

Maßnahmen zur Steigerung der Dauerfestigkeit von M36 Schraube-Mutter-Verbindung

Vergleichende experimentelle Untersuchungen an der TU-Berlin

Institut für Konstruktionstechnik und Entwicklungsmethodik

Leiter: Prof. Blessing

Bearbeiter: Attila Alt

Berlin, den 28.10.02

1	EINLEITUNG	3
2	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	3
3	AUSWERTUNG.....	4
3.1	VERGLEICHENDE DARSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	4
3.2	RIB- UND VERSCHLEIßANALYSE	5
4	ERGEBNIS	7
A	PRÜFLINGE	8
B	ZUGMUTTER.....	9
C	PRÜFVORRICHTUNG.....	10
D	VORSPANNEN	11
E	VERSUCHSDATEN	12
F	VERSUCHSPROTOKOLL ZU DEN GENORMTEN VERBINDUNGEN.....	13
G	VERSUCHSPROTOKOLL ZU DEN OPTIMIERTEN VERBINDUNGEN	14

1 Einleitung

Der Turm einer Windkraftanlage besteht gewöhnlich aus konischen Ringsegmenten, die über Flansche passend miteinander verschraubt werden. Dafür werden verzinkte Schrauben, Muttern und Scheiben nach DIN 6914/10.9, DIN 6915/10 und DIN 6916 der Gewinde M36 bis M48 verwendet. Winderregte Turmschwingungen können diese Schraubenverbindungen dynamisch erheblich beanspruchen. Die GE Windenergy GmbH sieht Möglichkeiten, die Dauerfestigkeit der Verbindungen durch

- eine Dacrometbeschichtung von Schraube, Mutter und Scheiben,
- einen großzügigen Gewindeauslauf und
- die Verwendung einer Zugmutter

zu steigern. Die folgenden experimentellen Untersuchungen sollen hierfür den Nachweis liefern.

2 Versuchsdurchführung

In zwei Versuchsblöcken werden die Dauerfestigkeit der genormten und der optimierte Schraube-Mutter-Verbindung bestimmt. Tabelle 1 enthält die Versuchsparameter. Anstelle von Unterlegscheiben nach DIN 9616 befinden sich gehärtete Buchsen mit der gleichen Geometrie der Auflageflächen unter dem Schraubenkopf und der Mutter. Je Versuchsblock stammen alle Schrauben oder Muttern aus der gleichen Werkstoff-, Fertigungs- und Wärmebehandlungscharge. Die Prüfverbindung ist in Bild 1 dargestellt.

Tabelle 1: Versuchsprogramm

	genormt	optimiert
Schraube	DIN 6914/10.9 TZN/+TOL. M36×260	DIN 6914/10.9 DT/DS schwarz M36×260
Mutter	DIN 6915/10 TZN/+TOL. MOLY M36	nach Zeichnung im Anhang B
l_k in mm	220	220
Gew.ausl.	3 belastete freie Gewindegänge	10 belastete freie Gewindegänge
F_V in kN	638 (torsionsbehaftet)	638 (torsionsbehaftet)

Die Spannungsamplituden bei fünfzigprozentiger Bruchwahrscheinlichkeit werden nach dem Treppenstufenverfahren nach DIN 969 mit so vielen Schrauben ermittelt, daß 18 Versuche in die Auswertung eines Blocks eingehen.

Wegen der großen erforderlichen Prüfkräfte wird eine andere Prüfmaschine verwendet (Anhang B), als die bekannten Hochfrequenz- oder Hydropulser. Damit verbunden weicht die Versuchsführung von zwei Festlegungen nach DIN 969 ab.

- Die Schraube-Mutter-Verbindung wird mit einem Drehmoment vorgespannt (Anhang D).
- Nach dem Anreißen der Schraube verringert sich die Vorspannkraft bis zum vollständigen Bruch fortlaufend (Anhang E).

Die Prüfmaschine liefert beim Vorspannen und im Betrieb ein elektrisches Spannungssignal, das zur Vorspannkraft und zur Schwingkraftamplitude jeweils proportio-

nal ist. Beide Signale werden je Versuchsblock mit Hilfe eines mit Dehnmeßstreifen beklebten Prüflings kalibriert.

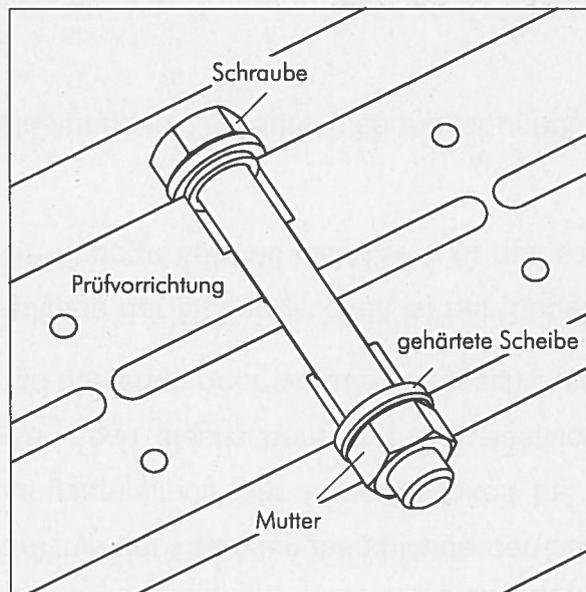


Bild 1: Prüfverbindungen

3 Auswertung

Die Versuchsprotokolle befinden sich in den Anhängen F und G. Sie enthalten die Auswertung der Schwingkraftamplituden bei fünfzigprozentiger Bruchwahrscheinlichkeit. Die Versuchsergebnisse werden im Folgenden als Spannungsamplituden verglichen. Sie beziehen sich auf die Kernquerschnitte der Schraubengewinde. Dafür wurden die Kerndurchmesser von Schrauben je Versuchsreihe gemessen und gemittelt.

3.1 Vergleichende Darstellung der Versuchsergebnisse

Tabelle 2 unterteilt die Versuche in Durchläufer und Brüche und die Brüche hinsichtlich ihres Anrißortes. Es sind jeweils zehn Schrauben gebrochen und acht haben acht bzw. zehn Millionen Lastspiele überlebt. Alle Bruchflächen der genormten Verbindungen liegen im ersten tragenden Gewindegang der Schraube. Die Mehrheit der gebrochenen optimierten Verbindungen hat ihren Anriß im Schraubenkopf. Drei gebrochene optimierte Verbindungen haben ihren Anriß im zweiten tragenden Gewindegang der Schraube.

Tabelle 2: Aufteilung der Versuche hinsichtlich Ereignis und Anrißort

	Durchläufer	Bruch		
		Kopf	1. tr. Gew.g.	2. tr. Gew.g.
genormt	8	-	10	-
optimiert	8	7	-	3

Bild 2 stellt die Anrißlastspielzahlen und Durchläufer beider Versuchsblöcke in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude dar. Die statistisch berechneten Spannungsamplituden bei fünfzigprozentiger Bruchwahrscheinlichkeit sind ebenfalls eingezeichnet. Die Anrißlastspielzahlen vergrößern sich bei den Brüchen im ersten tragenden Gewindegang der genormten Verbindungen und bei den Kopfbrüchen der optimierten Verbindung tendenziell mit abnehmender Spannungsamplitude. Sie liegen auf unterschiedlichen Spannungsniveaus bei ähnlichen Lastspielzahlen. Für die drei Gewindebrüche der optimierten Verbindungen gilt diese Abhängigkeit nicht. Bei der größten geprüften Spannungsamplitude ermüdet eine Schraube erst bei acht Millionen Lastspielen im zweiten tragenden Gewindegang.

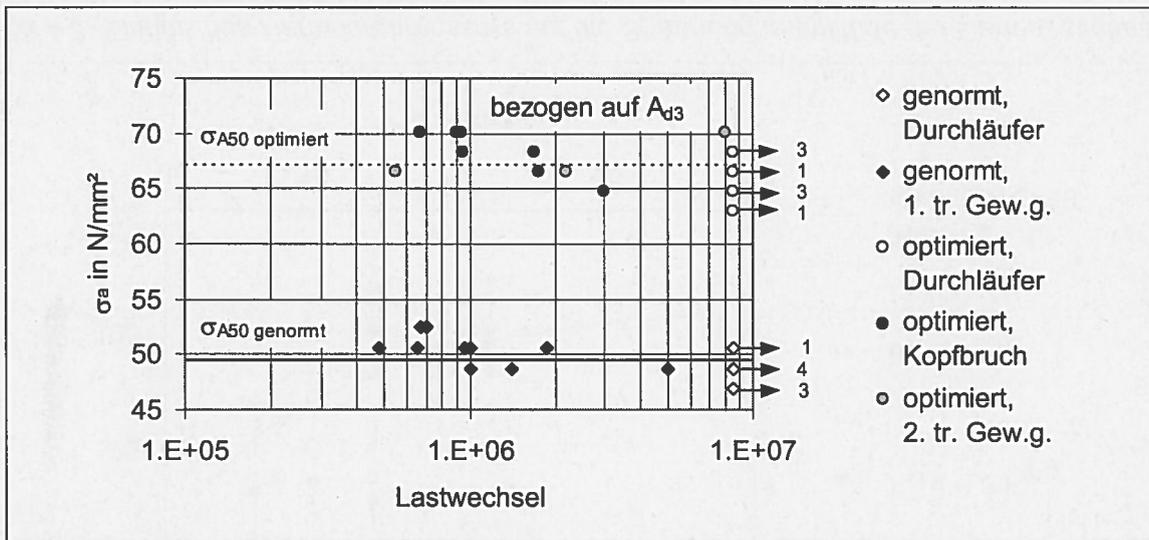


Bild 2: Anrißlastspielzahlen und Durchläufer der Versuche mit genormter und optimierter Schraube-Mutter-Verbindung

3.2 Riß- und Verschleißanalyse

Für die genormten Verbindungen ist eine Bruchfläche wie in Bild 3 und Bild 4 typisch. Im ersten tragenden Gewindegang der Schraube bilden sich auf gegenüber liegenden Seiten zwei Anrisse. Sie breiten sich aus, bis der Restquerschnitt unter der verbleibenden Vorspannkraft gewaltsam bricht. Nicht alle genormten gebrochenen Verbindungen haben zwei Anrisse, aber alle Anrisse liegen im ersten tragenden Gewindegang.

Für die optimierten Verbindungen ist ein Schraubenkopfbruch wie in Bild 5 und Bild 6 typisch. Er hat zwei Anrisse im Kopfradius und eine Gewaltbruchfläche. Der erste Anriß wandert mit einer leichten Neigung in das Innere des Kopfs. Mit dem Rißfortschritt neigt sich der tragende Restquerschnitt zwischen Rißgrund und gegenüberliegendem Kopfradius und wird dabei zunehmend schierend beansprucht. Ein zweiter Anriß wandert von dem gegenüberliegenden Kopfradius steil in den Kopf. Die glänzenden Bereiche dieser Dauerbruchfläche in Bild 6 sind während des Gewaltbruches durch ein Glätten der aufeinander gleitenden Bruchflächen entstanden.

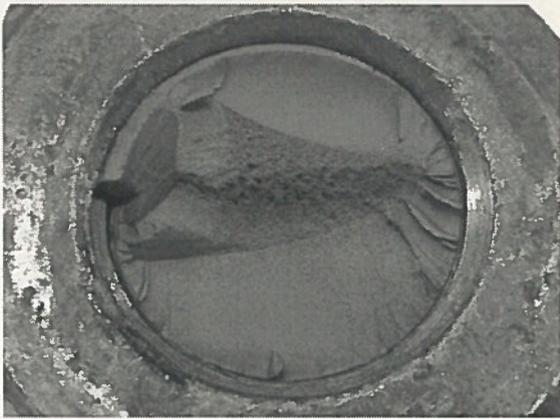


Bild 3: für die genormte Verbindung typische Bruchfläche im 1. tr. Gew.g. der Schraube

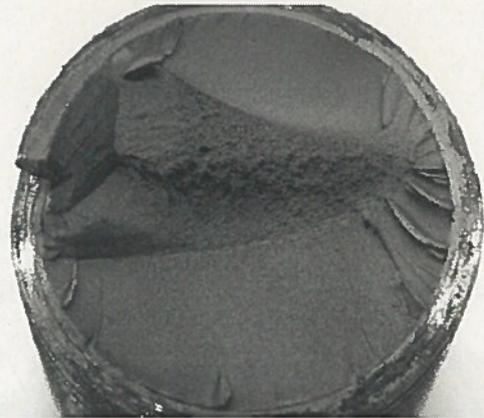


Bild 4: Vergrößerung zu Bild 3 ohne Mutter

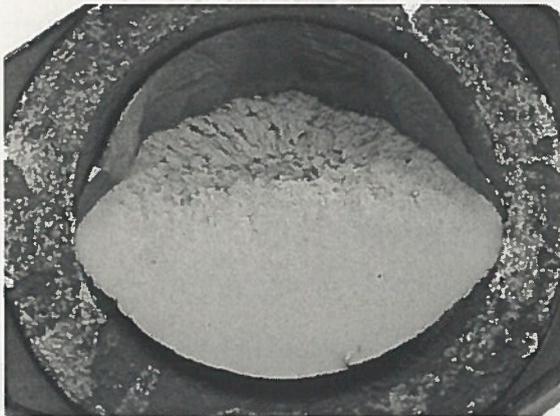


Bild 5: für die optimierte Verbindung typische Bruchfläche im Schraubenkopf



Bild 6: schaftseitige Kopfbruchfläche zu Bild 5

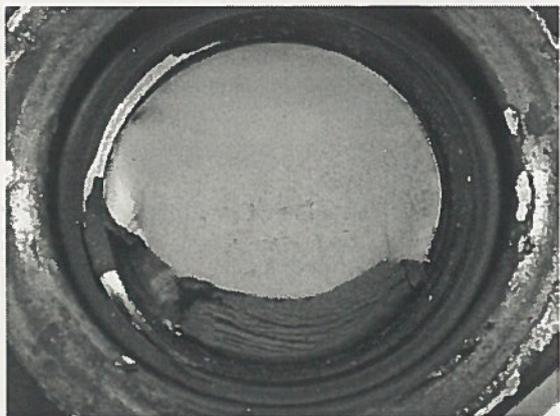


Bild 7: Bruchfläche im Gewinde einer Schraube in der optimierten Verbindung

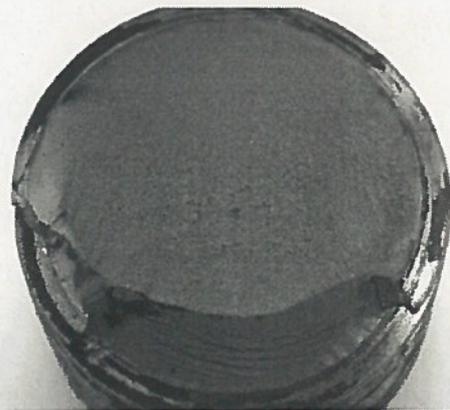


Bild 8: Vergrößerung zu Bild 7 ohne Mutter

Drei Schrauben der optimierten Verbindungen haben einen ersten Anriß im zweiten tragenden Gewindegang (Bild 7 und Bild 8). Er breitet sich in einem Winkel von ungefähr 45° ins Innere der Schraube und in Richtung des ersten tragenden Gewindegangs aus. Unter der zunehmenden Beanspruchung des tragenden Restquerschnitts bildet sich auf der gegenüberliegenden Seite ein zweiter Anriß im ersten tragenden Gewindegang. Der erste Anriß bleibt stehen, bis ihn der zweite erreicht. Dabei verringert sich die Vorspannkraft kontinuierlich. Es gibt keinen Gewaltbruch. Die drei Gewindebrüche der optimierten Verbindungen haben den gleichen Rißverlauf. Die Reihenfolge der Rißbildung ist an der Reibkorrosion in der Dauerbruchfläche, die vom zweiten tragenden Gewindegang ausgeht, zu erkennen. Mit zunehmender Aufweitung des zweiten Anrisses schließt sich der erste. Unter der dynamischen Beanspruchung entsteht Reibung, die zur Korrosion führt.

4 Ergebnis

Die Verwendung einer Zugmutter nach der Zeichnung in Anhang B, eine Dacromet-Beschichtung von Schraube und Mutter anstelle einer Tauchbad-Verzinkung und eine belastete freie Gewindelänge von zehn anstelle von drei Gewindegängen verbessern die Dauerfestigkeit der vorgespannten M36 Schraube-Mutter-Verbindung bei Zugbelastung um mindestens 36,8% (Bild 9).

Die Maßnahmen kommen nicht zur vollen Geltung, da die optimierten Verbindungen überwiegend im Kopf brechen. Eine Verbesserung des Schraubenkopfes erhöht die Dauerfestigkeit der Verbindung aber nur noch wenig, da einzelne Verbindungen auch schon im tragenden Gewinde der Schraube brechen.

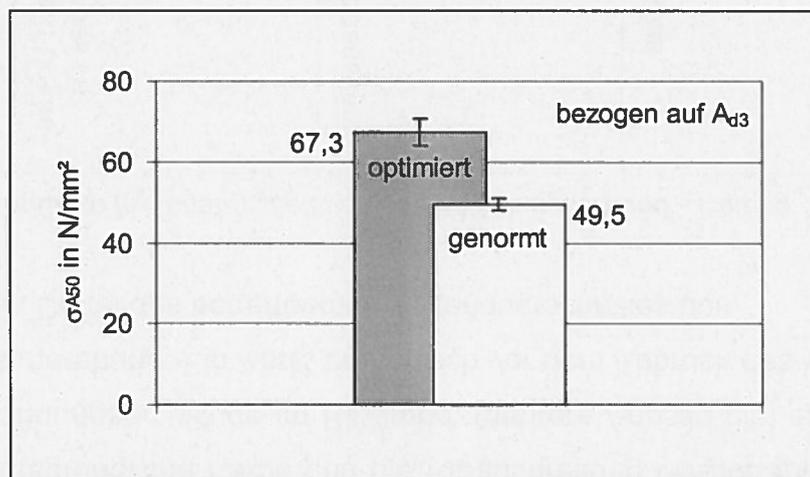
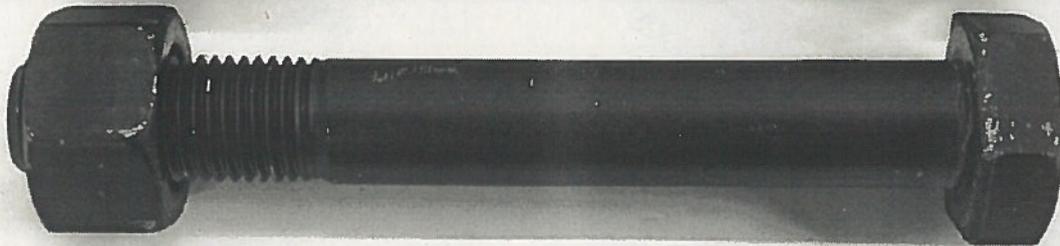
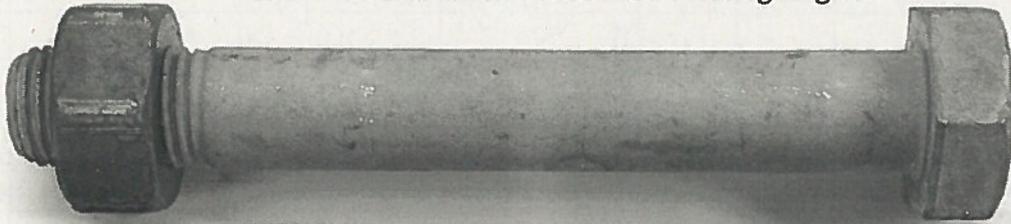


Bild 9: Vergleich der Dauerfestigkeit von genormter und optimierter M36 Schraube-Mutter-Verbindung

A Prüflinge

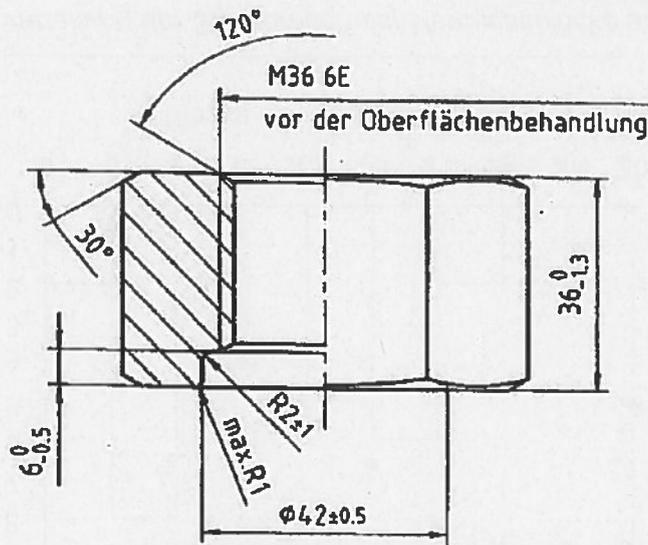
genormte verzinkte Verbindung
mit drei belasteten freien Gewindegängen



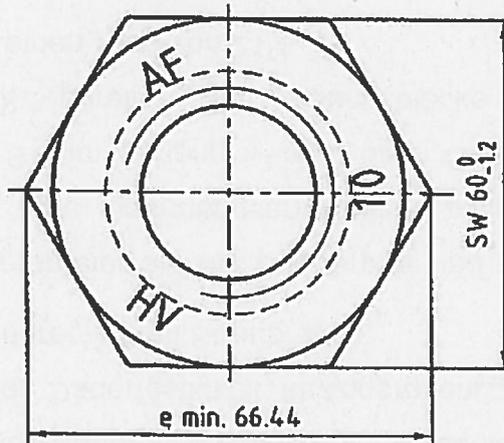
optimierte dacrometbeschichtete Verbindung
mit Zugmutter und zehn belasteten freien Gewindegängen

Bild 10: genormte Schraube-Mutter-Verbindung nach DIN 6914/10.9 TZN/+TOL. M36×260 und DIN 6915/10 TZN/+TOL. MOLY M36 und optimierte Schraube-Mutter-Verbindung nach DIN 6914/10.9 DT/DS schwarz M36×260 und nach Zeichnung im Anhang B

B Zugmutter



Die Mutter ist auf beiden Seiten unter 120° bis auf den Gewindedurchmesser ausgesenkt



Signierung vertieft: Herstellerzeichen und Güte

Weiter Maße und Toleranzen nach DIN 6915

 August Friedberg GmbH Achterbergstraße 38a D-45884 Gelsenkirchen	Kunde:		Oberflächenbehandlung: nach AF FLV-26 20 flZnncL- 480 h schwarz		
	Kunden Art.-Nr.:		Mechanische Eigenschaften nach DIN EN 20898-2 Festigkeitsklasse: 10		
Maßstab 1:1 Blatt 1 von 1		Kunden Z.-Nr.:		Oberflächenfehler nach DIN EN 493	
Index	And.-Nr	Datum	Name	Annahmeproofung nach DIN EN ISO 3269	
				Maßgenauigkeit entsprechend der Angabe in der Zeichnung bzw. nach DIN 267-2 und DIN ISO 4759-1 Produktklasse: B	
				EDV-Sach-Nr.: 4369	
				Benennung	
			Datum	Name	HV-Mutter M36 m=36 (Versuch: 286)
			Gez. 13.05.2002	Fe	
Vertraulichkeit dieser Unterlage ist zu wahren, siehe auch DIN 34.21			Gepr.		Zeichnungsnummer
					224121010
					Artikelnummer
					Teileart

C 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.

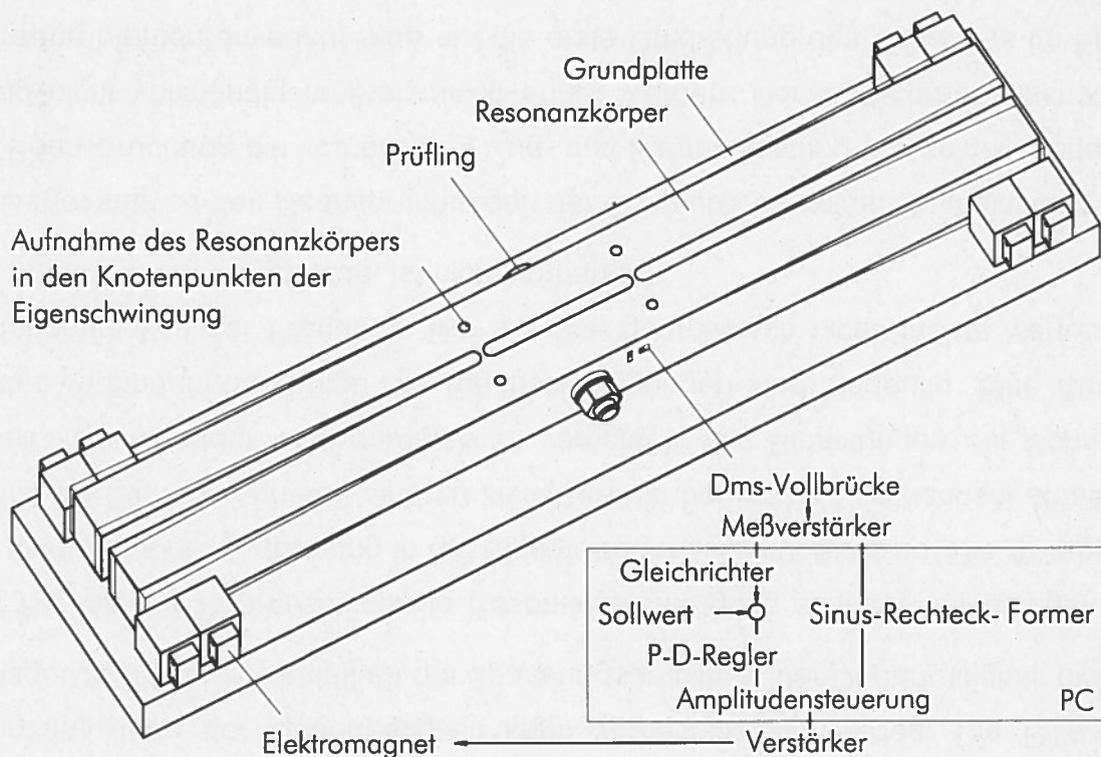


Bild 11: Prüfvorrichtung und Regelkreis

D 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. Sie beträgt 638 kN.

Das erforderliche Drehmoment wird, wie in Bild 12 dargestellt, mit Hilfe eines Untersetzungsgetriebes erzeugt. Die beim Anziehen zwischen Steckschlüssel und Abstützhebel des Werkzeuges entstehenden Querkräfte werden nicht in die Schraube eingeleitet.



Bild 12: Vorspannen mit Untersetzungsgetriebe

E Versuchsdaten

Während eines Versuches werden in aufeinanderfolgenden Schritten von 400 Lastspielen die größten elektrischen Spannungssignale der statischen und dynamischen Belastung in einer Datei gespeichert. Bild 13 zeigt die in eine Spannungsamplitude und einen Vorspannkraftverlust umgerechneten Daten für den Versuch 15 mit optimierter Schraube-Mutter-Verbindung.

Die Anrißlastspielzahl ist an der Änderung der statischen Belastung zu erkennen. Sie wird, wie in Bild 13 dargestellt, ausgewertet. Der Vorspannkraftverlust durch Setzen ist bei keinem Durchläufer größer als 2%.

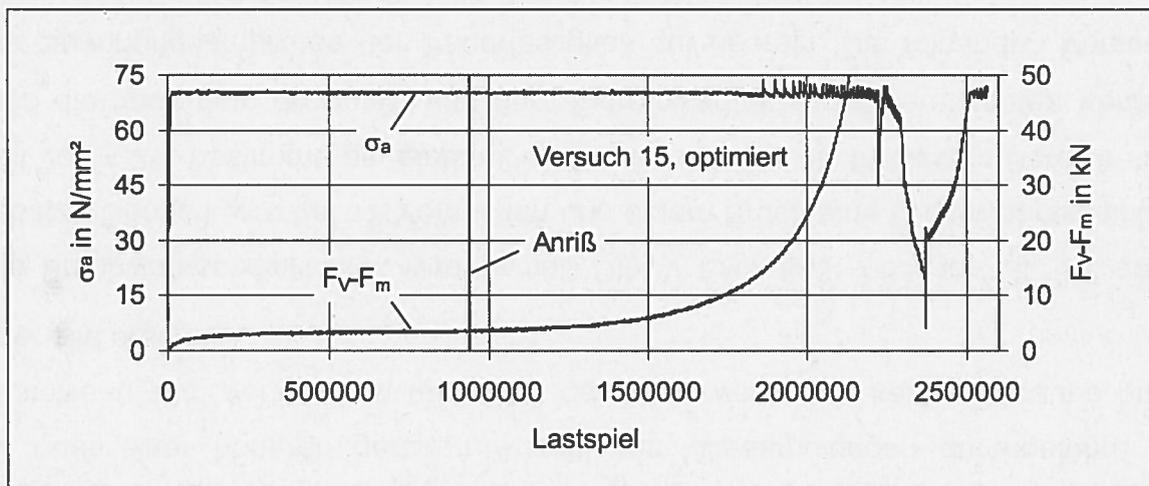


Bild 13: Versuchsdaten und Auswertung der Anrißlastspielzahl

Mit einer Rißausbreitung verschiebt sich die Phase des optimalen Übertragungsverhaltens von Schwingungsanregung zu -antwort. Oberhalb einer kritischen Rißgröße kann die Regelung den Sollwert der Spannungsamplitude 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 Spannungsamplitude (Bild 13). Ab einem kritischen Rißfortschritt verliert auch diese Regelung ihre Wirkung und die Spannungsamplitude fällt deutlich unter den Sollwert.

G Versuchsprotokoll zu den optimierten Verbindungen

Schraube	DIN 6914 / 10.9 DT/DS schwarz M36 x 260
Mutter	Zugmutter nach Zeichnung im Anhang B
A _{q3}	747,58 mm ²

Vorspannkraft	638 kN
Prüffrequenz	125 Hz
Versuchsdauer	max. 10000000 Lastspiele

Versuch Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
F _a in N	52440	x	x	x											x	x	x	x
	51096	-		x										-				x
	49751				x		x			x								
	48407							x										
	47062								-									
Lastspiele·10 ⁶ bis zum Anriß	0,90		8,00	0,95	1,75	0,55	3,00			2,20					0,94	0,67	1,70	
Anrißort	Kopf		2. tr. Gew.g.	Kopf	2. tr. Gew.g.	Kopf	2. tr. Gew.g.								Kopf	Kopf	Kopf	

x	-	z	f	z·f	z ² ·f
4	0	4	4	16	64
2	3	3	2	6	18
3	1	2	3	6	12
1	3	1	1	1	1
0	1	0	0		
			C	A	E
Σ	10	8	10	29	95

F _{a0}	47062 N
ΔF _a	1345 N
F _{A50}	50289 N $F_{a0} + \Delta F_a \cdot (A/C - 0,5)$
S	2438 N $1,62 \cdot \Delta F_a \cdot ((C \cdot E - A^2) / (C^2 + 0,029))$