

Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten  
Schrauben der Güte 10.9 unter axialem  
Zug, Ermittlung der Wöhlerlinien

**T 1488**

I. Teilprogramm: Feuerverzinkte  
Schrauben M20

T 1488

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

T 1488: Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten Schrauben der Güte 10.9  
unter axialem Zug, Ermittlung der Wöhlerlinien  
I. Teilprogramm: Feuerverzinkte Schrauben M20

## S C H L U S S B E R I C H T

Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten Schrauben der Güte 10.9 unter axialem Zug, Ermittlung der Wöhlerlinien

I. Teilprogramm: Feuerverzinkte Schrauben M20

UNIVERSITÄT HANNOVER  
Institut für Stahlbau  
Prof. Dr.-Ing. G. Lacher

3000 Hannover  
Callinstr. 32  
762-2437/3781

S C H L U S S B E R I C H T

zum

Forschungsvorhaben Nr. IV/1-5-361/82:

Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten Schrauben der  
Güte 10.9 unter axialem Zug, Ermittlung der Wöhlerlinien  
I. Teilprogramm: Feuerverzinkte Schrauben M20

Auftraggeber: Institut für Bautechnik,  
Reichpietschufer 72 - 76  
1 Berlin 30

Forschungsleiter: Prof. Dr.-Ing. G. Lacher

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. H.P. Kießlich  
Dipl.-Ing. J. Bernert

Hannover, den 26. Juli 1985

*Lacher Kießlich Bernert*

Inhaltsverzeichnis:

		<u>Seite</u>
	Bezeichnungen	4
1	Einleitung	5
2	Versuchsprogramm	5
2.1	Schraubenmaterial	5
2.2	Versuchsdurchführung	6
2.3	Versuchsergebnisse für konstante Mittelspannung	10
2.4	Auswertung der Versuchsergebnisse	16
2.4.1	Statistische Verfahren zur Auswertung von Versuchen im Bereich der Dauerfestigkeit	16
2.4.2	Ermittlung der Wöhlerlinien	18
2.4.3	Idealisierte Wöhlerlinien unter Einbeziehung des Prüfhorizontes III	24
3	Vergleich der Wöhlerlinien mit Ergebnissen der Literatur	27
4	Zusammenfassung	29
	Literatur	30

Bezeichnungen

$A_N$	Schraubenquerschnitt
$A_S$	Schraubenspannungsquerschnitt
$A_3$	Schraubenkernquerschnitt
$N$	Anzahl der Spannungsspiele bis zum Bruch
$N_A$	Grenzlastspielzahl $2 \cdot 10^6$
$N_D$	Grenzlastspielzahl $5 \cdot 10^6$
$n$	Anzahl der Versuche je Prüfhorizont
$P_B$	Bruchwahrscheinlichkeit
$P_U$	Überlebenswahrscheinlichkeit
$R$	Grenzspannungsverhältnis $\sigma_u / \sigma_o$
$m$	Anzahl der Dauerschwingbrüche je Prüfhorizont
$s$	Standardabweichung
$\sigma_A$	$2 \cdot 10^6$ mal ertragbare Spannungsamplitude
$\sigma_a$	Spannungsamplitude
$\sigma_D$	$5 \cdot 10^6$ mal ertragbare Spannungsamplitude
$\sigma_m$	Mittelspannung
$\sigma_o$	Oberer Spannungsgrenzwert
$\sigma_u$	Unterer Spannungsgrenzwert
$\sigma_V$	Vorspannung
$\Delta \sigma_n$	Differenz der Axialnormalspannung im quasistatischen Zugversuch
$\Delta \sigma_b$	Differenz der Biegenormalspannung im quasistatischen Zugversuch
$(\dots)_{10}$	Kennzeichnung für 10 % Bruchwahrscheinlichkeit
$(\dots)_{50}$	" " 50 % Bruchwahrscheinlichkeit
$(\dots)_{90}$	" " 90 % "

## 1 Einleitung

Die feuerverzinkte hochfeste Schraube wird heute gegenüber der unverzinkten oder "schwarzen" hochfesten Schraube vorgezogen, da die Feuerverzinkung im allgemeinen einen guten Korrosionsschutz gewährleistet. Es ist allerdings seit längerem bekannt, daß die spröde Eisen-Zink-Legierungsschicht dauerfestigkeitsmindernd wirkt.

Es war das Ziel dieses Forschungsprogramms, die Wöhlerkurve der feuerverzinkten hochfesten Schraube 10.9 mit dem Durchmesser M20 für den gesamten Bereich der Zeit- und Dauerfestigkeit zu ermitteln. Die Wöhlerversuche wurden mit einer Mittelspannung  $\sigma_m$  gefahren, die der vollen Vorspannung der hochfesten Schraube entspricht. Im Dauerfestigkeitsbereich betrug die Grenzlastspielzahl  $N_D = 5 \cdot 10^6$ .

Das Versuchsprogramm wurde in Anlehnung an die Empfehlungen der DIN ISO 3800, Teil 1, vergl. Lit. /5/, geplant und durchgeführt.

## 2. Versuchsprogramm

### 2.1 Schraubenmaterial

Alle geprüften feuerverzinkten hochfesten Schrauben der Güte 10.9 entstammen einer Charge und wurden von der Peiner Maschinen- und Schraubenwerke AG zur Verfügung gestellt. Tafel 1 enthält die vom Lieferwerk genannten chemischen Analysenwerte und Angaben über die wichtigsten mechanischen Eigenschaften der Schrauben. Die im Versuchsprogramm verwandten Muttern und Unterlegscheiben sind ebenfalls jeweils einer Charge entnommen und in Tafel 1 angeführt.

Alle hochfesten Schrauben, DIN 6914 /1/, entsprechen in ihren geprüften Eigenschaften den Güteanforderungen der DIN ISO 898, Teil 1 /2/. Der Anlieferungszustand der Schrauben war feuerverzinkt, jedoch nicht hochtemperaturverzinkt, und molykotegeschmiert. Alle Schraubengewinde wurden vor dem Vergüten gerollt, die Schrauben waren mithin schlußvergütet.



Tafel 1: Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften der im Versuchsprogramm verwandten feuerverzinkten hochfesten Schrauben 10.9, Muttern und Unterlegscheiben

Schraube	Mutter	Scheibe	Lieferwerk	Charge Nr.	Chemische Zusammensetzung						Mechanische Eigenschaften			
					C	Si	Mn	P	S	Cr	0,2%-Dehngrenze R <sub>p0,2</sub>	Brinellhärte	Prüfkraftversuch Prüfkr.	Festigkeit im Schrägzugversuch
					[%]						[N/mm <sup>2</sup> ]	[HB]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
M20x120			Peiner Maschinen- und Schraubenwerke AG	340356	0,45	0,24	0,73	0,022	0,026	1,16	1017-1049			1135-1139
	M20			58218	0,46	0,27	0,76	0,037	0,022			276	260	
		∅ 21		523620	0,49	0,28	0,76	0,016	0,012			323-352		

Die in Tafel 1 genannten Analysen- und Prüfwerte für Muttern, DIN 6915 /3/, genügen den Anforderungen der DIN ISO 898, Teil 2. Alle Muttern und Unterlegscheiben, DIN 6916 /4/, waren feuerverzinkt.

## 2.2 Zur Versuchsdurchführung

Für das Versuchsprogramm stand eine ölhydraulisch gesteuerte Universal-Prüfmaschine der MFL Prüf- und Meßsysteme GmbH vom Typ "HUS 60", maximale statische Prüflast 600 kN, Prüfmaschinenklasse I, zur Verfügung. Sie genügt den Anforderungen der DIN ISO 3800/1 /5/, wo im besonderen das Halten der Prüfkraft mit einer Genauigkeit von 2 % gefordert wird. Eine Prüffrequenz in den Grenzen  $5 \text{ Hz} \leq \nu \leq 10 \text{ Hz}$  und kraftgeregelt sinusförmige Zugschwellast wurde im Verlauf des gesamten Versuchsprogramms beibehalten /5/.

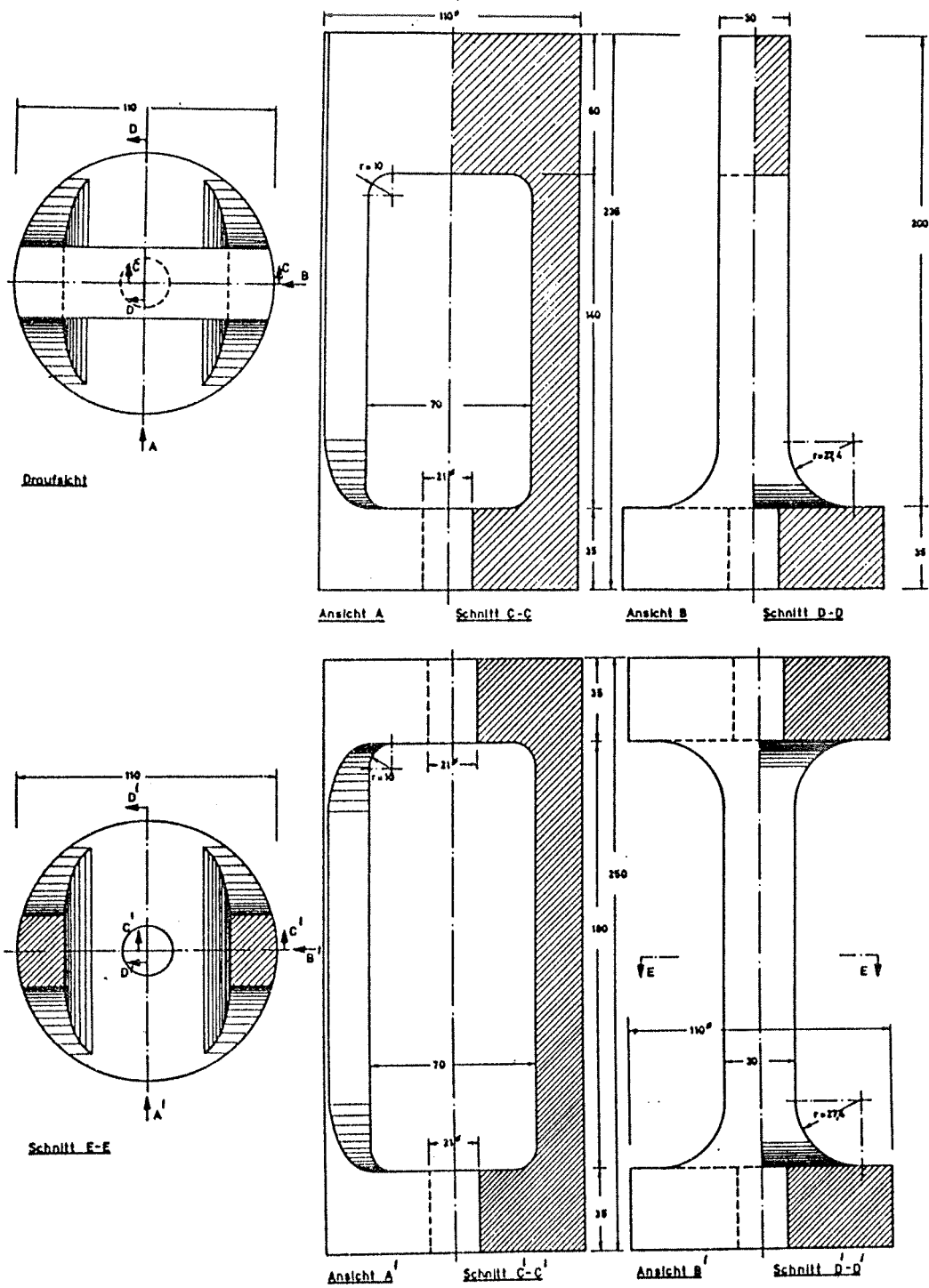


Bild 1 : Einspannkopf (Bild oben) und Mittelstück (Bild unten) für axiale Dauerschwingversuche an hochfesten Schrauben M20. Werkstoff (42Cr Mo 4 S) und Fertigung gemäß DIN ISO 3800/1.

Zur Einleitung der Axialkräfte in die hochfeste Schraube wurden 2 Einspannköpfe aus hochfestem Stahl 42 Cr Mo 4 S gefertigt, für Wöhlerversuche mit hohen Lastspielzahlen zusätzlich ein Mittelstück (42 Cr Mo 4 S), das in Verbindung mit den beiden Einspannköpfen das gleichzeitige Prüfen zweier hochfester Schrauben gestattete. Bild 1 zeigt die Konstruktionszeichnungen des Einspannkopfes und Mittelstückes. Die Werkstücke entsprechen in den Abmessungen, der Fertigungsgenauigkeit und Oberflächenbearbeitung im Bereich der Schraubeneinhängung sowie hinsichtlich der Wahl des Werkstoffes 42 Cr Mo 4 S den Anforderungen der DIN ISO 3800/1.

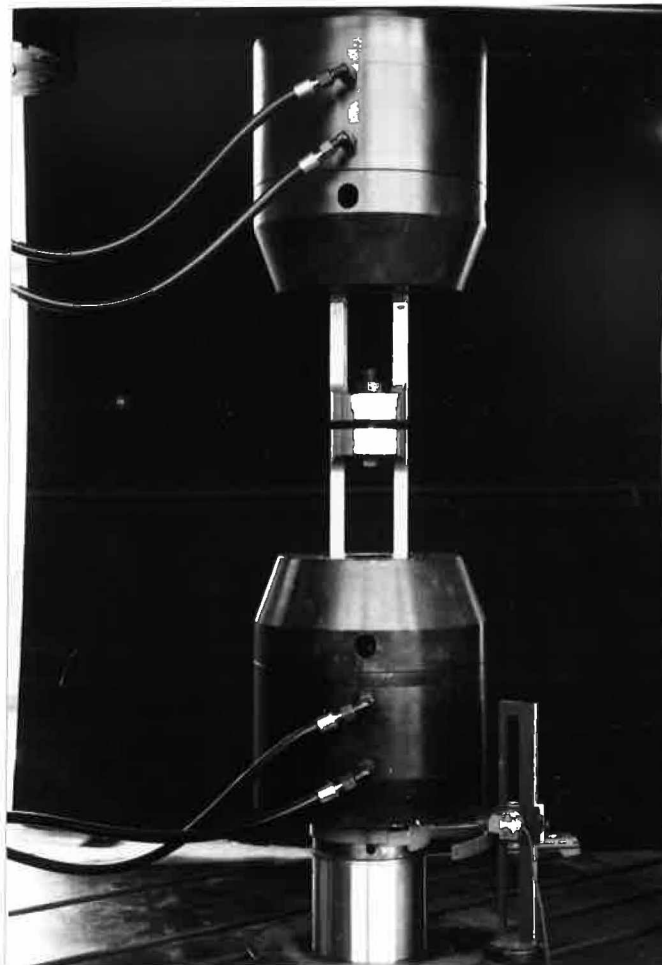


Bild 2: Zylinderköpfe der Prüfmaschine HUS 60 mit eingebauten Einspannköpfen. Versuchsanordnung mit einer Schraube, ohne Mittelstück (vergl. Bild 1) .

Beide Einspannköpfe wurden im Versuch fest in den Zylinderköpfen der Prüfmaschine verspannt (Bild 2). Da Vorrichtungen, die sich selbst ausrichten, nicht empfohlen werden /5/, wurde in allen Dauerschwingversuchen die Last in die hochfesten Schrauben über die starren Einspannköpfe eingeleitet.

Die gewünschte axiale Lasteintragung in die Schrauben wurde durch Ausrichten der Einspannköpfe und hohe Fertigungsgenauigkeit der planparallelen Auflageflächen im Bereich der Schrauben- und Mutterauflage realisiert. DIN ISO 3800/1 gestattet im Grenzfall eine Biegespannung von maximal 6 % der Axialspannung.

Nach dem Ausrichten der Einspannköpfe wurden mit Hilfe von 2 Meßschrauben die Biege- und Axialspannungen  $\Delta\sigma_b$  und  $\Delta\sigma_n$  unter statischen Lasten in der Größenordnung der späteren Dauerschwinglasten gemessen. Je Meßschraube waren dazu 2 Dehnungsmeßstreifen einander gegenüberliegend am Schraubenschaft appliziert. Es wurden mit jeder Meßschraube 2 Versuche gefahren, wobei die Schraube von Versuch zu Versuch um  $180^\circ$  in Achsrichtung gedreht wurde.

Die 4 Messungen ergaben einen maximalen Biegespannungsanteil  $\Delta\sigma_b$  von 3 % der Axialspannung. Die Versuche mit den um  $180^\circ$  in Achsrichtung gedrehten Schrauben ließen darüber hinaus den Schluß zu, daß unerwünschte Biegeanteile von maximal 1 % bereits durch Fertigungstoleranzen der hochfesten Schraube bedingt sind.

In allen Dauerschwingversuchen wurden die Muttern so aufgeschraubt, daß 4 freie belastete Gewindegänge der Schraube verblieben. Nach jedem Versuch wurden Schraube und Mutter ausgewechselt, die Unterlegscheiben unter Schraubenkopf und Mutter jedoch mehrfach wiederverwandt.

Die Schraubenmittelspannung  $\sigma_m$  in der Größenordnung der Schraubenvorspannung  $\sigma_v$  wurde im Versuch durch eine statische Zuglast von der Prüfmaschine erzeugt, der sich schwingend der Spannungsausgang  $\pm \sigma_a$  überlagerte. Die Schraube war damit frei von Torsionsspannungen.

### 2.3 Versuchsergebnisse für konstante Mittelspannung

Für alle Versuche, deren Ergebnisse zur Ermittlung der Wöhlerlinie (Kap. 2.4.2) benutzt werden, wurde die Mittelspannung  $\sigma_m = F_V/A_3$  konstant belassen. Dabei war  $F_V = 160$  kN die Vorspannkraft gemäß DASt-Ri 010 Nachfolgenorm DIN 18800 Teil 1 und Teil 7, /16/, so daß im Kernquerschnitt  $A_3 = 2,25$  cm<sup>2</sup> für M20 eine Vorspannung  $\sigma_m = 711$  N/mm<sup>2</sup> vorhanden war. Gemäß DIN ISO 3800/1 /5/ kann für Wöhlerversuche entweder konstantes Grenzspannungsverhältnis R oder konstante Mittelspannung  $\sigma_m$  gewählt werden. Die Entscheidung fiel zugunsten der konstanten Mittelspannung  $\sigma_m$ , da dann das Grenzspannungsverhältnis R nur zwischen  $0,75 \leq R \leq 0,92$  schwankt und eine möglicherweise vorhandene R-Abhängigkeit nur geringe Auswirkungen hat.

Es wurden insgesamt 59 Wöhlerversuche auf 5 Prüfhorizonten, davon 21 Versuche auf Prüfhorizont I und II im Zeitfestigkeitsbereich (Tafel 2) und 38 Versuche auf Prüfhorizonten III, IV und V im Übergangs- und Dauerfestigkeitsbereich (Tafel 3) gefahren. Gemäß der Empfehlung der DIN ISO 3800/1 /5/ wurde für die Versuche eine Grenzlastspielzahl von  $N_D = 5 \cdot 10^6$  festgelegt, wenngleich für Stahl auch Empfehlungen für höhere Grenzlastspielzahlen vorliegen, z.B.  $N = 10 \cdot 10^6$  nach DIN 50 100 /7/. 8 Versuche des Prüfhorizontes V wurden unter Verwendung des "Mittelstückes" (s. Bild 1 unten) gefahren, so daß dabei jeweils 2 Schrauben gleichzeitig geprüft wurden (Tafel 3, Fußn. 2)).

Die Ergebnisse der Wöhlerversuche für den Zeitfestigkeitsbereich sind der Tafel 2 zu entnehmen. Es wurden auf Prüfhorizont I 11 Versuche bei einer Spannungsamplitude  $\sigma_a = 102,2$  N/mm<sup>2</sup> gefahren und dabei im Mittel  $N = 6,9 \cdot 10^4$  Lastspiele bis zum Dauerschwingbruch erreicht. Auf Prüfhorizont II ergaben 10 Versuche bei einer Spannungsamplitude  $\sigma_a = 51,1$  N/mm<sup>2</sup> im Mittel  $N = 4,4 \cdot 10^5$  Lastspiele.

Die Schwingbrüche traten ohne Ausnahme im ersten tragenden, in die Mutter eingeschraubten Bolzengewindengang auf. Aufgrund der konstant gewählten Mittelspannung  $\sigma_m$  betragen für die Prüfhorizonte I und II die Grenzspannungsverhältnisse  $R = 0,75$  und  $0,87$ .

Tafel 2: Ergebnisse der Dauerschwingversuche im Zeitfestigkeitsbereich, Prüfhorizonte I und II bei konstanter Mittelspannung  $\sigma_m$

Prüfhorizont	Versuch Nr.	Prüflasten		Sp. im Schraubenkernquerschnitt			Grenzspannungsverhältnis $R = \sigma_u / \sigma_o$	Schwingspielzahl N
		Oberlast $F_o$	Unterlast $F_u$	Oberspannung $\sigma_o = F_o / A_3$	Unterspannung $\sigma_u = F_u / A_3$	Spannungsamplitude $\sigma_a = (\sigma_o - \sigma_u) / 2$		
		[kN]		[N/mm <sup>2</sup> ]				[10 <sup>3</sup> ]
I	1	183	137	813,3	608,9	102,2	0,75	75
	2	"	"	"	"	"	"	74
	3	"	"	"	"	"	"	75
	4	"	"	"	"	"	"	80
	5	"	"	"	"	"	"	64
	6	"	"	"	"	"	"	70
	7	"	"	"	"	"	"	68
	8	"	"	"	"	"	"	58
	9	"	"	"	"	"	"	62
	10	"	"	"	"	"	"	55
	11	"	"	"	"	"	"	86
II	12	171,5	148,5	762,2	660,0	51,1	0,87	515
	13	"	"	"	"	"	"	413
	14	"	"	"	"	"	"	478
	15	"	"	"	"	"	"	523
	16	"	"	"	"	"	"	452
	17	"	"	"	"	"	"	470
	18	"	"	"	"	"	"	432
	19	"	"	"	"	"	"	342
	20	"	"	"	"	"	"	447
	21	"	"	"	"	"	"	392

Im Übergangsbereich zwischen Zeit- und Dauerfestigkeit hatten die Versuchsergebnisse des Prüfhorizontes III bei einer Spannungsamplitude  $\sigma_a = 40,0 \text{ N/mm}^2$  eine größere Streubreite als im Zeitfestigkeitsbereich. Die Bruchlastspielzahlen von 7 Versuchen streuen im Bereich  $9,6 \cdot 10^5 \leq N \leq 2,2 \cdot 10^6$ , ein Durchläufer wurde nicht erreicht.

Tafel 3 weist die Lastspielzahlen für Prüfhorizont III im einzelnen aus. Das Grenzspannungsverhältnis betrug hier  $R = 0,89$ . Alle Dauerschwingbrüche traten im ersten tragenden, in die Mutter eingeschraubten Bolzengewindengang auf.

Im Dauerfestigkeitsbereich wurden für eine spätere Auswertung der Wöhlerversuche nach dem Abgrenzungsverfahren (vergl. Kap. 2.4) die Prüfhorizonte IV und V mit Spannungsamplituden  $\sigma_a = 35,6 \text{ N/mm}^2$  und  $31,1 \text{ N/mm}^2$  und entsprechenden Grenzspannungsverhältnissen  $R = 0,90$  und  $0,92$  gewählt (Tafel 3).

Tafel 3: Ergebnisse der Dauerschwingversuche im Übergangsbereich und im Dauerfestigkeitsbereich, Prüfhorizonte III, IV und V bei konstanter Mittelspannung  $\sigma_m$

Prüfhorizont	Versuch Nr.	Prüflasten		Sp. im Schraubenkernquerschnitt			Grenzspannungsverhältnis $R = \sigma_u / \sigma_o$	Schwingspielzahl N
		Oberlast $F_o$	Unterlast $F_u$	Oberspannung $\sigma_o = F_o / A_3$	Unterspannung $\sigma_u = F_u / A_3$	Spannungsamplitude $\sigma_a = (\sigma_o - \sigma_u) / 2$		
		[kN]		[N/mm <sup>2</sup> ]				
III	22	169	151	751,1	671,1	40,0	0,89	960
	23	"	"	"	"	"	"	1076
	24	"	"	"	"	"	"	2190
	25	"	"	"	"	"	"	968
	26	"	"	"	"	"	"	1572
	27	"	"	"	"	"	"	1635
	28	"	"	"	"	"	"	1250
	IV	29	168	152	746,7	675,6	35,6	0,90
30		"	"	"	"	"	"	1806
31		"	"	"	"	"	"	2909
32		"	"	"	"	"	"	1374
33		"	"	"	"	"	"	2424
34		"	"	"	"	"	"	1914
35		"	"	"	"	"	"	5000
36		"	"	"	"	"	"	4573
37		"	"	"	"	"	"	3461 <sup>1)</sup>
38		"	"	"	"	"	"	5000
39		"	"	"	"	"	"	3138
40		"	"	"	"	"	"	1819
41		"	"	"	"	"	"	1860
42		"	"	"	"	"	"	5000
V		43	167	153	742,2	680,0	31,1	0,92
	44	"	"	"	"	"	"	5000
	45	"	"	"	"	"	"	5000
	46	"	"	"	"	"	"	5000
	47	"	"	"	"	"	"	5000
	48	"	"	"	"	"	"	5000
	49	"	"	"	"	"	"	5000
	50	"	"	"	"	"	"	3837
	51	"	"	"	"	"	"	4321 <sup>1)</sup>
	52	"	"	"	"	"	"	5000
	53	"	"	"	"	"	"	1309
	54	"	"	"	"	"	"	5000
	55	"	"	"	"	"	"	5000
	56	"	"	"	"	"	"	15 <sup>3)</sup>
	57	"	"	"	"	"	"	5000
	58	"	"	"	"	"	"	5000
	59	"	"	"	"	"	"	5000

1) und 3) nicht gewertete Versuche

2) Versuche mit Mittelstück

Die mit der Fußnote 1) in Tafel 3 bezeichneten Versuche Nr. 37 und 51 ergaben Dauerschwingbrüche im Schaft der hochfesten Schrauben. Beide Schraubenschäfte zeigten nach dem Versuch Reibkerben, von denen der Bruch ausging und durch Reibung an der Lochinnenwandung der Einspannköpfe entstanden sein müssen. Diese im Schaft gebrochenen Schrauben wiesen keinen zusätzlichen Dauerriß im Gewindebereich auf, der, da einseitig auftretend, eine Biegeverformung, und damit eine Erklärung für den Kontakt des Schaftes an der Lochinnenwandung abgegeben hätte. Wegen der ungeklärten Ursache des Dauerschwingbruches im Schaft werden beide Versuche in der Versuchsauswertung nicht berücksichtigt.

Der ungewöhnliche Fall eines Dauerschwingbruches durch Abstreifen der Bolzengewindegänge ist in Tafel 3 für Versuch Nr. 56 vermerkt. Eine Erklärung für einen solchen Bruch nach  $N = 15\ 000$  Lastspielen könnte eine zu große Gewindetoleranz sein, jedoch wurde an den Gewinden der Mutter und Schraube vor Versuchsbeginn nichts derartiges bemerkt. Bild 3 zeigt das deutlich erkennbare abgescherte Bolzengewinde. Der Versuch Nr. 56 mit im Vergleich zu den übrigen Versuchen des Prüfungshorizontes V auffällig niedriger Lastspielzahl wurde wegen der ungewöhnlichen Form des Dauerschwingbruches in der Versuchsauswertung nicht berücksichtigt (Fußnote 3) in Tafel 3).





Bild 3: Abgeschertes Bolzengewinde bei  $N = 15000$   
Versuch Nr. 56

Die in Tafel 3 nicht als Sonderbrüche ausgewiesenen Ergebnisse von 13 Versuchen des Prüfhorizontes IV und 15 Versuchen des Prüfhorizontes V ergaben Schwingbrüche im ersten tragenden, in die Mutter eingeschraubten Gewindegang oder Durchläufer mit der Grenzlastspielzahl  $N_D = 5 \cdot 10^6$ . Im einzelnen waren dies 10 Brüche und 3 Durchläufer für Prüfhorizont IV sowie 3 Brüche und 12 Durchläufer auf Prüfhorizont V.

Die Darstellung der insgesamt 56 gewerteten Ergebnisse im doppellogarithmischen Achsenkreuz zeigt Bild 4.

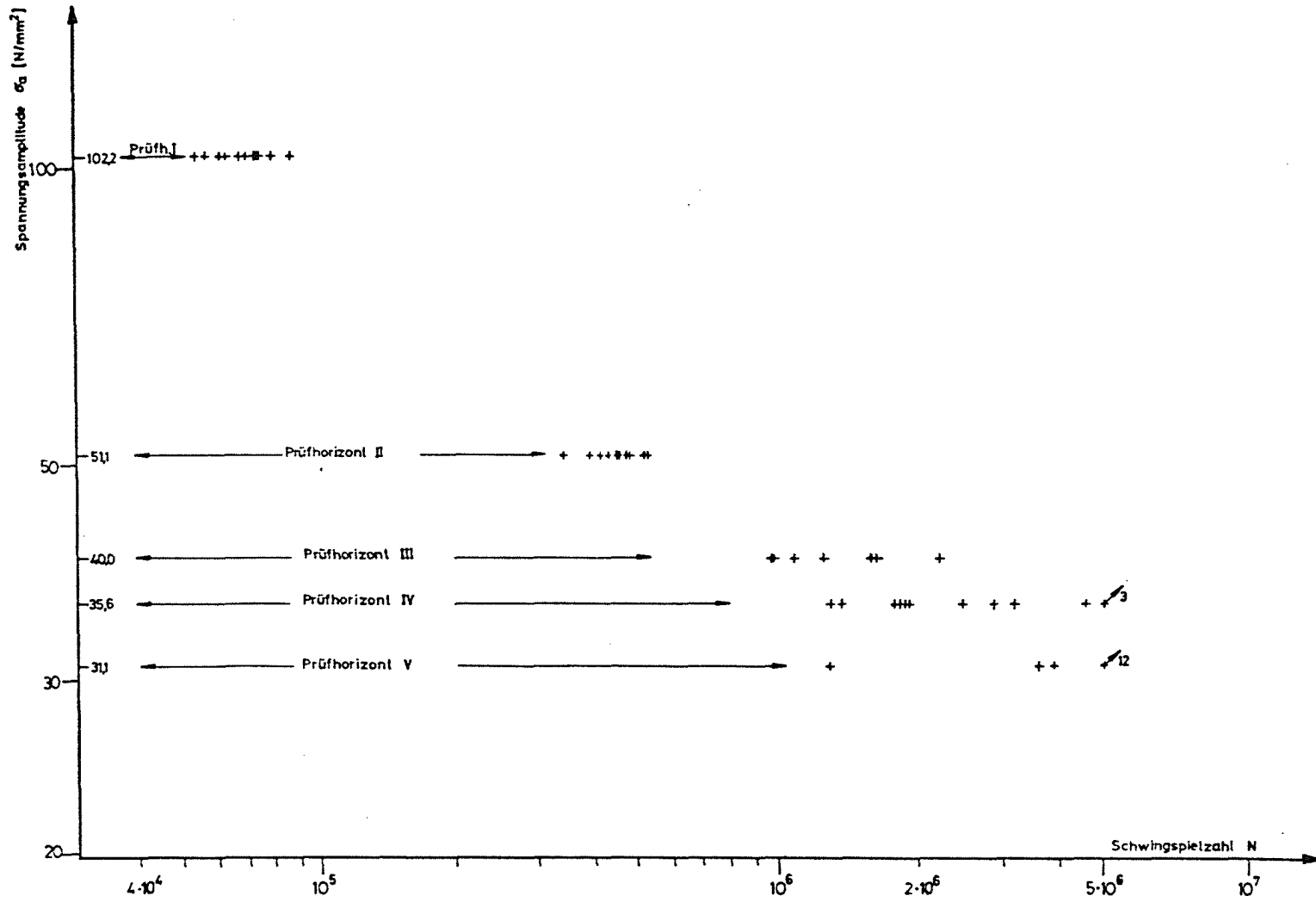


Bild 4: Ergebnisse der Wöhlerversuche mit konstanter Mittelspannung  $\sigma_m$  (siehe Tafel 2 und 3). Darstellung im doppelloarithmischen Achsenkreuz

## 2.4 Auswertung der Versuchsergebnisse

### 2.4.1 Statistische Verfahren zur Auswertung von Versuchen im Bereich der Dauerfestigkeit

Die Literatur bietet eine größere Anzahl von Verfahren zur Auswertung im Dauerfestigkeitsbereich an. Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich bereits hinsichtlich der Versuchsstrategie.

Das Treppenstufenverfahren (siehe z.B. VDI 2227 E /8/) ist besonders geeignet zur Ermittlung des Medianwertes der Dauerfestigkeit. Versuchstechnisch besitzt dieses Verfahren den Nachteil, daß ein gleichzeitiger Einsatz mehrerer Prüfmaschinen kaum möglich ist, sieht man von modifizierten Verfahren z.B. nach Brownlee et al /9/ ab. Als bekannt vorauszusetzen ist bei diesem Verfahren die ungefähre Größe der Standardabweichung und damit die Größe des Streufeldes im Bereich der Dauerfestigkeit, so daß ein geeigneter Treppenstufenabstand gewählt werden kann.

Das weniger bekannte Probit-Verfahren /8/ erfordert die Prüfung einer ausreichenden Anzahl von Proben auf einzelnen gezielt festgelegten Lastniveaus, in der Regel mindestens 3 Niveaus. Der besondere Vorteil dieses Konzeptes liegt darin, daß mehrere Versuche gleichzeitig gefahren werden können. Vor Versuchsbeginn sollten Abschätzungen über den Medianwert der Dauerfestigkeit und die die Größe der Standardabweichung vorliegen. Als Nachteil gegenüber dem Treppenstufenverfahren ist der hohe Versuchsaufwand zu nennen. In VDI 2227 E /8/ werden mindestens 40 Proben auf 4 bis 5 Niveaus empfohlen. In einer vergleichenden Studie verschiedener Verfahren von Kosteas/Graf /10/ werden mindestens 50 Proben für eine zuverlässige Auswertung im Dauerfestigkeitsbereich erforderlich gehalten.

Das von Maennig /11/ vorgestellte Abgrenzungsverfahren sieht eine Prüfung auf nur 2 festen Lastniveaus vor. Der Versuchsaufwand ist damit entsprechend geringer als beim Probit-Verfahren. Maennig empfiehlt 20 bis 23 Versuche, um das Dauerfestigkeitsgebiet befriedigend abschätzen zu können. Die Prüfhorizonte sind jeweils ober-

und unterhalb des Medianwertes  $\sigma_{D50}$  zu wählen, jedoch innerhalb des Streubereiches der Dauerfestigkeit. Das bedeutet für die praktische Versuchsdurchführung, daß auf jedem Horizont Brüche und Durchläufer nebeneinander auftreten müssen. Dies setzt eine genügend genaue Kenntnis des Medianwertes  $\sigma_{D50}$  sowie auch der Größe des Streubereiches voraus. Maennig unterstellt für Stähle, daß der zu erwartende Streubereich nicht kleiner als  $0,1 \cdot \sigma_{D50}$  ausfällt und gibt Formeln zur Festlegung des zweiten Prüfhorizontes anhand der Versuchsergebnisse des ersten Horizonts an.

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wird in der Regel von einer Gauß'schen Normalverteilung der Zufallsvariablen ausgegangen. Eine solche Verteilung unterstellt auch die Auswertung nach dem Treppenstufenverfahren. Damit wird die Berechnung von Spannungen am Rand des Dauerfestigkeitsstreubereiches  $\sigma_{D10}$ ,  $\sigma_{D90}$  möglich, weñgleich die Versuche sich um den Medianwert  $\sigma_{D50}$  konzentrieren. Sah die Versuchsplanung die Wahl fester Prüfhorizonte vor (Probit-Verfahren, Abgrenzungsverfahren), so kann nach Wahl einer geeigneten Schätzfunktion für die Bruch- oder Überlebenswahrscheinlichkeit  $P_B$  oder  $P_U$  die Auftragung der Versuchsergebnisse jedes Prüfhorizontes im Gauß'schen Summenhäufigkeitsnetz erfolgen. Eine ideale Gauß'sche Normalverteilung der Versuchsergebnisse ergäbe im Häufigkeitsnetz Punkte auf einer Geraden. Damit ist eine Kontrolle über die Art der Zufallsverteilung möglich.

Eine gute Näherungsfunktion für eine Normalverteilung ist die  $\sin^2x$ -Verteilungsfunktion für  $0 \leq x \leq \pi$ . Die Auswertung von Dauerfestigkeitsversuchen eines Prüfhorizontes kann daraufhin mit Hilfe einer arcsin-Transformation erfolgen. Erste Untersuchungen dazu liegen seit längerem von Dorff /12/ vor, weitere z.B. von Maennig /13/.

Eine Anzahl von  $m$  Brüchen innerhalb von  $n$  Versuchen eines Prüfhorizontes ergibt in der beschreibenden Statistik  $P_B = m/n$  als Schätzfunktion für die Bruchwahrscheinlichkeit. Die Ver-

wendung dieser einfachen Schätzfunktion wird jedoch gerade bei kleinem Probenumfang als problematisch erachtet. Maennig schlägt die auf der Grundlage von Varianzminimierungen modifizierte Schätzfunktion  $P_B = (3m-1)/(3n+1)$  nach Rossow /14/ vor. Es sei angemerkt, daß bei Anwendung der Rossowschen Schätzfunktion  $P_B + P_U = 1$  ist.

Für die Auswertung der Versuche im Dauerfestigkeitsbereich im Rahmen dieses Forschungsauftrages wurde das Abgrenzungsverfahren nach Maennig /11/ im Zusammenhang mit der Schätzfunktion für  $P_B$  nach Rossow /14/ gewählt, wobei die Gauß'sche Normalverteilung entsprechend der zur Zeit üblichen Handhabung für die Logarithmen der Zufallsvariablen angenommen wurde. Anhand der Ergebnisse der Literatur (vergl. Kap. 3) konnte der Medianwert der Dauerfestigkeit sowie die Streubreite des Dauerfestigkeitsbereiches vor Beginn der Versuche ausreichend genau abgeschätzt werden.

Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichtes lag der 2. Teil der DIN ISO 3800 (DIN ISO 3800 Teil 1 ist Lit. /5/) noch nicht vor, der Empfehlungen für die Anwendung statistischer Methoden geben wird. Es wird an dieser Stelle bereits darauf verwiesen.

#### 2.4.2 Ermittlung der Wöhlerlinien

Das Ziel der Versuchsauswertung der insgesamt 56 gewerteten Wöhlerversuche war die Ermittlung der Wöhlerlinien für Bruchwahrscheinlichkeiten  $P_B = 10\%$ ,  $50\%$  und  $90\%$ .

Im Zeitfestigkeitsbereich wurden je 11 und 10 Versuche (siehe Tafel 2) auf Schwingkrafthorizont I und II mit  $\sigma_a = 102,2 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_a = 51,1 \text{ N/mm}^2$  gefahren. Die Auftragung der Ergebnisse im Gauß'schen Summenhäufigkeitsnetz ist Bild 5 zu entnehmen. Schätzfunktion für die Bruchwahrscheinlichkeit ist  $P_B = (3m-1)/(3n+1)$ . Mit n wird die Anzahl der Versuche je Prüfhori-

zont bezeichnet, m ist die Anzahl der bis zu einer bestimmten Lastspielzahl gebrochenen Schrauben im betrachteten Prüfhorizont.

Bild 5 zeigt, daß die Ergebnisse annähernd auf einer Geraden liegen. Die Lage der Regressionsgeraden wurde jeweils so bestimmt, daß eine Minimierung der Fehler für die Bruchwahrscheinlichkeit  $P_B$  der Einzelversuche gewährleistet ist.

In Tafel 4 sind die anhand der Regressionsgeraden der Prüfhorizonte I und II des Bildes 5 ermittelten Lastspielzahlen für  $P_B = 10\%$ ,  $50\%$  und  $90\%$  zur Darstellung der Wöhlerlinien im Zeitfestigkeitsbereich zusammengefaßt, und die zugehörigen Neigungsexponenten  $k = (\Delta \log N) / (\Delta \log \sigma_a)$  angegeben. Für  $P_B = 50\%$  ergeben sich Lastspielzahlen  $N_I = 6,9 \cdot 10^4$  und  $N_{II} = 4,4 \cdot 10^5$  für die Prüfhorizonte I und II und der Neigungsexponent  $k = 2,68$ . Die Standardabweichung  $s$  für die Lastspielzahlen beträgt  $0,060$  und  $0,056$ , errechnet nach DIN 55302 /15/ mit der Formel  $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$  wobei für  $x_i = \log N_i$  gesetzt ist.

Tafel 4: Rechenwerte zur Darstellung der Wöhlerlinien für Bruchwahrscheinlichkeiten  $P_B = 10\%$ ,  $50\%$  und  $90\%$  im Zeitfestigkeitsbereich und Neigungsexponenten  $k$

BRUCHWAHR - SCHEINLICHKEIT $P_B$	LASTSPIELZAHL N FÜR		NEIGUNGS - EXPONENT K
	PRÜFHORIZONT I	PRÜFHORIZONT II	
10%	$5,7 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^5$	2,68
50%	$6,9 \cdot 10^4$	$4,4 \cdot 10^5$	2,68
90%	$8,3 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^5$	2,68

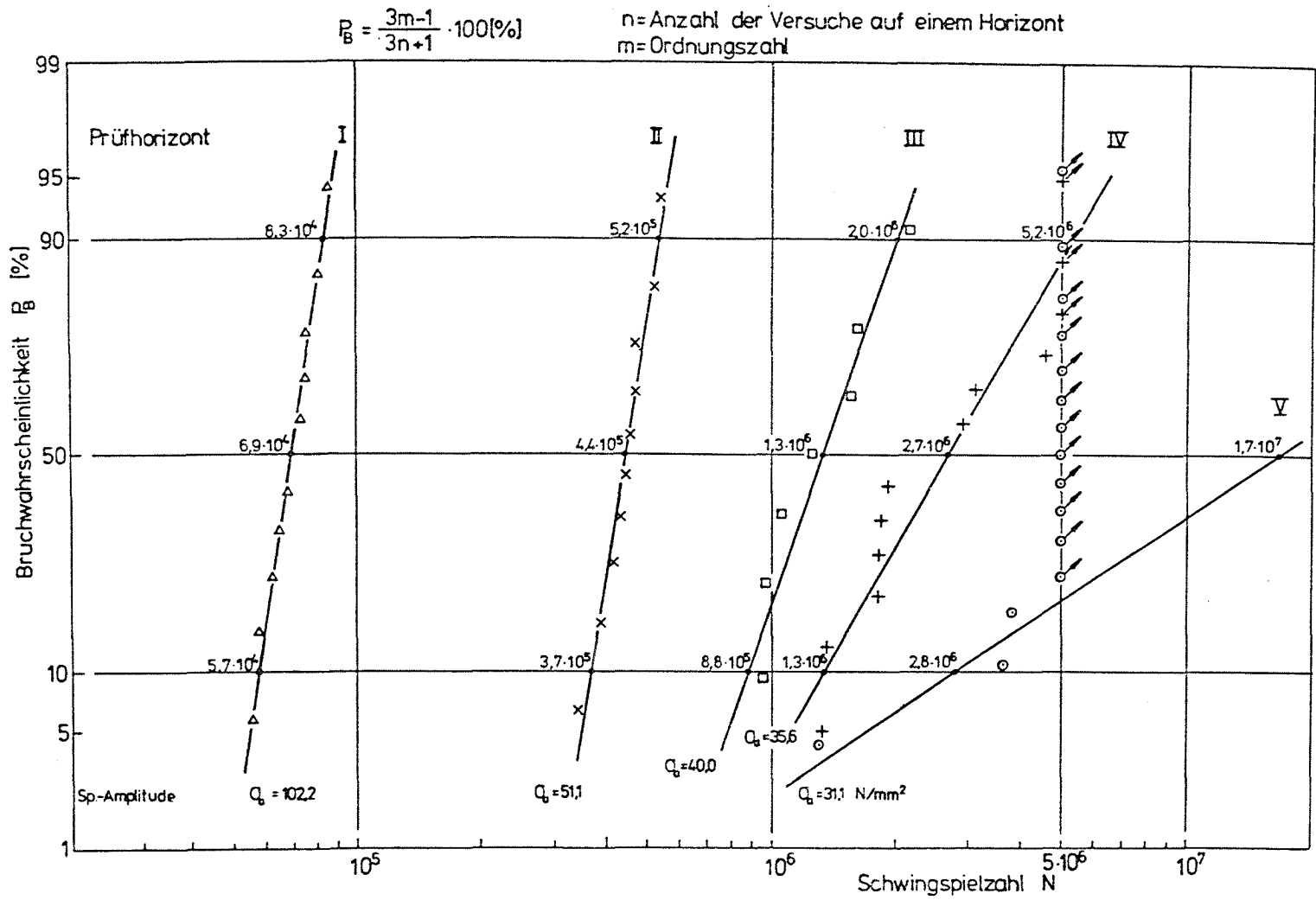


Bild 5: Auswertung der Versuchsergebnisse im Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmischer Teilung der Lastspielzahl

Die Versuchsergebnisse des Prüfhorizonts III mit  $\sigma_a = 40,0 \text{ N/mm}^2$  (siehe Tafel 3) zeigen in der Auftragung im Summenhäufigkeitsnetz Bild 5 größere Abweichungen von der Regressionsgeraden. Die in Bild 5 für  $P_B = 10 \%$ ,  $50 \%$  und  $90 \%$  angegebenen Lastspielzahlen sind daher mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Als Medianwert ergibt sich eine Lastspielzahl  $N = 1,3 \cdot 10^6$  bei einer Standardabweichung von  $s = 0,134$ .

Die Prüfhorizonte IV und V mit Spannungsamplituden  $\sigma_a = 35,6 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_a = 31,1 \text{ N/mm}^2$  innerhalb des Streubereiches der Dauerfestigkeit zeigen bei den  $n = 13$  Versuchen des Prüfhorizonts oberhalb des Medianwertes  $\sigma_{D50} = 34 \text{ N/mm}^2$   $m = 10$  Dauerbrüche und bei den  $n = 15$  Versuchen des Prüfhorizonts unterhalb des Medianwertes  $m = 3$  Dauerbrüche. Mit Hilfe der Rossow'schen Schätzfunktion errechnen sich damit Bruchwahrscheinlichkeiten  $P_{BIV} = (3 \cdot 10 - 1) / (3 \cdot 13 + 1) = 72,5 \%$  und  $P_{BV} = (3 \cdot 3 - 1) / (3 \cdot 15 + 1) = 17,4 \%$ , die nun ihrerseits die Ermittlung des Mittelwertes der  $5 \cdot 10^6$  mal ertragbaren Spannungsamplitude nach dem Abgrenzungsverfahren gestatten (Bild 6).

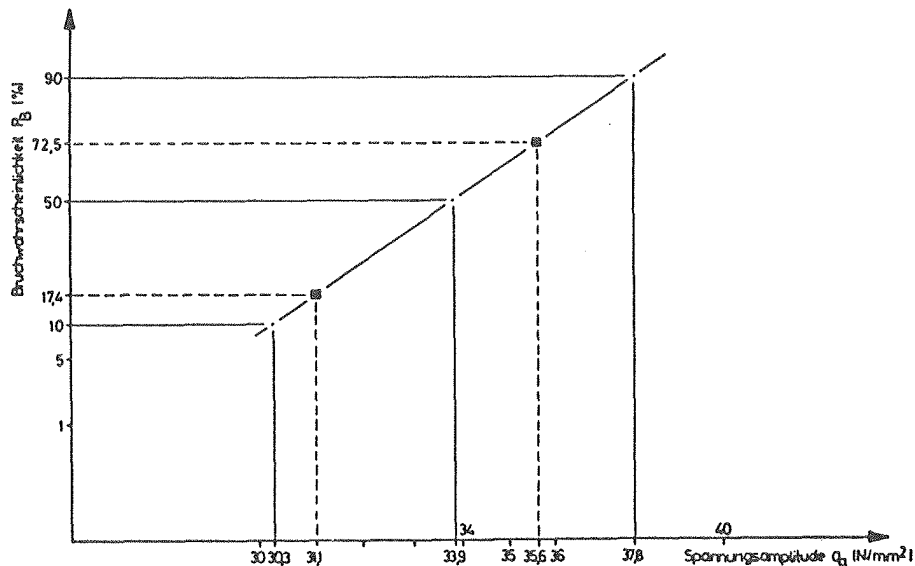


Bild 6 : Prüfhorizonte IV und V, Versuche Nr. 29 bis 59 (siehe Tafel 3)  
Auswertung der Versuchsergebnisse im Gauß'schen Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmischer Teilung der Spannungsamplitude nach dem Abgrenzungsverfahren für die Grenzlastspielzahl  $N_D = 5 \cdot 10^6$



Die Darstellung der Wöhlerlinien für die Bruchwahrscheinlichkeiten  $P_B = 10 \%$ ,  $50 \%$  und  $90 \%$  ist Bild 7 zu entnehmen. Als Konstruktionspunkte wurden die Ergebnisse der Prüfhorizonte I und II für  $P_B = 10 \%$ ,  $50 \%$  und  $90 \%$  (siehe Tafel 4) sowie die über die Prüfhorizonte IV und V berechneten Grenzwerte der Spannungsamplituden  $\sigma_a$  für  $N_D = 5 \cdot 10^6$  Lastspiele verwandt. Die Wöhlerfestigkeiten betragen hierfür nach Bild 6  $\sigma_{D10} = 30,3 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{D50} = 33,9 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_{D90} = 37,8 \text{ N/mm}^2$ . Als zeichnerisch ermittelter Medianwert für eine Grenzlastspielzahl  $N_A = 2 \cdot 10^6$  ergibt sich  $\sigma_{A50} = 35,2 \text{ N/mm}^2$  und damit eine um  $3 \%$  gegenüber dem Medianwert für  $N_D = 5 \cdot 10^6$  erhöhte Spannungsamplitude.

Die Ausrundung im Übergangsbereich erscheint im Hinblick auf die Versuchsergebnisse des Prüfhorizontes III notwendig. Sie sind in Bild 7 eingetragen, aber bei der Festlegung der Wöhlerlinie zunächst nur qualitativ berücksichtigt. Bild 7 zeigt auch, daß es bei feuerverzinkten Schrauben nicht zutreffend ist, wenn von zwei Prüfhorizonten des Zeitfestigkeitsbereiches, in unserem Falle I und II, durch lineare Extrapolation auf die  $2 \cdot 10^6$  mal ertragbare Spannungsamplitude als Dauerfestigkeitswert geschlossen wird. Zwar liegt der so ermittelte Wert  $\sigma_A$  mit  $\tilde{\sigma}_{A50} = 28,8 \text{ N/mm}^2$  gegenüber  $\sigma_{D50} = 33,9 \text{ N/mm}^2$  auf der sicheren Seite, die Abweichung beträgt aber  $18 \%$ . Unter Nichtbeachtung der Versuchsergebnisse des Prüfhorizontes III folgt der Abknickpunkt der Wöhlerlinie vielmehr bei rund  $1,2 \cdot 10^6$  Lastspielen.

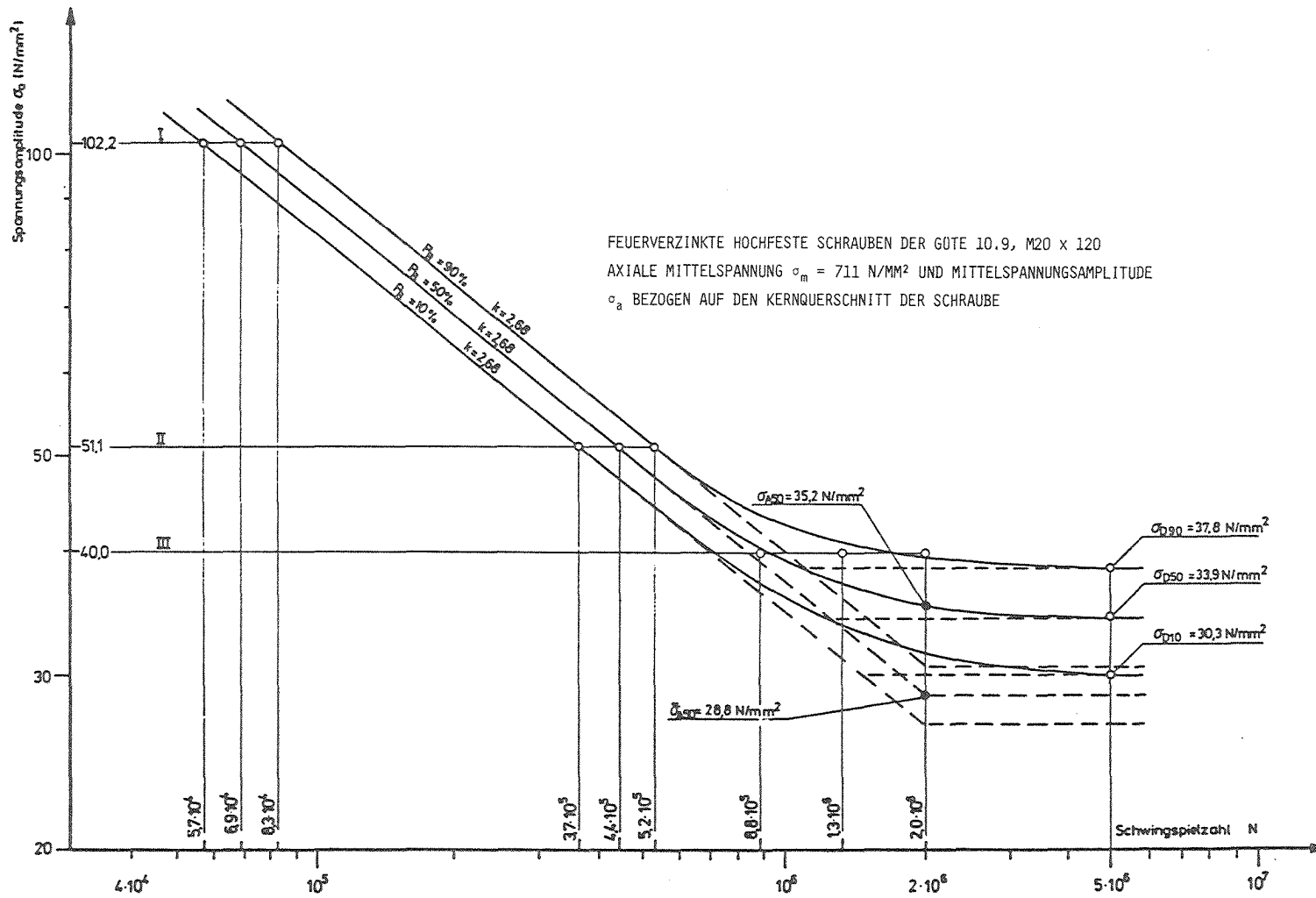


Bild 7 : Wöhlerlinien für Bruchwahrscheinlichkeiten  $P_B = 10 \%$ ,  $50 \%$  und  $90 \%$  mit qualitativer Berücksichtigung des Prüfhorizontes III

### 2.4.3 Idealisierte Wöhlerlinien unter Einbeziehung des Prüfhorizontes III

Der Prüfhorizont III war ursprünglich als ein Horizont im Dauerfestigkeitsbereich gedacht, für den bereits Durchläufer erwartet wurden. Tatsächlich traten aber bei 7 Proben nur Brüche auf, so daß die tieferliegenden Prüfhorizonte IV und V für das Abgrenzungsverfahren nach Maennig gewählt werden mußten. Wegen der geringen Probenzahl wurden die Versuchsergebnisse des Prüfhorizontes III bei der Festlegung der Wöhlerlinien nach Abschnitt 2.4.2 nur qualitativ berücksichtigt. Bezieht man jedoch den Prüfhorizont III voll in die Überlegungen ein und legt man die ausgleichende Gerade durch die Werte mit 10 %, 50 % und 90 % Bruchwahrscheinlichkeit der nunmehr 3 Prüfhorizonte des Zeitfestigkeitsbereiches nach dem Gauß'schen Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate fest, so zeigt Bild 8, daß der Neigungsexponent  $k$  ansteigt und der untere Abknickpunkt bei Beachtung der Versuchsergebnisse aus Prüfhorizont IV und V sich bei etwa  $1,8 \cdot 10^6$  Lastspielen einstellt. Der zunächst graphisch ermittelte Neigungsexponent  $k$  wurde algebraisch über die Bestimmungsgleichung der Ausgleichsgerade im doppellogarithmischen Koordinatensystem nach Basquin /16/

$$\log N = a \cdot \log \sigma + b$$

überprüft, mit

$$a = \frac{m \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{m \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i - a \cdot \sum y_i}{m}$$

und  $x_i = \log N_i$

$y_i = \log \sigma_i$

$m = 3$  Anzahl der Spannungsniveaus.

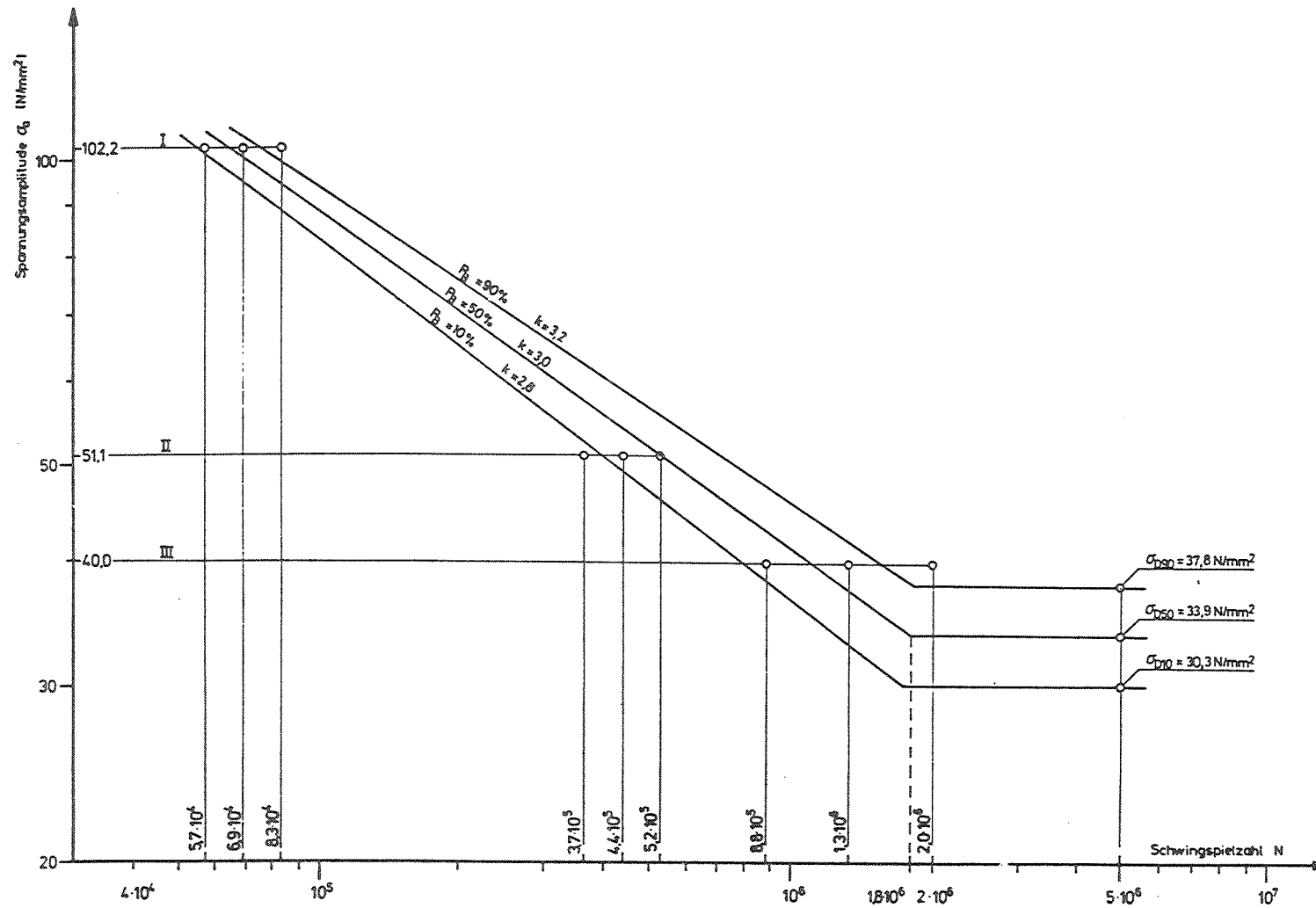


Bild 8 : Idealisierte Wöhlerlinien für Bruchwahrscheinlichkeiten  $P_B = 10\%$ ,  $50\%$  und  $90\%$ , erhalten als ausgleichende Grade zwischen den Prüfhorizonten II, II, III.

Die Überprüfung des oberen Abknickpunktes (Bild 9) ergibt ebenfalls plausible Werte. Gehen wir von dem garantierten Mindestwert der 0,2-Dehngrenze für 10.9 Schrauben von  $R_{p0,2} = 900 \text{ N/mm}^2$  aus, so verbleibt bei der Mittelspannung  $\sigma_m = 711 \text{ N/mm}^2$  eine maximale Spannungsamplitude von  $189 \text{ N/mm}^2$ , so daß der obere Abknickpunkt sich bei etwa 9.600 Lastspielen ergeben würde (in Bild 9 gestrichelt).

Berücksichtigt man jedoch die tatsächliche Höhe der 0,2-Dehngrenze, die nach Tafel 1 im Mittel bei  $R_{p0,2} = 1033 \text{ N/mm}^2$  liegt, so verbleibt eine maximale Spannungsamplitude von  $\sigma_a = 322 \text{ N/mm}^2$  und der theoretische obere Abknickpunkt stellt sich bei 1940 Lastspielen ein.

Somit erscheint die idealisierte Wöhlerlinie vernünftig.

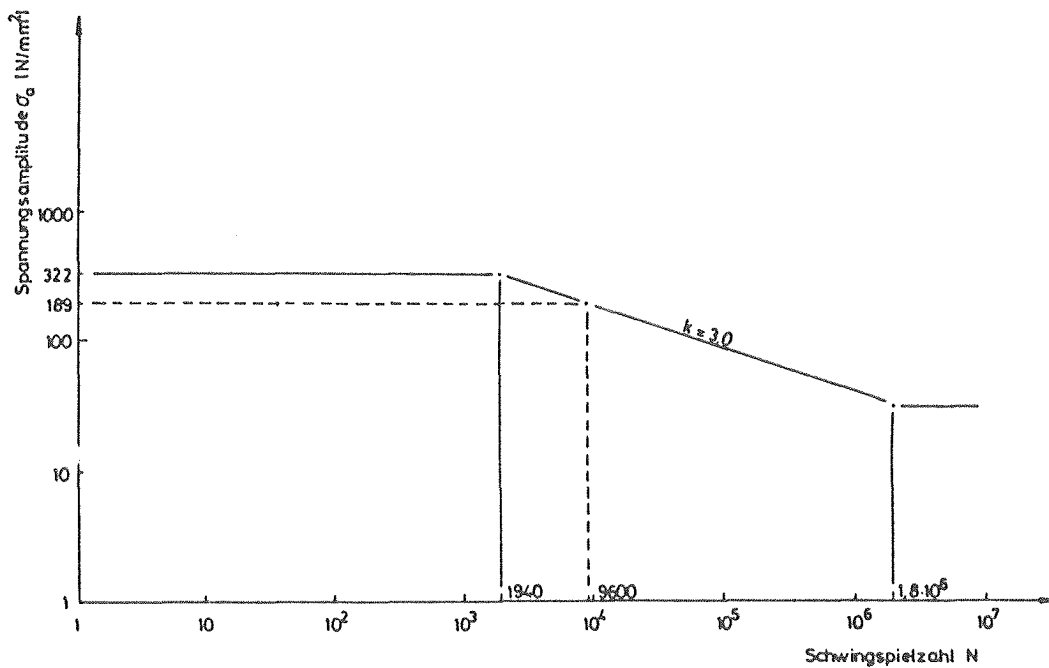


Bild 9: Vollständige idealisierte Wöhlerlinie für Medianwert  $P_B = 50 \%$   
gestrichelt: oberer Abknickpunkt für  $R_{p0,2} = 900 \text{ N/mm}^2$   
ausgezogen: oberer Abknickpunkt für vorhandene  $R_{p0,2} = 1033 \text{ N/mm}^2$

### 3 Vergleich der Wöhlerlinien mit Ergebnissen der Literatur

Bild 10 zeigt die Wöhlerlinien für Bruchwahrscheinlichkeiten  $P_B = 10 \%$ ,  $50 \%$  und  $90 \%$  im Vergleich mit Einzelversuchen von Valtinat /17/ und Grenzwerten der Wöhlerfestigkeit nach Versuchen von Wiegand/Strigens /18/ und Wiegand/Thomala /19/.

Die Versuche von Valtinat an hochfesten feuerverzinkten Schrauben 10.9, Durchmesser M20 weisen überwiegend niedrigere Bruch-Lastspielzahlen auf. In der Tendenz wäre aufgrund dieser Versuche im Zeitfestigkeitsbereich eine etwas flachere Neigung der Wöhlerlinie und damit ein größerer Neigungsexponent  $k$  zu erwarten gewesen, im Dauerfestigkeitsbereich eine etwas höhere Grenzwöhlerfestigkeit  $\sigma_D$ .

Die Grenzwerte der Wöhlerfestigkeiten nach Versuchen von Wiegand/Strigens gelten für Schrauben mit kleinerem Durchmesser M16 und fallen erstaunlich hoch aus. Im Vergleich zum Grenzwert  $\sigma_{D50} = 33,9 \text{ N/mm}^2$  der Wöhlerkurve fällt der Medianwert nach /18/ mit  $46,2 \text{ N/mm}^2$  um  $36 \%$  höher aus.

Ein Vergleich der Medianwerte für die Grenzlastspielzahl  $N_D = 5 \cdot 10^6$  zeigt, daß nach /19/ ein mit  $48,3 \text{ N/mm}^2$  um  $42 \%$  höherer Wert als  $\sigma_{D50} = 33,9 \text{ N/mm}^2$  gefunden wurde. Hier wurden allerdings Schrauben M30 geprüft.

Insgesamt ist festzustellen, daß für Durchmesser M16 und M30 die zitierten Ergebnisse der Literatur höhere Grenzwöhlerfestigkeiten ausweisen als die Grenzwerte unserer Wöhlerlinien.

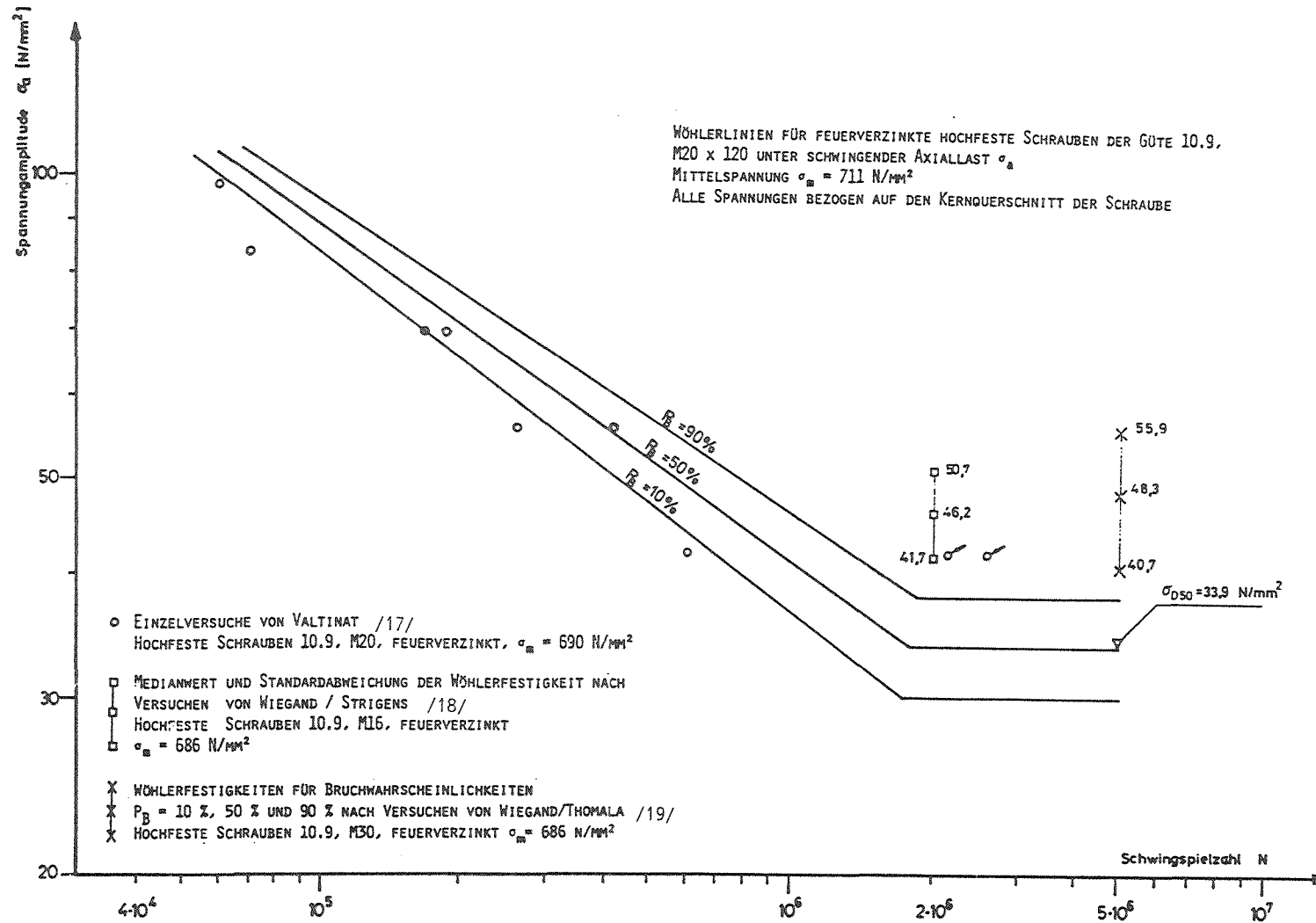


Bild 10 : Idealisierte Wöhlerlinien für Bruchwahrscheinlichkeiten  
 $P_B = 10\%$ ,  $50\%$  und  $90\%$  im Vergleich mit Ergebnissen  
 der Literatur

#### 4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprogramms "Zeit- und Dauerfestigkeit von hochfesten Schrauben der Güte 10.9 unter axialem Zug, Ermittlung der Wöhlerlinien. I. Teilprogramm: Feuerverzinkte Schrauben M20" wurden 56 Wöhlerversuche unter pulsierender Axialspannung und statischer axialer Mittelspannung von  $\sigma_m = 711 \text{ N/mm}^2$  gefahren. Die Mittelspannung entspricht der Soll-Vorspannkraft  $F_V = 160 \text{ kN}$  bezogen auf den Kernquerschnitt. Es wurden Wöhlerlinien für Bruchwahrscheinlichkeiten  $P_B = 10 \%$ ,  $50 \%$  und  $90 \%$  anhand der auf 5 Spannungsprüfhorizonte verteilten Ergebnisse ermittelt.

Als Grenzwerte der Wöhlerfestigkeiten für  $N_D = 5 \cdot 10^6$  Lastspiele ergaben sich Spannungsamplituden  $\sigma_{D10} = 30 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{D50} = 34 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{D90} = 38 \text{ N/mm}^2$ .

Der Index nennt die Bruchwahrscheinlichkeit. Der Neigungsexponent der Wöhlerlinien im Zeitfestigkeitsbereich betrug für  $P_B = 50 \%$   $k = 2,7$ . Wird der Prüfhorizont III in die Auswertung einbezogen, so ergibt sich eine idealisierte Wöhlerlinie mit der flacheren Neigung  $k = 3,0$ .

Ein Vergleich mit aus der Literatur entnommenen Versuchsergebnissen an feuerverzinkten Schrauben M20 zeigt, daß die Mehrzahl der Ergebnisse sich größenordnungsmäßig einordnen.



## L i t e r a t u r

- /1/ DIN 6914: Sechskantschrauben mit großen Schlüsselweiten, März 1979
- /2/ DIN ISO 898, Teil 1: Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen, Schrauben, April 1979
- /3/ DIN 6915: Sechskantmuttern mit großen Schlüsselweiten, März 1979
- /4/ DIN 6916: Scheiben, März 1979
- /5/ DIN-ISO 3800, Teil 1: Verbindungselemente mit Gewinde, Dauerschwingversuche unter Zugschwellbeanspruchung, März 1978
- /6/ DASt-Ri 010: Anwendung hochfester Schrauben im Stahlbau, Juni 1976, Nachfolgenorm DIN 18800 Teil 1: Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion, Ausgabe 3/1981, DIN 18800 Teil 7 - Stahlbauten: Herstellen, Eignungsnachweise zum Schweißen, Ausgabe 5/1983
- /7/ DIN 50100: Dauerschwingversuch, Februar 1978
- /8/ VDI 2227 E: Festigkeit bei wiederholter Beanspruchung, Zeit- und Dauerfestigkeit metallischer Werkstoffe, insbesondere von Stählen, April 1974
- /9/ Brownlee, K.A., Hodges, J.L. und Rosenblatt, M.: The up-and-down-method with small samples, J. American Statistical Association, 1953
- /10/ Kosteas, D. und Graf, U.: Versuchsdurchführung und Auswertung von Dauerfestigkeitsuntersuchungen, Mitteilungen, des Lehrstuhls für Stahlbau, Technische Universität München, Heft 20, 1984
- /11/ Maennig, W.-W.: Bemerkungen zur Beurteilung des Dauerschwingfestigkeitsverhaltens von Stahl und einige Untersuchungen zur Bestimmung des Dauerfestigkeitsbereiches, Materialprüfung 12, Nr. 4, April 1970
- /12/ Dorff, D.: Vergleich verschiedener statistischer Transformationsverfahren auf ihre Anwendbarkeit zur Ermittlung der Dauerfestigkeit, Diss., Berlin 1961
- /13/ Maennig, W.-W.: Untersuchungen zur Planung und Auswertung von Dauerschwingversuchen an Stahl in den Bereichen der Zeit und Dauerfestigkeit, VDI-Zeitschrift, Reihe 5, Nr. 5, August 1967

- /14/ Rossow, E.: Eine einfache Rechenschiebernäherung an die den "normal scores" entsprechenden Prozentpunkte, Z. wirtschaftliche Fertigung 59, Nr. 12, S. 596-597, Jahr 1964
- /15/ DIN 55302, Blatt 1: Statische Auswertungsverfahren, Häufigkeitsverteilung, Mittelwert, Streuung, Nov. 1970
- /16/ Kostas, D.: Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise, Stahlbau Handbuch, S. 595, Stahlbau Verlags-GmbH, Köln 1982
- /17/ Valtinat, G.: Der Einsatz der Feuerverzinkung im Stahlbau - im Hinblick auf Schraubenverbindungen, Veröffentl. der "Beratung Feuerverzinken"
- /18/ Wiegand, H. und Strigens, P.: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben, Industrie-Anzeiger 94, Nr. 12, Februar 1972
- /19/ Wiegand, H. und Thomala, W.: Zum Festigkeitsverhalten feuerverzinkter HV-Schrauben, Drahtwelt 59, Nr. 12, Fachteil: Schrauben, Muttern Formteile, Dezember 1973