

# Seilbahnhänge: Ermüdungsbeanspruchte Tragstruktur: Anwendung von Leichtmetall

Autor(en): **Steurer, Tony**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **98 (1980)**

Heft 51-52

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74290>

## **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.

# Seilbahngehänge: Ermüdungsbeanspruchte Tragstruktur

## Anwendung von Leichtmetall

Von Tony Steurer, Zürich

### Ausgangslage

Der Bauteil zwischen dem Laufwerk und der Kabine wird bei Seilbahnen als *Gehänge* bezeichnet. Die Kabine als Fassungsraum der Fahrgäste ist mittels dieser Tragstruktur gelenkig am eigentlichen Fahrzeug, dem Laufwerk «angehängt» (Bild 1).

Neben einer rein statischen Beanspruchung durch Eigen- und Nutzlasten erfährt das Gehänge durch den Fahrtrieb infolge *Be- und Entladen* sowie durch die aus der Bewegung herrührenden sog. *Massenkräfte* auch oft wiederholte Beanspruchungen. Da bekanntlich Spannungen, auch wenn sie weit unter der Streckgrenze des verwendeten Materials liegen, bei hinreichend grosser Zahl von Lastwechseln zum Bruch führen, wird die Bemessung und Gestaltung des Gehänges weitgehend durch dessen Ermüdungsverhalten bestimmt.

Die folgenden Überlegungen beziehen sich vornehmlich auf Gehänge von *Pendelbahnen*; Anlagen, die im Pendelbetrieb funktionieren, und Kabinen mit Fassungsvermögen bis rund 125 Personen aufweisen.

### Verwendete Werkstoffe

Gehänge lassen sich hinsichtlich des verwendeten Materials in *Tragstrukturen aus Stahl oder Leichtmetall* ordnen. Bei Stahlausführungen wird normalerweise Fe 360 eingesetzt; vereinzelt findet man Fe 510, doch ergibt sich ermüdungstechnisch gegenüber der niedriger legierten Sorte keine Vorteile, da der Ermüdungsnachweis nach SIA 161 (Ziffer 3 085 3) die Stahlsorte vernachlässigt. Einzelne ältere, geschweisste Rohrfachwerkgehänge sind in CrMo 60 ausgeführt. Die Leichtmetall-Konstruktionen bestehen hauptsächlich aus zusammengesetzten Profilen und mechanischen Verbindungen, wofür ausschliesslich Anticorodal-100 (AlMgSi1), warm ausgehärtet, eingesetzt wird. Einzelne geschweisste Querschnitte sind mit dem in Umgebungstemperatur selbsttätig aushärtenden Unidur-100 (AlZn4,5Mg1), warm ausgehärtet, ausgeführt.

Die Werkstoffwahl erfolgt oft nach dem Gesichtspunkt des *erzielbaren geringsten Gewichts*, da hierdurch in begrenz-

tem Umfang die Dimension der Gesamtanlage (Seildurchmesser, Laufwerk-Dimensionen, Antriebslast usw.) beeinflusst werden kann. Dies führt zu aufgelösten, feingliederigen Konstruktionen mit dem Drang zu intensiverem Ausnutzen des Materials, was ein Ansteigen der Arbeitsspannungen hervorruft und das Ermüdungsverhalten vermehrt in den Vordergrund rückt.

Der *Wirkungsgrad* der Konstruktion lässt sich anhand des Verhältnisses von aufgewendetem Eigengewicht je Fahrgast grob abschätzen. Neuere Gehängekonstruktionen weisen ein Leistungsgewicht von 9–13 kg/Person bei Leichtmetall- und 11–17 kg/Person bei Stahlausführungen auf. Die vermutete Gewichtsersparnis bei der Verwendung von Aluminium wird bestätigt, doch erlaubt dies keine quantitativen Folgerungen, da massgebende Einflüsse, wie Gehängelänge (Auswirkung des Ausnahmefalles Trageilbremse), Trasse, statische Ausbildung, vorhandenes Sicherheitsniveau usw., im Leistungsgewicht unberücksichtigt bleiben.

### Safe-life oder fail-safe

Ein Bemessungskonzept geht grundsätzlich von den möglichen Schadenfolgen beim Ausfall eines Bauteils oder gar der ganzen Tragstruktur aus und legt daran das Zuverlässigkeitsniveau fest.

Die beiden, auf ermüdungsbeanspruchte Tragstrukturen ausgerichteten Sicherheitskonzepte «safe-life» und «fail-safe» sind vom *Flugzeugbau* her bekannt. Das erste kann als *Lebensdauersicherheit* bezeichnet werden, bei der jeder Ermüdungsschaden über die festgelegte Nutzungsdauer ausgeschlossen wird. Diese Forderung verlangt neben der genauen Erfassung der Belastungen auch die zugehörigen Kenntnisse über das Ermüdungsverhalten der untersuchten Konstruktion. Diesbezügliche Unzulänglichkeiten führen – unter Wahrung der geforderten Sicherheit – zwangsläufig zu Überdimensionierungen.

Die Verhinderung jeglichen dynamischen Schadens ist dagegen nach der «fail-safe»-Methode unwirtschaftlich und unerreichbar. Der Schaden, hervorgerufen durch dynamische Anrisse, gekoppelt mit deren Ausbreitgeschwindigkeit, muss dabei durch entsprechen-



Bild 1. Pendel-Luftseilbahn

den Unterhalt und Inspektion begrenzt bleiben. Als Extremfall der Schadenbegrenzung kann der Begriff der *Ausfallsicherheit* geschaffen werden. Trotz lokalem Versagen eines Bauteils muss die Tragstruktur in der Lage sein, über eine *beschränkte Dauer* ihre Aufgabe zu erfüllen.

Es stellt sich die Frage, nach welchem Konzept die Bemessung eines Gehänges erfolgen soll. Grundsätzlich kann die Kombination beider Prinzipien, mit differenzierter Gewichtung, dem hohen Sicherheitsbedürfnis sowie den Gegebenheiten bei Gehängekonstruktionen am besten Rechnung tragen. Der Schwerpunkt liegt, im Gegensatz zum Flugzeugbau, bei der *Lebensdauersicherheit*.

Gegen eine globale Anwendung der Schadensbegrenzung sprechen hauptsächlich zwei *Schwierigkeiten*. Die dazu erforderliche *intensive Wartung und Inspektion* lässt sich bei Gehängen nur schwer durchführen; kritische Stellen (z. B. Anschluss Gehängekopf) sind oft nur durch Zerlegung zugänglich. Ausserdem sind *gesicherte Bemessungswerte für den Zeitfestigkeitsbereich* nur *beschränkt vorhanden* und der Gewinn gegenüber der Dauerfestigkeit eher gering. Die üblichen Betriebsüberwachungen und die im Rhythmus der Revision erfolgenden Kontrollen erfassen nur augenfällige Veränderungen, wie z. B. der Bruch einzelner Schrauben oder die übermässige Verformung einzelner Elemente. Damit lässt sich lokal das Prinzip der *Ausfallsicherheit*, im

Sinne einer genügenden quasi-statischen Restbruchtragfähigkeit, anwenden.

Eine Ausfallsicherheit des Gehänges kann durch die entsprechende statische Ausbildung in Form innerlich statisch unbestimmter Systeme (Fachwerke, vgl. Bruchversuch an Gehänge [1]) sowie der konstruktiven Ausbildung mittels parallel geschalteter Bauteile geschaffen werden. In dieser Sicht monolithische Bauteile, wie der Gehängekopf oder der einteilige Tragholm, lassen sich nicht im Sinne einer Kräfteumlagerung ausbilden, doch verbessern rissbegrenzende Massnahmen deren Ausfallsicherheit. Den ganzen Bemühungen jedoch ist das Hauptziel – die ermüdungsgerechte Ausbildung – übergeordnet. Der bei Fachwerkausbildung im Vergleich zur einteiligen Konstruktion höheren Ausfallsicherheit steht jedoch das ungenauere Erfassen der lokalen Beanspruchungszustände in den Knoten sowie die allgemein höhere Kerbempfindlichkeit gegenüber. Es bleibt somit offen, welche Konstruktionsart hinsichtlich der Gesamtsicherheit vorzuziehen ist.

## Allgemeines zur Ermüdungstheorie

Der Wunsch nach einer mathematischen Formulierung der Lebensdauerfunktion, basierend auf einer möglichst geringen Anzahl experimentell bestimmter Kennwerte, bestand seit jeher. Die bekannte Vielzahl der das Ermüdungsverhalten beeinflussenden Grössen mag die Komplexität des Problems und seine schiere Unlösbarkeit veranschaulichen. Im Laufe der Zeit wurde hierzu eine grosse Anzahl Ansätze, ausgehend von empirischen, statistischen oder bruchmechanischen Überlegungen, vorgeschlagen. Die meisten verfolgen das Ziel, mittels Extrapolation der im Zeitfestigkeitsbereich gewonnenen Versuchspunkte den Dauerfestigkeitsbereich zu beschreiben.

### Ermüdungstheorie von Stüssi

Eine bekannte Arbeit auf diesem Gebiet ist die «Theorie der Dauerfestigkeit» von Stüssi die in ihren Grundzügen bereits 1946 [2] vorlag und später durch seine umfangreichen Untersuchungen (z. B. [3,4]) ergänzt, verfeinert und abgestimmt wurde. Der Geltungsbereich erstreckt sich auf alle metallischen Werkstoffe und somit auch auf die Leichtmetall-Legierungen. Anhand einer einzigen Funktion wird das gesamte Wertefeld, Kurzzeitfestigkeit über Zeitfestigkeit zur Dauerfestigkeit, in kontinuierlichem Verlauf erfasst.

Der auf phänomenologischer Theorie beruhende Ansatz besteht aus zwei

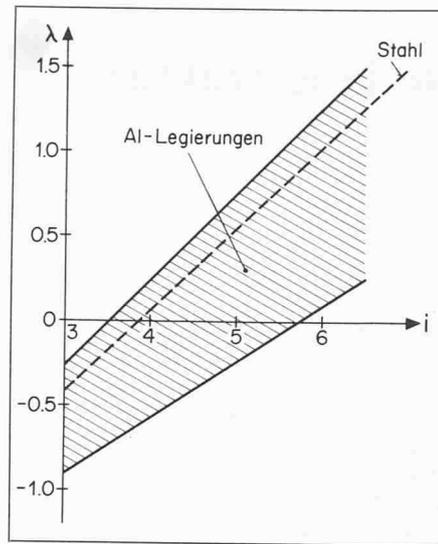


Bild 2. Ermüdungsfunktion  $\lambda$  in Abhängigkeit vom Material

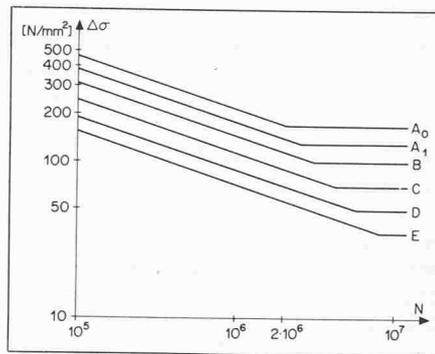


Bild 3. Ermüdungsfestigkeit nach Norm SIA 161

Grundaussagen:

1. Die Langzeitformel für die Wechselfestigkeit  $\sigma_w$

$$(1) \quad \sigma_w = \frac{\sigma_{ou} + f_w \cdot \sigma_{aw}}{1 + f_w}$$

Die ertragbare Wechselfestigkeit  $\sigma_w$ , bei vorgegebener Lastwechselzahl  $N$  bzw.  $\log N = i$ , ist dabei ein gewogenes Mittel zwischen der statischen Zugfestigkeit  $\sigma_{ou}$  und der Dauerwechselfestigkeit  $\sigma_{aw}$ . Nach Auswertung verschiedener Versuchsreihen zeigt Stüssi einen einfachen Verlauf der Gewichtsfunktion  $f_w$ :

$$\lambda = \log f_w = \log \frac{\sigma_{ou} - \sigma_w}{\sigma_w - \sigma_{aw}} = p \cdot i + \lambda_0$$

$f_w$  kann als eigentliche Ermüdungsfunktion bezeichnet werden, die durch die materialabhängigen Konstanten  $p$  und  $\lambda_0$  sowie durch die Lastwechselzahl bzw. den Logarithmus  $i$  bestimmt ist. Somit ist die Wöhlerlinie für die Wechselfestigkeit ( $\sigma_m = 0$ ) ungekerbter, einachsiger- und einstufiger, zugbeanspruchter Teile definiert.

2. Erweiterung des Anwendungsbereichs durch Erfassen des Wechsel- und Schwellbereichs ( $\sigma_m > 0$ ) und des Kerbeeinflusses:

$$(2) \quad \Delta\sigma = \frac{\sigma_w - C_1 \cdot \sigma_m}{1 - C_2 \cdot \sigma_m} \cdot 2$$

$$\text{mit } C_1 = \frac{\sigma_{ou} \cdot \sigma_w + \chi^2 + \varphi^2}{\sigma_{ou}^2 + \chi^2 + \varphi^2}$$

$$C_2 = \frac{1 - C_1}{\sigma_{ou}}$$

Die ertragbare Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma_m$  lässt sich somit, bei vorgegebener Lastwechselzahl  $N$  und Mittelspannung  $\sigma_m$ , in Verbindung mit der materialabhängigen Kriechkonstante  $\chi^2$  ( $\chi^2 = 0$  bei Stahl) und der mittlungsabhängigen Kerbfunktion  $\varphi^2$  bestimmen.

Durch Einsetzen der Gleichung (1) in (2) ergibt sich, dass die Steigung der Ermüdungsfunktion  $\lambda$  bei unterschiedlicher Kerbwirkung und Mittelspannung konstant bleibt und einzig durch diese Einflüsse parallel verschoben wird.

### SIA 161 – Ansatz Stüssi

Die in der Norm wiedergegebenen Zeitfestigkeitsgeraden (Bild 3) basieren auf umfangreichen Versuchen [5] an geschweissten I-förmigen Biegeträgern. Die Kerbeeinflüsse werden fünf Gruppen zugeordnet, die als Parallelen ( $A_1 - E$ ) zur Anfangsgeraden  $A_0$  dargestellt sind. Im Bereich geringer und hoher Lastwechsel (sog. Low Cycle: LC – Kurzzeitfestigkeit bzw. High Cycle: HC – Dauerfestigkeit) werden die Zeitfestigkeitsgeraden durch Horizontalen begrenzt.

Der Ermüdungsnachweis erfolgt über die Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$ , die Lastspielzahl  $N$  sowie die konstruktive Gestaltung mittels der zugehörigen Ermüdungskategorie ( $A_1 - E$ ). Die Einflüsse infolge unterschiedlicher Stahlsorten und veränderlicher Mittelspannung bleiben unberücksichtigt bzw. werden vernachlässigt. In Wirklichkeit ist dies bei grosser Kerbschärfe zutreffend; bei Teilen mit geringen Eigenspannungen und schwachen Kerbwirkungen (glatter Stab, Nietkonstruktionen) dagegen ist der Einfluss deutlich spürbar.

Vergleicht man die Normenwerte mit der Theorie von Stüssi, so können zwei grundlegende Feststellungen gemacht werden:

- Die nichtlineare Regression nach Stüssi ergibt im doppellogarithmischen Diagramm im Zeitfestigkeitsbereich erwartungsgemäss keine Gerade, doch sind deren Abweichungen davon sehr gering. Die etwas grösseren Differenzen in den beiden Übergangsbereichen sind auf den, aus Vereinfachungsgründen – physikalisch zwar unmöglichen –, genickten Verlauf zurückzuführen (Bild 4).
- Stüssi zeigt, dass ab Lastwechsel  $i > 5$  das Verhältnis der ertragbaren Spannungsamplitude von ungekerbter zu gekerbter Form annähernd konstant bleibt. Dies bedeutet, dass die Wöhlerlinien für ungekerbte und gekerbte Ausbildungen, sowie für verschieden starke Kerbeeinflüsse untereinander,

in zweifachlogarithmischer Darstellung annähernd parallel verlaufen müssen, was der Darstellung der Norm entspricht.

**Leichtmetall-Legierungen**

Verlockend wäre nun, eine dem Baustahl ähnlich komprimierte und vereinfachte Darstellungs- und Bemessungsart für Leichtmetall-Legierungen zu schaffen. Analytische Überlegungen anhand der *Ermüdungstheorie von Stüssi* sowie alle experimentellen Werte zeigen, dass sicher zwischen den Legierungsarten unterschieden werden muss, aber innerhalb der einzelnen Typen Vereinfachungen möglich sind.

Generell ist die Abnahme der Schwingfestigkeit im Vergleich zur statischen Bruchfestigkeit bei Leichtmetall-Legierungen bedeutend ausgeprägter als bei Stahl, was sich durch eine gesamthaft stärkere Neigung der Wöhlerlinie ausdrückt. Die starke Ermüdungsempfindlichkeit wird extrem bei hochfesten Legierungen, vor allem im Bereich der Ursprungsbeanspruchung, ersichtlich. Die Auswirkungen können derart sein, dass Legierungen mit niedrigeren statischen Kennwerten absolut höhere Dauerfestigkeiten erreichen. Ähnlich verhält es sich mit der Kerbempfindlichkeit, wobei sich die Werte im Dauerfestigkeitsbereich mit zunehmender Kerbschärfe angleichen.

Die Beeinflussung der Ermüdungsfestigkeit durch das Niveau der Mittelspannungen ist bei Leichtmetall-Legierungen im Vergleich zu Baustahl, besonders bei positiver Mittelspannung, ausgeprägter, wobei diese Beeinträchtigung mit zunehmender statischer Festigkeit der Legierung massiv anwächst. Die sog. *Mittelspannungsempfindlichkeit M* zeigt den qualitativen Einfluss.

$$M = \frac{\sigma_{R=-1} - \sigma_{R=0}}{\sigma_{m R=0}}$$

mit  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

Die unter Kerbwirkung bei Stahlausführungen starke Abnahme des Mittelspannungseinflusses ist bei Leichtmetallen dagegen nicht in diesem Umfang feststellbar.

Bei einer vorgegebenen Gehänge-Lebensdauer von rund 30 Jahren wird insbesondere das Verhalten bei Lastwechselzahlen  $i > 5$  interessieren. Nach der Theorie von *Stüssi* sowie der Auswertung verschiedener experimenteller Werte [6] lassen sich die Wöhlerlinien für die üblich verwendete Legierung AlMgSi 1 in diesem Bereich im zweifachlogarithmischen Massstab gut als Gerade approximieren. Ausserdem ist die Kerbziffer in diesem Lastspielbereich bei gleicher Mittelspannung konstant, womit der Einfluss der Kerb-

schärfe bzw. des Konstruktionsdetails ebenfalls durch zum ungekerbten Grundmaterial *parallele* Wöhlerlinien angenähert werden kann (Bild 6).

Der Dauerfestigkeitsbereich von AlMgSi 1 ist bei schwacher Kerbung mit  $2,5 \cdot 10^6$  Lastwechsel, bei scharfer Kerbung (Stabanschlüsse, seitliche Knotenbleche, Quersteifen usw.) hingegen erst bei rund  $10^8$  Lastwechsel, erreicht.

**Betriebslasten/Beanspruchungen bei Gehängen**

Dem Konstrukteur von Gehängen gibt die einschlägige Vorschrift [7] einzig Festwerte für die Nutzlast, die Bremslast und die Ausnahmelast Tragseilbremsung. Im Idealfall dagegen orientiert sich die Bemessung eines vorwiegend dynamisch beanspruchten Bauteils nicht nur an der Grösse der Belastungen sondern auch an deren Auftretenshäufigkeit und Reihenfolge. Zu den eigentlichen äusseren Lasten addieren sich systeminterne, aus dem Bewegungsablauf hervorgehende, massenabhängige Lasten. Beide zusammen ergeben das für das Ermüdungsverhalten massgebende Lastspektrum.

**Lasten**

Von der Bemessungsseite her lassen sich die angreifenden Lasten nach ihrer Auftretensintensität in quasi-statische (LC-Bereich: statische Festigkeit) und dynamische (HC-Bereich: Dauerfestigkeit) Grössen unterteilen:

- *Statische Lasten:*

- Eigengewicht\*)
- Nutzlast\*)
- Notbremsung
- Tragseilbremsung
- Anstoss an Puffer
- Querpendelung (Wind)
- Laufwerkschlingern
- Prüflasten

- *Dynamische Lasten:*

- Be- und Entladung
- Stützenüberfahrt\*\*)
- Dämpfungsbremse\*\*)
- Anstossen an Führungen\*\*)
- Zugseilschwingungen\*\*)
- unrunde Laufrollen\*\*)
- unebene Fahrbahn\*\*)

Eigengewicht und Nutzlast\*) als Masse beeinflussen die mit \*\*) bezeichneten Lasten.

**Häufigkeit und Auftretenscharakteristik**

Der statische Tragfähigkeitsnachweis bietet lastseitig gesehen keine besonderen Probleme. Die dabei massgebenden Grössen sind durch die Vorschrift hinreichend genau erfasst. Im allgemeinen wird der Ausnahmelastfall Tragseilbremsung bestimmend.

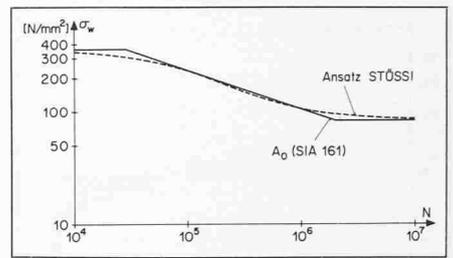


Bild 4. Vergleich Normansatz-Stüssi an der ungekerbten Probe unter der Annahme gleicher Randwerte

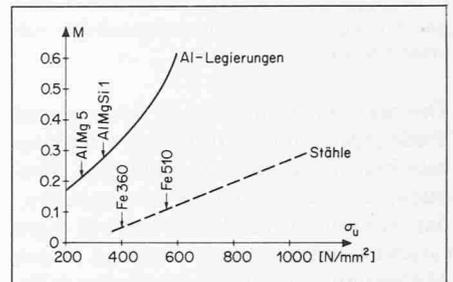


Bild 5. Mittelspannungsempfindlichkeit M in Abhängigkeit der statischen Zugfestigkeit

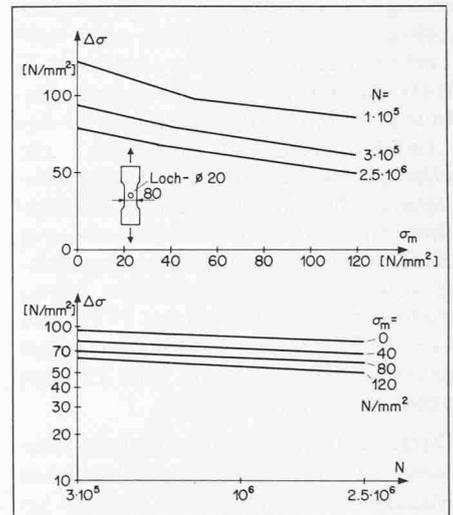


Bild 6. AlMgSi 1; 99 Prozent Überlebenswahrscheinlichkeit bei einem statistischen Vertrauensgrad von 90 Prozent [6]

Ein exakter Ermüdungsnachweis dagegen wird durch die bestehenden Unklarheiten betreffend Grösse, Häufigkeit und Form der dynamischen Lasten verunmöglicht.

*Nutzlast/Be- und Entladen*

Bei Kabinen mit einem Fassungsvermögen von mehr als 15 Personen wird je Fahrgast 75 kg als Lastannahme vorgeschrieben. Vor allem bei Bahnen in Skigebieten dürfte dieses Mittel eher einen unteren Wert darstellen, da sich zum eigentlichen Körpergewicht noch zusätzlich gewichtige Ausrüstungen addieren. Diese Feststellung kann auch aus durchgeführten Messungen [8] abgelesen werden, nach denen das Mittelgewicht deutlich höher (etwa 82 kg, Streuung ± 13,7 kg) liegt (Bild 7).

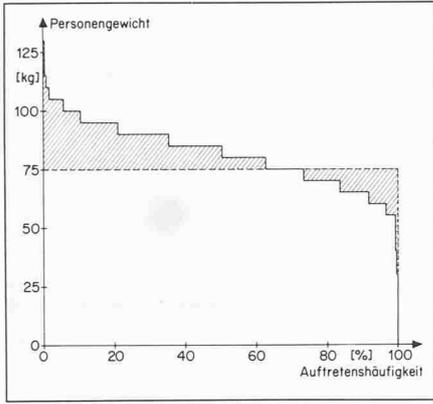


Bild 7. Gemessene Personengewichte und ihre Auftretenshäufigkeit

Das Be- und Entladen am Anfang und Ende jeder Fahrt stellt in sich ein dynamischer Vorgang mit niedriger Frequenz dar. Neben der daraus entstehenden Spannungsamplitude bewirkt diese Grundlastschwankung ebenso eine Mittelspannungsänderung für die während der Fahrt überlagerten Schwingungen.

Im Mittel werden pro Jahr und Gehänge rund 8100 Fahrten (Standardabweichung 3900) durchgeführt, was bei einer Lebensdauer von 30 Jahren rund  $3 \cdot 10^5$  Lastwechsel ergibt. Da bekanntlich nicht durchwegs mit voll besetzter Kabine gefahren wird, entscheidet für das Ermüdungsverhalten demnach die Häufigkeitsverteilung der Kabinenbelegung. Die Auswertung der Fahrprotokolle eines Jahres dreier repräsentativer Bahnen zeigt bezüglich Belegungsdichte folgende Gemeinsamkeiten: Maximalwerte treten nur bei etwa 25 Prozent bzw. 10 Prozent der Fahrten auf, wobei deutlich zwischen Berg- und Talfahrt unterschieden werden muss.

Dargestellt im Summenhäufigkeitsnetz und im einfachlogarithmischen Massstab ist ein linearer Verlauf erkennbar, aus dem sich für den Ermüdungsnachweis ein Grundlastkollektiv ableiten lässt (Bild 9).

### Stützenüberfahrt

Der vom Übergang von weicher zu harter Fahrbahn sowie der Gefällsänderung herrührende massenabhängige Lastfall Stützenüberfahrt wird im allgemeinen mit dem masse- bzw. spannungsvergrößernden Stossfaktor  $\varphi_s$  (Vorschrift  $\varphi = 1,4$ ), bezogen auf die Vertikallasten, abgedeckt. Die Auswertung verschiedener an bestehenden Bahnen durchgeführter Messreihen [9, sowie eigene Messungen] zeigt den dominanten Einfluss der Masse und der Fahrgeschwindigkeit. Geometrische Parameter, wie Trassee, Sattelradius, Stützenkonstruktion treten weniger markant in Erscheinung und werden in den folgenden Betrachtungen vernachlässigt. Den aufgeführten Beanspruchungen überlagern sich durchwegs ge-

ringe, hochfrequente Torsionsschwingungen.

Die Messwerte zeigen deutlich eine Erhöhung des Stossfaktors unter zunehmender Geschwindigkeit sowie eine Verringerung desselben mit steigender Zuladung, wobei unter hohen Lasten eine Näherung an eine Horizontale erfolgen wird. Ebenso besteht ein Unterschied zwischen Berg- und Talfahrt; bei der letzten sind grössere entlastende Werte erkennbar, die von der im allgemeinen grösseren talseitigen Gefällsänderung nach der Stütze herrühren werden.

Die Anzahl der Lastamplituden je Stützenüberfahrt ist bahnhabhängig und schwankt zwischen 5 und 30 Lastspielen bei einer Frequenz von rund 0,5 bis 5 Hz, wobei jeweils nur ein bis zwei Ausschläge den Maximalwert erreichen (Bild 11).

Die bei der Stützenüberfahrt entstehende Zentrifugalkraft – abhängig von der Geschwindigkeit und dem Stützensattelradius – bewirkt eine Verminderung der Mittellast (5–20 Prozent); der Zuganteil aus überlagerter Pendelung wird dadurch entsprechend vergrössert.

Die aus Messungen ermittelten Stossfaktoren beziehen sich auf starre Nutzlasten (Betonwürfel). Die in Wirklichkeit *federnde Personenlast* wirkt sich auf diese günstig aus.

### Dämpfungsbremse

Die bei der Stützenüberfahrt auftretende Zentrifugalkraft sowie die beim Anfahren und Verzögern hervorgerufenen Trägheitskräfte verursachen entsprechende *Längspendelungen*. Die jeweiligen Gefällsänderungen in der Fahrbahn bewirken ebenso ein Pendeln, jedoch mit geringerem Ausschlag. Diese «Schaukelbewegungen» werden einerseits durch die Lagerreibung am Gehängezapfen und andererseits durch mechanische Dämpfer abgeschwächt; die letzten wirken entweder direkt am Gehängezapfen oder über eine Kolbenstange am Gehängefuss (Teleskopdämpfer).

Die Bremsvorrichtung am Gehängezapfen kann der mechanischen Wirkungsweise nach in *Reibungsdämpfer* und *hydraulische Dämpfer* unterteilt werden. Grundsätzlich erzeugen beide am Gehängkopf eine Momentenbelastung MY (vgl. Bild 15), die sich aber deutlich hinsichtlich der Auftretenshäufigkeit und Intensität unterscheiden.

Der Reibungsdämpfer bewirkt eine eigentliche Erhöhung der Lagerreibung; bis zum Überschreiten der definierten Momentenlast MY gilt das Gehänge als mit dem Laufwerk starr verbunden, womit für eine Pendelung vorerst immer das volle Moment überwunden werden muss. So wird beispielsweise

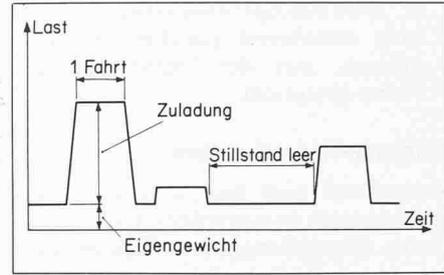


Bild 8. Grundlastschwankung infolge Be- und Entladens

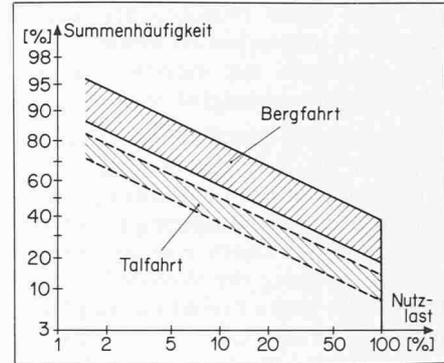


Bild 9. Summenhäufigkeit der Nutzlast

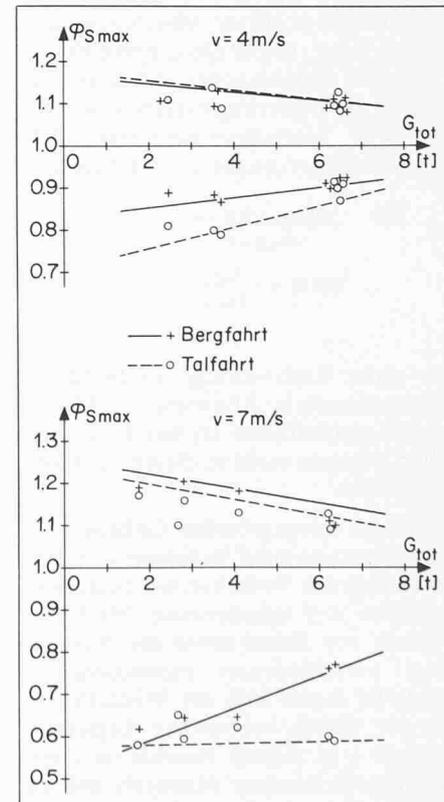


Bild 10. Stossfaktor  $\varphi_s$  aus Stützenüberfahrt in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der angehängten Totlast (Eigengewicht Gehänge, Kabine plus Nutzlast)

se bei der kontinuierlichen Gefällsänderung immer wieder das volle Reibungsmoment aufgebaut, bis der Hebelarm infolge Auslenkung mit der Masse zusammen das bestimmte, entgegenwirkende Moment erreicht. Bei den üblichen hydraulischen Dämpfern dagegen ist die Bremswirkung von der Frequenz der Pendelung bzw. deren Beschleunigung abhängig. Langsame Bewegungsvorgänge (Gefällsänderung, Anfahren, Verzögern) sind nur durch die normale Lagerreibung sowie eine gewisse Vorspannung (etwa 40 Prozent MY) behindert, ansonsten bleiben diese ungedämpft. Die internen Leckverluste jedoch sind derart, dass bei solchen Vorgängen keine oder nur geringe Vorspannung aufgebaut werden kann. Die Vollwerte für MY werden einzig bei grossen Pendelbeschleunigungen (Stützenüberfahrt, Notbremsungen) erreicht. Die retardierende und sanfte Wirkungsweise dieser Dämpfungsart macht sich damit in der Häufigkeitsverteilung bemerkbar. Durchgeführte Messungen zeigen je Stützenüberfahrt bei Reibungsdämpfern fünf bis sechs Vollauschläge, bei der hydraulischen Vorrichtung deren zwei bis drei. Im Feld dagegen ist der Unterschied bedeutender; die Lastzahl ist wohl bei beiden Ausführungsarten ungefähr die gleiche (abhängig von Trasse und Feldlängen), das Beanspruchungsniveau jedoch liegt beim Reibungsdämpfer immer in der Nähe des maximalen Momentes MY, bei der hydraulischen Bremse dagegen bedeutend niedriger (nur Lagerreibung und beschränkte Vorspannungswirkung).

Die zu erwartende Häufigkeit lässt erkennen, dass es sich um ein Problem der Dauerfestigkeit handelt und besonders bei auf die Momentenbeanspruchung MY empfindlichen Gehängeformen ausschlaggebend ist.

Die Auslegung der Dämpfungskapazität bezieht sich normalerweise auf die Masse und die Gehängelänge. Deren aufnehmbare Höchstbeanspruchung ist durch die Produktwahl genau bestimmt. Als Richtwert gilt  $MY = \pm 100 \text{ Nm/Fahrgast}$ .

*Anstossen an Führungen*

Das Anstossen der Kabine an die Führungen, vor allem bei der Stationseinfahrt (exzentrische Nutzlast infolge Aussteigensdrang der Fahrgäste), ergibt hauptsächlich *Torsions- (Querstoss) und Biegebelastungen (Längs- und Querpendelung)*. Je Fahrt ist somit sicher eine massenabhängige Lastamplitude zu erwarten, deren Grösse jedoch nicht genau bekannt ist. Als Bemessungslast wird eine an ungünstigster Stelle auf Kabinenbodenhöhe angreifende Last von 200 N/Fahrgast festgelegt, die für die statische Bemessung zutreffen mag,

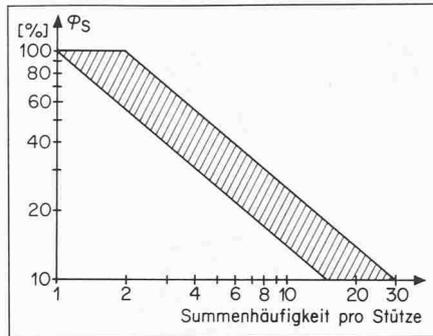


Bild 11. Auftretenshäufigkeit des Stossfaktors  $\phi_s$  je Stützenüberfahrt

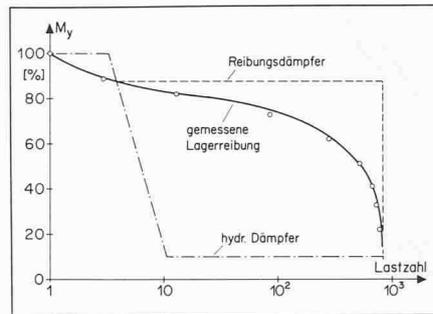


Bild 12. Häufigkeitscharakteristik bei Momentenbeanspruchung MY von Reibungsdämpfer und hydraulischem Dämpfer, ausgehend von einer gemessenen Häufigkeitsverteilung der Lagerreibung für eine Berg- und Talfahrt

für den Ermüdungsnachweis dagegen – wie Beobachtungen zeigen – eher zu hoch ist.

*Störschwingungen im Feld*

Das Erscheinungsbild der im Feld gemessenen Schwingungen erlaubt keine genaue Zuordnung bzw. Entkoppelung in Zugseilschwingungen, unrunde Laufrollen, unebene Fahrbahn usw. Diese sog. *Störschwingungen* sind der Grundlast (Eigengewicht+Nutzlast) als Wechselamplitude überlagert, wobei die durch allfälliges Längspendeln im Feld erzeugte Zentrifugalkraft die Mittelast geringfügig anhebt.

Wie im Stützenbereich dominiert im Feld eine von der Vertikallast abhängige Massekraft, ausdrückbar mit dem Stossfaktor  $\phi_F$ . Die aus verschiedenen Messungen ermittelten Werte dazu sind jedoch im Feld durchwegs niedriger. Ebenso lässt sich auch hier eine gesetzmässige Abhängigkeit zwischen dem Stossfaktor, der Grösse der angehängten Masse und der Geschwindigkeit erkennen.

Im Feld liegt die Schwingfrequenz, im Vergleich zur Stützenüberfahrt, mit 5 bis 12 Hz bedeutend höher, was in Abhängigkeit der Feldlänge zu sehr hohen Lastspielzahlen führt. Interessant für das Ermüdungsverhalten ist dabei die Verteilcharakteristik (Bild 14).

Nach Auswertung verschiedener Bahnen lässt sich die Häufigkeitsverteilung im einfach logarithmischen Diagramm

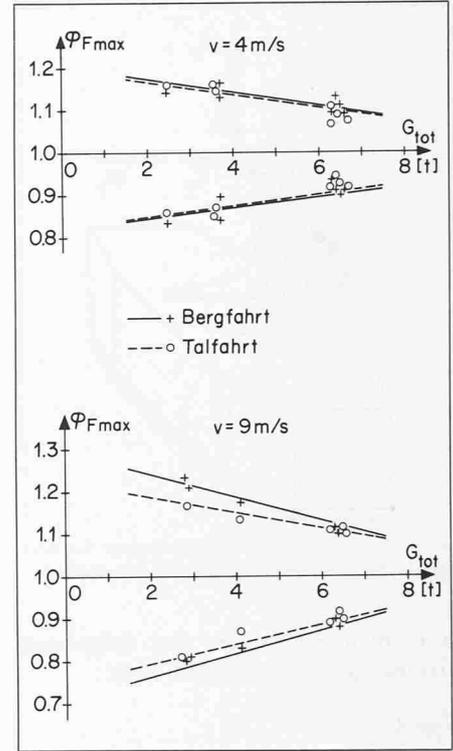


Bild 13. Stossfaktor  $\phi_F$  im Feld in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der angehängten Totlast (Eigengewicht Gehänge, Kabine plus Nutzlast)

in erster Näherung durch eine Gerade darstellen, wobei die jeweilige Steigung von der Feldlänge abhängt; je Feld wurden zwischen  $10^2$  und  $10^4$  Lastspiele gezählt.

**Beanspruchung im Gehänge – statische Modelle**

Die am Gehänge wirkenden Beanspruchungen lassen sich mit den vorne erwähnten, am Gehängekopf angreifenden Ersatzlasten, darstellen (Bild 15). Das Hauptanliegen beim Entwurf der globalen wie lokalen Tragstruktur – Wahl des Tragsystems sowie Ausbildung der Querschnitte und Konstruktionsdetails – wird, hinsichtlich eines günstigen Ermüdungsverhaltens, die Vermeidung hoher Spannungsamplituden sein. Die meisten im Gehängebau verwendeten Tragsysteme lassen sich

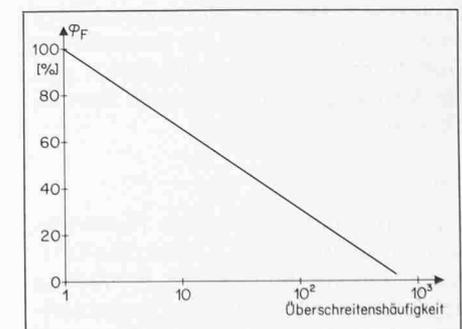


Bild 14. Charakteristik der Auftretenshäufigkeit des Stossfaktors  $\phi_F$  je Feld

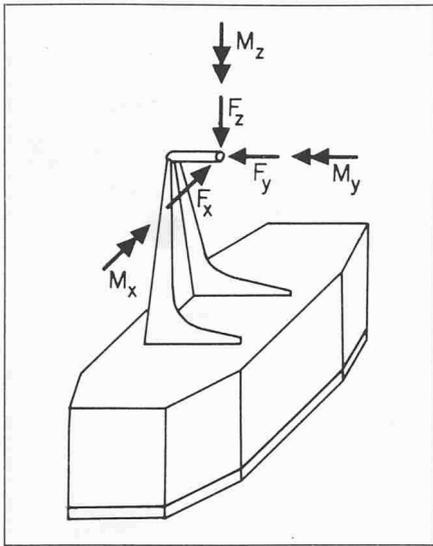


Bild 15. Ersatzlasten am Gehängekopf angreifend

prinzipiell einem der vier folgenden Grundtypen zuordnen (Bild 16):

#### Typ A

Die Kraftübertragung erfolgt über zwei zusammengesetzte I-Profile, die in gewissen Abständen durch Querschotten zu einem Rahmen verbunden sind. Die geringe Biegesteifigkeit der Tragholmen um die schwache Achse machen diese Ausbildung vor allem gegenüber entsprechenden Momenten  $M_Y$  (infolge Dämpfung) empfindlich; hohe dynamische Spannungsauslässe sind zu erwarten. Die Anordnung eines Teleskopdämpfers kann diese Wirkung entschärfen, so dass einzig die Lagerreibung aufzunehmen ist.

#### Typ B

Kastenförmige Wangenquerschnitte bewirken eine entscheidend höhere seitliche Biege- und Torsionssteifigkeit. Konstruktiv bietet der Anschluss des Kastens an den Gehängekopf gewisse Schwierigkeiten; vielfach erfolgt nur ein unvollständiger Anschluss, womit in diesem Bereich ein für das Ermüdungsverhalten ungünstiger, gestörter Kraftfluss besteht.

#### Typ C

Ein einziger torsions- und biegesteifer Kasten bietet für die Aufnahme der angreifenden Lasten keine besonderen Probleme. Das Ermüdungsverhalten wird vor allem durch die konstruktive Gestaltung des «Gehängeknicks» und der Verzweigungen im Bereich des Gehängefusses mitbestimmt.

#### Typ D

Eine räumlich angeordnete Fachwerkstruktur überträgt die Kräfte. Die kritischen Punkte hinsichtlich Ermüdung liegen insbesondere bei der konstruktiven Ausbildung der Anschlüsse und Knoten. Die damit zwangsläufig eingebauten Unstetigkeiten und örtlichen

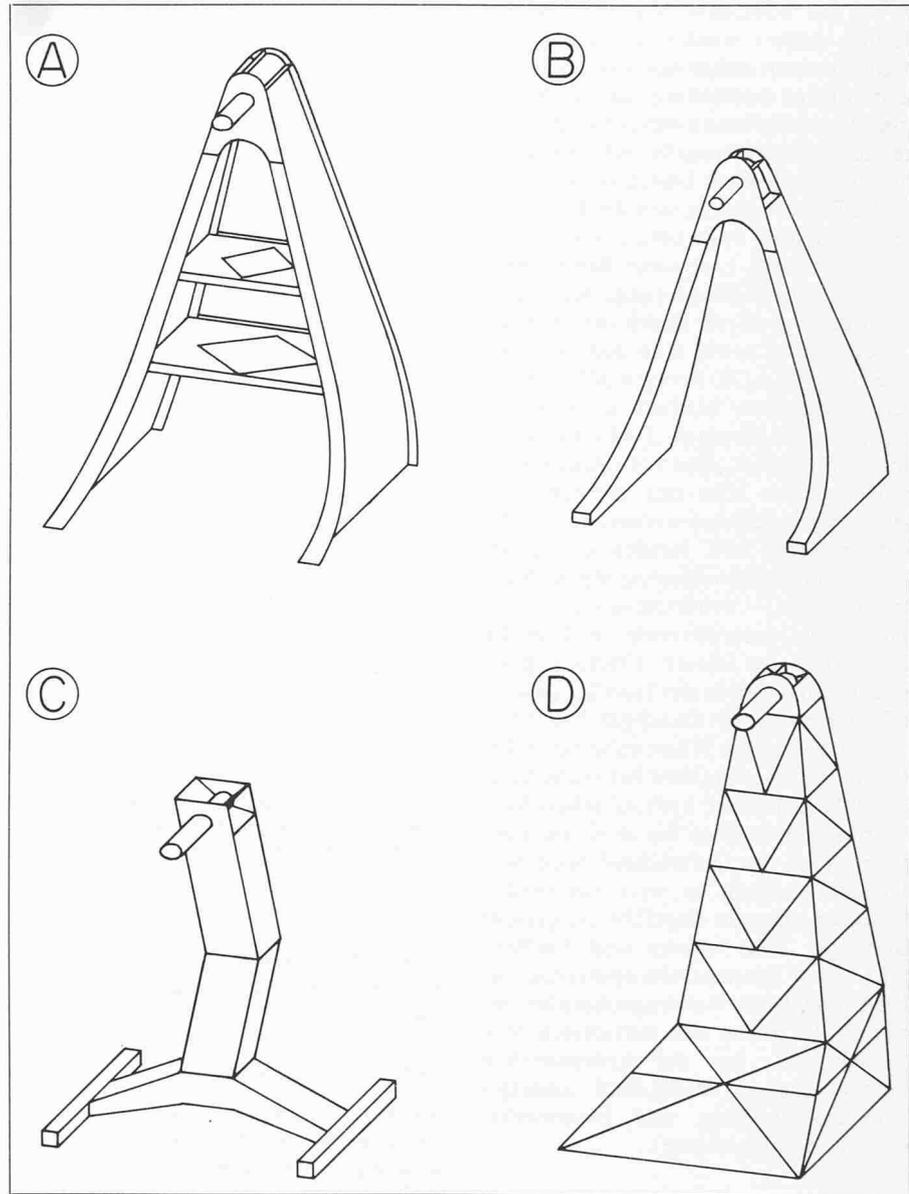


Bild 16. Grundsysteme der verwendeten Tragstrukturen

Kraftumlenkungen bewirken eine hohe Kerbschärfe.

Der Gehängekopf ist bei allen Ausbildungen durchwegs in Stahl ausgeführt. Die eigentliche Tragstruktur wird sowohl in Stahl als auch in Leichtmetall ausgebildet, wobei die beiden erstgenannten Typen (A und B) bevorzugte Leichtmetall-Ausführungen darstellen.

#### Berechnungsmodelle

Für die Berechnung der Schnittkräfte muss die wirkliche Tragstruktur bekanntlich durch ein Modell idealisiert werden. Das statische Ersatzsystem zur Bestimmung des globalen Schnittkraftverlaufs für die beiden Typen C und D ist offensichtlich: *räumliche Stabzüge*. Bei der Fachwerkausbildung stellt sich das Problem der Anschlusssteifigkeiten in den Knoten. Die Annahme eines vollstarrten Anschlusses ist unzutreffend und erzeugt irrealer Momente. Tatsächlich handelt es sich um eine elastische

Einspannung, deren Höhe nicht allgemein festgelegt werden kann, da diese neben der Anordnung der Verbindungsmittel auch von der jeweiligen Biege- und Torsionssteifigkeit der angeschlossenen Stäbe abhängt.

Ein ebenes Stabsystem für die Typen A und B stellt eine zu grobe Näherung dar, mit dem wohl einzelne Lastfälle relativ gut, andere dagegen gar nicht erfasst werden können. Auch hier gilt, als unterste Grenze der statischen Vereinfachung, das räumliche Stabsystem. Dabei stellt sich allgemein die Frage, inwieweit Vereinfachungen bei der Erfassung lokaler Ausbildungen, wie beim Anschluss Querschott an Hauptträger oder Hauptträger an Gehängekopf, den globalen Schnittkraftverlauf verfälschen. Ein kürzlich an unserem Institut abgeschlossenes Forschungsprojekt befasste sich mit diesem Problemkreis. Umfangreiche rechnerische Untersuchungen an verschiedenen Mo-

dellen klärten die Einflussintensität verschiedener Parameter. Die Modellbildung an sich wurde anhand verschiedener bestehender Messungen an Gehänge korreliert. Für die Bemessungspraxis geht daraus hervor, dass zur Ermittlung des globalen Schnittkraftverlaufs als Ersatzsystem ein räumlicher Stabzug, unter entsprechender Erfassung der Detailausbildung, genügt.

#### Lagerung

Die konstruktive Ausbildung im Bereich des Gehängefusses entscheidet über die Wahl der Lagerung bzw. die Art der Lasteinleitung. Die Verbindung mit der Kabine erfolgt in der Regel über Hängestangen oder über Seile, die bis zum Kabinenboden geführt sind. Infolge der Nachgiebigkeit dieser Aufhängevorrichtungen und des Kabinenbodens besteht im allgemeinen keine gegenseitige Beeinflussung von Kabine und Gehänge; als Lager werden Gelenke eingeführt. Erfolgt eine vom Gehängekopf zum -fuss hin kontinuierliche Verbreiterung der Hauptträger (Typ A und B), so genügt eine *Zweipunkt-Lagerung*; die Lasteinleitung geschieht über den Gehängezapfen.

Die Lagerung in x-Richtung erfolgt aus Symmetriegründen in der Mitte des untersten Querschottes bzw. auf der Höhe des Gehängebodens durch ein Auflager, das einzig einer X-Kraft standhält. Besteht ein gelenkiger Anschluss dieses Querschottes, so muss das Auflager zusätzlich ein Moment  $M_X$  aufnehmen, um die Instabilität des Stabes durch Rotation zu verhindern. Im Gehängekopf ist zudem aus Gründen der Gesamtstabilität eine Abstützung in x-Richtung erforderlich.

Eine im Gehängefussbereich sprunghafte, L-förmige Verbreiterung des Hauptträgers zu einem eigentlichen Querträger (Variation von Typ B) verlangt die wirkliche Vierpunkt-Lagerung (Bild 18).

Im Gegensatz zum erstgenannten Ersatzsystem ist es in diesem Fall einfacher, den Gehängezapfen als Lager einzuführen und die Lasten entsprechend verteilt an den vier Aufhängepunkten angreifen zu lassen. Es entfällt damit das für die Ableitung der horizontalen Auflagerkräfte aufwendige Stabsystem im Fussbereich.

#### Lokale Einflüsse

Lokale Ausbildungen müssen bei der Idealisierung als Stabsystem stark vereinfacht werden. Der Einfluss auf den globalen Schnittkraftverlauf durch vorgenommene Näherungen wird im folgenden dargestellt.

Die Wiedergabe des Gehängekopfes als einfacher T-förmiger Stabzug (Bild 17 und 18) scheint sehr ungenau, doch zeigen Vergleichsrechnungen, dass ihr

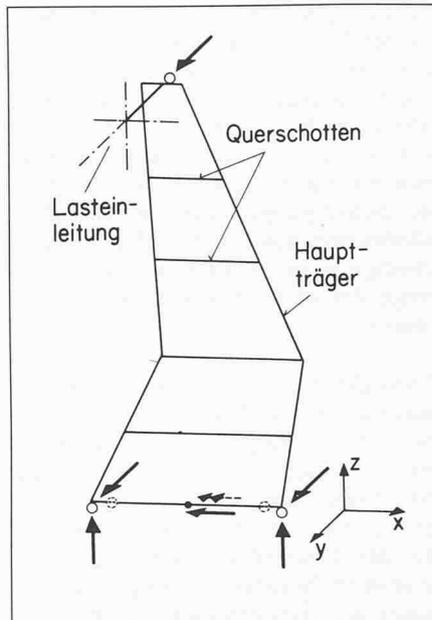


Bild 17. Statisches Ersatzsystem der Typen A und B mit Lagerungsbedingungen

Einfluss (Geometrie und Steifigkeitsverhältnisse) gering bleibt. Die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel für den Anschluss am Gehängekopf dagegen spielt für die Momentenverteilung im Hauptträger, insbesondere beim Typ A, eine bedeutende Rolle. Die *Anschlussnachgiebigkeit* bewirkt gegenüber der starren Ausbildung eine überproportionale Zunahme der Momente (schwache Achse) beim ersten Querschottanschluss unter geringer Abnahme der Beanspruchung im Kopfbereich. Diese für den Ermüdungsnachweis kaum zu vernachlässigende Tatsache ist aber in der Berechnung schwierig zu erfassen, da die effektiven Verhältnisse (Ersatz-Drehfedersteifigkeit) kaum exakt bestimmbar sind. Mittels einer Extremwertrechnung lassen sich aber die ausschlaggebenden Bemessungswerte eingrenzen.

Die Idealisierung des Querschottes als Stab beim Gehängetyp A und die damit verbundene Festlegung der zugehörigen Querschnittswerte ist vage. Eine innerhalb möglicher Grenzwerte durchgeführte Variation der Steifigkeiten zeigt einen geringen Einfluss auf den globalen Schnittkraftverlauf. Zudem kann der Anschluss an den Hauptträger durch den gleichen Stab nachgebildet werden, da die Aufteilung mit angepasstem veränderlichem Steifigkeitsverlauf ebenso vernachlässigende Auswirkungen hat.

Bei der Bestimmung der Spannungen aus den errechneten Schnittkräften sind dagegen die *lokalen Einflüsse* zu berücksichtigen. Das *shear lag* als Folge unvollständiger Anschlüsse (Gehängekopf-Hauptträger) oder nachgiebiger Verbindungsmittel zusammengesetzter Profile (Steg-Flansch) muss in die

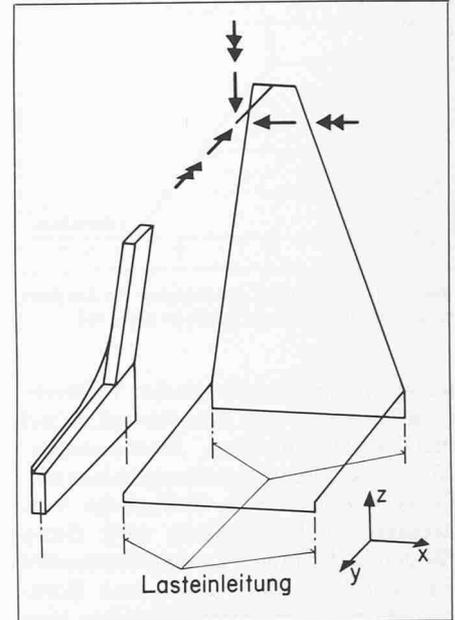


Bild 18. Statisches Ersatzsystem für Variante von Typ B

Spannungsermittlung einbezogen werden. Zudem stellt die Berücksichtigung der nichtlinearen Dehnungsverteilung bei gekrümmter Stabachse sowie die in diesen Bereichen bei aufgelösten Querschnitten vorhandenen Querbiegemomente eine weitere Verfeinerung der Spannungsbestimmung dar. Für eine genauere Erfassung des lokalen Schnittkraftverlaufs bei Anschlüssen und ähnlichem (Steifigkeitsänderungen, Exzentrizitäten, verschiedene Materialien usw.) kann ein Stabsystem offensichtlich kaum genügen; eine Modellbildung mit finiten Elementen ist unumgänglich.

Ausserdem muss man sich im klaren sein, dass die bei statischen Beanspruchungen bestehende *Proportionalität* zwischen äusserer Last und inneren Spannungen bei bewegten Vorgängen kaum zutrifft. Einerseits kann bei hohen Schwingfrequenzen der Zeitabschnitt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zyklen zu gering sein, damit sich statisches Gleichgewicht einstellt, und andererseits sind lokale plastische Verformungen mitverantwortlich. Die diesbezügliche Verfälschung ist jedoch im vorliegenden nicht besonders krass. Die angesetzten Lasten sind über Messungen am Bauteil und nicht über direkte Lastmessungen festgelegt und weisen zudem keine besonders hohe Frequenz auf. Im weiteren muss beinahe durchwegs für den Dauerfestigkeitsbereich bemessen werden, wodurch das Beanspruchungsniveau verhältnismässig tief liegt und somit die elastischen Verformungsanteile überwiegen.

#### Lebensdauervorhersage

Die im Normalfall dem Ermüdungs-

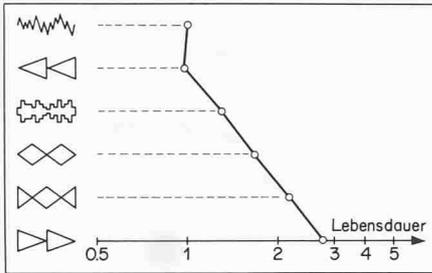


Bild 19. Lebensdauer in Abhängigkeit der Lastfolge bezogen auf stochastische Lastfolge nach [11]

nachweis zugrunde liegenden Wöhlerlinien basieren fast ausschliesslich auf den Werten aus sog. *Einstufenversuchen*, einem Beanspruchungsablauf einfachster Form. Eine verlässliche Vorhersage der Lebensdauer trifft einzig für den in der Praxis kaum auftretenden Fall der konstanten zyklischen Beanspruchung unter unveränderlicher Vorlast zu. Tatsächlich treten aber Betriebslasten unterschiedlicher Grösse, Häufigkeit und Reihenfolge auf. Um dennoch das zentrale Anliegen der Lebensdauervorhersage bei der Bemessung ermüdungsbeanspruchter Tragstrukturen – im vorliegenden die Bemessung neuer und die Nachkontrolle bestehender Gehänge – zu bewältigen, sind grundsätzlich zwei Lösungswege gangbar.

Die komplexen Betriebsbeanspruchungen lassen sich zu Gruppen gleicher Spannungsamplituden entflechten mit Bestimmung der zugehörigen Lastspielzahlen. Die somit erhaltenen Einstufenbeanspruchungen genügen einzeln den Wöhlerlinien, müssen aber als Ganzes mit Hilfe einer geeigneten *Schadensakkumulationshypothese* rechnerisch verknüpft werden. Allen Hypothesen vorangestellt ist die Vorstellung, dass die Teilschädigungen je Laststufe, linear oder nichtlinear, je nach Methode, akkumuliert werden. Eine der bekanntesten Methoden, jene von *Palmgren und Miner*, geht von einer linear fortschreitenden Schädigung aus. Dass die Teil-

schädigung je Schwingenspiel nicht allein von der Beanspruchungshöhe, sondern auch von der vorangegangenen Beanspruchungsgeschichte abhängt, bleibt unberücksichtigt. Der Reihenfolgeeinfluss ist aber, wie zahlreiche Untersuchungen zeigen, nicht vernachlässigbar. Die Schädigungstheorie nach *Stüssi* [10] integriert daher neben der linearen Schädigung des Materials eine gleichzeitige Abnahme des Widerstandsvermögens.

Eindrücklich lässt sich der Einfluss der Lastfolge auf die Lebensdauer anhand von Untersuchungen der NASA [11] an einer hochfesten Aluminium-Legierung (7000-Serie) darstellen (Bild 19). Trotz der Verfeinerung bei neueren Methoden der Lebensdauervorhersage, teilweise unter Berücksichtigung bruchmechanischer Überlegungen, führt die rechnerische Bestimmung oft zu Fehleinschätzungen, die einmal auf der sicheren, zum andern auf der unsicheren Seite liegen können.

Die zweite Möglichkeit einer Vorhersage der Lebensdauer besteht in der experimentellen Bestimmung der ertragbaren Schwingfestigkeit unter den vorgegebenen veränderlichen Beanspruchungen. Die exakteste Aussage ergäbe ein genaues Nachfahren der an der Bahn gemessenen Werte. Dieses Verfahren fällt jedoch für die praktische Anwendung ausser Betracht, da sowohl die genauen bahnabhängigen Beanspruchungswerte unbekannt sind als auch eine der geplanten Nutzungsdauer entsprechende Versuchsdauer kaum zur Verfügung steht. Zwischen diesem Grenzfall und jenem des Einstufenversuchs liegt das *normierte Last- bzw. Spannungskollektiv*, das einerseits die speziellen Betriebsbeanspruchungen berücksichtigt und andererseits durch eine Standardisierung eine allgemeinere Betrachtung des Werkstoff- und Bauteilverhaltens erlaubt.

Anhand der Auswertungen durchgeführter und geplanter Messungen an Gehängen wird an unserem Institut ein *Normkollektiv für Seilbahnen* zusammengestellt. Die Kollektivform ist grundsätzlich durch eine niederfrequente Mittelspannungsänderung, der eine verhältnismässig hochfrequente Schwingung überlagert ist, gekennzeichnet. Je Fahrt gilt die nutzlastabhängige Mittelspannung als deterministische Grösse, die zufolge den Einflüssen aus Stützenüberfahrt und Pendelung gering variiert. Die zugehörige Grösse selbst wird innerhalb des Gesamtkollektivs entsprechend der Häufigkeitsverteilung unter Berücksichtigung der Folge Berg-/Tal-Fahrt randomartig festgelegt. Die massenabhängigen Beanspruchungen aus Stützenüberfahrt und aus Störungen im Feld, deren Grösse direkt mit der Grundlast gekoppelt ist, zusammen mit den Dämpfungsmomenten ergeben die der Mittellast überlagerten Schwingungen. Anhand der mit dem erarbeiteten Auszählverfahren gewonnenen Werte lassen sich Random-Folgen dieser Schwingungen generieren, die nicht nur die Häufigkeit, sondern auch statistisch bewertet – ausgehend von der Übergangshäufigkeitsverteilung – die Reihenfolge wiedergeben.

### Beeinflussende Grössen der Schwingfestigkeit

Neben dem verwendeten *Material* gelten für das Schwingfestigkeitsverhalten einer Tragstruktur die *Spannungsdifferenz*  $\Delta\sigma$  sowie die *Mittelspannung*  $\sigma_m$  als eigentliche Kenngrössen. Diese beiden Spannungswerte sind bekanntlich nicht nur vom statischen System und deren Beanspruchung, sondern auch in starkem Umfang von deren konstruktiven Ausbildung abhängig. Jede Tragstruktur weist durch ihre konstruktive Gestaltung unvermeidbar *Störstellen*, sog. *Kerben* auf. Querschnittsänderungen, Ein- und Ausschnitte, Bohrungen, alle Verbindungen und Anschlüsse; *jede geometrische Unstetigkeit an sich verursacht eine Kerbwirkung*, die je nach Schärfe entsprechend lokale Spannungserhöhungen mit mehrachsiger und inhomogener Verteilung erzeugen. Wie stark das Ermüdungsverhalten durch solche Kerben bestimmt wird, zeigt die Darstellung von Bild 21.

Die Grundregel – die Kerben in spannungsarme, niedrigbeanspruchte Bereiche der Konstruktion zu verlegen – lässt sich hinsichtlich des Aufbaus der Tragstruktur nicht immer verwirklichen. So beim Gehänge, wo eine gewisse lokale Konzentration im Kopfbereich kaum vermieden werden kann. Einzig die angepasste konstruktive Formgebung so-

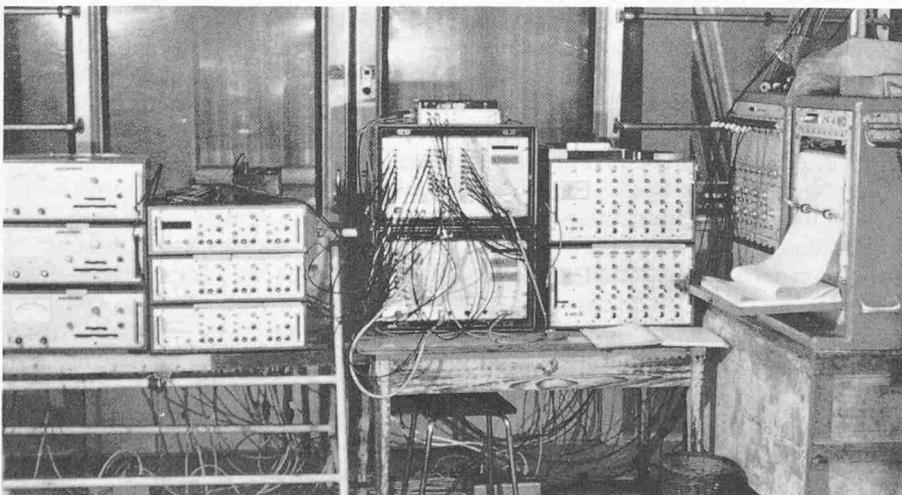


Bild 20. Dehnungsmessungen vom Institut in Zusammenarbeit mit der EMPA durchgeführt

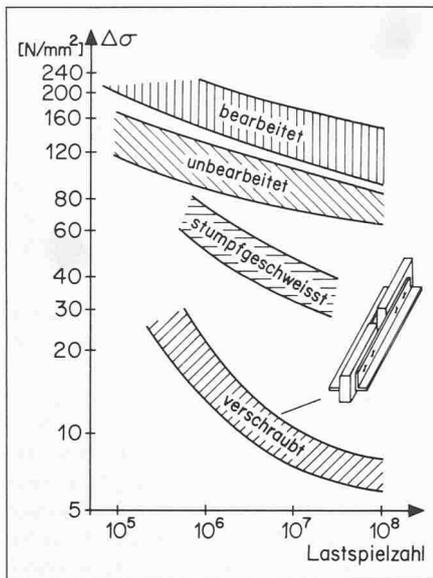


Bild 21. Einfluss der Kerben bei AlMgSi 1

wie sanfte Übergänge, vollständige Anschlüsse usw. kann die Kerbwirkung in diesem Bereich entschärfen.

Der Kerbe aus geometrischer Gestaltung überlagern sich zudem die Einflüsse infolge *fertigungstechnischer Massnahmen*, wie Kaltverformung, Oberflächenbehandlung (rauh, poliert, gerollt, kugelgestrahlt usw.) sowie Oberflächenschutz (Anstrich, Beschichtungen); Massnahmen, die Eigenspannungen erzeugen. Zusätzlich überlagern sich die Einflüsse aus Korrosion, Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Im Gehängebau sind hauptsächlich die *Verbindungszonen* von Bedeutung. Einer der meist gefährdeten Punkte hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens ist der bei Leichtmetall-Ausführungen *geschraubte Anschluss des Hauptträgers an den stählernen Gehängkopf*. Zu den geometrischen scharfen Kerben aus oftmals unvollständigen, einschnittigen und lokal exzentrischen Anschlüssen addieren sich die Einwirkungen aus dem Zusammenschluss zweier unterschiedlicher Metalle. Dazu gehören die Reibkorrosion in Verknüpfung mit der Oberflächenbehandlung und Beschichtung des Stahlteils (Anstrich, spritzverzinkt, feuerverzinkt) sowie der Vorspanngrad und das Lochspiel der Verbindungsmittel. Gesicherte Aussagen

über das zugehörige Ermüdungsverhalten, insbesondere bei der Verwendung von AlMgSi 1, bestehen nicht. Geplante Einstufen- und Normlastkollektiv-Versuche an axial- und biegebeanspruchten Stossausbildungen (zweischchnittiger Laschenstoss, einschnittiger Überlappungsstoss) und ganzen Bauteilen sollen darüber mehr Auskunft geben. Die *Einstufenversuche* erlauben ein relatives Einordnen der verschiedenen Einflussgrößen und schaffen damit erste Entscheidungskriterien für die Parameterwahl der anschließenden Normlastkollektiv-Versuche. Ausserdem liefern die gewonnenen Werte, verbunden mit einer geeigneten Schadensakkumulationshypothese, erste Bemessungsansätze, deren Absicherung und genauere Bestimmung schliesslich durch die Versuche mit standardisiertem Lastkollektiv erfolgen. Damit kann der für den Ermüdungsnachweis relevante Grad der Beeinflussung, durch die erwähnten gehängespezifischen Parameter, abgeklärt werden.

### Zusammenfassung

Beim Gehänge einer Seilbahn handelt es sich um eine überwiegend schwing- und damit ermüdungsbeanspruchte Tragstruktur. Die aus Betriebsmessungen an Gehängen gewonnenen Beanspruchungsverhältnisse, in Form von Grösse, Häufigkeit und Reihenfolge der wirkenden Lasten, erlauben eine erste Näherung bei der allgemeinen Festlegung der Beanspruchungen für den Ermüdungsnachweis. Es bedarf weiterer umfangreicher Messungen, um die aufgezeigten Ansätze zu verifizieren und zu verfeinern, mit dem Ziel, ein repräsentatives, standardisiertes Beanspruchungskollektiv zu schaffen.

Das Ermüdungsverhalten ist jedoch nicht allein vom möglichst genauen Erfassen der wirkenden Beanspruchungen, sondern auch von den konstruktionsbedingten Einflüssen abhängig. Die Auswirkungen gehängespezifischer Ausbildungen müssen anhand umfassender Versuche geklärt werden, damit eine sichere Bemessung und Nachkontrolle der Seilbahngehänge möglich wird.

### Literaturangaben

- [1] *Staffelbach, F.*: «Untersuchungen an einem Luftseilbahngehänge». Schweizer Archiv, November 1968
- [2] *Stüssi, F., Kollbrunner C. F.*: «Schrumpfspannungen und Dauerfestigkeit geschweisster Trägerstösse». Mitteilungen aus dem Institut für Baustatik, Nr. 18, ETH Zürich, 1946
- [3] *Stüssi, F.*: «Theory and test results on the fatigue of metals». Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Octobre 1959
- [4] *Stüssi, F.*: «Zur Durchführung und Auswertung von Ermüdungsversuchen». Theorie und Berechnung von Tragwerken, Springer Verlag, 1974
- [5] *Fisher, J. W. et al.*: «Effects of weldments on the fatigue strength of steel beams», NCHRP Report 102, Highway Research Board, Washington D. C. 1970 und «Fatigue strength of steel beams with welded stiffeners and attachments», NCHRP Report 147, Transportation Research Board, Washington D. C. 1974
- [6] *Schütz, W.*: «Schwingfestigkeit von AlMgSi 1 und AlMg 5 im gekerbten und unkerbten Zustand». Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Bericht Nr. FB-57, 1966
- [7] Seilbahnverordnungen vom 23.9.1963, Ausführungsbestimmungen vom 5.10.1963 und Zusatz vom Nov. 1963, Eidg. Amt für Verkehr, Bern
- [8] *Wettstein, H.*: «Zur Abhängigkeit des mittleren Personengewichtes von der Personenzahl». Mitteilung aus dem Institut für Bau- und Transportmaschinen, ETH Zürich, 1971
- [9] *Buxbaum, O.*: «Verfahren zur Ermittlung von Bemessungslasten schwingbruchgefährdeter Bauteile aus Extremwerten von Häufigkeitsverteilungen». Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Bericht Nr. FB-75, 1967
- [10] *Stüssi, F.*: «On the fatigue of metals with special reference to aluminium». Aluminium in Structural Engineering, Proceedings of a symposium, London, 11.+12.6.63. Aluminium Federation, Portland House, Stag Place, London
- [11] NASA: «Variable-Amplitude Fatigue Tests with Particular Attention to the Effects of High and Low Loads». TN D-1522, Dec. 1962

Adresse des Verfassers: *T. Steurer* dipl. Ing. ETH, Institut für Baustatik und Stahlbau, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich