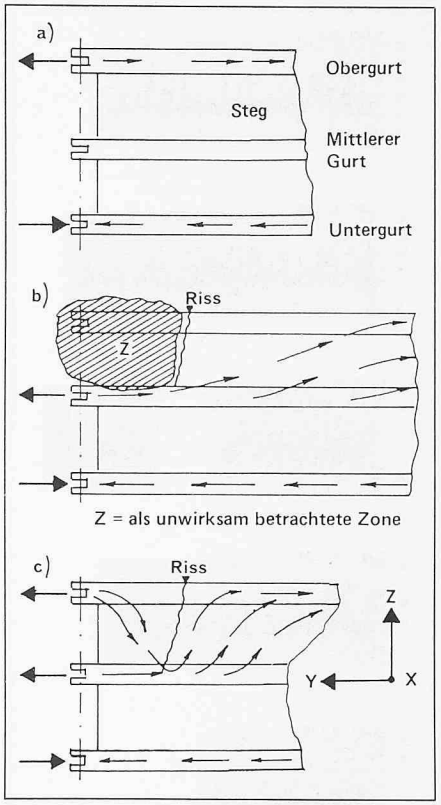


Bild 7. Fatale Folgen einer unvollständigen Fail-Safe-Analyse.
a) Leitwerkanschluss in intaktem Zustand. Der zusätzliche mittlere Holmgurt mit seinem Anschluss übernimmt keine Biegekräfte.
b) Angenommene Lastverteilung nach Versagen des oberen Holmteiles: der mittlere Gurt mitsamt Anschluss übernimmt die Zugkräfte infolge Biegemomentes.
c) Effektive Lastverteilung nach Auftreten eines Risses durch den Obergurt und die obere Hälfte des Steges. Der obere Anschluss übernimmt immer noch 30% der Zugkraft! Der Riss wurde keineswegs durch den mittleren Gurt gestoppt, sondern ist durch diesen fortgeschritten, was zum Versagen des ganzen Holmes geführt hat.
Die Ursache des abweichenden Verhaltens liegt in der Steifigkeit der Struktur quer zum Holm in der Anschlussgegend

Die *Bruchmechanik* hat sich als gutes Werkzeug zur Voraussage der Rissfortpflanzung bewährt. Da sie sich nicht mit der Entstehung des Risses befasst, die unter identischen Bedingungen eine grosse Streuung in bezug auf die Anzahl Lastzyklen bis zum Anriss aufweist, ist sie *wesentlich zuverlässiger als globale Lebensdauerprognosen.* Dafür ist sie für den Entwurf und die Vordimensionierung von Tragwerken ungeeignet. Auch die Anwendung der Bruchmechanik setzt voraus, dass man über gutes *statistisches Material* verfügt, was Grösse und Häufigkeit der Belastungen anbelangt. Es liegt auf der

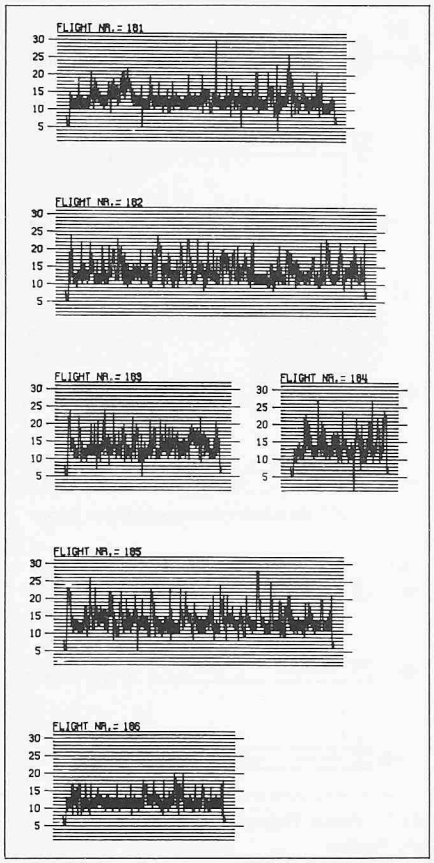


Bild 8. Beispiel eines standardisierten Lastspektrums. Es handelt sich um einzelne Flüge im Rahmen des Falstaff-Programmes. Sie basieren auf statistischen Messungen im Flug mit vier verschiedenen Jägertypen; die Verteilung der gemessenen Anzahl Lastzyklen wurde mit dem Computer vorgenommen. Insgesamt bestehen 200 solche unter sich kombinierbare Standard-Flüge. Anhand der Flugzeugeigenschaften können sie jedem Modell angepasst werden. Damit können Flugzeuge bereits im Projektstadium in bezug auf Ermüdung evaluiert werden

Hand, dass dies nur selten für Neukonstruktionen der Fall ist.

Lastannahmen

Der Hauptgrund, warum die Ergebnisse mancher umfangreicher Grossversuche im Bereich der Ermüdung untereinander schwer vergleichbar sind und nur beschränkt für neue Konstruktionen zu verwerten sind, liegt in der *Spezifizität der Belastung*. Die Beanspruchung kritischer Stellen hängt nicht nur von den äusseren Lasten ab, sondern auch von den *Besonderheiten der Struktur* selber: Lastverteilung, Massenverteilung (mit den damit verbundenen dynamischen Effekten), Steifigkeiten usw. Lokale Bedingungen können eine sehr grosse Rolle spielen: zum Beispiel Schwingungen – in diesem Fall können sie zyklischen Charakter aufweisen – oder einsatzbedingte Faktoren. Darum haben sich in den letzten Jahren die Bemühungen vermehrt, standardisierte Lastspektren (oder Lastkollektive) zu schaffen, die für Vordimensionierung und Schätzung der Lebensdauer realistisch genug sind (Bild 8).

Es ist ein Erfolg der internationalen Zusammenarbeit, wie im Rahmen der ICAF, dass Forschung und Versuchstätigkeit in mehreren Ländern nicht nur nach gemeinsam erarbeiteten Richtlinien abgewickelt werden, sondern als sich ergänzende Teilaufgaben grösserer Forschungsprojekte konzipiert werden. Ein gutes Beispiel ist das *Falstaff-Programm* (Fighter Aircraft Loading Standard For Fatigue Evaluation). Längere Zeit basierten die Lebensdauer-Prognosen für Flugzeuge auf Versuchen mit stark vereinfachter Belastung, deren Ergebnisse erfahrungsgemäss zum Teil fraglich waren. Diese Vereinfachungen waren durch die verfügbaren Versuchseinrichtungen bedingt. Anderseits war man nur auf summarische statistische Daten über die Betriebslasten angewiesen.

Mit der Schaffung moderner elektrohydraulischer, computergesteuerter Belastungseinrichtungen, welche die Simulation beliebiger Belastungen ermöglichen, und der Messung von Betriebslasten auf breiter Basis war der Weg offen für die extrem realistische Simulation dieser Lasten. Die breite Auswertung dieser realitätsnahen Versuche ist aber nur denkbar, wenn die Programme vereinheitlicht werden. Dies ist wiederum nur in bestimmten Gruppen möglich. In der Luftfahrt beispielsweise liegen die Lastspektren von Jägern und Verkehrsflugzeugen weit auseinander. Deshalb befasst sich das *Falstaff*-Programm nur mit Jägern. Es ist Gegenstand eines umfangreichen Entwicklungsvorhabens; Partner sind das niederländische *National Aerospace Laboratory (NLR)*, das *Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit* in Darmstadt, die *Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG)* in Ottobrunn (BRD) und das *Eidgenössische Flugzeugwerke in Emmen* (dessen Arbeit für die realistische Simulation von Flugbeanspruchungen den Initialimpuls zu diesem Programm gegeben hat).

Es ist weitgehend der Luftfahrt-Forschung zu verdanken, dass heute sowohl Prüfeinrichtungen wie realistische Lastannahmen breiten Kreisen zur Verfügung stehen. Am Institut von Prof. *Badoux* an der ETH Lausanne, das Pionierarbeit auf dem Gebiet der Ermüdungsforschung im Bauwesen leistet und massgebend an der Organisation des IVBH-Kolloquiums beteiligt ist, dient u.a. eine vom Eidg. Flugzeugwerk Emmen entwickelte und gebaute Prüfeinrichtung der Lebensdauer-Untersuchung von Stahlbrücken.

Eine weitgehende Standardisierung der Belastungsstatistik innerhalb von bestimmten Arten von Konstruktionen und Bauwerken ist eine Voraussetzung für das Erreichen einer angemessenen Sicherheit gegen Ermüdung unter voller Berücksichtigung der wirtschaftlichen Aspekte.

Literaturhinweise

Wie bereits erwähnt, geht der Umfang der Literatur über Werkstoff- und Strukturermüdung ins Unermessliche, wobei nur ein Bruchteil der Publikationen von allgemeinem Interesse sind. In der *Schweiz* besitzt wohl das *Flugzeugwerk Emmen* (6032 Emmen) die umfangreichste Bibliothek auf diesem Sektor und ermöglicht überdies den Zugang zu den meisten Publikationen der ICAF-Mitgliedstaaten. Eine wahre Freude für den Spezialisten, jedoch unüberblickbar für den in diesem Gebiet unerfahrenen Ingenieur oder Konstrukteur.

Hier einige Titel, die dem Nichtspezialisten die Vertiefung einiger in diesem Beitrag erwähnten Begriffe erleichtern sollen.

Norm SIA 151: Stahlbauten (1979)

«Fatigue as a Design Criterion», von T.V. Duggan und *J. Byrne* (MacMillan, 1977). Eine gute Einführung in das Gebiet der Ermüdung. Die wichtigen Begriffe werden erklärt, wobei das Gewicht auf die Konstruktionspraxis gelegt wird. Ohne Vereinfachungen kommen die Verfasser nicht aus; wer mehr wissen möchte, findet zahlreiche Referenzen für ein vertieftes Studium (164 Seiten mit zahlreichen Abbildungen).

«Manuel sur la fatigue des structures – Aspects physiques fondamentaux», von *W.G. Barrois* (AGARD, 1970). Dieses Werk ist als Synthese der damaligen Kenntnisse auf dem Gebiet der Strukturermüdung konzipiert worden. Obwohl in der Zwischenzeit Fortschritte erzielt worden sind, ist dieses Handbuch immer noch ein wertvolles Lehrmittel. Dank der Verwendung neuester Erkenntnisse bis ins Jahr 1970 hat der Verfasser – zugleich Ingenieur und Forscher – ein Buch von dauerdem Wert geschaffen (300 Seiten, 259 Figuren, 452 Referenzen, darunter sehr spezialisierte Beiträge; existiert auch in englischer Sprache).

«Fatigue Design Procedures», herausgegeben von *E. Gasser* und *W. Schütz* (Pergamon Press, 1969). Es handelt sich um die *Proceedings* des 4. ICAF-Symposiums in München (1965). Obwohl die Referate in erster Linie dem Flugzeugbau gewidmet sind, findet man wertvolle Informationen über die Ermüdungsprobleme aus der Sicht des Konstrukteurs, die allgemeine Gültigkeit haben.

«Colloquium Proceedings Lausanne 1982», herausgegeben von der IVBH. Darin sind alle Vorträge gesammelt, die am Kolloquium gehalten werden. Mehr als hundert Beiträge geben einen Überblick über den heutigen Stand, insbesonders was das Bauwesen anbelangt.

Adresse des Verfassers: *J.-P. Weibel,* dipl. Ing. ETH, 1141 Vufflens-le-Château.