

Einfluß von Längsrissen in großen Schrauben auf die Dauerfestigkeit der Schraube-Mutter-Verbindung

Vergleichende experimentelle Untersuchungen an der TU-Berlin

Institut für Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik

Leiter: Prof. Blessing

Bearbeiter: Attila Alt

Berlin, den 17.09.02

1	EINLEITUNG	3
2	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	3
3	AUSWERTUNG	4
3.1	VERSUCHSPROTOKOLLE.....	4
3.2	VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE.....	5
3.3	RIB- UND VERSCHLEIBANALYSE.....	6
3.4	INTERPRETATION DER VERSUCHSERGEBNISSE.....	7
4	ERGEBNIS	8
5	EMPFEHLUNG	8
A	PRÜFLINGE	9
B	PRÜFVORRICHTUNG	10
C	VORSPANNEN	11
D	VERSUCHSDATEN	12
E	BRUCHFLÄCHEN I. O.	13
F	BRUCHFLÄCHEN N. I. O.	14

3 Auswertung

Im Folgenden werden relative Versuchsergebnisse verglichen, um dauerhaft ertragbare Kraftamplituden verschiedener Definitionen auseinanderzuhalten. Alle Kraftamplituden werden auf die mit fünfzigprozentiger Bruchwahrscheinlichkeit ertragbare Kraftamplitude der Schrauben ohne Längsriß bezogen.

3.1 Versuchsprotokolle

Bezeichnungen:	Schraube	DIN 6914 / 10.9 TZN/+ TOL. M36 x 235
	Mutter	DIN 6915 / 10 TZN/+ TOL. MOLY
	Scheibe	DIN 6916 TZN
Vorspannkraft:	F_M von 2800 Nm Anziehmoment im ersten Versuch	
Prüffrequenz:	125 Hz	
Versuchsdauer:	> 9000000 Lastwechsel oder bis zum Schraubenbruch	

i. O.		
Nr.	$F_a / F_{A50 i.O.}$	Lw. Anriß
1	1.076	900000
2	1.042	500000
3	1.008	1400000
4	0.975	1000000
5	0.941	
6	0.975	2100000
7	0.941	
8	0.975	
9	1.008	
10	1.042	
11	1.076	1400000
12	1.042	
13	1.076	670000
14	1.042	680000
15	1.008	
16	1.042	900000
17	1.008	1100000
18	0.975	
19	1.008	
20	1.042	650000

$F_{A50 i.O.} / F_{A50 i.O.}$	1
Standardabweichung	0,046292
Bruchlage	1. tr. Gwg.

n. i. O.		
Nr.	$F_a / F_{A50 i.O.}$	Lw. Anriß
1	0.975	
2	1.008	760000
3	0.975	4800000
4	0.941	
5	0.975	
6	1.008	1200000
7	0.975	900000
8	0.941	
9	0.975	
10	1.008	
11	1.042	1600000
12	1.008	
13	1.042	960000
14	1.008	650000

$F_{A50 n.i.O.} / F_{A50 i.O.}$	0,991597
Standardabweichung	0,038908
Bruchlage	1. tr. Gwg.

3.2 Vergleichende Darstellung der Versuchsergebnisse

Neben der Dauerfestigkeit können die Anrißlastspielzahlen und Anrißsorte auf unterschiedliche Ursachen der Ermüdung hinweisen. Bild 2 stellt die Anrißlastspielzahlen und Durchläufer der Schrauben mit und ohne Längsriss je normiertem Lastniveau dar. Die Anhänge E und F enthalten Aufnahmen der Bruchflächen. Bild 3 wertet die Bruchflächen der Schrauben mit Längsriss hinsichtlich der Lage des ersten Anrisses zum Längsriss aus.

Die Lastniveaus der normierten Darstellung in Bild 2 stehen im Verhältnis zu dem mit fünfzigprozentiger Bruchwahrscheinlichkeit ertragbaren Wert Eins/der Schrauben ohne Längsriss. Der entsprechende Wert der Schrauben mit Längsriss liegt weniger als 1% darunter. Die Anrißlastspielzahlen unterscheiden sich nicht auffallend. Eine Ausnahme ist der späte Anriß bei 4800000 Lastwechseln im dritten Versuch der Schrauben mit Längsriss.

Alle Brüche liegen im ersten tragenden Gewindegang. 57% der gebrochenen Schrauben mit Längsriss sind zuerst an der Stelle des Längsrisses angerissen, 29% genau gegenüber. Nur eine Schraube ist 30° verdreht zum Längsriss angerissen.

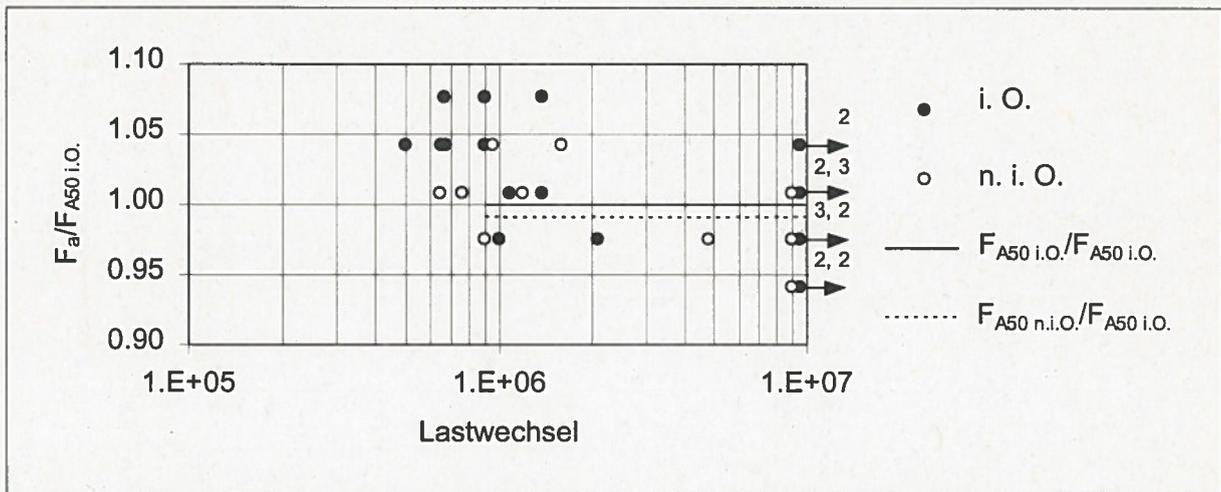


Bild 2: Anrißlastspielzahlen und Durchläufer der i. O.- und n. i. O.-Versuche

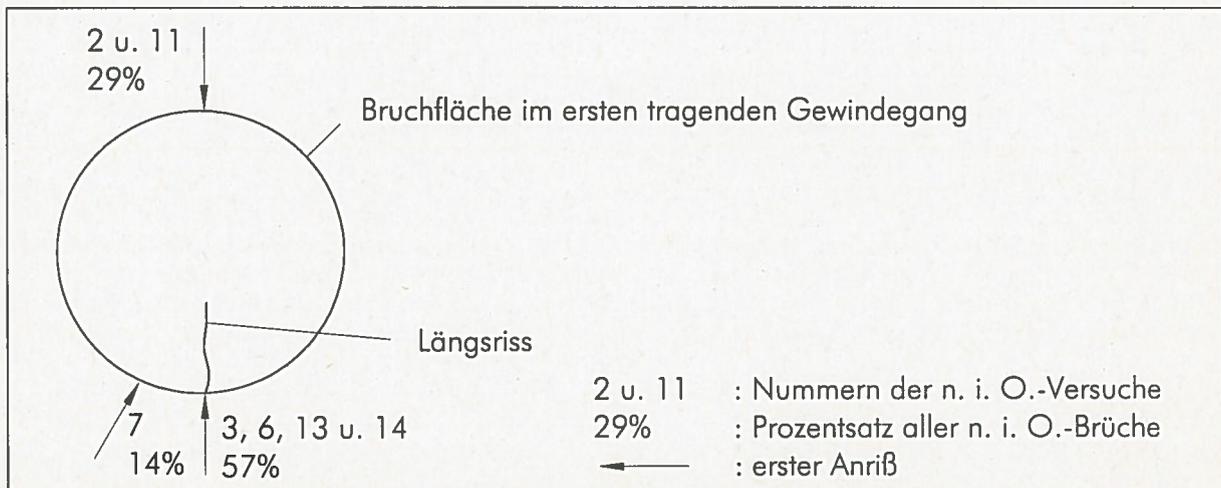


Bild 3: erste Anrißsorte in Zuordnung zur Lage des Längsrisses

3.3 Riß- und Verschleißanalyse

In den Bruchflächen der Schrauben mit Längsriß aus den Versuchen 6 und 7 befinden sich zwei Anrisse, jeweils einer davon an der Stelle des Längsrisses. Die zeitliche Folge der Rißentstehung ist anhand der Rißverläufe erkennbar. Im Versuch 6 entsteht der Riß an der Stelle des Längsrisses vor dem anderen, im Versuch 7 danach. In beiden Fällen bleibt der vom Längsriß ausgehende Anriß stehen.

Die Bruchfläche in Bild 4 zu Versuch 7 zeigt die beiden Anrisse in deutlich versetzten Ebenen. Der Anriß an der Stelle des Längsrisses bildet sich nur, weil der schon vorhandene andere Riß durch den Längsriß in seiner Ausbreitung behindert wird. Eine zeitweilig bestehende Hinterschneidung des tragenden Restquerschnittes erfährt eine zunehmende Beanspruchung an der Stelle des Längsrisses. Die Rastlinie in Bild 5 zeugt von der Unterbrechung im Rißfortschritt zur Dauerbruchfläche.



Bild 4: Dauerbruchfläche 7 n. i. O.



Bild 5: Detail zu Bild 5

Die Bruchfläche in Bild 6 zu Versuch 6 zeigt den stabilen Anriß an der Stelle des Längsrisses und 90° gegen den Uhrzeigersinn verdreht dazu den zweiten Anriß, der zum Dauerbruch führte. Der zweite Riß suchte während seines Fortschritts die leicht versetzte Ebene des schon vorhandenen Risses an der Stelle des Längsrisses (Bild 7).

Die starke Korrosion im Längsriß erklärt sich aus der parallelen Ausrichtung vom Rißgrund der fortschreitenden Dauerbruchfläche zum Querschnitt des Längsrisses. Zum Zeitpunkt des Rißfortschrittes bis auf die Höhe des Längsrisses war das Aufklaffen der Dauerbruchfläche mit einer Scherbewegung im Längsriß verbunden. Sie führte zur Reibkorrosion.

Bei den anderen Versuchen ist nur wenig Reibkorrosion im Längsriß zu erkennen (Anhang F). Die reibkorrodierten Bereiche liegen nicht an der Außenseite, sondern im Inneren der Längsrisse.

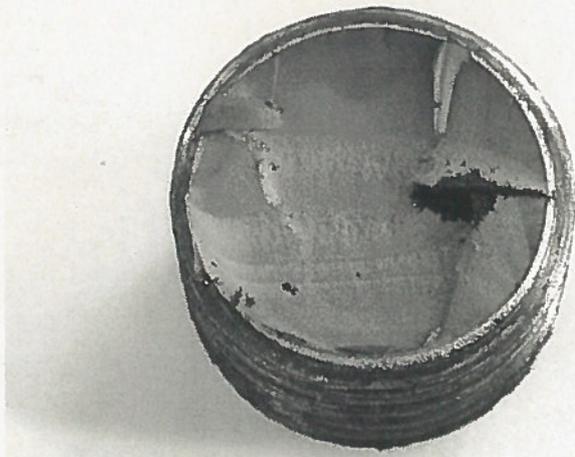


Bild 6: Dauerbruchfläche 6 n. i. O.



Bild 7: Detail zu Bild 6

3.4 Interpretation der Versuchsergebnisse

Die Dauerbrüche der Schrauben mit Längsriß werden nicht durch Reibkorrosion verursacht. Sie tritt nur im Inneren der Längsriss auf. Die Reibkorrosion in den Längsrissen entsteht dadurch, daß sich im Verlauf des Rißfortschrittes der Dauerbruchfläche unsymmetrische Traganteile des Restquerschnittes rechts und links vom Längsriß ausbilden. Sie biegen die Schraube mit einer Gleitbewegung im Längsriß.

Obwohl die Längsriss in den Schrauben die Dauerfestigkeit nicht verringern, beeinflussen sie den Anrißort. Der Dauerbruch beginnt bevorzugt im ersten tragenden Gewindegang an der Stelle des Längsrisses oder gegenüber. Gegenläufige Einflüsse sind vorstellbar, die je nach Einflußnahme den Anrißort bestimmen. Einerseits wird die Querkontraktion im Gewindegang an der Stelle des Längsrisses nicht mehr behindert. Die Mehrachsigkeit des Spannungszustandes verringert sich. Bei gleichen Dehnungen in Schraubenlängsrichtung auf dem ganzen Umfang der Schraube wird der Gewindegang an der Stelle des Längsrisses weniger beansprucht. Die Schrauben brechen auf der gegenüberliegenden Seite des Längsrisses. Andererseits verfolgt der Längsriß zwar in seiner Hauptrichtung die gerade Linie der ursprünglichen Riefe, hat aber im Detail einen unruhigen Verlauf. Ein Längsriß, der lokal nicht rechtwinklig zum Gewindegang verläuft, wirkt wie ein kleiner Anriß zum Dauerbruch.

Ungewöhnlich hohe Anrißlastspielzahlen wie in Versuch 3 mit Längsriß sind von anderen Dauerschwingversuchen bekannt, liegen dort aber gewöhnlich bei Lastniveaus im Bereich der Dauerfestigkeit und Lastwechselzahlen in der Verlängerung der Zeitfestigkeitsgeraden. Der Dauerbruch der Schraube beginnt bei dem vorliegenden Versuch an der Stelle des Längsrisses mit einem Versatz im Längsriß von einem halben Millimeter.

4 Ergebnis

- Ein Längsriß in der Schraube beeinflusst den Anrißort der Dauerbruchfläche. Der Dauerbruch beginnt bevorzugt im ersten tragenden Gewindegang an der Stelle des Längsrisses oder gegenüber.
- Ein Längsriß in der Schraube beeinflusst die Dauerfestigkeit der Schraube-Mutter-Verbindung nicht. Der experimentell bestimmte Unterschied beträgt weniger als 1% und liegt im Bereich der Standardabweichungen (Bild 8).

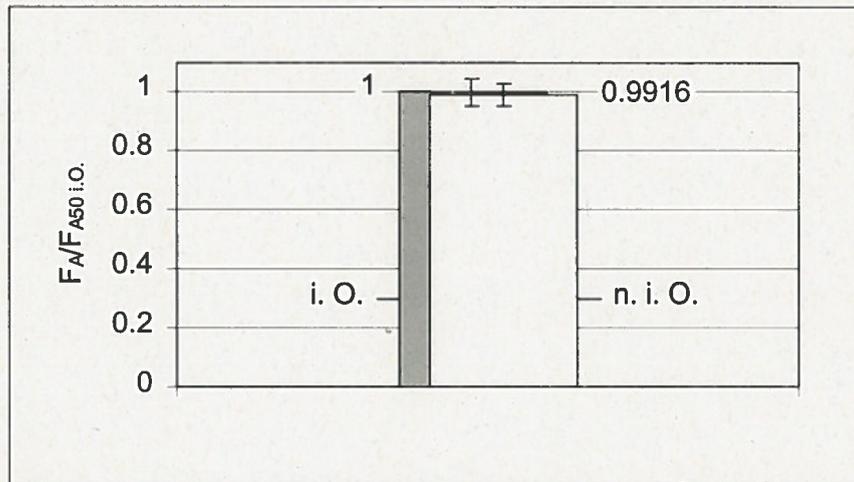


Bild 8: Vergleich der relativen Dauerfestigkeit der i. O.- und n. i. O.-Schrauben

5 Empfehlung

Die Untersuchungen betreffen die reine Zugbelastung der Schraube-Mutter-Verbindung. Statische oder dynamische Biegeanteile der Belastung können bei nicht rechtwinkliger Ausrichtung vom Profil des Längsrisses zur neutralen Faser der Biegebeanspruchung in der Schraube zu Gleitbewegungen im Längsriß mit Reibkorrosion führen. Bei der Turmverschraubung von Windkraftanlagen sollte ein möglicher Längsriß in der Schraube z. B. in Richtung der Turmmitte zeigen.

A Prüflinge

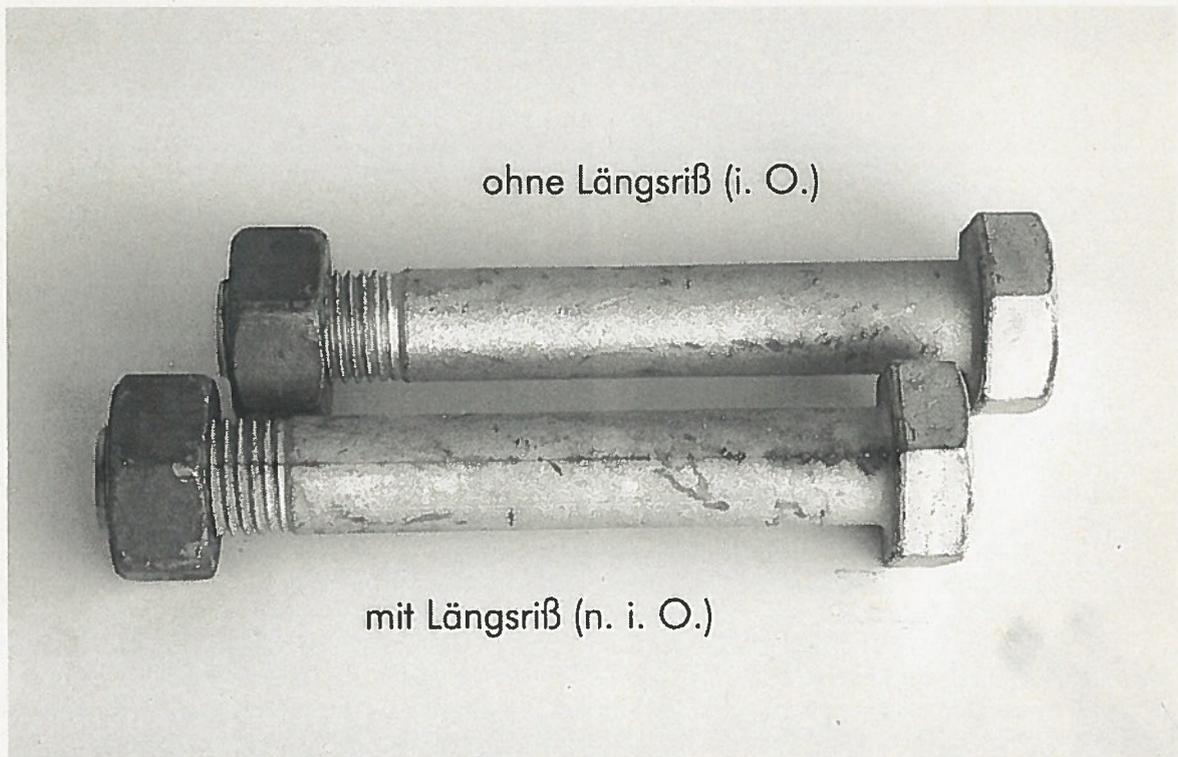


Bild 9: Prüflinge gemäß DIN 6914/10.9 TZN/+TOL. M36x235 mit und ohne Längsriß

B Prüfvorrichtung

Schraube und Mutter verspannen zwei gegenüberliegende Seiten eines geschlossenen Rahmens. Hebelarme erweitern den Rahmen. Eine Biegeeigenschwingung dieser Vorrichtung belastet die Schraube harmonisch. Die Eigenschwingung besitzt vier Knotenpunkte, in denen die Vorrichtung frei von Reaktionskräften gelagert ist. Die Trägheit der Hebelarme beeinflusst die Eigenfrequenz und das Verhältnis von schwingender Vorrichtungs- zu Schraubenbeanspruchung. Die Vorrichtung ist so dimensioniert, daß sie Vorspannungen erträgt, welche die Schraube oberhalb ihrer Dehngrenze beanspruchen und Schwingungsamplituden, welche die Schraube ermüden. Ihre Eigenfrequenz beträgt 125 Hz.

Elektromagnete betreiben die Prüfvorrichtung in Eigenschwingung. Das Dehnmeßstreifensignal der Maschinendeckung in Eigenschwingung wird von einem Rechner in einen Rechteckimpuls gleicher Frequenz verarbeitet und betreibt die Elektromagnete transistorverstärkt. Die Schwingungsamplitude der Maschine wird über die Amplitude des Rechteckimpulses mit Proportional-Differential-Verhalten geregelt. Phase und Impulsbreite können während des Betriebs von Hand optimiert werden. Störungen der Netzspannung genügen, um die Maschine infolge der vom Rechner generierten Störimpulse in Eigenschwingung zu versetzen.

Die Verformungsarbeit der Struktur wird nur einmal für die größte Auslenkung in ihre Eigenform verrichtet. Sie verteilt sich auf mehrere Schwingungsperioden mit wachsender Amplitude. Abgesehen davon gleichen die Magnete nur eine Dämpfung der Schwingung aus.

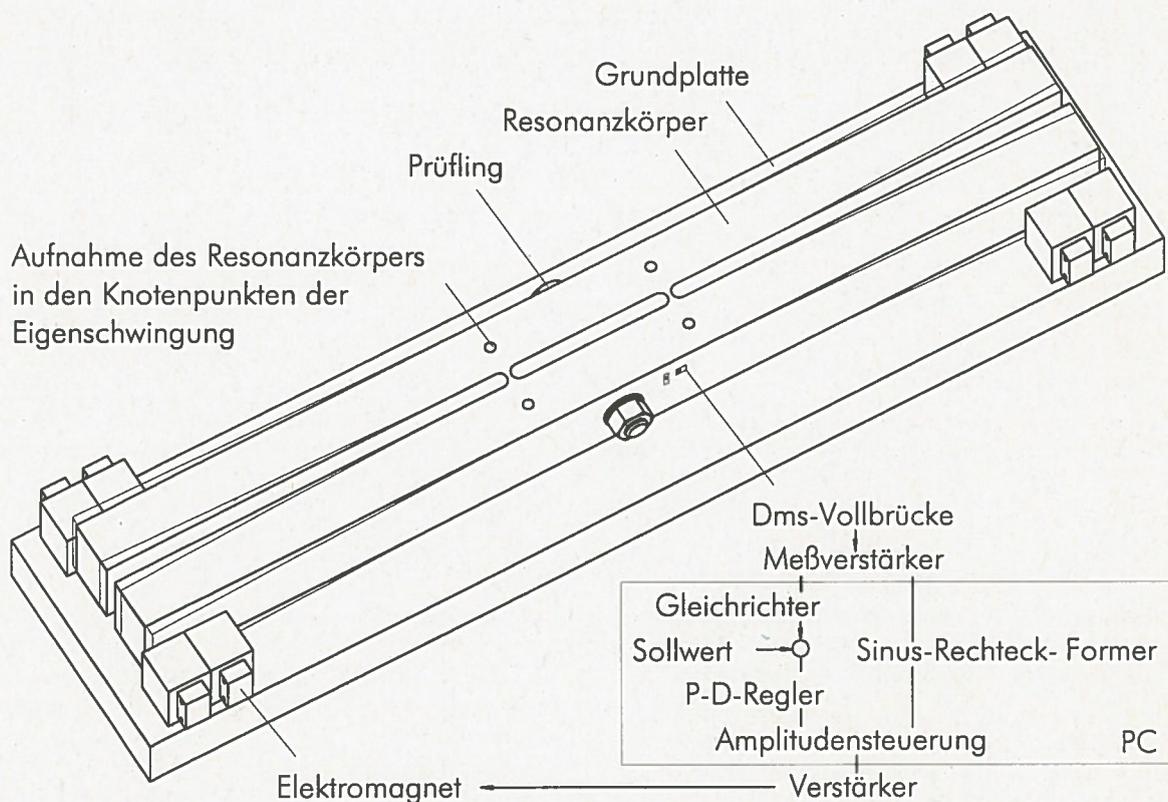


Bild 10: Prüfvorrichtung und Regelkreis

C Vorspannen

Die Vorspannkraft wird im ersten Versuch für das Drehmoment von 2800 Nm als proportionales elektrisches Spannungssignal der Dehnmeßstreifen auf der Prüfvorrichtung bestimmt und danach für alle Verbindungen gleich eingestellt.

Das erforderliche Drehmoment wird, wie in Bild 11 dargestellt, mit Hilfe eines Untersetzungsgetriebes erzeugt. Die beim Anziehen zwischen Steckschlüssel und Abstützhebel des Werkzeuges entstehenden Querkräfte werden nicht in die Schraube eingeleitet.

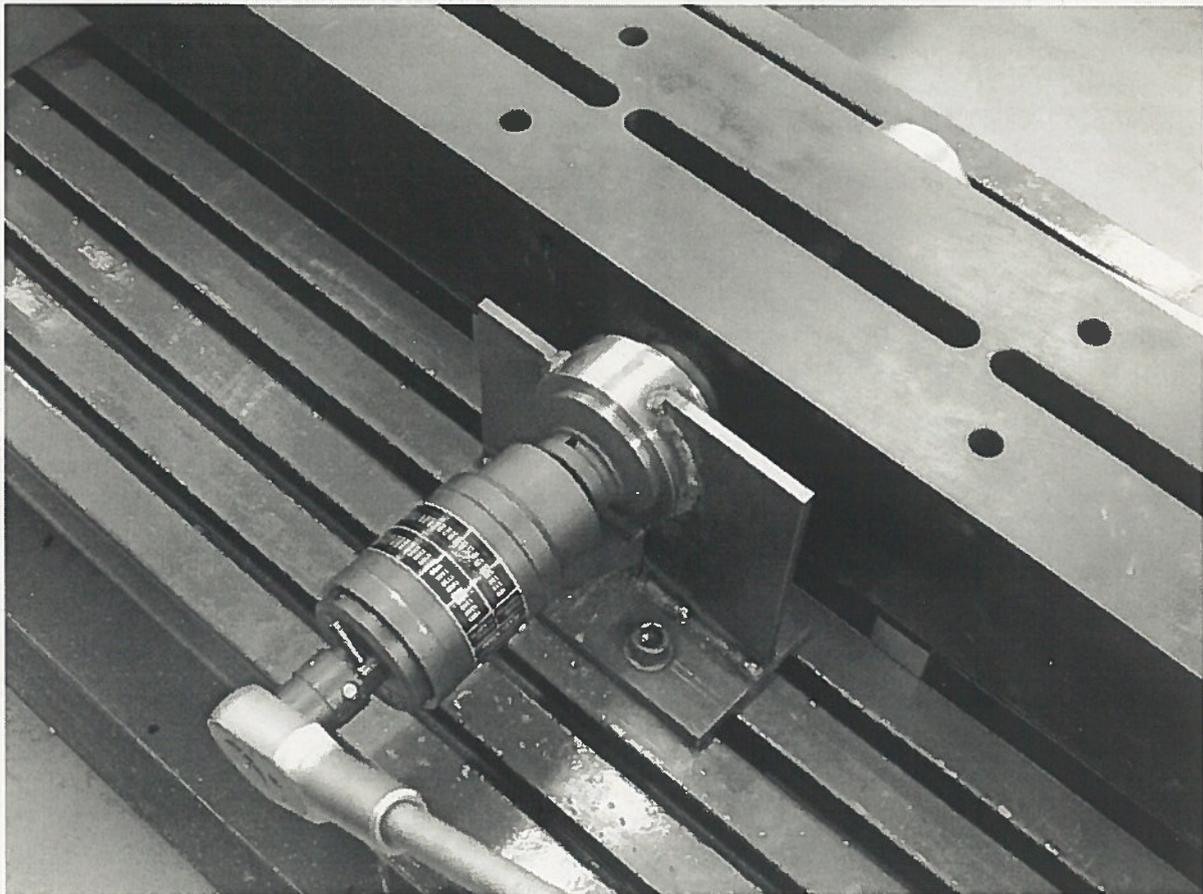


Bild 11: Vorspannen mit Untersetzungsgetriebe

D Versuchsdaten

Während eines Versuches werden in aufeinanderfolgenden Schritten von 400 Lastwechseln die größten elektrischen Spannungssignale der statischen und dynamischen Belastung in einer Datei gespeichert. Bild 12 zeigt die Daten in normierter Darstellung beispielhaft für den Versuch 11 ohne Längsriß.

Die Anrißlastspielzahl ist an der Änderung der statischen Belastung zu erkennen. Sie wird, wie in Bild 12 dargestellt, ausgewertet. Der Vorspannkraftverlust durch Setzen ist bei keinem Durchläufer größer als 2%.

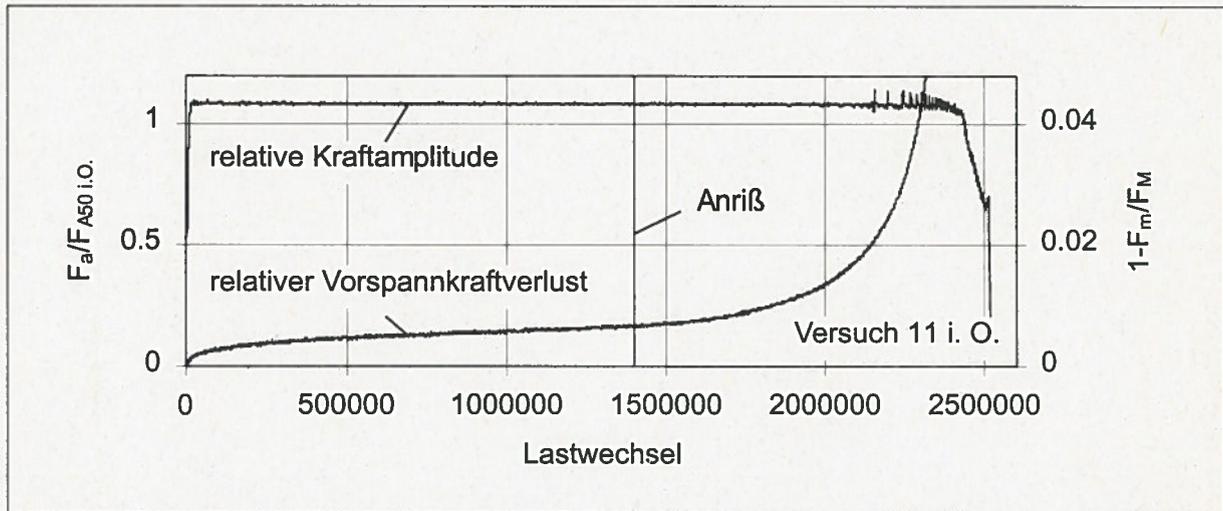
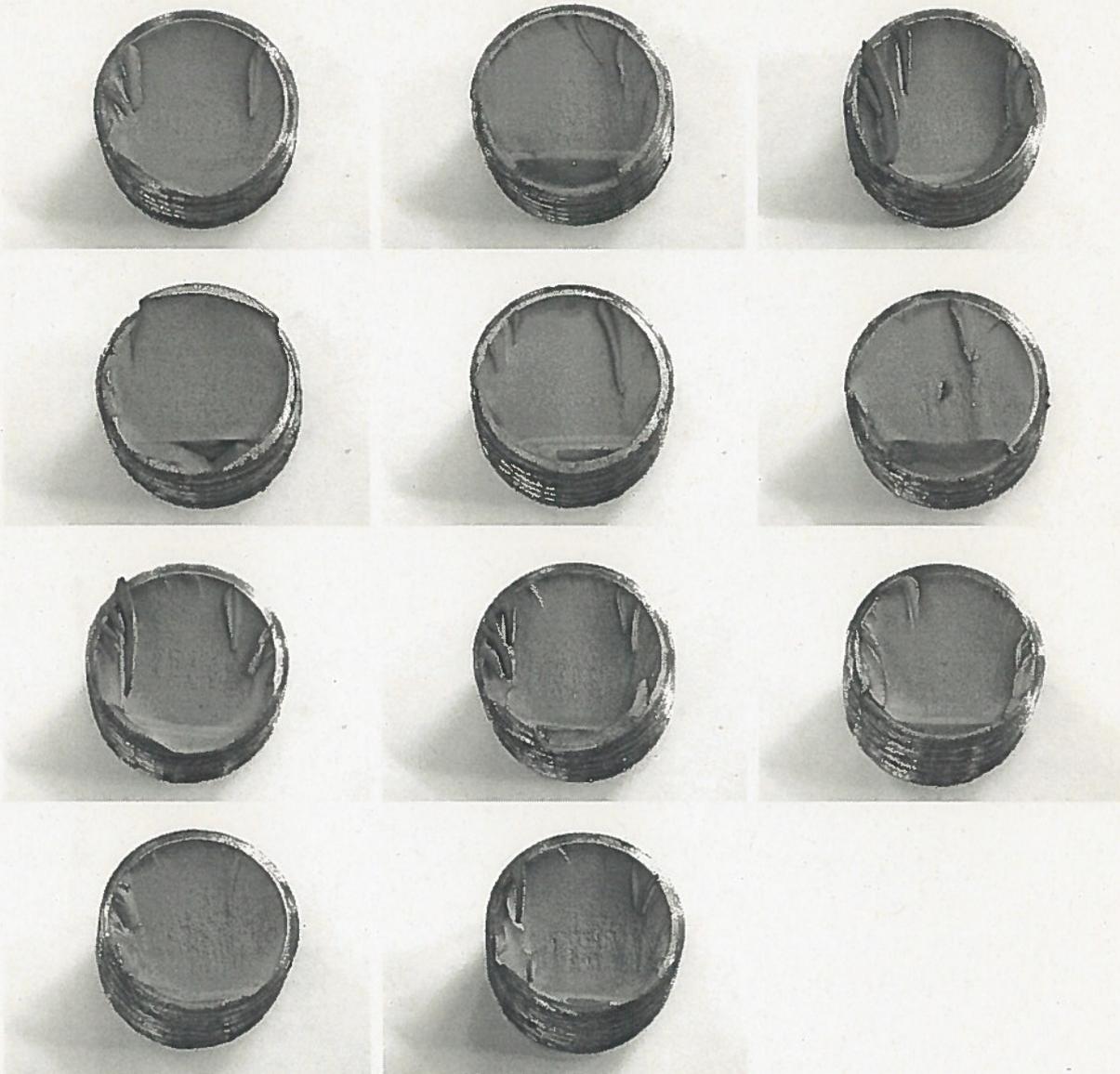


Bild 12: Versuchsdaten und Auswertung der Anrißlastspielzahl

Mit einer Rißausbreitung verschiebt sich die Phase des optimalen Übertragungsverhaltens von Schwingungsanregung zu -antwort. Oberhalb einer kritischen Rißgröße kann die Regelung den Sollwert der Belastungsamplitude nicht mehr erreichen. Die Anregung der Elektromagnete wird beim Unterschreiten eines Grenzwertes im kleinstmöglichen Diskretisierungsschritt der Meßkarte verzögert. Dadurch kommt es während des Rißfortschrittes in abnehmenden Zeitabständen zum Überschwingen der Belastungsamplitude (Bild 12). Ab einem kritischen Rißfortschritt verliert auch diese Regelung ihre Wirkung und die Belastungsamplitude fällt deutlich unter den Sollwert.

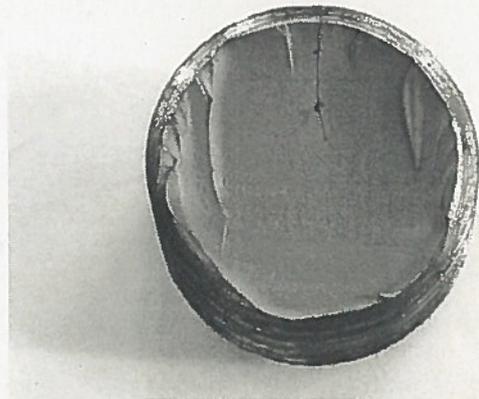
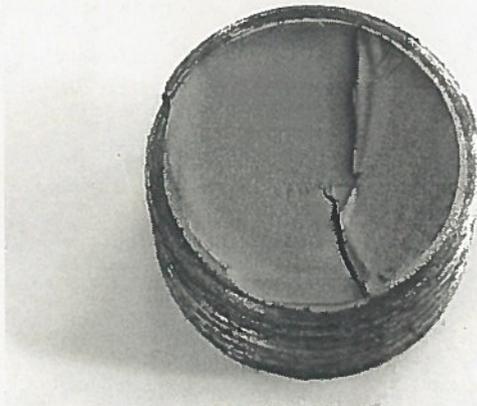
E Bruchflächen i. O.



Bruchbilder der i. O. Versuche 1, 2, 3, 4, 6, 11, 13, 14, 16, 17 u. 20 von links nach rechts und oben nach unten.

In allen Darstellungen breitet sich die Dauerbruchfläche von oben nach unten aus.

F Bruchflächen n. i. O.



Bruchbilder der n. i. O. Versuche 2, 3, 6, 7, 11, 13 u. 14 von links nach rechts und oben nach unten.

In allen Darstellungen breitet sich die Dauerbruchfläche von oben nach unten aus.