

9. Experimentelle Lebensdauerabschätzung

Aus der Erkenntnis, dass einerseits eine dauerfeste Auslegung von schwingbeanspruchten Bauteilen mit der Forderung nach Leichtbau kollidiert, andererseits die Zeitfestigkeit stark von der Kollektivform abhängt, musste ein Weg gefunden werden, der eine ausreichende Sicherheit während der gesamten Nutzungszeit bei gleichzeitig wirtschaftlicher Konstruktion zu gewährleistet.

Die Forderung einer betriebsfesten Bemessungsweise setzt aber voraus, dass das Festigkeitsverhalten unter Schwingbeanspruchung mit veränderlicher Amplitude aus geeigneten Versuchen bekannt ist.

Im einfachsten Fall dient hierzu der mehrstufige Wöhlerversuch, bei dem eine Probe nach vorgegebenen Schema mit verschiedenen Lastamplituden bis zum Bruch geprüft wird. Der Versuchsaufwand ist vergleichsweise gering.

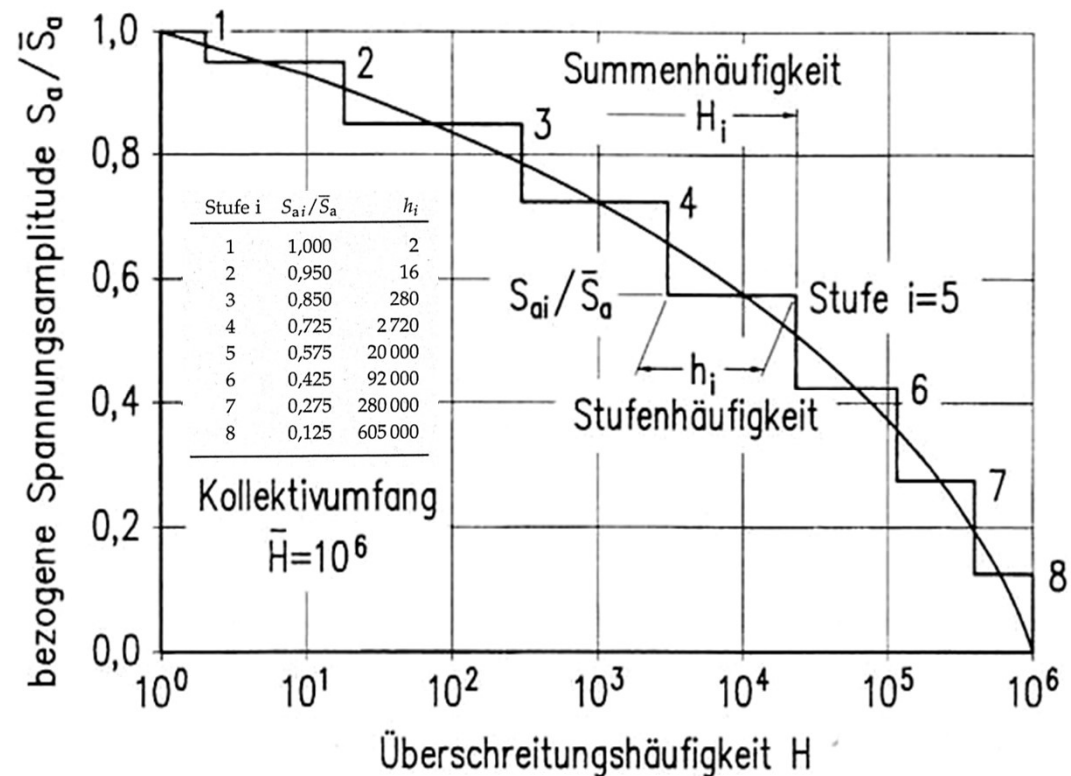
Genauerer Ergebnisse bei erhöhtem experimentellen Aufwand liefern Zufalls-lasten- bzw. Nachfahrversuche, bei denen betriebsähnliche Beanspruchungs-Zeitverläufe vorgegeben werden.

9.1 Blockprogramm-Versuch

Die ersten Versuche dieser Art wurden ab 1936 von E. Gaßner und A. Teichmann im Institut für Festigkeit der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) in Berlin-Adlershof unternommen.

Hierbei wird das Beanspruchungskollektiv durch eine Treppenkurve mit 8 Stufen möglichst gut angenähert. Die Stufenamplituden S_{ai} und die Stufenhäufigkeit n_i bilden das sog. Normkollektiv als Basis für den Blockprogramm-Versuch

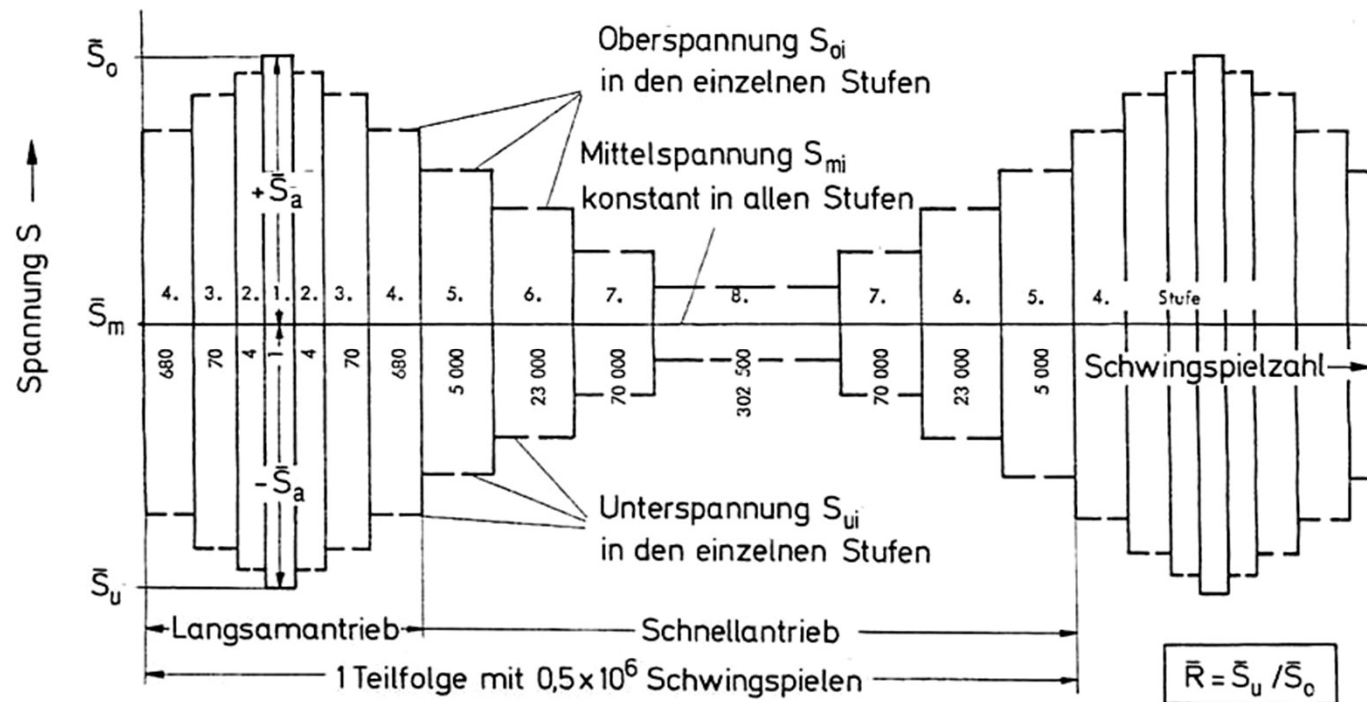
nach Haibach: Betriebsfestigkeit



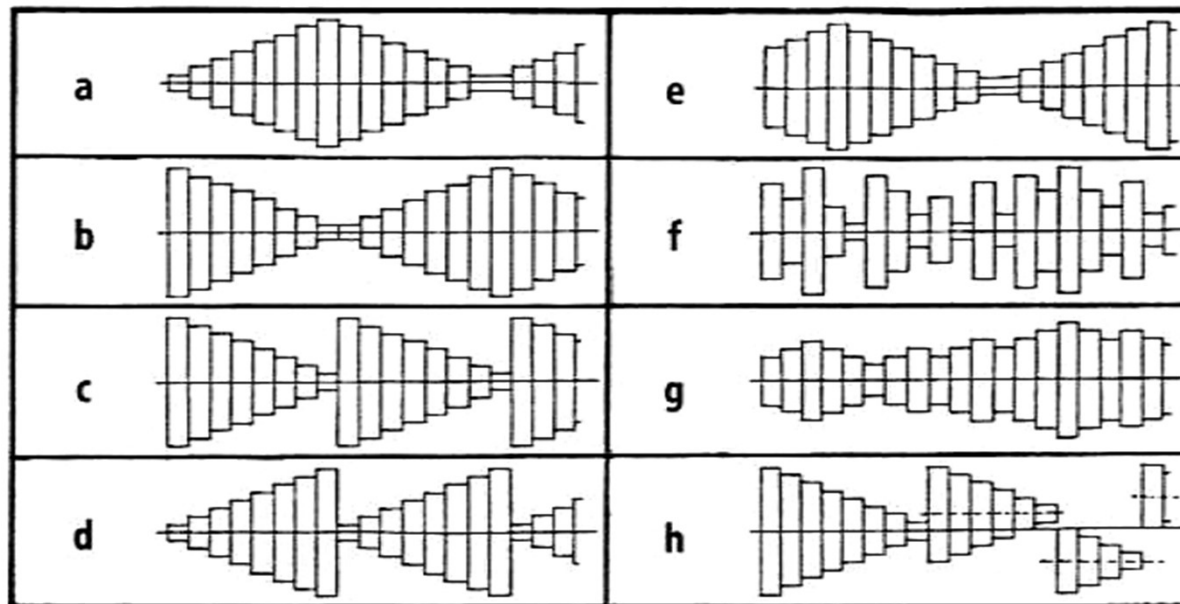
Um eine ausreichende Durchmischung kleiner und großer Amplituden zu gewährleisten, wird im Blockprogrammversuch die Stufenhäufigkeit in eine geeignete Anzahl von Teilfolgen zerlegt und beginnend mit einer mittleren Amplitude abwechselnd auf- und absteigend bis zum Versagen geprüft.

Beanspruchungsablauf im Betriebsfestigkeitsversuch mit Normverteilung

nach Haibach:
Betriebsfestigkeit



Verschiedene Varianten des Blockprogramm-Versuchs wurden entwickelt, haben aber nur wenig praktische Bedeutung erlangt.



Varianten für den Ablauf von Blockprogramm-Versuchen

nach Haibach: Betriebsfestigkeit

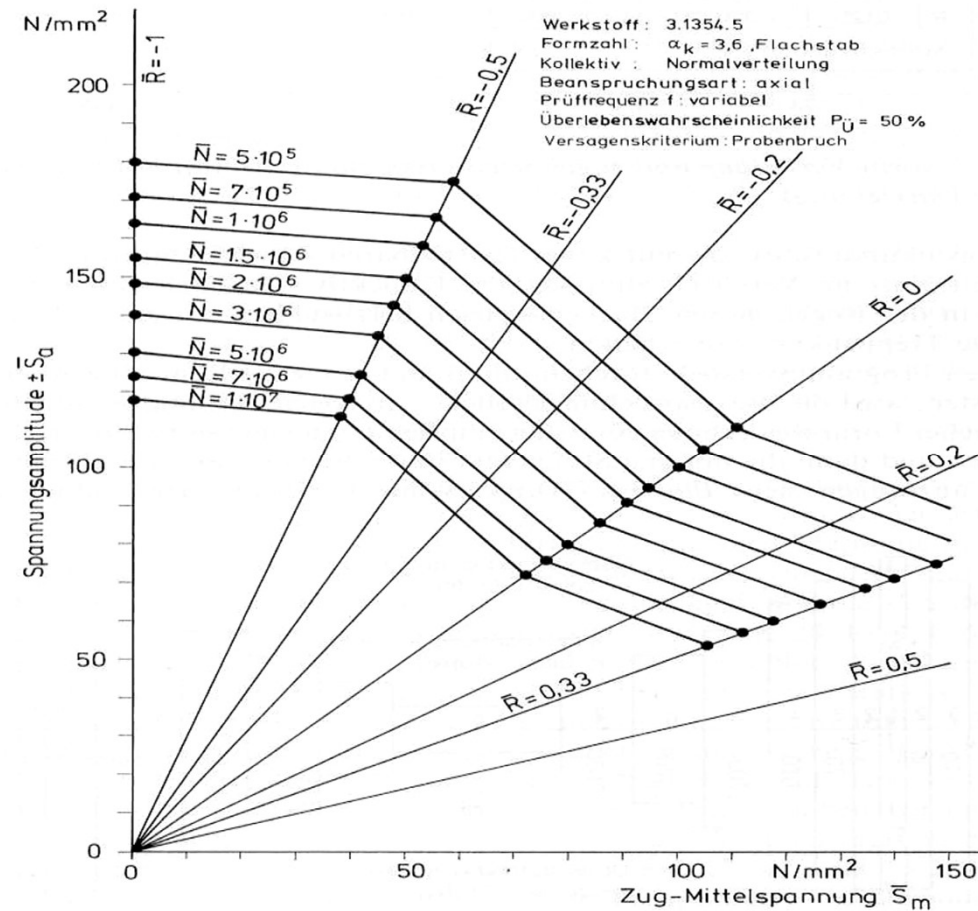
a auf-ab-Folge
b ab-auf-Folge
c ab-ab-Folge
d auf-auf-Folge

e Gaßner'sche auf-ab-auf-Folge
f Zufalls-Stufenfolge mit beliebigen Übergängen
g Zufalls-Stufenfolge mit Markov'schen Übergängen
h Amplituden mit unterschiedlichen Mittellasten

Die Ergebnisse aus Blockprogramm-Versuchen lassen sich auch in Betriebsfestigkeitsschaubildern nach Smith oder Haigh darstellen

Betriebsfestigkeitsschaubild nach Haigh für den Werkstoff AlCuMg2

nach Buxbaum: Betriebsfestigkeit



Vorteile des Blockprogramm-Versuch:

- Versuchsablauf einfach und durch wenige Parameter reproduzierbar
- Große Anzahl von Versuchsergebnissen verfügbar, die wesentliche Erkenntnisse zum Betriebsfestigkeitsverhalten von Werkstoffen liefern
- Gute Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Werkstoffen
- Lebensdauervorhersage mit Lebenslinien gegenüber einer rechnerischen Abschätzung über Wöhlerlinien verlässlicher

Nachteile:

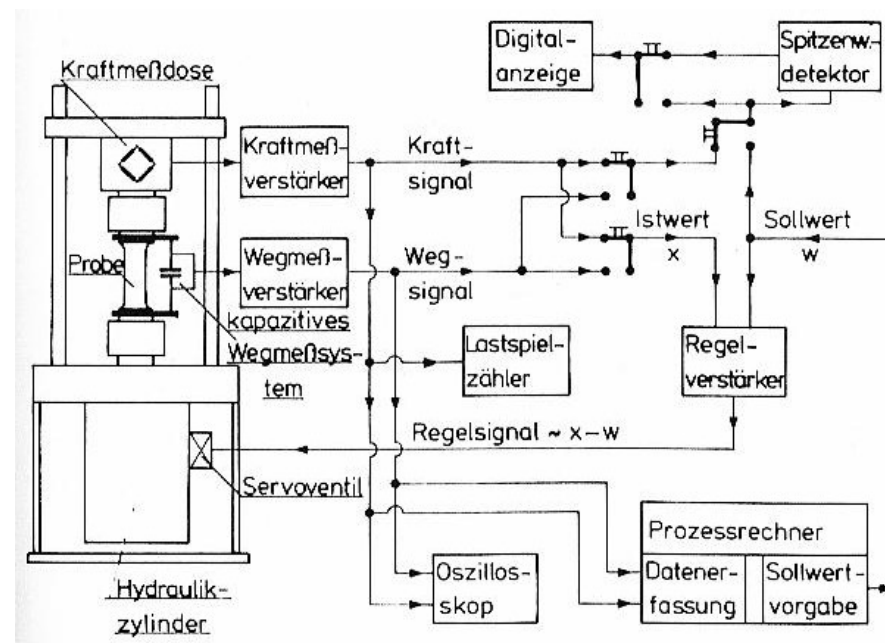
- Ohne weiteren Versuchs- und Auswertungsaufwand nur für konstante Mittelspannung anwendbar
- Lebensdauervorhersage tendenziell zu hoch (nicht konservativ)
- Frequenz- und Reihenfolgeinfluss wird nicht berücksichtigt

9.2 Zufallslasten-Versuch

Beim Zufallslastenversuch werden aus dem Beanspruchungskollektiv einer maßgeblichen Lastenfolge eine stochastischer Beanspruchungs-Zeitfunktion erzeugt.

Servohydraulischer Prüfstand für Zufallslastenversuch

aus Macherauch: Werkstoffkundepraktikum



Voraussetzung für die Durchführung derartiger Versuche war die Einführung servohydraulischer Prüfmaschinen, die seit ca. 1960 zu Verfügung standen.

Vorteile des Zufallslasten-Versuchs:

- Zur Generierung der Schwingungsbeanspruchung sind nur die wenigen Daten des Beanspruchungskollektivs notwendig
- Es lassen sich beliebig viele unterschiedliche Beanspruchungs-Zeitverläufe erzeugen
- Lebensdauervorhersage ist gegenüber dem Block-Programmversuch verlässlicher

Nachteile:

- Hoher prüftechnischer Aufwand
- Begrenzte Möglichkeit zur Verkürzung der Versuchslaufzeiten
- Frequenz- und Reihenfolgeeinfluss wird nur statistisch berücksichtigt
- Keine unmittelbare Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Beanspruchungs-Zeitverläufe

9.3 Nachfahrversuch

Dem Nachfahrversuch liegt in der Regel eine gemessene Last-Zeitfunktion zugrunde, die das gesamte oder häufiger einen repräsentativen Teil der Betriebsbeanspruchung umfasst.

Rüttelprüfstand der Firma BEP zur Simulation einer Fahrt auf einer Versuchsstrecke



Der Nachfahrversuch ist ein seit Jahrzehnten im Fahrzeugbau übliches Verfahren zum Nachweis ausreichender Betriebsfestigkeit.

Vorteile des Nachfahrversuchs:

- Wirklichkeitsnahe Ermittlung der Lebensdauer unter realen Bedingungen, da der Frequenz- und Reihenfolgeeinfluss berücksichtigt wird.
- Lebensdauervorhersage sowohl für Einzelbauteile als auch Bauteilgruppen möglich

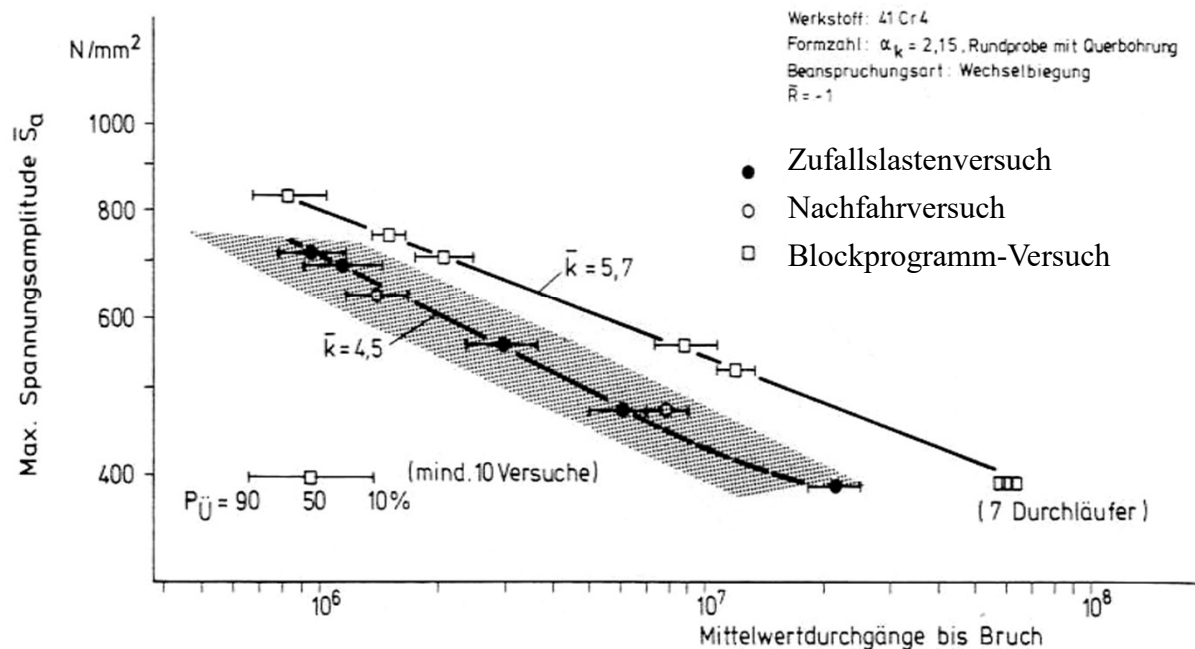
Nachteile:

- Hoher prüftechnischer Aufwand
- Der Beanspruchungsablauf muss bekannt sein (z. B. aus einem Fahrversuch)
- Geringe Möglichkeit zur Verkürzung der Versuchslaufzeiten
- Keine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Beanspruchungs-Zeitverläufen
- Nachweis der Betriebsfestigkeit beruht i. d. Regel auf Erfahrungen des jeweiligen Herstellers

Allgemein gilt, dass sich die in Zufallslasten- oder Nachfahrversuchen gewonnenen Lebensdauerlinien sowohl in Bezug auf ihre absolute Lage als auch hinsichtlich ihrer Neigung von Lebensdauerlinien unterscheiden können, die im Programmblock-Versuchen für gleiche Häufigkeitsverteilung an gleichartigen Versuchskörpern gewonnen wurden.

Lebensdauerlinien aus Programm-, Betriebslasten-, nachfahr- und Fahrversuchen

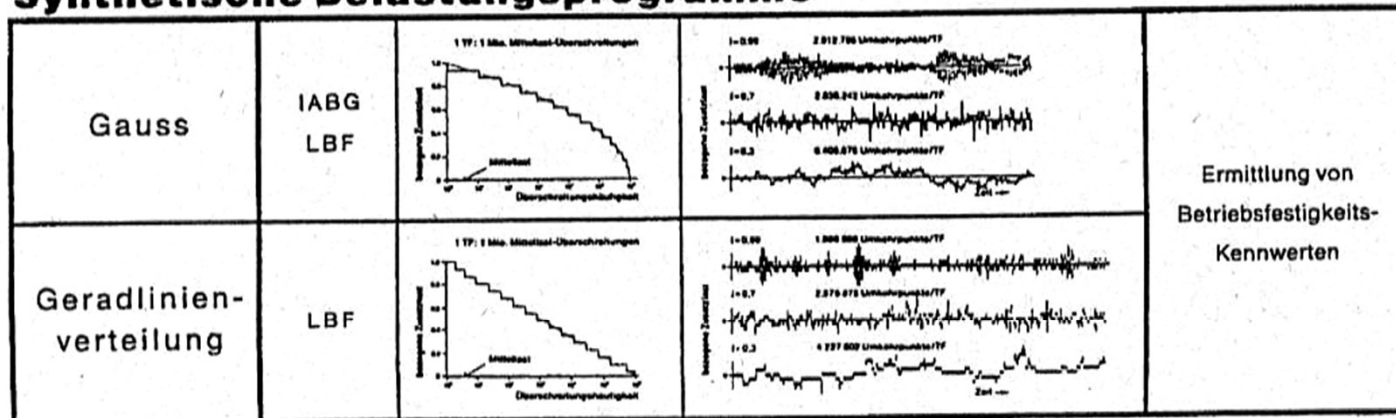
aus Buxbaum: Betriebsfestigkeit



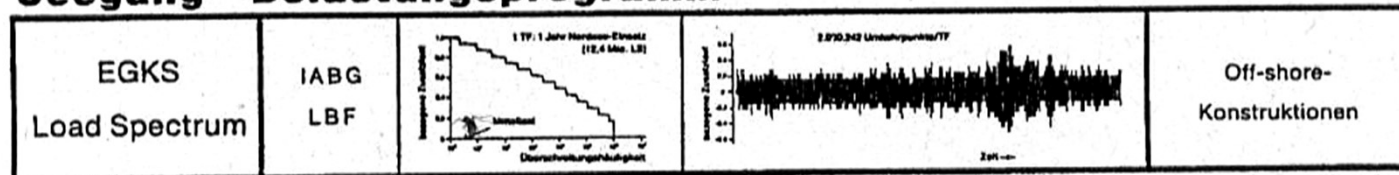
9.4 Versuche mit standardisierten Lastfolgen

Standardisierte Lastfolgen wurden für konstruktionstypische Anwendungsfälle aus einer größeren Zahl repräsentativer Messungen der Betriebsbeanspruchungen abgeleitet und dienen international als Bemessungsgrundlage für dynamisch beanspruchte Bauteile.

Synthetische Belastungsprogramme

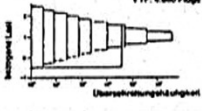
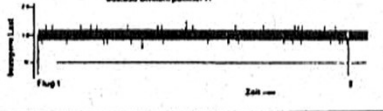
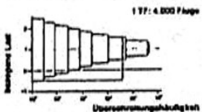
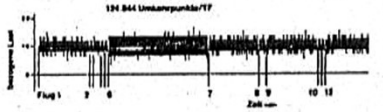
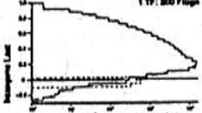
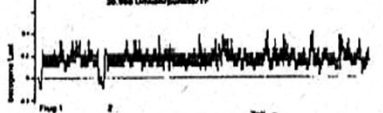
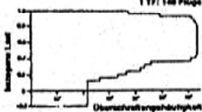
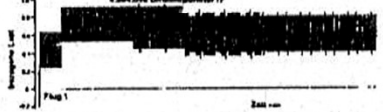
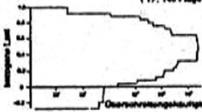

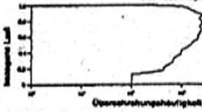
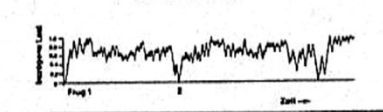


Seegang – Belastungsprogramm





Einzelflug – Belastungsprogramme

Name	Partner	LC-Kollektiv	Ausschnitt	Anwendung
TWIST Transport Wing Standard	LBF NLR			Flügelunterdecke von Transportflugzeugen
MiniTWIST verkürzte TWIST-Folge	LBF NLR			
FALSTAFF Fighter Aircraft Loading STandard For Fatigue evaluation	F+W Emmen IABG LBF NLR			Flügelunterdecke von Kampfflugzeugen
Helix H: Hinged rotors griech. ἑλίξ ἑσπέριον = Drehflügel	IABG LBF			Blattbereich von Hubschrauber- Gelenk-Rotoren
Felix F: Fixed rotors Felix Tourneçon: Pionier im Helikopterbau	MBB NLR RAE			
Cold TURBISTAN TURBine STANDARD	CEAT IABG LBF MTU NLR RAE RR			Verdichterscheiben von Strahltriebwerken
Cold MiniTURB verkürzte TURBISTAN-Folge	RWTH Aachen SNECMA Univ. Utah	