



Zusammenfassung des DIBt-Forschungsvorhabens ZP 52-5- 16.125-1231/06 „Experimentelle Ermittlung von Wöhlerlinien großer Schrauben“

1 Problemstellung und Ziel

Hochfeste Schrauben großer Abmessungen werden vorwiegend in Flanschverbindungen von modernen Windenergieanlagen (WEA) eingesetzt. 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.

Die für den Ermüdungsfestigkeits-Nachweis gültige EN-1993-1-9 ist für Schrauben größer M30 nur bis zu einem Gewindedurchmesser M36 abgesichert.

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 nach EN 1993-1-9.

2 Allgemeine Versuchsvoraussetzungen

Die für Schrauben geltende Wöhlerlinie KF 50 in der EN 1993-1-9 ist herstellerunabhängig. Im Regelfall werden Wöhlerlinien mit Probekörpern nur eines Herstellers ermittelt, um einen eventuellen Fertigungseinfluss und damit eine Vergrößerung des Streubandes zu verhindern. Hier werden die Schwingversuche dennoch mit Schrauben von drei verschiedenen Herstellern durchgeführt, um sicherzustellen, dass alle Hersteller die normativen Vorgaben erfüllen. Eine daraus resultierende größere Streuung wird dabei bewusst in Kauf genommen.

Für die Ermittlung der beiden Ermüdungsfestigkeitskurven werden jeweils 30 Schwingversuche im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit und 20 Schwingversuche, aufgeteilt auf zwei Zeitfestigkeitshorizonte, durchgeführt.

3 Axialschwingversuche

3.1 Versuchskörper

Die verwendeten Versuchskörper können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Hersteller	Garnituren	Anzahl	Fertigungszustand
A	M48x275 10.9 HV tZn	30	schlussvergütet
B	M48x275 10.9 HV tZn	13	schlussvergütet
	M48x280 10.9 HV tZn	17	schlussvergütet
C	M48x275 10.9 HV tZn	14	schlussvergütet

Tabelle 3-1: Übersicht über die verwendeten Probekörper für die Axialschwingversuche

Die unterschiedlichen Garniturmengen und Schraubenlängen liegen in den Lagerbeständen der einzelnen Hersteller begründet und haben keinen Einfluss auf die Versuchsdurchführung.



3.2 Prüfmaschine

Die Versuche wurden auf einem Sincotec-Hochfrequenzpulser 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 bis 80 Hz.

Die Einspannvorrichtung inkl. Einsatz wurde von der Firma Sincotec gefertigt und entspricht den in der DIN 969 angegebenen Anforderungen.



Abbildung 3-1: Prüfmaschine und Zugtorpedo

3.3 Versuchsparameter

Die nachfolgende Tabelle zeigt die gewählten Versuchsparameter für die Schwingversuche im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB) und in den Zeitfestigkeitsbereichen (ZFB 1 und ZFB 2)

	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 [-]	$5 \cdot 10^6$ / Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 3-2: Versuchsparameter für Axialschwingversuche

Die in den Versuchen angesetzte Mittellast von $F_m = 200$ kN ist der maximalen Prüfkraftkapazität der Maschine geschuldet.



3.4 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Versuchsserien sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

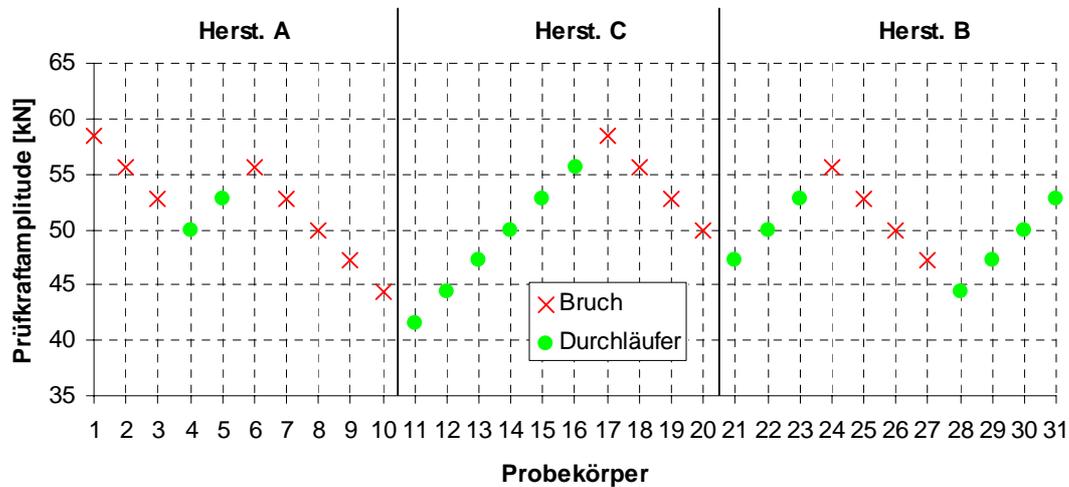


Abbildung 3-2: Prüfergebnisse im Übergangsbereich

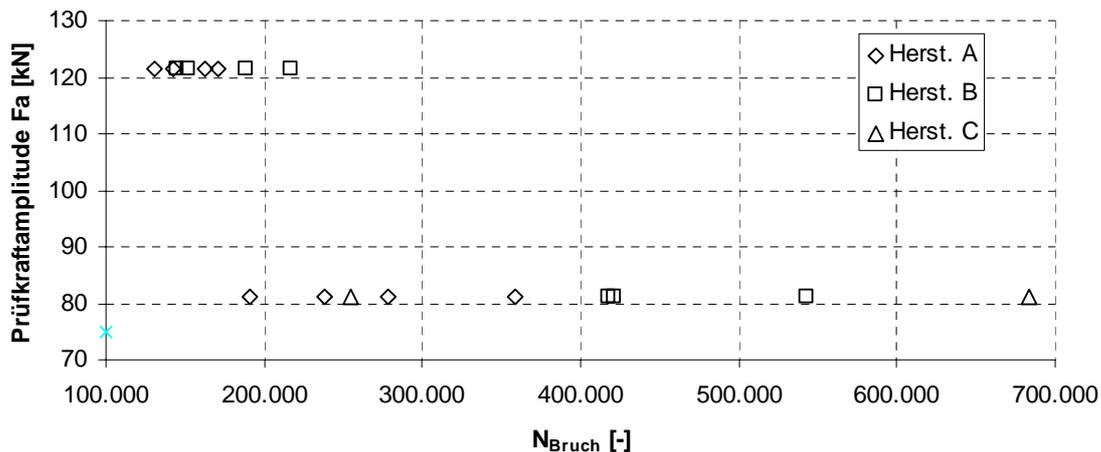


Abbildung 3-3: Prüfergebnisse in den Zeitfestigkeitsbereichen

Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB):

Die Streubreite im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit umfasst sieben Stufensprünge. Der Bruchort liegt größtenteils im ersten tragenden Gewindegang. Drei Probekörper des Herstellers 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.

Zeitfestigkeitsbereich 1 (ZFB 1):

Es liegt eine relativ große Streubreite in den Ergebnissen vor. Der Bruchort liegt fast ausschließlich im ersten tragenden Gewindegang. Ein Probekörper des Herstellers B ist unter Kopf gebrochen. 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.

Zeitfestigkeitsbereich 2 (ZFB 2):

Das Streuband ist im ZFB 2 geringer als im ZFB 1. Der Bruchort liegt überwiegend im ersten tragenden Gewindegang. Zwei Probekörper des Herstellers B weisen einen Bruch unter Kopf auf. Die erreichten Lastwechselzahlen dieser Probekörper liegen im normalen Streuband.



3.5 Wöhlerlinie

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die ermittelten Wöhlerlinien nach der statistischen Auswertung sowie den Vergleich mit der Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9. Aufgrund der großen Streubreite im ZFB 1 wurde hier zunächst eine herstellertrennte Auswertung vorgenommen. Für die Gesamtauswertung wurden dann der minimale Mittelwert und eine gemittelte Streuung verwendet.

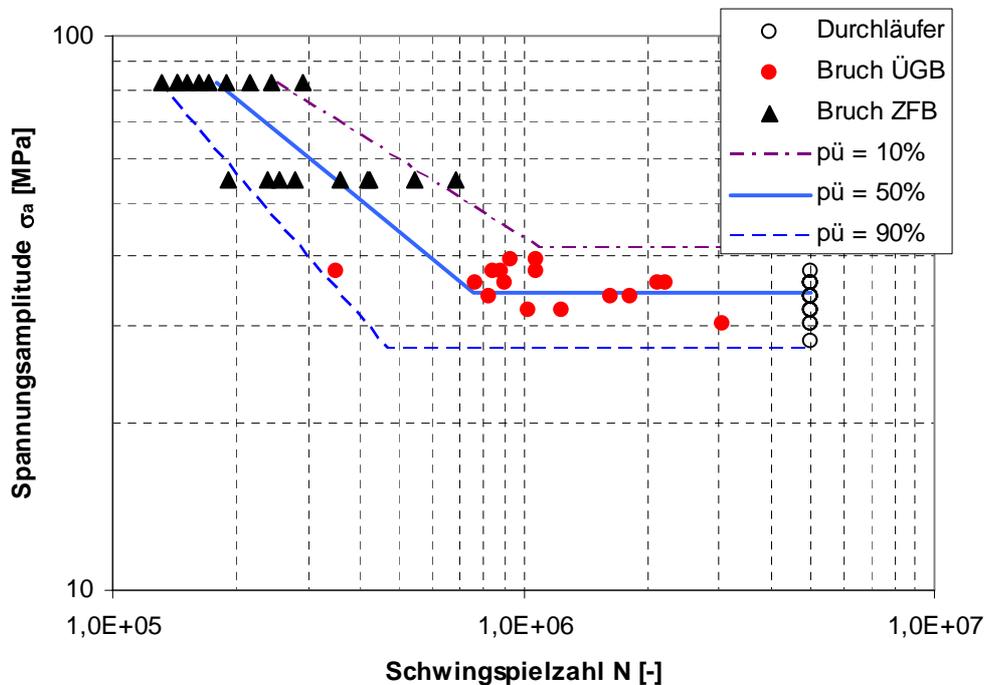


Abbildung 3-4: Wöhlerlinien für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 10%, 50% und 90%

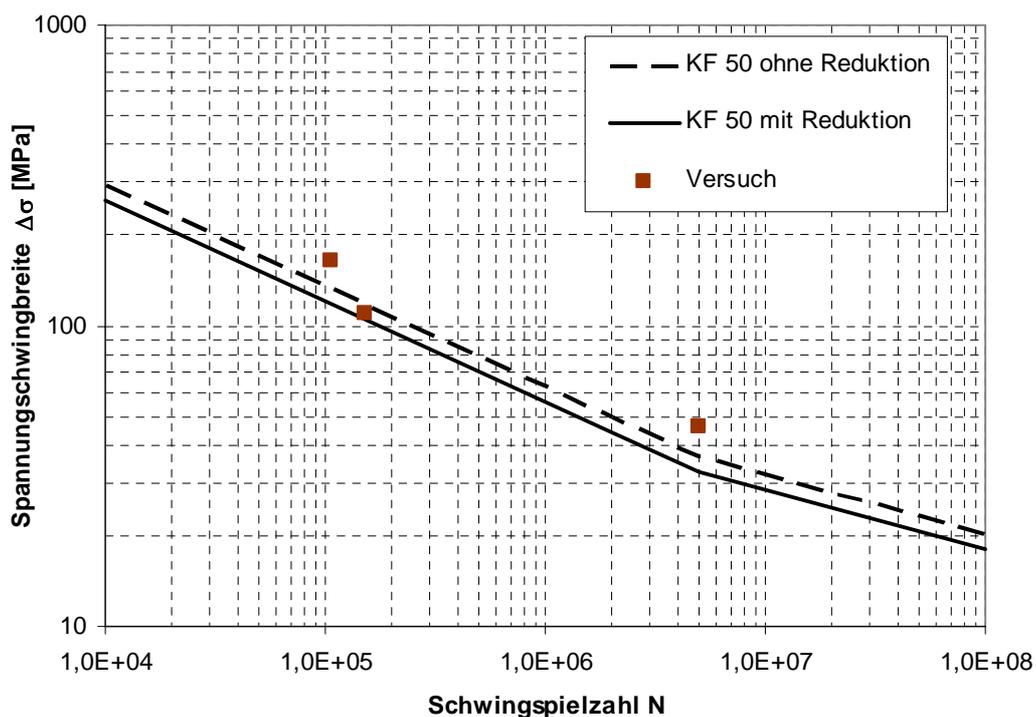


Abbildung 3-5: Vergleich zwischen Versuchen und Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9



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

Würden die einzelnen Versuchshorizonte miteinander verbunden werden, so würden aufgrund der großen Steigung im Zeitfestigkeitsbereich Teile der konstruierten Wöhlerlinie unterhalb der Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9 verlaufen. Dieser Rückschluss ist jedoch vor dem Hintergrund der erzielten Ergebnisse nicht einsichtig. Die große Streuung der Versuchsergebnisse im Zeitfestigkeitsbereich 1 führt letztendlich zu der starken Neigung der Wöhlerlinie. Bei Wahl eines höheren Lasthorizont würden sich die Streuungen verringern und es würde sich eine geringere Neigung ergeben.

4 Biegeschwingversuche

4.1 Versuchskörper

Die verwendeten Versuchskörper können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Hersteller	Garnituren	Anzahl	Fertigungszustand
A	M48x345 10.9 HV tZn	23	Schlussvergütet
B	M48x340 10.9 HV tZn	15	Schlussvergütet
C	M48x340 10.9 HV tZn	23	Schlussvergütet

Tabelle 4-1: Übersicht über die verwendeten Probekörper für die Axialschwingversuche

Die unterschiedlichen Garniturmengen und Schraubenlängen liegen in den Lagerbeständen der einzelnen Hersteller begründet und haben keinen Einfluss auf die Versuchsdurchführung.

4.2 Prüfmaschine

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

Es handelt sich um einen magnetangeregten Resonanzpulsler. 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 4-1: Biegeprüfmaschine



4.3 Versuchsp Parameter

Die nachfolgende Tabelle zeigt die gewählten Versuchsp Parameter für die Schwingversuche im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB) und in den Zeitfestigkeitsbereichen (ZFB 1 und ZFB 2)

	ÜGB	ZFB 1	ZFB 2
Anz. Versuche	30	10	10
Mittellast $F_{m,Beginn}$ [kN]	500	500	500
Prüfamp litude σ_a [MPa]	var.	$1,7 \cdot \sigma_{A,D50}$	$2,4 \cdot \sigma_{A,D50}$
Startamp litude 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 [-]	$1 \cdot 10^7$ / Anriss	Anriss	Anriss

Tabelle 4-2: Versuchsp Parameter für Biegeschwingversuche

Aufgrund der Steuerungsweise der Maschine werden Anrisswöhlerlinien erzeugt. Der Anriss wird über den Abfall der Vorspannkraft definiert.

4.4 Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Versuchsserien sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

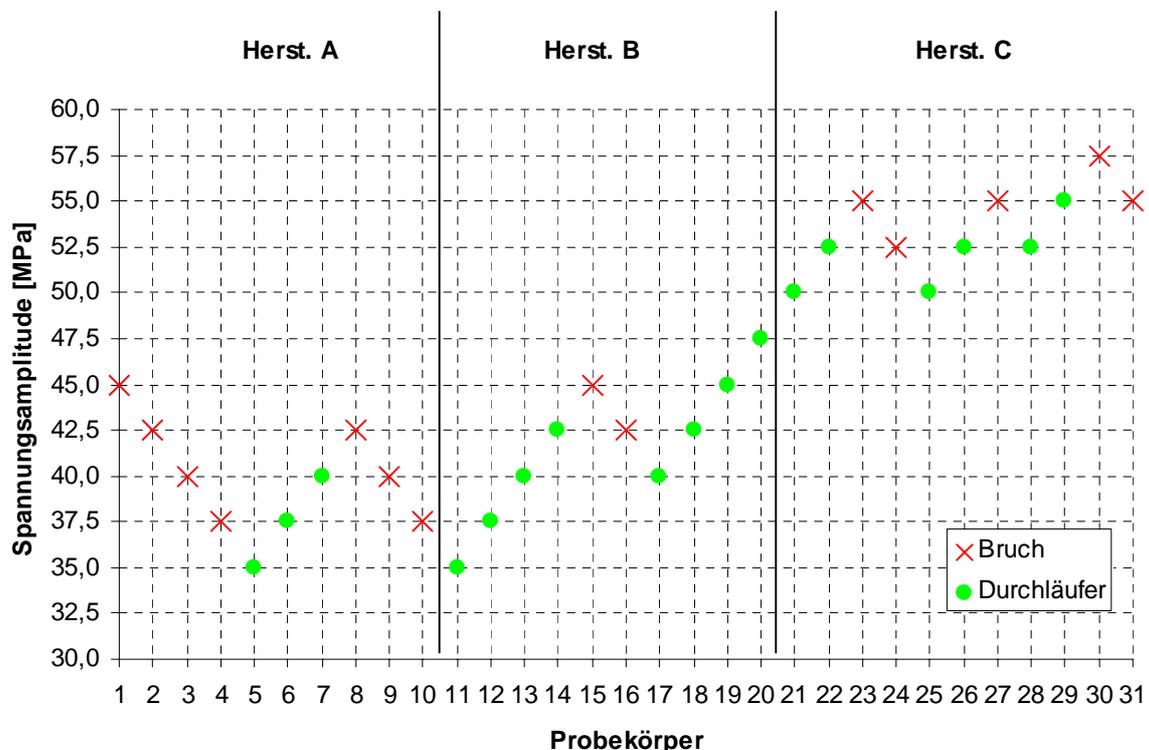


Abbildung 4-2: Prüfergebnisse im Übergangsbereich

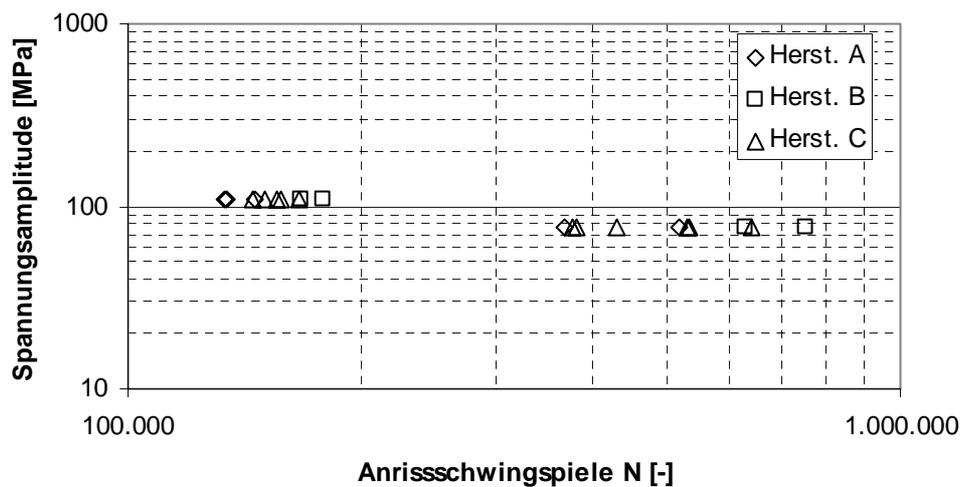


Abbildung 4-3: Prüfergebnisse in den Zeitfestigkeitsbereichen

Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB):

Der Streubereich im Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit ist mit 10 Stufensprüngen sehr breit und wird nicht von allen Herstellern bestätigt. Eine Diskrepanz besteht vor allem zwischen den Versuchsergebnissen der Probekörper von Hersteller A und Hersteller C. Es liegen zwei verschiedene Bruchorte vor. Bei den Probekörpern von Herstellern A und B liegt der Bruchort unter Kopf, bei denen von Hersteller C im ersten tragenden Gewindegang.

Die Anrisschwingspielzahlen bewegen sich zwischen 2 Mio. und 5 Mio. Lastwechseln.

Zeitfestigkeitsbereich 1:

Die Streubreite der Anrisschwingspielzahlen bewegt sich im ZFB 1 im akzeptablen Bereich. Der Bruchort ist hochgradig herstellerabhängig. Die Probekörper von Hersteller A versagten unter Kopf, die von Hersteller C fast ausschließlich im ersten tragenden Gewindegang. Die Probekörper von Hersteller B brachen zu gleichen Teilen unter Kopf und im ersten tragenden Gewindegang.

Zeitfestigkeitsbereich 2:

Die Anrisschwingspielzahlen bewegen sich in einem engen Streuband. Die Probekörper von Hersteller A und B weisen sowohl Brüche unter Kopf und im ersten tragenden Gewindegang auf. Die Probekörper von Hersteller C versagten ausschließlich im ersten tragenden Gewindegang.

4.5 Wöhlerlinie

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die ermittelten Wöhlerlinien nach der statistischen Auswertung sowie den Vergleich mit der Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9. Aufgrund der großen Streubreite im ÜGB wurde hier zunächst eine herstellergetrennte Auswertung vorgenommen. Für die Gesamtauswertung wurden dann der minimale Mittelwert und eine gemittelte Streuung verwendet.

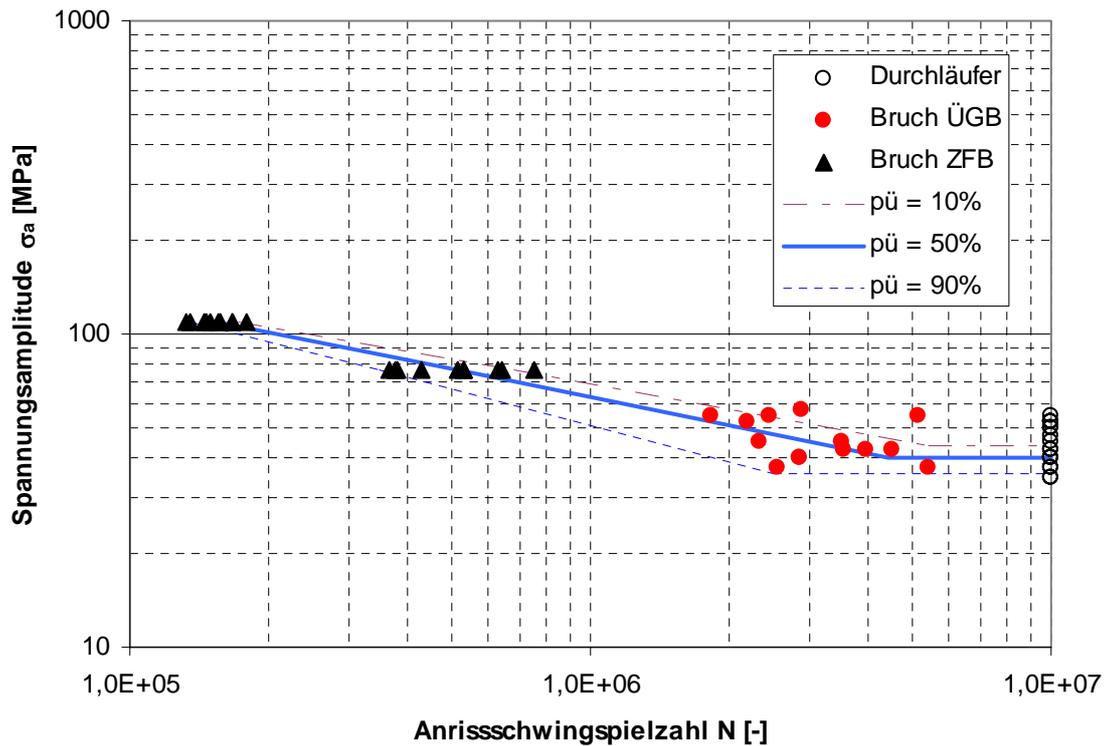


Abbildung 4-4: Wöhlerlinien für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 10%, 50% und 90%

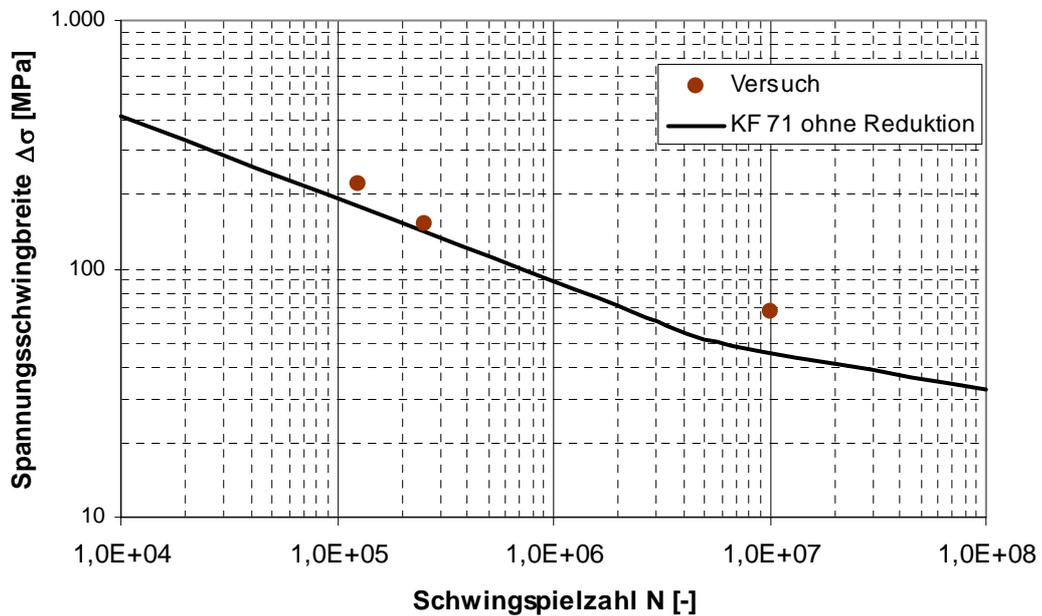


Abbildung 4-5: Vergleich zwischen Versuchen und Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9

Alle Quantilwerte aus der Versuchsreihe liegen oberhalb der normativen Wöhlerlinie KF 71 ohne Abminderung. Dieses Ergebnis bestätigt den allgemeinen Stand des Wissens, nach dem Schraubenbiegung günstiger einzustufen ist als Schraubenzug.



5 Wertung für die praktische Anwendung

Es wurde gezeigt, dass die Abminderung der Wöhlerlinie nach EN 1993-1-9 zur Erfassung des Größeneinflusses bis zu einer Schraubengröße M48 ausreichend ist. Die Regelungen im Eurocode wurden somit bestätigt.

Die Anmerkungen der EN 1993-1-9 zu dem Kerbdetail Schraube können so gedeutet werden, dass auch für Biegebeanspruchung derselbe Kerbfall wie unter Axialzug gilt. Für reine Wechselbiegung zeigt sich ein günstigeres Verhalten als für Axialzug. Nach den Versuchsergebnissen kann hier die Kerbfallklasse 71 auf der sicheren Seite liegend angesetzt werden.