

Experimentelle Ermittlung von Wöhlerlinien großer Schrauben

T 3198

T 3198

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7838-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

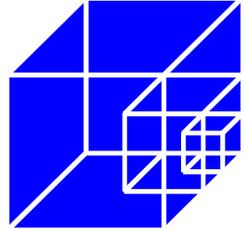
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



Forschungsbericht

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben ZP 52-5- 16.125-1231/06

„Experimentelle Ermittlung von Wöhlerlinien großer Schrauben“

- Forschende Stelle:** Institut für Stahlbau
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9A
30167 Hannover
- Leitung:** Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
- Bearbeitung:** Dipl.-Ing. Frithjof Marten
- Förderer:** Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 L
10829 Berlin
- Berichtsumfang:** 88 Seiten
- Datum:** Fassung vom 21.07.2008

Vorwort

Bei modernen stählernen Rohrtürmen von Windenergieanlagen (WEA) kommen hochfeste Schrauben großen Durchmessers in Ringflanschverbindungen zum Einsatz. Die Schrauben erfahren hohe dynamische Belastungen während des Betriebes mit über 10^9 Lastwechseln. Dem Ermüdungsfestigkeitsnachweis der Schrauben kommt somit eine große Bedeutung zu.

Nach gültiger Euronorm EN 1993-1-9 für den Baubereich wird für Schraubendurchmesser bis M30 unter Axialzug die Kerbfallklasse 50 angesetzt. Für größere Durchmesser wird die Kerbfallklasse mithilfe eines Reduktionsfaktors abgemindert. Die Formel zur Ermittlung des Reduktionsfaktors ist abhängig vom Durchmesser. Die Einordnung des Bauteils „Schraube“ in die Kerbfallklasse 50 sowie die Formel zur Ermittlung des Reduktionsfaktors beruhen auf Versuchsergebnissen an Schrauben kleiner M36. Es ist bislang unklar, ob diese Kerbfallklasse im Zusammenhang mit dem Reduktionsfaktor auch für Schraubendurchmesser größer M36 auf der sicheren Seite liegt.

Neben der Zugbeanspruchung erfahren Schrauben in Ringflanschverbindungen von WEA auch Biegebeanspruchung. Für diesen Belastungsfall kann die Euronorm entsprechend interpretiert werden, dass auch für diese Beanspruchungsart die Kerbfallklasse 50 angewendet werden kann. Für eine Biegebelastung existiert allerdings kein eigener Kerbfall.

Aus diesen Gründen wurde das Institut für Stahlbau der Universität Hannover mit Datum vom 01.04.2006 vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) beauftragt, das Forschungsvorhaben „Experimentelle Ermittlung von Wöhlerlinien große Schrauben“ ZP 52-5- 16.125-1231/06 durchzuführen.

In diesem Vorhaben werden Wöhlerlinien an Schrauben M48 10.9 tZn unter reinem Zug und reiner Biegung experimentell ermittelt.

Die Autoren danken dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) für die finanzielle Förderung und die konstruktive Unterstützung bei der Durchführung dieses Vorhabens.

Die Autoren bedanken sich bei dem Betreuer des Forschungsprojektes, Herrn Dr.-Ing. Karsten Kathage.

Weiterhin bedanken sich die Autoren bei den Personen und Firmen, die durch ihre gute Zusammenarbeit das Vorhaben unterstützt haben:

Jörg Blume (Schraubenwerk Zerst GmbH), Dr.-Ing. Volker Dünkel (Fuchs Schraubenwerk GmbH), Dr.-Ing. Uwe Hasselmann (Peiner Umformtechnik GmbH), Patrick Junkers (Barbarino & Kilp GmbH), Bruno Schliwa (August Friedberg GmbH), Joachim Weigel (Peiner Umformtechnik GmbH)

Hannover, Juli 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	8
1.1	Problemstellung.....	8
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	9
2	Wissensstand	10
2.1	Allgemeines.....	10
2.2	Normative Situation	10
2.2.1	Ermüdungsfestigkeit.....	10
2.2.2	Versuchsdurchführung	12
2.3	Axialschwingversuche	12
2.4	Biegeschwingversuche	14
3	Statistik	16
3.1	Allgemeines.....	16
3.1.1	Statistische Grundbegriffe.....	16
3.1.2	Verteilungsdichtefunktionen	16
3.2	Verfahren für Versuchsdurchführung im Übergangsbereich.....	17
3.2.1	Treppenstufenverfahren	17
3.2.2	Abgrenzungsverfahren	17
3.3	Verfahren für Versuchsdurchführung im Zeitfestigkeitsbereich	18
3.4	Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse	19
3.4.1	Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit.....	19
3.4.2	Zeitfestigkeitsbereich	19
3.5	Wahl der Verteilungsfunktion.....	19
4	Schwingversuche.....	20
4.1	Prüfung mehrerer Hersteller.....	20
4.2	Versuchsverfahren.....	20
4.3	Axialzug-Schwingversuche.....	21
4.3.1	Versuchsmaterial.....	21
4.3.2	Prüfmaschine.....	21
4.3.3	Versuchsparameter	22
4.3.4	Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit mit Herstellungseinfluss	23
4.3.5	Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit ohne Herstellungseinfluss	25



4.3.6	Versuchsergebnisse im Zeitfestigkeitsbereich	26
4.3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse für Zug	29
4.4	Biege-Schwingversuche	30
4.4.1	Versuchsmaterial	30
4.4.2	Prüfmaschine	31
4.4.3	Vorspanngerät	31
4.4.4	Versuchsparameter	32
4.4.5	Ermittlung der Anrisschwingspielzahlen aus der Vorspannkraft	34
4.4.6	Versuchsergebnisse im Zeitfestigkeitsbereich	35
4.4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	39
4.5	Diskussion der Bruchorte und Konsequenzen	40
5	Statistische Auswertung	45
5.1	Axialzug-Schwingversuche	45
5.1.1	Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit	45
5.1.2	Zeitfestigkeitsbereich 1	47
5.1.3	Zeitfestigkeitsbereich 2	53
5.1.4	Ermittlung der Wöhlerlinien	55
5.1.5	Bewertung der Ergebnisse	59
5.2	Biege-Schwingversuche	60
5.2.1	Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit	60
5.2.2	Zeitfestigkeitsbereich 1	63
5.2.3	Zeitfestigkeitsbereich 2	65
5.2.4	Ermittlung der Wöhlerlinie	67
5.2.5	Bewertung der Ergebnisse	69
5.3	Vergleich der Biege wöhlerlinie mit Axialzug-Wöhlerlinie	70
6	Zusammenfassung	71
7	Literatur	73

Formelzeichen / Symbole

Lateinische Buchstaben

d bzw. d_s	Schaftdurchmesser
d_{stufe}	Stufensprung für Treppenstufenverfahren
i	Laufende Ordnungsziffer
k	Wöhlerliniensteigung
k_s	Reduktionsfaktor nach EN 1993-1-9
n	Stichprobenumfang
$p_{\bar{u}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit
r	Anzahl der Brüche für Abgrenzungsverfahren
s	Standardabweichung der Stichprobe
x_i	Stichprobenwert
\bar{x}	Mittelwert der Stichprobe
\bar{x}_G	Geometrischer Mittelwert der Stichprobe
A	Parameter für Treppenstufenverfahren
A_S	Spannungsquerschnitt der Schraube
B	Sprungfaktor für Abgrenzungsverfahren
C	Parameter für Treppenstufenverfahren
D_F	Kraftdifferenz für Abgrenzungsverfahren
E	Parameter für Treppenstufenverfahren
F_a	Prüfkraftamplitude
F_{A50}	Kraftamplitude für 50% Überlebenswahrscheinlichkeit
F_m	Mittellast
F_S	Zugkraft in der Schraube
F_V	Schraubenvorspannkraft
ΔF_{all}	Kraftstufensprung für Treppenstufenverfahren
N	Schwingspielzahl
N_{Anriss}	Anrisschwingspielzahl
N_{Bruch}	Bruchschwingspielzahl
N_k	Abknickschwingspielzahl
$R_{p0,2}$	0,2% Dehngrenze
Z	äußere Zugkraft im Mantelblech

Griechische Buchstaben:

μ	Mittelwert der Grundgesamtheit
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit
σ_a	Spannungsamplitude bezogen auf Spannungsquerschnitt
σ_{A50}	Spannungsamplitude für 50% Überlebenswahrscheinlichkeit
$\Delta\sigma_c$	Spannungsschwingbreite bei $N = 2 \cdot 10^6$
$\Delta\sigma_{D,x\%}$	Dauerfestigkeitsschwingbreite bei x% Überlebenswahrscheinlichkeit



1 Einführung

1.1 Problemstellung

Hochfeste Schrauben großer Abmessungen werden vorwiegend in Flanschverbindungen von modernen Windenergieanlagen (WEA) eingesetzt (Abbildung 1-1). Mittlerweile werden Gewindegrößen bis M42 regelmäßig und in Einzelfällen bis M64 eingesetzt. Während des Betriebs erfahren die Schrauben Ermüdungsbeanspruchungen aus kombinierten Axial- und Biegespannungen mit über 10^9 Lastwechseln.



Abbildung 1-1: WEA mit innen liegendem geschraubtem L-Ringflansch

Neben der Größenordnung der Lastwechsel, welche eine neue Anforderung im Bauwesen darstellt, ist auch der Einfluss der Biegespannungen auf die Ermüdungsfestigkeit von Schrauben in einem Ringflansch nicht abschließend geklärt. Aufgrund der kombinierten Beanspruchung ist eine eindeutige Zuordnung der Spannungsanteile zu der Zug- bzw. Biegebeanspruchung nicht ohne weiteres möglich. Untersuchungen der Ermüdungsfestigkeit von Schrauben unter reiner Biegebeanspruchung als Basis für die Bewertung kombinierter Beanspruchung sind bislang nur vereinzelt und für kleinere Durchmesser durchgeführt worden. Es ist allerdings bekannt, dass das Ermüdungsverhalten von Schrauben unter Biegebeanspruchung günstiger ist als unter Axialbeanspruchung. Es stellt sich daher die Frage, ob bei genauer Kenntnis des Ermüdungsverhaltens unter Biegebeanspruchung eine wirtschaftlichere Bemessung der Schraubenverbindung gegen Ermüdung unter kombinierter Beanspruchung möglich ist.

Im Bereich der deutschen Bauaufsicht wird der Nachweis gegen Ermüdung von Stahlbauten, und somit auch für Schrauben, in der Regel mit Hilfe von Nennspannungen durchgeführt. Bei Beanspruchung in Axialrichtung ist dabei für Schrauben mit einem Gewindedurchmesser größer M30 die ertragbare Ermüdungsfestigkeit zu reduzieren. Hierbei ist anzumerken, dass in der EN 1993-1-9 die diesem Effekt Rechnung tragende Reduzierungsfunktion für Schrauben größer M30 nur bis zu einem Gewindedurchmesser M36 abgesichert ist. Für Schrauben unter reiner Biegebeanspruchung existieren bislang keine Ermüdungsfestigkeitskurven.



1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Erstellung von Wöhlerlinien für hochfeste Schrauben des Durchmessers M48 sowohl unter Axial- als auch unter reiner Biegebeanspruchung zur Absicherung bzw. gegebenenfalls Erweiterung der bestehenden Ermüdungsfestigkeitskurven. Da die Angaben in der EN 1993-1-9 herstellerunabhängig sind, werden die Schwingversuche mit Schrauben von vier verschiedenen Herstellern durchgeführt. Diese Vorgehensweise führt zu einer größeren Streuung, so dass ein spezifischer Herstellereinfluss innerhalb der Prüfungen ausgeschlossen werden kann.

Für die Erstellung der beiden Ermüdungsfestigkeitskurven werden jeweils 30 Schwingversuche im Übergangsbereich und 20 Schwingversuche im Zeitfestigkeitsbereich durchgeführt. Über statistische Auswertungsverfahren werden im Anschluss die gesuchten Wöhlerlinien erstellt.

2 Wissensstand

2.1 Allgemeines

Bei dynamisch beanspruchten Schraubenverbindungen werden hochfest vorgespannte (HV-) Schraubengarnituren eingesetzt. HV-Schraubengarnituren zeichnen sich in erster Linie durch eine hohe Materialgüte (meist 10.9) aus. Ein weiterer Unterschied zu normalen Schraubengarnituren ist die im Vergleich geringere Mutterhöhe (0,8 d).

Zur Vermeidung von Klaffungen der miteinander verbundenen Bauteile werden nach DIN 18800-7 dynamisch beanspruchte HV-Garnituren im Bauwesen auf mindestens 70% ihrer Streckgrenze vorgespannt.

$$F_V = 0,7 \cdot R_{p0,2} \cdot A_s$$

Die Vorspannung führt zu einem nichtlinearen Schraubenkraftverlauf bei äußerer Zugbeanspruchung im Mantelblech von Flanschverbindungen (Abbildung 2-1).

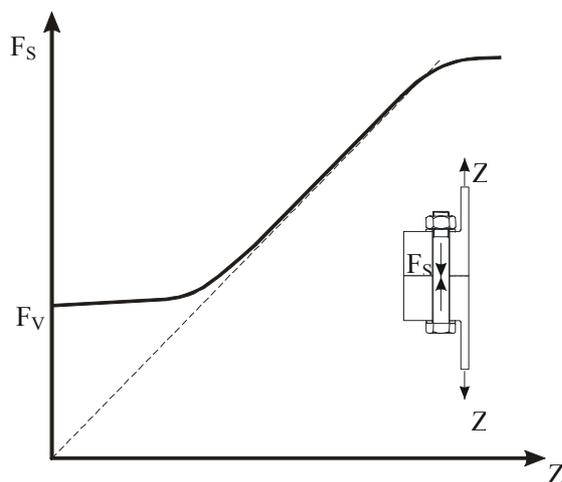


Abbildung 2-1: Nichtlinearer Schraubenkraftverlauf im L-Flansch

Aufgrund des nichtlinearen Schraubenkraftverlaufes erfährt die Schraubenverbindung bei kleinen Zugschwingbeanspruchungen eine vernachlässigbare Ermüdungsbeanspruchung.

2.2 Normative Situation

2.2.1 Ermüdungsfestigkeit

Im Bauwesen wird der Nachweis gegen Materialermüdung mithilfe des Nennspannungskonzepts nach der EN 1993-1-9 [2-1] geführt. Sämtliche im Eurocode aufgeführten Wöhlerlinien gelten für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $p_{\bar{u}} = 97,7\%$.

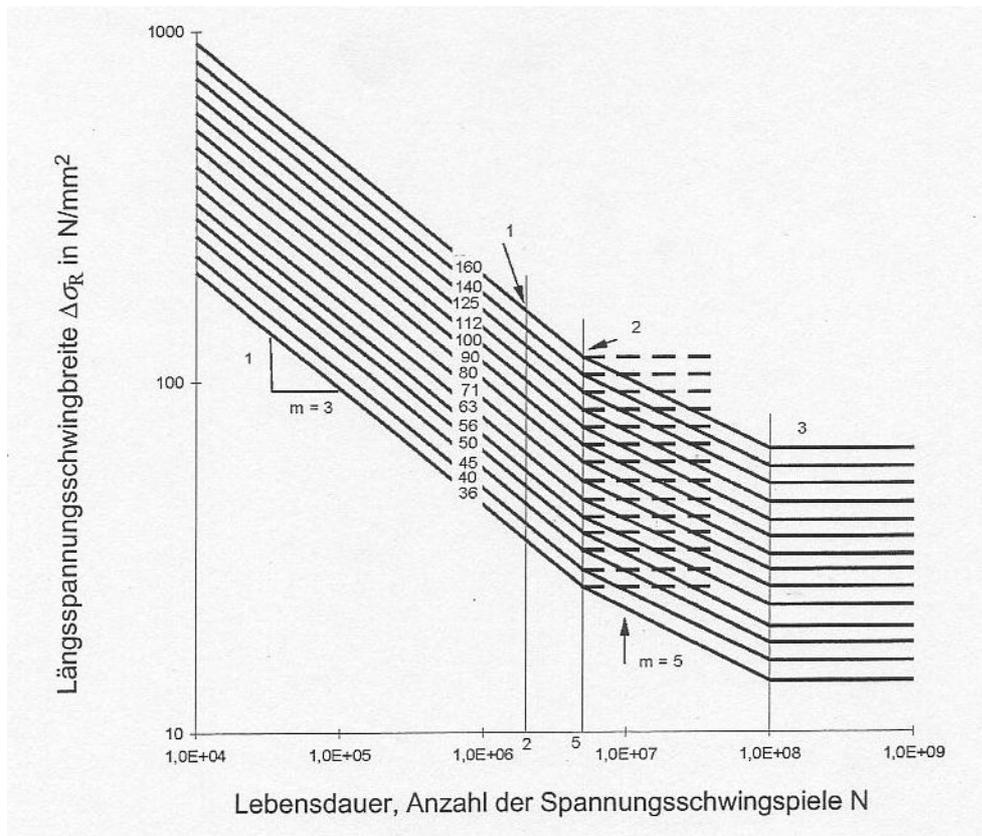


Abbildung 2-2: Wöhlerlinien für verschiedene Kerbdetails, aus [2-1]

Für Schrauben unter Axialschwingbelastung gilt in der EN 1993-1-9 die Kerbklasse 50 ($\Delta\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2$ bei $N = 2 \cdot 10^6$ Lastwechseln). Eventuelle Einflüsse aus der Höhe der Vorspannkraft, der Materialgüte, des Herstellungsverfahrens oder Beschichtungen werden nicht berücksichtigt. Eine Reduzierung der Kerbklasse erfolgt lediglich für Durchmesser größer M30:

$$\Delta\sigma_{c,\text{red}} = \Delta\sigma_c \cdot k_s \quad \text{mit} \quad k_s = \left(\frac{30}{\varnothing}\right)^{0,25} \quad \text{für} \quad d_s > 30\text{mm}$$

Für Biegebelastung gibt der Eurocode explizit keine Ermüdungsfestigkeitskurven an. Die Aussagen zu dem entsprechenden Kerbfall lassen jedoch die Interpretation zu, dass für Biegung ebenfalls Kerbfall 50 angesetzt werden kann.

Neben der EN1993-1-9 existiert mit der VDI 2230 [2-2] eine im Maschinenbau angewandte Richtlinie, nach der Dauerfestigkeiten für hochfeste Schrauben ermittelt werden können. Im Gegensatz zu der EN 1993-1-9 berücksichtigt die VDI bei der Ermittlung der Dauerfestigkeit neben dem Durchmesser auch die Herstellungsart und eine eventuelle Beschichtung.

Schlussvergütete Schrauben (tZn):
$$\sigma_{\text{ASV}} = 0,8 \cdot 0,85 \cdot \left(\frac{150}{d} + 45\right) \text{ in } [\text{N/mm}^2]$$

Schlussgerollte Schrauben (tZn):
$$\sigma_{\text{ASG}} = 0,8 \cdot \left(2 - \frac{F_{\text{Sm}}}{F_{0,2\text{min}}}\right) \cdot \sigma_{\text{ASV}} \text{ in } [\text{N/mm}^2]$$

Die VDI-Richtlinie gibt keine speziellen Ermüdungsfestigkeiten für reine Biegebeanspruchung an.

2.2.2 Versuchsdurchführung

Die DIN 969 hat die ursprünglich gültige DIN ISO 3800-1 ersetzt und legt die Bedingungen für die Durchführung von Schwingfestigkeitsversuchen bei Axialbelastung an Verbindungselementen mit Gewinde fest. Darüber hinaus gibt sie Empfehlungen für die Auswertung der Ergebnisse. Die Schwingversuche können entweder mit konstanter Mittelspannung oder mit konstantem Spannungsverhältnis durchgeführt werden.

Die Durchführung von Schwingfestigkeitsversuchen bei Biegebelastung ist nicht normativ geregelt.

2.3 Axialschwingversuche

Schwingversuche an Schrauben bei Axialbelastung haben eine lange Tradition. Bereits in den dreißiger Jahren stellte Wiegand in seiner Dissertation Untersuchungen zu der Dauerfestigkeit von Schraubenwerkstoffen und Schraubenverbindungen an [1-1].

Thomala hat in seiner Dissertation [1-2] Dauerschwingversuche an Sechskantschrauben nach DIN 931 im Abmessungsbereich M6 - M24 und der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 durchgeführt und verschiedene Einflussfaktoren auf die Ermüdungsfestigkeit untersucht. Unter anderem zeigten die Versuchsergebnisse einen hyperbolischen Abfall der Dauerfestigkeit mit zunehmendem Schraubendurchmesser (s. Abb. 2-3). Diese Untersuchungen gingen später in die VDI 2230 ein.

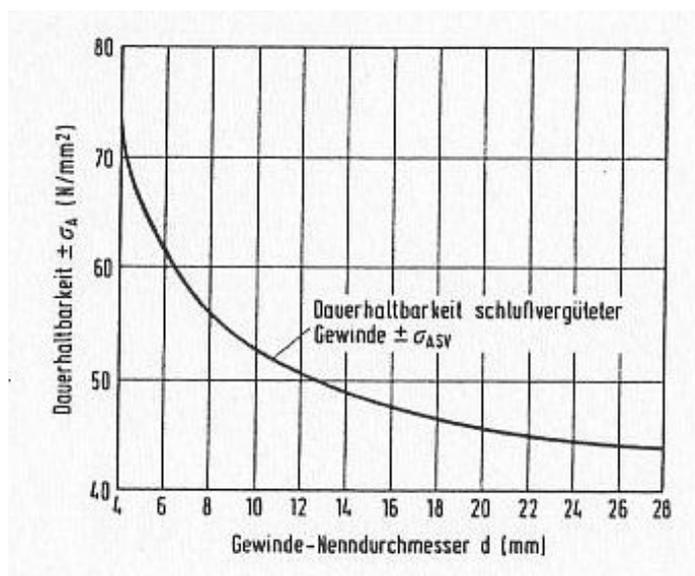


Abbildung 2-3:
Einfluss des Durchmessers auf die Dauerfestigkeit bei Axialbelastung, nach [2-2]

In den 80er Jahren führte Lacher Schwingversuche an schwarzen und feuerverzinkten hochfesten Schrauben M20 im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich unter Axialbeanspruchung durch [1-3]. Im Vergleich zu Thomala zeigten die Versuche mit $\Delta\sigma_{D,50\%} = 76,4 \text{ N/mm}^2$ für schwarze und $\Delta\sigma_{D,50\%} = 67,8 \text{ N/mm}^2$ für feuerverzinkte Schrauben vergleichsweise geringe Dauerfestigkeiten. Die Wöhlerliniensteigungen im Zeitfestigkeitsbereich betragen $k = 3,6$ ($N_k = 2,8 \cdot 10^6$) für schwarze bzw. $3,0$ ($N_k = 1,8 \cdot 10^6$) für feuerverzinkte Schrauben.

Schneider untersuchte an Schrauben M6 - M16 nach DIN 931 der Festigkeitsklassen 8.8 bis 12.9 unter anderem den Einfluss der Gewindefertigung (schlussgerollt/schlussvergütet) und der Vorspannung auf die Dauerfestigkeit [1-4]. Er zeigte, dass für schlussvergütete Schrauben der Einfluss der Vorspannkraft auf die Dauerfestigkeit für $F_v < 0,7 \cdot R_{p0,2}$ vernachlässigt werden kann. Die Dauerfestigkeit von schlussgerollten Schrauben hingegen liegt aufgrund der fertigungsbedingt verbleibenden Druckeigenspannungen im Gewinde höher als die von



schlussvergüteten Schrauben. Wegen der Interaktion zwischen Eigenspannung und Vorspannkraft fällt die Dauerfestigkeit mit zunehmender Vorspannkraft linear ab. Im Gegensatz zu schlussvergüteten Schrauben besteht bei schlussgerollten Schrauben demnach ein Mittelspannungseinfluss im Bereich der Dauerfestigkeit (siehe Abb. 2-4).

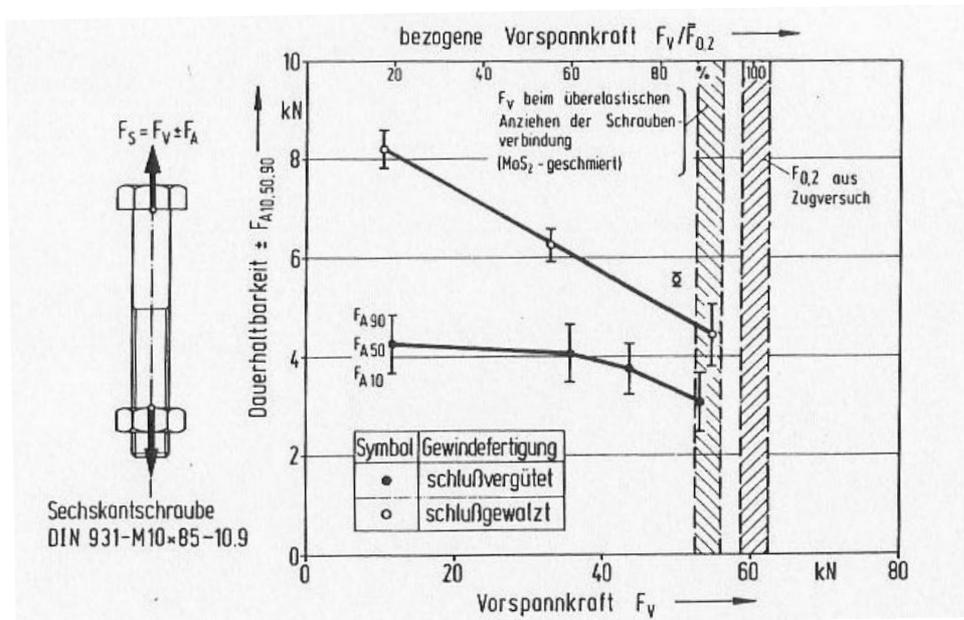


Abbildung 2-4: Einfluss der Vorspannkraft auf die Dauerfestigkeit bei verschiedenen Herstellungsverfahren, aus [1-4]

Generell muss eine ausreichende Mindestvorspannkraft vorhanden sein, so dass ein Aufklaffen der Kontaktflächen zwischen Schraube und Mutter im Bereich der Unterlast ausgeschlossen werden kann.

Dem Einfluss von Randschicht- und Oberflächenzuständen gilt das Hauptaugenmerk der Dissertation von Dünkel [1-5]. Für die im Bauwesen übliche Feuerverzinkung von HV-Schrauben stellt er bei größeren Schichtdicken einen Abfall der Dauerfestigkeit fest. Als Ursache stellt er durch das Vorspannen verformungsbedingte Anrisse fest, die bis in den Grundwerkstoff hineinreichen.

Den bislang vorgestellten Veröffentlichungen gemein ist die Untersuchung von Schrauben kleinerer Durchmesser (bis max. M24). Dies gilt auch für die überwiegende Zahl der hier nicht weiter erwähnten Literaturstellen. Nur in Einzelfällen wurden Schrauben größeren Durchmessers geprüft ([1-6], [1-7]). Die Prüfkörper entsprachen allerdings zum einen nicht den HV-Spezifikationen, zum anderen sind die Randbedingungen der Versuche im Zusammenhang mit der Auswertung teilweise zu hinterfragen. Bei [1-7] wurden beispielsweise Schraubenbolzen mit zwei Muttern untersucht, somit zwei Gewinde gleichzeitig geprüft. Dies ist in der Auswertung nicht berücksichtigt worden.

Zur Ermittlung der Spannungsverteilung in axial- und biegebeanspruchten Schrauben wurden von Kaiser, Beyer, Dünkel und Schneider Untersuchungen an einer mit DMS beklebten Modellschraube M60x10 durchgeführt [1-8]. Danach liegt das Spannungsmaximum für eine axialbelastete Schraube im ersten tragenden Gewindegang und für Biegebelastung unter Kopf (Abb. 2-5).

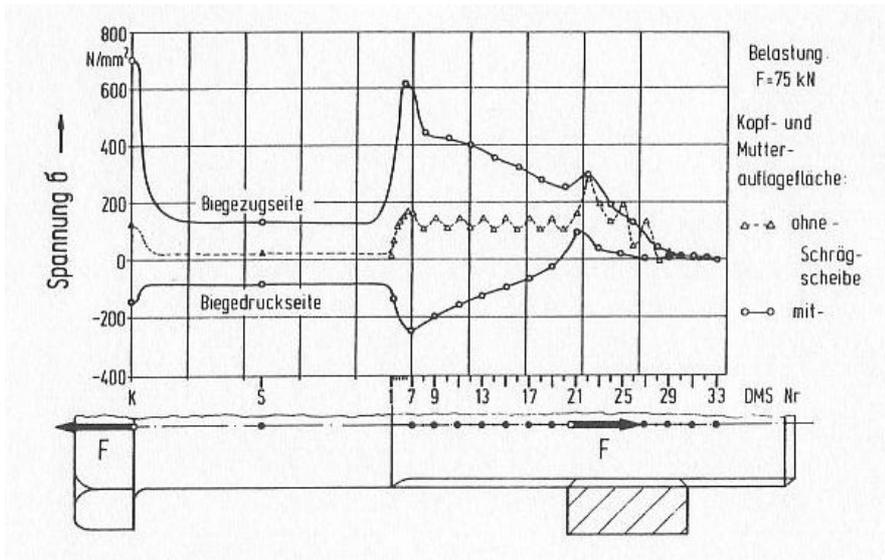


Abbildung 2-5: Spannungsverteilung in einer mit und ohne zusätzliche Biegung belasteten Modellgewindeverbindung, aus [1-8]

2.4 Biegeschwingversuche

Im Vergleich zu axialbelasteten Schrauben lassen sich nur wenige Veröffentlichungen für Schrauben unter reiner Biegebeanspruchung finden. Zudem handelt es sich bei der vorhandenen Literatur häufig um eine kombinierte Belastung aus Zug und Biegung und nicht um eine reine Biegebelastung. Hierzu gehören unter anderem die Veröffentlichungen [1-9] bis [1-12].

Untersuchungen an rein biegebelasteten Schraubenverbindungen wurden von Mardaneh und Alt durchgeführt ([1-14], [1-15]). Der Versuchsaufbau von Mardaneh ließ dabei nur eine handfeste Vorspannung der Schraube zu, welche das reale Tragverhalten der Schraube-Mutter-Verbindung im hoch vorgespannten Einbauzustand bei Biegung nicht korrekt wiedergeben kann. Von Alt wurde eine neuartige Magnetresonanz-Prüfmaschine entwickelt, mit der hoch vorgespannte Schrauben unter reiner Biegewechsel- und Biegeschwellbelastung geprüft werden können. Alt untersuchte 10.9 Schrauben nach DIN 931 im Durchmesserbereich M8 - M24 sowohl unter Zug- als auch unter Biegebelastung.

Abbildung 2-6 zeigt die Biegedauerfestigkeit in Abhängigkeit vom Schraubendurchmesser. Eingezeichnet sind die Ergebnisse für 80%ige und überelastische Vorspannung.

Für eine Vorspannung von 80% der Streckgrenze ergibt sich hiernach für Durchmesser M24 eine Dauerfestigkeitsamplitude von $96,6 \text{ N/mm}^2$ ($p_{\bar{u}} = 50\%$).

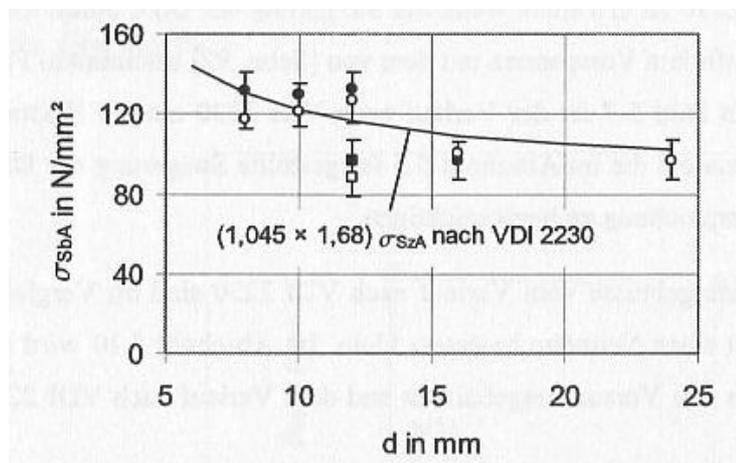


Abbildung 2-6: Einfluss des Durchmessers auf die Dauerfestigkeit bei Biegebelastung, aus [1-15]



Alt ermittelt ein Verhältnis von Biegedauerfestigkeit zu Zugdauerfestigkeit von 1,68. Dieser Faktor ist unabhängig von dem Gewindedurchmesser (siehe Abb. 2-7)

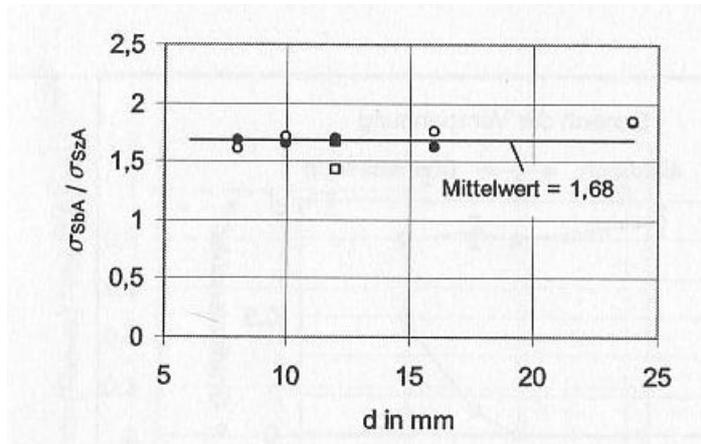


Abbildung 2-7: Verhältnis von Biege- zu Zugdauerfestigkeit in Abhängigkeit vom Durchmesser, aus [1-15]

3 Statistik

3.1 Allgemeines

Mithilfe der Statistik werden die Ergebnisse aus Schwingversuchen ausgewertet und Wöhlerlinien für unterschiedliche Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnet. Entscheidend für die Erstellung der Wöhlerlinien sind der statistische Mittelwert und die Standardabweichung (= Streuung).

3.1.1 Statistische Grundbegriffe

Nachfolgend werden die wichtigsten statistischen Grundbegriffe definiert:

- *Arithmetischer Mittelwert der Stichprobe*

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{mit} \quad x_i = \text{Stichprobenwert}$$

- *Geometrischer Mittelwert der Stichprobe*

$$\log \bar{x}_G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log x_i$$

- *Standardabweichung der Stichprobe*

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

- *Logarithmische Standardabweichung der Stichprobe*

$$s_{\log} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log x_i - \log \bar{x}_G)^2}$$

3.1.2 Verteilungsdichtefunktionen

Verteilungsdichtefunktionen beschreiben die Wahrscheinlichkeit, dass eine Zufallsgröße X einen Wert gleich oder kleiner x annimmt. Hierfür werden der Mittelwert und die Standardabweichung aus den Versuchen benötigt.

Für die Auswertung von Schwingversuchen an Schraubenverbindungen werden meist die Normalverteilung bzw. die log-Normalverteilung aufgrund ihrer vergleichsweise einfachen Anwendung bei gleichzeitiger guter Übereinstimmung zu den Versuchsergebnissen zugrunde gelegt.

- *Normalverteilungsfunktion*

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$



- *Log-Normalverteilungsfunktion*

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log x - \log \mu}{\sigma}\right)^2}$$

3.2 Verfahren für Versuchsdurchführung im Übergangsbereich

Nachfolgend werden die gängigsten Verfahren für die Versuchsauswertung im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit vorgestellt.

3.2.1 Treppenstufenverfahren

Das Treppenstufenverfahren wurde ursprünglich von Dixon und Mood entwickelt. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt in der automatischen Kalibrierung um den Mittelwert. Als Nachteil ist die meist große Anzahl an benötigten Versuchen für eine gute Schätzung der Standardabweichung (>25 Versuche) zu nennen.

Der Versuchsablauf entspricht einem Folgeverfahren. Dabei wird die Belastungshöhe für den aktuellen Versuch anhand des Ergebnisses des vorigen Versuchs mithilfe eines festgelegten (in der Regel linearen) Stufensprungs d_{stufe} ermittelt. Ist ein Probekörper unter einer bestimmten Belastung im beendeten Versuch gebrochen, so wird die Belastung für den nächsten Versuch um eine Laststufe verringert. Ist der Probekörper hingegen durchgelaufen, so wird die Belastung für den nächsten Versuch um eine Laststufe erhöht.

Der optimale Stufensprung ist von der geplanten Anzahl der Versuche und der Standardabweichung abhängig. Nach Dünkel sollte der Stufensprung d_{stufe} zwischen $0,5 \cdot s$ und $1,0 \cdot s$ liegen. Für s gibt es in [1-5] folgenden Zusammenhang zwischen Mittelwert der Kraftamplitude F_{A50} und Standardabweichung an:

$$s = 0,06 \cdot F_{A50}$$

3.2.2 Abgrenzungsverfahren

Beim Abgrenzungsverfahren wird der Übergangsbereich durch Versuchsreihen auf zwei Lasthorizonten eingegrenzt. Im ersten Schritt dieses Verfahrens wird hierfür der erste Lasthorizont ermittelt. Es wird ausgehend von dem Ergebnis („Bruch“ oder „Durchläufer“) des ersten Versuchs die Lastamplitude für die folgenden Versuche solange um einen festen Stufensprung gesteigert (bei Durchläufer) oder gesenkt (bei Bruch), bis sich das alternative Ereignis einstellt. Auf diesem Niveau wird eine Versuchsserie gefahren. Der zweite Lasthorizont wird ausgehend vom ersten Horizont berechnet.

Bei dem bekanntesten Abgrenzungsverfahren nach *Maening* wird der zweite Lasthorizont F_{a2} in Abhängigkeit von der Anzahl der Brüche r auf dem ersten Horizont und einem Sprungfaktor B bestimmt:

$$F_{a2} = F_{a1} + D_F$$

$$\text{mit: } D_F = \left[1 - \frac{r}{n} \right] \cdot B \cdot F_{a1} \quad \text{für } r < 0,5 n$$

$$\text{oder: } D_F = -\frac{r}{n} \cdot B \cdot F_{a1} \quad \text{für } r \geq 0,5 n$$

Die DIN 969 [2-3] empfiehlt für den Sprungfaktor B einen Wert zwischen 0,15 und 0,2.

Der Vorteil des Abgrenzungsverfahrens liegt in der präzisen Bestimmung der Streubreite bei bereits geringer Probenzahl, wenn der obere und untere Rand des Übergangsbereichs mit den beiden Lasthorizonten gut getroffen werden. Als problematisch erweist sich allerdings die Tatsache, dass die Streubreite bereits im Vorfeld relativ genau bekannt sein sollte. Wird der Stufensprung zur Ermittlung des ersten Lasthorizonts zu klein gewählt, müssen viele nicht auswertbare Versuche gefahren werden, bis der erste Lasthorizont bestimmt ist. Ist der Stufensprung hingegen zu groß, können auf dem bestimmten Lasthorizont nur Brüche oder Durchläufer auftreten. Dieses Ergebnis wäre statistisch nicht auswertbar.

3.3 Verfahren für Versuchsdurchführung im Zeitfestigkeitsbereich

Im Zeitfestigkeitsbereich wird für Schraubenverbindungen im Allgemeinen das Horizontenverfahren verwendet, da es präzisere Aussagen über die Streuung ermöglicht. Bei dem Horizontenverfahren werden Versuchsserien auf zwei oder mehr Lasthorizonten gefahren. Die DIN 969 schlägt als Lasthorizonte für das Horizontenverfahren $1,6 \cdot \sigma_D$ und $2,4 \cdot \sigma_D$ vor.

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung des Zeitfestigkeitsbereiches ist das Perlenschnurverfahren. Es findet hauptsächlich Anwendung bei einer geringen Anzahl von zur Verfügung stehenden Proben (evtl. aufgrund von Bauteilabmessungen oder auch Herstellungs- bzw. Prüfkosten einer Probe).



3.4 Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse

3.4.1 Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit

Da die statistische Auswertung des Treppenstufenverfahrens in der DIN 969 u.a. nach Dixon und Mood erfolgt, wird hier nur diese Auswertung beschrieben. Es berechnen sich Mittelwert und Standardabweichung wie folgt:

- Mittelwert:

$$F_{A50} = F_{a0} + \Delta F_{\text{all}} \cdot \left(\frac{A}{C} + x \right)$$

mit $x = 0,5$ wenn mehr Brüche als Durchläufer

$x = -0,5$ wenn mehr Durchläufer als Brüche

- Standardabweichung:

$$s(F_A) = 1,62 \cdot \Delta F_{\text{all}} \cdot \left[\frac{C \cdot E - A^2}{C^2} + 0,029 \right]$$

mit der Bedingung $\frac{C \cdot E - A^2}{C^2} > 0,3$,

um die Voraussetzung des linearisierten Berechnungsansatzes zu erfüllen.

Die Parameter A, C und E ergeben sich dabei aus dem Auswertungsschema (siehe Kapitel 5.1.1).

3.4.2 Zeitfestigkeitsbereich

Für die Auswertung im Zeitfestigkeitsbereich müssen die Versuchsergebnisse (= erreichte Bruchschwingspielzahl) jedes Lasthorizonts zunächst in ansteigender Reihenfolge sortiert werden. Unter Ansatz einer geeigneten Verteilungsfunktion (hier Normalverteilung bzw. log-Normalverteilung) können im Anschluss mit den Formeln aus Kapitel 3.1.1 der zugehörige Mittelwert und die Standardabweichung berechnet werden.

3.5 Wahl der Verteilungsfunktion

Für Ausfallwahrscheinlichkeiten oberhalb 90% und unterhalb 10% spielt die Verteilungsfunktion eine große Rolle bei der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse.

Bei dem Treppenstufenverfahren nach Dixon und Mood wird für das Auswertungsschema eine Normalverteilung vorausgesetzt.

Für die statistische Auswertung im Zeitfestigkeitsbereich muss mithilfe eines Hypothesentests nachgewiesen werden, dass die Ergebnisse der untersuchten Stichprobe der angenommenen Verteilungsfunktion genügen. In Abschnitt 5 wird mit dem Anderson-Darling Test überprüft, ob eine Normalverteilung oder eine log-Normalverteilung für die statistische Auswertung zugrunde gelegt werden kann. Der Anderson-Darling Test wird aufgrund seiner guten Trennschärfe auch bei geringer Probenanzahl gewählt.

4 Schwingversuche

In diesem Abschnitt werden die Parameter, die Randbedingungen und die Ergebnisse der Schwingversuche präsentiert.

4.1 Prüfung mehrerer Hersteller

Üblicherweise werden Schwingversuche an Schrauben zur Ermittlung von Wöhlerlinien chargenrein durchgeführt. Dies geschieht vor allem, um die Streubreite der Ergebnisse möglichst gering zu halten. Von dieser Vorgehensweise wird hier mit der Prüfung und Auswertung von Schrauben verschiedener Hersteller als eine Stichprobe bewusst abgewichen. Da das Ziel dieses Projektes die Absicherung der Wöhlerlinien des Eurocode 3 für Schrauben mit großem Durchmesser ist, würde eine einzelne herstellerbezogene Wöhlerlinie diesem Ziel nicht genügen. Durch die Prüfung mehrerer Hersteller und der daraus resultierenden größeren Streuung kann eine allgemeingültige, herstellerunabhängige Aussage hinsichtlich der Sicherheit der Wöhlerlinien des Eurocodes 3 für Schrauben großer Durchmesser getroffen werden. Grundvoraussetzung bei der Prüfung mehrerer Hersteller ist allerdings, dass sämtliche Prüfkörper hinsichtlich Gewindegeometrie, Beschichtung und Herstellungsverfahren einheitlich sind.

4.2 Versuchsverfahren

Folgende Versuchsverfahren kommen für die durchzuführenden Versuche zur Anwendung:

1. Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit: Treppenstufenverfahren
2. Zeitfestigkeitsbereich: Horizontenverfahren



4.3 Axialzug-Schwingversuche

Die Durchführung und Auswertung der Axialschwingversuche erfolgten in Übereinstimmung mit der DIN 969 unter konstanter Mittelspannung. Die Mittelspannung muss dabei so hoch gewählt werden, dass auf sämtlichen Lasthorizonten eine Schwellbeanspruchung vorliegt, d.h. auch auf dem Unterlastniveau die Schraubenverbindung unter ausreichender Zugbeanspruchung verbleibt, so dass sich die Kontaktflächen zwischen Schraube und Mutter nicht öffnen.

4.3.1 Versuchsmaterial

Für die Durchführung der Axialschwingversuche wurden von den Herstellern Friedberg, Fuchs, Peiner Umformtechnik und Zerbst folgende HV-Garnituren gemäß DASt-Ri. 021 [2-4] geliefert:

Hersteller A: 30 Garnituren M48x275 10.9 tZn (schlussvergütet)

Hersteller B: 13 Garnituren M48x275 10.9 tZn (schlussvergütet)

17 Garnituren M48x280 10.9 tZn (schlussvergütet)

Hersteller C: 14 Garnituren M48x275 10.9 tZn (schlussvergütet)

Hersteller D: 30 Garnituren M48x275 10.9 tZn (schlussgerollt)

Anmerkung: Die Herstellungsweise wurde nicht von vornherein explizit vorgegeben, da die forschende Stelle davon ausgegangen ist, dass Schrauben in diesem Abmessungsbereich grundsätzlich schlussvergütet werden.

Die unterschiedlichen Liefermengen und Schraubenlängen der verschiedenen Hersteller liegen in den Lagerbeständen der einzelnen Firmen begründet. Die Klemmlänge ist hiervon nicht beeinflusst. Da Hersteller C kurzfristig nicht die gewünschten 30 Garnituren zur Verfügung stellen konnte, wurden im Zeitfestigkeitsbereich weniger Versuche mit Schrauben dieses Herstellers durchgeführt.

4.3.2 Prüfmaschine

Die Versuche wurden auf einem Sincotec-Hochfrequenzpulsler des Typs „PowerSwing New-Line MOT 400“ mit einer maximalen Nennkraft von 400 kN durchgeführt. Die dynamische Kraftamplitude beträgt max. ± 200 kN bei einer Frequenz von 20...80 Hz.

Die Einspannvorrichtung inkl. Einsatz wurde von der Firma Sincotec gefertigt und entspricht den in der DIN 969 angegebenen Anforderungen (siehe Abb. 4-1).



Abbildung 4-1:
Resonanzprüfmaschine und Zugtorpedo für Axialschwingversuche

4.3.3 Versuchsparameter

Tabelle 4-1 zeigt die gewählten Versuchsparameter für die Prüfung im Zeitfestigkeitsbereich (ZFB 1 und ZFB 2) und im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB).

	ÜGB	ZFB 1	ZFB 2
Anz. Versuche	30	10	10
Mittellast F_m [kN]	200	200	200
Prüfamplitude F [kN]	var.	$1,6 \cdot F_{A,D50}$	$2,4 \cdot F_{A,D50}$
Startamplitude F_{Start} [kN]	58,4	$1,6 \cdot F_{A,D50}$	$2,4 \cdot F_{A,D50}$
Stufensprung d_{Stufe} [kN]	2,8	-	-
Abbruchkriterium N [-]	$5 \cdot 10^6 / \text{Bruch}$	Bruch	Bruch

Tabelle 4-1: Versuchsparameter für Axialschwingversuche

Nach [2-4] beträgt die Regelvorspannkraft für M48 HV

$$F_V = 0,7 \cdot R_{p0,2} \cdot A_s = 0,7 \cdot 900 \cdot 1473,1 = 928 \text{ kN} \approx 930 \text{ kN.}$$

Aufgrund der maschinenbedingt maximal möglichen Oberlast von 400 kN (= Vorspannkraft + $F_{a,max}$) musste die Mittellast in den Versuchen mit $F_m = 200$ kN deutlich geringer gewählt werden. Wie verschiedene Untersuchungen zeigen, hat dies für schlussvergütete Schrauben keinen Einfluss auf die Dauerfestigkeit, da diese weitestgehend unabhängig von der Mittellast ist.

Für den Zeitfestigkeitsbereich ist sowohl ein positiver als auch ein negativer Einfluss durch eine geringe Vorspannkraft denkbar:

Auf der einen Seite kann sich durch geringe Vorspannkraften nach [1-2] wegen der damit verbundenen geringen elastischen Verformungen eine ungünstige Gewindelastverteilung einstellen. Hierdurch kann der erste tragende Gewindengang, in dem sich in der Regel der Ermüdungsriss einstellen wird, eine besonders hohe Beanspruchung erfahren.

Auf der anderen Seite sinkt mit einer niedrigeren Vorspannung die Oberlast ab, das effektive Spannungsmaximum, welches das Risswachstum bestimmt, ist somit geringer. Solange die Vorspannkraft so hoch ist, dass sich im Bereich der Unterlast die Kontaktflächen zwischen Schraube und Mutter nicht öffnen (und somit eine Schlagbeanspruchung entsteht), könnte sich eine geringere Vorspannkraft auch positiv auf die Schwingfestigkeit auswirken.

Da das plötzliche Versagen von Schrauben dieses Durchmesserbereiches eine starke stoßartige Belastung für die Prüfmaschine darstellt, wurden die Abschaltparameter zum Schutz des Gerätes scharf gewählt. Dies führte dazu, dass das Abbruchkriterium „Bruch der Schraube“ nicht immer erreicht wurde, sondern die Maschine teilweise bereits bei einem tiefen Anriss in der Schraube abschaltete. Ein erneutes Einschalten der Maschine führte entweder zu einem sofortigen Versagen des Prüfkörpers, oder die Maschine schaltete im Hochlauf aufgrund verletzter Regelparameter wieder ab. Da der Schraubenbruch an diesen Prüfkörpern manuell herbeigeführt werden konnte, kann davon ausgegangen werden, dass der vorhandene Anriss tief genug war, um bei normaler Vorspannung ($0,7 \cdot R_{p0,2}$) zum Bruch zu führen.



4.3.4 Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit mit Herstellungseinfluss

Wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben sind die Probenkörper hinsichtlich ihrer Herstellungsweise nicht einheitlich. Während die Schrauben der Hersteller A bis C wie erwartet schlussvergütet waren, fertigt Hersteller D Schrauben in diesem Durchmesserbereich standardmäßig schlussgerollt. Bei schlussgerollten Schrauben ist die Dauerfestigkeit hochgradig vorspannkraftabhängig. Gerade bei den hier vorliegenden niedrigen Vorspannkraften zeigen Schrauben dieser Herstellungsart stark erhöhte Dauerfestigkeiten im Vergleich zu den schlussvergüteten Schrauben. Aufgrund dieses Mittelspannungseinflusses dürfen die beiden Herstellungsvarianten nicht als eine Stichprobe untersucht werden. Da der Autor zu Beginn der Schwingprüfungen von einem einheitlichen Herstellungsverfahren ausgegangen ist, wurden zunächst beide Herstellungsverfahren unbeabsichtigt als eine Stichprobe untersucht.

Nachfolgend sind in Abbildung 4-2 die Ergebnisse der Axialschwingversuche im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit mit Einfluss der unterschiedlichen Fertigungsverfahren dargestellt.

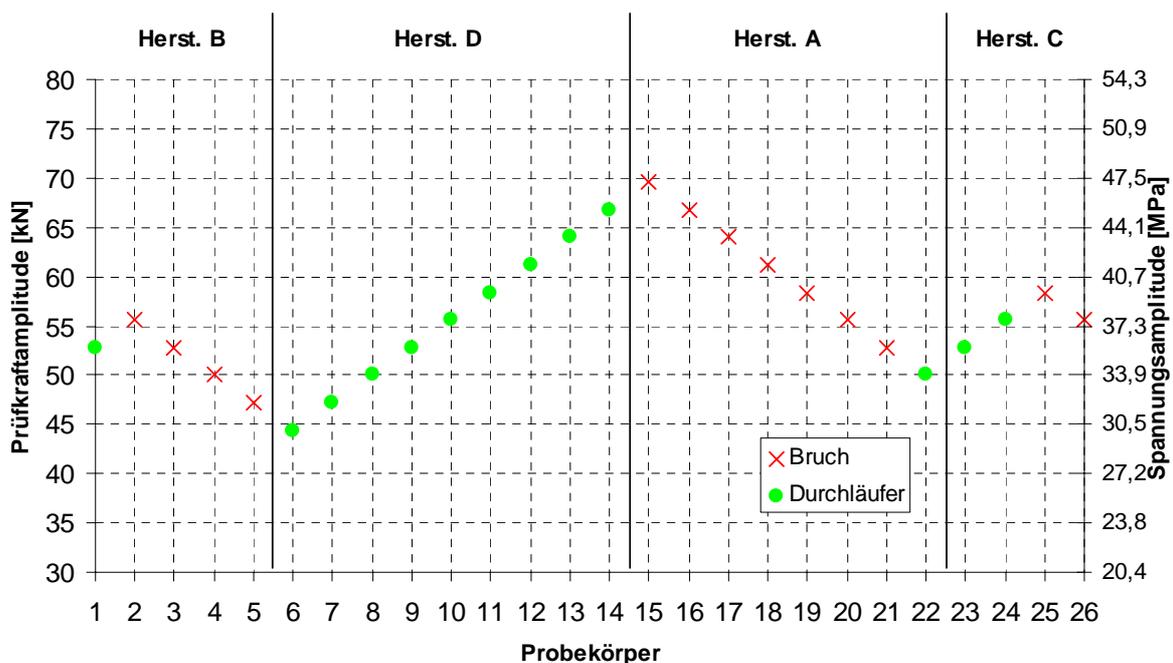


Abbildung 4-2: Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit mit Fertigungseinfluss

Der Einfluss auf die Dauerfestigkeit durch das abweichende Herstellungsverfahren bei Hersteller D ist in Abbildung 4-2 deutlich zu erkennen. Während die Prüfkörper der Hersteller B und C in einem ähnlichen Amplitudenbereich sowohl Brüche als auch Durchläufer aufweisen, weichen die Versuchsergebnisse von Hersteller A und D signifikant ab. Durch das Schlussrollen werden auch sehr hohe Prüfkraftamplituden noch dauerhaft von den Probenkörpern des Herstellers D ertragen. Das Treppenstufenverfahren hebt somit das Lastniveau in den Zeitfestigkeitsbereich von schlussvergüteten Schrauben. Dies erklärt die sieben aufeinander folgenden Bruchereignisse im direkten Anschluss bei den schlussvergüteten Probenkörpern von Hersteller A, bis sich die Prüfkraftamplitude wieder auf das ursprüngliche Niveau abgesenkt hat.

Auf der Grundlage dieser für eine statistische Auswertung sehr unbefriedigenden Versuchsergebnisse wurden die beteiligten Hersteller eingeladen und die erzielten Versuchsergebnisse präsentiert und diskutiert. Im Rahmen dieser Diskussion wurde festgestellt, dass die Probekörper von Hersteller D schlussgerollt sind. Aufgrund der Tatsache, dass die drei übrigen Hersteller standardmäßig schlussvergütete Schrauben fertigen und im Rahmen des Forschungsvorhabens nur eine Wöhlerlinie für ein Herstellungsverfahren erstellt werden kann, wurde beschlossen, nur schlussvergütete Schrauben zu untersuchen. Hersteller D hat sich daraufhin aus dem Forschungsvorhaben zurückgezogen.



4.3.5 Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit ohne Herstellungseinfluss

Durch den Ausstieg von Hersteller D aus dem Forschungsprojekt wurden die Versuche nunmehr mit den drei verbliebenen Herstellern durchgeführt. Da zur Ermittlung der Dauerfestigkeit 30 Versuche vorgesehen waren, die Versuche von Hersteller D nicht und die Versuche von Hersteller A nur zu einem geringen Teil verwendet werden können, mussten zusätzliche Versuche gefahren werden. Die Ergebnisse der Axialschwingversuche im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit mit einheitlichem Fertigungsverfahren sind in Tabelle 4-2 und Abbildung 4-3 dargestellt. Die zugehörigen Bruchbilder können dem Anhang entnommen werden.

Herst.	Prüfkörper	F_a [kN]	Ergebnis	N_{Bruch} [-]	Bruchort
A	1	58,4	Bruch	932.125	1. tragender Gewindegang
A	2	55,6	Bruch	351.296	1. tragender Gewindegang
A	3	52,8	Bruch	762.974	1. tragender Gewindegang
A	4	50,0	Durchläufer	-	-
A	5	52,8	Durchläufer	-	-
A	6	55,6	Bruch	883.577	1. tragender Gewindegang
A	7	52,8	Bruch	901.780	1. tragender Gewindegang
A	8	50,0	Bruch	822.311	1. tragender Gewindegang
A	9	47,2	Bruch	1.032.484	1. tragender Gewindegang
A	10	44,4	Bruch	3.056.372	1. tragender Gewindegang
C	11	41,6	Durchläufer	-	-
C	12	44,4	Durchläufer	-	-
C	13	47,2	Durchläufer	-	-
C	14	50,0	Durchläufer	-	-
C	15	52,8	Durchläufer	-	-
C	16	55,6	Durchläufer	-	-
C	17	58,4	Bruch	1.078.627	1. tragender Gewindegang
C	18	55,6	Bruch	1.077.359	1. tragender Gewindegang
C	19	52,8	Bruch	2.216.876	1. tragender Gewindegang
C	20	50,0	Bruch	1.635.049	1. tragender Gewindegang
B	21	47,2	Durchläufer	-	-
B	22	50,0	Durchläufer	-	-
B	23	52,8	Durchläufer	-	-
B	24	55,6	Bruch	846.162	unter Kopf
B	25	52,8	Bruch	2.120.552	unter Kopf
B	26	50,0	Bruch	1.820.864	unter Kopf
B	27	47,2	Bruch	1.235.766	1. tragender Gewindegang
B	28	44,4	Durchläufer	-	-
B	29	47,2	Durchläufer	-	-
B	30	50,0	Durchläufer	-	-
B	31	52,8	Durchläufer	-	-

Tabelle 4-2: Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit ohne Fertigungseinfluss

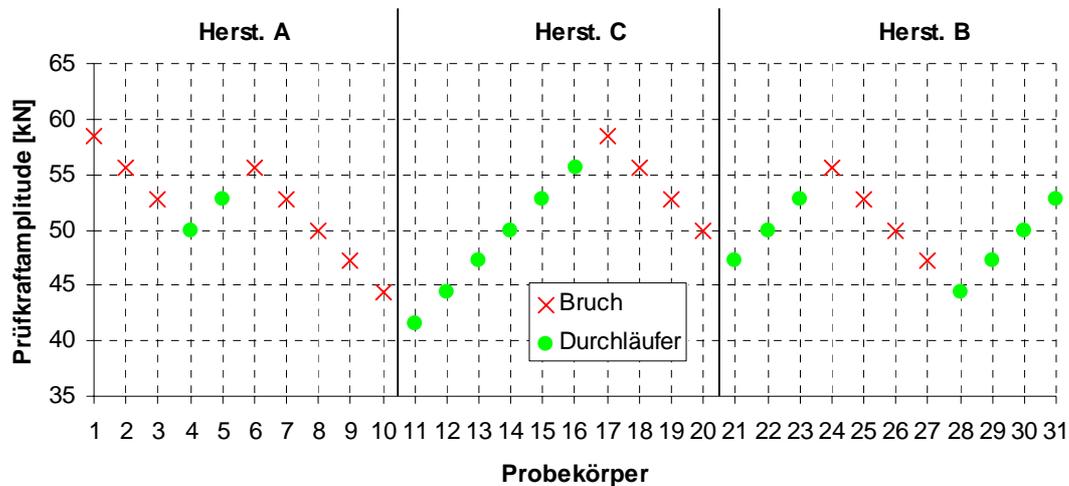


Abbildung 4-3: Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit o. Fertigungseinfluss

Es zeigt sich ein homogenerer Treppenstufenverlauf als zuvor. Die Stufensprunganzahl hat sich verringert und die Probekörper jedes Herstellers weisen sowohl Brüche als auch Durchläufer auf. Durch die Reduzierung der Stufensprunganzahl vermindert sich die Streuung. Nach Möglichkeit sollten nicht mehr als 4-5 Stufensprünge vorhanden sein, wovon allerdings bei der Prüfung mehrerer Hersteller wegen des Chargeneinflusses nicht ausgegangen werden kann.

4.3.6 Versuchsergebnisse im Zeitfestigkeitsbereich

Über die in Kapitel 5 durchgeführte statistische Auswertung der Dauerfestigkeitsversuche werden die Lasthorizonte für die Versuche im Zeitfestigkeitsbereich ermittelt. Nach DIN 969 sollen die beiden Zeitfestigkeitshorizonte bei $1,6 \cdot \sigma_{a,D}$ und $2,4 \cdot \sigma_{a,D}$ liegen.

Aus der statistischen Auswertung der Versuche im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit ergeben sich als Prüfkrafthorizonte

- für ZFB 1: 81,1 kN

- für ZFB 2: 121,6 kN

Die Tabellen 4-3 und 4-4 sowie die Abbildungen 4-4 und 4-5 zeigen die Ergebnisse aus den beiden Versuchsreihen. Die zugehörigen Bruchbilder können dem Anhang entnommen werden.



4.3.6.1 Zeitfestigkeitsbereich 1

Herst.	Prüfk.	F_a [kN]	σ_a [MPa]	N_{Bruch} [-]	Bruchort
B	1	81,1	55,1	543.033	1. tragender Gewindegang
B	2	81,1	55,1	417.187	1. tragender Gewindegang
B	3	81,1	55,1	421.055	1. tragender Gewindegang
B	4	81,1	55,1	1.092.832	unter Kopf
A	5	81,1	55,1	190.970	1. tragender Gewindegang
A	6	81,1	55,1	278.464	1. tragender Gewindegang
A	7	81,1	55,1	238.226	1. tragender Gewindegang
A	8	81,1	55,1	358.584	1. tragender Gewindegang
C	9	81,1	55,1	255.143	1. tragender Gewindegang
C	10	81,1	55,1	683.664	1. tragender Gewindegang

Tabelle 4-3: Versuchsergebnisse auf dem unteren Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 1)

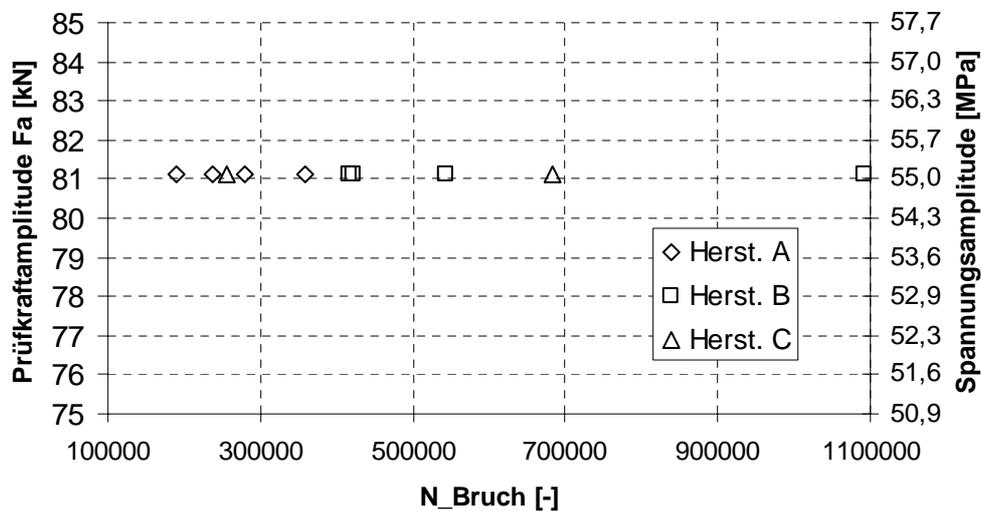


Abbildung 4-4: Versuchsergebnisse auf dem unteren Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 1)

4.3.6.2 Zeitfestigkeitsbereich 2

Herst.	Prüfk.	F _a [kN]	σ _a [MPa]	N _{Bruch} [-]	Bruchort
B	1	121,6	82,5	144.408	unter Kopf
B	2	121,6	82,5	152.310	1. tragender Gewindegang
B	3	121,6	82,5	216.471	1. tragender Gewindegang
B	4	121,6	82,5	188.394	unter Kopf
A	5	121,6	82,5	131.020	1. tragender Gewindegang
A	6	121,6	82,5	162.055	1. tragender Gewindegang
A	7	121,6	82,5	143.072	1. tragender Gewindegang
A	8	121,6	82,5	171.279	1. tragender Gewindegang
C	9	121,6	82,5	290.218	1. tragender Gewindegang
C	10	121,6	82,5	244.826	1. tragender Gewindegang

Tabelle 4-4: Versuchsergebnisse auf dem oberen Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 2)

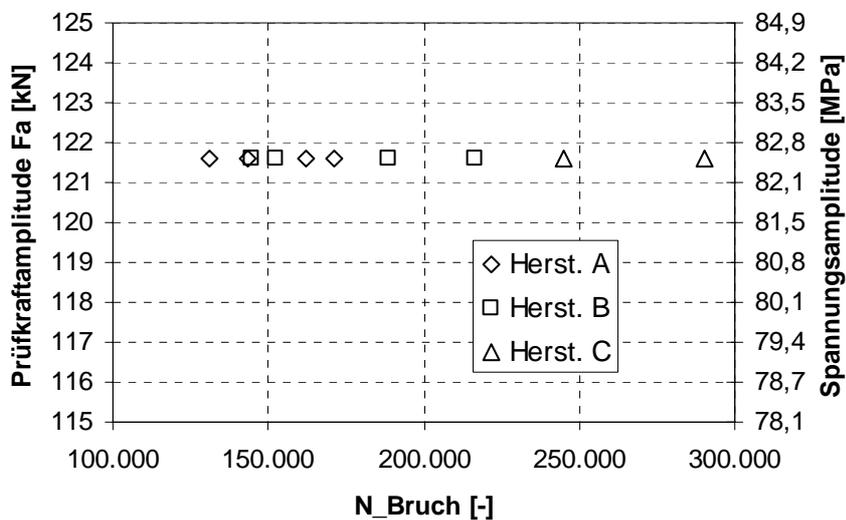


Abbildung 4-5: Versuchsergebnisse auf dem oberen Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 2)



4.3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse für Zug

a) Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB)

Die Streubreite im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit bewegt sich nach Herausnahme der Probekörper von Hersteller D mit 7 Stufensprüngen in einem zu erwartenden Bereich, wenn berücksichtigt wird, dass Versuchskörper mehrerer Hersteller als eine Stichprobe untersucht worden sind. Das vorhandene Streuband wird größtenteils von allen Herstellern bestätigt.

Der Bruchort liegt, wie erwartet, fast ausschließlich im ersten tragenden Gewindegang. Lediglich drei Probekörper von Hersteller B weisen einen Bruch unter Kopf auf. Die erreichten Schwingspielzahlen bewegen sich bei den unter Kopf gebrochenen Probekörpern im Streuband der Brüche im ersten tragenden Gewindegang.

b) Zeitfestigkeitsbereich 1 (ZFB 1)

Es liegt eine relativ große Streubreite in den Ergebnissen vor. Die erzielten Bruchschwingspielzahlen der Probekörper von Hersteller A liegen allesamt unter denen von Hersteller B. Hersteller C weist einen Bruch mit niedriger und einen Bruch mit hoher erzielter Schwingspielzahl auf.

Der Bruchort liegt fast ausschließlich im ersten tragenden Gewindegang. Die Ausnahme bildet ein Prüfkörper von Hersteller B, der unter Kopf gebrochen ist. Die Bruchschwingspielzahl dieses Probekörpers liegt mit über 1 Mio. Lastwechsel weit außerhalb der restlichen Ergebnisse und bereits im Bereich der erzielten Schwingspielzahlen der im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit geprüften Schrauben.

c) Zeitfestigkeitsbereich 2 (ZFB 2)

Das Streuband ist im ZFB 2 geringer als im ZFB 1. Die höchsten Bruchschwingspielzahlen erzielten die beiden Probekörper von Hersteller C. Die Ergebnisse von Hersteller A und B sind durchmischt.

Der Bruchort liegt überwiegend im ersten tragenden Gewindegang. Auch hier weisen zwei Probekörper von Hersteller B einen Bruch unter Kopf auf. Im Gegensatz zum ZFB 1 liegen die erreichten Lastwechselzahlen dieser Probekörper allerdings im normalen Streuband.

4.4 Biege-Schwingversuche

Für die Durchführung von Biegeschwingversuchen an Schrauben existiert keine normative Regel. Die Schwingversuche und deren Auswertung werden, soweit als sinnvoll erachtet, in Anlehnung an die DIN 969 durchgeführt.

Bei Biegeschwingversuchen muss zwischen Wechselbelastung, bei der Zug- und Druckseite wechseln, und Schwellbelastung, bei der Zug- und Druckseite stationär sind, unterschieden werden. Meist wird die Schraubenverbindung wie in einem Ringflansch aufgrund der exzentrischen Lasteinleitung schwellend belastet. Die Wechselbelastung kann dennoch als Basis angesehen werden, da zum einen bei einer schwellenden Beanspruchung als zusätzliche Einflussgröße die Exzentrizität zur Belastung eingeht und zum anderen mit einer exzentrischen Belastung auch eine simultane Axialbelastung einhergeht. Aus diesem Grund werden die Versuche unter wechselnder Belastung durchgeführt.

Für ein realitätsnahes Tragverhalten der Schraubenverbindung spielt die Vorspannung eine entscheidende Rolle. Sie muss so groß sein, dass durch Überlagerung von Vorspannung und Biegerandspannung auch die Biegedruckseite der Schraube noch unter Zug steht. Eine zu geringe Vorspannkraft würde zu einem Abheben der Mutter auf der Druckseite und somit zu einem Verkanten der Verbindungselemente führen.

Wie bei den Axialschwingversuchen werden auch die Biegeschwingversuche unter konstanter Mittellast durchgeführt.

Die verwendete Prüfmaschine (s. Kapitel 4.4.2) arbeitet biegewinkelgeregelt. Die Art der Regelung und die Tatsache, dass die Mittelspannung konstruktionsbedingt nicht nachgeregelt werden kann, hat Konsequenzen für den Zeitfestigkeitsbereich: durch einen Anriss reduziert sich die Steifigkeit des Prüfkörpers. Der gleiche kontrollierte Biegewinkel erzeugt im Prüfkörper somit nach dem Anriss eine geringere Biegespannung als zuvor. Gleichsam erfährt die Schraube durch die Schädigung plastische Dehnungen, welche zu einem Abfall der Vorspannkraft führen. Für die Ermittlung der Dauerfestigkeit spielt dies keine Rolle, da nach dem Stand des Wissens jeder Anriss auch letztendlich zum Bruch führt und nur zwischen Bruch und Durchläufer unterschieden wird. Im Zeitfestigkeitsbereich führt die Verringerung der Biegespannung nach dem Anriss allerdings zu höheren Schwingspielzahlen. Aufgrund dieser Tatsache werden nicht Bruchwöhlerlinien sondern Anrisswöhlerlinien erzeugt. Der Zeitpunkt des Anrisses wird über den Vorspannkraftverlauf ermittelt.

4.4.1 Versuchsmaterial

Während der vorangegangenen Axialschwingversuche wurde festgestellt, dass einer von vier Herstellern standardmäßig eine abweichende Herstellungsart wählt. Daher standen von Beginn an nur Probekörper von drei verschiedenen Herstellern zur Verfügung, welche folgende Garnituren geliefert haben:

Hersteller A: 23 Garnituren M48x345 10.9 tZn

Hersteller B: 15 Garnituren M48x340 10.9 tZn

Hersteller C: 23 Garnituren M48x340 10.9 tZn

Die im Vergleich zu den Axialschwingversuchen größere benötigte Schraubenlänge ist aufgrund von Prüfmaschinenbeschränkungen erforderlich und spielt für den Vergleich der Versuchsergebnisse keine nennenswerte Rolle.



Die unterschiedlichen Liefermengen und Längen liegen in den Lagerbeständen der einzelnen Firmen begründet. Da Hersteller B kurzfristig nicht die gewünschten 23 Garnituren zur Verfügung stellen konnte und einige Vorversuche zur Kalibrierung der Maschine mit Schrauben von Hersteller A durchgeführt wurden, werden im Zeitfestigkeitsbereich weniger Versuche mit Schrauben dieser beiden Hersteller durchgeführt.

4.4.2 Prüfmaschine

Die verwendete Prüfmaschine (Abb. 4-6) zur Durchführung der Schwingversuche wurde von Dr.-Ing. Attila Alt entwickelt und ist patentgeschützt (Patent-Nr. 102 04 258).

Es handelt sich hierbei um einen magnetangeregten Resonanzpulser. Die eingesetzte Maschine arbeitet in einem Prüffrequenzbereich von 60-65 Hz, so dass Zug- und Biegeversuchsergebnisse ohne Berücksichtigung eines Frequenzeinflusses miteinander verglichen werden können.

Die Kontrolle des Biegewinkels erfolgt über an der Maschine angebrachte Dehnungsmessstreifen.



Abbildung 4-6: Biegeresonanzprüfmaschine

4.4.3 Vorspanngerät

Die Schraubenverbindungen müssen für die Prüfung ausreichend vorgespannt werden. Im Gegensatz zu den Axialschwingversuchen kann die Vorspannung nicht über die Prüfmaschine selbst aufgebracht werden. Deswegen wurden die Schrauben im eingebauten Zustand vorgespannt. Hierfür wurde freundlicherweise von der Firma Hytorc ein hydraulisches Vorspanngerät (MXT 3 mit Hydraulikpumpe JETPRO) zur Verfügung gestellt. Mit diesem Gerät wurden die Schraubenverbindungen auf ein Niveau von planmäßig 500 kN vorgespannt. Ein präzises Vorspannen auf ein exakt einheitliches Niveau war aufgrund unterschiedlicher Reibzustände in den gepaarten Gewinden der Probekörper nicht möglich. Ein Vorspannen auf 930 kN nach DASt-Ri. 021 war wegen eines möglichen Stabilitätsversagens der Maschine nicht möglich. Die wirkende Vorspannkraft von ca. 500 kN ist ausreichend, um die Biegedruckseite auf allen Lasthorizonten zu „überziehen“. Die vorhandene Vorspannkraft wurde über Dehnungsmessstreifen an der Prüfmaschine gemessen.

4.4.4 Versuchsparameter

Tabelle 4-5 zeigt die gewählten Versuchsparameter für die Prüfung im Zeitfestigkeitsbereich (ZFB 1 und ZFB 2) und im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB).

	ÜGB	ZFB 1	ZFB 2
Anz. Versuche	30	10	10
Mittellast $F_{m,Beginn}$ [kN]	~500	~500	~500
Prüfamplitude σ_a [MPa]	var.	$1,7 \cdot \sigma_{A,D50}$	$2,4 \cdot \sigma_{A,D50}$
Startamplitude σ_{Start} [MPa]	58,4	$1,7 \cdot \sigma_{A,D50}$	$2,4 \cdot \sigma_{A,D50}$
Stufensprung d_{Stufe} [MPa]	2,5	-	-
Abbruchkriterium N [-]	$1 \cdot 10^7$ / Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4-5: Versuchsparameter für Biegeschwingversuche

Die Schrauben zeigten bei der Prüfung ein gutmütiges Verhalten nach dem Anriss. Mit fortschreitendem Anriss sank die Mittellast in hohem Maße, in einigen Fällen auf unter 10% der Ausgangsvorspannung, ohne dass der Probenkörper gebrochen ist. Bei so weit vorgeschädigten Probekörpern konnte der Schraubenbruch problemlos manuell herbeigeführt werden.



Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit

In Tabelle 4-6 und Abbildung 4-7 sind die Versuchsergebnisse der Prüfung im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit dargestellt. Die zugehörigen Bruchbilder können dem Anhang entnommen werden. Als „gebrochen“ wurden dabei alle Schrauben mit ausgeprägtem Anriss angesehen.

Herst.	Prüfkörper	σ_a [MPa]	Ergebnis	N_{Anriss} [-]	Bruchort
A	1	45,0	Bruch	2.336.918	Unter Kopf
A	2	42,5	Bruch	4.531.136	Unter Kopf
A	3	40,0	Bruch	2.834.612	Unter Kopf
A	4	37,5	Bruch	5.432.859	Unter Kopf
A	5	35,0	Durchläufer	-	-
A	6	37,5	Durchläufer	-	-
A	7	40,0	Durchläufer	-	-
A	8	42,5	Bruch	3.534.692	Unter Kopf
A	9	40,0	Bruch	2.850.492	Unter Kopf
A	10	37,5	Bruch	2.551.560	Unter Kopf
B	11	35,0	Durchläufer	-	-
B	12	37,5	Durchläufer	-	-
B	13	40,0	Durchläufer	-	-
B	14	42,5	Durchläufer	-	-
B	15	45,0	Bruch	3.498.118	Unter Kopf
B	16	42,5	Bruch	3.981.477	Unter Kopf
B	17	40,0	Durchläufer	-	-
B	18	42,5	Durchläufer	-	-
B	19	45,0	Durchläufer	-	-
B	20	47,5	Durchläufer	-	-
C	21	50,0	Durchläufer	-	-
C	22	52,5	Durchläufer	-	-
C	23	55,0	Bruch	2.448.057	1. tragender Gewindegang
C	24	52,5	Bruch	2.179.868	1. tragender Gewindegang
C	25	50,0	Durchläufer	-	-
C	26	52,5	Durchläufer	-	-
C	27	55,0	Bruch	5.167.858	1. tragender Gewindegang
C	28	52,5	Durchläufer	-	-
C	29	55,0	Durchläufer	-	-
C	30	57,5	Bruch	2.868.673	1. tragender Gewindegang
C	31	55,0	Bruch	1.819.852	1. tragender Gewindegang

Tabelle 4-6: Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit

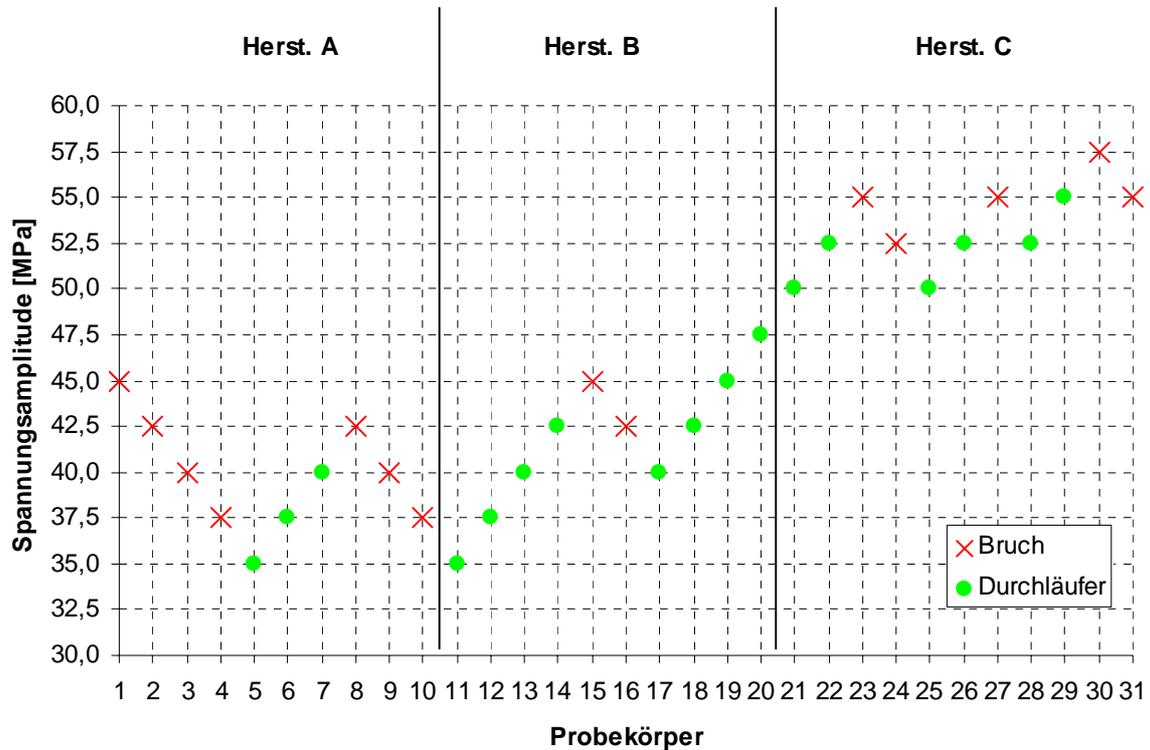


Abbildung 4-7: Versuchsergebnisse im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit

Es liegt eine große Streubreite von 10 Stufensprüngen vor. Zwischen Hersteller A und C besteht ein Unterschied in der dauerhaft ertragbaren Spannungsamplitude von ca. 15 MPa. Wegen der Vorgehensweise beim Treppenstufenverfahren lässt sich für Hersteller B keine aussagekräftige Einschätzung der mittleren Dauerfestigkeitsamplitude vornehmen. Der Anstieg der Spannungsamplitude in der Versuchsserie von Hersteller B legt aber die Vermutung nahe, dass die mittlere Dauerfestigkeit eher im Bereich von Hersteller C als von Hersteller A liegt.

4.4.5 Ermittlung der Anrisschwingspielzahlen aus der Vorspannkraft

Jede vorgespannte Schraubenverbindung verliert bereits kurz nach dem Anziehvorgang einen geringen Teil ihrer Vorspannkraft. Der Grund hierfür liegt in der Flächeneinebnung der in Kontakt stehenden Verschraubungsteile. Dieses Verhalten erschwert die Suche nach der Anrisschwingspielzahl mithilfe des Vorspannkraftabfalls. Zur Überprüfung, wie viel Prozent Vorspannkraftverlust aus der Einebnung resultieren können, werden sämtliche Durchläuferproben aus dem Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit auf ihren Vorspannkraftabfall hin untersucht.



Schraube Nr.	$F_{V,Beginn}$ [kN]	$F_{V,Ende}$ [kN]	Prozentualer Abfall
5	551,2	557,8	-1,2%
6	527,4	519,5	1,5%
7	502,1	494,1	1,6%
11	482,2	491,6	-1,9%
12	522,8	542,0	-3,7%
13	499,0	488,3	2,1%
14	514,5	510,8	0,7%
17	517,1	503,5	2,6%
18	506,5	494,9	2,3%
19	522,2	525,4	-0,6%
20	486,1	482,8	0,7%
21	508,7	509,4	-0,1%
22	545,0	544,1	0,1%
25	524,7	521,7	0,6%
26	509,9	502,6	1,4%
28	501,0	500,9	0,1%
29	507,3	511,2	-0,8%

Tabelle 4-7: Prozentualer Vorspannkraftabfall der Durchläufer nach $1 \cdot 10^7$ Lastwechseln

Tabelle 4-7 zeigt, dass der Vorspannkraftabfall durch Einebnung bei maximal 2,6% liegt. Bei einigen Versuchskörpern konnte sogar ein Anstieg der Vorspannkraft von bis zu 3,7% beobachtet werden. Dieses Verhalten wird auf ein Verklemmen der Schraube-Mutter-Verbindung in der Maschine bei zyklischer Belastung zurückgeführt und spielt hinsichtlich der Ermittlung des Vorspannkraftverlustes keine Rolle. Aufgrund dieser Auswertung wird auf der sicheren Seite davon ausgegangen, dass ab einem Vorspannkraftverlust von mehr als 2,5% ein Anriss vorliegt. Die Anrisschwingspielzahlen werden demnach für einen Vorspannkraftabfall von 2,5% definiert.

4.4.6 Versuchsergebnisse im Zeitfestigkeitsbereich

Die Bestimmung der beiden Lasthorizonte für die Versuche im Zeitfestigkeitsbereich wird in Anlehnung an DIN 969 durchgeführt (siehe hierfür auch Kapitel 5). Wegen der großen Streubreite bei den Versuchen im Bereich des Übergangs zur Dauerfestigkeit wird der untere Lasthorizont etwas höher als nach DIN 969 gewählt, um einen größeren Abstand der Prüfamplitude zu der mittleren Dauerfestigkeit von Hersteller C zu gewährleisten.

Aus der statistischen Auswertung der Versuche im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit ergeben sich als Prüfkrafthorizonte

- für ZFB 1: 76,5 MPa ($=1,7 \cdot \sigma_{a,D50}$)

- für ZFB 2: 110,0 MPa ($=2,4 \cdot \sigma_{a,D50}$)

Die beiden nachfolgenden Tabellen und Abbildungen zeigen die Ergebnisse aus den Versuchsreihen sowohl für Bruch als auch für 2,5%igen Abfall der Vorspannkraft. Die zugehörigen Bruchbilder können dem Anhang entnommen werden.

4.4.6.1 Ergebnisse im Zeitfestigkeitsbereich 1

Herst.	Prüfk.	F_v [kN]	σ_a [MPa]	N_{Anriss} [-]	N_{Bruch} [-]	Bruchort
A	1	518	76,5	516.111	700.713	Unter Kopf
A	2	505	76,5	366.550	531.054	Unter Kopf
B	3	525	76,5	629.149	1.097.721	1. tragender Gewindegang
B	4	516	76,5	755.103	1.202.638	Unter Kopf
C	5	507	76,5	379.879	648.947	1. tragender Gewindegang
C	6	523	76,5	377.280	527.491	1. tragender Gewindegang
C	7	519	76,5	428.506	597.098	1. tragender Gewindegang
C	8	475	76,5	640.680	1.608.640	Gewindeauslauf
C	9	527	76,5	531.748	727.208	1. tragender Gewindegang
C	10	423	76,5	530.016	787.921	1. tragender Gewindegang

Tabelle 4-8: Versuchsergebnisse auf dem unteren Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 1)

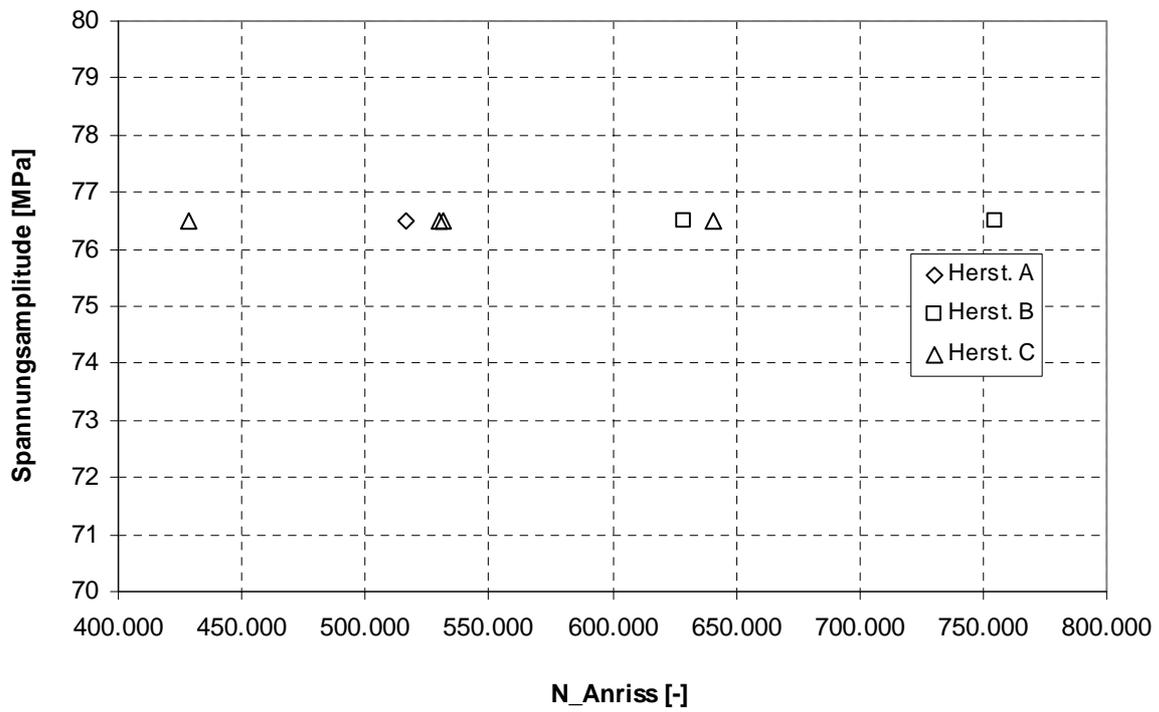


Abbildung 4-8: Versuchsergebnisse auf dem unteren Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 1) für 2,5% Vorspannkraftabfall

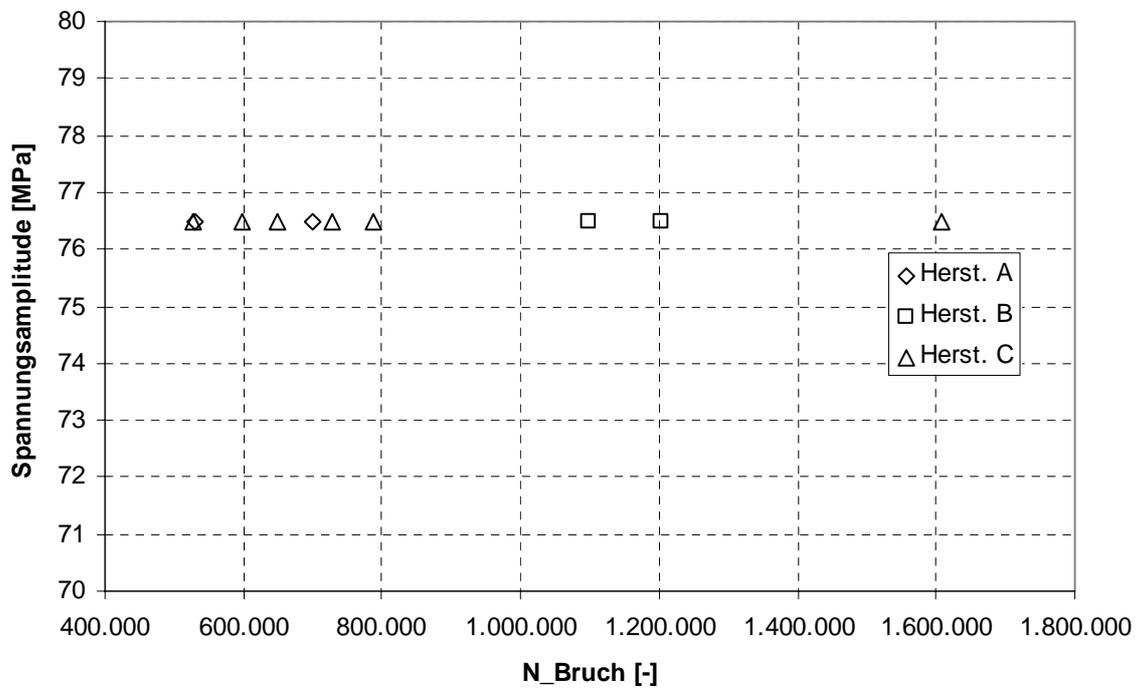


Abbildung 4-9: Versuchsergebnisse auf dem unteren Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 1) für Schraubbruch

4.4.6.2 Ergebnisse im Zeitfestigkeitsbereich 2

Herst.	Prüfk.	F_v [kN]	σ_a [MPa]	N_{Anriss} [-]	N_{Bruch} [-]	Bruchort
A	1	513	110	134.533	232.448	Unter Kopf
A	2	528	110	133.015	192.319	1. tragender Gewindegang
A	3	527	110	146.072	245.536	Unter Kopf
B	4	528	110	178.398	282.061	1. tragender Gewindegang
B	5	514	110	167.627	314.037	Unter Kopf
C	6	513	110	150.217	225.553	1. tragender Gewindegang
C	7	508	110	145.010	213.964	1. tragender Gewindegang
C	8	423	110	166.236	372.081	Gewindeauslauf
C	9	505	110	157.906	227.395	1. tragender Gewindegang
C	10	513	110	156.083	211.849	1. tragender Gewindegang

Tabelle 4-9: Versuchsergebnisse auf dem oberen Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 2)

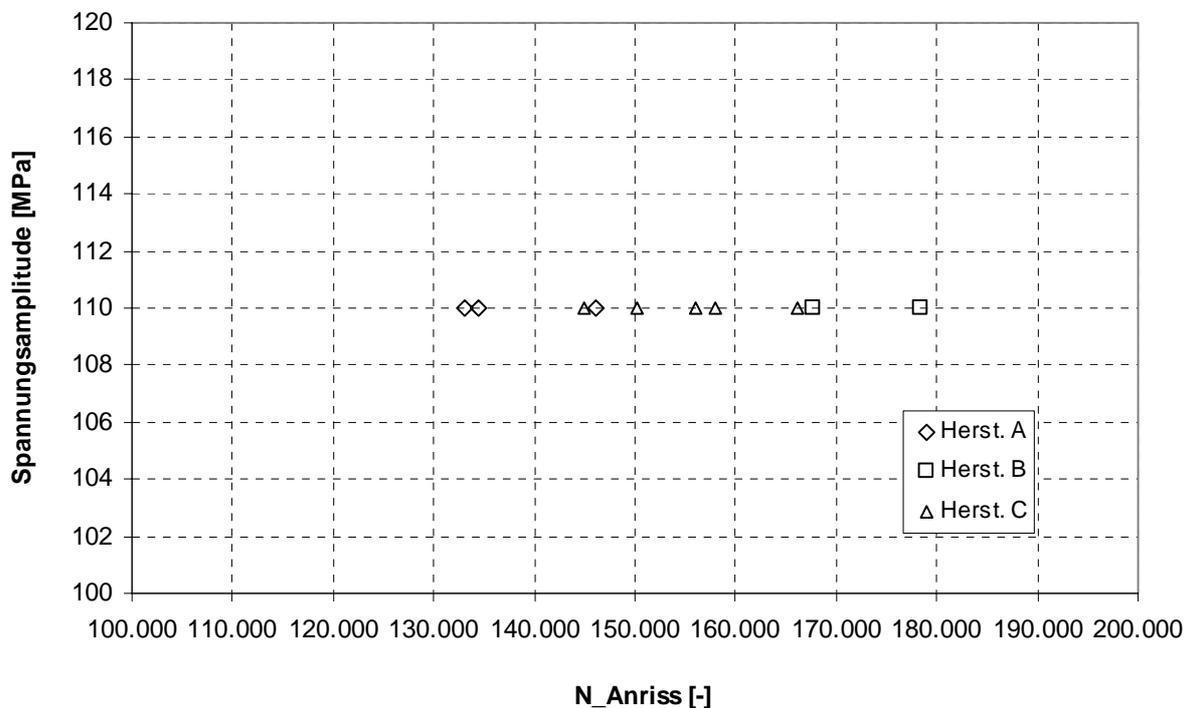


Abbildung 4-10: Versuchsergebnisse auf dem oberen Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 2) für 2,5% Vorspannkraftabfall

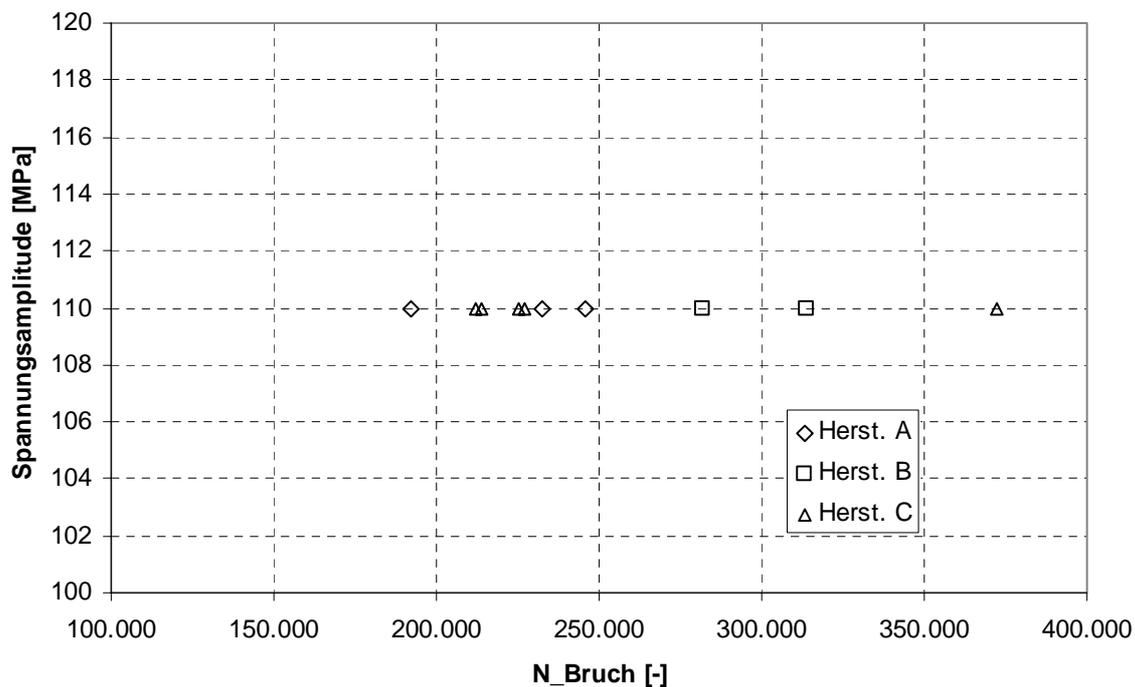


Abbildung 4-11: Versuchsergebnisse auf dem oberen Zeitfestigkeitshorizont (ZBF 2) für Schraubenbruch

4.4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

a) Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB)

Der Streubereich im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit ist mit 10 Stufensprüngen sehr breit. Problematisch ist vor allem, dass das vorhandene Streuband nicht von allen Herstellern gleichmäßig ausgenutzt wird. Der Streubereich von Hersteller A liegt vollständig unter dem von Hersteller C. Durch die Diskrepanz der Ergebnisse dieser beiden Hersteller deckt Hersteller B als Verbindungsglied zwischen den beiden Ketten bei 10 Versuchen allein sechs Stufensprünge ab. Da die Ergebnisse von Hersteller B eine ansteigende Tendenz aufweisen, liegt die Vermutung nahe, dass sich dessen Ergebnisse bei frei wählbarer Startamplitude eher im Bereich von Hersteller C als von Hersteller A bewegen würden.

Es liegen zwei verschiedene Bruchorte vor. Während sämtliche Schrauben der Hersteller A und B unter Kopf gebrochen sind, versagten die Schrauben von Hersteller C durchweg im ersten tragenden Gewindegang.

Die Anrisschwingspielzahlen bewegen sich zwischen 2 Mio. und 5 Mio. Lastwechseln. Ein Zusammenhang zwischen Hersteller und Höhe der Anrisschwingspielzahl ist nicht erkennbar.

b) Zeitfestigkeitsbereich 1

Die Streubreite bewegt sich im ZFB 1 im mittleren Bereich. Der Bruchort ist wie im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit hochgradig herstellerabhängig. Während die Probekörper von Hersteller A unter Kopf gebrochen sind, versagen die Probekörper von Hersteller C fast alle im ersten tragenden Gewindegang. Eine Ausnahme bildet Prüfkörper 8 des Herstellers C,

welcher im Gewindeauslauf versagte. Die beiden Probekörper von Hersteller B brachen je einmal unter Kopf und einmal im ersten tragenden Gewindegang.

Die beiden Probekörper von Hersteller B sowie der im Gewindeauslauf gebrochene Probekörper von Hersteller C erreichen dabei deutlich höhere Lastwechselzahlen.

c) Zeitfestigkeitsbereich 2

Die Anrisschwingenspielzahlen bewegen sich in einem engen Streuband. Während die Probekörper von Hersteller A und B beide Brüche unter Kopf und im ersten tragenden Gewindegang aufweisen, versagen die Schrauben von Hersteller C nur im ersten tragenden Gewindegang. Eine Ausnahme bildet auch hier Prüfkörper 8 von Hersteller C, welcher im Gewindeauslauf versagte. Ein Zusammenhang zwischen Bruchort und erreichter Lastwechselzahl ist nicht erkennbar.

Bei beiden Zeitfestigkeitshorizonten ist zu erkennen, dass der Streubereich für 2,5% Vorspannkraftabfall weitaus geringer ist als bei dem letztendlichen Bruch der Schraube.

4.5 Diskussion der Bruchorte und Konsequenzen

Die folgende Tabelle 4-10 zeigt, dass die Bruchorte (1. tragender Gewindegang, Übergang Kopf-Schaft, Gewindeauslauf) nicht nur last- sondern teilweise auch herstellerabhängig sind.

	Bruchorte Zug			Bruchorte Biegung		
	ÜGB	ZFB 1	ZFB 2	ÜGB	ZFB 1	ZFB 2
Hersteller A	1. trag. Gg	1. trag. Gg	1. trag. Gg	ÜG K-S	ÜG K-S	ÜG K-S + (1. trag. Gg)
Hersteller B	ÜG K-S + (1. trag. Gg)	1. trag. Gg + (ÜG K-S)	1. trag. Gg + ÜG K-S	ÜG K-S	1. trag. Gg + ÜG K-S	1. trag. Gg + ÜG K-S
Hersteller C	1. trag. Gg	1. trag. Gg	1. trag. Gg	1. trag. Gg	1. trag. Gg + (Ga)	1. trag. Gg + (Ga)

Tabelle 4-10: Herstellerbezogener Vergleich der Bruchorte

Die Klammern um einige Bruchorte symbolisieren den weniger häufig auftretenden Bruchort auf dem jeweiligen Belastungshorizont.



Aufgrund der unterschiedlichen Bruchorte ergeben sich folgende Fragen:

1. Worin liegt die Ursache der unterschiedlichen Bruchorte?
2. Sind die erreichten Schwingenspielzahlen bei verschiedenen Bruchorten innerhalb einer Belastungsart miteinander vergleichbar?
3. An welcher Stelle würden die Schrauben bei kombinierter Beanspruchung versagen?

Zu Frage 1:

Verschiedene Gründe können für die abweichenden Bruchorte verantwortlich sein:

- a) Materialeinfluss:
 - Unterschiedliche Werkstoffe
- b) Geometrieinfluss
 - Unterschiedliche Ausrundungsradien unter Kopf und im 1. tragenden Gewindengang
 - Unterschiedlicher Rundlauf bzw. Kopf/Schaft nicht rechtwinklig zueinander
 - Differenzen im Schaftdurchmesser über die Schaftlänge
- c) Fertigungseinfluss
 - Verschiedene Randschichtzustände durch Herstellungsprozesse

Eine Rückfrage bei den Herstellern ergab, dass für die Herstellung der Probekörper von Hersteller A und B ein 34 CrNiMo 6 eingesetzt wurde, während Hersteller C hier den höherwertigen Werkstoff 30 CrNiMo 8 verwendet hat. Der 30 CrNiMo 8 zeichnet sich durch ein gleichmäßigeres Gefüge nach dem Vergütungsprozess aus, so dass weniger Fehlstellen vorliegen, die die Ermüdungsfestigkeit beeinträchtigen können. Die unterschiedliche Gefügebesechaffenheit könnte ein Grund für die abweichenden Ergebnisse zwischen Hersteller A und C sein.

In der nachfolgenden Tabelle 4-11 sind für jeweils 4 Probekörper der einzelnen Hersteller aus der Biegeprüfserie im ÜGB verschiedene geometrische Parameter bestimmt worden:

Hersteller	Prüfk. Nr.	Ø nahe Kopf [mm]	Ø nahe Auslauf [mm]	Radius K-S [mm]	Zn-Dicke nahe Kopf [µm]
A	2	48,1	47,9	-	110-160
A	6	48,0	47,8	3-3,5	
A	7	48,0	47,9	3-3,5	
A	8	48,0	47,9	-	
B	15	48,9	48,5	-	120-160
B	16	48,9	48,5	-	
B	18	48,8	48,4	3-3,5	
B	19	48,8	48,0	3-3,5	
C	24	48,2	48,2	3-3,5	60-110
C	25	48,2	48,2	3-3,5	
C	29	48,2	48,2	3-3,5	
C	30	48,2	48,2	3-3,5	

Tabelle 4-11: Vergleich geometrischer Parameter

Der Vergleich der Schaftdurchmesser in der Nähe des Kopf-Schaft-Überganges und im Bereich des Gewindeauslaufes ergab im Kopfbereich Unterschiede bis zu knapp 1mm. Die größte Differenz zwischen den Durchmessern nahe Kopf und nahe Gewindeauslauf weisen die Probekörper von Hersteller B mit ~0,4mm auf. Die größere Durchmesserdiffereenz über die Schaftlänge bei Hersteller B führt zu einer geringfügig anderen Steifigkeitsverteilung und damit bei Biegebelastung zu einem leicht erhöhten Biegemoment unter Kopf. Auffällig ist der konstante Durchmesser bei Hersteller C. Bei genauer Betrachtung der Probekörper ist erkennbar, dass der Schaft bei diesem Hersteller überdreht worden ist. Neben der gleichmäßigeren Geometrie kann sich ein Überdrehen zusätzlich positiv auf die Randschicht und damit auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken. Beim Überdrehen kann ebenfalls der Übergangsbereich zwischen Kopf und Schaft nachbearbeitet werden, so dass dies auch ein Grund sein kann, dass die Probekörper von Hersteller C nicht unter Kopf gebrochen sind.

Die oberflächliche Überprüfung der Ausrundungsradien an den nicht gebrochenen Schrauben mithilfe einer Radienlehre am Kopf-Schaftübergang zeigte keine nennenswerten Unterschiede innerhalb eines Herstellers und zwischen den Herstellern. Aufgrund der Zinkschicht konnten jedoch nicht die Ausrundungsradien des Grundwerkstoffes ermittelt werden. Eine Messung der Zinkschichtdicke in der Nähe der Ausrundung ergab etwas geringere Dicken bei Hersteller C.

Auch wenn sämtliche Probekörper schlussvergütet sind, können einzelne Prozessschritte wie beispielsweise das Strahlen der Schrauben zur Reinigung vor dem Verzinken Auswirkungen auf den Randschichtzustand haben. Da die Prozesskette zum Know-how der Hersteller gehört, sind hierüber keine Daten verfügbar.



Fazit: Die unterschiedlichen Bruchorte und erreichten Schwingenspielzahlen der einzelnen Hersteller können anhand der vorhandenen Daten nicht abschließend erklärt werden.

Die Kopfbrüche der Probekörper von Hersteller B bei *Zugbelastung* sind vermutlich einem geometrischen Problem geschuldet, d.h. die Schrauben laufen nicht rund bzw. der Kopf steht nicht exakt rechtwinklig zum Schaft. Somit wirkt zusätzlich zur Zugkraft ein zusätzliches Biegemoment unter Kopf. Diese These wird dadurch gestützt, dass die Probekörper von Hersteller B im ÜGB überwiegend unter Kopf gebrochen sind und im ZFB überwiegend Brüche im ersten tragenden Gewindegang aufgetreten sind. Durch die höheren Lasten im ZFB kann eine plastische Verformung stattfinden, die geometrische Imperfektionen aus dem Probekörper gleich zu Beginn der Prüfung „herausziehen“. Der Probekörper wird anschließend rein axial beansprucht wird.

Für *Biegebelastung* werden unterschiedliche Kerbradien im Kopf-Schaftübergang im Grundwerkstoff vermutet, die aufgrund der Verzinkung nicht überprüft werden konnten. Für Hersteller A und B könnte darüber hinaus noch die Differenz der Schaftdurchmesser an verschiedenen Stellen hinzugezogen werden. Dieser Umstand wird allerdings als vernachlässigbar eingestuft, da die Erhöhung des Biegemoments im Kopfbereich aufgrund der Durchmessererhöhung von maximal 0,2mm bzw. 0,4mm nur marginal ist. Ein besseres Randschichtverhalten bzw. eine bessere Ausarbeitung des Ausrundungsradius unter Kopf durch Überdrehen der Schrauben durch Hersteller C sowie die Verwendung eines anderen Werkstoffs können ebenfalls Gründe für die abweichenden Bruchorte und die generell besseren Ergebnisse im Vergleich zu Hersteller A und B sein.

Zu Frage 2:

Streng genommen ist eine Durchmischung unterschiedlicher Bruchorte innerhalb einer Stichprobe nicht ohne weiteres zu vertreten, da unterschiedliche Bruchmechanismen vorliegen. Aus den unterschiedlichen Bruchorten können verschiedene Wöhlerliniensteigungen oder auch Dauerfestigkeiten resultieren, die bereits bei der Untersuchung nur eines Herstellers problematisch werden können.

Beispielsweise kann die Dauerfestigkeit der Probekörper von Hersteller B unter Zugbeanspruchung nur mit Kopfbrüchen ermittelt werden, während die Zeitfestigkeiten beim gleichen Hersteller hauptsächlich durch Brüche im ersten tragenden Gewindegang charakterisiert sind. Die Information über die Dauerschwingfestigkeiten mit Bruch im Gewinde bzw. Zeitfestigkeiten mit Bruch unter Kopf zur vollständigen Beschreibung einer Wöhlerlinie mit einem einheitlichen Versagensort fehlen. Hier gilt es demnach zu überprüfen, ob unterschiedliche Bruchorte ähnliche Schwingenspielzahlen erreicht haben. Ist dies der Fall, können die beiden Versagensorte als gleichwertig betrachtet werden.

Bei einem Vergleich mehrerer Hersteller mit herstellerspezifisch unterschiedlichen Bruchorten (wie hier beispielsweise bei Biegebelastung: Hersteller C im Gewinde, Hersteller A+B überwiegend unter Kopf) ergibt sich ein zusätzliches Problem. Auch wenn Hersteller A, B und C unter den gleichen Prüfbedingungen getestet wurden, zeigt der unterschiedliche Bruchort, dass vermutlich unterschiedliche Kerbfälle vorliegen, die getrennt voneinander untersucht werden müssen.

Aus der Sicht eines Anwenders kann entgegen gehalten werden, dass es bei dem äußerlich identischen Bauteil „Schraube“ nur auf die erreichte Schwingspielzahlen ankommt und nicht auf den Bruchort. Wenn allerdings die Bruchschwingspielzahlen in einem Zusammenhang mit dem Bruchort stehen, müsste in diesem Fall neben dem Kerbfall auch der Bruchort angegeben werden. Es kann somit streng genommen nicht mehr von einer Stichprobe gesprochen werden.

Zu Frage 3:

Solange die Schrauben eines Herstellers unter Zug und unter Biegung den gleichen Bruchort aufweisen, stellt sich diese Frage nicht und die Schwingspielzahl kann mithilfe der ermittelten Wöhlerlinien bestimmt werden. Treten allerdings für Zug und Biegung unterschiedliche Bruchorte auf, lässt sich die Frage nach dem letztendlichen Bruchort und der Schwingspielzahl nicht mehr ohne weiteres beantworten.

Konsequenzen:

Da die Datenbasis für eine statistische Auswertung mit Quantilen nur unter Berücksichtigung aller Versuchsergebnisse ausreicht, werden trotz der angesprochenen Probleme bei verschiedenen Bruchorten für den Vergleich mit EN 1993-1-9 alle Versuchsergebnisse als eine Stichprobe angesehen.



5 Statistische Auswertung

In diesem Abschnitt werden die Versuchsergebnisse aus den Schwingversuchen mit Axial- und mit Biegebelastung statistisch ausgewertet und die Wöhlerlinien ermittelt. Wie in Kapitel 3.5 angekündigt, werden die Versuchsergebnisse im Zeitfestigkeitsbereich entweder normalverteilt oder log-normalverteilt ausgewertet. Für den Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit ist die Streuung um den Mittelwert nach dem Treppenstufenverfahren normalverteilt.

Sämtliche nachfolgend angegebenen Spannungen sind auf den Spannungsquerschnitt bezogen.

5.1 Axialzug-Schwingversuche

5.1.1 Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit

5.1.1.1 Auswertung mit allen Probekörpern

Die Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichung im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit wird in Übereinstimmung mit der DIN 969 nach den Formeln aus Kapitel 3.4.1 vorgenommen. Die Ermittlung der Eingangsparameter C, A und E erfolgt nach Tabelle 5-1.

F _a [kN]	Hersteller A									Hersteller C									Hersteller B									X	O	z	f	z·f	z ² ·f				
58,4	X															X												2	0	6	0	0	0				
55,6		X				X								O	X					X								4	1	5	1	5	25				
52,8			X		O	X								O			X			O	X							4	4	4	4	16	64				
50,0				O			X							O			X	O			X				O			3	4	3	4	12	36				
47,2							X							O						O			X	O				2	3	2	3	6	12				
44,4								X	O															O				1	2	1	2	2	2				
41,6														O														0	1	0	1	0	0				
P.nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	1	-	15	41	139
																																			C	A	E

Tabelle 5-1: Auswertungsschema des Treppenstufenverfahrens (7 Stufensprünge)

Mittelwert:

$$F_{A50} = 41,6 + 2,8 \cdot \left(\frac{41}{15} + 0,5 \right) = 50,7 \text{ kN (oder } \sigma_{a50} = 34,4 \text{ MPa)}$$

Standardabweichung:

$$s(F_A) = 1,62 \cdot 2,8 \cdot \left[\frac{15 \cdot 139 - 41^2}{15^2} + 0,029 \right] = 8,3 \text{ kN (oder 16,3\%)}$$

5.1.1.2 Auswertung mit 26 Probekörpern

Bei genauer Betrachtung wird ersichtlich, dass sowohl der unterste als auch der oberste Lasthorizont nur von einem Hersteller abgedeckt wird. Der unterste Horizont mit F_a = 41,6 kN wird nur von Hersteller C abgedeckt. Die Laststufe resultiert aus den vorigen Bruchereignissen von Hersteller A. Der oberste Lasthorizont mit F_a = 58,4 kN wird ebenfalls nur von Her-

steller C erreicht. Der Versuch auf demselben Horizont von Hersteller A resultiert aus dem Startwert, den Hersteller A nicht bestätigen konnte. Aus diesem Grund wird eine zweite Auswertung ohne den obersten und untersten Lasthorizont durchgeführt, d.h. die Versuchsergebnisse der Probekörper 1, 10, 11, 16 und 17 werden aus der nachfolgenden Auswertung entfernt. Es verbleiben somit noch 26 Versuche für eine zusammenhängende Kette.

F _a [kN]	Hersteller A								Hersteller C								Hersteller B								X	O	Z	f	z·f	z ² ·f			
	55,6	X				X									X														4	0	4	0	0
52,8		X		O	X							O	X					O	X								O	4	4	3	4	12	36
50,0			O			X					O			X	O				X						O		3	4	2	4	8	16	
47,2							X	O							O					X	O					2	3	1	3	3	3		
44,4								O													O					0	2	0	2	0	0		
P.nr	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	1	1	-	13	23	55	
																													C	A	E		

Tabelle 5-2: Auswertungsschema des Treppenstufenverfahrens (5 Stufensprünge)

Mittelwert:

$$F_{A50} = 44,4 + 2,8 \cdot \left(\frac{23}{13} + 0,5 \right) = 50,8 \text{ kN (oder } \sigma_{a50} = 34,4 \text{ MPa)}$$

Standardabweichung:

$$s(F_A) = 1,62 \cdot 2,8 \cdot \left[\frac{13 \cdot 55 - 23^2}{13^2} + 0,029 \right] = 5,1 \text{ kN (oder 10,1\%)}$$

Durch die Reduktion von 7 auf 5 Lasthorizonte, die von allen Herstellern abgedeckt werden, bleibt der Mittelwert nahezu konstant, und die Streubreite reduziert sich von 16,3% auf 10,1%.



5.1.2 Zeitfestigkeitsbereich 1

5.1.2.1 Auswertung mit einem Stichprobenumfang von 10

Zunächst werden mit Hilfe von Tabelle 5-3 der Mittelwert und die Standardabweichung nach den Formeln aus Kapitel 3.1.1 für die Stichprobe bestimmt:

Ordnungs-Nr.	Herst.	Prüfk.	N_{Bruch}	$\log N_{\text{Bruch}}$
1	A	5	190.970	5,281
2	A	7	238.226	5,377
3	C	9	255.143	5,407
4	A	6	278.464	5,445
5	A	8	358.584	5,555
6	B	2	417.187	5,620
7	B	3	421.055	5,624
8	B	1	543.033	5,735
9	C	10	683.664	5,835
10	B	4	1.092.832	6,039

Tabelle 5-3: Bruchschwingspielzahlen des ZFB 1 (in aufsteigender Reihenfolge sortiert)

Mittelwert:

$$\bar{x} = 447.916$$

$$\log \bar{x} = 5,592$$

Standardabweichung:

$$s = 272.040 \quad (\text{oder } 60,7\%)$$

$$s_{\log} = 0,231$$

Die Überprüfung, ob die Normalverteilung oder die logarithmische Normalverteilung zugrunde gelegt werden muss, erfolgt mit dem Anderson-Darling Test [1-16] in Tabellenform:

- für Normalverteilung:

$$s = 272.040$$

$$\bar{x} = 447.916$$

i	x_i	Y_i	P_i	$1-P_i$	$\ln(P_i)$	$\ln(1-P_i)$	$(2i-1) * (\ln P_i + \ln(1-P_{n+1-i}))$
1	190970	-0,94	0,1725	0,8275	-1,7576	-0,1893	-6,4818
2	238226	-0,77	0,2204	0,7796	-1,5123	-0,2490	-9,4707
3	255143	-0,71	0,2393	0,7607	-1,4301	-0,2735	-12,2132
4	278464	-0,62	0,2667	0,7333	-1,3217	-0,3102	-13,5740
5	358584	-0,33	0,3713	0,6287	-0,9907	-0,4641	-14,3796
6	417187	-0,11	0,4550	0,5450	-0,7874	-0,6070	-13,7666
7	421055	-0,10	0,4607	0,5393	-0,7751	-0,6174	-14,1081
8	543033	0,35	0,6367	0,3633	-0,4515	-1,0125	-10,8743
9	683664	0,87	0,8069	0,1931	-0,2145	-1,6446	-7,8799
10	1092832	2,37	0,9911	0,0089	-0,0089	-4,7242	-3,7659
							-106,5141

$$A^2 = 0,6514$$

$$A^* = 0,7149 > 0,631 \text{ für Signifikanz } \alpha = 0,1$$

=> Normalverteilung nicht ansetzbar!



- für log-Normalverteilung:

$s = 0,231$

$\bar{x} = 5,592$

i	x_i	Y_i	P_i	$1-P_i$	$\ln(P_i)$	$\ln(1-P_i)$	$(2i-1) * (\ln P_i + \ln(1-P_{n+1-i}))$
1	5,2809651	-1,34	0,0895	0,9105	-2,4141	-0,0937	-6,0401
2	5,3769892	-0,93	0,1765	0,8235	-1,7344	-0,1942	-10,9664
3	5,4067837	-0,80	0,2119	0,7881	-1,5517	-0,2381	-14,3439
4	5,4447691	-0,64	0,2625	0,7375	-1,3374	-0,3045	-15,0475
5	5,5545909	-0,16	0,4362	0,5638	-0,8296	-0,5731	-14,6384
6	5,6203308	0,12	0,5493	0,4507	-0,5991	-0,7969	-12,8949
7	5,6243388	0,14	0,5561	0,4439	-0,5867	-0,8122	-11,5864
8	5,7348262	0,62	0,7321	0,2679	-0,3119	-1,3171	-8,2496
9	5,8348427	1,05	0,8535	0,1465	-0,1584	-1,9210	-5,9934
10	6,0385534	1,93	0,9734	0,0266	-0,0270	-3,6261	-2,2931
							-102,0537

$A^2 = 0,2054$

$A^* = 0,2254 < 0,631$ für Signifikanz $\alpha = 0,1$

=> log-Normalverteilung ansetzbar!

Aus dem Hypothesentest folgt, dass nur die log-Normalverteilung der Stichprobe genügt. Mithilfe von Excel werden die Quantilwerte für 10%, 90% und 97,7% Überlebenswahrscheinlichkeit der log-Normalverteilung berechnet.

$N_{10} = 772.616$

$N_{90} = 197.440$

$N_{97,7} = 135.024$

5.1.2.2 Auswertung mit einem Stichprobenumfang von 9 Probekörpern

Der Stichprobenwert mit der Ordnungsnummer 10 liegt noch innerhalb der 3-fachen Standardabweichung und darf somit streng genommen nicht als Ausreißer behandelt werden. Dennoch ist dieser Versuch in vielerlei Hinsicht besonders. Er ist der einzige Probekörper, dessen

- Bruchschwingspielzahl nicht durch ein zweites Ergebnis bestätigt wird,
- Bruchschwingspielzahl im Bereich der dauerhaft getesteten Probekörper liegt,
- Bruch unter Kopf aufgetreten ist.

Aus diesen Gründen wird dieser Versuch gestrichen und eine Auswertung mit neun Versuchswerten durchgeführt. Da sich hierdurch die Streubreite reduziert, braucht der Hypothesentest nicht erneut durchgeführt werden. Es ergeben sich mit den neun verbleibenden Stichprobenwerten:

Mittelwert:

$$\bar{x} = 376.258$$

$$\log \bar{x} = 5,542$$

Standardabweichung:

$$s = 159.657$$

$$s_{\log} = 0,180 \quad (\text{oder } 42,4\%)$$

Quantile:

$$N_{10} = 592.504$$

$$N_{90} = 204.836$$

$$N_{97,7} = 152.382$$

Durch das Streichen des höchsten Wertes fällt der Mittelwert ab und die Streubreite reduziert sich. Dadurch ergibt sich mit neun Versuchswerten eine höhere zulässige Schwingspielzahl für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $p_{\bar{u}} = 97,7\%$ als bei der Auswertung von 10 Versuchen.

5.1.2.3 Auswertung mit gemittelter Standardabweichung

Durch das Herausnehmen des am stärksten abweichenden Wertes der Stichprobe konnte die Standardabweichung um fast 20% reduziert werden. Dieses Vorgehen zeigt eine generelle Schwäche der statistischen Auswertung bei geringen Stichprobenumfängen, wie sie hier vorliegen: Durch einzelne Einflüsse (wie die Untersuchung von mehreren Herstellern) werden Streuungen erzeugt, die bei großen Stichprobenumfängen innerhalb einer Normalverteilung unbedeutend wären, bei kleinen Stichprobenumfängen allerdings großen Einfluss auf den Mittelwert und die Standardabweichung haben können. Durch die Reduzierung des Stichprobenumfanges wurden bessere Quantilwerte erzeugt, obwohl der Mittelwert geringer war als bei vollem Stichprobenumfang.

Aus diesem Grund wird eine weitere statistische Auswertung auf der Basis folgender Überlegungen durchgeführt:



Da der Mittelwert und die Standardabweichung entscheidend für die Quantilwerte sind und die große Standardabweichung vermutlich aus der Mischung verschiedener Hersteller stammt, werden zunächst alle Hersteller getrennt hinsichtlich ihres Mittelwertes und ihrer Standardabweichung ausgewertet. Für die Berechnung der Quantilwerte der gesamten Stichprobe werden im Anschluss folgender Mittelwert und Standardabweichung verwendet:

- Mittelwert: Minimum der drei Einzelmittelwerte
- Standardabweichung: Mittelwert aus den drei Einzelstandardabweichungen

Durch dieses Vorgehen wird auf der einen Seite sichergestellt, dass ein konservativer Mittelwert vorliegt. Auf der anderen Seite wird die Standardabweichung auf einen Durchschnittswert reduziert, der auch im Anwendungsfall (Verwendung von Schrauben eines Herstellers innerhalb einer Konstruktion) vorliegt.

Aus Tabelle 5-3 geht hervor, dass von Hersteller C nur zwei Stichproben vorliegen, die für sich eine große Streuung aufweisen. Bei Ansatz dieser zwei Stichproben als eine unabhängige Größe würde das oben vorgeschlagene Vorgehen ad absurdum geführt werden, da hierdurch wiederum eine kleine Gruppe einen großen Einfluss auf die gemittelte Standardabweichung hat. Da sich die eine Stichprobe von Hersteller C im Bereich von Hersteller A und die andere im Bereich von Hersteller B bewegt, werden die zwei jeweiligen Ergebnisse den beiden anderen Herstellern zugeführt. Es entstehen somit zwei voneinander getrennte Mittelwerte und zwei Standardabweichungen, die gemittelt werden.

Ordnungs-Nr.	Gruppe 1		Gruppe 2	
	Hersteller	N _{Bruch}	Hersteller	N _{Bruch}
1	A	190.970	B	417.187
2	A	238.226	B	421.055
3	C	255.143	B	543.033
4	A	278.464	C	683.664
5	A	358.586	B	1.092.832
	x ₁	264.278	x ₂	631.554
	s ₁	61.708	s ₂	71.567
	$\bar{x}_{\min} = 264.278$			
	$s_{\text{mittel}} = 66.637 (25,8\%)$			

Tabelle 5-4: Bestimmung des min. Mittelwertes und der gemittelten Standardabweichung (logarithmische Verteilung)

Unter Zugrundelegung einer Gaußschen Normalverteilung ergeben sich somit folgende Quantilwerte:

$$N_{10} = 264.278 + 1,282 \cdot 66.637 = 349.667$$

$$N_{90} = 264.278 - 1,282 \cdot 66.637 = 178.879$$

$$N_{97,7} = 264.278 - 2 \cdot 66.637 = 131.310$$

Es ergibt sich für $p_{\bar{u}} = 97,7\%$ ein ähnlicher Quantilwert wie in der ursprünglichen Auswertung unter Ansatz der log-Normalverteilung, allerdings mit einer sehr viel geringeren Standardabweichung.

5.1.2.4 Vergleich der 97,7%-Quantilwerte

Tabelle 5-5 zeigt den Vergleich der drei statistischen Auswertungen für die nach Eurocode 3 relevante Überlebenswahrscheinlichkeit $p_{\bar{u}}=97,7\%$. Danach liegen alle Quantilwerte ungefähr auf einem Niveau.

Auswertung mit	$N_{97,7}$
10 Proben ($\text{Pr}(\text{ZFB1}) = 10$)	135.024
9 Proben ($\text{Pr}(\text{ZFB1}) = 9$)	152.382
Min. Mittelwert ($\bar{x} = \min$)	131.310

Tabelle 5-5: Vergleich der Quantilwerte für $p_{\bar{u}}=97,7\%$



5.1.3 Zeitfestigkeitsbereich 2

5.1.3.1 Auswertung mit einem Stichprobenumfang von 10

Zunächst werden mit Hilfe von Tabelle 5-6 der Mittelwert und die Standardabweichung nach den Formeln aus Kapitel 3.1.1 für die Stichprobe bestimmt:

Ordnungs.-Nr.	Herst.	Prüfk.	N _{Bruch}	Log N _{Bruch}
1	A	5	131.020	5,117
2	A	7	143.072	5,156
3	B	1	144.408	5,160
4	B	2	152.310	5,183
5	A	6	162.055	5,210
6	A	8	171.279	5,234
7	B	4	188.394	5,275
8	B	3	216.471	5,335
9	C	10	244.826	5,389
10	C	9	290.218	5,463

Tabelle 5-6: Bruchschwingspielzahlen des ZFB 2 (in aufsteigender Reihenfolge sortiert)

Mittelwert:

$$\bar{x} = 184.405$$

$$\log \bar{x} = 5,252$$

Standardabweichung:

$$s = 51.371$$

$$s_{\log} = 0,112 \quad (\text{oder } 27,9\%)$$

Es folgt die Überprüfung, ob die log-Normalverteilung auch für den Zeitfestigkeitsbereich 2 zugrunde gelegt werden kann:

- für log-Normalverteilung:

$$s = 0,112$$

$$\bar{x} = 5,252$$

i	x_i	Y_i	P_i	$1-P_i$	$\ln(P_i)$	$\ln(1-P_i)$	$(2i-1) \cdot (\ln P_i + \ln(1-P_{n+1-i}))$
1	5,1173376	-1,20	0,1152	0,8848	-2,1615	-0,1223	-5,6565
2	5,1555546	-0,86	0,1951	0,8049	-1,6343	-0,2170	-11,4811
3	5,1595913	-0,82	0,2052	0,7948	-1,5840	-0,2296	-15,2894
4	5,1827284	-0,62	0,2685	0,7315	-1,3149	-0,3127	-15,2959
5	5,2096624	-0,38	0,3529	0,6471	-1,0416	-0,4352	-14,5140
6	5,2337041	-0,16	0,4351	0,5649	-0,8322	-0,5711	-13,9422
7	5,2750671	0,20	0,5811	0,4189	-0,5428	-0,8702	-11,1204
8	5,3353997	0,74	0,7710	0,2290	-0,2601	-1,4739	-7,3458
9	5,3888575	1,22	0,8884	0,1116	-0,1183	-2,1927	-5,7013
10	5,4627243	1,88	0,9697	0,0303	-0,0308	-3,4950	-2,9100
							-103,2565

$$A^2 = 0,3256$$

$$A^* = 0,3574 < 0,631 \text{ für Signifikanz } \alpha = 0,1$$

=> log-Normalverteilung ansetzbar!

Die Quantilwerte werden mithilfe von Excel berechnet:

$$N_{10} = 248.883$$

$$N_{90} = 128.272$$

$$N_{97,7} = 106.650$$



5.1.4 Ermittlung der Wöhlerlinien

Nachfolgend werden sowohl die Wöhlerlinien für 50% Überlebenswahrscheinlichkeit und für die Quantilwerte $p_{\bar{u}} = 10\%$, 90% und $97,7\%$ Bruchwahrscheinlichkeit ermittelt.

5.1.4.1 Wöhlerlinien für 50% Überlebenswahrscheinlichkeit

Abbildung 5-1 zeigt die einzelnen Versuchsergebnisse und die Wöhlerlinien mit den verschiedenen berechneten Mittelwerten für den Zeitfestigkeitsbereich 1 nach Kapitel 5.1.2.

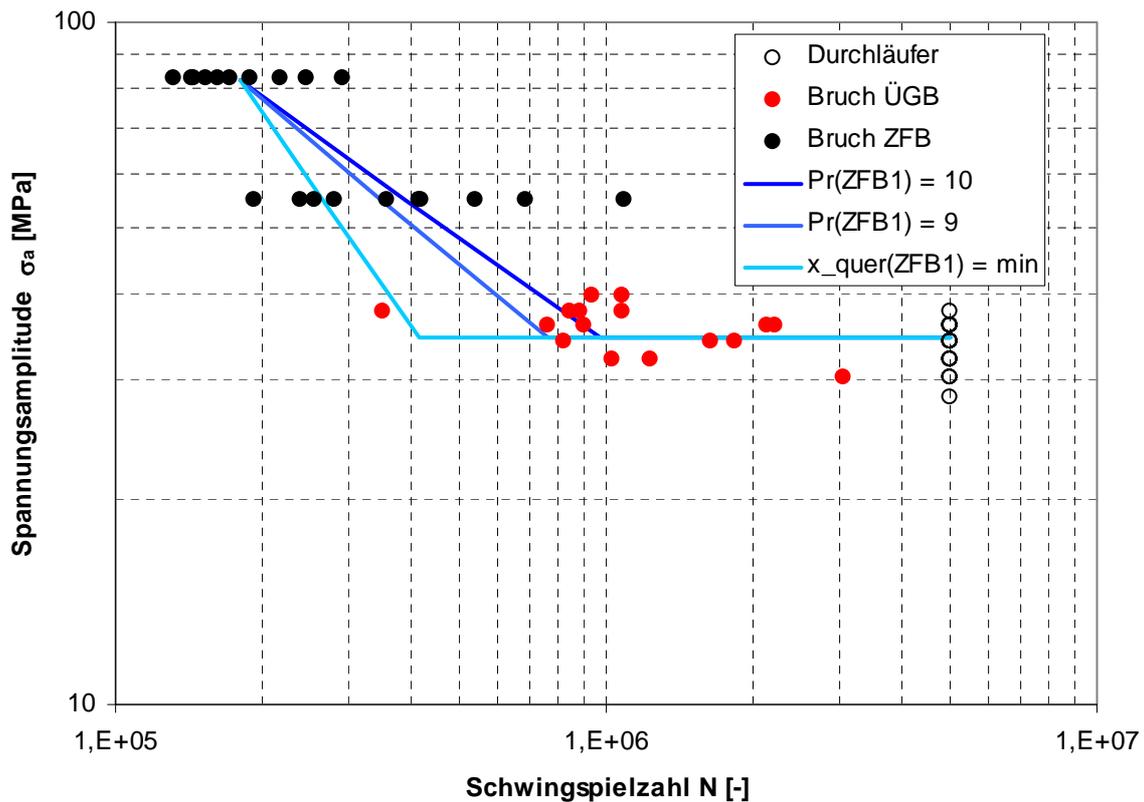


Abbildung 5-1: Wöhlerlinien für 50% Überlebenswahrscheinlichkeit

Die zugehörigen Steigungen und Knickschwingspielzahlen können folgender Tabelle entnommen werden.

Wöhlerlinie	N_{Knick}	Steigung k
$\text{Pr}(\text{ZFB1}) = 10$	974.201	1,9
$\text{Pr}(\text{ZFB1}) = 9$	759.681	1,7
$\bar{x} (\text{ZFB1}) = \text{min}$	417.333	1,0

Tabelle 5-7: Knickschwingspielzahlen und Steigung der 50%-Wöhlerlinien

Der Abknickpunkt für die ermittelte Wöhlerlinie mit minimalem Mittelwert und gemittelter Standardabweichung liegt aufgrund der großen Steigung im Zeitfestigkeitsbereich weit außerhalb der ermittelten Bruchschwingspielzahlen des Übergangsbereichs. Für den Vergleich

mit dem der EN 1993-1-9 wird dennoch diese Wöhlerlinie herangezogen, weil es sich hierbei um eine konservative Annahme handelt.

Generell muss festgestellt werden, dass die Steigung aller Wöhlerlinien im Zeitfestigkeitsbereich ungewöhnlich hoch ist.

5.1.4.2 Quantilwöhlerlinien

Nachfolgend sind in Abbildung 5-2 bis Abbildung 5-4 die Quantilwöhlerlinien für die verschiedenen statistischen Auswertungen des ZFB 1 und eine Überlebenswahrscheinlichkeit $p_{\bar{u}}$ von 10%, 90% und 97,7% dargestellt.

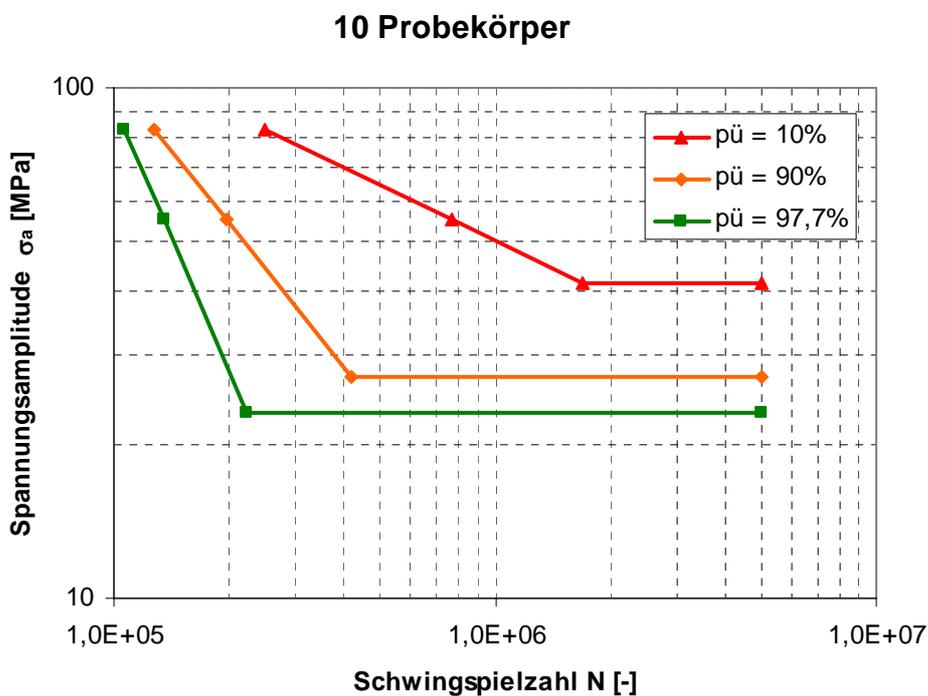


Abbildung 5-2: Quantilwöhlerlinien für ZFB 1 = 10 Probekörper

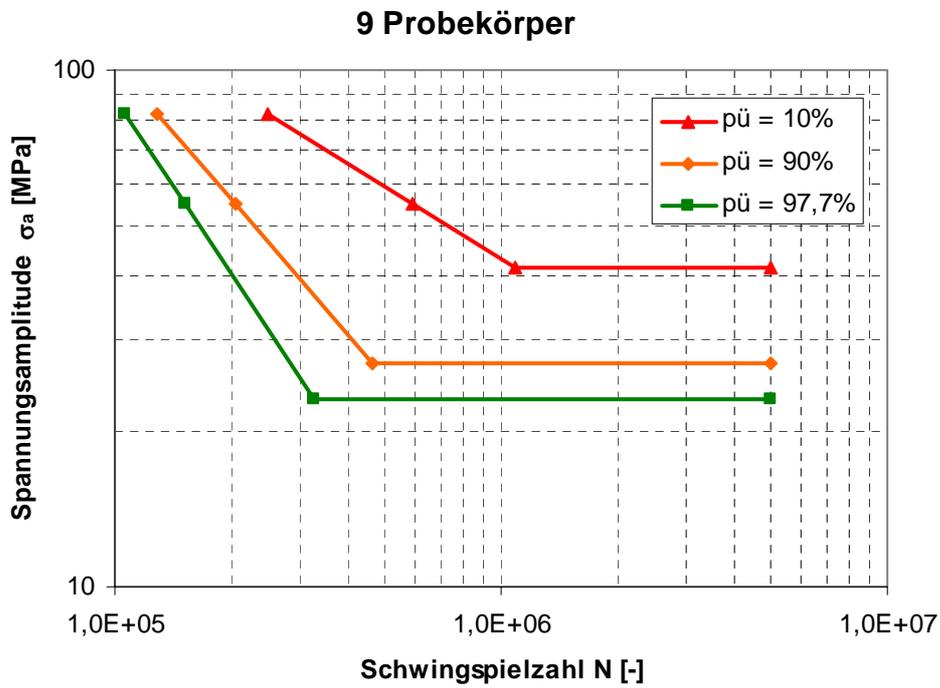


Abbildung 5-3: Quantilwöhlerlinien für ZFB 1 = 9 Probekörper

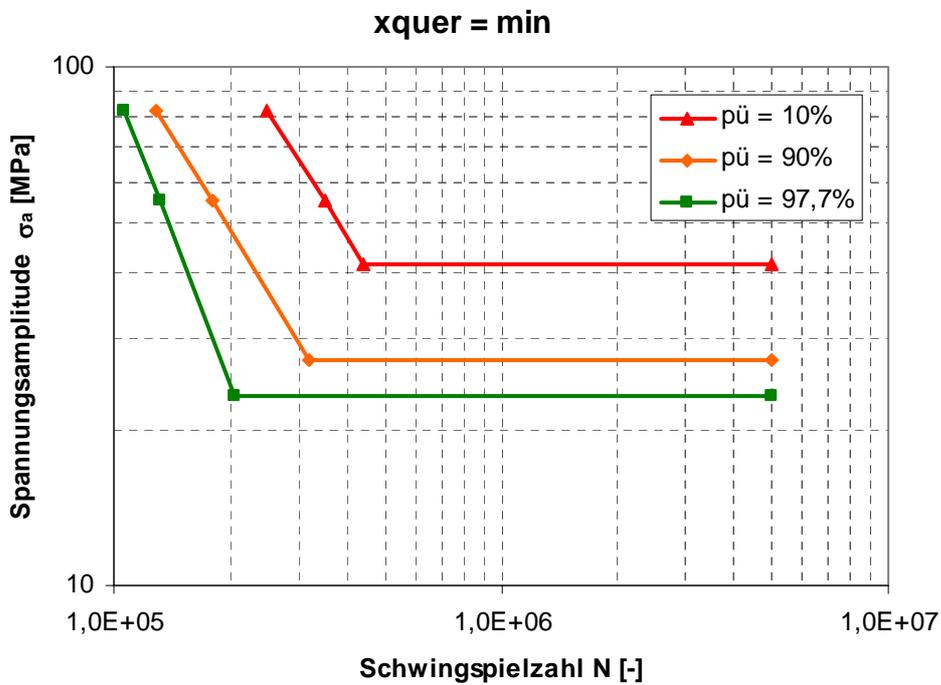


Abbildung 5-4: Quantilwöhlerlinien für ZFB 1 = min. Mittelwert

5.1.4.3 Vergleich mit EN 1993-1-9

Abbildung 5-5 zeigt den Vergleich der Versuchswerte ($p_{\bar{u}} = 97,7\%$) mit der für Schraubenverbindungen unter Zug zu verwendenden Wöhlerlinie KF 50 nach EN 1993-1-9. Die Wöhlerlinie nach EN ist sowohl ohne als auch mit der normativ vorgegebenen Abminderung für Schrauben M48 (Reduktionsfaktor $k_s = 0,89$) eingezeichnet. Für den Versuchswert auf dem unteren Zeitfestigkeitshorizont wurde dabei auf der sicheren Seite der Quantilwert mit minimalem Mittelwert und gemittelter Standardabweichung zugrunde gelegt.

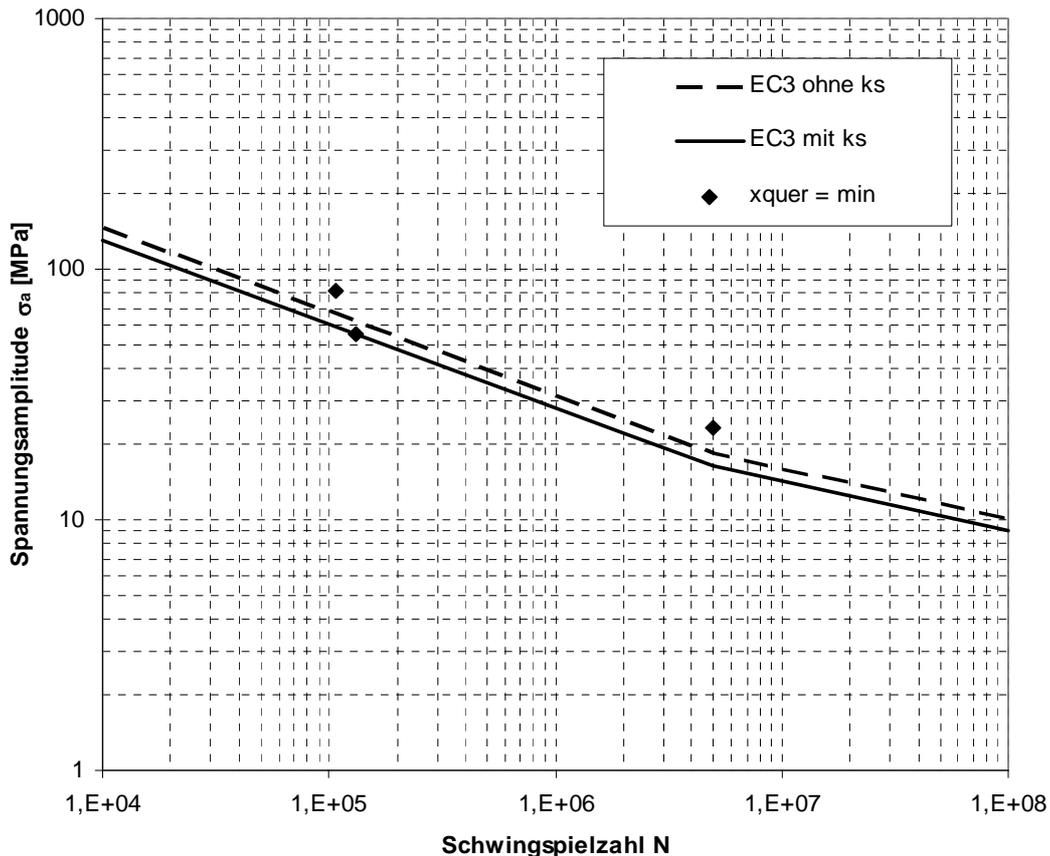


Abbildung 5-5: Vergleich der Versuchswerte mit der Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9 ($p_{\bar{u}} = 97,7\%$)

Alle Quantilwerte liegen oberhalb der normativen abgeminderten Wöhlerlinie. Die Abminderung der Wöhlerlinie ist aufgrund der Versuchsergebnisse auf dem Zeitfestigkeitshorizont 1 erforderlich.

Würden die Punkte wie in Abbildung 5-4 gezeigt miteinander verbunden werden, so würden aufgrund der großen Steigung im Zeitfestigkeitsbereich Teile der so konstruierten Wöhlerlinie unterhalb der Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9 verlaufen. Dieser Rückschluss ist jedoch vor dem Hintergrund der erzielten Ergebnisse nicht einsichtig. Vielmehr ist wahrscheinlich, dass der ZFB 1 aufgrund der großen Streuungen zu konservativ ausgewertet wurde.

Bei höher gewählter Prüfamplitude für den ZFB 1 würden die Ergebnisse vermutlich weniger streuen, so dass evtl. auf eine Abminderung verzichtet werden könnte.



5.1.5 Bewertung der Ergebnisse

Die statistische Auswertung zeigt teilweise einen deutlichen Fertigungseinfluss. Obwohl sämtliche Prüfkörper schlussvergütet sind, können verschiedene Fertigungseinflüsse wie beispielsweise die Präzision der Gewinderollmaschinen oder auch eine Oberflächennachbehandlung vor dem Verzinken einen großen Einfluss auf die Schwingfestigkeit haben.

Besonders deutlich zeigt sich der Fertigungseinfluss im Zeitfestigkeitsbereich 1. Auch wenn der Prüfkörper mit dem abweichenden Bruchort unter Kopf nicht berücksichtigt wird, zeigt sich immer noch eine relativ große Streuung von über 40%. Neben dem Fertigungseinfluss kann die große Streuung in diesem Bereich allerdings auch noch eine andere Ursache haben: Der Übergangsbereich vom Zeitfestigkeitsbereich in den Dauerfestigkeitsbereich ist fließend. Je dichter ein Lashorizont an dem Streubereich des Übergangsbereiches liegt, desto größer werden die Streuungen für diesen Horizont. Untermauert wird diese Überlegung durch den höher liegenden Zeitfestigkeitsbereich 2, dessen Streuung mit ~28% deutlich geringer ausfällt.



5.2.1.2 Auswertung mit gemittelter Standardabweichung

Die ermittelte Streuung von knapp 70% resultiert aus der großen Diskrepanz zwischen den Versuchsergebnissen von Hersteller A und C. Der niedrigste Prüfhorizont für die Probekörper von Hersteller C liegt zwei Stufen über dem höchsten Prüfhorizont von Hersteller A. Die Versuchsergebnisse der Probekörper von Hersteller B heben das Lastniveau auf die untere Grenze des Prüfniveaus von Hersteller C. Es wird vermutet, dass die Probekörper von Hersteller B bei frei wählbarer Ausgangsamplitude eher auf dem Lastniveau von Hersteller C als von Hersteller A liegen würden bei einem ähnlichen Streubereich wie die beiden anderen Hersteller.

Analog zu den Überlegungen in Kapitel 5.1.2.3 wird hier für den Dauerfestigkeitsbereich eine Auswertung mit minimalem Mittelwert und gemittelter Standardabweichung durchgeführt. Die Versuchsergebnisse von Hersteller B werden bis auf Probekörper 20, der gestrichen wird, zusammen mit Hersteller A ausgewertet, so dass sich zwei Stichproben ergeben (siehe Tab. 5-9 und 5-10).

Stichprobe 1: Hersteller A + B

σ_a [MPa]	Hersteller A									Hersteller B									X	O	z	f	z·f	z ² ·f		
45,0	X														X					O	2	1	4	2	8	32
42,5		X						X							O	X				O	3	2	3	3	9	27
40,0			X				O	X						O						O	2	3	2	2	4	8
37,5				X		O			X			O									2	2	1	2	2	2
35,0					O							O									0	2	0	0	0	0
P.nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	9	1	-	9	23	69	
																							C	A	E	

Tabelle 5-9: Auswertungsschema des Treppenstufenverfahrens, Hersteller A+B

Es folgen der Mittelwert und die Standardabweichung zu:

$$\sigma_{A50} = 40,1 \text{ MPa}$$

$$s_a = 4,7 \text{ MPa (oder 11,8\%)}$$

Stichprobe 2: Hersteller C

σ_a [MPa]	Hersteller C									X	O	z	f	z·f	z ² ·f						
57,5										X						1	0	3	1	3	9
55,0			X				X			O	X					3	1	2	3	6	12
52,5		O		X		O										1	3	1	1	1	1
50,0	O				O											0	2	0	0	0	0
P.nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11					5	6	-	5	10	22
																			C	A	E

Tabelle 5-10: Auswertungsschema des Treppenstufenverfahrens, Hersteller C

Es folgen der Mittelwert und die Standardabweichung zu:

$$\sigma_{A50} = 53,8 \text{ MPa}$$

$$s_a = 1,7 \text{ MPa (oder 3,2\%)}$$

Zusammenführung der beiden Stichproben:

Es ergeben sich für die Berechnung der Quantilwerte folgender Mittelwert und Standardabweichung:

$$\sigma_{A50,\min} = 40,1 \text{ MPa}$$

$$s_{a,\text{mittel}} = (4,7 + 1,7) / 2 = 3,2 \text{ MPa} \quad (\text{oder } 8,1\%)$$

Die Quantilwerte für die verschiedenen Überlebenswahrscheinlichkeiten ergeben sich zu:

$$\sigma_{A10} = 44,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A90} = 36,0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A97,7} = 33,6 \text{ MPa}$$



5.2.2 Zeitfestigkeitsbereich 1

Das Vorgehen erfolgt analog zu Kapitel 5.1.2.

5.2.2.1 Auswertung mit einem Stichprobenumfang von 10

Ordnungs-Nr.	Hersteller	Prüfkörper	N_{Anriss}
1	A	2	366.550
2	C	6	377.280
3	C	5	379.879
4	C	7	428.506
5	A	1	516.111
6	C	10	530.016
7	C	9	531.748
8	B	3	629.149
9	B	8	640.680
10	C	4	755.103

Tabelle 5-11: Anrisschwingspielzahlen des ZFB 1 (in aufsteigender Reihenfolge sortiert)

Mittelwert:

$$\bar{x} = 515.502$$

$$\log \bar{x} = 5,66$$

Standardabweichung:

$$s = 130.692 \quad (\text{oder } 25,4\%)$$

$$s_{\log} = 0,09$$

Die Überprüfung, ob die Normalverteilung oder die logarithmische Normalverteilung zugrunde gelegt werden muss, erfolgt mit dem Anderson-Darling Test [1-16] in Tabellenform:

- für Normalverteilung:

$$s = 130.692$$

$$\bar{x} = 515.502$$

i	x_i	Y_i	P_i	$1-P_i$	$\ln(P_i)$	$\ln(1-P_i)$	$(2i-1) * (\ln P_i + \ln(1-P_{n+1-i}))$
1	366.550	-1,14	0,1272	0,8728	-2,0620	-0,1361	-5,4619
2	377.280	-1,06	0,1451	0,8549	-1,9302	-0,1568	-11,1229
3	379.879	-1,04	0,1497	0,8503	-1,8991	-0,1622	-17,7401
4	428.506	-0,67	0,2528	0,7472	-1,3751	-0,2914	-15,2069
5	516.111	0,00	0,5019	0,4981	-0,6894	-0,6969	-13,2765
6	530.016	0,11	0,5442	0,4558	-0,6084	-0,7857	-14,3582
7	531.748	0,12	0,5495	0,4505	-0,5988	-0,7973	-11,5733
8	629.149	0,87	0,8077	0,1923	-0,2135	-1,6489	-5,6353
9	640.680	0,96	0,8309	0,1691	-0,1852	-1,7774	-5,8141
10	755.103	1,83	0,9666	0,0334	-0,0339	-3,3999	-3,2300
							-103,4190

$$A^2 = 0,3419$$

$$A^* = 0,3752 < 0,631 \text{ für Signifikanz } \alpha = 0,1$$

=> Normalverteilung ansetzbar!

Aus dem Hypothesentest folgt, dass die Normalverteilung angesetzt werden kann. Mithilfe von Excel werden die Quantilwerte für 10%, 90% und 97,7% Überlebenswahrscheinlichkeit der Normalverteilung berechnet.

$$N_{10} = 682.990$$

$$N_{90} = 348.014$$

$$N_{97,7} = 254.721$$



5.2.3 Zeitfestigkeitsbereich 2

5.2.3.1 Auswertung mit einem Stichprobenumfang von 10

Zunächst werden mit Hilfe von Tabelle 5-12 der Mittelwert und die Standardabweichung nach den Formeln aus Kapitel 3.1.1 für die Stichprobe bestimmt:

Ordnungs-Nr.	Herst.	Prüfk.	N _{Anriss}
1	A	2	133.015
2	A	1	134.533
3	C	7	145.010
4	A	3	146.072
5	C	6	150.217
6	C	10	156.083
7	C	9	157.906
8	C	8	166.236
9	B	5	167.627
10	B	4	178.398

Tabelle 5-12: Anrisschwingspielzahlen des ZFB 2 (in aufsteigender Reihenfolge sortiert)

Mittelwert:

$$\bar{x} = 153.510$$

$$\log \bar{x} = 5,17$$

Standardabweichung:

$$s = 14.626 \quad (\text{oder } 9,5\%)$$

$$s_{\log} = 0,03$$

Es folgt die Überprüfung, ob die Normalverteilung auch für den Zeitfestigkeitsbereich 2 zugrunde gelegt werden kann:

- für Normalverteilung:

$$s = 14.626$$

$$\bar{x} = 153.510$$

i	x_i	Y_i	P_i	$1-P_i$	$\ln(P_i)$	$\ln(1-P_i)$	$(2i-1) \cdot (\ln P_i + \ln(1-P_{n+1-i}))$
1	133.015	-1,40	0,0806	0,9194	-2,5186	-0,0840	-5,6329
2	134.533	-1,30	0,0972	0,9028	-2,3307	-0,1023	-12,3574
3	145.010	-0,58	0,2806	0,7194	-1,2709	-0,3293	-14,6026
4	146.072	-0,51	0,3055	0,6945	-1,1857	-0,3646	-15,0380
5	150.217	-0,23	0,4109	0,5891	-0,8893	-0,5292	-15,5960
6	156.083	0,18	0,5698	0,4302	-0,5624	-0,8436	-12,0080
7	157.906	0,30	0,6181	0,3819	-0,4811	-0,9626	-10,9943
8	166.236	0,87	0,8079	0,1921	-0,2133	-1,6496	-8,1398
9	167.627	0,97	0,8328	0,1672	-0,1830	-1,7885	-4,8496
10	178.398	1,70	0,9556	0,0444	-0,0454	-3,1143	-2,4591
							-101,6778

$$A^2 = 0,1678$$

$$A^* = 0,1841 < 0,631 \text{ für Signifikanz } \alpha = 0,1$$

=> Normalverteilung ansetzbar!

Die Quantilwerte werden mithilfe von Excel berechnet:

$$N_{10} = 172.253$$

$$N_{90} = 134.766$$

$$N_{97,7} = 124.326$$



5.2.4 Ermittlung der Wöhlerlinie

Nachfolgend werden sowohl die Wöhlerlinien für 50% Überlebenswahrscheinlichkeit und für die Quantilwerte $p_{\bar{u}} = 10\%$, 90% und $97,7\%$ Bruchwahrscheinlichkeit ermittelt.

5.2.4.1 Wöhlerlinien für 50% Überlebenswahrscheinlichkeit

Abbildung 5-6 zeigt die einzelnen Versuchsergebnisse und die Wöhlerlinien mit den verschiedenen berechneten Mittelwerten für den Zeitfestigkeitsbereich 1 nach Kapitel 5.1.2.

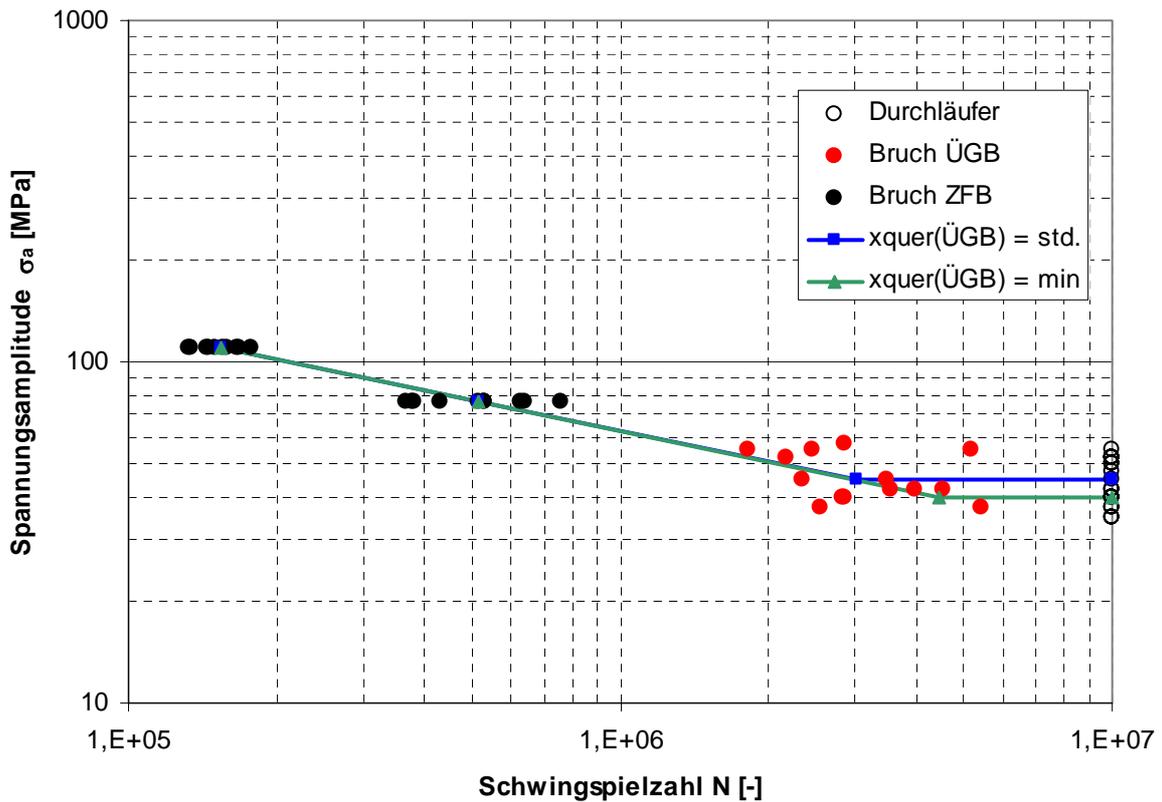


Abbildung 5-6: Wöhlerlinien für 50% Überlebenswahrscheinlichkeit

Die zugehörigen Steigungen und Knickschwingspielzahlen können folgender Tabelle entnommen werden.

Wöhlerlinie	N_{Knick}	Steigung k
\bar{x} (ÜGB) = standard	4.449.224	3,3
\bar{x} (ÜGB) = min	3.028.860	3,3

Tabelle 5-13: Knickschwingspielzahlen und Steigung der 50%-Wöhlerlinien

5.2.4.2 Quantilwöhlerlinien

Die Quantilwöhlerlinien (s. Abbildung 5-7) können lediglich für den Fall des minimalen Mittelwertes und gemittelter Standardabweichung im Übergangsbereich ($\bar{x}(\ddot{U}GB) = \min$) erzeugt werden. Bei normaler Auswertung dieses Bereichs sind die Streuungen so groß, dass bei großen Überlebenswahrscheinlichkeiten negative Schwingenspielzahlen berechnet werden.

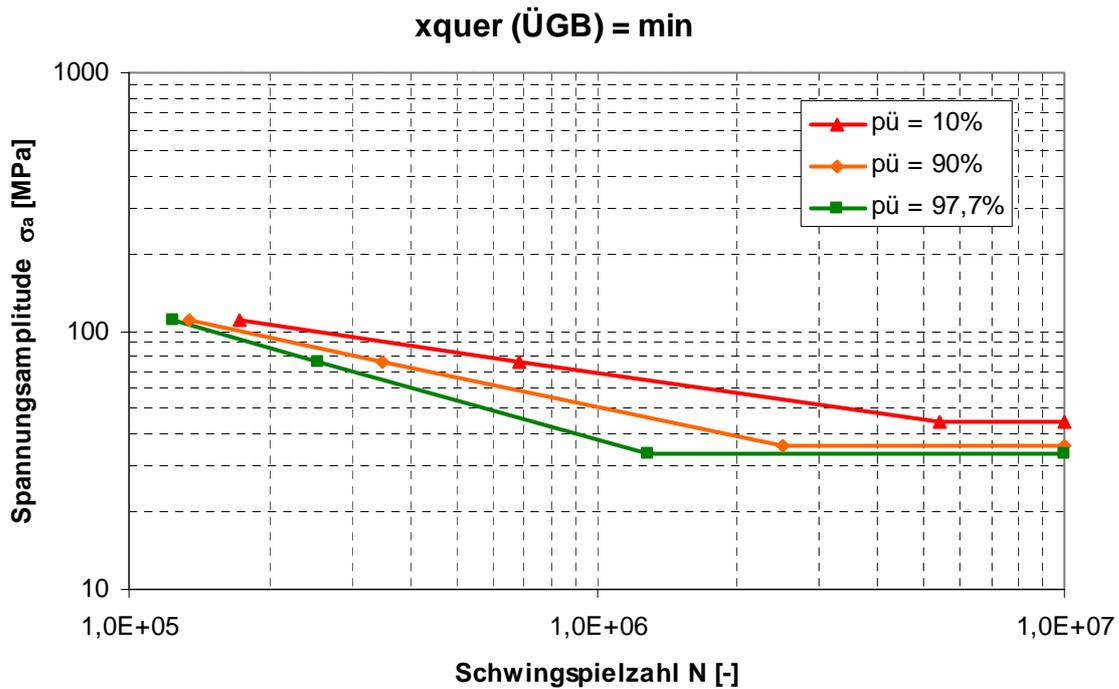


Abbildung 5-7: Quantilwöhlerlinien mit $\ddot{U}GB = \min$. Mittelwert + gemittelte Standardabweichung



5.2.4.3 Vergleich mit EN 1993-1-9

Abbildung 5-8 zeigt den Vergleich der Versuchswerte ($p_{\ddot{u}} = 97,7\%$) mit der Wöhlerlinie KF 50 nach EN 1993-1-9. Die Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9 ist sowohl ohne als auch mit der normativ vorgegebenen Abminderung für Schrauben M48 (Reduktionsfaktor $k_s = 0,89$) eingezeichnet. Für den Versuchswert im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit wurde dabei auf der sicheren Seite der Quantilwert mit minimalem Mittelwert und gemittelter Standardabweichung zugrunde gelegt.

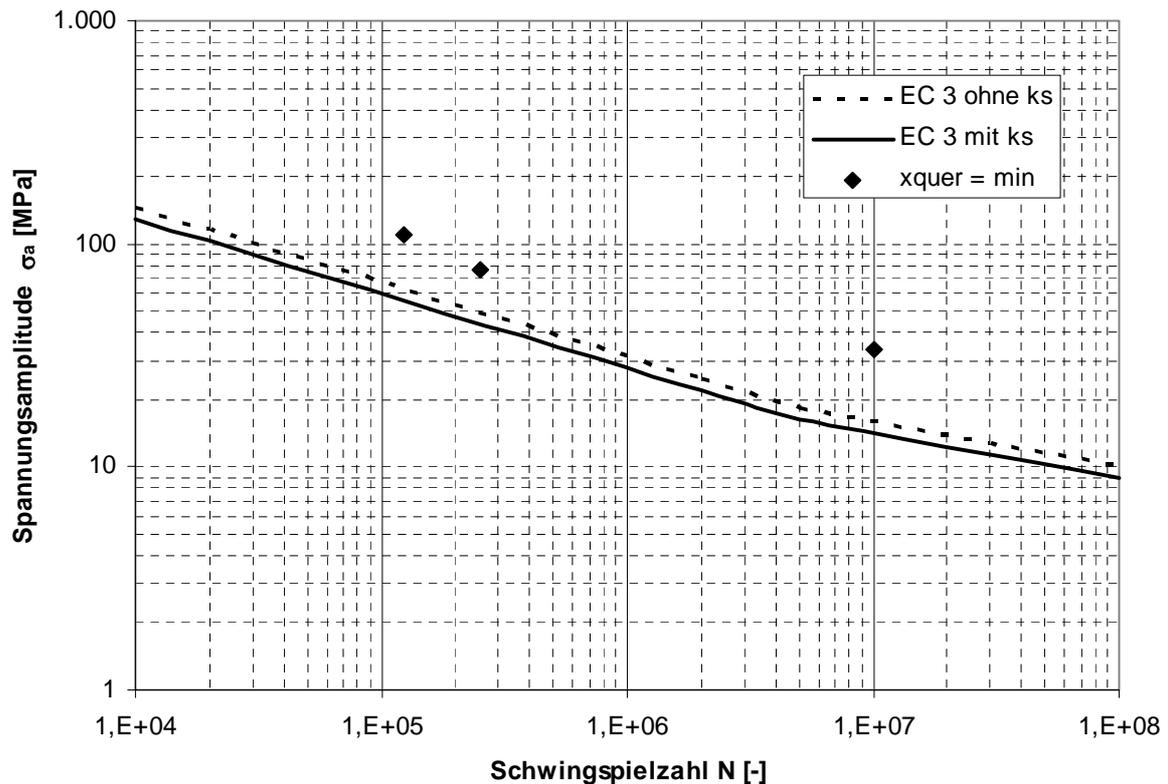


Abbildung 5-8: Vergleich der Versuchswerte mit der Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9 ($p_{\ddot{u}} = 97,7\%$)

Alle Quantilwerte aus der Versuchsreihe liegen oberhalb der normativen Wöhlerlinie ohne Abminderung. Dieses Ergebnis bestätigt den allgemeinen Stand des Wissens, nach dem Schraubenbiegung günstiger einzustufen ist als Schraubenzug.

5.2.5 Bewertung der Ergebnisse

Auch die Auswertungen für die Biegebelastung zeigen einen deutlichen Herstellungseinfluss. Im Gegensatz zu den Axialschwingversuchen ist dieser Einfluss im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit zu sehen, wo eine große Anzahl von Stufensprüngen vorliegt. Die Gründe für das große Streuband sind wie in Kapitel 5.1.5 bereits erwähnt vermutlich in Fertigungseinflüssen der verschiedenen Hersteller zu suchen. Diese These wird durch die Tatsache gestützt, dass Hersteller A auf allen Horizonten zumeist schlechtere Resultate erzielt als die beiden anderen Hersteller.

5.3 Vergleich der Biegewöhlerlinie mit Axialzug-Wöhlerlinie

Aufgrund der teilweise großen Streuungen in beiden Belastungsfällen wäre ein Vergleich von Quantilwöhlerlinien nur unter der Annahme eines minimalen Mittelwertes mit gemittelter Streuung möglich. Da allerdings die Streuungen, die diese Annahme erforderlich machten, in unterschiedlichen Bereichen (ÜGB bei Biegung, ZFB 1 bei Zug) aufgetreten sind, ist ein solcher Vergleich nicht aussagekräftig.

Auch ein Vergleich der Wöhlerlinien für 50% Bruchwahrscheinlichkeit ist aufgrund folgender Punkte problematisch:

- a) Die Axialwöhlerlinien sind für Bruch definiert, die Biegewöhlerlinien für Anriss.
- b) Die Bruchorte unter Zug und unter Biegung sind nicht einheitlich.

Wegen der unterschiedlichen Wöhlerliniendefinitionen kann ein Vergleich zwischen Zug und Biegung nur für die Dauerfestigkeit erfolgen, da in diesem Bereich anstelle der Lastwechsel die Spannungsamplitude ermittelt wird und jeder Anriss letztendlich zum Bruch führt.

Ein abweichender Bruchort von Zug und Biegung wäre nicht problematisch, solange der Bruchort innerhalb einer Belastungsart einheitlich wäre. Da dies nicht der Fall ist, werden für den Vergleich konservativ nur die Probekörper von Hersteller C herangezogen, welche für beide Belastungsarten nur Brüche im Gewinde aufweisen. Durch dieses Vorgehen wird gleichzeitig ein Fertigungseinfluss ausgeschlossen. Das Ergebnis des Vergleichs ist in Abbildung 5-9 dargestellt.

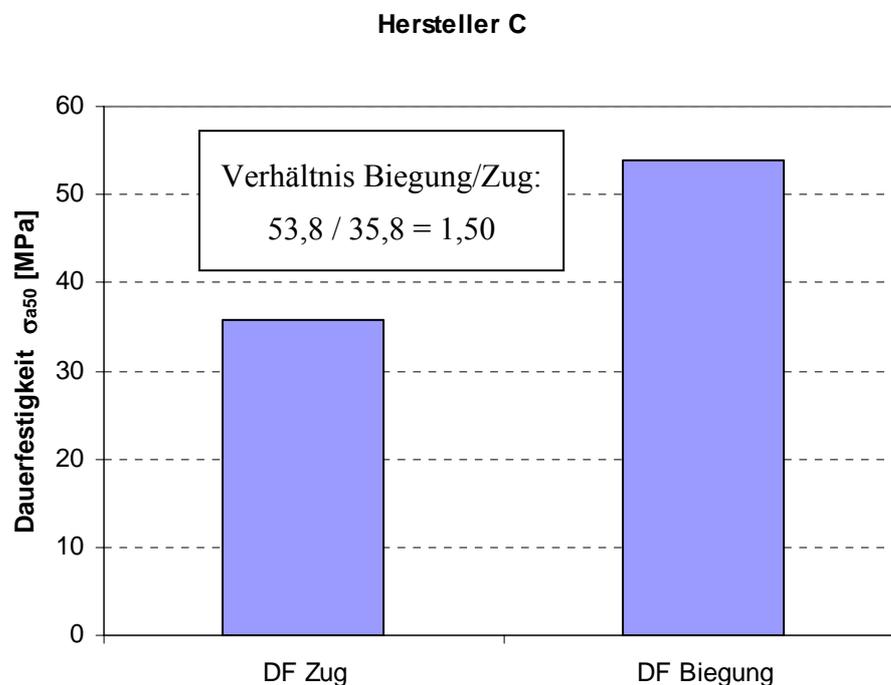


Abbildung 5-9: Vergleich der Dauerfestigkeiten für Zug und Biegung bei Hersteller C

A. Alt hat in seiner Dissertation [1-15] Dauerfestigkeitsuntersuchungen an Schrauben M8 bis M24 unter Zug und unter Biegung vorgenommen. Auf Seite 82 zeigt er, dass das Verhältnis von dauerfester Biegespannungs- zu dauerfester Zugspannungsamplitude unabhängig vom untersuchten Durchmesserbereich im Mittel bei 1,68 liegt. Mit dem hier vorliegenden Verhältnis von 1,50 kann das von Alt ermittelte Verhältnis in dieser Höhe nicht bestätigt werden.



6 Zusammenfassung

In dem bearbeiteten Forschungsvorhaben wurden Wöhlerlinien für Schraubengarnituren M48 10.9 HV tZn unter Axialzug und unter Biegung experimentell ermittelt. Sämtliche ermittelte Spannungen beziehen sich dabei auf den Spannungsquerschnitt.

Es wurden jeweils Schwingprüfungen im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB) und auf zwei Zeitfestigkeitshorizonten (ZFB 1 und ZFB 2) durchgeführt. Die Versuchsdurchführung und die statistische Auswertung erfolgten im ÜGB nach dem Treppenstufenverfahren, auf den ZFB kam das Horizontenverfahren zur Anwendung.

Die Prüfungen wurden sowohl unter Zug als auch unter Biegung mit Resonanzpulsern bei einer Frequenz von ~60 Hz durchgeführt.

Die Prüfungen wurden mit Schrauben von mehreren Herstellern als eine Stichprobe durchgeführt. Ursprünglich standen Schraubengarnituren von vier verschiedenen Herstellern für die Prüfungen zu Verfügung. Im Laufe der ersten Versuchsserie stellte sich heraus, dass die gelieferten Schrauben eines Herstellers schlussgerollt anstelle schlussvergütet waren. Da nur eine Herstellungsweise untersucht werden konnte, zog sich der entsprechende Hersteller aus dem Projekt zurück, so dass die Wöhlerlinien letztendlich mit Probekörpern von drei Herstellern ermittelt wurden.

Für die **Schwingversuche unter Axialbelastung** wurden Bruchwöhlerlinien ermittelt. Die Streuungen lagen bei 16,3% im ÜGB, 60,7% im ZFB 1 und 27,9% im ZFB 2 bei Auswertung sämtlicher Versuchsergebnisse. Auf beiden Zeitfestigkeitshorizonten war ein herstellerbedingter Fertigungseinfluss erkennbar. Eine Ermittlung von Quantilwöhlerlinien war wegen der großen Streuungen im ZFB 1 nur unter Ansatz einer log-Normalverteilung möglich. Durch Selektion der Versuchsergebnisse im ZFB 1 konnte die Streuung auf 42,4% reduziert werden. In einem weiteren Schritt wurden auf der sicheren Seite die Prüfkörper der einzelnen Hersteller hinsichtlich Mittelwert und Standardabweichung im ZFB 1 getrennt ausgewertet. Für die Ermittlung der Quantilwöhlerlinien wurden anschließend der minimale Mittelwert und das Mittel der Standardabweichungen herangezogen. Durch diese Maßnahme, welche eine Art unter Grenze bildet, konnte die Streuung nochmals auf 25,8% reduziert werden.

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit $p_u = 97,7\%$ mit der entsprechenden um den Wert k_s abgeminderten Wöhlerlinie der EN 1993-1-9 (KF 50) zeigte, dass die Wöhlerlinie der EN 1993-1-9 auf der sicheren Seite liegt. Die dickenbedingte Abminderung wird benötigt.

Für die **Schwingversuche unter Biegebelastung** wurden bedingt durch die Prüftechnik Anrisswöhlerlinien ermittelt. Die Streuungen betragen 69,4% im ÜGB, 25,4% im ZFB 1 und 9,5% im ZFB 2. Auf allen Horizonten war ein herstellerbedingter Fertigungseinfluss zu erkennen. Wegen der großen Streuung im ÜGB wurde dieser Bereich ebenfalls nach Herstellern getrennt ausgewertet und der minimale Mittelwert mit mittlerer Streuung für die Quantilwöhlerlinien angesetzt. Die mittlere Streuung konnte so auf 8,1% reduziert werden.

Die Quantilwöhlerlinien wurden unter Zugrundelegung einer Normalverteilung ermittelt. Danach liegt die experimentell ermittelte Wöhlerlinie über der Wöhlerlinie der EN 1993-1-9 (KF 50). Eine dickenbedingte Abminderung ist für diesen Belastungsfall nicht erforderlich.

Bei beiden Belastungsarten traten sowohl herstellerepezifisch als auch innerhalb eines Herstellers **unterschiedliche Bruchorte** (erster tragender Gewindegang und Übergang von Kopf zu Schaft) auf. Eine herstelleregetrennte Auswertung zeigte zumindest für den Zeitfestigkeitsbereich, dass die Bruchorte als gleichwertig einzuschätzen sind und somit gemeinsam ausgewertet werden können. Dennoch können die abweichenden Bruchorte nicht abschließend erklärt werden. Als mögliche Gründe werden je nach Belastungsart geometrische Imperfektionen bzw. verschiedene Randschichtzustände vermutet.

Der von Alt ermittelte Faktor 1,68 für das **Verhältnis von Biege- zu Zugdauerfestigkeit** konnte mit den hier vorliegenden Ergebnissen nicht bestätigt werden. Ein Vergleich der Prüfergebnisse von Hersteller C unter Biegung und unter Zug ergab ein Verhältnis von 1,50.



7 Literatur

- [1-1] *Wiegand, H.*: Über die Dauerfestigkeit von Schraubenwerkstoffen und Schraubenverbindungen. Dissertation, TU Darmstadt, 1933.
- [1-2] *Thomala, W.*: Beitrag zur Dauerhaltbarkeit von Schraubenverbindungen. Dissertation, TU Darmstadt, 1978.
- [1-3] *Lacher, G.*: Zeit- und Dauerfestigkeit von schwarzen und feuerverzinkten hochfesten Schrauben M20 der Festigkeitsklasse 10.9 unter axialer Beanspruchung. Bauingenieur 61 (1986), S. 227-233.
- [1-4] *Schneider, W.*: Beanspruchung und Haltbarkeit hochvorgespannter Schraubenverbindungen. Dissertation, TU Darmstadt, 1991.
- [1-5] *Dünkel, V.*: Schwingfestigkeit von Schraubenverbindungen – Optimierte Versuchsführung und deren Anwendung bei der Untersuchung von Randschicht- und Oberflächenzuständen. Dissertation, TU Darmstadt, 1999.
- [1-6] *Koenigsmann, W.; Vogt, G.*: Dauerfestigkeit von Schraubenverbindungen großer Nenndurchmesser. Konstruktion 33 (1981), Heft 6, S. 219-231.
- [1-7] *Hanenkamp, W.*: Untersuchungen zur Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten Schraubenbolzen (10.9) im Durchmesserbereich M36 bis M72. Konstruktion 44 (1992), S. 255-260.
- [1-8] *Kaiser, B.; Beyer, S.; Dünkel, V.; Schneider, W.*: Schraubenverbindungen – Beanspruchungsverteilung unter ruhender und schwingender Belastung. Materialprüfung 37 (1995), S. 14-18.
- [1-9] *Illgner, K. H.; Beelich, K. H.*: Einfluss überlagerter Biegung auf die Haltbarkeit von Schraubenverbindungen. Konstruktion 18 (1966).
- [1-10] *Weber, H.*: Statistische und dynamische Untersuchungen an exzentrisch belasteten Schraubenverbindungen. Dissertation, TU-Berlin, 1969.
- [1-11] *Agatonovic, P.*: Verhalten von Schraubenverbindungen bei zusammengesetzter Betriebsbeanspruchung. Dissertation, TU Berlin, 1973.
- [1-12] *Kampf, M.*: Dauerhaltbarkeit von Schrauben unter kombinierter Zug- und Biegebelastung. Dissertation, TU Berlin, 1997.

- [1-13] *Mauch, H.*: Statistische Methoden zur Beurteilung von Bauteillebensdauer und Zuverlässigkeit und ihre beispielhafte Anwendung auf Zahnräder. Institut für maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal. Forschungsbericht zum AiF-FV 11154 / N. 1999.

- [1-14] *Mardaneh, H.*: Dauerfestigkeitsuntersuchungen an biegebelasteten Schrauben. Dissertation, TU Berlin, 1982.

- [1-15] *Alt, A.*: Dauerfestigkeitsprüfung und Dauerfestigkeit von Schraube-Mutter-Verbindungen unter kombinierter Zug- und Biegebelastung. Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 381. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf, 2005.

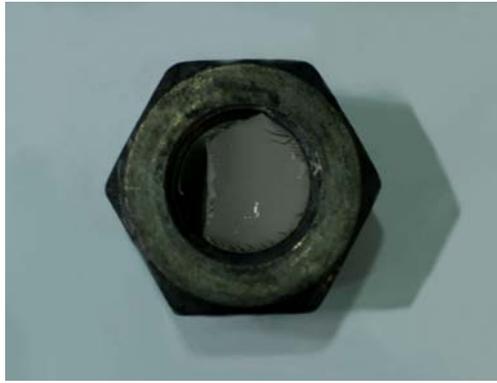
- [1-16] D'Agostino, R. B.; Stephens, M.A.: Goodness-of-fit techniques. Marcel Dekker Verlag. New York, 1986.



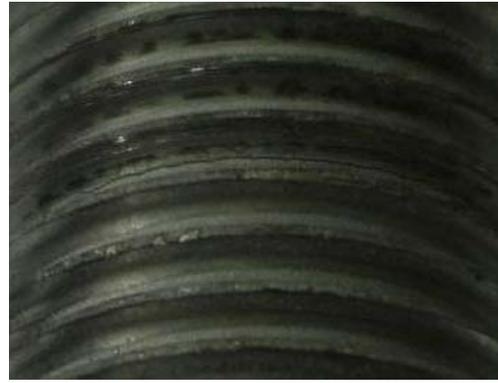
Normen

- [2-1] DIN EN 1993, Teil 1-9: Ermüdung. Juli 2005.
- [2-2] VDI 2230, Bl. 1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen, Zylindrische Einschraubenverbindungen. Beuth-Verlag Berlin. 2003.
- [2-3] DIN 969: Verbindungselemente mit Gewinde – Schwingfestigkeitsversuch bei Axialbelastung. Prüfverfahren und Auswertung der Ergebnisse. Beuth-Verlag Berlin. Dezember 1997.
- [2-4] DASt-Richtlinie 021: Schraubenverbindungen aus Garnituren M42 bis M64 entsprechend DIN 6914, DIN 6915, DIN 6916, Entwurf Juni 2005.
- [2-5] DIN 13, Teil 1: Metrische ISO-Gewinde, Regelgewinde von 1 bis 68 mm Gewinde-Nenn Durchmesser, Nennmaße. 1986.
- [2-6] DIBt (Hrsg.): Richtlinie Windenergieanlagen Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung. Entwurf März 2003.

Bruchbilder Axial-Schwingversuche Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit



Versuchsschraube 1



Versuchsschraube 2



Versuchsschraube 3



Versuchsschraube 6



Versuchsschraube 7



Versuchsschraube 8



Versuchsschraube 17



Versuchsschraube 18



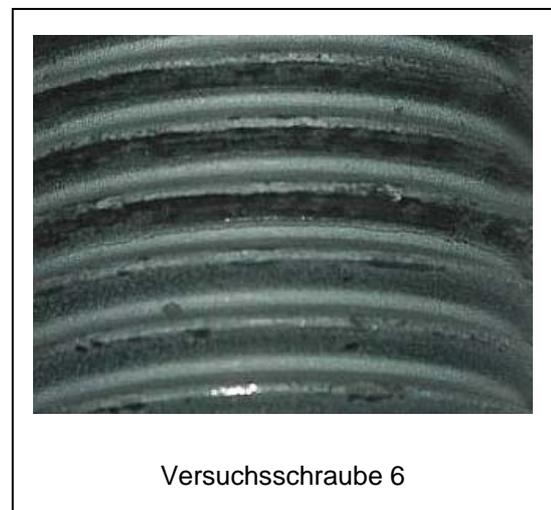
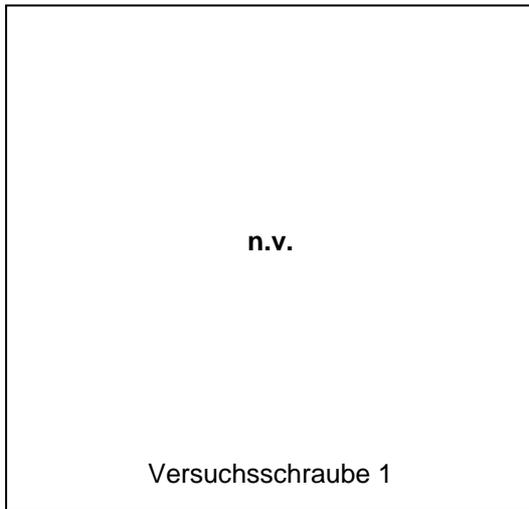
Versuchsschraube 19



Versuchsschraube 20



Zeitfestigkeitsbereich 1





Zeitfestigkeitsbereich 2

Fotos nicht vorhanden

Bruchbilder Biege-Schwingversuche Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit



Versuchsschraube 1



Versuchsschraube 2



Versuchsschraube 3



Versuchsschraube 4



Versuchsschraube 8



Versuchsschraube 9





Versuchsschraube 30



Zeitfestigkeitsbereich 1



Versuchsschraube 1



Versuchsschraube 2



Versuchsschraube 3



Versuchsschraube 4



Versuchsschraube 5



Versuchsschraube 6



Versuchsschraube 9



Versuchsschraube 10



Zeitfestigkeitsbereich 2



Versuchsschraube 1



Versuchsschraube 2



Versuchsschraube 3



Versuchsschraube 4



Versuchsschraube 5



Versuchsschraube 6



Versuchsschraube 9



Versuchsschraube 10