

BAM-BERICHT Nr. 8

DER BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

**Zum Spannungs - Dehnungs - Verhalten
von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

von Dr.-Ing. Helmut Veith

1. Einleitung	1
1.1. Bisherige Beobachtungen und Erörterungen über Vorgänge im wechselbeanspruchten Metallgefüge	1
1.1.1. Kubisch-flächenzentrierte Metalle	1
1.1.2. Kubisch-raumzentrierte Metalle.....	4
1.2. Folgerungen für die Problemstellung der Arbeit	5
1.3. Begründung und Ziel der Arbeit	7
2. Versuchsaufbau	8
2.1. Beanspruchungseinrichtung	8
2.2. Messen der mechanischen Größen	9
2.3. Anordnung zum Messen der Ultraschallschwächung	9
2.4. Registriergeräte	10
3. Versuchsdurchführung	11
3.1. Werkstoffe und Probenform	11
3.2. Versuchsvorbereitung	12
3.3. Untersuchung des Plastizierungsverlaufes	12
3.3.1. Spannungs-Dehnungs-Verhalten, Ultraschallschwächung	12
3.3.2. Koerzitivkraftverhalten	12
3.3.3. Elektronenmikroskopische Untersuchungen	13
4. Versuchsergebnisse	14
4.1. Untersuchung des Plastizierungsverlaufes und seiner Abhängigkeit von der aufgetragenen Spannungsamplitude ...	14
4.1.1. Änderung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens	14
4.1.2. Echohöhenverlauf der Ultraschallimpulse.....	17
4.1.3. Änderung der Koerzitivkraft	18
4.1.4. Einfluß des Plastizierungsprozesses auf die mechanischen Eigenschaften bei einsinniger Belastung.....	20
4.1.5. Änderung der Versetzungsstruktur	21
4.2. Einfluß der Korngröße auf den Plastizierungsprozeß	24
4.2.1. Spannungs-Dehnungs-Verhalten	25
4.2.2. Mikro-Verformungsverhalten	31
4.3. Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf den Plastizierungsprozeß	32
5. Besprechung der Versuchsergebnisse	33
5.1. Bedeutung plastischer Mikroverformungen für den Plastizierungsprozeß	33
5.2. Vorgänge beim Plastizierungsprozeß	34
6. Zusammenfassung	56
7. Schrifttum	58

Liste der Bezeichnungen

A	Kennzahl für das Berechnungsmodell	L_L	erforderliche Schleifenlänge für das Losreißen der Versetzung von den Teilchen (Ausbruchslänge), normiert auf den Betrag des Burgersvektors b
A(N)	über einen Lastwechsel gemittelte Echohöhe der Ultraschallimpulse als Funktion der Lastwechselzahl N	L_{L_1}	Ausbruchslänge L_L , erreicht nach der Lastwechselzahl N_1
A(N=0)	Echohöhe der Ultraschallimpulse vor dem Versuch	L_N	Netzwerkänge des Versetzungsnetzwerkes [cm]
$\left[\frac{A(N)}{A(N=0)} \right] M$	Mittelwert aus mehreren Verhältnissen $A(N)/A(N=0)$	$L_{c_i}^j$	Länge der Versetzungsschleife zwischen dem (i-1)-ten und dem i-ten Teilchen nach dem Zeitschritt Δt_j [cm]
D	Diffusionskonstante [cm ² /s]	$L_{c_i}^0$	Länge der Versetzungsschleife zwischen dem (i-1)-ten und dem i-ten Teilchen vor dem Versuch [cm]
E_L	Linienenergie der Versetzung [kpcm/cm]	L_i^j	Mittelwert der Schleifenlänge $L_{c_i}^j$ und $L_{c_{i+1}}^j$ [cm]
$E_p(N)$	aus der mechanischen Hysteresisschleife ermittelte Dämpfungsarbeit als Funktion der Lastwechselzahl N [kpcm]	L_v	Länge der aufgestauten Versetzungsgruppe [cm]
$E_{el}(N=1)$	im ersten Lastwechsel maximal aufgenommene elastische Energie [kpcm]	L_{max}	größte Versetzungsschleife innerhalb der Netzwerkänge L_N [cm]
$\frac{E_p(N)}{E_{el}(N=1)}$	aus der mechanischen Hysteresisschleife ermittelte normierte Dämpfungsarbeit als Funktion der Lastwechselzahl N	L_2'	größte Schleifenlänge an Versetzungen sich elastisch verhaltender Körner, die plastizierten Körnern nicht benachbart sind, nach der Lastwechselzahl N_1 [cm]
G	Schubmodul [kp/cm ²]	N	Lastwechselzahl
$H_c(N)$	Koerzitivkraft als Funktion der Lastwechselzahl N [A/cm]	N_1	Lastwechselzahl, nach der eine merkliche Erhöhung der Verformungswegamplitude durch die Plastizierung der ersten Kornfolge, nämlich von sich elastisch verhaltenden Körnern, die primär plastizierten Körnern benachbart sind, eintritt
$H_c(N=0)$	Koerzitivkraft vor dem Versuch [A/cm]	N_2	Lastwechselzahl, nach der die zweite Kornfolge plastiziert wird
$\frac{H_c(N)}{H_c(N=0)}$	normierte Koerzitivkraft als Funktion der Lastwechselzahl N		
K_i	infolge der Ausbauchung zweier benachbarter Versetzungsschleifen L_{c_i} und $L_{c_{i+1}}$ am dazwischenliegenden i-ten Teilchen in Richtung der Versetzungslinie wirkende Kraftkomponente [kp]		

N_3	Lastwechselzahl, nach der die dritte Kornfolge plastiziert wird	f_S	Ultraschallfrequenz [MHz]
N_m	Lastwechselzahl, nach der die m-te Kornfolge plastiziert wird	f_o	Grenzfrequenz für den Relaxationsvorgang bei magnetomechanischen Dämpfungsbeiträgen durch Mikrowirbelströme [MHz]
ΔN_2	zwischen den Plastizierungszeitpunkten der ersten und zweiten Kornfolge liegende Lastwechselzahl	k	Boltzmann-Konstante [kpcm/°K]
ΔN_i	zwischen den Plastizierungszeitpunkten der (i-1)-ten und i-ten Kornfolge liegende Lastwechselzahl	k_D	Konstante [kp ² /cm ²]
		k_y	Anstieg der Petch-Geraden
P	augenblicklich wirkende Kraft innerhalb eines Lastwechsels [kp]	l	mittlere Länge der schwingfähigen Versetzungsschleifen [cm]
P_a	aufgebrachte Kraftamplitude [kp]	l_o	Bezugslänge an der Probe [cm]
R	Rechenschrittzahl	m	Anzahl der plastizierten Kornfolgen
R_E	spezifischer elektrischer Widerstand [Vcm/A]	n	Verhältnis der Anzahl neu plastizierter Körner zur Anzahl der im ersten Lastwechsel plastizierten Körner
R_1	N_1 zugeordnete Rechenschrittzahl	q_i	Weg-Koordinatenachse des i-ten Teilchens
R_2^j	L_2^j zugeordnete Rechenschrittzahl	q_i^j	Ortskoordinate des i-ten Teilchens nach dem Zeitschritt Δt_j [cm]
ΔR_2	ΔN_2 zugeordnete Rechenschrittzahl	q_i^o	Ortskoordinate des i-ten Teilchens vor dem Versuch [cm]
S_E	Mittelwert von $(\tau_v)^2$ über eine halbe Lastwechselperiode $\theta/2$ [kp ² /cm ⁴]	Δq_i^j	vom i-ten Teilchen während des Zeitschrittes Δt_j zurückgelegter Weg [cm]
T	absolute Temperatur [°K]	t_j	vom Versuchsbeginn bis nach dem Zeitschritt Δt_j vergangene Zeit [s]
a	Ableitung	t_{L_1}	R_1 entsprechende Zeit [s]
b	Betrag des Burgersvektors [cm]	Δt	Zeitschritt [s]
c_K	Konstante [μm^{-1}]	Δt_j	j-ter Zeitschritt [s]
d_K	aus den Schlibfbildern ermittelter mittlerer Korndurchmesser [μm]	v_i	Driftgeschwindigkeit des i-ten Teilchens [cm/s]
f	Lastwechselfrequenz [Hz]	x	Abstand vom Aufstapunkt der Versetzungsgruppe [cm]

α	Anteil der plastizierten Körner in der Probe	ϵ_0	Beitrag einer Kornfolge zum plastischen Anteil der Dehnungsamplitude im Zeitpunkt ihrer Plastizierung
α_v	Ultraschall-Schwächungskoeffizient durch gedämpft schwingende Versetzungsschleifen [dB/s]	ϵ_v	Dehnung der Probe
α_m	Ultraschall-Schwächungskoeffizient durch Blochwandschwingungen [dB/s]	θ	Lastwechselperiode [s]
γ	Scherung (elastisch, plastisch)	ρ	Versetzungsdichte [cm/cm ³]
$\delta(N)$	Verformungswegamplitude als Funktion der Lastwechselzahl N [μm]	σ	aufgebrachte Spannung [kp/mm ²]
$\delta(N=1)$	Verformungswegamplitude im ersten Lastwechsel [μm]	σ_a	aufgebrachte Spannungsamplitude [kp/mm ²]
$\delta(N_1)$	Verformungswegamplitude nach der Lastwechselzahl N_1 [μm]	σ_{ac}	Grenz-Spannungsamplitude für das lineare Anwachsen der Verformungswegamplitude $\delta(N)$ mit der Lastwechselzahl N [kp/mm ²]
$\delta(N)_{\text{max}}$	im Versuch maximal erreichte Verformungswegamplitude [μm]	σ_{aG}	Grenz-Spannungsamplitude für das Auftreten einer Verformungsweg-Amplituden-erhöhung [kp/mm ²]
$\frac{\delta(N)}{\delta(N=1)}$	normierte Verformungswegamplitude als Funktion der Lastwechselzahl N	σ_i	aus der Reibspannung τ_i resultierende Normalspannung [kp/mm ²]
$\frac{\delta(N_1)}{\delta(N=1)}$	normierte Verformungswegamplitude nach der Lastwechselzahl N_1	σ_{io}	Grenz-Spannungsamplitude für das Auftreten einer nachweisbaren plastischen Verformung [kp/mm ²]
$\left[\frac{\delta(N)}{\delta(N=1)} \right]_{\text{max}}$	im Versuch maximal erreichte normierte Verformungswegamplitude	σ_m	Mittelspannung [kp/mm ²]
δ_v	Probenverlängerung, Verformungsweg [μm]	σ_{So}	obere Streckgrenze [kp/mm ²]
ϵ_E	Sättigungswert des Beitrages einer Kornfolge zum plastischen Anteil der Dehnungsamplitude	σ_{Su}	untere Streckgrenze [kp/mm ²]
$\epsilon_K(\tau_a, N)$	Beitrag einer Kornfolge zum plastischen Anteil der Dehnungsamplitude als Funktion der Lastwechselzahl N und der Spannungsamplitude τ_a als Parameter	σ_W	technische Wechselfestigkeit [kp/mm ²]
ϵ_p	plastischer Anteil der Dehnung	σ_0	der kritischen Schubspannung τ_0 entsprechende Normalspannung [kp/mm ²]
ϵ_{pm}	mikroplastischer Anteil der Dehnungsamplitude	$\Delta\sigma$	Differenz der Spannungsamplituden σ_a und σ_{aG} für $\sigma_a < \sigma_{aG}$ [kp/mm ²]
		τ	aus der aufgetragenen Spannung σ resultierende in den Gleitebenen wirksame Schubspannung [kp/mm ²]

τ_a	aus der aufgebrachten Spannungsamplitude σ_a resultierende in den Gleitebenen wirksame Schubspannungsamplitude [kp/mm ²]	τ_{i2}	notwendige Schubspannung für eine irreversible Versetzungsbewegung bei einsinniger Belastung [kp/mm ²]
τ_{ac}	der Grenz-Spannungsamplitude σ_{ac} entsprechende Schubspannungsamplitude [kp/mm ²]	τ_k	Loslöseschubspannung [kp/mm ²]
τ_{aG}	der Grenz-Spannungsamplitude σ_{aG} entsprechende Schubspannungsamplitude [kp/mm ²]	$\tau_v(x, t)$	aus einer Versetzungsaufstauung an der Korngrenze resultierende orts- und zeitabhängige Schubspannung im Nachbarkorn [kp/mm ²]
τ_c	Grenz-Spannungsamplitude für die Diffusion längs der Versetzungslinie [kp/mm ²]	$\bar{\tau}_v(t)$	sich aus τ_v für $\tau_i = \bar{\tau}_i$ ergebende Schubspannung [kp/mm ²]
τ_D	in der Gleitebene senkrecht zur Versetzungslinie wirkende Schubspannung [kp/mm ²]	τ_{va}	Amplitudenwert von τ_v [kp/mm ²]
$\tau_{G(x,t)}$	aus einer Versetzungsaufstauung an der Korngrenze resultierende orts- und zeitabhängige Schubspannungserhöhung im Nachbarkorn [kp/mm ²]	$\bar{\tau}_{va}$	Amplitudenwert von $\bar{\tau}_v$ (wirksamer Mittelwert von τ_{va} über N_1) [kp/mm ²]
τ_{Ga}	Amplitudenwert von τ_G [kp/mm ²]	τ_{va0}	Amplitudenwert von τ_v für $\tau_i = \tau_{i0}$ [kp/mm ²]
τ_i	der Versetzungsbewegung entgegenwirkende Reibspannung [kp/mm ²]	τ_o	kritische Schubspannung [kp/mm ²]
$\bar{\tau}_i$	wirksamer Mittelwert von τ_i über die Lastwechselzahl N_1 [kp/mm ²]	τ_{II}	charakteristische Schubspannung für den Übergang vom Bereich I zum Bereich II der Verfestigungskurve eines kubisch-flächenzentrierten Metalleinkristalls [kp/mm ²]
τ_{iE}	Sättigungswert der Reibspannung τ_i [kp/mm ²]	τ_{III}	charakteristische Schubspannung für den Übergang vom Bereich II zum Bereich III der Verfestigungskurve eines kubisch-flächenzentrierten Metalleinkristalls
τ_{i0}	der Grenz-Spannungsamplitude σ_{i0} entsprechende Schubspannungsamplitude [kp/mm ²]	τ^*	für das Losreißen der Versetzung von den Teilchen erforderliche Schubspannungsamplitude [kp/mm ²]
τ_{i1}	notwendige Schubspannung für eine reversible Versetzungsbewegung bei einsinniger Belastung [kp/mm ²]	χ_a	Anfangsuszeptibilität [Vs/Acm]

Die Mehrzahl der bei der technischen Anwendung metallischer Werkstoffe auftretenden Versagensursachen sind Dauerbrüche. Daraus geht hervor, welche große Bedeutung auch heute noch der Erforschung des Verhaltens von Werkstoffen unter Wechselbeanspruchung beigemessen werden muß, obwohl seit den ersten Untersuchungen durch Wöhler eine Vielzahl von Veröffentlichungen über empirische Ergebnisse berichten und sich mit grundsätzlichen Fragen beschäftigen. Nachdem zunächst die Praktiker Regeln über die von außen feststellbaren Einflüsse, die zum Dauerbruch führen, durch die Ermittlung der Wöhlerkurve erarbeiteten, gelang es erst in neuerer Zeit mit Hilfe der durch die Elektronik geförderten modernen Beobachtungs- und Meßmethoden auch Vorgänge, die im Mikrobereich der Werkstoffe während der Wechselbeanspruchung ablaufen, direkt oder indirekt zu verfolgen. Obwohl dieser Fortschritt vor allem in den letzten zehn Jahren neue grundlegende Erkenntnisse gebracht hat, ist es bisher noch nicht gelungen, die zum Dauerbruch führenden Vorgänge vollständig zu erklären [1].

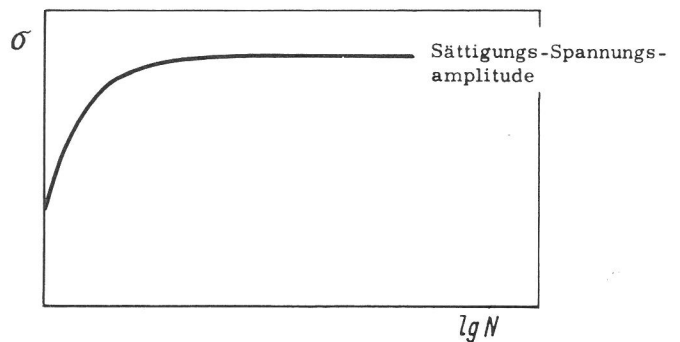
1.1. Bisherige Beobachtungen und Erörterungen über Vorgänge im wechselbeanspruchten Metallgefüge

Zur Klärung der grundlegenden Vorgänge im Mikrobereich metallischer Werkstoffe während einer zyklischen Beanspruchung werden vorwiegend das Spannungs-Dehnungsverhalten und die Werkstoffdämpfung in Abhängigkeit der Lastwechselzahl bei konstant gehaltener Spannungs- oder Dehnungsamplitude beobachtet. Parallel dazu ermöglichen oder unterstützen elektronenmikroskopische Aufnahmen eine Deutung der Versuchsergebnisse. Die Aufzeichnung des Spannungs-Dehnungsverlaufes in Abhängigkeit der Lastwechselzahl zeigt, daß sich im ersten Stadium der Wechselbeanspruchung die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes ändern. Elektronenmikroskopische Beobachtungen bestätigen, daß als Ursache dafür die Bewegung von Versetzungen, die bereits im Ausgangszustand vorhanden sind, die Erzeugung neuer Versetzungen, die Bildung neuer Gleithindernisse sowie die damit verbundene allmähliche Behinderung der Versetzungsbewegung und die Ausbildung spezieller Versetzungsanordnungen in Betracht zu ziehen sind [1 ÷ 39].

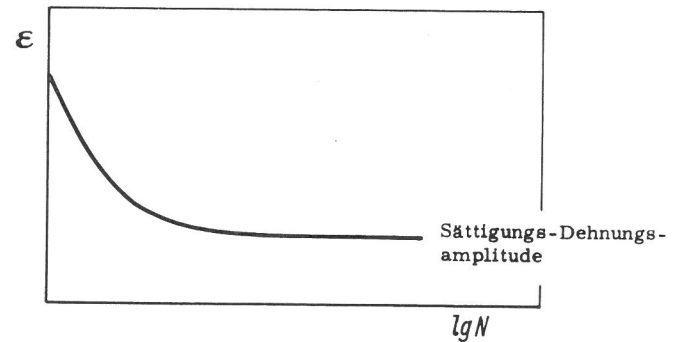
1.1.1. Kubisch-flächenzentrierte Metalle

Aus den bisher hauptsächlich an kubisch-flächenzentrierten Metallen sowohl mit Einkristallen als auch mit vielkristallinen Proben durchgeführten Untersuchungen geht hervor, daß der Ausgangszustand, die Versuchstemperatur und die Spannungsamplitude dafür maßgebend sind, ob bei einer zum Dauerbruch führenden Beanspruchung zunächst eine Verfestigung oder eine Entfestigung des Werkstoffes eintritt. Bei rekristallisierten Proben wird im allgemeinen zuerst eine Verfestigung beobachtet. Die Verfestigung läuft um so

schneller ab, je höher die aufgebrachte Spannungs- bzw. Dehnungsamplitude ist. Nach dem Abschluß des wesentlichen Verfestigungsprozesses stellt sich ein sogenannter „Sättigungswert“ ein, der bei konstant gehaltener Dehnungsamplitude einer Sättigungs-Spannungsamplitude (Bild 1 a) und bei konstant gehaltener Spannungsamplitude einer Sättigungs-Dehnungsamplitude (Bild 1 b) entspricht. Die bisher



a) Verlauf der Spannungsamplitude in Abhängigkeit der Lastwechselzahl bis zum Erreichen der Sättigungs-Spannungsamplitude bei vorgegebener konstanter Dehnungsamplitude (schematisch)



b) Verlauf der Dehnungsamplitude in Abhängigkeit der Lastwechselzahl bis zum Erreichen der Sättigungs-Dehnungsamplitude bei vorgegebener konstanter Spannungsamplitude (schematisch)

Bild 1

vorwiegend mit konstant gehaltener Dehnungsamplitude durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß die Sättigungs-Spannungsamplitude durch die Erhöhung der Dehnungsamplitude und mit abnehmender Versuchstemperatur anwächst [5, 6, 11, 13, 14, 15, 24]. In vor der Wechselverformung kaltverformten Proben kann eine Verfestigung oder eine Entfestigung eintreten, je nachdem, ob ein für den Werkstoff charakteristisches und von der Versuchstemperatur abhängiges Grenzverhältnis von aufgebrachter Dehnungsamplitude zum Kaltverformungsgrad über- oder unterschritten wird. Für Kupfer z. B. beträgt das Grenzverhältnis bei Raumtem-

peratur und auch bei tieferen Temperaturen [13] ungefähr 0,1. Im Verfestigungsbereich, also oberhalb des Grenzverhältnisses, wächst die Verfestigungsgeschwindigkeit mit zunehmender Dehnungsamplitude, im Entfestigungsbereich, also unterhalb des Grenzverhältnisses, nimmt die Entfestigungsgeschwindigkeit mit kleiner werdender Dehnungsamplitude zu. Bei Metallen mit genügend hoher Stapelfehlerenergie zeigt der Vergleich von Versuchen mit rekristallisierten und kaltverformten Proben, daß die Sättigungs-Spannungsamplitude in beiden Fällen, wie es bereits beschrieben wurde, von der Dehnungsamplitude und der Temperatur abhängt, jedoch die Probenvorgeschichte, Glühung oder Kaltverformung, keinen wesentlichen Einfluß auf ihre Höhe hat, wie z. B. aus *Bild 2* zu ersehen ist [10, 11, 13].

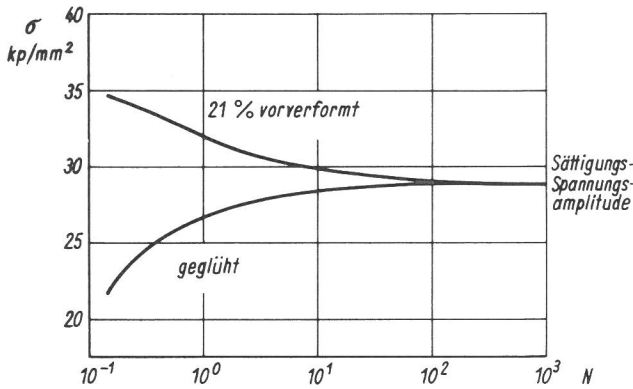


Bild 2
Verfestigung von geglühtem und Entfestigung von vorverformtem polykristallinem Aluminium bei gleicher Dehnungsamplitude durch eine Zug-Druck-Wechselbeanspruchung nach H. Raymond und L. F. Coffin [10]

Elektronenmikroskopische Durchstrahlungsaufnahmen lassen erkennen, daß in rekristallisierten Proben bei hohen Dehnungsamplituden (Bruch-Lastwechselzahl $< 10^4$) mit dem Beginn der Verfestigung eine rasche Versetzungsvermehrung einsetzt. Die neu entstehenden Versetzungen bilden zunächst unregelmäßig verteilte Versetzungsknäuel aus eng miteinander verschlungenen Versetzungen. Mit dem Erreichen der Sättigungs-Spannungsamplitude entsteht bei Metallen mit genügend hoher Stapelfehlerenergie eine klare Versetzungs-Zellstruktur, bei der das Innere der Zellen fast frei von Versetzungen ist. Untersuchungen der Zellgröße in Abhängigkeit der Dehnungsamplitude und der Versuchstemperatur zeigen, daß sich die einstellende Endzellgröße umgekehrt proportional zur erreichten Höhe der Sättigungs-Spannungsamplitude verhält [17, 18, 20]. In Metallen mit niedriger Stapelfehlerenergie, wie z. B. bei einer Cu-7,5 % Al-Legierung, bildet sich bei hohen Dehnungsamplituden eine Versetzungs-Bandstruktur aus. Zwischen den in Bändern angeordneten Versetzungen sind nur wenige Versetzungen sichtbar. Der Abstand der Versetzungsbänder wird mit wachsender Dehnungsamplitude kleiner, die Versetzungsdichte in den Bändern nimmt dabei zu [20]. Mit steigender Temperatur vergrößert sich der Abstand der Versetzungsbänder und die Anzahl der Versetzungen zwischen den Versetzungsbändern. Bei kleinen Dehnungsamplituden (Bruch-Lastwechselzahl $> 10^5$) geht die Erzeugung neuer Versetzungen wesentlich langsamer vor sich. Aus der zunächst entstehenden, ziemlich regelmäßigen Verteilung von Versetzungsschleifen und Versetzungsdipolen bilden sich mit dem Erreichen des Sättigungszustandes bandförmige Anordnungen dieser Gitterstörungen aus [12, 15, 16, 19, 20, 21].

Nach Untersuchungen von Feltner und Laird [20] stellt sich in vielkristallinem Kupfer unter gleichen Versuchsbedingungen (Dehnungsamplitude, Temperatur), die zur Ausbildung einer Versetzungs-Zellstruktur führen, in vorher kaltverformten Proben aus der bereits durch die Vorverformung grob entwickelten Zellstruktur die gleiche in der Zellgröße und in der Versetzungsanordnung der Zellwände übereinstimmende Versetzungs-Zellstruktur ein wie in vorher rekristallisierten Proben. Bei vergleichbaren Versuchen hinsichtlich Kaltverformungsgrad, Dehnungsamplitude und Versuchstemperatur weist die in der Cu-7,5 % Al-Legierung sich ausbildende Versetzungs-Bandstruktur in den vorher kaltverformten Proben einen größeren Abstand der Versetzungsbänder auf als in den vorher rekristallisierten Proben. Dieser Unterschied wird auf die infolge der niedrigen Stapelfehlerenergie der Cu-7,5 % Al-Legierung erschwerten und deshalb nicht vollständig während der Wechselverformung erfolgten Umwandlung der bereits bei der Kaltverformung entstandenen, in größeren Abständen angeordneten Versetzungsbänder zurückgeführt.

Zur Erklärung der während der Wechselverformung ablaufenden Vorgänge wird versucht, die für die einsinnige Belastung entwickelten Modelle der Versetzungstheorie heranzuziehen. Der in rekristallisierten Proben bei hohen Dehnungsamplituden mit hoher Geschwindigkeit vor sich gehende Verfestigungsprozeß, bei dem eine rasche Versetzungsvermehrung, die Entstehung von dichten Versetzungsknäueln und schließlich die Ausbildung einer Versetzungs-Zellstruktur mit nur wenigen Versetzungen in den Zellen zu beobachten ist, wird danach den Bereichen II und III der Verfestigungskurve für die einsinnige Belastung (*Bild 3*) zu-

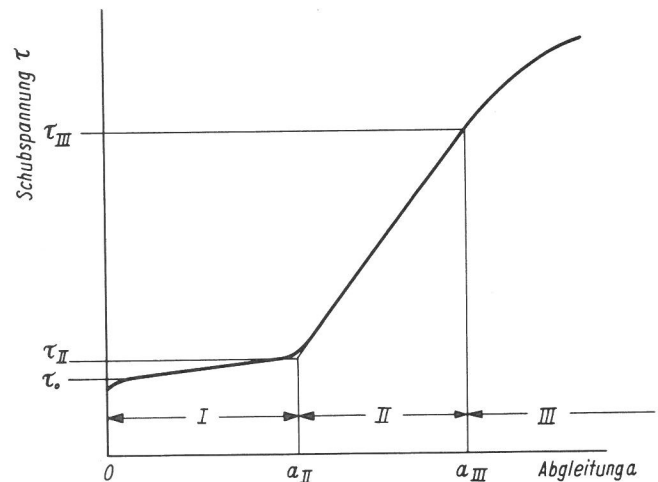


Bild 3
Allgemeiner Verlauf der Verfestigungskurve eines kubisch-flächenzentrierten Metalleinkristalls mittlerer Orientierung, gekennzeichnet durch die Bereiche: I Einfachgleiten, II Mehrfachgleiten und III Quergleiten

geordnet und angenommen, daß die am Anfang hohe Verfestigungsgeschwindigkeit auf die mit der raschen Versetzungsvermehrung zunehmende Wechselwirkung von Gleitversetzungen mit weitreichenden Spannungsfeldern zurückzuführen ist, während das Abnehmen der Verfestigungsgeschwindigkeit und des Verfestigungsbetrages mit steigender Temperatur und Stapelfehlerenergie auf den damit wachsenden Anteil der Quergleitung hinweisen [8, 13, 14, 20, 23].

Über den Ablauf des Verfestigungsprozesses bei niedrigen Dehnungsamplituden und die Entstehung der dabei auftre-

tenden Anordnung von Versetzungsschleifen und Versetzungsdipolen besteht bisher noch keine einheitliche Auffassung. Nach einem von Feltner [20, 21, 24] vorgeschlagenen Modell wird als kennzeichnender Mechanismus für die Vermehrung der Versetzungsdipole die Quergleitung von Schraubenversetzungen [25] bei der Umgehung ihrer selbst erzeugten Dipolhindernisse angesehen, und das bei kleinen Dehnungsamplituden beobachtete Anwachsen der Verfestigungsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur [24] und größer werdender Stapelfehlerenergie [23] damit erklärt, daß mit der dadurch leichter möglich werdenden Quergleitung sich die Anzahl der erzeugten Versetzungsdipole pro Lastwechsel erhöht. Die mit der Lastwechselzahl zunehmende Dichte der Dipolhindernisse behindert die Versetzungsbewegung immer stärker, bis schließlich mit dem Erreichen des Sättigungszustandes die gesamte Verformungsamplitude nur noch durch die begrenzte Hin- und Herbewegung der Versetzungsdipole selbst, die Ausbeulung ihrer Seitenstücke sowie der einzelnen Versetzungsabschnitte der durch die Wechselwirkung mit den Versetzungsdipolen blockierten Schraubenversetzungen aufgebracht wird. Nach Hartmann [8, 9] ist die bei niedrigen Dehnungsamplituden wie die bei neutronenbestrahlten oder abgeschreckten Proben zu beobachtende große Anzahl prismatischer Versetzungsschleifen auf die Erzeugung und die Diffusion von Leerstellen zurückzuführen. Es wird angenommen, daß die bei der Gleitung von Schraubenversetzungen mit Durchschneidungssprünge entstehenden Leerstellenketten bei der Lastumkehr erhalten bleiben, sich in einzelnen Diffusionsschritten diskusförmig in der Gleitebene anordnen und je nach Leerstellenanzahl und Höhe der Stapelfehlerenergie prismatische Versetzungsschleifen, die einen Stapelfehler einschließen, oder vollständige Versetzungsringe bilden können.

Durch die Analyse der mechanischen Hysteresisschleife, verbunden mit Mikro-Verformungsmessungen vor und nach Wechselbeanspruchungs-Versuchen wird ebenfalls eine Klärung der Vorgänge im Mikrobereich angestrebt. Ein Modell von Cottrell [26, 27] erklärt das die mechanische Hysteresisschleife kennzeichnende Spannungs-Dehnungs-Verhalten wie folgt: Der zu Beginn z. B. einer Zugbelastung auftretende elastische Bereich O—A in Bild 4 wird durch die Größe der

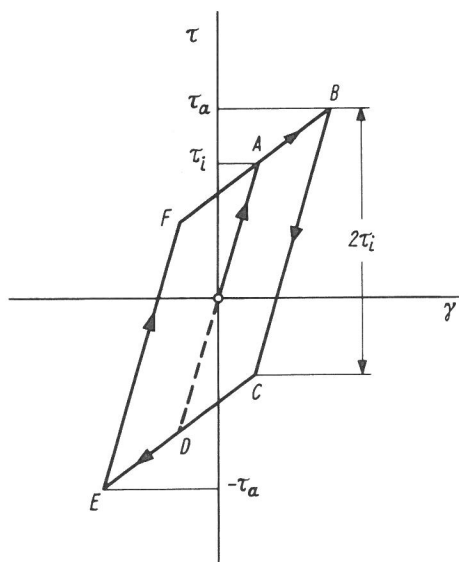


Bild 4
Schematische Darstellung der mechanischen Hysteresisschleife nach A. H. Cottrell [26]

die Versetzungsbewegung hemmenden Reibspannung τ_i bestimmt. Sobald infolge der äußeren Belastung die in den Gleitebenen wirksame Schubspannung τ über τ_i anwächst, beginnt die plastische Verformung, indem sich Gleitversetzungen unter dem Einfluß der zunehmenden Spannungsdifferenz $(\tau - \tau_i)$ in ihren Gleitebenen bewegen, bis sie sich an widerstandsfähigen Hindernissen aufstauen müssen. Im Punkt B stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der Spannungsdifferenz $(\tau_a - \tau_i)$ und der aus der Wechselwirkung der Spannungsfelder der Versetzungen in ihrer neuen Anordnung resultierenden, der bisherigen Versetzungsbewegung entgegengerichteten, inneren Spannung ein. Da τ_i von der Bewegungsrichtung unabhängig ist, kann die Zurückbewegung der Versetzungen unter der Mitwirkung des aufgebauten inneren Spannungsfeldes erst dann erfolgen, wenn durch eine Entlastung allein oder durch eine anschließende Druckbelastung die Spannungsdifferenz $|\tau_a - \tau| > 2\tau_i$ wird. Bei Wechselbeanspruchung mit einer Spannungsamplitude $(\pm \tau_a) > \tau_i$ tritt beispielsweise beim Beginn mit einer Zugbelastung im darauffolgenden Druckbereich, wie Bild 4 zeigt, ein Bauschinger Effekt auf, der, wenn sich τ_i während des Zyklus nicht ändert, zu einer geschlossenen Hysteresisschleife führt.

Lukas und Klesnil [15] bestimmen bei ihren Wechselbeanspruchungs-Untersuchungen (Bruch-Lastwechselzahl $> 10^5$) an vielkristallinem Kupfer und zwei Cu-Zn-Legierungen mit 8 % und 31 % Zn die Reibspannung entsprechend dem Modell von Cottrell. Die zunächst vor den Dauerschwingversuchen im Mikro-Dehnungsbereich mit einer Meßempfindlichkeit von ungefähr 10^{-6} unter Zug-Druck-Wechselbelastung ermittelten Reibspannungswerte liegen im Bereich um 1 kp/mm^2 , sie steigen mit dem Legierungsgehalt leicht an. Nach dem Erreichen der Sättigungs-Versetzungsdichte, die wesentlich früher eintritt als die Sättigungs-Dehnungsamplitude, ergeben sich Reibspannungswerte von $4 \div 5 \text{ kp/mm}^2$, die ebenfalls in der erwähnten Weise vom Legierungsgehalt abhängen. Da das Aktivierungsvolumen sich nachweislich während der Wechselbeanspruchung nicht geändert hat, wird die maßgebend zur Verfestigung beitragende Reibspannungserhöhung kurzreichenden inneren Spannungsfeldern zugeschrieben, die nicht durch thermisch aktivierbare Prozesse überwunden werden. Aus dem Unterschied zwischen den genannten Reibspannungswerten, die sich im Laufe der weiteren Wechselbeanspruchung nicht mehr merklich erhöhen, und den der Sättigungs-Dehnungsamplitude entsprechenden Fließspannungen geht hervor, daß auch weitreichende Spannungsfelder an der Verfestigung beteiligt sind. Der Anteil beträgt beim reinen Kupfer ungefähr 50 %, während bei der Legierung mit 31 % Zn die Verfestigung fast ausschließlich durch die Reibspannungserhöhung erfolgt. Demnach tragen

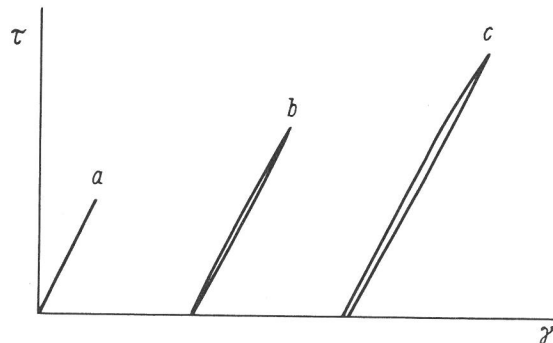


Bild 5
Mikro-Verformungsverhalten nach einer vorhergegangenen Wechselverformung (schematisch)

weitreichende Spannungsfelder um so mehr zur Verfestigung bei, je höher die Stapelfehlerenergie des Metalls ist, d. h. je leichter sich eine ausgeprägte Versetzungsstruktur während der Verfestigung ausbilden kann.

Von Snowden [16] durchgeführte Mikro-Verformungsmessungen (Meßempfindlichkeit 10^{-6}) bei Zugbelastung und anschließender Entlastung (*Bild 5*) an Aluminium-Einkristallen nach einer Wechselverformung zeigen, daß, nachdem bei sehr kleiner Belastung noch keine Hysteresisschleife beobachtet wird (*Bild 5 a*), durch die sukzessive Erhöhung der Maximalspannung zunächst geschlossene Hysteresisschleifen (*Bild 5 b*) entstehen. Die aus diesen Hysteresisschleifen nach Cottrell ermittelte Reibspannung τ_{i1} erweist sich in einem größeren Bereich als von der maximal aufgebrauchten Spannung und von der Orientierung des Kristalls weitgehend unabhängig; sie ist klein im Verhältnis zur aufgebrauchten Maximalspannung. Bei höheren Belastungen schließt sich die Hysteresisschleife nach der Entlastung nicht mehr, es bleibt eine plastische Verformung zurück (*Bild 5 c*). Die sich nunmehr ergebende Reibspannung τ_{i2} ist erheblich größer als τ_{i1} und kann einen wesentlichen Teil der aufgebrauchten Höchstspannung betragen. Es wird angenommen, daß τ_{i1} aus den der Ausbauchung einzelner Versetzungsstücke im Gitter entgegenwirkenden Kräften (z. B. Peierls-Nabarro-Kräfte) resultiert, während τ_{i2} vor allem auf die Wechselwirkung der Spannungsfelder benachbarter Gleitversetzungen sowie auf die Reaktion von Gleitversetzungen mit Waldversetzungen und der dabei entstehenden Hindernisse bei der Bewegung der Versetzungen über größere Laufwege zurückzuführen ist.

1.1.2. Kubisch-raumzentrierte Metalle

Kubisch-raumzentrierte Metalle – untersucht wurden vor allem Eisen und allgemeine Baustähle – zeigen bei der Wechselbeanspruchung charakteristische, vom allgemeinen Verhalten der kubisch-flächenzentrierten Metalle abweichende Eigenschaften. Die Untersuchung von sehr reinem im Bereich von $700 \div 900^\circ\text{C}$ langzeitgeglühtem Eisen, bei dem keine ausgeprägte Streckgrenze mehr festgestellt wird, gibt Aufschluß über mögliche Ursachen des unterschiedlichen Verhaltens. Hier wird wie bei den kubisch-flächenzentrierten Metallen unter kleinen Verformungsamplituden eine bandförmige Versetzungsanordnung, die hauptsächlich aus prismatischen Versetzungsschleifen besteht, und bei hohen Amplituden eine Versetzungs-Zellstruktur beobachtet [28, 29, 30, 31, 32]. Deshalb werden zur Klärung der Vorgänge die für kubisch-flächenzentrierte Metalle entwickelten Modelle herangezogen. Lukas, Klesnil und Mitarbeiter zeigen, daß gleich zu Beginn der Wechselverformung eine starke Verfestigung einsetzt, die bei kleineren Amplituden nach etwa 100 Lastwechseln mit dem Abschluß der Versetzungsvermehrung zur Sättigungs-Spannungsamplitude führt [28], während bei hoher Amplitude die höchste Versetzungsdichte und die größte Verfestigung bereits nach einem Lastwechsel erreicht wird [29]. Die gleichen Autoren weisen ferner für kleine Amplituden nach, daß während der Beanspruchung das Aktivierungsvolumen konstant bleibt, die Wechselverfestigung also im wesentlichen auf die Erhöhung des temperaturunabhängigen Anteils der Reibspannung zurückzuführen ist, wobei die sich einstellende Fließspannung jedoch einen Anteil der durch die bandförmige Versetzungsanordnung entstehenden weiterreichenden Spannungsfelder enthalten kann [33].

Nach Versuchen von Lipsitt und Horne [34] verschiebt sich das für kubisch-raumzentrierte Metalle charakteristisch ge-

haltene Knie der Wöhlerkurve nach niedrigen Spannungsamplituden und größeren Bruchlastwechselzahlen, wenn bei einem ursprünglich 0,09 % C (N-Gehalt nicht bekannt) enthaltenden Stahl der C-Gehalt auf 0,004 % und der N-Gehalt auf 0,00018 % reduziert wird. Ähnliche Ergebnisse werden von Hempel [35] an Eisen-Einkristallen und von Enrietto und Mitarbeitern bei desoxydiertem Niob erhalten [36]. Klesnil und Holzmann [37] zeigen an einem normalgeglühten Baustahl mit 0,11 % C, daß hier im Gegensatz zum Verhalten der kubisch-flächenzentrierten Metalle zu Beginn der Wechselbeanspruchung eine Entfestigung eintritt. Nach einer 200stündigen Glühung bei 820°C in feuchter Wasserstoffatmosphäre, bei der C und N weitgehend entfernt wurden, findet wie bei den kubisch-flächenzentrierten Metallen eine Verfestigung gleich zu Beginn des Versuches statt.

Aus den bisher besprochenen Ergebnissen wird in Analogie zum Verhalten unter einsinniger Belastung gefolgert, daß auch die charakteristischen mechanischen Eigenschaften und ihre Änderung während der Wechselbeanspruchung auf die anfängliche Verankerung von Versetzungen durch geringe Mengen von Verunreinigungen und Legierungselementen, die interstitiell im Gitter aufgenommen werden können, zurückzuführen sind. Die nachfolgend genannten Untersuchungen an allgemeinen Baustählen, die den Ablauf der Vorgänge während der zyklischen Belastung ausführlicher beschreiben, lassen eine geringere Widerstandsfähigkeit der Versetzungs-Blockierung bei Wechselbeanspruchung als bei einsinniger Belastung vermuten. Nach Oates und Wilson [38] führen in normalgeglühtem Material bereits Spannungsamplituden unterhalb der ausgeprägten Streckgrenze zu ihrem Abbau im Laufe des Wechselbeanspruchungs-Versuches. Dabei verkleinert sich zunächst mit wachsender Lastwechselzahl die Lüdersdehnung bis schließlich keine ausgeprägte Streckgrenze mehr auftritt (*Bild 6*). Die mikroskopische

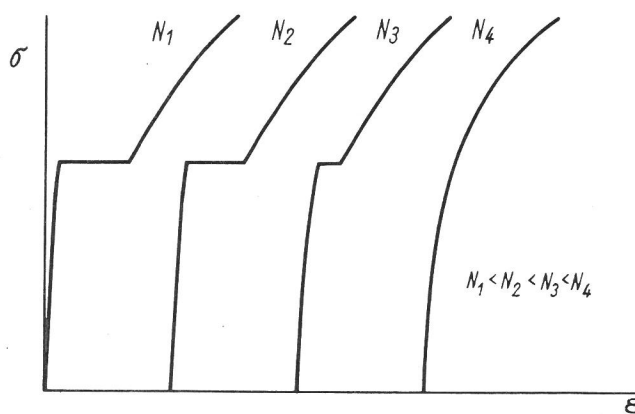


Bild 6
Einfluß einer Zug-Druck-Wechselbeanspruchung auf die mechanischen Eigenschaften bei einsinniger Beanspruchung in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N (schematisch)

Beobachtung von Oberflächenkörnern zeigt, daß zu Beginn des Versuches nur vereinzelte Körner Gleitspuren aufweisen. Mit diesen Körnern als Zentren breitet sich offenbar die plastische Verformung durch die Wechselbeanspruchung allmählich auf die übrigen Körner aus. Durch Spannungsamplituden unterhalb der Dauerwechselfestigkeit konnte bei feinkörnigem Material die Beseitigung der ausgeprägten Streckgrenze nicht mehr erreicht werden. Die auch hier am Anfang vorhandene kleine Anzahl plastizierter Körner wurde während der Beanspruchungsdauer etwas größer, es entstanden jedoch keine ausgedehnten plastisch deformierten Be-

reiche mehr. Bei Versuchen an grobkörnigem Material, bei dem die Dauerwechselfestigkeit niedriger lag als bei feinkörnigen Proben, trat noch nahe der Dauerfestigkeitsgrenze eine sich fortlaufend ausbreitende Plastizierung der Körner ein, die nach kurzer Zeit ausreichte, die ausgeprägte Streckgrenze abzutragen. Nach Ansicht der Verfasser wird die Dauerwechselfestigkeit in feinkörnigem Material im wesentlichen durch die Spannungsamplitude charakterisiert, bei der eine Ausbreitung der infolge örtlicher Spannungskonzentrationen anfänglich vorhandenen plastisch deformierten Bezirke nicht mehr möglich ist, d. h. die Spannungskonzentrationen an den Korngrenzen zu gering sind, um die plastische Verformung in angrenzende, zunächst nur elastisch beanspruchte Körner weiterzutragen. Die notwendige Spannungsamplitude für den Ablauf des durch die im Ausgangszustand blockierten Versetzungen bedingten Plastizierungsprozesses ist bei großem Korn kleiner als bei kleinem Korn. Untersuchungen von Klesnil und Mitarbeitern [39] an einem 0,11 % C-Stahl, dessen Korngröße durch Glühbehandlungen variiert wurde, bestätigten die Beobachtungen und Folgerungen der vorher genannten Verfasser und geben erstmals einen zusammenhängenden Überblick der Änderung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von geglühtem Baustahl in Abhängigkeit der Spannungsamplitude und mit der Korngröße als Parameter. Danach tritt bei Spannungsamplituden unterhalb der unteren Streckgrenze unabhängig von der Korngröße zunächst gleich zu Beginn des Versuches eine Entfestigung ein. Die dabei sich maximal einstellende Dehnungsamplitude wächst mit zunehmender Spannungsamplitude, wobei die zum Erreichen des Maximums erforderliche Lastwechselzahl kleiner wird. Dieses Verhalten geht auch aus Dämpfungsmessungen über die mechanische Hysteresisschleife von Lazan und Mitarbeitern [40, 41] an Baustahl sowie von Kirschling [42] an Ck-Stählen hervor. Das besonders bei hohen Spannungsamplituden zu beobachtende ausgeprägte Dehnungs-Amplitudenmaximum weist daraufhin, daß im Laufe der die Dehnungs-Amplitudenerhöhung bewirkenden Entfestigung offenbar in den bereits plastizierten Körnern eine die Dehnungsamplitude wieder vermindernde Verfestigung einsetzt [39, 43]. Dieser Verfestigungsprozeß führt nach genügend langer Beanspruchungsdauer zu einer mit der Spannungsamplitude wachsenden Sättigungs-Dehnungsamplitude, die offenbar bei niedrigen Spannungsamplituden nicht von der Korngröße beeinflusst wird. Elektronenmikroskopische Durchstrahlungsaufnahmen zeigen, daß in Abhängigkeit der Spannungsamplitude Versetzungsanordnungen entstehen [39, 44], wie sie bereits von der Verfestigung der bisher besprochenen Metalle bekannt sind (vgl. unter 1.1.1). Der von der Versetzungsdichte unabhängige Anteil der Fließspannung – er wurde jeweils im Zugversuch bestimmt – nimmt in mit niedriger Spannungsamplitude beanspruchten Proben mit der Lastwechselzahl zu und strebt einem mit der Spannungsamplitude größer werdenden, jedoch von der Korngröße unabhängigen Grenzwert zu. Entsprechend den Überlegungen bei den kubisch-flächenzentrierten Metallen [23] wird daraus geschlossen, daß auch hier die Verfestigung bei kleinen Spannungsamplituden (Ausbildung einer Versetzungs-Bandstruktur) im wesentlichen auf der zunehmenden Bewegungsbehinderung der Versetzungen durch kurzreichende Spannungsfelder beruht [39].

In mehreren Arbeiten [38, 39, 45, 46] wird auf den Einfluß der Korngröße auf die technische Wechselfestigkeitsgrenze hingewiesen. Nach den Ergebnissen von Klesnil und Mitarbeitern [39] läßt sich der Zusammenhang in einem der Hall-Petch-Beziehung [52, 53] ähnlichen Gesetz darstellen.

Aus dem Vergleich mit der Petch-Geraden für die untere Streckgrenze geht hervor, daß für sehr grobes Korn die Dauerwechselfestigkeit über der Streckgrenze liegen könnte, also dann eine Änderung der mechanischen Eigenschaften wie bei den reinen kubisch-flächen- und kubisch-raumzentrierten Metallen zu erwarten wäre. Die Petch-Gerade für die technische Dauerwechselfestigkeit verläuft parallel zu den Petch-Geraden für die Fließspannung bei mehrprozentiger konstanter Verformung. Einen Hinweis für die mögliche Ursache dieser Beobachtung geben die Untersuchungen von Hempel und Mitarbeitern [46, 47]. Die dort ermittelte Verformungs-Grenzlinie, deren Spannungswerte um $20 \div 50\%$ unterhalb der technischen Dauerwechselfestigkeit liegen, zeigt, daß auch unterhalb der Wechselfestigkeitsgrenze noch plastische Deformationen auftreten. Da die metallographisch an der Probenoberfläche nachgewiesenen Verformungsspurten erst im Laufe der Beanspruchungszeit sichtbar werden, sollten sie noch dem bei höheren Spannungsamplituden festgestellten Entfestigungsmechanismus zugeordnet werden. Die Ergebnisse von Lazan und Wu [40] aus Dämpfungsmessungen über die mechanische Hysteresisschleife unterstützen diese Vorstellung durch den Nachweis, daß auch bei Spannungsamplituden unterhalb der technischen Dauerwechselfestigkeit sich das logarithmische Dekrement noch erhöht. Die untere Grenze, bei der keine Dämpfungsänderung mehr feststellbar ist, wird von den Verfassern als dynamische Proportionalitätsgrenze bezeichnet. Schenck, Schmidtman und Mitarbeiter [48, 49] zeigen durch die Bestimmung von Dämpfungsänderungen im Kilohertz-Bereich, daß die auch unterhalb der Dauerfestigkeit zu Beginn des Versuches meßbare Dämpfungserhöhung durch Auslagerung bei Temperaturen über 100°C wieder rückgängig gemacht werden kann. Sie schließen über die Analyse des Dämpfungsverhaltens nach der Versetzungsdämpfungstheorie von Granato und Lücke [50, 51] daraus, daß die Dämpfungserhöhung auf das Losreißen der Versetzungen von Fremdatomwolken sowie die anschließende Ausbildung von Frank-Read-Quellen bei höheren Spannungen zurückzuführen ist und die Erniedrigung der Dämpfung mit der Wiederblockierung der Versetzungen durch Fremdatome, die unter erhöhter Temperatur zu den Versetzungen hindiffundieren, zu erklären ist. Aus den während der Auslagerung erhaltenen Dämpfungsänderungen konnte die Aktivierungsenergie für den Diffusionsvorgang ermittelt werden. Die Werte liegen in der Nähe der Werte für die Diffusion von Kohlenstoff und Stickstoff in Eisen.

1.2. Folgerungen für die Problemstellung der Arbeit

Aus den bisher besprochenen Untersuchungen geht hervor, daß, bedingt durch die Eigenschaften des Werkstoffes als Folge seiner Zusammensetzung und seines Behandlungszustandes, zu Beginn der Wechselbeanspruchung makroskopisch beobachtbar entweder eine Verfestigung, also eine Verringerung der Gleitfähigkeit kristalliner Bezirke, oder eine Entfestigung, d. h. eine Erleichterung des Gleitens, stattfinden kann. Nach der Versetzungstheorie der plastischen Verformung ist die Anzahl der gleitfähigen Versetzungen, deren Laufweg sowie die Art und Dichte der Gleithindernisse für das Spannungs-Dehnungs-Verhalten maßgebend. Daraus folgt in Übereinstimmung mit den für die einsinnige Belastung entwickelten Modellen der Versetzungstheorie, daß als Startbedingung für die plastische Verformung auch bei der Wechselbeanspruchung frei bewegliche Versetzungen im Gitter vorhanden sein oder erzeugt werden müssen.

Bei normalisierten Baustählen reichen offensichtlich auch Spannungsamplituden unterhalb der ausgeprägten Streckgrenze aus, um während der Wechselbeanspruchung frei bewegliche Versetzungen in größerem Ausmaß zu erzeugen. Vermutlich als Folge davon wird die ausgeprägte Streckgrenze abgebaut, und es kann eine plastische Verformung mit anschließender Verfestigung stattfinden, die sehr wahrscheinlich die Ursache für das Eintreten eines Dauerbruches bei diesen Stählen auch im Spannungsbereich unterhalb der ursprünglichen Streckgrenze ist und damit Bedeutung für das Wechselverfestigungsverhalten von Baustählen haben dürfte. Der die Verfestigung erst ermöglichende Plastizierungsprozeß sollte deshalb im Mittelpunkt weiterer Untersuchungen stehen.

Der in normalisierten Baustählen bei Spannungsamplituden unterhalb der ausgeprägten Streckgrenze zunächst ablaufende Plastizierungsprozeß, der aufgrund der dabei auftretenden Dehnungs-Amplitudenerhöhung in der Literatur als Entfestigung bezeichnet wird, ist mit der nach einer der Wechselbeanspruchung vorangegangenen Kaltverformung zu beobachtenden Entfestigung nicht vergleichbar. Durch die Kaltverformung sind bereits zu Beginn der Wechselbeanspruchung eine große Anzahl im Prinzip gleitfähiger, aber durch ihre Anordnung in einer Versetzungs-Zellstruktur oder -Bandstruktur bewegungsbehinderter Versetzungen vorhanden. Die Entfestigung ist hier auf die Umordnung der Versetzungsstruktur und die dabei teilweise Beseitigung von Gleithindernissen zurückzuführen, während die in den normalisierten Baustählen festgestellte Dehnungs-Amplitudenerhöhung auf die Erzeugung von gleitfähigen Versetzungen durch die Aktivierung von Versetzungsquellen beruht.

Nach den vor allem über eine Interpretation der Hall-Petch-Beziehung [52, 53] entwickelten Modelle zur Theorie der Streckgrenze von Vielkristallen [54 ÷ 60] ist eine größere Zahl frei beweglicher Versetzungen erst beim Überschreiten der oberen Streckgrenze zu erwarten. Als Ursache für die Versetzungsvermehrung werden allgemein die durch Versetzungsaufstauungen, in einigen bereits bei Spannungen unterhalb der Streckgrenze plastizierten Körnern [61 ÷ 64], hervorgerufenen Spannungskonzentrationen angesehen, die mit dem Erreichen der oberen Streckgrenze groß genug sind, in den sich bis dahin noch elastisch verhaltenden Nachbarkörnern gleitfähige Versetzungen zu induzieren. Mit diesen Überlegungen läßt sich der bei den normalisierten Baustählen während der Wechselbeanspruchung auftretende Plastizierungsprozeß nicht ohne weiteres erklären, da bereits bei Spannungsamplituden weit unterhalb der oberen Streckgrenze eine Dehnungs-Amplitudenerhöhung beobachtet wird, die wesentlich größer ist als die bei einer entsprechenden Spannung im Zugversuch feststellbaren Mikrodehnung. Es ist deshalb die Frage zu stellen, wie die für den Dehnungs-Amplitudenanstieg erforderlichen freien Versetzungen auch bei Spannungsamplituden unterhalb der Streckgrenze erzeugt werden können.

Nach den Versuchsergebnissen beginnt bei der Wechselbeanspruchung die Plastizierung in mehreren Körnern gleichzeitig und breitet sich vermutlich von dort dann rund um diese aus. In Übereinstimmung mit der Interpretation der bei statischer Belastung gemessenen Mikroverformungen werden in den primär plastizierten Körnern, wahrscheinlich aufgrund höherer Schubspannungen infolge ihrer günstigen Orientierung zur Beanspruchungsrichtung oder infolge örtlicher Spannungskonzentrationen in der Probe, z. B. durch Einschlüsse oder Oberflächenkerben, in einer oder mehreren

parallelen Gleitebenen bereits bei Spannungsamplituden unterhalb der ausgeprägten Streckgrenze freie Versetzungen erzeugt. Jedesmal, wenn aufgrund der äußeren Spannung die in der Gleitebene wirksame Schubspannung größer wird als die Reibspannung, können sich diese Versetzungen unter dem Einfluß der Spannungsdifferenz frei bewegen bis sie sich an einem größeren Hindernis, z. B. einer Korngrenze aufstauen müssen. Nach Eshelby und Stroh [65 ÷ 68] verursachen sie dort eine Spannungskonzentration, die bis ins Nachbarkorn reicht. Dadurch werden blockierte Versetzungsquellen im Nachbarkorn, die dort in der Nähe der Aufstauung liegen, für eine Aktivierung besonders begünstigt. Da nach der Theorie die Spannungserhöhung unter anderem von der freien Aufstaulänge der Versetzungen abhängt, und diese z. B. nach der Streckgrenzen-Theorie von Petch und Cottrell [53, 54, 57] als proportional dem Korn-durchmesser angenommen wird, ist zu erwarten, daß der Quellen-Aktivierungsprozeß bei gleicher äußerer Spannung in grobkörnigem Material leichter als in feinkörnigem abläuft. Die Versuchsergebnisse von Klesnil und Mitarbeitern [39] ergeben für die technische Dauerwechselfestigkeit eine Korngrößenabhängigkeit, wie sie diesen Überlegungen entspricht.

Die zur Aktivierung der blockierten Versetzungsquellen erforderliche Loslöse-Schubspannung hängt von der Art und Dichte der die Versetzungen blockierenden Ausscheidungen oder Fremdatome ab. Da es offenbar nicht gelingt, bei äußeren Spannungen unterhalb der oberen Streckgrenze diese kritische Schubspannung direkt über die Aufstauung freier Versetzungen im Nachbarkorn aufzubringen, so ist zu diskutieren, ob durch eine Wechselbeanspruchung unterhalb der Streckgrenze eine allmähliche Beseitigung der Aktivierungshindernisse und dadurch die Herabsetzung der Quellen-Aktivierungsspannung erfolgen kann. Dazu sollte als eine Möglichkeit die Befreiung der blockierten Versetzungen durch spannungsinduzierte Diffusion senkrecht zur Versetzungslinie oder längs der Versetzungslinie in Betracht gezogen werden. Wird angenommen, daß die Behinderung der Versetzungsbewegung durch Teilchen in der unmittelbaren Umgebung der Versetzung verursacht wird, so ist die Auflösung der Teilchen nach der kürzlich von Gleiter [69, 70] beschriebenen Diffusion im Spannungsfeld einer auf die Teilchen auflaufenden Stufenversetzung vorstellbar, indem infolge des großen Potentialgradienten zwischen dem Teilchen und der Versetzung Teilchenatome sukzessiv in die Matrix diffundieren. Die Beseitigung von metastabilen Ausscheidungsstrukturen, z. B. feinen Karbidausscheidungen in der Ferritmatrix von abschreckgealterten Stählen, durch eine Wechselbeanspruchung, wie sie von McGrath und Bratina [44, 71] durch elektronenmikroskopische Durchstrahlungsaufnahmen nachgewiesen wurde, könnte durch die erwähnte spannungsinduzierte Diffusion hervorgerufen worden sein. Vor allem auf Langzeit-Dämpfungsmessungen bezogen, zeigen mehrere Autoren [72 ÷ 79], daß eine auf blockierte Stufenversetzungen wirkende Wechselfeldspannung zur Diffusion der blockierenden Fremdatome längs der Versetzungslinie führen kann, wenn dabei die Bindung der Fremdatome senkrecht zur Versetzungslinie erhalten bleibt. Dadurch können im Laufe der Zeit größere freie Versetzungsabschnitte entstehen, d. h. die Blockierung der Versetzung wird dabei schwächer werden. Die spannungsinduzierte Diffusion von Kohlenstoff und Stickstoff im Ferrit dürfte auch bei Raumtemperatur und niedrigen Spannungen noch leicht möglich sein. Die sukzessive Befreiung blockierter Versetzungen durch einen solchen Prozeß bis die für die an

der Versetzung wirkende Schubspannung charakteristische Ausbruchslänge erreicht wird, erfordert in Abhängigkeit der Spannungsamplitude eine bestimmte Lastwechselzahl, so daß der Beginn des bei Spannungsamplituden unterhalb der ausgeprägten Streckgrenze beobachteten, allmählich ablaufenden Plastizierungsprozesses erst nach mehreren Belastungszyklen makroskopisch feststellbar sein sollte.

Aus den bisher bekannten Untersuchungen an allgemeinen Baustählen [29, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 48], bei denen die Änderungen der mechanischen Eigenschaften während der Wechselbeanspruchung verfolgt wurden, ist über den Beginn und den Verlauf des Plastizierungsprozesses in Abhängigkeit der aufgebrachtten Spannungsamplitude noch kein einheitliches Bild zu gewinnen. Die Ursache mag bei den jeweils unterschiedlichen Versuchsbedingungen und unter Umständen in der Darstellung der Versuchsergebnisse liegen. In einigen Fällen wurden Biegeumlauf- und Torsionsversuche gefahren, in anderen reine Zug-Druck-Belastung aufgebracht. Bei allen Experimenten lag die Belastungsfrequenz so hoch, daß der genaue Beginn von Eigenschaftsänderungen zumindest bei höheren Lasthorizonten nicht genau erfaßt werden konnte. Nur in einem Fall wurde auf die starke Probenerwärmung hingewiesen, die bei den angegebenen Probenabmessungen und Frequenzen sicherlich auch bei den anderen Versuchen zu erwarten ist, insbesondere bei Zug-Druck-Belastung. Es ist klar, daß solche Temperaturerhöhungen den Plastizierungsablauf beeinflussen, speziell wenn mit Diffusionsvorgängen gerechnet werden muß. Der Vergleich wird zusätzlich erschwert, weil die Korngröße meist nicht angegeben wurde; systematische Untersuchungen ihres Einflusses erfolgten bisher nur in einer Arbeit [39]. Aus den genannten Gründen sollte für die Fortführung der Untersuchungen zur weiteren Klärung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens zunächst in besonders auf dieses Ziel abgestimmten Experimenten der Beginn des Plastizierungsprozesses und sein Verlauf bei vorgegebenen Spannungsamplituden mit der Korngröße als Parameter ermittelt werden. Neben der Registrierung der Dehnungs-Amplitudenänderung und der mechanischen Hysterese sollten Ultraschall-Schwächungsmessungen im Megahertzgebiet zusätzliche Aussagen ermöglichen, da nach der bereits erwähnten Versetzungsdämpfungstheorie von Granato und Lücke [50, 51] durch die z. B. mittels Ultraschallimpulse sehr kleiner Amplitude zu elastischen reibungsbehinderten Schwingungen angeregten Versetzungen ein Dämpfungsanteil entsteht, welcher der vierten Potenz der mittleren Versetzungsschleifenlänge zwischen den Verankerungspunkten und der Versetzungsdichte proportional ist. Der nach der Theorie bestehende Zusammenhang zwischen

der Koerzitivkraft und der Versetzungsdichte bei plastischer Verformung konnte bei Ni-, Co- und Fe-Einkristallen im Experiment bestätigt werden [80, 81]. Es ist deshalb zu prüfen, ob mit Koerzitivkraft-Bestimmungen die Ergebnisse aus den anderen Versuchswerten ergänzt werden können. Dieses Verfahren dürfte allerdings den Nachteil haben, daß nicht kontinuierlich während des Versuches gemessen werden kann.

1.3. Begründung und Ziel der Arbeit

Aus der Analyse der bisherigen Untersuchungen über Vorgänge im wechselbeanspruchten Metallgefüge und speziell aus den Beobachtungen bei allgemeinen Baustählen wird gefolgert, daß der in normalisierten Baustählen bei Spannungsamplituden unterhalb der ausgeprägten Streckgrenze im ersten Stadium der Wechselbeanspruchung auftretende, auch als Entfestigung bezeichnete Plastizierungsprozeß und die damit verbundenen Vorgänge als Voraussetzung für die dem Werkstoffversagen vorausgehende Verfestigung anzusehen sind. Das Verständnis der den Plastizierungsprozeß ermöglichenden Vorgänge ist deshalb für die Beurteilung der Wechselfestigkeit dieser Stähle von Bedeutung.

Die bisher bekannten Versuchsergebnisse vermitteln kein geschlossenes Bild über den Beginn und den Verlauf des Plastizierungsprozesses in Abhängigkeit der Spannungsamplitude und der für das Verformungsverhalten vielkristalliner Werkstoffe wichtigen Korngröße. Eine Klärung des Vorganges konnte bis jetzt nur insoweit erreicht werden, als elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, daß, zunächst von einzelnen plastizierten Bezirken ausgehend, sich die plastische Deformation, wahrscheinlich von Korn zu Korn, über die ganze Probe ausbreitet, wobei die ausgeprägte Streckgrenze abgebaut wird.

Das Ziel der Arbeit besteht deshalb darin, den in Baustählen bei der Wechselbeanspruchung mit Spannungsamplituden unterhalb der Streckgrenze auftretenden Plastizierungsprozeß sowie die dazu führenden Vorgänge über das Spannungs-Dehnungs-Verhalten und die Ultraschallschwächung im Megahertzgebiet unter Berücksichtigung der Korngröße zu untersuchen. Mit Hilfe der Versetzungstheorie soll angestrebt werden, Voraussetzungen für das Zustandekommen und den Beginn des Plastizierungsprozesses abzuleiten sowie Hinweise für die innerhalb der Versetzungsanordnung ablaufenden Mechanismen zur Ausbreitung der plastischen Verformung zu finden.

2. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ermöglicht die Darstellung und Registrierung

- der auf die Probe wirkenden Kraft als Funktion der Zeit;
- des Verformungsweges der Probe über eine definierte Meßlänge in Abhängigkeit der Zeit;
- aus a) und b) des Kraft-Weg-Verlaufes innerhalb eines Lastwechsels (mechanische Hysterese);
- mit a) der Ultraschall-Echohöhenänderung als Funktion der Kraft innerhalb eines Lastwechsels;
- mit b) der Ultraschall-Echohöhenänderung als Funktion des Verformungsweges innerhalb eines Lastwechsels.

Der schematische Versuchsaufbau ist aus *Bild 7*, der Versuchsstand aus *Bild 8* zu ersehen.

2.1. Beanspruchungsrichtung

Es wurde ein Pulser, Typ PH 001 D, Bauart „Schenk“, für Zug-Druck-Belastungen bis zu 20 Mp verwendet. Die Einrichtung kann in zwei Frequenzbereichen gefahren werden, im Schnellantrieb nach dem Resonanzprinzip bei sinusförmiger Belastungskurve mit ungefähr $30 \div 40$ Hz und im Langsamantrieb mit Dreiecksbelastung, bei der die Belastungsgeschwindigkeit im Bereich bis 8 Mp, wahlweise 2100 kp/sec oder 4200 kp/sec beträgt, je nach Lastamplitude mit $0,05 \div 0,3$ Hz. Die Kraft wird beim Langsamantrieb über die Verformung einer der Probe vorgeschalteten Feder

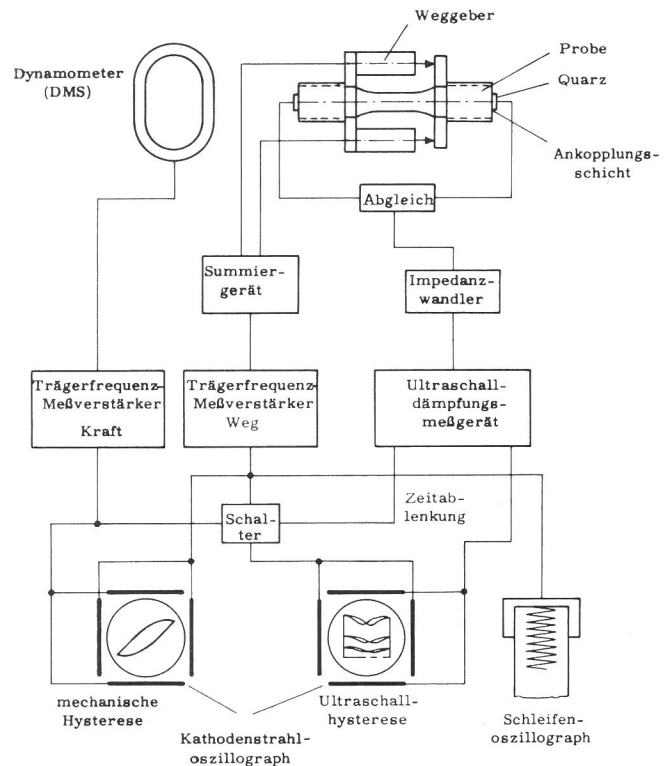


Bild 7
Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues

Bild 8
Ansicht des Versuchsaufbaues

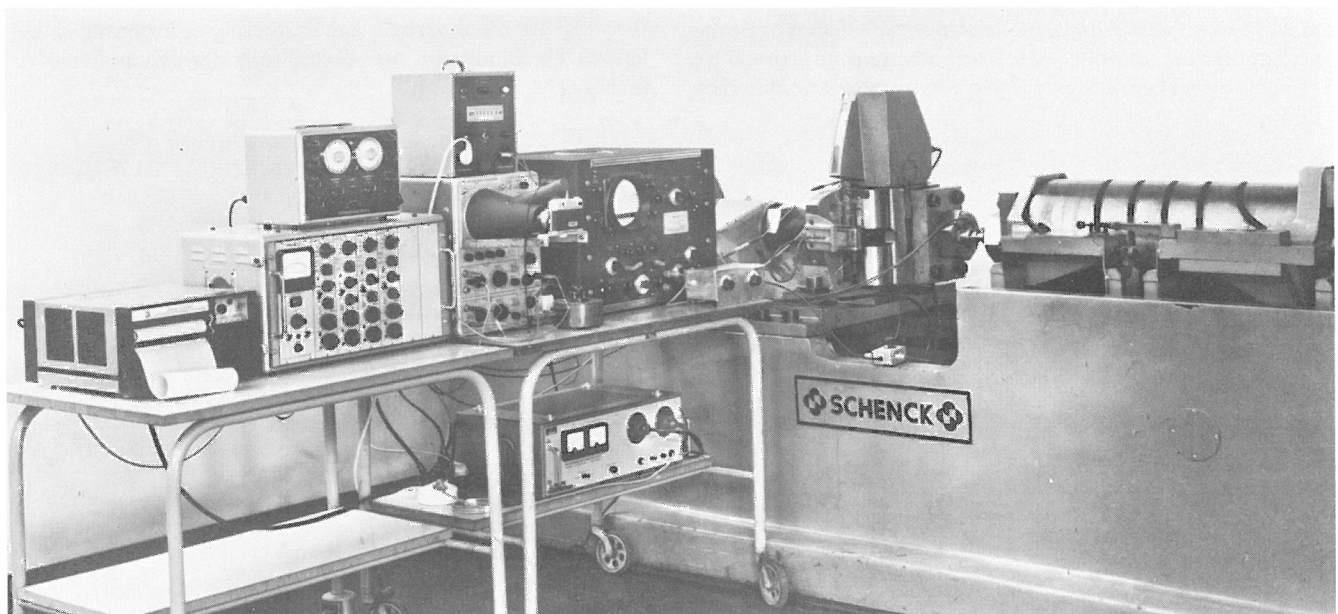


Bild 9

Spannvorrichtung der Prüfmaschine mit einseitig eingespannter Probe, den an der Probe befestigten induktiven Wegaufnehmern (Bauart: Baldwin-Hottinger-Meßtechnik) und der Koppelungsbuchse für die Quarzschwinger

durch einen Spindeltrieb aufgebracht, dessen Bewegung die Sollwert-Schalter am Dynamometer regeln. Dadurch ist die Maschine sowohl für reine Wechselbelastung als auch für Schwellbelastung geeignet und hat den Vorteil, daß unmittelbar nach dem Wechsellastversuch ein Zugversuch mit gleicher Belastungsgeschwindigkeit gefahren werden kann.

2.2. Messen der mechanischen Größen

Die Messung der an der Probe wirkenden Kraft erfolgte über Dehnungsmeißstreifen, die temperaturkompensiert auf dem Dynamometer des Pulsers angeordnet sind. Der Verformungsweg der Probe über eine definierte Meßlänge wurde über zwei induktive Wegaufnehmer vom Typ WIT der Hottinger-Baldwin-Meßtechnik ermittelt, die symmetrisch zur Probenachse in einer Ebene während des Versuches angeordnet waren (Bild 9). Zur Kontrolle von Biegespannungen vor dem Versuch konnten die Geber in einer Ebene verbleibend voll um die Probenachse geschwenkt werden. Die Meßwerte der beiden Wegaufnehmer ermöglichen die Ermittlung von Biegedehnungen und ergeben summiert und gemittelt den Verformungsweg der Probe. Die Verstärkung der von den Kraft- und Wegaufnehmern kommenden Signale über einen Mehrkanal-Trägerfrequenz-Meßverstärker vom Typ KWS/6T-5 der Hottinger-Baldwin-Meßtechnik ermöglichte ihre Darstellung auf einem Registriergerät.

2.3. Anordnung zum Messen der Ultraschallschwächung

Für die Erzeugung der Ultraschallimpulse und den Empfang der Rückwändechos diente ein Ultraschall-Dämpfungskomparator der Firma Sperry Products Inc. in Verbindung mit Longitudinal-Quarzschwingern, die über Salol (Fa. Merck)

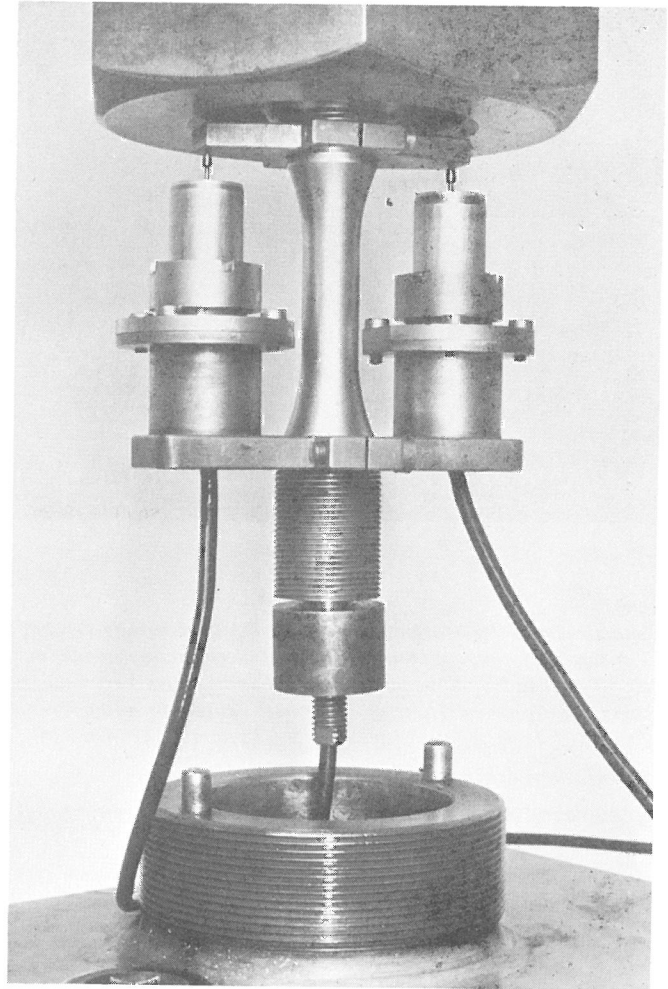
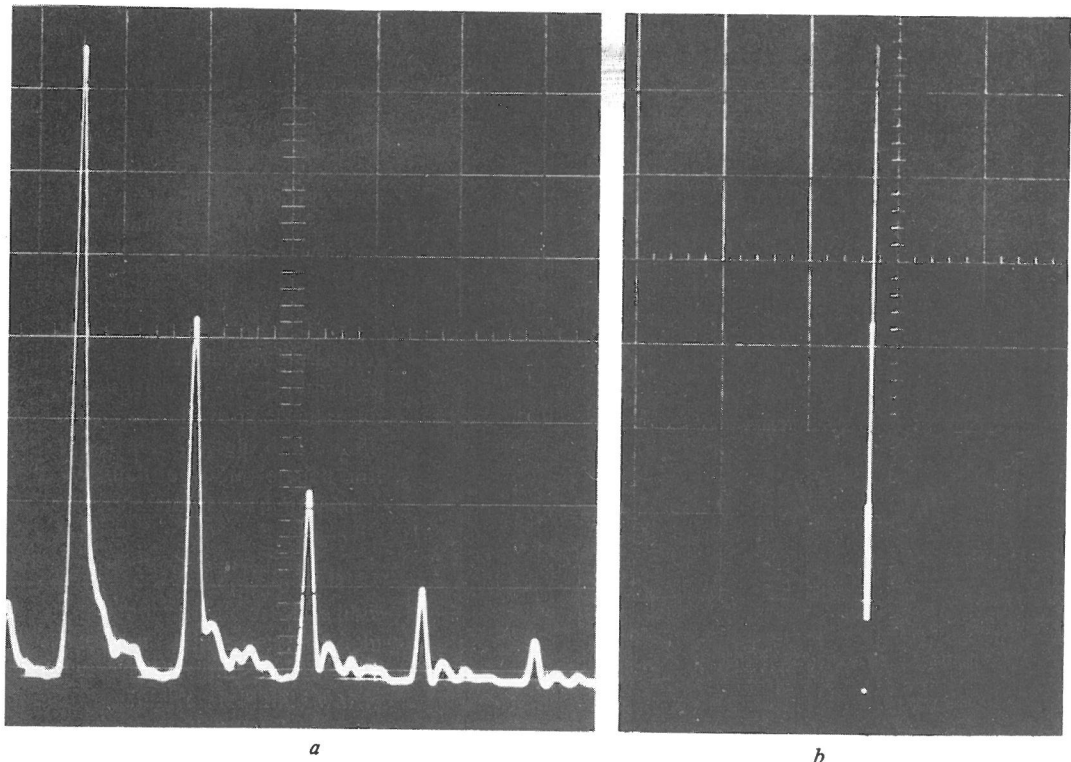


Bild 10

- a) Echohöhe eines Ultraschallimpulses als Funktion der Laufzeit durch die Probe
- b) Nach Abschaltung der Zeitablenkung aus der Echofolge entstehende Echohöhensäule



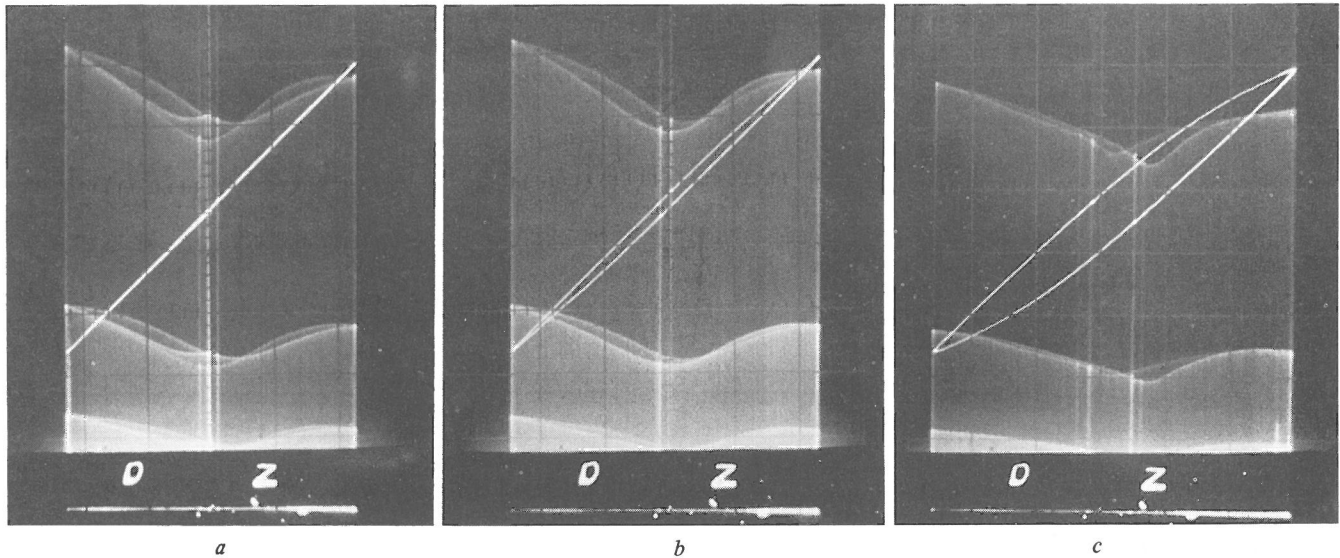


Bild 11

Kathodenstrahl-Oszillogramm des Kraft-Verformungsweg-Verlaufes (Z = Zug-Verformungsbereich, D = Druck-Verformungsbereich) und der Ultraschall-Echohöhenänderung als Funktion des Verformungsweges (Echohöhenhysterese) innerhalb eines Belastungszyklus (St 52-3, 3. Serie, $d_K = 22 \mu\text{m}$, $\sigma_a = 29,0 \text{ kp/mm}^2$, Vers.-Nr. 234)

- a) Aufnahme des ersten Lastwechsels
- b) Aufnahme eines Lastwechsels zu Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung ($N = 50$)
- c) Aufnahme eines Lastwechsels während des wesentlichen Verformungsweg-Amplitudenanstieges ($N = 150$)

angekoppelt wurden. Die für Wechselbeanspruchungs-Versuche notwendige Probenform erforderte die Durchschallung der Probe von beiden Stirnseiten her, um durch die Verkürzung des Schallweges bis zur Rückkehr an einen Quarz mindestens vier gut auswertbare Echos bei Berücksichtigung möglicher Werkstoff-Dämpfungserhöhungen zu erhalten. Unterschiedliche Ankopplungsverhältnisse an den Quarzen, z. B. durch die nicht immer ganz gleiche Dicke der Salol-schicht, konnten durch einen elektrischen Dämpfungsabgleich in Form eines Spannungsteilers kompensiert werden. Die für die Abstimmung des Resonanzkreises störende Kapazität der Zuleitungskabel wurde in zwei induktiv gekoppelte und getrennt abgleichbare Schwingkreise einbezogen.

Um den Echohöhenverlauf in Abhängigkeit der augenblicklichen Probenverformung oder der aufgetragenen Kraft innerhalb eines Lastwechsels erfassen zu können, wurde eine Schaltung aufgebaut, die es erlaubt, wahlweise entweder die Echohöhen als Funktion der Laufzeit auf einem Kathodenstrahl-Oszillographen darzustellen (Bild 10 a) oder durch die Abschaltung der Zeitablenkung, wodurch dann eine Echofolgensäule entsteht (Bild 10 b), auf die nunmehr spannungsproportionales Signal zu geben. Die dadurch mögliche Aufzeichnung, z. B. der Änderung der Echohöhensäule durch die Probenverformung während eines Belastungszyklus, ist aus den Aufnahmen in Bild 11 zu ersehen.

2.4. Registriergeräte

Auf einem Zweikanal-Kathodenstrahl-Oszillographen, Typ Tektronix 502, wurde die mechanische Hysterese und der Echohöhenverlauf als Funktion des Probenverformungsweges gleichzeitig aufgezeichnet und photographisch festgehalten (Bild 11). Dadurch ist der direkte Vergleich dieser beiden Kurven möglich. Wahlweise dazu konnte auch das Echobild in Abhängigkeit der aufgetragenen Kraft registriert werden. Die aufgetragene Kraft zur Kontrolle ihres Amplituden-Istwertes und der Verformungsweg wurden nebeneinander auf einem Lichtstrahl-Oszillographen, Typ CEC 5-124, der Firma Cons. Electrodynamics Corp. als Funktionen der Zeit aufgeschrieben.

3.1. Werkstoffe und Probenform

Als Versuchswerkstoffe standen St 37-3 und St 52-3 nach DIN 17 100 zur Verfügung. Die chemische Zusammensetzung der Stähle ist aus *Tabelle 1* zu ersehen. Das jeweils aus

	C	Si	P	S	Mn	N	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%
St 37-3	0,15	0,25	0,025	0,031	0,43	0,005	0,10	0,08
St 52-3	0,18	0,41	0,034	0,034	1,26	0,006	0,29	0,04

Tabelle 1
Chemische Zusammensetzung der Stähle

einer Charge entnommene und als warmgewalzte Stangen von 32 mm Durchmesser angelieferte Material wurde für die Versuche nach Herstellung der Probenrohlinge wärmebehandelt, um die einzelnen Korngrößen zu erzielen; die Daten dazu sind in *Tabelle 2* dargestellt. Auf die Variation der Korngröße mußte bei St 37-3 verzichtet werden, da in dem angestrebten Korngrößenbereich über 17 µm Durchmesser kein gleichmäßiger Korndurchmesser im Gefüge erreicht

Material	Serie	mittlerer Korndurchmesser µm	*)	Glüh-temperatur °C	Glüh-dauer h	Abküh-lung
St 37-3	1**)	16		890	0,5	Luft
St 37-3	2	15		890	0,5	Luft
St 52-3	1	13		880	0,5	Luft
St 52-3	2	13		880	0,5	Luft
St 52-3	3	22		980	2,0	Luft
St 52-3	4	30		990	2,0	Ofen
St 52-3	5	45		1100	2,0	Ofen

*) Kreisverfahren

**) zweimal normalisiert

Tabelle 2
Wärmebehandlung der Stähle

Material	Serie	Korndurch-messer µm	*) Belastungs-geschwindigkeit kp/sec	σ_{So} kp/mm ²	σ_{Su} kp/mm ²
St 37-3	1**)	15,5	200	41,2	30,3
St 37-3	2	14,9	200	42,1	29,7
St 52-3	1	12,9	200	46,8	38,5
St 52-3	2	13,2	2 100	47,5	44,6
St 52-3	3	22,2	2 100	40,1	39,2
St 52-3	4	32,3	2 100	37,7	35,3
St 52-3	5	45,3	2 100	31,2	31,2

*) Kreisverfahren

**) zweimal normalisiert

Tabelle 3
Mechanische Eigenschaften der Stähle

werden konnte. Die mechanischen Eigenschaften der Stähle im normalisierten Zustand sowie die durch die Korngröße sich ändernde Streckgrenze zeigt *Tabelle 3*.

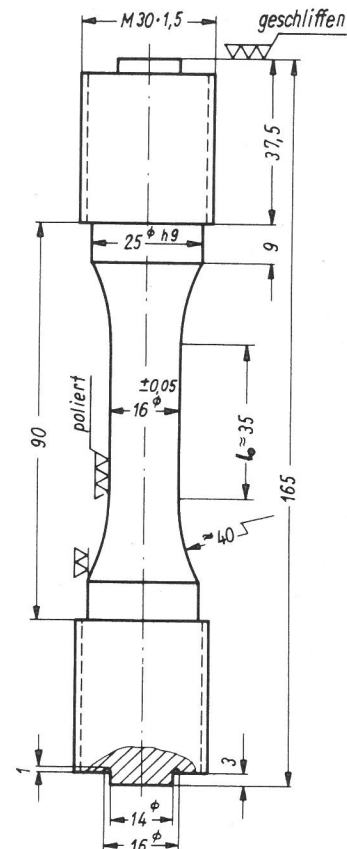


Bild 12
Probenform

Die aus *Bild 12* hervorgehende Probenform entstand unter Berücksichtigung folgender Gesichtspunkte und Erfahrungen:

Da die Verformungsweg-Messungen nur über einen bestimmten Probenbereich erfolgen können, der Ultraschall aber die ganze Probe durchlaufen muß, sollte das wesentlich beanspruchte Volumen übersehbar begrenzt und von beiden Untersuchungsmethoden erfaßt werden. So wurde zwischen dem Gewindekernquerschnitt und dem eigentlichen Probenquerschnitt ein Verhältnis von 3 : 1 gewählt. Zur Vermeidung der örtlich bevorzugten Einleitung von Vorgängen durch Spannungskonzentrationen wurde ein sehr großer Übergangsradius vom Probendurchmesser zum Gewindekernquerschnitt gewählt und die Wegaufnehmerhalterung nicht auf den zylindrischen Teil gesetzt. Die Länge des zylindrischen Teiles ergab sich aus der Forderung, auch bei Amplituden dicht unterhalb der oberen Streckgrenze ein Ausknicken der Probe im Druckbereich zu vermeiden. Vorversuche zeigten, daß die für Wechselbeanspruchungen not-

wendige Vorspannung der Gewindeverbindung über die Stirnflächen der Probe und die dadurch wechselnde Be- und Entlastung der Stirnflächen zu Oberflächendeformationen führen, denen die relativ spröde Salol-Ankopplungsschicht auf die Dauer nicht gewachsen ist. Deshalb wurden die mit Entlastungskerbene versehenen Augen für die Quarzankopplung an den Stirnflächen der Proben entwickelt (vgl. Bild 12). Die Höhe der Augen wurde so bemessen, daß durch das sich öffnende Schallfeld keine Direktreflexionen am Augenumfang entstehen. Die Stirnflächen der Augen wurden mit einer Prismahalterung parallel zueinander geschliffen.

3.2. Versuchsvorbereitung

Die Quarzschwinger mit 12 mm Durchmesser wurden in einer Zentriervorrichtung auf ungefähr 60°C erwärmt, mit Salol (Schmelzpunkt 42°C) benetzt und über die Zentrier-einrichtung auf die Augen der Probe aufgebracht. Durch Drehen des Quarzes mit der Zentriereinrichtung bildete sich infolge ihres Gewichtes stets ein annähernd gleich dünner Salolfilm zwischen Quarz und Probe aus. Nach der unterkühlten Erstarrung des Salols durch Impfen wurde jede Ankopplung durch eine getrennte Anregung der Quarze überprüft.

Vor dem Einbau der Probe in den Pulser erfolgte die genaue Einregelung der vorgesehenen Kraftamplitude mit einer Blindprobe, um bereits im ersten Lastwechsel des Versuches den Sollwert der Kraftamplitude zu erreichen. Dazu wurde nach dem Warmlaufen der Meßgeräte die Dynamometer-Dehnungsmeßstreifenbrücke auf Null abgeglichen, die Probe eingespannt und dann die beim Verspannen sich aufbauenden Kräfte von ± 100 kp auf ± 5 kp angesteuert. Anschließend erfolgte die Einregelung der gewünschten Kraftamplitude bei laufendem Pulser.

Bei der zu untersuchenden Probe war neben dem Dynamometerabgleich auch der Weggeberabgleich vor dem Verspannen durchzuführen. Über die Anzeige der Geber nach dem Verspannen konnten die durch die Einspannvorrichtung unvermeidlich hervorgerufenen Biegespannungen in der Probe abgeschätzt werden. Sie betragen maximal 2 kp/mm² im kleinsten Probenquerschnitt. Die Abstimmung des Resonanz-Schwingkreises für die Quarzschwinger erfolgte im eingebauten Zustand der Probe. Die Echofolgen der einzelnen Schwinger wurde, soweit es notwendig war, mit dem Spannungsteiler (Abgleich) durch Angleichen der Echohöhen in laufzeitabhängiger Darstellung an eine im Dämpfungskomparator mit variablen Exponenten erzeugbare und gleichzeitig auf der Elektronenstrahlröhre sichtbare e-Funktion aufeinander abgestimmt. Von der so entstehenden gemeinsamen Echofolge der Quarze wurde das erste Echo zur Ausklammerung des Nahfeldeinflusses ausgeblendet und nicht ausgewertet.

3.3. Untersuchung des Plastizierungsverlaufes

3.3.1. Spannungs-Dehnungs-Verhalten, Ultraschallschwächung

Zur Vermeidung einer Probenerwärmung während der Wechselbeanspruchung, und um auch nach der Wechselbeanspruchung das Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei einsinniger Belastung mit gleicher Belastungsgeschwindigkeit wie bei der Wechselbeanspruchung ermitteln zu können, wurden alle Versuche im Langsamantrieb mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 2100 kp/sec gefahren. Daraus ergab sich für die durchgeführten Versuche eine von der Belastungs-

amplitude etwas abhängige Lastwechselfrequenz von $0,07 \div 0,13$ Hz (vgl. unter 2.1).

Die erste an den beiden Stählen mit normalisierten Proben gefahrene Versuchsserie sollte dazu dienen, einen Überblick über die Änderung der mechanischen Eigenschaften der Stähle bei konstanter Zug-Druck-Kraftamplitude in Abhängigkeit der Lastwechselzahl vom ersten Zyklus bis zum Bruch zu gewinnen und zu sehen, welche Aussagefähigkeit Ultraschall-Schwächungsmessungen dabei haben. Dazu wurde die Kraft-Verformungsweg-Kurve (mechanische Hysteresisschleife) zusammen mit dem Ultraschall-Echohöhenverlauf über dem Verformungsweg innerhalb eines Lastwechsels und in Abhängigkeit der Lastwechselzahl entsprechend den Aufnahmen in Bild 11 photographisch festgehalten. Über die Vergrößerung der Aufnahmen konnten Änderungen von 1 % der im ersten Lastwechsel gemessenen elastischen Verformungswegamplitude – das entspricht einer Dehnungs-Meßempfindlichkeit von ungefähr 10^{-5} – noch ermittelt werden. Bei dieser Serie lag die höchste Spannungsamplitude etwas über der unteren Streckgrenze der Stähle, die Abstufung der Spannungsamplituden nach unten erfolgte unter Berücksichtigung der Regelgenauigkeit des Pulser von umgerechnet $\pm 0,5$ kp/mm² um jeweils 2 kp/mm², bis beim niedrigsten Lathorizont ein Bruch bei etwas mehr als 10^5 Lastwechseln auftrat. Es konnte auch bei hohen Spannungsamplituden keine Probenerwärmung festgestellt werden.

Vorversuche zeigten, daß die Wahl der Ultraschallfrequenz für die vorgegebene Probenform sehr eingeschränkt ist. Bei der in den normalisierten Proben vorhandenen Korngröße waren bei 15 MHz gerade noch zwei Echos auswertbar, die jedoch auch bei kleinen Spannungsamplituden gleich zu Beginn des Plastizierungsvorganges verschwanden. Mit Rücksicht auf den zu untersuchenden Korngrößeneinfluß wurde deshalb für alle Versuche eine Durchschallungsfrequenz von 5 MHz, eine Impulsdauer von 1 μ sec und die maximal mögliche Impulshöhe des Gerätes gewählt. Vor jedem Versuch erfolgte die Überprüfung der Linearität des Echoempfangsverstärkers. Die Impulshöhe und die Echoempfangsverstärkung wurden während des Versuches nicht geändert.

Zur genaueren Ermittlung des Beginns einer merklichen Änderung der Verformungswegamplitude erfolgte bei den weiteren Untersuchungen zusätzlich eine zeitabhängige, kontinuierliche Aufzeichnung des Verformungsweges im Maßstab $25 \div 100$ μ m/cm. Dadurch konnte eine höhere Darstellungsgenauigkeit erreicht und die infolge der nicht ideal geregelten Kraftamplitude auftretenden Schwankungen der Verformungswegamplitude durch eine Ausgleichsrechnung über mehrere Lastwechsel berücksichtigt werden. Die Spannungs-Amplitudenabstufung wurde jetzt bis zu einer unteren Grenze fortgeführt, bei der auch nach 10^5 Lastwechseln keine Änderung der Verformungswegamplitude mehr feststellbar war. Nach dem Ablauf des wesentlichen Plastizierungsvorganges wurde die Wechselbeanspruchung beendet und direkt im Pulser mit der gleichen Belastungsgeschwindigkeit wie bei der Wechselbeanspruchung die Kraft-Verformungsweg-Kurve über die Streckgrenze hinaus bis zu 2 mm Verformungsweg aufgezeichnet.

3.3.2. Koerzitivkraftverhalten

Ergänzend zu den genannten Untersuchungsmethoden erfolgte eine orientierende Ermittlung der Koerzitivkraft in Abhängigkeit der Lastwechselzahl. Dazu mußte die Probe

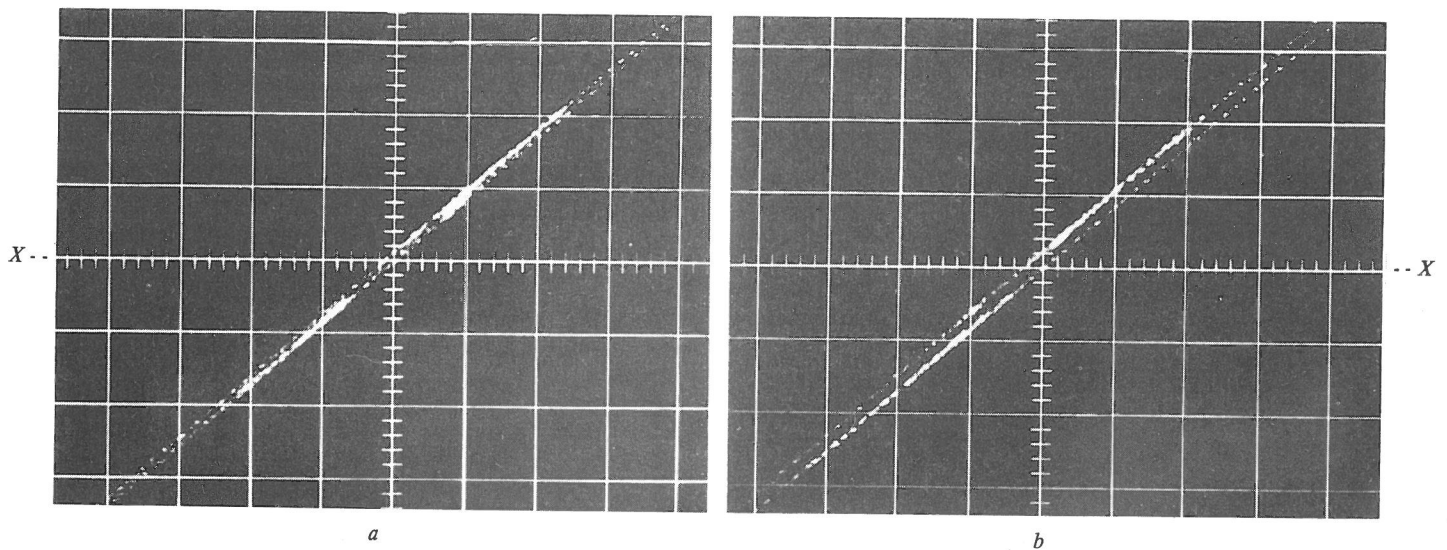


Bild 13
 Kathodenstrahl-Oszillogramm zur Ermittlung des mikroplastischen Anteiles ϵ_{pm} der Dehnungsamplitude in Abhängigkeit der Spannungsamplitude σ_a . Auf der mit X - X bezeichneten Spannungs-Nulllinie entspricht eine Rastereinheit (auf dem Bildschirm 1 cm) einer Dehnung von $2 \cdot 10^{-5}$, eine Rastereinheit senkrecht dazu entspricht $0,54 \text{ kp/mm}^2$

Beispiel: St 52-3, 4. Serie, mittlerer Korndurchmesser $d_K = 30 \mu\text{m}$, Belastungsgeschwindigkeit = 2100 kp/s

a) $\sigma_a = 5,4 \text{ kp/mm}^2$ b) $\sigma_a = 16,1 \text{ kp/mm}^2$

für jede Messung ausgebaut werden. Nach vorheriger Sättigung der Probe in einer Spule, deren Länge der dreifachen Probenlänge entsprach, wurde die Koerzitivkraft über die Messung des zur Beseitigung der Remanenz notwendigen Entmagnetisierungsstromes bestimmt. Zur Anzeige der Induktion diente ein Oerstedmeter, Bauart „Förster“; der Kompensationsstrom wurde als Spannungsabfall an einem Normal-Widerstand über ein Digital-Voltmeter abgelesen.

3.3.3. Mikroverformungen

Für die Erörterung der Versuchsergebnisse mit Hilfe der Versetzungstheorie interessierte das Mikro-Verformungsverhalten der Serien 2 ÷ 5 von St 52-3. Um direkt aus dem Versuch Dehnungswerte zu erhalten, wurde anstelle der induktiven Wegaufnehmer mit Dehnungsmeßstreifen gearbeitet. Dazu waren auf je einer Probe dieser Serien zwei Dehnungsmeßstreifen symmetrisch zur Probenachse in der Mitte des zylindrischen Probenteiles aufgeklebt worden, um eventuell in der Meßebene auftretende Biegedehnungen feststellen und über die Summierung der Gebersignale kompensieren zu können. Zugunsten der Dehnungs-Meßgenauigkeit wurde auf die kontinuierliche Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Verlaufes während des jeweils mit einer bestimmten Spannungsamplitude gefahrenen Belastungszyklus verzich-

tet. Die Beschränkung der Registrierung auf die Umgebung des Spannungs-Nulldurchganges auf dem Bildschirm eines Kathoden-Oszillographen entsprechend den Aufnahmen in Bild 13 ermöglichte die Aufzeichnung der plastischen Mikroverformungen mit einer Empfindlichkeit von $2 \cdot 10^{-6}$ ohne Übersteuerung der Meßgeräte. Die Abhängigkeit der Hysteresisschleifenbreite ($\sigma = 0$) von der Spannungsamplitude konnte nur in großen Spannungs-Amplitudenschritten ermittelt werden, um den Einfluß der jeweils vorhergegangenen Belastungszyklen möglichst klein zu halten. Die Versuche wurden im Pulser ebenfalls wie die Wechselbeanspruchungs-Versuche mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 2100 kp/sec gefahren.

3.3.4. Elektronenmikroskopische Untersuchungen

Von Proben der 2. Serie des St 52-3 wurden vor der Wechselbeanspruchung und nachdem sie verschiedene Stadien des Plastizierungsprozesses bei jeweils der gleichen Spannungsamplitude erreicht hatten, elektronenmikroskopische Durchstrahlungsaufnahmen in einem 100-kV-Elektronenmikroskop, Typ Elmiskop I der Firma Siemens AG, aufgenommen. Zur Herstellung der Durchstrahlungsproben wurden zunächst aus ungefähr 1 mm starken, der Versuchsprobe durch Trennschleifen entnommenen Scheiben nach dem Vorschleifen auf 0,5 mm Stärke durch elektrolytisches Polieren ungefähr 0,1 mm starke Folien angefertigt. Nach dem beidseitigen, deckungsgleichen Aufbringen von Kunststoffband-Plättchen mit 2,2 mm Durchmesser über eine Maske auf die Folie erfolgte auf elektrolytischem Wege das Herauslösen der Durchstrahlungsproben [82]. Die auf diese Weise aus der Folie herausgetrennten Proben wurden nach dem Ablösen des Kunststoffbandes mit Aceton nach dem Jet-Verfahren unter dem Flüssigkeitsspiegel des Elektrolytbades gedünnt. Als Elektrolyt diente Eisessig mit 23 % Perchlorsäure.

4. Versuchsergebnisse

4.1. Untersuchung des Plastizierungsverlaufes und seiner Abhängigkeit von der aufgetragten Spannungsamplitude

4.1.1. Änderung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens

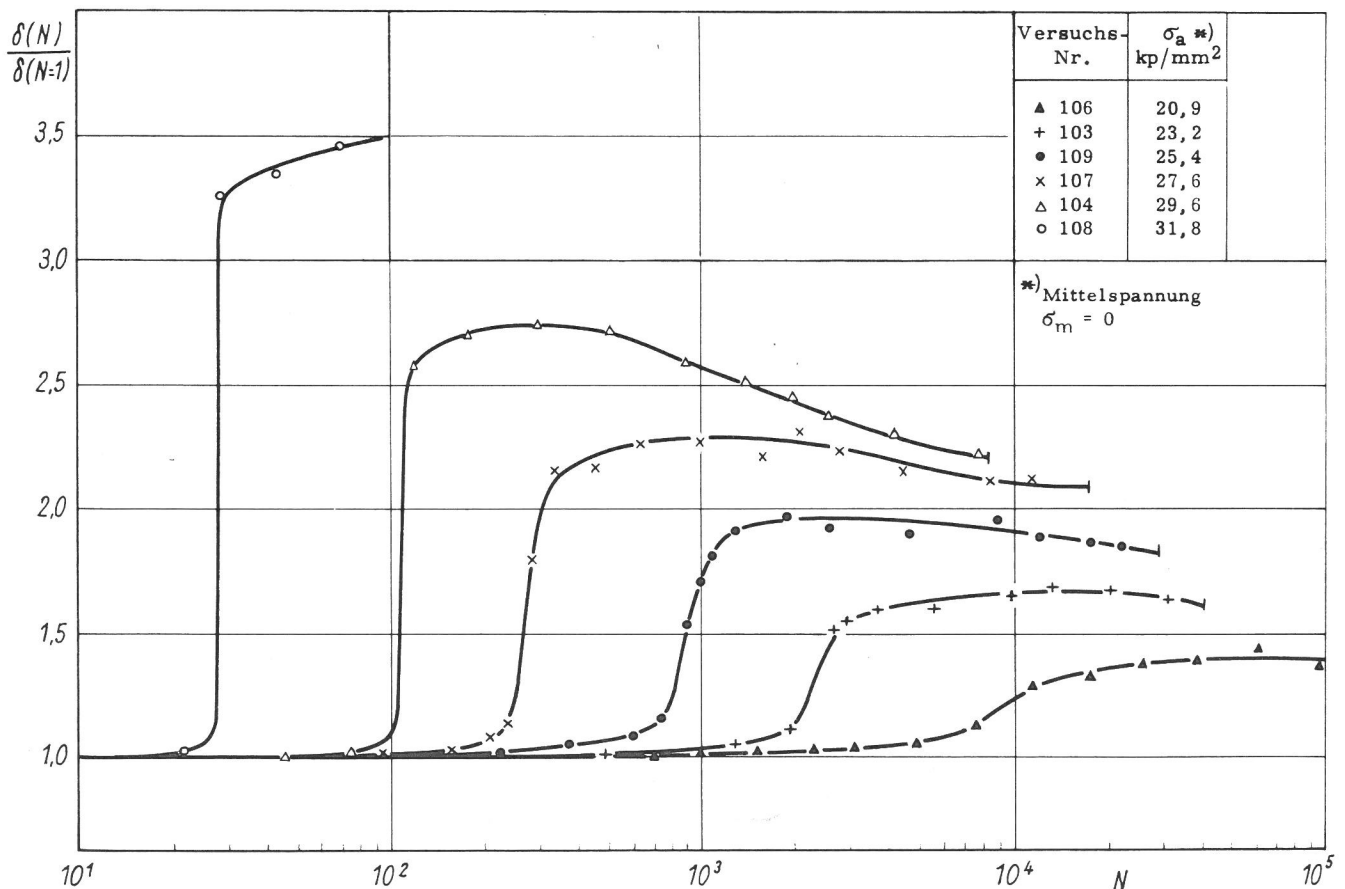
Die Änderung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens wurde entsprechend dem Versuchsaufbau über die Änderung der Verformungsamplitude $\delta(N)$ und des Kraft-Verformungsweg-Verlaufes (mechanische Hysteresisschleife) in Abhängigkeit der Lastwechselzahl bei konstant gehaltener Zug-Druck-Kraftamplitude beobachtet. Die jeweils an der 1. Serie der beiden Stähle St 52-3 und St 37-3 durchgeführten Versuche geben einen Überblick, wie die aufgetragene Spannungsamplitude σ_a ($\sigma_m = 0$) im Bereich unterhalb der ausgeprägten Streckgrenze den Verlauf der Verformungswegamplitude in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N beeinflusst. Aus den Bildern 14 und 15, in denen die normierte Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ aufgetragen wurde, ist klar zu ersehen, daß der Beginn einer merklichen Ver-

formungsweg-Amplitudenerhöhung, die Zunahme der Verformungswegamplitude pro Lastwechsel und die Höhe des sich einstellenden Maximums der Verformungswegamplitude von der Spannungsamplitude abhängen. Mit wachsender Spannungsamplitude wird die für die erste feststellbare Erhöhung der Verformungswegamplitude, z. B. 1 % der elastischen Verformungswegamplitude, sich ergebende Lastwechselzahl kleiner, nimmt die Änderung der Verformungswegamplitude pro Lastwechsel während der Erhöhung der Verformungswegamplitude zu und steigt die maximal sich einstellende Verformungswegamplitude an. Die Erhöhung der Verformungswegamplitude setzt nach dem Ablauf von einigen Prozent der Probenlebensdauer ein und ist nach $5 \div 10\%$ der Bruch-Lastwechselzahl im wesentlichen abgeschlossen. Das Maximum der Verformungswegamplitude tritt um so

Bild 14

Normierte Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N

St 37-3 Serie 1 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 16 \mu\text{m}$



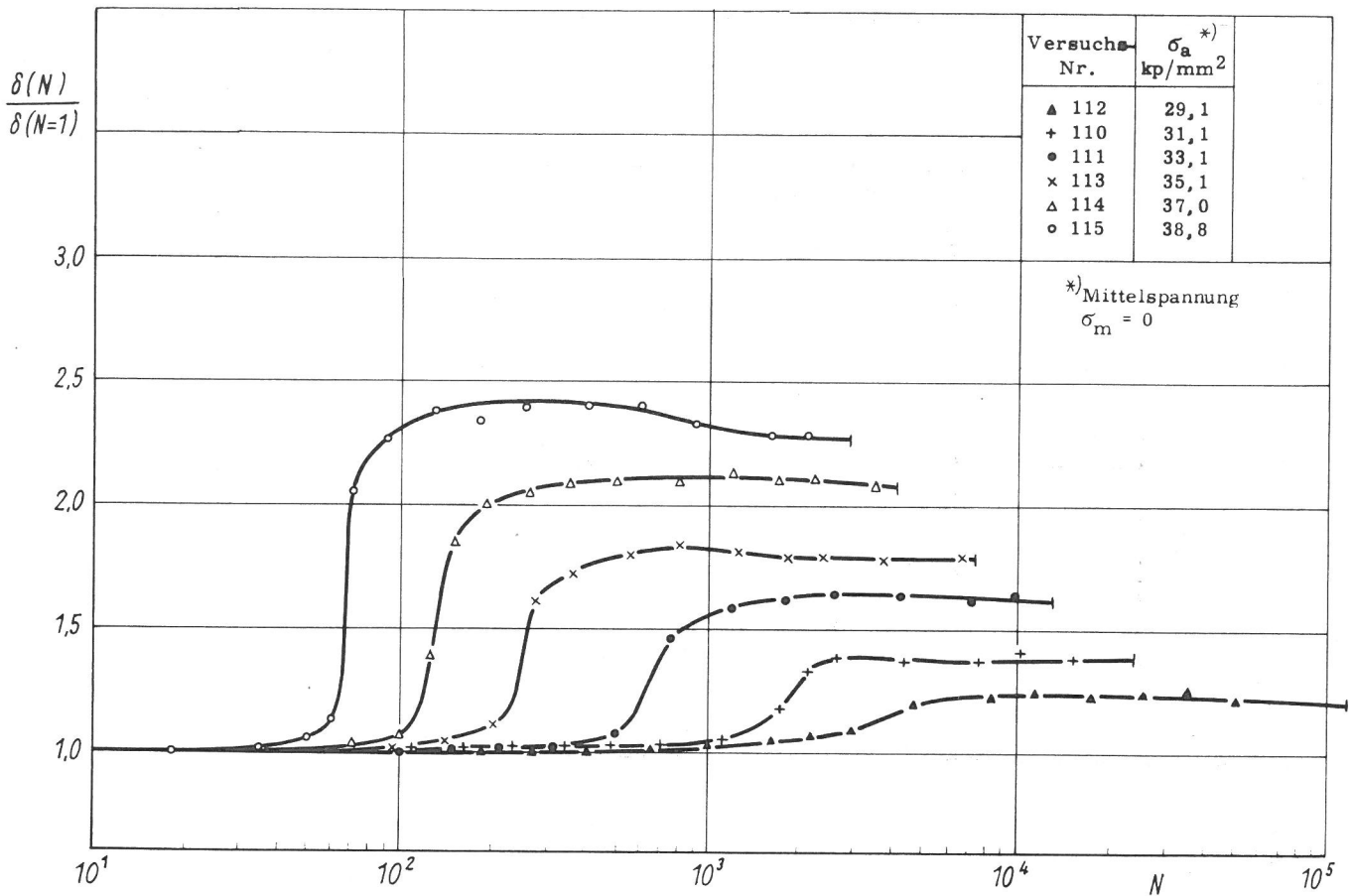


Bild 15
Normierte Verformungsamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N
St 52-3 Serie 1 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$

deutlicher in Erscheinung je höher die Spannungsamplitude gewählt wird. Der Abfall der Verformungswegamplitude hält bis zum Bruch an, er ist bei der 1. Serie von St 37-3 im allgemeinen größer als bei der 1. Serie von St 52-3.

Wie aus Bild 16 hervorgeht, ist die Verformungswegamplitude $\delta(N=1)$ jeweils des 1. Lastwechsels proportional der aufgetragenen Spannungsamplitude σ_a ; für beide Stähle gilt der gleiche Proportionalitätsfaktor; im gefahrenen Belastungsbereich zeigen also beide Stähle zu Beginn der Wechselbeanspruchung nahezu elastisches Verformungsverhalten (vgl. dazu unter 5.1). Durch den Vergleich der sich maximal einstellenden Verformungswegamplitude $\delta_{\max}(N)$ mit der im ersten Lastwechsel beobachteten Verformungswegamplitude $\delta(N=1)$ kann in Bild 16 für jeden der beiden Stähle eine Grenz-Spannungsamplitude σ_{aG} abgelesen werden, deren Überschreitung zu einer Erhöhung der Verformungswegamplitude während der Wechselbeanspruchung führt. Sowohl für St 37-3 als für St 52-3 liegt σ_{aG} unterhalb der für diese Stähle ermittelten technischen Dauerwechselfestigkeit σ_w , nämlich um ungefähr 4 kp/mm^2 bzw. 2 kp/mm^2 . σ_{aG} St 37 ist ungefähr um 11 kp/mm^2 kleiner als σ_{aG} St 52. Dieser Unterschied trägt hauptsächlich dazu bei, daß die gleiche Spannung σ_a bei St 37-3 eine wesentlich höhere maximale Verformungswegamplitude $\delta_{\max}(N)$ bewirkt als bei St 52-3.

Die aus den aufgenommenen mechanischen Hysteresisschleifen ermittelte Dämpfungsarbeit $E_p(N)$, die auf die im ersten Lastwechsel maximal aufgenommene elastische Energie

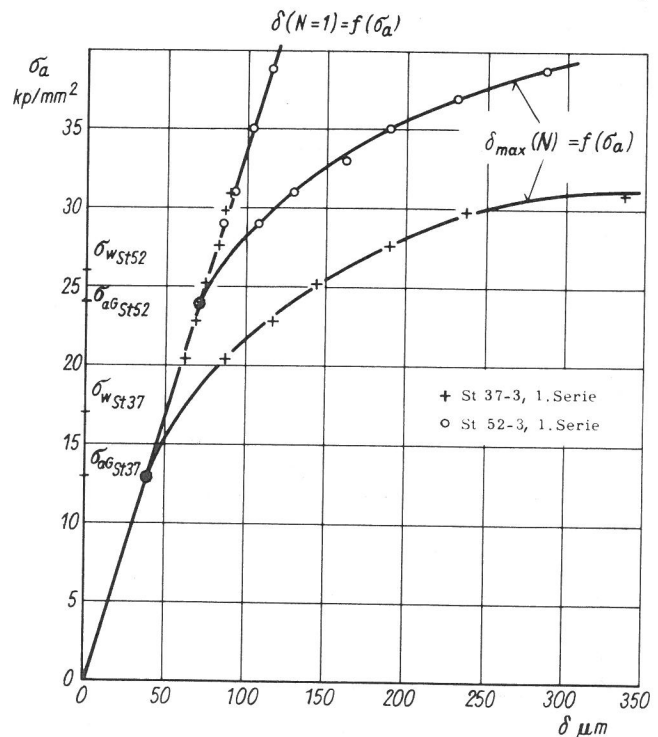


Bild 16
Vergleich der Verformungswegamplitude $\delta(N=1)$ des 1. Lastwechsels mit der maximal sich einstellenden Verformungswegamplitude $\delta_{\max}(N)$ in Abhängigkeit der aufgetragenen Spannungsamplitude σ_a (Darstellung entspricht σ - ϵ -Beziehung bei einsinniger Belastung)

$E_{e1}(N=1)$ normiert wurde, ist in Abhängigkeit der Lastwechselzahl und mit der Spannungsamplitude σ_a als Parameter für die 1. Serie von St 37-3 in Bild 17 und für die 1. Serie

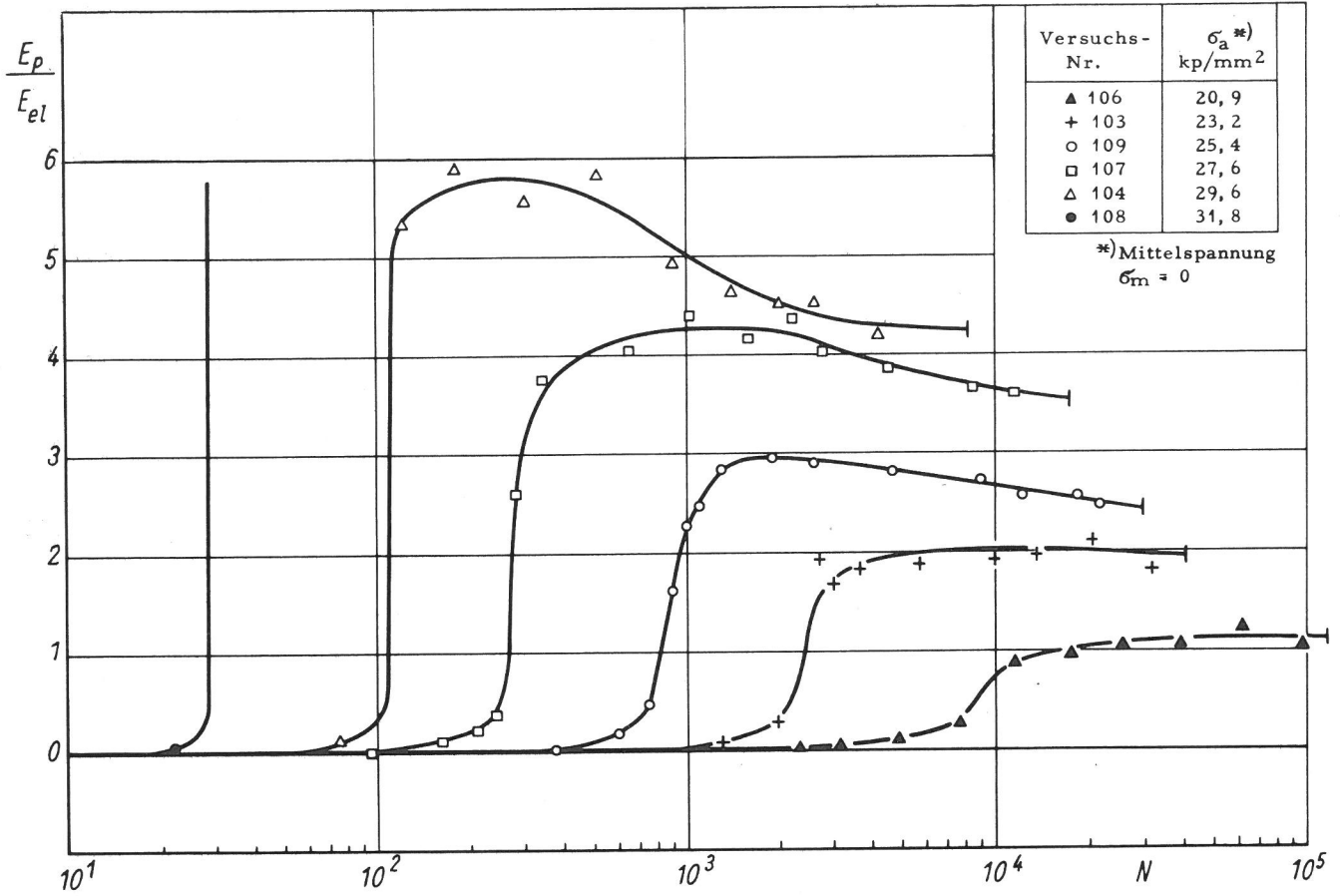
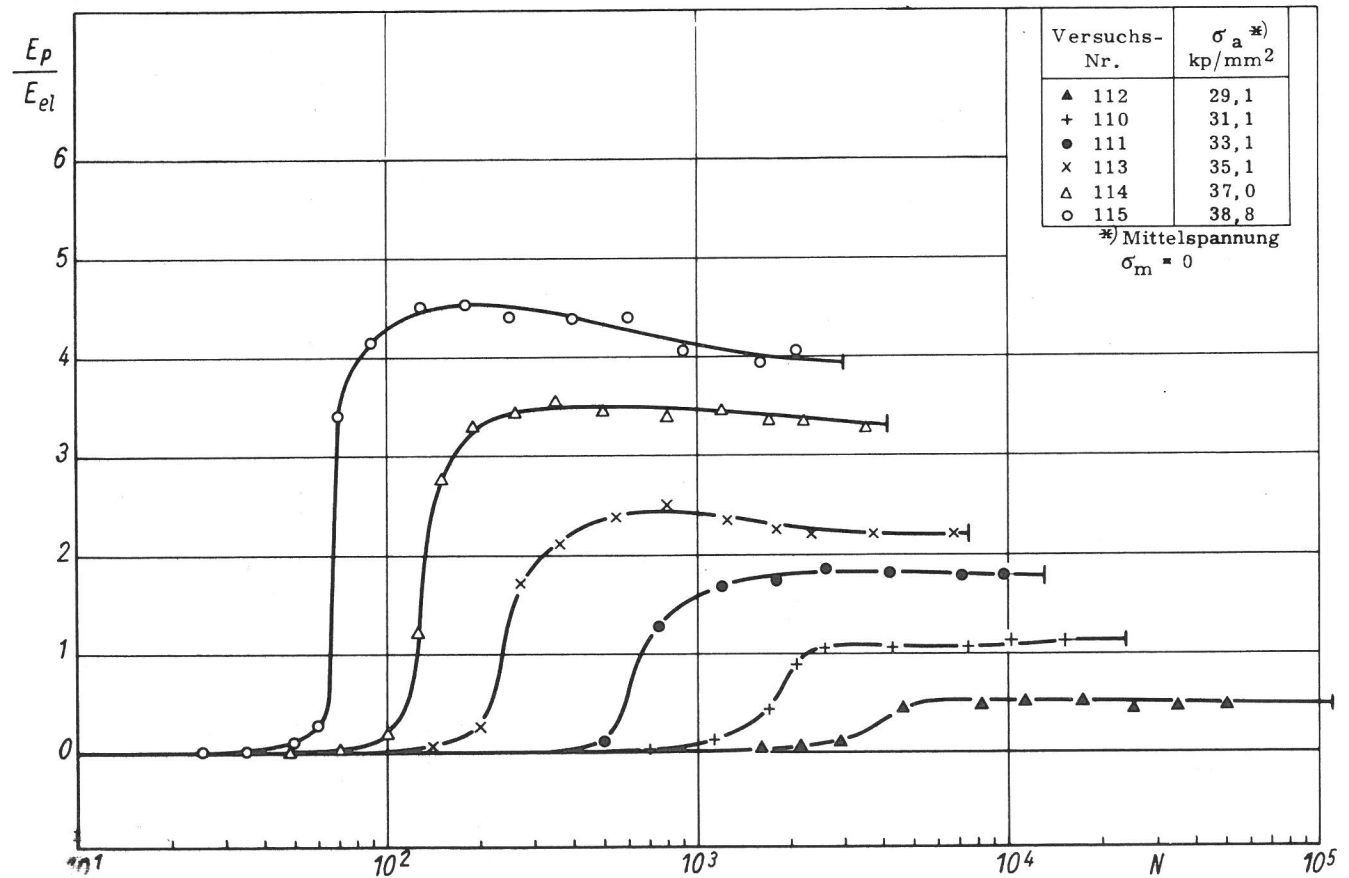


Bild 17
Die aus der mechanischen Hysterese ermittelte normierte Dämpfungsarbeit $E_p(N)/E_{el}(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N

St 37-3 Serie 1 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 16 \mu m$

Bild 18
Die aus der mechanischen Hysterese ermittelte normierte Dämpfungsarbeit $E_p(N)/E_{el}(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N

St 52-3 Serie 1 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu m$



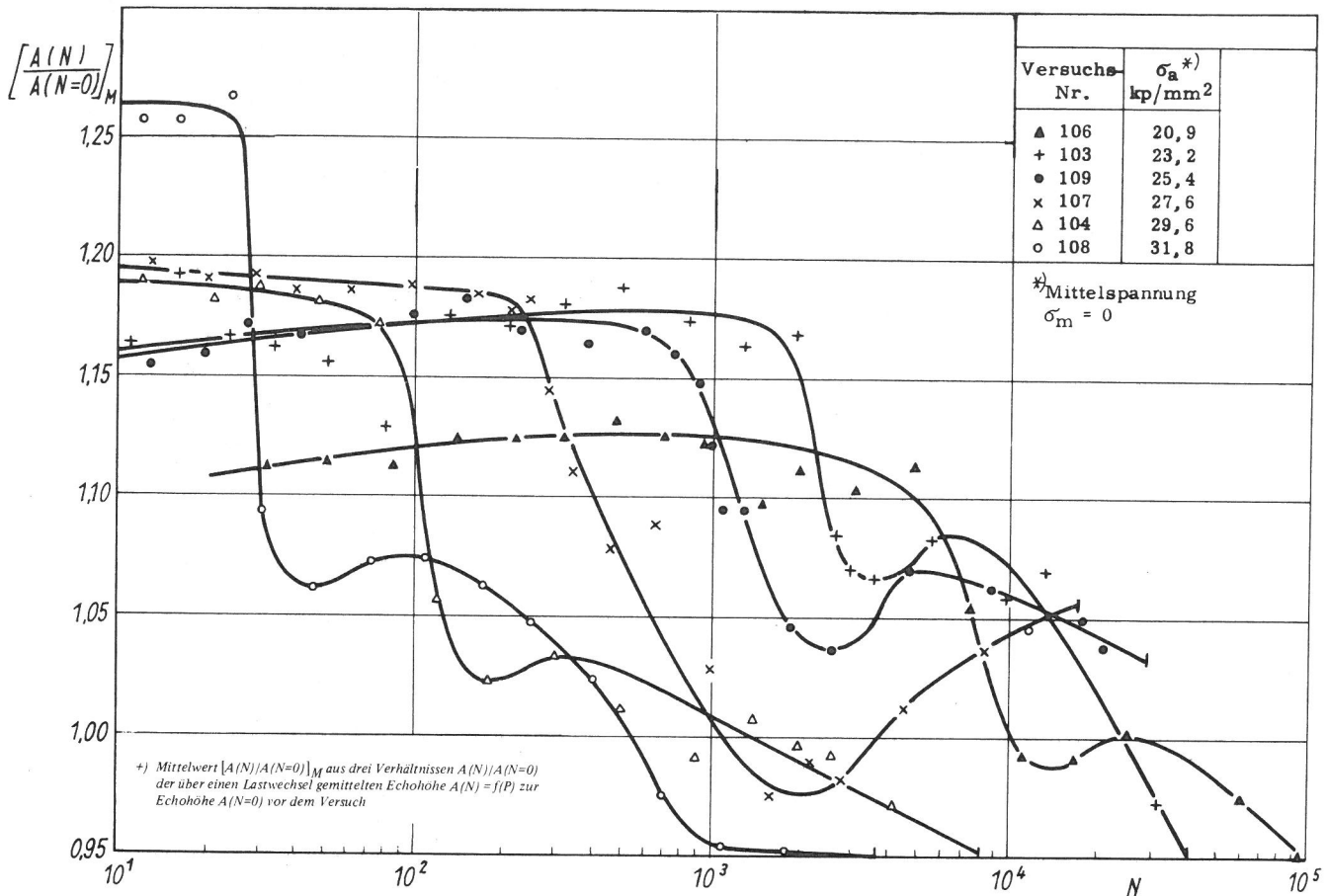


Bild 19
 Normierte Echohöhe<sup>+) [A(N)/A(N=0)]_M der Ultraschallimpulse bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N
 St 37-3 Serie 1 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 16 \mu\text{m}$
 Ultraschallfrequenz 5 MHz</sup>

von St 52-3 in Bild 18 dargestellt. Der Vergleich von Bild 14 mit Bild 17 und von Bild 15 mit Bild 18 zeigt, daß für beide Stähle die Änderung der Verformungswegamplitude und die aus der mechanischen Hysterese ermittelte Dämpfungsarbeit in Abhängigkeit der Lastwechselzahl und für gleiche Spannungsamplituden σ_a ähnlich verlaufen.

4.1.2. Echohöhenverlauf der Ultraschallimpulse

Die für Wechselbeanspruchungs-Versuche sich zwangsläufig ergebende Probenform und die angewandte Quarzankopplung gestatteten nicht die Bestimmung der reinen Werkstoffdämpfung. Es konnte nur die Ultraschallschwächung innerhalb eines Lastwechsels als Funktion der augenblicklich wirksamen äußeren Kraft bzw. des Proben-Verformungsweges und dieser Zusammenhang in Abhängigkeit der Lastwechselzahl ermittelt werden. Da die Ankoppelungsverhältnisse während des Versuches gleichbleiben und nachgewiesen wurde, daß die durch die Beanspruchung sich geringfügig ändernde Geometrie der Probe keinen Einfluß auf das Meßergebnis hat, dürfen Änderungen der Ultraschallschwächung im Versuch den im Werkstoff während der Wechselbeanspruchung ablaufenden Vorgängen zugeschrieben werden, solange noch kein Anriß der Probe eingetreten ist.

Für den aus dem Versuch ermittelten Echohöhenverlauf innerhalb eines Lastwechsels, der beispielsweise in den Aufnahmen des Bildes 11 dargestellt ist, ergeben sich mehrere

Möglichkeiten der Auswertung für Aussagen in Abhängigkeit der Lastwechselzahl. Um einen Überblick zu gewinnen, wurde zunächst der probenbezogene Extinktionskoeffizient für mehrere Spannungshorizonte innerhalb eines Lastwechsels, darunter die Spitzenwerte und Nulldurchgänge, als Funktion der Lastwechselzahl bestimmt. Daraus ergab sich für alle Spannungshorizonte innerhalb eines Lastwechsels der gleiche Funktionsverlauf, es entstand jedoch eine Schar übereinanderliegender Kurven aufgrund der unterschiedlichen Ausgangswerte entsprechend den Echohöhenkurven (vgl. Bild 11). Die größten Änderungen des Extinktionskoeffizienten in Abhängigkeit der Lastwechselzahl wurden beim Zug- und Druckspannungsmaximum, die geringsten bei der Spannung, bei der das Echohöhenminimum (vgl. Bild 11) liegt, festgestellt. Da die zu den Spannungsmaxima eines Lastwechsels gehörigen Versuchswerte durch die Kraftamplituden-Regelgenauigkeit der Maschine beeinflusst werden, erfolgte in den Bildern 19 ÷ 20 die Darstellung des mittleren normierten Echohöhenverlaufes $[A(N)/A(N=0)]_M$ der Ultraschallimpulse in Abhängigkeit der Lastwechselzahl, wobei $A(N)$ den Mittelwert einer Echohöhe über einen Zyklus bei der Lastwechselzahl N (vgl. Bild 11) und $A(N=0)$ die dazugehörige Echohöhe vor Versuchsbeginn (vgl. Bild 10 b) darstellt. Im Diagramm wurde der Mittelwert der Auswertungen von drei Echohöhen aufgetragen. Bild 19 zeigt den mittleren normierten Echohöhenverlauf in Abhängigkeit der Lastwechselzahl für St 37-3 mit der Spannungsamplitude als Parameter, Bild 20 das gleiche für St 52-3. Für beide Stähle tritt nach einer von der Spannungsamplitude abhängigen Lastwechselzahl zunächst eine zunehmende Absorption der Schallenergie ein. Diese charakteristische Lastwechselzahl wird mit wachsender Spannungsamplitude kleiner, wie das bereits für den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung beobachtet wurde. Aus dem Vergleich der Bilder 14

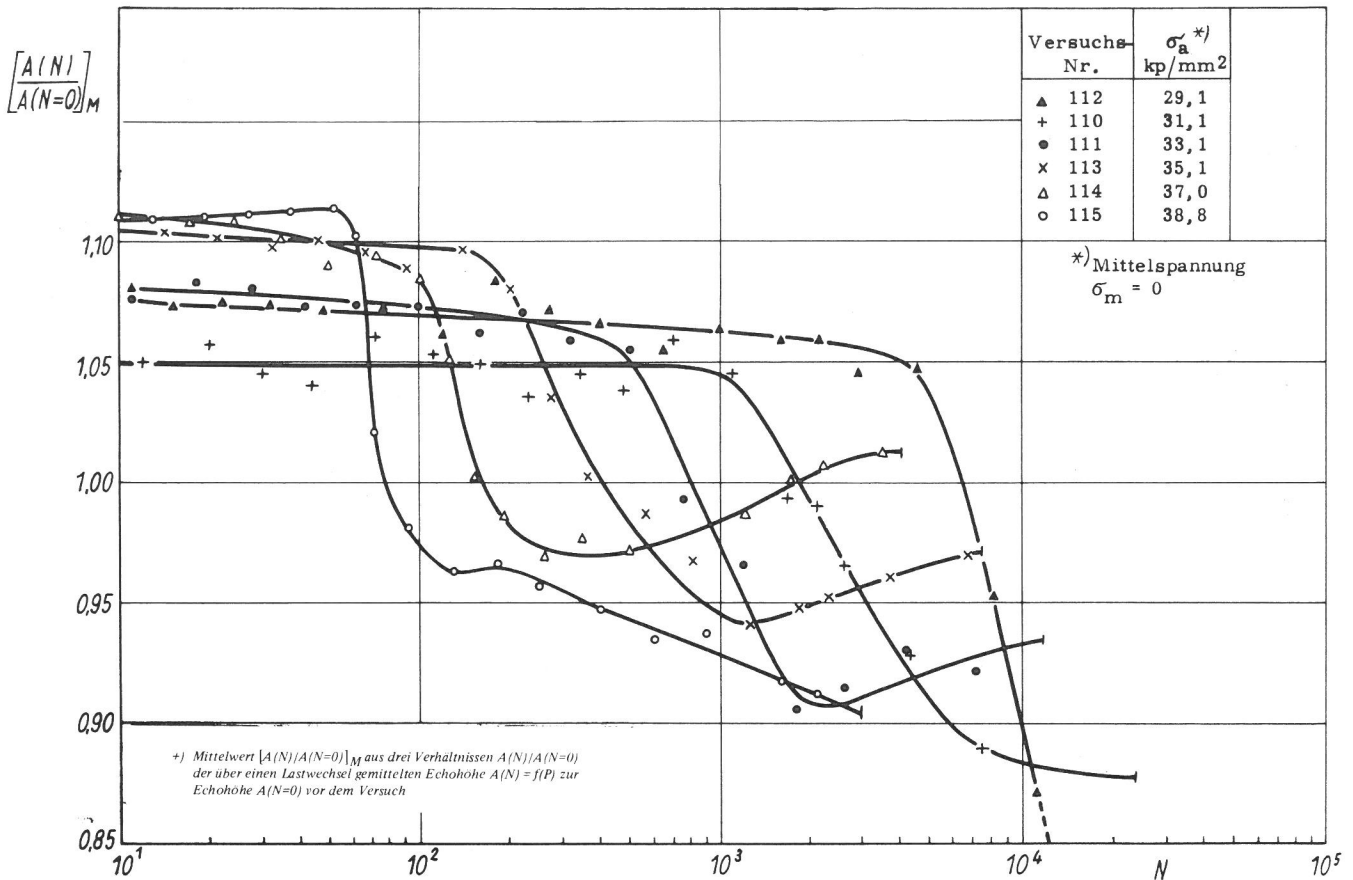


Bild 20
 Normierte Echohöhe^{+) $[A(N)/A(N=0)]_M$ der Ultraschallimpulse bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N St 52-3 Serie 1 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$ Ultraschallfrequenz 5 MHz}

und 19 sowie der Bilder 15 und 20 – die Ergebnisse wurden jeweils an den gleichen Proben ermittelt – geht hervor, daß bei gleicher Spannungsamplitude der erste wesentliche Echohöhenverlust mit dem Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung einsetzt. Der weitere Echohöhenverlauf nach dem steilen Abfall der Echohöhen ist für beide Stähle uneinheitlich. Bei St 37-3 (Bild 19) tritt mit Ausnahme des Versuches Nr. 107 nach dem ersten Echohöhenverlust eine kleinere Erhöhung der Echos ein, die bald wieder durch einen weiteren Echohöhenabfall kompensiert wird, der sich bis zum Bruch fortsetzt. Die kurze Phase der Echoerhöhung findet bei allen Versuchen kurz nach Abschluß des wesentlichen Anstieges der Verformungswegamplitude statt. Für die höchste Spannungsamplitude von St 52-3 (Bild 20) kann der für St 37-3 geschilderte Verlauf noch erkannt werden, während bei den mittleren Spannungsamplituden das Anwachsen der Echohöhen nach ihrem steilen Abfall wesentlich ausgeprägter ist und bis zum Bruch anhält. Im Bereich niedriger Spannungsamplituden (Versuche Nr. 110 und 112) tritt nur ein Echohöhenabfall ein, der Ansatz zur Ausbildung eines Echohöhenminimums ist bei dem mit der höheren Spannungsamplitude gefahrenen Versuch (Nr. 110) jedoch noch feststellbar. In dem für die Klärung der Ursachen der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung interessierenden Abschnitt vor dem Eintreten der ersten Verformungsweg-Amplitudenerhöhung ermöglicht die Untersuchung der Ultraschallschwächung keine eindeutigen Aussagen. Die dort beobachteten Echohöhenänderungen liegen im Streuband der

Versuchswerte; die Beurteilung der Kurven wird zusätzlich durch die unterschiedlichen Anfangswerte erschwert.

In Bild 21 wird als Beispiel an St 52-3 der 1. Serie für zwei Spannungsamplituden σ_a der Einfluß der Durchschallungsfrequenz auf den normierten Echohöhenverlauf in Abhängigkeit der Lastwechselzahl dargestellt. Die Erhöhung der Frequenz von 5 auf 12 MHz bringt, wie es zu erwarten war, keine zusätzlichen Erkenntnisse, bestätigt aber die Ergebnisse der Versuche mit 5 MHz. Eine wesentlich weitere Erhöhung der Durchschallungsfrequenz war durch die Probenform bedingt nicht mehr möglich (vgl. unter 3.3.1).

4.1.3. Änderung der Koerzitivkraft

Ergänzend zur Untersuchung der Ultraschallschwächung sollten Koerzitivkraftmessungen Aufschluß über die sich ändernde Dichte von Gitterbaufehlern während der Wechselbeanspruchung geben. Deshalb wurde, wie Bild 22 zeigt, die normierte Koerzitivkraft $H_c(N)/H_c(N=0)$ in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N bei zwei verschiedenen Spannungsamplituden σ_a für St 37-3 der 2. Serie ermittelt. Aus der Darstellung geht hervor, daß die wesentliche Änderung der Koerzitivkraft parallel mit der Erhöhung der Verformungswegamplitude verläuft. Die Koerzitivkraft wächst jedoch auch in der sichtbaren Verfestigungsphase, in der die Verformungswegamplitude bereits wieder abfällt, noch weiter bis zum Bruch an. Vor dem Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung wird die Koerzitivkraft für beide Spannungsamplituden zunächst etwas kleiner, ein Zeichen dafür, daß dieser Effekt reproduzierbar ist, die Ursache dafür aber offenbar keinen Einfluß auf das Verhalten der Verformungswegamplitude hat.

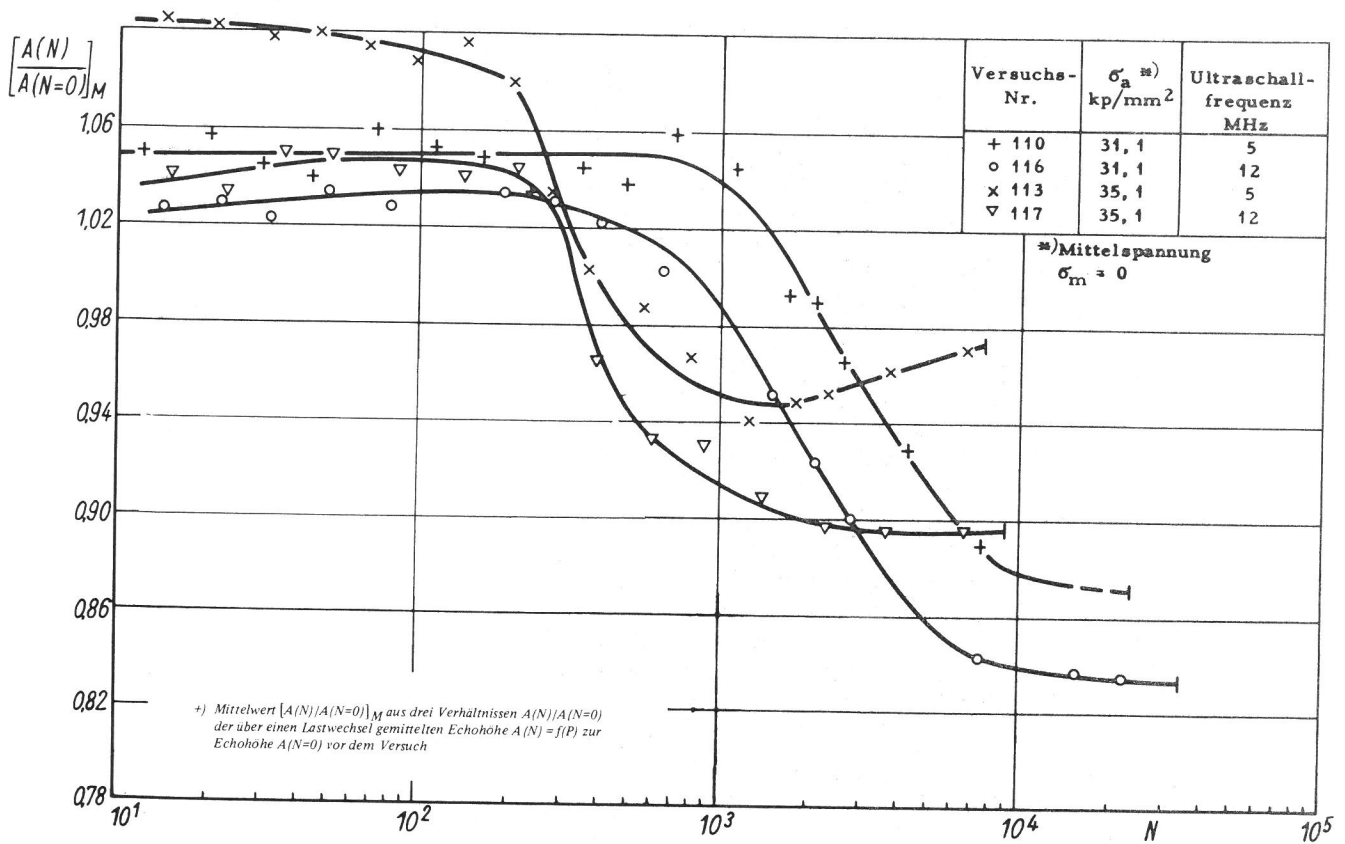
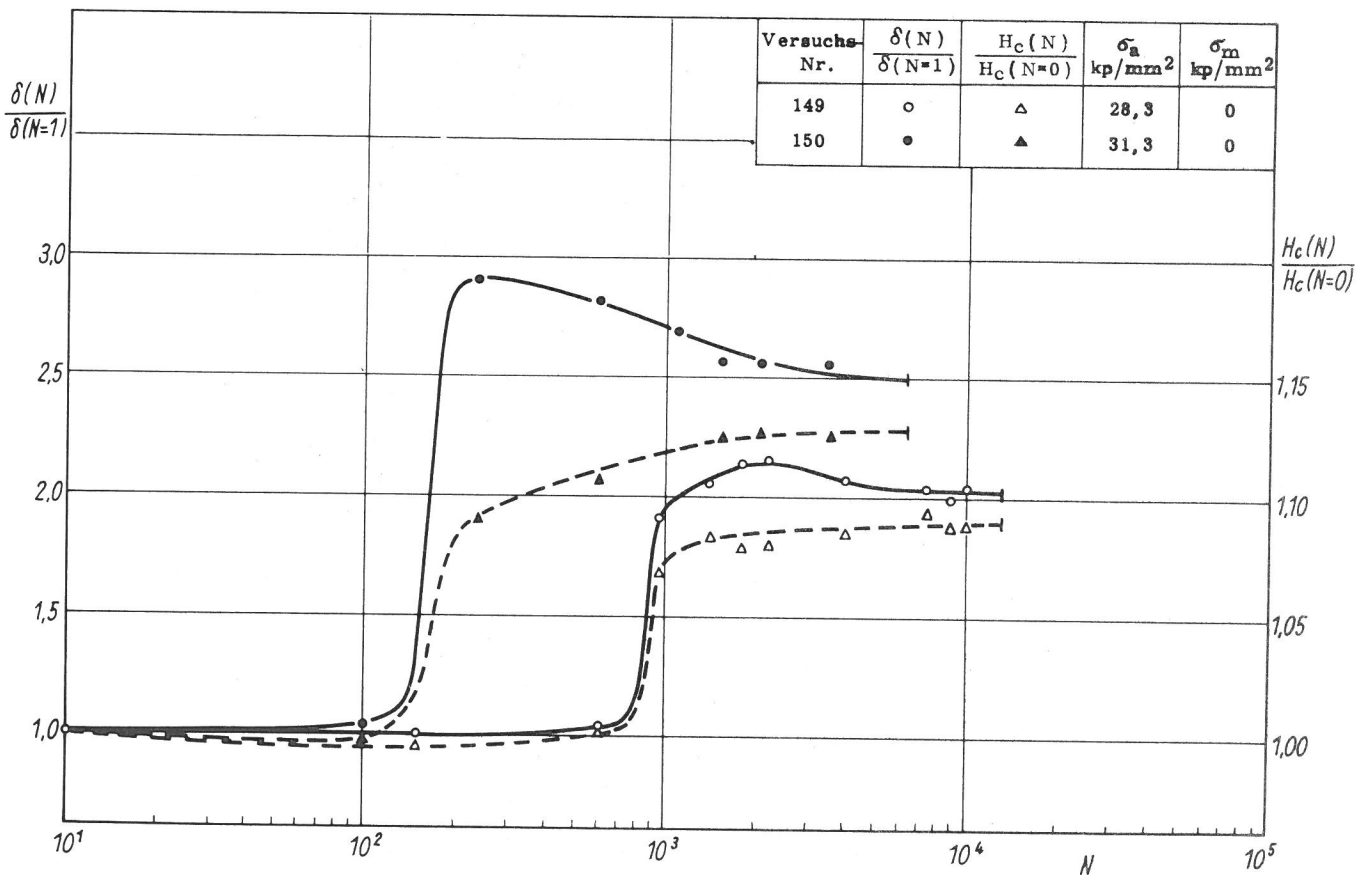


Bild 21
Einfluß der Durchschallungsfrequenz auf die normierte Echohöhe⁺ $[A(N)/A(N=0)]_M$ der Ultraschallimpulse bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N

St 52-3 Serie 1 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$

Bild 22
Normierte Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ und Koerzitivkraft $H_c(N)/H_c(N=0)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N

St 37-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 15 \mu\text{m}$



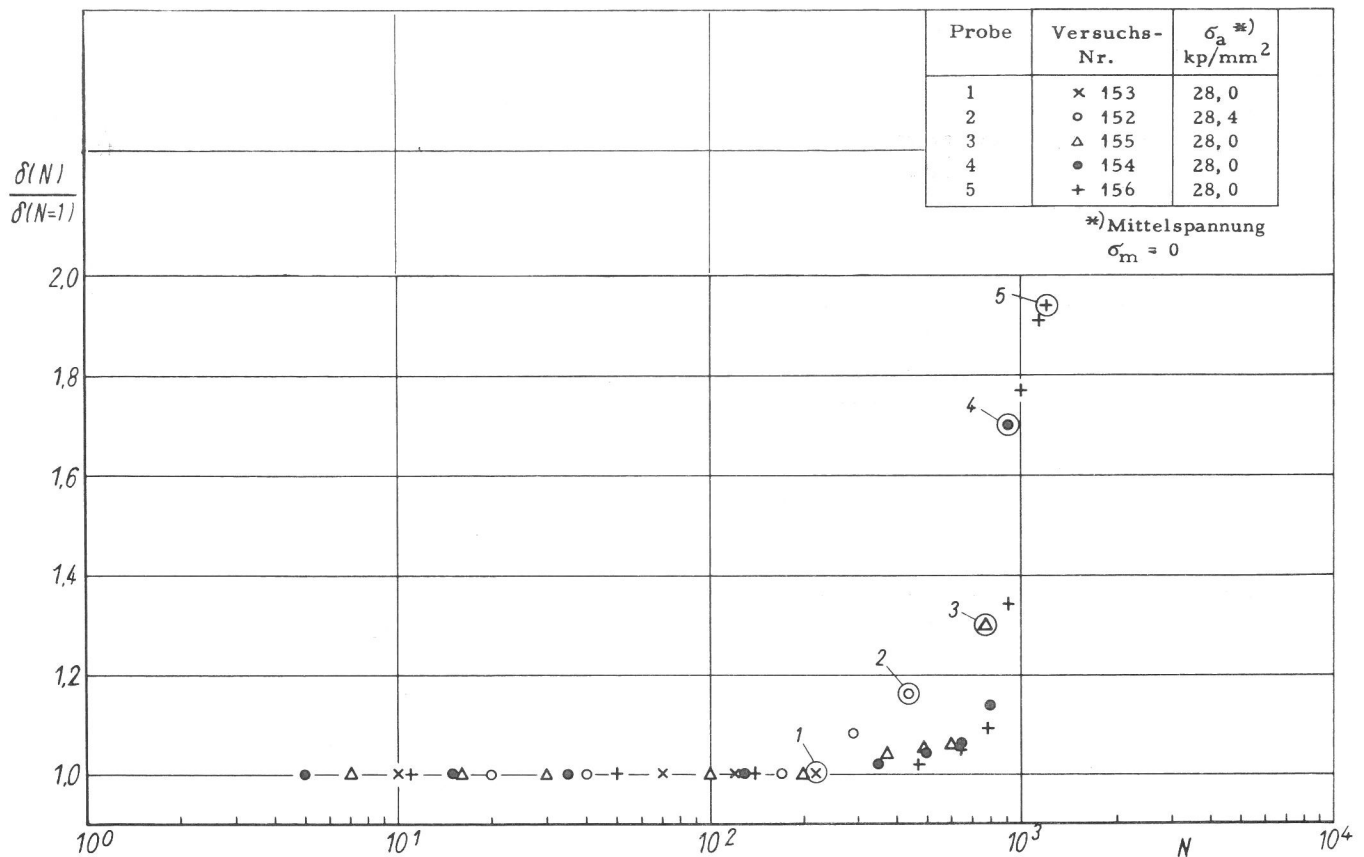


Bild 23
Einfluß der Zug-Druck-Wechselbeanspruchung auf die mechanischen Eigenschaften bei einsinniger Belastung

St 37-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 15 \mu\text{m}$
Normierte Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N bis zum Zugversuch

4.1.4. Einfluß des Plastizierungsprozesses auf die mechanischen Eigenschaften bei einsinniger Belastung

Nach den Ausführungen unter 1.1.2 führt bei niedriggekohlten Stählen die Wechselbeanspruchung im Zeitfestigkeitsgebiet mit Spannungsamplituden, die unterhalb der ausgeprägten Streckgrenze liegen, zur Beseitigung der ausgeprägten Streckgrenze. Die Zuordnung dieses Vorganges zur den Plastizierungsprozeß kennzeichnenden Dehnungs-Amplitudenerhöhung wurde bisher noch nicht untersucht, sie erscheint jedoch wesentlich für das Verständnis des Plastizierungsprozesses und der dabei im Mikrobereich ablaufenden Vorgänge. Um hierzu einen Überblick zu gewinnen, wurden 5 Proben der 2. Serie von St 37-3 einer Spannungsamplitude von $\sigma_a = 28 \text{ kp/mm}^2$ ausgesetzt, die Wechselbeanspruchung jeweils in verschiedenen Stadien der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung beendet und anschließend im Pulser der Kraft-Verformungsweg-Verlauf im Bereich der Streckgrenze ermittelt. Bild 23 zeigt zunächst den an den einzelnen Proben gemessenen normierten Verformungsweg-Amplitudenverlauf $\delta(N)/\delta(N=1)$ in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N bis zum Abbruch der Wechselbeanspruchung. Die Meßwerte der verschiedenen Proben lassen sich gut in einen Kurvenzug einordnen, ein Zeichen dafür, daß die Verformungsweg-Amplitudenerhöhung gut reproduzierbar ist. Das Abweichen der Versuchswerte des Versuches Nr. 152, das aufgrund des etwas kleineren Durchmessers der betreffenden Probe auf

die dadurch bedingte Erhöhung der Spannungsamplitude um $0,4 \text{ kp/mm}^2$ zurückzuführen ist, veranschaulicht, wie empfindlich der Ablauf des Plastizierungsprozesses von der aufgetragenen Spannungsamplitude abhängt. In Bild 24 ist jeweils der Kraft-Verformungsweg-Verlauf (mechanische Hysteresisschleife) des letzten Lastwechsels von der einsinnigen Belastung aufgezeichnet. Die noch sehr schmale Schleife für Probe 1 zeigt, daß gerade der Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung erfaßt wurde. Aus dem Vergleich des Spannungs-Verformungsweg-Verlaufes für Probe 1 und 2 in Bild 25 geht hervor, daß nach der Einleitung des Plastizierungsprozesses eine Verformungsweg-Amplitudenerhöhung von ungefähr 18 % bereits zu einer merklichen Erniedrigung der oberen und unteren Streckgrenze führt. Nach 30 % Verformungsweg-Amplitudenerhöhung bei Probe 3 ist die obere Streckgrenze gerade abgebaut worden und der Lüdersbereich beinahe verschwunden. Neben dem weiteren Absinken der unteren Streckgrenze kann hier eine plastische Verformung der Probe bereits bei Spannungen weit unterhalb der Streckgrenze beobachtet werden. Bei Probe 4 ist nach der Beendigung der Wechselbeanspruchung zwar die wesentliche Erhöhung der Verformungswegamplitude noch nicht abgeschlossen, bei der anschließenden einsinnigen Belastung tritt jedoch bereits keine ausgeprägte Streckgrenze mehr auf. Aus dem Vergleich des Spannungs-Verformungsweg-Verlaufes der Proben 3 bis 5 bei einsinniger Belastung geht hervor, daß bei gleichen Spannungen unterhalb der noch erkennbaren ausgeprägten Streckgrenze der Probe 3 die plastische Verformung umso größer wird, je größer die erreichte Verformungsweg-Amplitudenerhöhung während der Wechselbeanspruchung war. Für den Bereich oberhalb der genannten Streckgrenze der Probe 3 entsteht der Eindruck, daß die zur Erzielung gleicher Verformungswege erforderliche Spannung von Probe 3 über Probe 4 nach Probe 5 anwächst.

Probe	Versuchs-Nr.	σ_a^{**} kp/mm ²
1	153	28,0
2	152	28,4
3	155	28,0
4	154	28,0
5	156	28,0

^{**}) Mittelspannung $\sigma_m = 0$

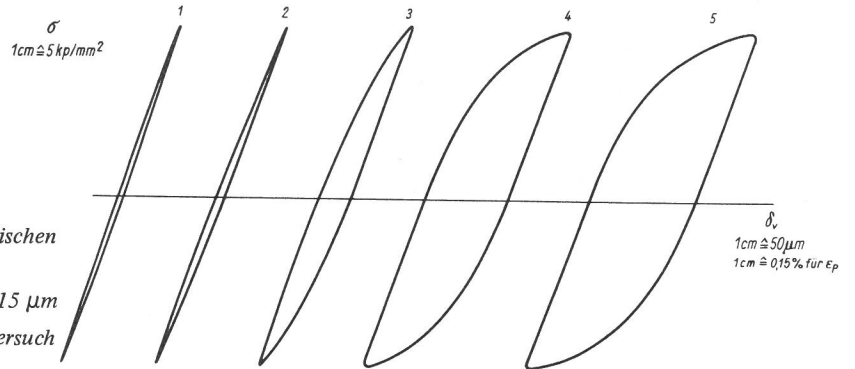


Bild 24
Einfluß der Zug-Druck-Wechselbeanspruchung auf die mechanischen Eigenschaften bei einsinniger Belastung
St 37-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 15 \mu\text{m}$
Mechanische Hysterese des letzten Lastwechsels vor dem Zugversuch

Probe	Versuchs-Nr.	σ_a^{**} kp/mm ²
1	153	28,0
2	152	28,4
3	155	28,0
4	154	28,0
5	156	28,0

^{**}) Mittelspannung $\sigma_m = 0$

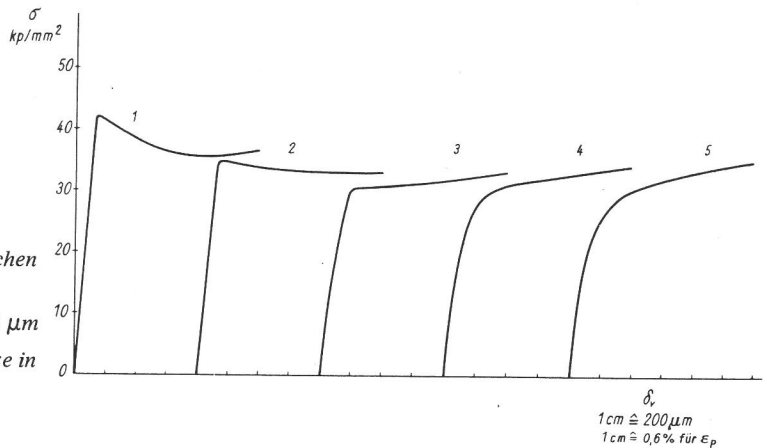


Bild 25
Einfluß der Zug-Druck-Wechselbeanspruchung auf die mechanischen Eigenschaften bei einsinniger Belastung
St 37-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 15 \mu\text{m}$
Spannungs-Verformungsweg-Verlauf im Bereich der Streckgrenze in Abhängigkeit der vorher ertragenen Lastwechselzahl N

Probe	Versuchs-Nr.	Lastwechselzahl
1	250	100
2	249	200
3	248	500
4	246	600

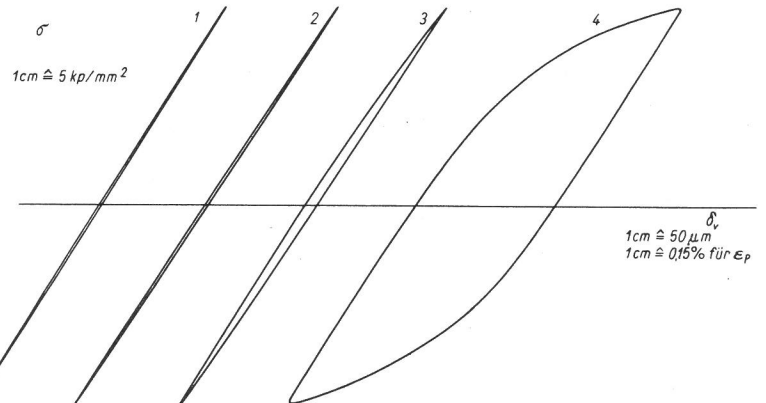


Bild 26
Mechanische Hysteresschleife des letzten Lastwechsels vor der elektronenmikroskopischen Untersuchung
Aufgebrachte Spannungsamplitude $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$
St 52-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$

4.1.5. Änderung der Versetzungsstruktur

Ergänzend zu den Untersuchungen unter 4.1.4 wurden aus der 2. Serie von St 52-3 an einer Probe vor der Wechselbeanspruchung und an 4 Proben, nachdem sie verschiedene Stadien des Plastizierungsprozesses bei jeweils der gleichen Spannungsamplitude von $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$ erreicht hatten, elektronenmikroskopische Durchstrahlungsaufnahmen gemacht. Zur Orientierung, welchem Stadium des Plastizierungsprozesses die beobachteten Versetzungsstrukturen zuzuordnen sind, zeigt **Bild 26** die mechanischen Hysteresschleifen jeweils des letzten Lastwechsels vor der elektronenmikroskopischen Untersuchung.

Die **Bilder 27 a ÷ 27 c** geben Beispiele für die vor der Wechselbeanspruchung beobachteten Versetzungsstruktur. Im allgemeinen wurde eine gleichmäßige Verteilung der Versetzungen festgestellt. In **Bild 27 b** sind Teile des Versetzungsnetzwerkes zu erkennen. Nach **Bild 27 c** entsteht der Eindruck, daß in der Nähe der Perlitinsel die Versetzungsdichte etwas höher ist als im Korninnern.

Bei der ersten wechselbeanspruchten Probe, bei der nach einer Lastwechselzahl von $N = 100$ der Versuch mit dem Beginn der merklichen Erhöhung der Verformungswegamplitude beendet wurde (vgl. **Bild 26**), waren bereits verschiedenartige Versetzungsanordnungen zu erkennen. Die Mehr-

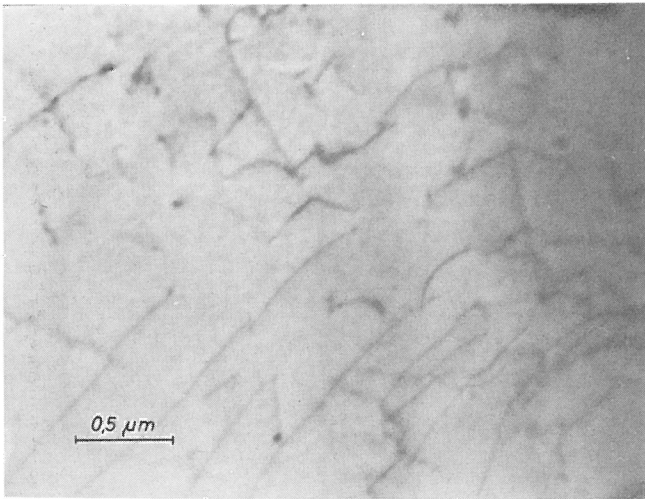


Bild 27 a
St 52-3, 2. Serie, Ausgangszustand

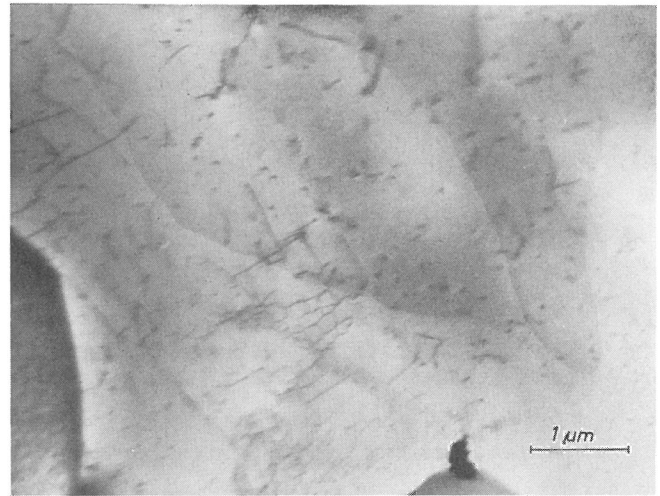


Bild 28 a
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 100$

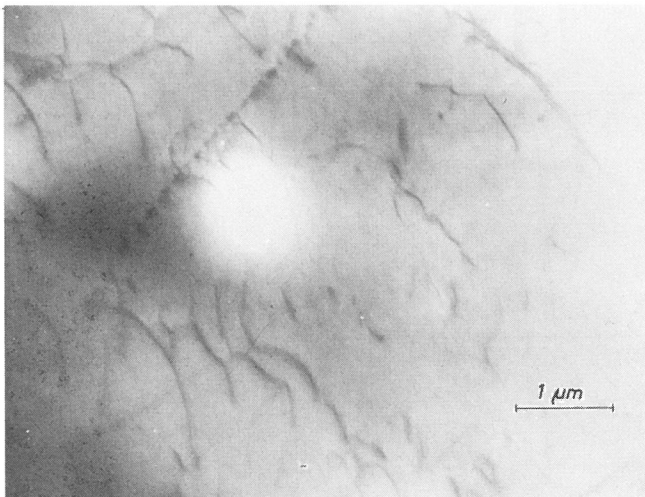


Bild 27 b
St 52-3, 2. Serie, Ausgangszustand

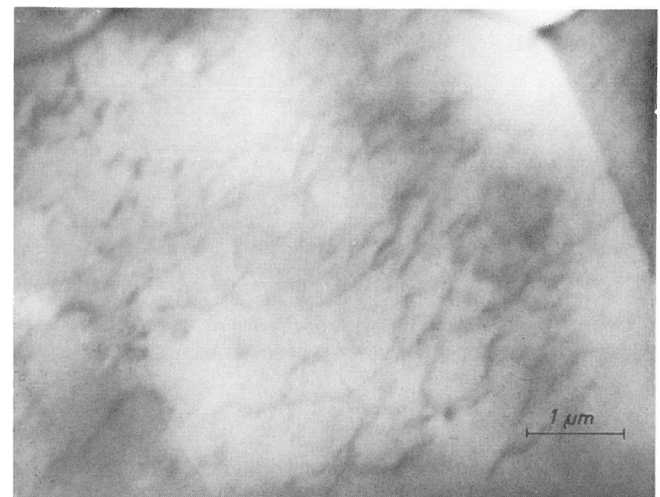


Bild 28 b
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 100$

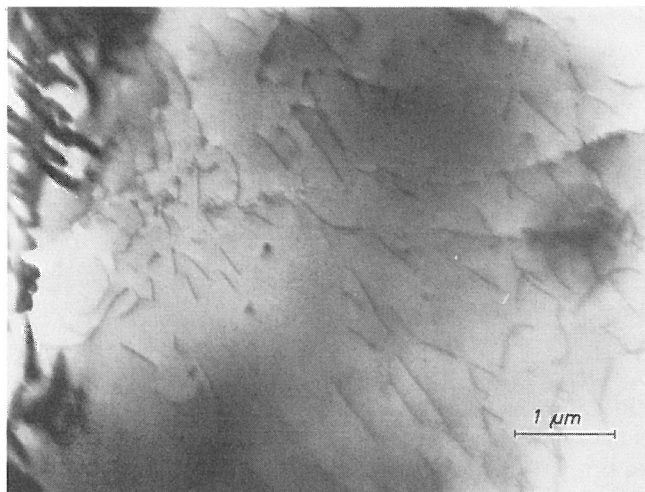


Bild 27 c
St 52-3, 2. Serie, Ausgangszustand



Bild 28 c
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 100$

zahl der betrachteten Körner hatte noch eine dem Ausgangszustand entsprechende Versetzungsstruktur. **Bild 28 a** zeigt neben Teilen des Versetzungs-Netzwerkes viele punktförmige Gebilde, die in den Aufnahmen des Ausgangszustandes nicht auftreten (vgl. Bild 27 a ÷ 27 c). Es ist deshalb zu ver-

muten, daß diese Gitterbaufehler, die z. B. Versetzungsschleifen darstellen könnten, erst während der Wechselbeanspruchung entstanden sind. Wie aus **Bild 28 b** und **28 c** hervorgeht, führte die Wechselbeanspruchung in mehreren Körnern bereits zu einer starken Versetzungsvermehrung, die

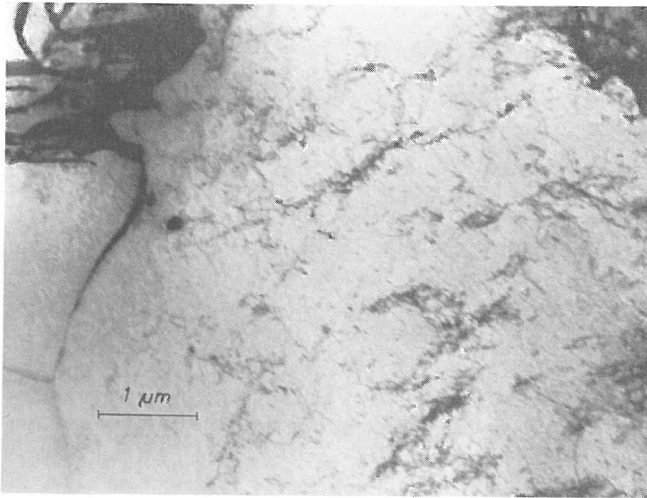


Bild 29 a
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 200$

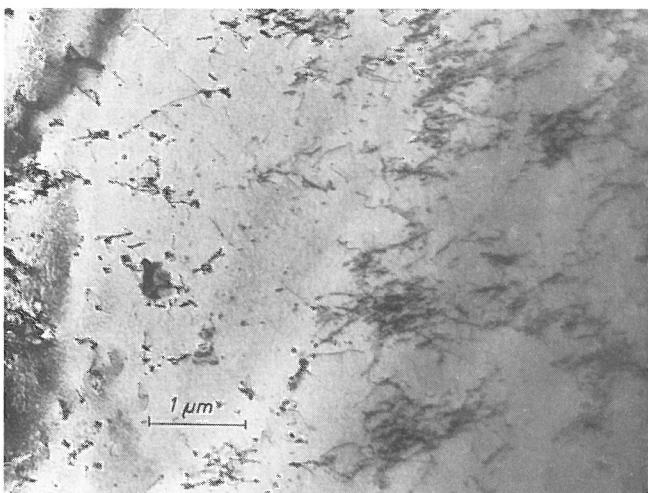


Bild 29 b
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 200$

vereinzelt schon die Entstehung örtlich begrenzter, hoher Konzentrationen eng miteinander verschlungener Versetzungen (Versetzungsknäuel) ermöglicht hatte (Bild 28 c).

Bei der Probe 2 der wechselbeanspruchten Proben (vgl. Bild 26) – der Versuch wurde hier nach $N = 200$ abgebro-

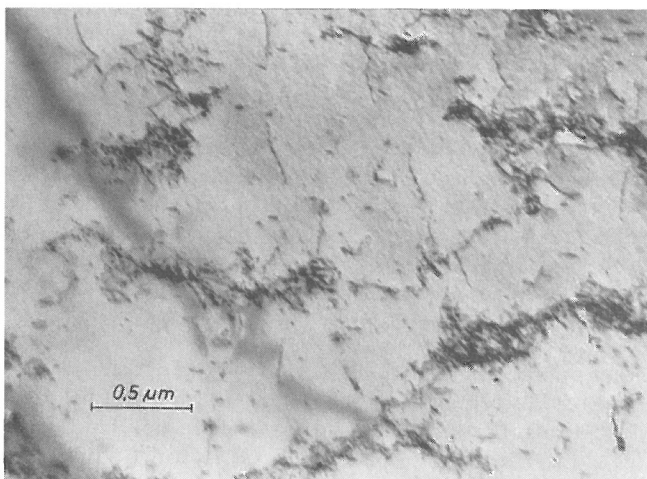


Bild 30 a
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 500$

chen – konnten prinzipiell die gleichen Versetzungsanordnungen wie bei Probe 1 beobachtet werden, nämlich Körner mit einer dem Ausgangszustand (vgl. Bild 27 a und 27 b) ähnlichen Versetzungsstruktur, Körner mit erhöhter Versetzungsdichte (vgl. Bild 28 b) und eine größere Anzahl Körner,

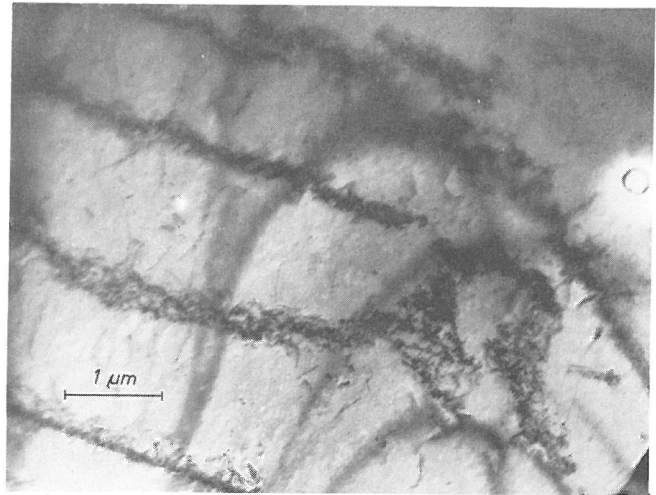


Bild 30 b
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 500$

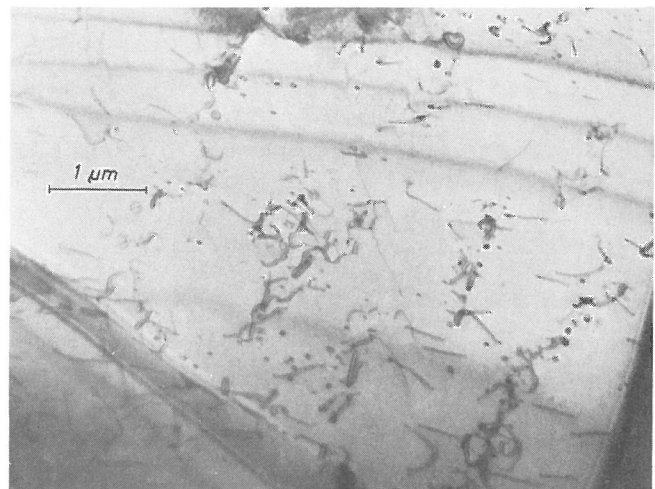


Bild 30 c
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 500$

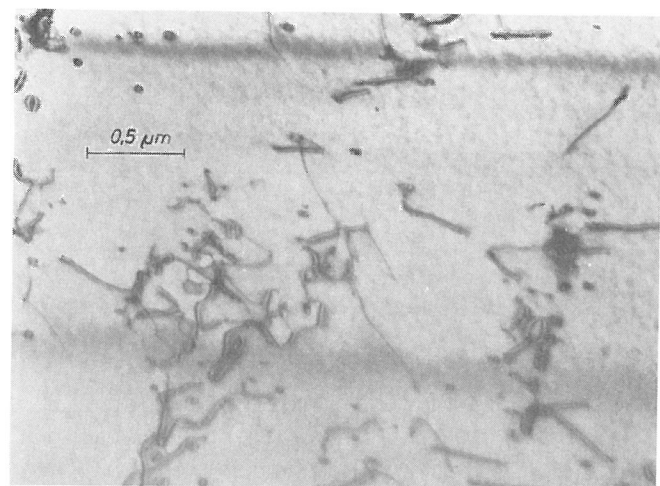


Bild 30 d
Ausschnittsvergrößerung aus Bild 30 c

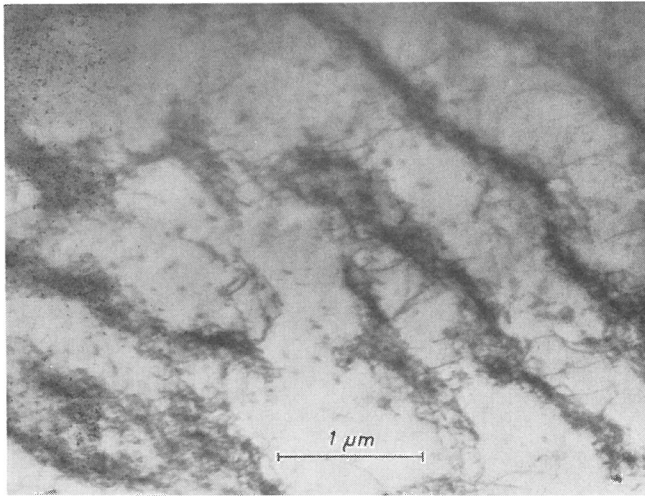


Bild 31 a
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 600$

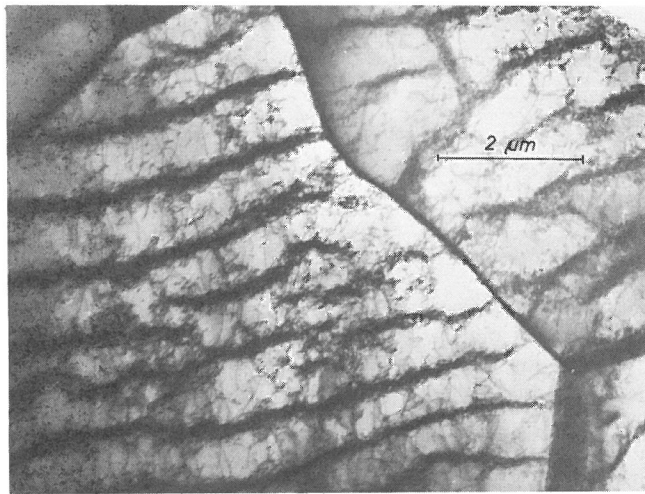


Bild 31 b
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 600$

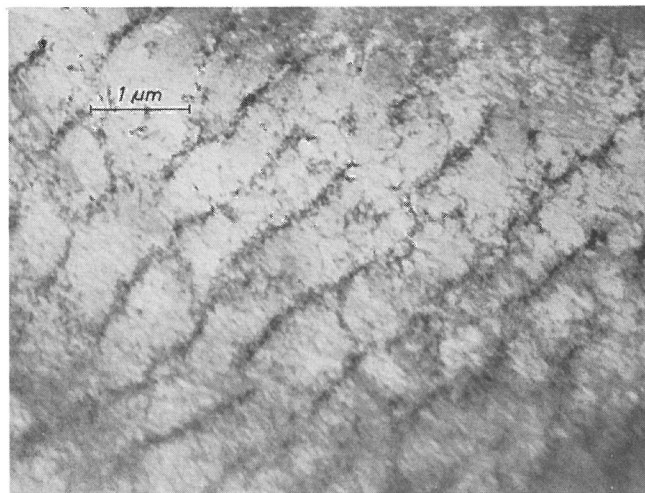


Bild 31 c
St 52-3, 2. Serie, $\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$, $N = 600$

in denen sich bereits Versetzungen zu teppichartigen und streifenförmigen Anordnungen unterschiedlicher Versetzungsdichte konzentriert hatten (Bild 29 a, 29 b).

In der Probe 3, $N = 500$ (vgl. Bild 26), wurden neben Kör-

nern mit einer hohen Dichte gleichmäßig verteilter Versetzungen Körner mit band- oder wandförmigen Versetzungskonzentrationen (Bild 30 a, 30 b) festgestellt, die eine höhere Versetzungsdichte haben und schärfer begrenzt sind als die Versetzungsstrukturen in den Aufnahmen der Proben 1 und 2 (vgl. Bild 28 c, 29 a, 29 b). Während die Versetzungsanordnung in Bild 30 a noch als vorwiegend bandförmig bezeichnet werden könnte, so scheint der regelmäßige Abstand der klar begrenzten, parallel zueinander angeordneten Versetzungskonzentrationen recht gleichmäßig hoher Versetzungsdichte in Bild 30 b darauf hinzuweisen, daß hier wahrscheinlich bereits eine Versetzungswandstruktur als Vorstufe zur Versetzungszellstruktur vorliegt. Wie Bild 30 c zeigt, gelang es in einem Fall, das frühe Stadium der Versetzungsbandsstruktur zu erfassen. Aus der Ausschnittsvergrößerung (Bild 30 d) sind deutlich Versetzungsschleifen sowohl innerhalb der Versetzungsknäuel als auch in der Umgebung der bereits bandförmig erkennbaren Versetzungsanordnungen zu sehen. Inwieweit auch Versetzungsdipole an der Versetzungsknäuelbildung beteiligt sind, läßt sich den Aufnahmen nicht eindeutig entnehmen.

Bei der Probe 4 der wechselbeanspruchten Proben, bei der nach $N = 600$ der Versuch während der wesentlichen Erhöhung der Verformungswegamplitude beendet wurde (vgl. Bild 26), konnte bereits in vielen Körnern das Anstreben einer dem Sättigungszustand entsprechenden Versetzungsstruktur, hier einer Versetzungszellstruktur, festgestellt werden. In Bild 31 a und in dem links im Bild 31 b sichtbaren Korn ist neben vereinzelt noch flächenhaften Versetzungsanordnungen wieder die aus Bild 30 b bekannte, scharf begrenzte, wahrscheinlich aus Versetzungswänden sehr hoher Versetzungsdichte bestehende Versetzungsstruktur zu beobachten. Zwischen diesen Versetzungskonzentrationen ist die Versetzungsdichte niedrig, stellenweise sind nur wenige Versetzungen zu sehen. In dem rechts im Bild 31 b erfaßten Korn und in Bild 31 c ist bereits die Entstehung einer Versetzungszellstruktur zu erkennen. Die einzelnen Versetzungszellen sind teilweise schon deutlich sichtbar, die Versetzungsdichte in den Zellen dürfte der Versetzungsdichte zwischen Versetzungswänden des im linken Teil des Bildes 31 b sichtbaren Kornes entsprechen. Inwieweit die Versetzungszellstruktur direkt aus den beobachteten, als wandförmig bezeichneten Versetzungsanordnungen entsteht, ist aus dem Vergleich der Bilder 31 a ÷ 31 c nicht eindeutig zu ersehen.

4.2. Einfluß der Korngröße auf den Plastizierungsprozeß

Der Einfluß der Korngröße auf den Plastizierungsprozeß wurde an den Serien 2 ÷ 5 von St 52-3 untersucht. Die Korndurchmesser (d_K) betragen $13 \mu\text{m}$, $22 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ und $45 \mu\text{m}$. Bei St 37-3 mußte auf die Variation der Korngröße in dem für die Beobachtung des Plastizierungsprozesses interessanten Bereich von $d_K = 15 \div 50 \mu\text{m}$ (vgl. unter 4.2.1) verzichtet werden, da verschiedene Wärmebehandlungsversuche zur Erzielung eines größeren Korndurchmessers als $d_K \approx 17 \mu\text{m}$ immer wieder zur Ausbildung von Nestern sehr unterschiedlich großer Körner führten.

Aufgrund des starken Einflusses der Korngröße auf die Ultraschallschwächung (vgl. [83]) ergaben sich mit zunehmender Korngröße wachsende Schwierigkeiten bei der Durchschallung. An den Proben der 3. Serie von St 52-3 mit $d_K = 22 \mu\text{m}$ konnten bereits nur noch zwei Echos ausgewertet werden. Diese Ergebnisse sind für mehrere Spannungsamplituden σ_a in Bild 32 dargestellt. Im Prinzip ergeben sich

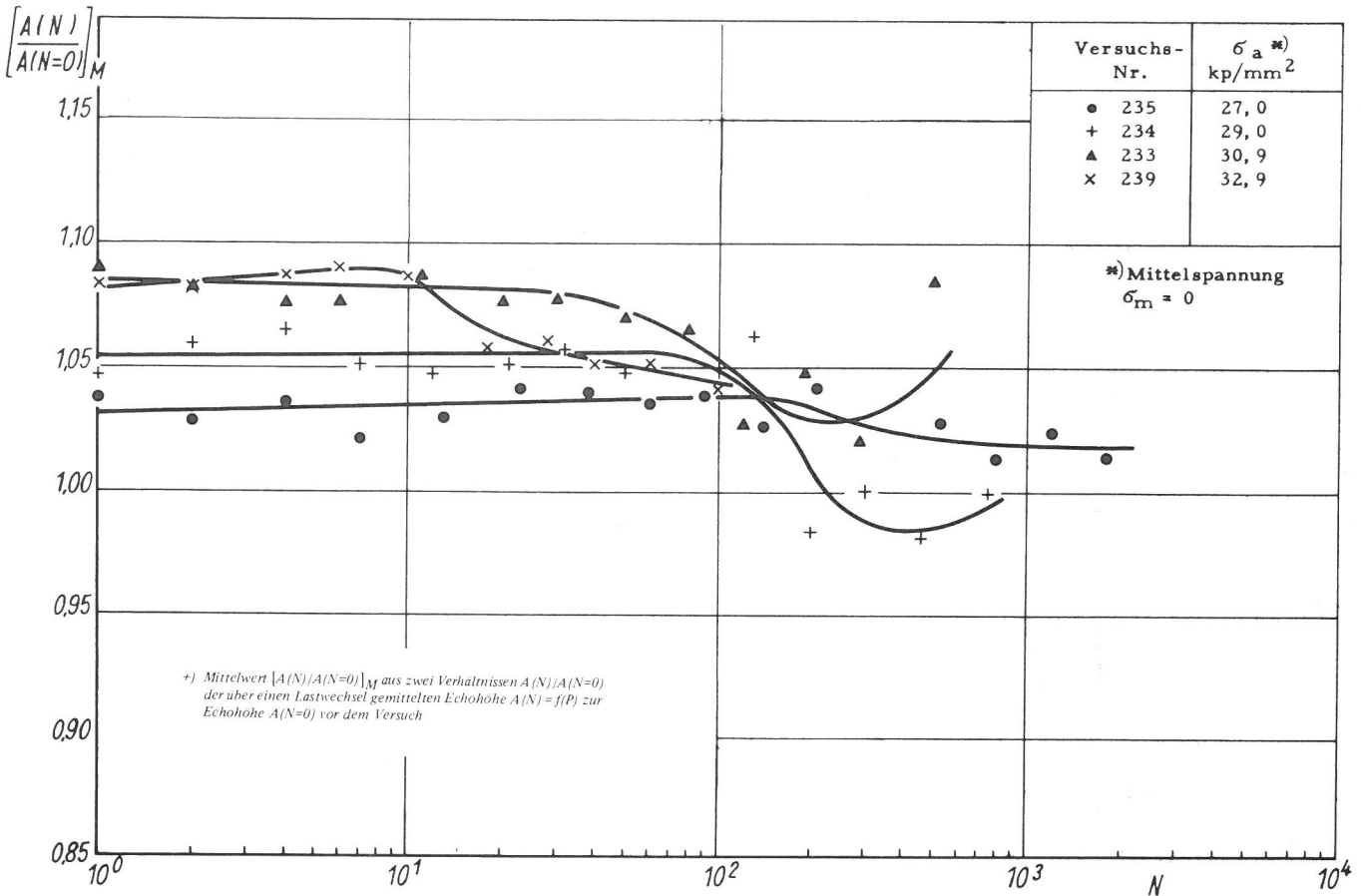


Bild 32
Normierte Echohöhe<sup>+) [A(N)/A(N=0)]_M der Ultraschallimpulse bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N
St 52-3 Serie 3 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 22 \mu\text{m}$
Ultraschallfrequenz 5 MHz</sup>

ähnliche Kurven wie in den Bildern 19 ÷ 21, die Änderungen der Echohöhen im Bereich der wesentlichen Verformungsweg-Amplitudenerhöhung sind jedoch teilweise so schwach ausgeprägt, daß aus dieser Darstellung und weiteren Ergebnissen an Proben mit noch größerem Korndurchmesser keine zusätzlichen, die Untersuchung des Spannungs-Dehnungsverhaltens ergänzenden Aussagen zum Einfluß der Korngröße auf den Plastizierungsprozeß erwartet werden können.

4.2.1. Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Aus der Untersuchung der Serien 2 ÷ 5 von St 52-3 zeigen die Bilder 33 ÷ 36 für vier Korngrößen die Änderung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N für jeweils einen Spannungs-Amplitudenbereich, bei dem die höchste Spannungsamplitude bereits nach einigen Lastwechseln zu einer feststellbaren Erhöhung der Verformungswegamplitude und die niedrigste Spannungsamplitude zu einer maximalen Verformungsweg-Amplitudenerhöhung von ungefähr 5 % der im ersten Lastwechsel gemessenen Verformungswegamplitude führt. Die obere Grenze des jeweiligen Spannungs-Amplitudenbereiches liegt bei allen Serien ungefähr $7 \div 8 \text{ kp/mm}^2$ unterhalb der im Pulser für die Belastungsgeschwindigkeit der Wechselbeanspruchungs-Versuche sich ergebenden oberen Streckgrenze (vgl. Tabelle 3) und ist bei der 2. Serie ($d_K = 13 \mu\text{m}$) um ungefähr 4 kp/mm^2 , jedoch bei den anderen Serien um ungefähr $6 \div 7 \text{ kp/mm}^2$ niedriger als die entsprechende untere Streckgrenze. Der Spannungs-Amplitu-

denbereich schrumpft mit wachsender Korngröße zusammen, wobei die untere Grenze sich nach kleineren Spannungsamplituden hin verschiebt. Aus dem Vergleich der Bilder geht hervor, daß in dem beschriebenen Spannungs-Amplitudenenbereich bei der 3. Serie ($d_K = 22 \mu\text{m}$), der 4. Serie ($d_K = 30 \mu\text{m}$) sowie der 5. Serie ($d_K = 45 \mu\text{m}$) die merkliche Erhöhung der Verformungswegamplitude sehr viel früher beginnt und sich daran eine ausgeprägtere, wesentlich länger andauernde Einleitungsperiode der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung anschließt als bei der 2. Serie ($d_K = 13 \mu\text{m}$). Die aus den Versuchen mit Proben der 2. Serie resultierenden Kurven (Bild 33) gleichen in ihrem prinzipiellen Verlauf den in Bild 14 dargestellten Kurven für die 1. Serie von St 37-3 ($d_K = 16 \mu\text{m}$); der Verformungsweg-Amplitudenverlauf für die 1. und 2. Serie von St 52-3 – beide Serien wurden gleich wärmebehandelt (vgl. Tabelle 2) – stimmt für sich entsprechende Spannungsamplituden im allgemeinen gut überein. Vergleichbare Kurven ergeben sich auch für die Serien 3 und 4 von St 52-3 (Bild 34, 35), während die Kurven für die 5. Serie (Bild 36) sich am besten dem Verlauf der Serien 3 und 4 bei niedrigen Spannungsamplituden zuordnen lassen.

In Bild 37 ist die maximal sich einstellende normierte Verformungswegamplitude $[\delta(N)/\delta(N=1)]_{\text{max}}$ als Funktion der aufgetragenen Spannungsamplitude σ_a für die Serien 2 ÷ 5 von St 52-3 dargestellt. Aus dem Vergleich der parabelförmig gekrümmten Kurven geht hervor, daß für gleiche, maximal sich einstellende Verformungswegamplituden bei den Serien 2 und 3 höhere Spannungsamplituden σ_a erforderlich sind als bei den Serien 4 und 5. Als Ursache hierfür sind, wie das bereits bei der Gegenüberstellung der 1. Serien von St 37-3 und St 52-3 (vgl. Bild 16) beobachtet wurde, vor allem die für die einzelnen Serien unterschiedlich hohen Grenz-Spannungsamplituden σ_{aG} anzusehen, die sich hier

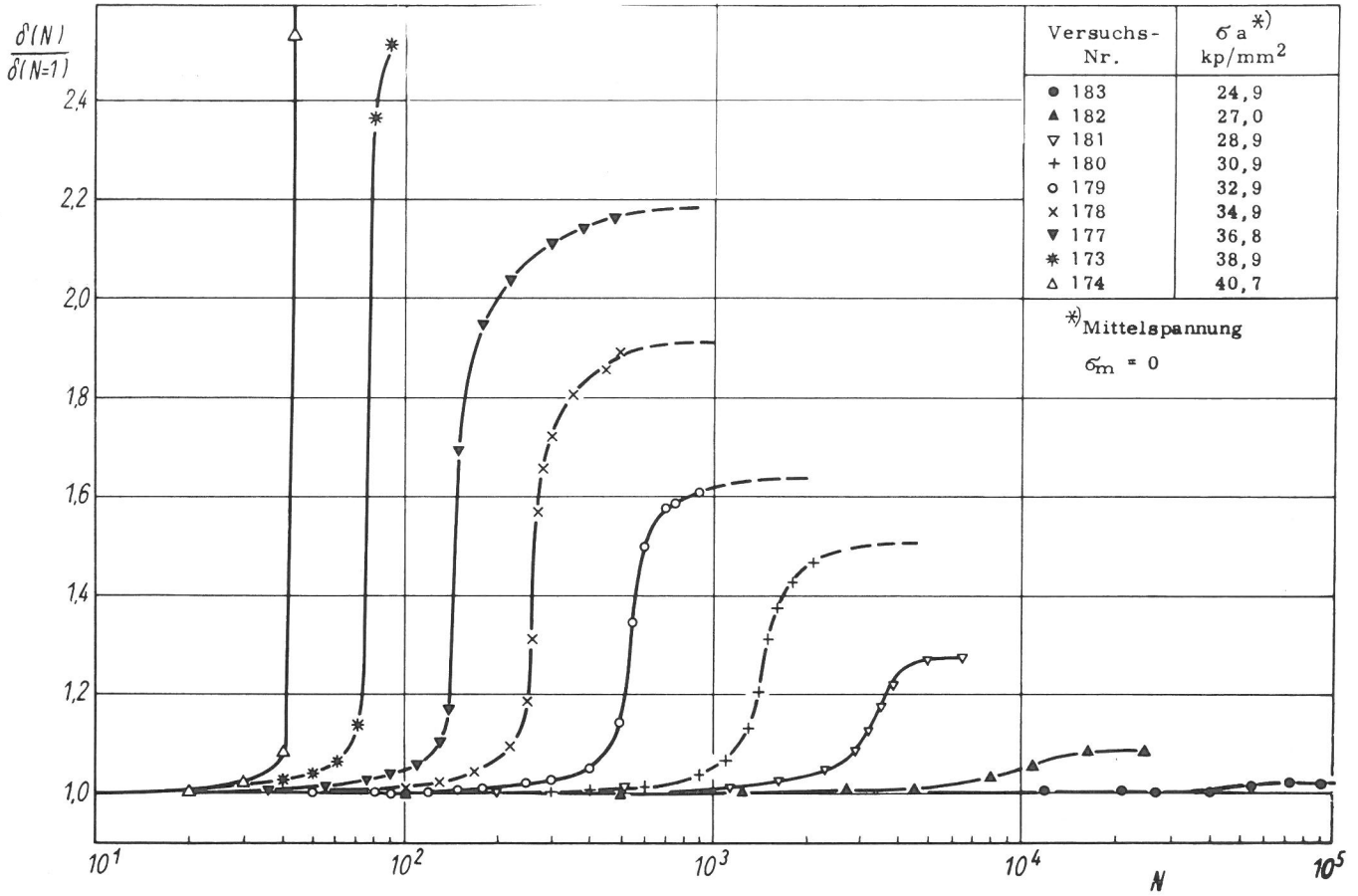
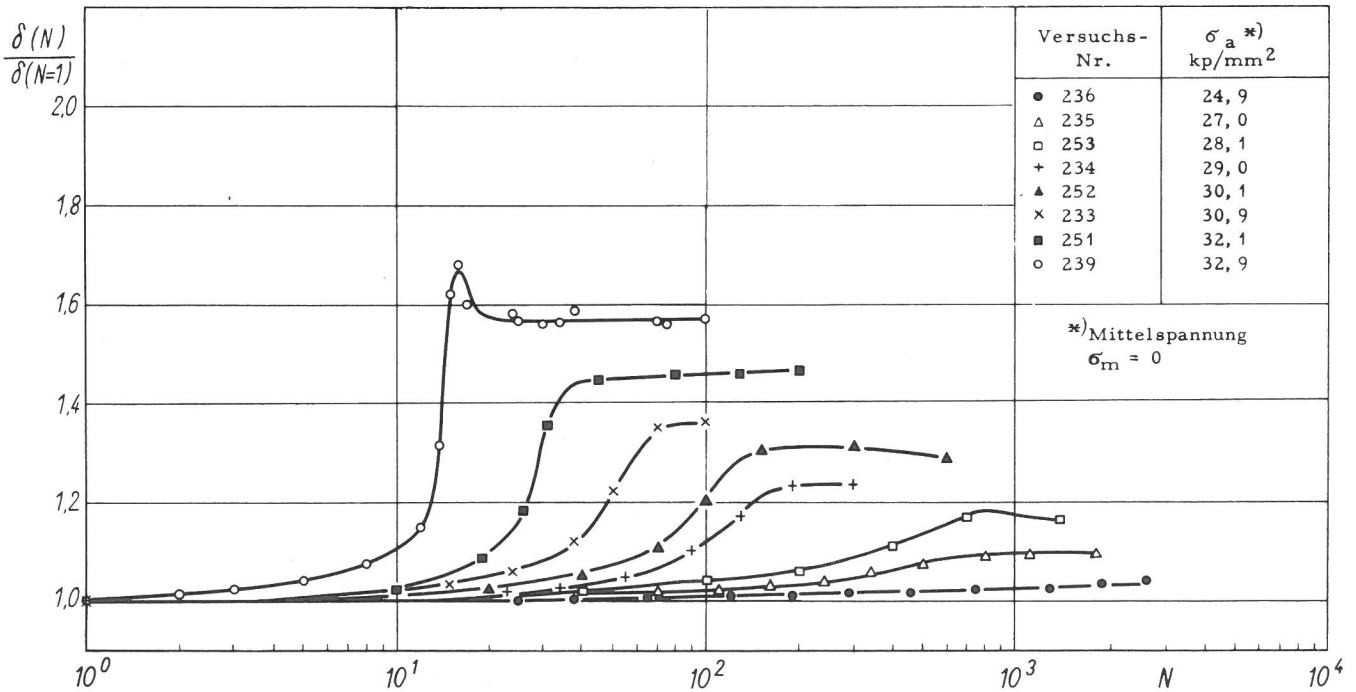


Bild 33
Normierte Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude p_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N
St 52-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$

Bild 34
Normierte Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N
St 52-3 Serie 3 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 22 \mu\text{m}$



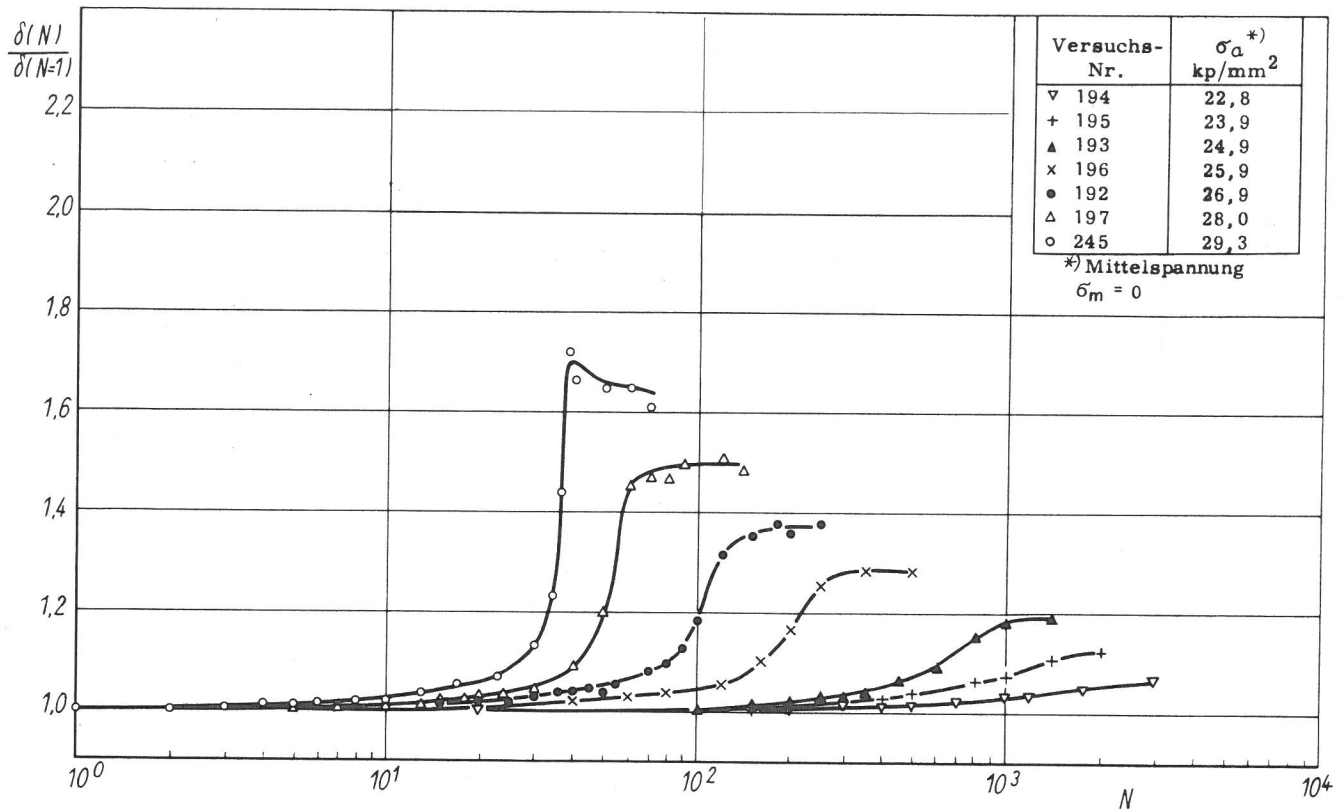
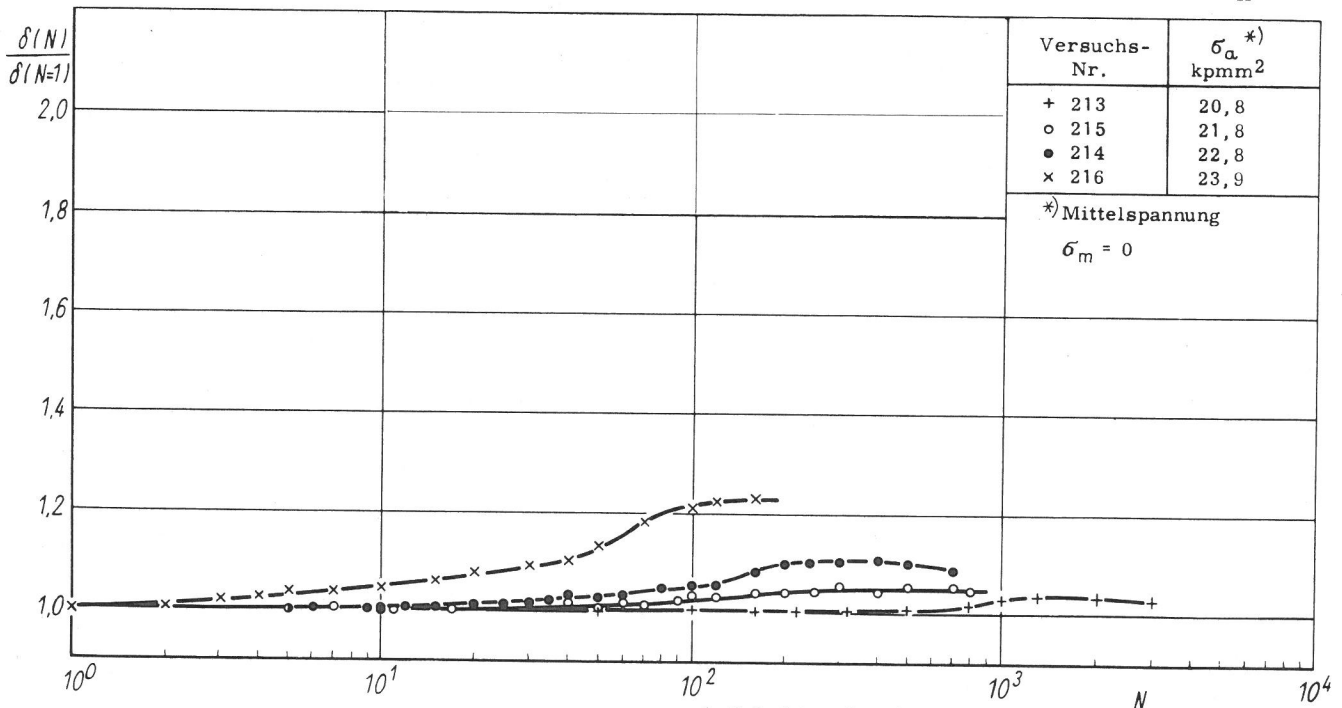


Bild 35
Normierte Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N

St 52-3 Serie 4 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 30 \mu m$

Bild 36
Normierte Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N

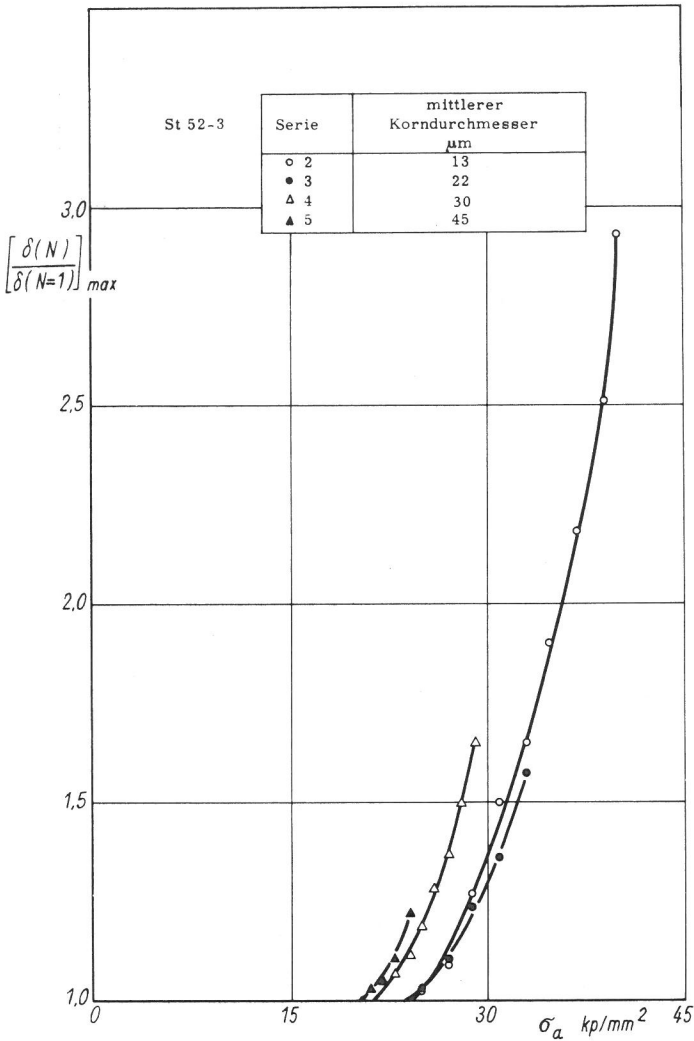
St 52-3 Serie 5 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 45 \mu m$



Serie	d_K μm	σ_{aG} kp/mm ²
2	13	24,3
3	22	23,7
4	30	21,3
5	45	20,4

Tabelle 4
Grenz-Spannungsamplitude σ_{aG} für das Eintreten einer Verformungsweg-Amplitudenerhöhung für die Serien 2 ÷ 5 von St 52-3

als Schnittpunkte der Kurven mit der σ_a -Achse ergeben und in Tabelle 4 zusammengestellt sind. Weder die Grenz-Spannungsamplituden σ_{aG} , die zwei Gruppen bilden, nämlich die eine im Bereich um $\sigma_{aG} = 24 \text{ kp/mm}^2$ (Werte der Serien 2 und 3) und die andere im Bereich um $\sigma_{aG} = 21 \text{ kp/mm}^2$ (Werte der Serien 4 und 5), noch andere Merkmale der Funktionen lassen sich direkt der Korngröße zuordnen. Die Gruppierung der σ_{aG} -Werte erfolgt offenbar entsprechend den Abkühlungsbedingungen nach dem Glühen (vgl. Tabelle 2). Für die beiden in Luft abgekühlten Serien 2 und 3 er-



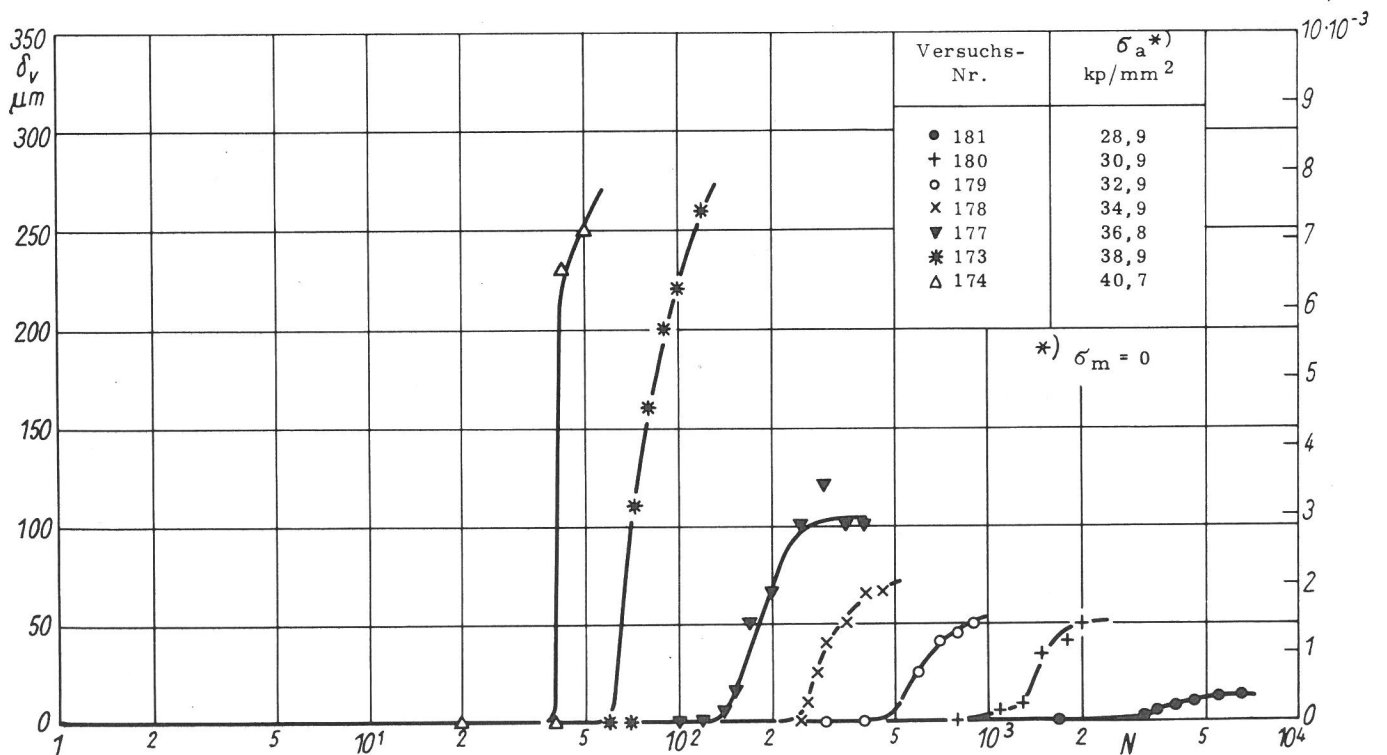
geben sich höhere σ_{aG} -Werte als für die beiden im Ofen abgekühlten Serien 4 und 5.

Vor allem bei den mit höheren Spannungsamplituden gefahrenen Versuchen trat während der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung eine Probenverlängerung ein. Speziell dazu an mehreren Proben der 2. Serie von St 52-3 mit Spannungsamplituden von $\sigma_a = 30 \div 37 \text{ kp/mm}^2$ durchgeführte Versuche zeigten, daß, nachdem bei gleicher Ober- und Unterkraft (maximale Zug- bzw. Druckkraft) die Probenverlängerung eingesetzt hatte, diese durch eine Erniedrigung der Oberkraft um nur ungefähr 1 % zum Stillstand gebracht werden konnte und eine geringe weitere Verminderung der Oberkraft zur anschließenden Verkürzung der Probe führte. Nach einer überschlägigen Rechnung liegt die zur Unterdrückung der Probenverlängerung erforderliche Änderung der Oberkraft in der Größenordnung des durch die Querdehnung hervorgerufenen Unterschiedes zwischen der wahren Ober- und Unterspannung. Die bei gleicher Ober- und Unterkraft auftretende Probenverlängerung ließ sich bei den Versuchen mit Proben der Serien 2 ÷ 5 zur Untersuchung des Korngrößeneinflusses direkt der kontinuierlichen, zeitabhängigen Aufzeichnung des Verformungsweges entnehmen (vgl. unter 3.3.1). Die daraus für die 2. Serie sich ergebende Probenverlängerung δ_v in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N ist für die höheren Spannungsamplituden σ_a in Bild 38 dargestellt. Die Gegenüberstellung der an den gleichen Proben ermittelten Ergebnisse aus den Bildern 33 und 38 zeigt, daß die Probenverlängerung später einsetzt als die Verformungsweg-Amplitudenerhöhung, nämlich erst mit dem Beginn der wesentlichen Erhöhung der Verformungswegamplitude, und dann mit dem Anwachsen der Verformungswegamplitude vergleichbar zunimmt. Mit Ausnahme des Verhaltens bei den beiden höchsten Spannungsamplituden klingt die Probenverlängerung mit dem Abschluß der wesent-

Bild 37
Maximal sich einstellende normierte Verformungswegamplitude $[\delta(N)]/\delta(N=1)]_{max}$ in Abhängigkeit der Spannungsamplitude σ_a

Bild 38
Probenverlängerung δ_v bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N

St 52-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$
 ϵ_v



lichen Verformungsweg-Amplitudenerhöhung offenbar einem Grenzwert zustrebend ab. Für die Serien 3 ÷ 5 ergab sich prinzipiell die gleiche Abhängigkeit der Probenverlängerung von der Lastwechselzahl und der Spannungsamplitude als Parameter. Bei den jeweils höchsten Spannungsamplituden betrug die größte gemessene Probenverlängerung $\delta_V =$

$50 \mu\text{m}$ ($\sigma_a = 32,9 \text{ kp/mm}^2$) für die 3. Serie, $\delta_V = 50 \mu\text{m}$ ($\sigma_a = 29,3 \text{ kp/mm}^2$) für die 4. Serie und $\delta_V = 20 \mu\text{m}$ ($\sigma_a = 23,9 \text{ kp/mm}^2$) für die 5. Serie.

In den *Bildern 39 ÷ 42* ist das Spannungs-Verformungsweg-Verhalten im Bereich der Streckgrenze für die Proben der

Probe	Versuchs-Nr.	σ_a x) kp/mm ²
1 xx)	176	0
2	183	24,9
3	182	27,0
4	181	28,9
5	180	30,9
6	179	32,9
7	178	34,9
8	177	36,8
9	173	38,9
10	174	40,9

x) Mittelspannung $\sigma_m = 0$
xx) ohne vorhergegangene Wechselbeanspruchung

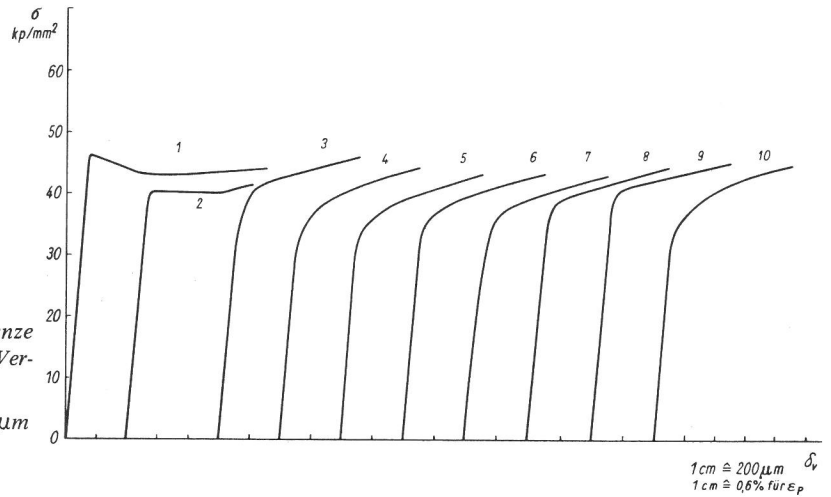


Bild 39
Spannungs-Verformungsweg-Verhalten im Bereich der Streckgrenze nach der Wechselbeanspruchung zur Ermittlung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$

St 52-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$

Probe	Versuchs-Nr.	σ_a x) kp/mm ²
1 xx)	231	0
2	236	24,9
3	235	27,0
4	234	29,0
5	233	30,9
6	239	32,9

x) Mittelspannung $\sigma_m = 0$
xx) ohne vorhergegangene Wechselbeanspruchung

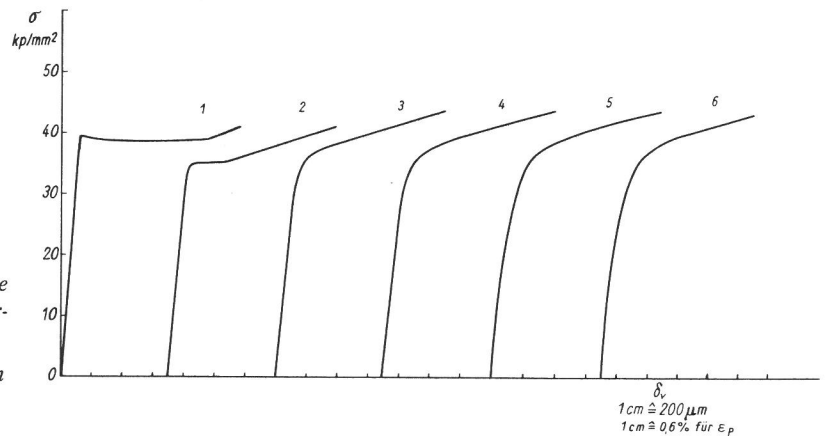


Bild 40
Spannungs-Verformungsweg-Verhalten im Bereich der Streckgrenze nach der Wechselbeanspruchung zur Ermittlung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$

St 52-3 Serie 3 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 22 \mu\text{m}$

Probe	Versuchs-Nr.	σ_a x) kp/mm ²
1 xx)	187	0
2	194	22,8
3	195	23,9
4	193	24,9
5	196	25,9
6	192	26,9
7	197	28,0
8	245	29,3

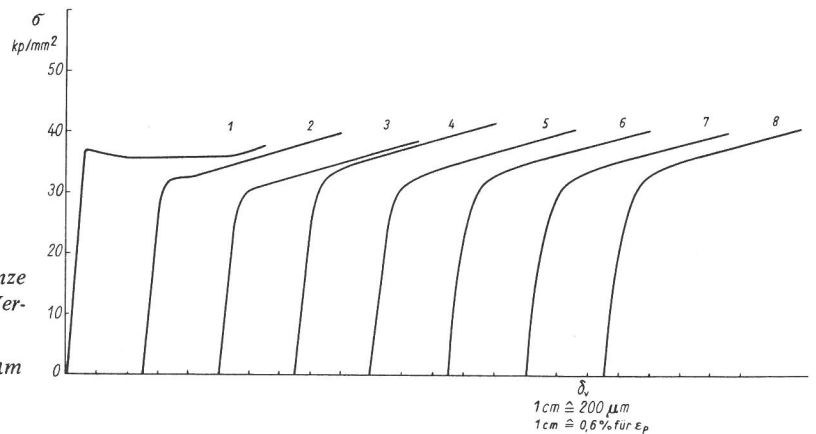


Bild 41
Spannungs-Verformungsweg-Verhalten im Bereich der Streckgrenze nach der Wechselbeanspruchung zur Ermittlung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$

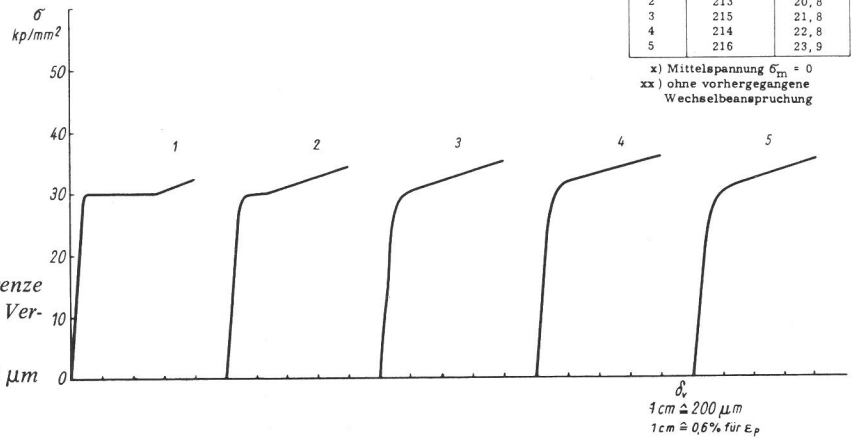
St 52-3 Serie 4 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 30 \mu\text{m}$

Probe	Versuchs-Nr.	$\sigma_a^*)$ kp/mm ²
1 xx)	211	0
2	213	20,8
3	215	21,8
4	214	22,8
5	216	23,9

x) Mittelspannung $\sigma_m = 0$
xx) ohne vorhergegangene Wechselbeanspruchung

Bild 42
Spannungs-Verformungsweg-Verhalten im Bereich der Streckgrenze nach der Wechselbeanspruchung zur Ermittlung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$

St 52-3 Serie 5 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 45 \mu m$



Serien 2 ÷ 5 von St 52-3 dargestellt, die vorher mit einer Spannungsamplitude σ_a oberhalb der Grenzspannungsamplitude σ_{aG} (vgl. Tabelle 4) bis zum Abschluß der wesentlichen Verformungsweg-Amplitudenerhöhung beansprucht worden waren. Zum Vergleich wurde auch die Spannungs-Verformungsweg-Kurve einer vorher nicht wechselbeanspruchten Probe jeder Serie eingezeichnet. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug wie bei der Wechselbeanspruchung 2100 kp/sec. Mit Ausnahme der Versuche, die jeweils mit der niedrigsten Spannungsamplitude $\sigma_a > \sigma_{aG}$ gefahren worden waren, wurde bei allen Proben die ausgeprägte Streckgrenze während der Wechselbeanspruchung abgebaut.

Aus den Ergebnissen für die niedrigste Spannungsamplitude $\sigma_a > \sigma_{aG}$ geht hervor, daß, wie das bereits bei den Versuchen mit Proben der 2. Serie von St 37-3 festgestellt wurde (vgl. Bild 25), die Beseitigung der ausgeprägten Streckgrenze bei den Serien 2 ÷ 4 mit der vorhergehenden Erniedrigung der unteren Streckgrenze bei gleichzeitiger Abnahme der Lüdersdehnung verbunden ist, während bei der 5. Serie die untere Streckgrenze durch die Verformungsweg-Amplitudenerhöhung nicht merklich abfällt. Abweichend von den Beobachtungen an der 2. Serie von St 37-3 (vgl. Bild 23 und 25) trat bei den Serien 2 und 5 die ausgeprägte Streckgrenze nach den mit den niedrigsten Spannungsamplituden $\sigma_a > \sigma_{aG}$

Probe	Versuchs-Nr.	$\sigma_a^*)$ kp/mm ²	Lastwechselzahl
1	176	0	0
2	227	23,8	$5,6 \cdot 10^7$

*) Mittelspannung $\sigma_m = 0$



Bild 43
Spannungs-Verformungsweg-Verhalten im Bereich der Streckgrenze St 52-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu m$
Probe 1: ohne vorhergegangene Wechselbeanspruchung
Probe 2: nach der Wechselbeanspruchung mit einer Kraftamplitude P_a unterhalb des Grenzwertes für die Erhöhung der Verformungswegamplitude

Probe	Versuchs-Nr.	$\sigma_a^*)$ kp/mm ²	Lastwechselzahl
1	231	0	0
2	244	22,8	$2,2 \cdot 10^4$

*) Mittelspannung $\sigma_m = 0$

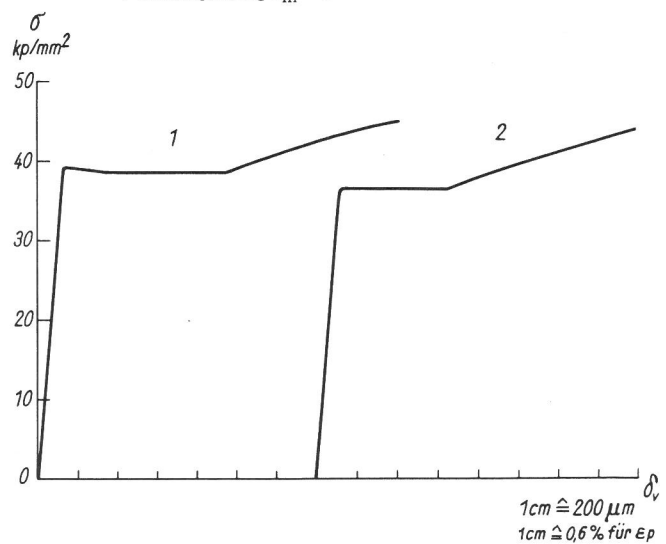


Bild 44
Spannungs-Verformungsweg-Verhalten im Bereich der Streckgrenze St 52-3 Serie 3 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 22 \mu m$
Probe 1: ohne vorhergegangene Wechselbeanspruchung
Probe 2: nach der Wechselbeanspruchung mit einer Kraftamplitude P_a unterhalb des Grenzwertes für die Erhöhung der Verformungswegamplitude

Probe	Versuchs-Nr.	$\sigma_a^{*)}$ kp/mm ²	Lastwechsel-zahl
1	187	0	0
2	255	20,7	$7,6 \cdot 10^4$

*) Mittelspannung $\sigma_m = 0$

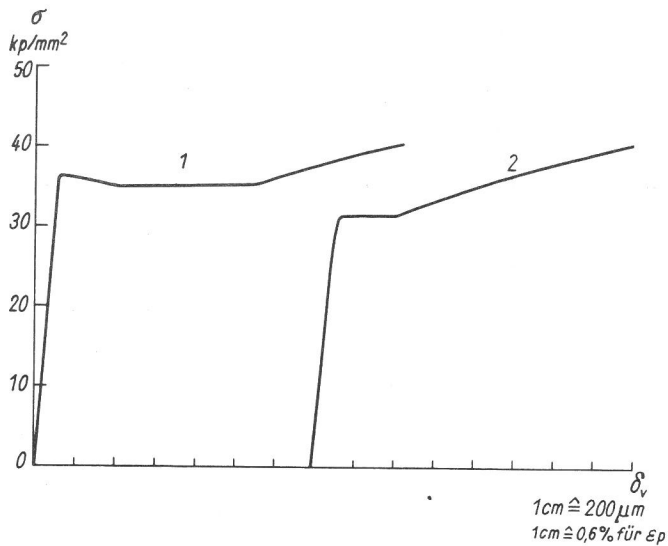


Bild 45
Spannungs-Verformungsweg-Verhalten im Bereich der Streckgrenze
St 52-3 Serie 4 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 30 \mu\text{m}$
Probe 1: ohne vorhergegangene Wechselbeanspruchung
Probe 2: nach der Wechselbeanspruchung mit einer Kraftamplitude P_a unterhalb des Grenzwertes für die Erhöhung der Verformungswegamplitude

geführten Versuchen noch auf, obwohl, wie die Bilder 33 und 36 zeigen, die Verformungswegamplitude ihren Maximalwert schon erreicht hatte.

In den Bildern 43 ÷ 46 sind für Proben aus den Serien 2 ÷ 5 von St 52-3 die Spannungs-Verformungsweg-Kurven im Bereich der Streckgrenze jeweils einer vorher nicht zyklisch belasteten und einer mit $\sigma_a < \sigma_{aG}$ über mehr als 10^4 Zyklen wechselbeanspruchten Probe einander gegenübergestellt. Aus dem jeweiligen Vergleich der Kurven eines Bildes geht hervor, daß auch im Spannungs-Amplitudenbereich um $\Delta\sigma \approx 1 \text{ kp/mm}^2$ unterhalb σ_{aG} noch eine Änderung der mechanischen Eigenschaften im Bereich der Streckgrenze eintritt, obwohl während der Wechselbeanspruchung keine Erhöhung der Verformungswegamplitude mehr festgestellt werden konnte. Bei der wechselbeanspruchten Probe der 2. Serie ($\Delta\sigma = 0,5 \text{ kp/mm}^2$), der 3. Serie ($\Delta\sigma = 0,9 \text{ kp/mm}^2$) und der 4. Serie ($\Delta\sigma = 0,6 \text{ kp/mm}^2$) wurde sowohl eine merkliche Erniedrigung der unteren Streckgrenze als auch eine wesentliche Verminderung der Lüdersdehnung beobachtet (Bild 43 ÷ 45), während bei der Probe der 5. Serie ($\Delta\sigma = 1,7 \text{ kp/mm}^2$) nur noch eine geringe Verkürzung des Lüdersbereiches zu erkennen war (Bild 46).

4.2.2. Mikro-Verformungsverhalten

Über die Registrierung des Spannungs-Dehnungs-Verlaufes im Bereich um den Belastungs-Nullpunkt (vgl. Aufnahmen in Bild 13) bei der schrittweisen Erhöhung der Spannungsamplitude läßt sich zunächst die Spannungsamplitude σ_{i0}

Probe	Versuchs-Nr.	$\sigma_a^{*)}$ kp/mm ²	Lastwechsel-zahl
1	211	0	0
2	218	18,7	$2,1 \cdot 10^4$

*) Mittelspannung $\sigma_m = 0$

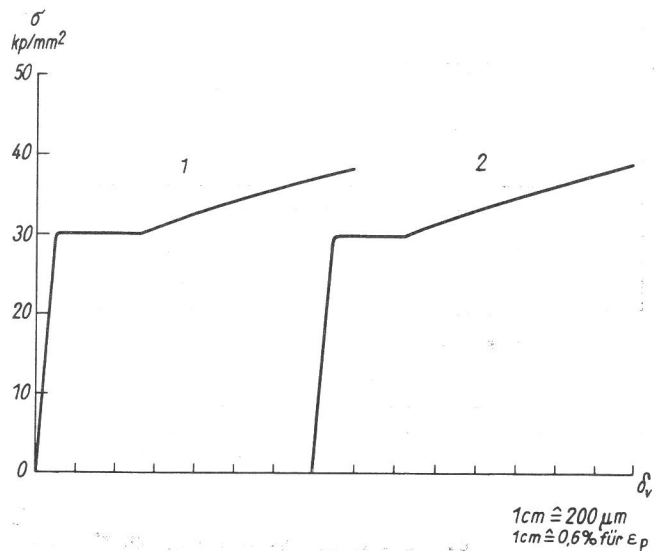


Bild 46
Spannungs-Verformungsweg-Verhalten im Bereich der Streckgrenze
St 52-3 Serie 5 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 45 \mu\text{m}$
Probe 1: ohne vorhergegangene Wechselbeanspruchung
Probe 2: nach der Wechselbeanspruchung mit einer Kraftamplitude P_a unterhalb des Grenzwertes für die Erhöhung der Verformungswegamplitude

Serie	d_K	Grenzen für σ_{i0}	σ_{i0}
	μm		
2	13	6,3 ÷ 8,4	$7,4 \pm 1,0$
3	22	3,3 ÷ 6,3	$4,8 \pm 1,5$
4	30	2,7 ÷ 5,4	$4,1 \pm 1,3$
5	45	3,3 ÷ 5,4	$4,4 \pm 1,0$

Tabelle 5
Grenz-Spannungsamplitude σ_{i0} für das Auftreten plastischer Mikroverformungen für die Serien 2 ÷ 5 von St 52-3

eingrenzen, bei der (im Rahmen der Meßgenauigkeit) durch die Entstehung einer mechanischen Hysteresisschleife die erste plastische Verformung nachweisbar ist. In Tabelle 5 sind die σ_{i0} eingrenzenden sowie die sich daraus ergebenden mittleren Werte für die Serien 2 ÷ 5 von St 52-3 zusammengestellt. Der Vergleich von Tabelle 4 mit Tabelle 5 zeigt, daß bei allen Serien die Spannungsamplitude σ_{i0} für das Eintreten einer plastischen Mikroverformung der Größenordnung 10^{-6} wesentlich kleiner ist als die Grenz-Spannungsamplitude σ_{aG} für eine Erhöhung der Verformungswegamplitude (Meßgenauigkeit 10^{-5}) während der Wechselbeanspruchung. Das Anwachsen des mikroplastischen Anteiles ϵ_{pm} der Dehnungsamplitude durch die weitere Erhöhung der Spannungsamplitude σ_a über σ_{i0} hinaus ist in Bild 47 dargestellt. Bei allen vier Serien ergibt sich für $\epsilon_{pm} = f(\sigma_a)$ eine parabelförmig gekrümmte Kurve, deren Steilheit mit größer werdendem Korndurchmesser zunimmt.

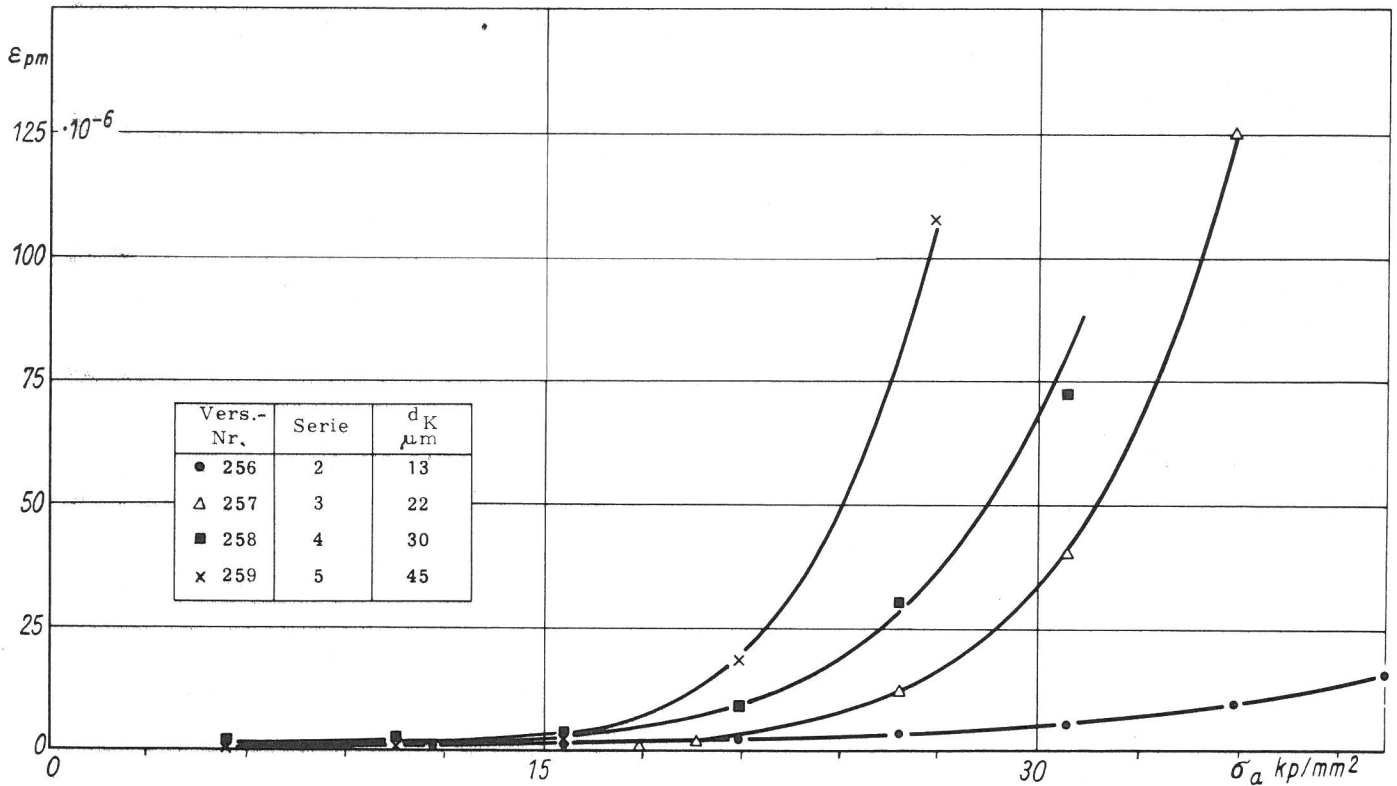


Bild 47
 Abhängigkeit des mikroplastischen Anteils ϵ_{pm} der Dehnungsamplitude von der Spannungsamplitude σ_a für den ersten Lastwechsel
 St 52-3

4.3. Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf den Plastizierungsprozeß

Der für die Erläuterung der Versuchsergebnisse mit Hilfe der Versetzungstheorie interessierende Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf den Beginn und den Ablauf des Plastizierungsprozesses konnte nicht in der vorgesehenen Weise untersucht werden. Im Frequenzbereich des Pulser-Schnellantriebes ($30 \div 40$ Hz) wurde bereits bei Spannungsamplituden etwas oberhalb der Grenzspannungsamplitude σ_{aG} eine Probenerwärmung festgestellt. Da bei den meisten bisher gebräuchlichen Dauerschwing-Prüfeinrichtungen keine Regelung der Frequenz möglich ist, stand für die Variation der Frequenz im Bereich von $0,1 \div 10$ Hz nur eine Prüfmaschine zur Verfügung. Mehrere auf dieser Maschine durchgeführte Versuche zeigten jedoch, daß durch die nicht genügend exakte Querhauptführung in der Probe sehr hohe Biegespannungen auftraten, die Maschine also für die vorgesehenen Untersuchungen nicht geeignet war. Schließlich verblieb noch die Möglichkeit, die Belastungsgeschwindigkeit im Langsamantrieb des Pulsers zu verdoppeln (vgl. unter 2.1). Die Ergebnisse der Untersuchungen an Proben der 2. Serie von St 52-3 in Bild 48 zeigen für zwei Spannungsamplituden, daß eine Steigerung der Belastungsgeschwindigkeit von 2100 kp/sec auf 4200 kp/sec keinen merklichen Einfluß auf den Beginn und Verlauf der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung in Abhängigkeit der Lastwechselzahl hat.

Versuchs-Nr.	σ_a (x) kp/mm ²	Belastungsgeschwindigkeit kp/sec
× 180	30,9	2100
● 189	30,9	4200
+ 179	32,9	2100
○ 186	32,9	4200

(x) Mittelspannung $\sigma_m = 0$ kp/mm²

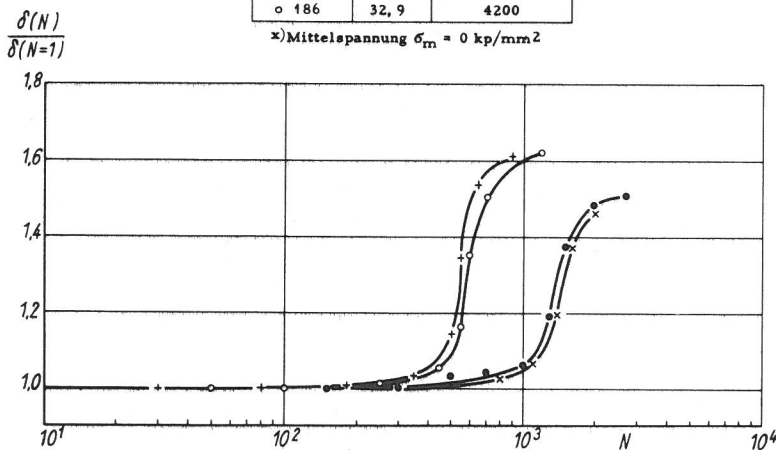


Bild 48
 Vergleich der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N bei einfacher und doppelter Belastungsgeschwindigkeit
 St 52-3 Serie 2 Korndurchmesser $d_K = 13 \mu m$

5.1. Bedeutung plastischer Mikroverformungen für den Plastizierungsprozeß

Das für verschiedene Korngrößen beobachtete Mikro-Verformungsverhalten in Abhängigkeit der Spannungsamplitude beim Durchfahren des ersten Belastungszyklus ist vergleichbar mit dem Auftreten von Mikrodehnungen im Zugversuch bei Spannungen unterhalb der Streckgrenze. Suits und Chalmers [61] haben bei Untersuchungen an Silizium-Eisen mit Proben verschiedener Korngröße festgestellt, daß nach dem Überschreiten einer Grenzspannung, die der kritischen Schubspannung des Einkristalls entspricht, also unabhängig von der Korngröße ist, weit unterhalb der Streckgrenze bereits bei einzelnen Körnern Gleitlinien auftreten. Dementsprechend zeigt der Vergleich der für die σ_{iO} -Werte aus Tabelle 5 ersichtlichen Grenzen, daß diese mit Ausnahme der Abweichung für $d_K = 13 \mu m$ für alle anderen Korndurchmesser gut übereinstimmen, also kein Korngrößeneinfluß erkennbar ist, und der für σ_{iO} sich ergebende Spannungsbereich von ungefähr $4,1 \div 7,4 \text{ kp/mm}^2$ in sinnvoller Beziehung zu der aus der kritischen Schubspannung $\tau_o = 1,8 \text{ kp/mm}^2$ für mittellorientierte Eisen-Einkristalle [84] resultierenden Zugspannung von $\sigma_o = 3,6 \div 5,4 \text{ kp/mm}^2$ (für $\sigma/\tau = 2 \div 3$) steht.

Aus den genannten Untersuchungen geht weiter hervor, daß die Anzahl der plastizierten Körner oberhalb des der kritischen Schubspannung entsprechenden Wertes mit wachsender äußerer Spannung zunimmt, wobei gleiche Spannungen in dem grobkörnigen Material ($d_K = 170 \mu m$) zu einem wesentlich höheren Anteil an plastizierten Körnern führen als in den feinkörnigen Proben ($d_K = 20 \mu m$). Die hierauf bezogene Erörterung des in Bild 47 dargestellten Mikro-Verformungsverhaltens setzt die Kenntnis des Einflusses der bereits plastizierten Körner auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten voraus. Nach Cottrell [26] ist für eine Probe, in der nach dem Überschreiten der für die Versetzungsbewegung erforderlichen Spannung τ_i durch die aufgebrauchte Schubspannung τ nur wenige Körner in dem sich sonst elastisch verhaltenden Material plastiziert werden, die makroskopische Abgleitung

$$a \sim \alpha \frac{(\tau - \tau_i)}{G} \quad (1)$$

(α = Anteil der plastizierten Körner; G = Schubmodul), wenn $\alpha \ll 1$ und a mindestens um eine Größenordnung kleiner ist als die elastische Scherung. Unter der Voraussetzung, daß Gl. (1) nicht nur für die erste Belastung mit $\tau = 0$ beginnend für den Abschnitt A-B der in Bild 4 dargestellten mechanischen Hysteresisschleife gilt, sondern z. B. auch die Abgleitung $[a]_{F-B}$ durch die Spannungsänderung von E über F nach B sinngemäß damit beschrieben werden darf, nämlich

$$[a]_{F-B} \sim \alpha \frac{(2 \tau_a - 2 \tau_i)}{G}$$

oder

$$\frac{[a]_{F-B}}{2} \sim \alpha \frac{(\tau_a - \tau_i)}{G}, \quad (2)$$

so folgt daraus für den Zusammenhang zwischen dem plastischen Anteil ϵ_{pm} der Dehnungsamplitude und der Spannungsamplitude σ_a

$$\epsilon_{pm} \sim \alpha \frac{(\sigma_a - \sigma_i)}{G}. \quad (3)$$

Aus dem Vergleich der zwischen ϵ_{pm} und σ_a bestehenden Beziehung in Gl. (3) mit den Funktionen $\epsilon_{pm} = f(\sigma_a)$ in Bild 47 geht hervor, daß der parabelförmig gekrümmte Verlauf der experimentell ermittelten Kurven auf den oberhalb σ_{iO} mit σ_a wachsenden Anteil α der plastizierten Körner zurückzuführen ist. Die mit größer werdendem Korndurchmesser d_K zunehmende Steilheit der Kurven zeigt an, daß bei gleichen $(\sigma_a - \sigma_{iO})$ -Werten der Anteil der plastizierten Körner mit wachsender Korngröße zunimmt.

Aufgrund der zwischen dem Mikro-Verformungsverhalten bei der einsinnigen Belastung und dem innerhalb des ersten Lastwechsels bei der Wechselbeanspruchung bestehenden Analogie wird angenommen, daß auch bei der zyklischen Belastung infolge einer günstigen Kornorientierung zur Beanspruchungsrichtung oder durch statistisch verteilte, örtlich begrenzte Spannungskonzentrationen im Gefüge, wie sie z. B. durch Einschlüsse und Ausscheidungen hervorgerufen werden können [85], bereits bei Spannungsamplituden weit unterhalb der Streckgrenze in einigen Körnern die für ihre plastische Verformung notwendigen freien Versetzungen entstehen. Durch die Plastizierung einzelner Körner innerhalb eines sich sonst elastisch verhaltenden Kornverbandes entstehen in der Umgebung der plastizierten Körner weitere innere Spannungen. Geht man speziell davon aus, daß die Abgleitung in den einzelnen plastizierten Körnern aus der Aufstauung der freien Versetzungen an den Korngrenzen resultiert [26, 86], so tritt jeweils in der Umgebung einer solchen Versetzungsaufstauung eine Spannungserhöhung auf, die bis in das Nachbarkorn reicht. Wird die dazu von Eshelby, Frank und Nabarro [65] abgeleitete Beziehung zunächst auf die erste Belastungsphase des ersten Lastwechsels angewandt, indem mit der z. B. aus einer aufgebrauchten Zugspannung resultierenden, in der Gleitebene wirksamen Schubspannung $\tau = \tau(t)$ der Abschnitt O-A-B der mechanischen Hysteresisschleife in Bild 4 durchfahren wird, dann gilt für die orts- und zeitabhängige Schubspannungserhöhung (vgl. Bild 49)

$$\tau_G(x, t) = [\tau(t) - \tau_i] \sqrt{\frac{L_v}{x}} \quad (4)$$

für den Bereich $0 < x \ll L_v$, wobei L_v die Länge der auf-

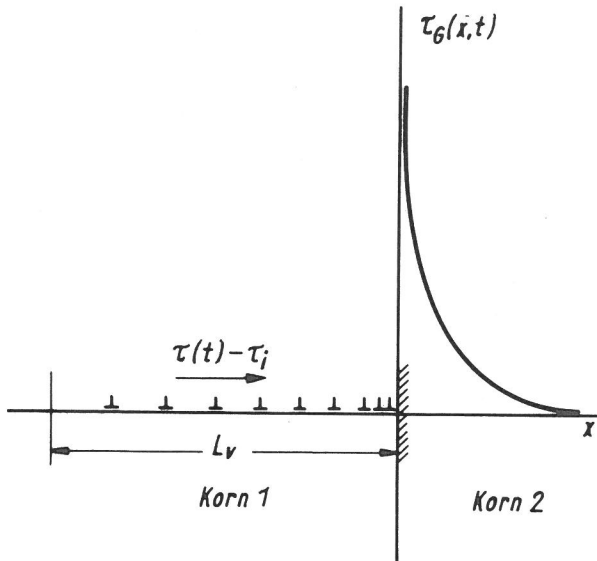


Bild 49
Schematische Darstellung der Spannungserhöhung $\tau_G(x, t)$ durch die Versetzungsaufstauung an einer Korngrenze zum Zeitpunkt t

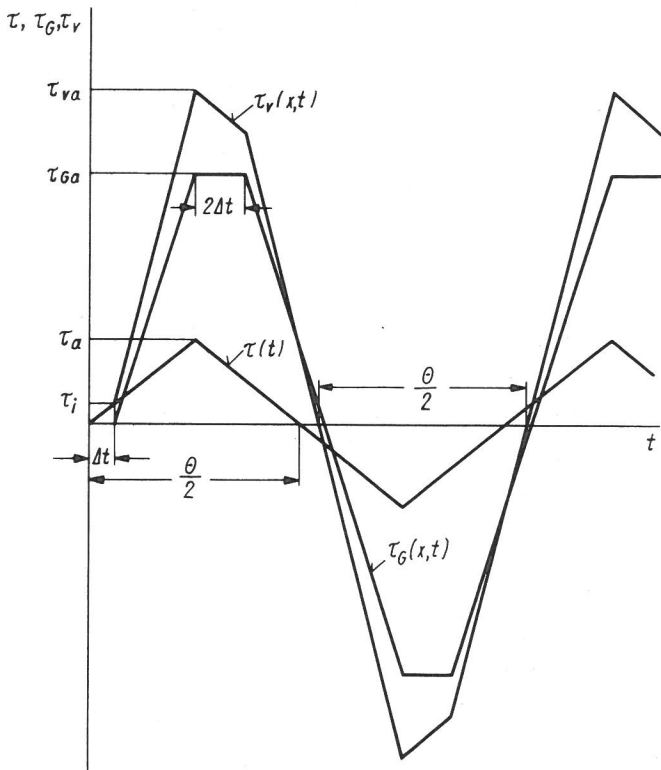


Bild 50
Schematische Darstellung des aus der Wechselbeanspruchung mit $\tau(t)$ sich ergebenden zeitabhängigen Verlaufes der durch eine Versetzungsaufstauung an der Korngrenze auftretenden Spannungserhöhung $\tau_G(x, t)$ sowie der aus der Überlagerung von $\tau(t)$ und $\tau_G(x, t)$ resultierenden Spannung $\tau_v(x, t)$

gestauten Versetzungsgruppe und x der Abstand von der Korngrenze ist. Für $\tau(t) = \tau_a$ im Punkt B der Hystereseschleife erreicht $\tau_G(x, t)$ das zeitabhängige Maximum

$$\tau_{Ga} = (\tau_a - \tau_i) \sqrt{\frac{L_v}{x}} \quad (5)$$

Während der anschließenden Spannungsänderung von B nach C bleibt das Maximum τ_{Ga} im wesentlichen so lange erhalten, bis die aufgestauten Versetzungen wieder zurück ins Korninnere laufen können, also $|\tau_a - \tau(t)| > |2 \tau_i|$ wird (vgl. unter 1.1.2). Mit der Erfüllung dieser Bedingung im Punkt C nimmt die Spannungserhöhung $\tau_G(x, t)$ ziemlich rasch ab, durchläuft den Wert Null und sollte durch eine Aufstauung von Versetzungen umgekehrter Polarität in der gleichen Gleitebene oder durch die Aktivierung eines anderen Gleitsystems für $\tau(t) = -\tau_a$ einem τ_{Ga} entsprechenden negativen Maximalwert $-\tau_{Ga}$ zustreben. Die aus dem beschriebenen Vorgang für den maschinenbedingten Verlauf von $\tau(t)$ sich ergebende Zeitabhängigkeit von $\tau_G(t)$ ist in Bild 50 schematisch dargestellt. Aus der Überlagerung von $\tau(t)$ und $\tau_G(x, t)$ resultiert der zeitabhängige Verlauf der in der Umgebung der Versetzungsaufstauung im sich elastisch verhaltenden Nachbarkorn wirksamen Schubspannung $\tau_v(x, t)$. Die dazu gehörige Spannungsamplitude τ_{va} beträgt entsprechend Bild 50

$$\tau_{va} = \tau_{Ga} + \tau_a \quad (6)$$

oder in Verbindung mit Gl. (5)

$$\tau_{va} = \tau_a \left[\left(1 - \frac{\tau_i}{\tau_a}\right) \sqrt{\frac{L_v}{x} + 1} \right] \quad (7)$$

Aus Gl. (7) geht hervor, daß die sich elastisch verhaltenden Körner, die eine gemeinsame Korngrenze mit z. B. im ersten Lastwechsel bereits plastizierten Körnern haben, in der Nähe der gemeinsamen Korngrenze Spannungsamplituden ausgesetzt sein können, die ein Mehrfaches ($L_v > x$) der aufgetragenen Spannungsamplitude betragen. Dadurch entstehen innerhalb aller sich elastisch verhaltenden Körner zwei Gruppen. Die eine Gruppe ist dadurch gekennzeichnet, daß ihre Körner eine gemeinsame Korngrenze mit bereits plastizierten Körnern haben, also örtlich sehr hoch beansprucht sein können, während die Körner der anderen Gruppe im wesentlichen nur unter der aufgetragenen Spannung stehen.

Nach den Ausführungen unter 1.2 ist in den bereits im ersten Belastungszyklus plastizierten Körnern gleich zu Versuchsbeginn eine mit der Lastwechselzahl fortschreitende Verfestigung zu erwarten. Die damit verbundene Erhöhung der Reibspannung τ_i [15, 39], die von der Lastwechselzahl N und der Spannungsamplitude τ_a abhängen sollte, also $\tau_i = f(\tau_a, N)$, führt nach Gl. (7) zu einer Verminderung von τ_{va} , wie das durch die nach Gl. (7) erweiterte Beziehung

$$\tau_{va} [\tau_a, \tau_i(\tau_a, N)] = \tau_a \left\{ \left[1 - \frac{\tau_i(\tau_a, N)}{\tau_a} \right] \sqrt{\frac{L_v}{x} + 1} \right\} \quad (8)$$

dargestellt werden kann.

5.2. Vorgänge beim Plastizierungsprozeß

Die Darstellung der Versuchsergebnisse aus den Bildern 33 ÷ 36 als Funktionen

$$\lg \left[\frac{\delta(N)}{\delta(N=1)} - 1 \right] = \lg N$$

in den Bildern 51 ÷ 54 für eine Änderung der Verformungswegamplitude von 0,1 ÷ 10 % verdeutlicht durch den steilen Anstieg der Kurven bereits bei einer Verformungsweg-Amplitudenerhöhung im Bereich um 0,1 %, daß innerhalb jeder Serie eine merkliche Erhöhung der Verformungswegamplitude erst nach einer durch die aufgetragene Spannungsamplitude bestimmte Lastwechselzahl eintritt. Nach den aus der Literatur bekannten Untersuchungen [38, 39, 43] und

in Übereinstimmung mit den Ergebnissen unter 4.1.4 und 4.1.5 ist anzunehmen, daß die Erhöhung der Verformungswegamplitude durch die Plastizierung neuer Körner erfolgt. Den Ausführungen unter 5.1 zufolge sind die zu Versuchsbeginn sich elastisch verhaltenden Körner, die eine gemeinsame Korngrenze mit den bereits im ersten Lastwechsel plastizierten Körnern (primär plastizierte Körner) haben, im Durchschnitt höheren Spannungsamplituden ausgesetzt als alle übrigen sich elastisch verhaltenden Körner. Eine merkliche Erhöhung der Verformungswegamplitude sollte deshalb mit dem Beginn der Plastizierung dieser Körner einsetzen und dementsprechend die dafür charakteristische Lastwechselzahl N_1 sich der aus Gl. (8) ergebenden Spannungsamplitude τ_{va} zuordnen lassen, also

$$N_1 = f(\tau_{va}) \quad (9)$$

sein, wenn der Aktivierungsprozeß neuer Versetzungsquellen in den zu plastizierenden Körnern unabhängig von der zur Erzielung der einzelnen Korngrößen notwendigen Wärmebehandlung für alle Serien in gleicher Weise abläuft.

Zur Überprüfung der in Gl. (9) aufgestellten Hypothese muß zunächst N_1 bekannt sein. Da aufgrund der unterschiedlichen Kornorientierung und unter Umständen durch örtliche Spannungskonzentrationen bedingt die Plastizierung der neuen Körner nicht gleichzeitig erfolgt, erscheint es sinnvoll, N_1 durch ein Verhältnis n aus der Anzahl der neu plastizierten Körner zur Anzahl der primär plastizierten Körner festzulegen. Unter der Voraus-

setzung, daß die neu plastizierten Körner in Abhängigkeit der Spannungsamplitude und mit der Korngröße als Parameter pro Korn jeweils den gleichen plastischen Anteil zur Dehnungsamplitude beitragen wie die primär plastizierten Körner und unter Vernachlässigung der Verringerung der Dehnungsamplitude durch die Verfestigung in den bereits plastizierten Körnern, kann aus dem Verhältnis n der Kornanteile, über den mikroplastischen Anteil ϵ_{pm} der Dehnungsamplitude (vgl. Bild 47) und die Bezugslänge l_0 an der Probe (vgl. Bild 12) die jeweils für eine bestimmte Spannungsamplitude und Korngröße N_1 definierende, normierte Verformungswegamplitude

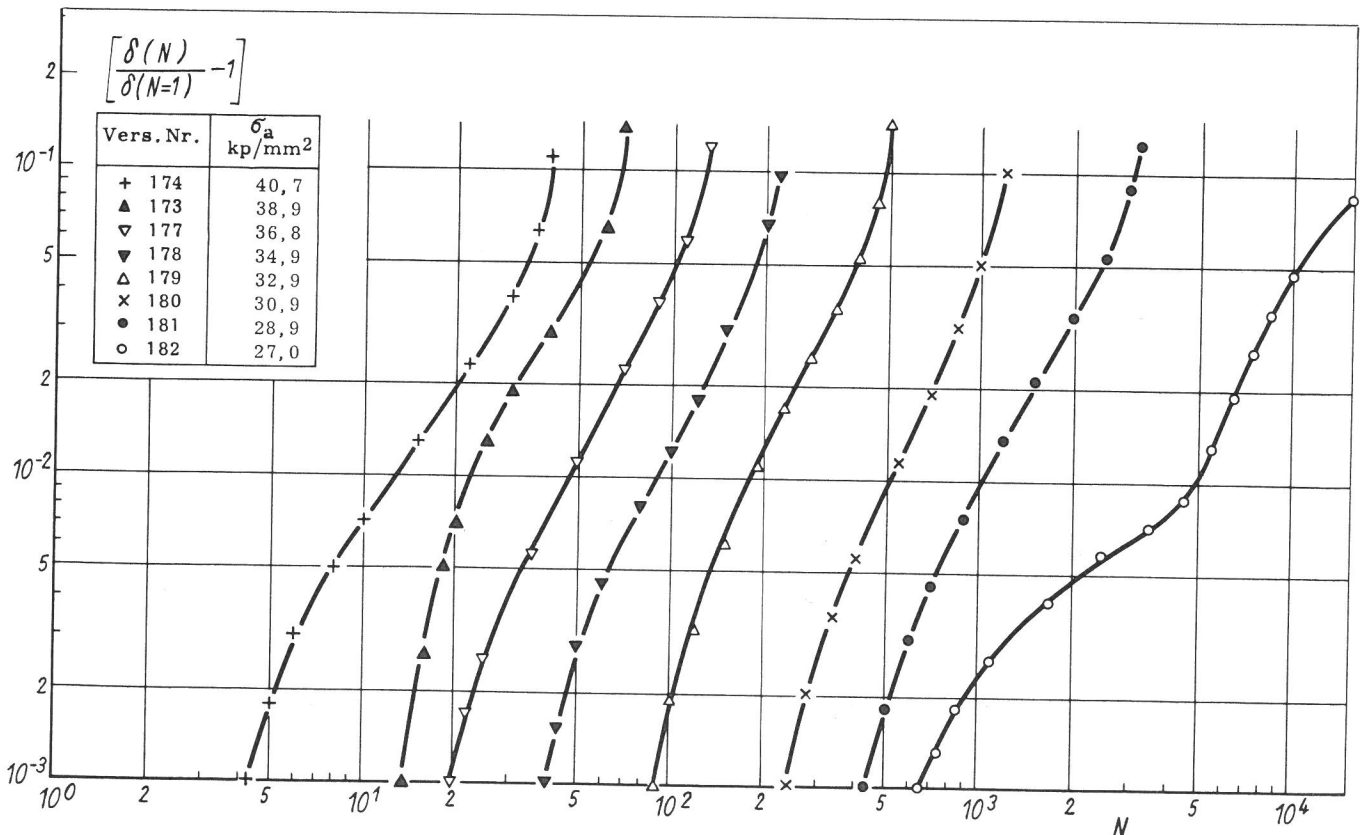
$$\frac{\delta(N_1)}{\delta(N=1)} = 1 + \frac{n \epsilon_{pm} l_0}{\delta(N=1)} \quad (10)$$

ermittelt und damit N_1 direkt aus den Bildern 51 ÷ 54 abgelesen werden. N_1 -Werte wurden für die Verhältnisse n von 0,1 und 0,5 bestimmt (vgl. Tabelle 6). Die für $n = 0,1$ sich ergebenden Werte liegen in der Nähe der Schnittpunkte der in den Bildern 51 ÷ 54 dargestellten Funktionen mit der Linie für $\left[\frac{\delta(N)}{\delta(N=1)} - 1 \right] = 10^{-3}$, während $n = 0,5$ zu um den Faktor 1,2 ÷ 4 höheren N_1 -Werten führt.

Die Versuchsergebnisse ermöglichen keine direkte Aussage über $\tau_1 = f(\tau_a, N)$ und damit über τ_{va} nach Gl. (8). Deshalb können Anhaltspunkte für die Gültigkeit der in Gl. (9) aufgestellten Beziehung nur indirekt über den aus dem Versuch ermittelbaren Zusammenhang $N_1 = f(\tau_a)$ in Verbindung mit Gl. (8) gefunden werden. Die Darstellung von $N_1 = f(\tau_a)$ für die Serien 2 ÷ 5 von St 52-3 in Bild 55 für $n = 0,1$ und in Bild 56 für $n = 0,5$ zeigt, daß, wenn man zunächst den Kurvenverlauf für die 3. Serie ($d_K = 22 \mu\text{m}$) außer Betracht läßt, mit kleiner werdender Korngröße höhere Spannungsamplituden τ_a erforderlich sind, um den durch N_1 charakterisierten Beginn des Plastizierungsprozesses jeweils nach der gleichen Lastwechselzahl zu erreichen. Setzt man voraus, daß die Aufstaulänge L_V der freien Versetzungen in den pri-

Bild 51
Darstellung der normierten Verformungswegamplitude $[\delta(N)/\delta(N=1)] - 1$ in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N zur Ermittlung der für den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung charakteristischen Lastwechselzahl N_1

St 52-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$



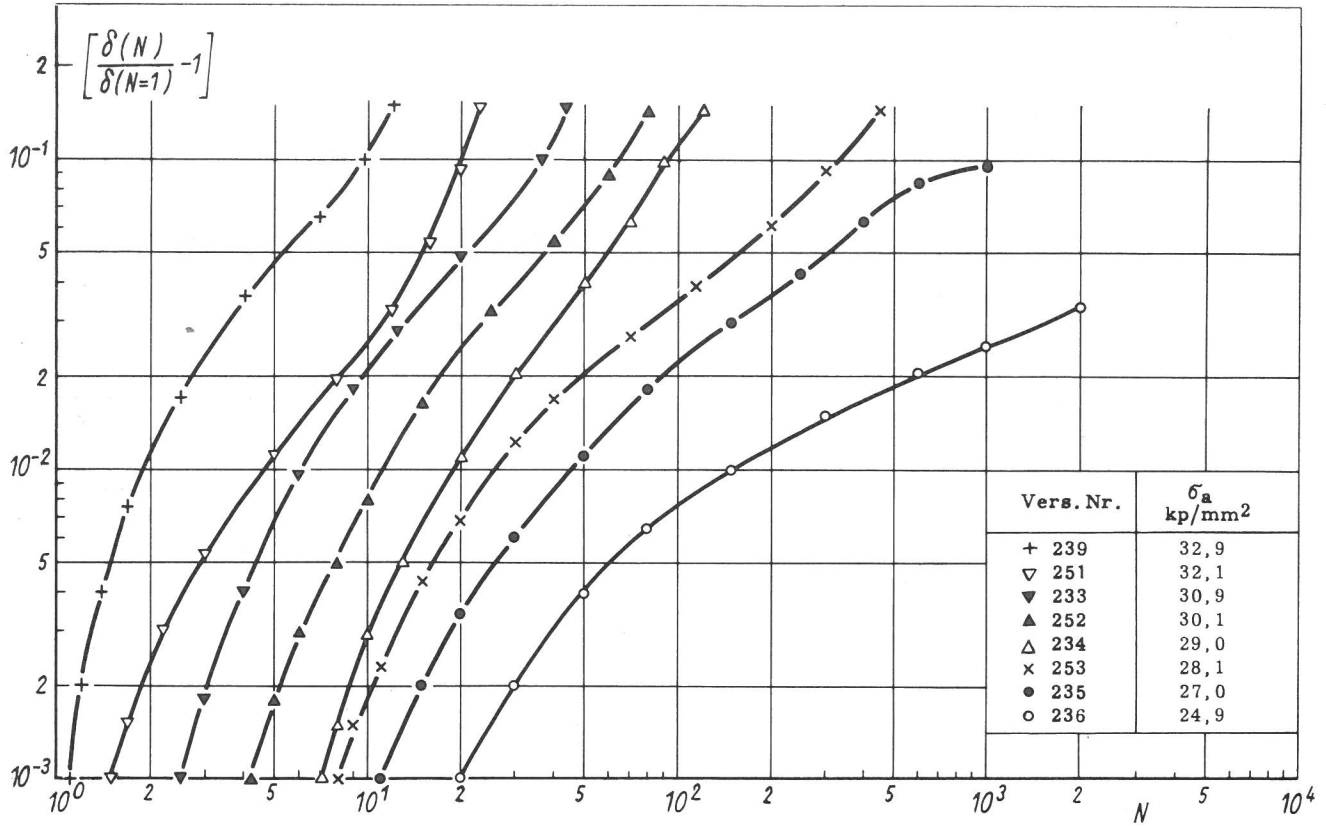
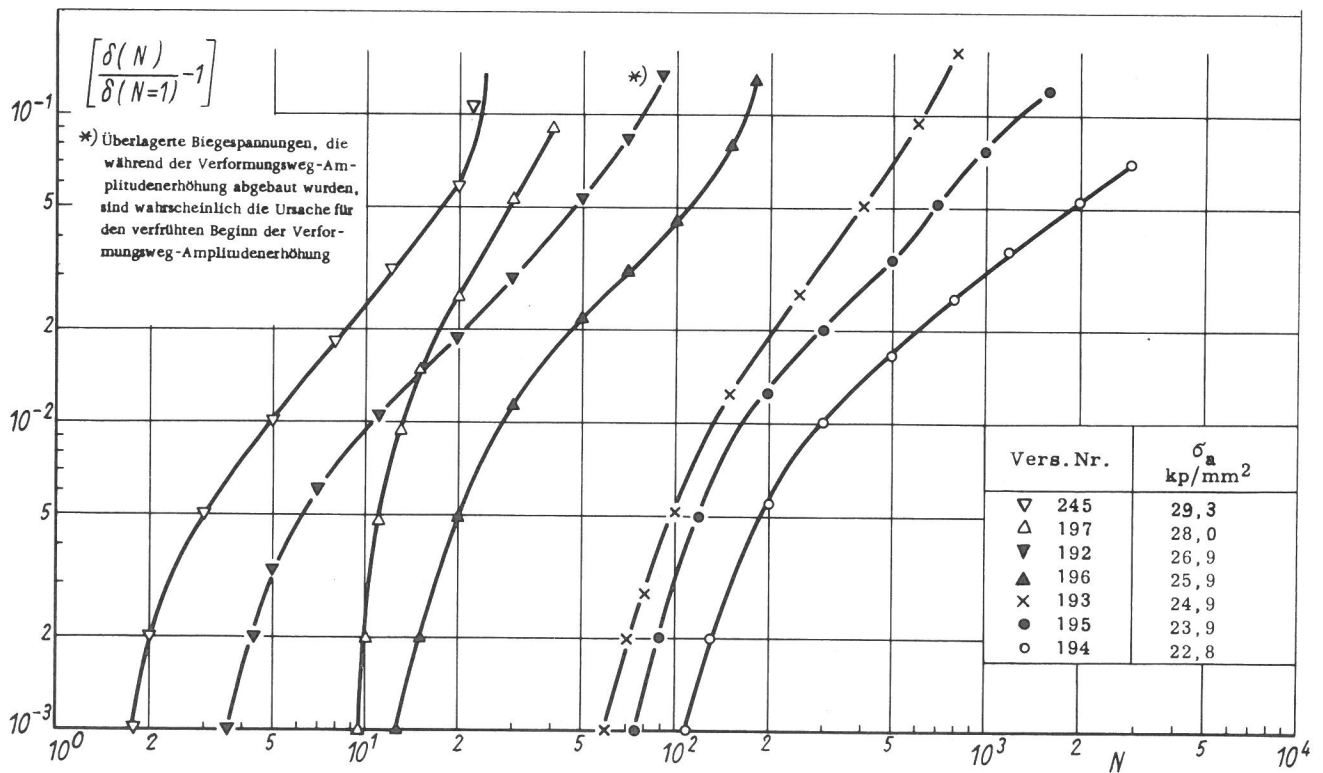


Bild 52
Darstellung der normierten Verformungswegamplitude $[\delta(N)/\delta(N=1)] - 1$ in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N zur Ermittlung der für den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung charakteristischen Lastwechselzahl N_1

St 52-3 Serie 3 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 22 \mu\text{m}$

Bild 53
Darstellung der normierten Verformungswegamplitude $[\delta(N)/\delta(N=1)] - 1$ in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N zur Ermittlung der für den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung charakteristischen Lastwechselzahl N_1

St 52-3 Serie 4 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 30 \mu\text{m}$



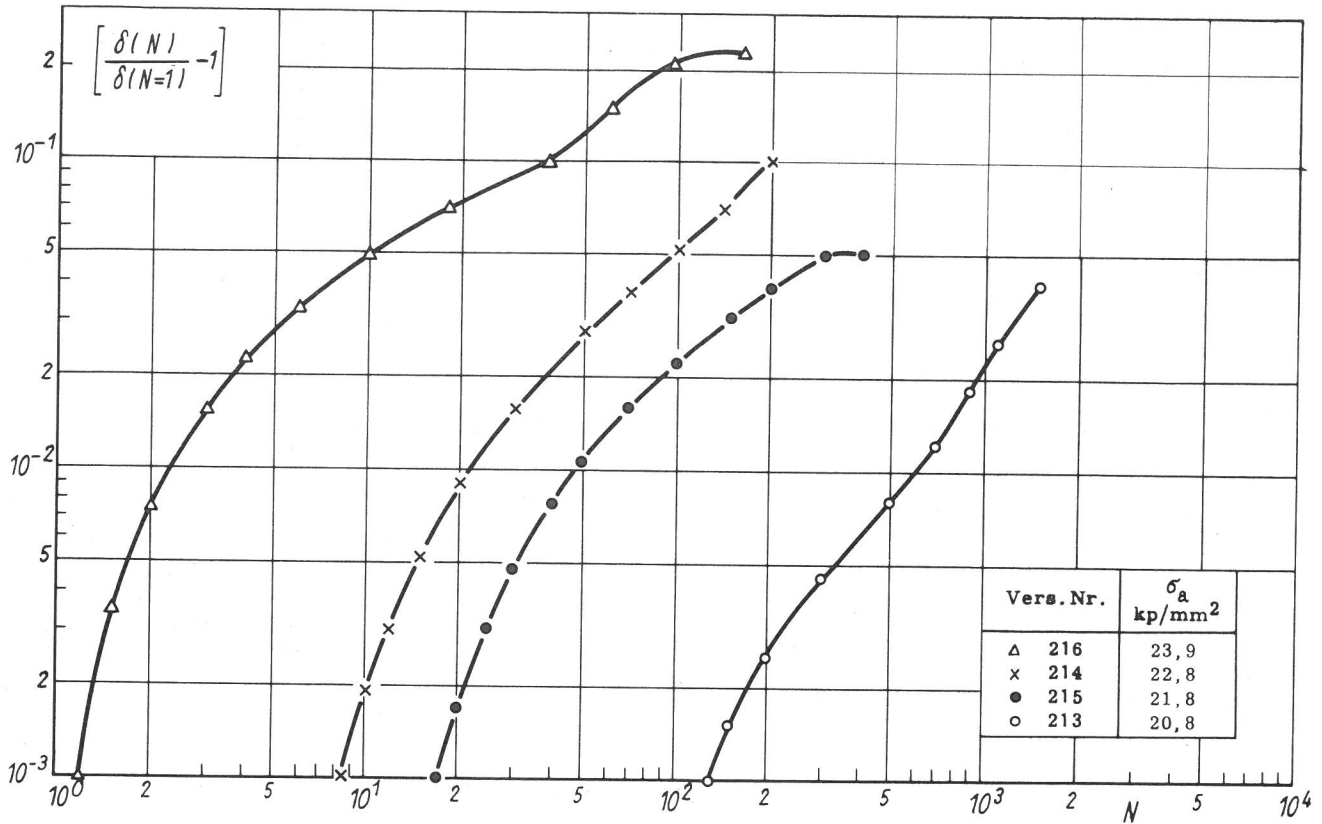


Bild 54
Darstellung der normierten Verformungswegamplitude $[\delta(N)/\delta(N=1)] - 1$ in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N zur Ermittlung der für den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung charakteristischen Lastwechselzahl N_1

St 52-3 Serie 5 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 45 \mu\text{m}$

mär plastizierten Körnern sich proportional zum Korndurchmesser verhält, so entspricht das Ergebnis der Beziehung zwischen τ_{va} und τ_a nach Gl. (8) und weist damit bereits auf den durch Gl. (9) beschriebenen Zusammenhang zwischen τ_{va} und N_1 hin. Das nachfolgende Zahlenbeispiel soll diesen Hinweis noch klarer zum Ausdruck bringen. Es wird angenommen, daß L_v ungefähr dem tatsächlichen Kornradius entspricht [54, 55]. Die Verteilung des tatsächlichen Korndurchmessers läßt sich nach dem Verfahren von Scheil [87, 88] aus der den Schlibbildern entnommenen Verteilung des Schnittflächendurchmessers berechnen. Daraus ergibt sich erfahrungsgemäß, daß der mittlere, tatsächliche Korndurchmesser ungefähr um den Faktor 1,5 größer ist als der mittlere Schnittflächendurchmesser d_K . Demnach soll

$$L_v \approx \frac{1,5 d_K}{2} \approx 0,75 d_K \quad (11)$$

betragen. Weiterhin wird vorausgesetzt, daß der Abstand x (vgl. Bild 49) der zu aktivierenden Versetzungsquellen in den sich elastisch verhaltenden Körnern vom Aufstapungspunkt freier Versetzungen in den primär plastizierten Körnern einer Netzwerklänge der im Ausgangszustand vermutlich im Netzwerk angeordneten Versetzungen (vgl. unter 4.1.5) entspricht. Bei einer Anfangsversetzungsdichte von ungefähr 10^8 cm^{-2} [89] ergibt sich dann $x \approx 10^{-4} \text{ cm}$. Unter den genannten Voraussetzungen kann für Gl. (8)

$$\tau_{va} = \tau_a \left\{ \left[1 - \frac{\tau_i(\tau_a, N)}{\tau_a} \right] \sqrt{c_K d_K + 1} \right\} \quad (12)$$

geschrieben werden, wobei für die gewählten Werte die Konstante $c_K = 0,75 \mu\text{m}^{-1}$ ist. Wird in Gl. (12) $\tau_i = \tau_{i0}$ gesetzt und für τ_{i0} die Werte in Tabelle 5 ($\tau_{i0} = 1/3 \sigma_{i0}$ [55]) zugrunde gelegt, so lassen sich Spannungsamplituden

$$\tau_{va0} = \tau_a \left[\left(1 - \frac{\tau_{i0}}{\tau_a} \right) \sqrt{c_K d_K + 1} \right] \quad (13)$$

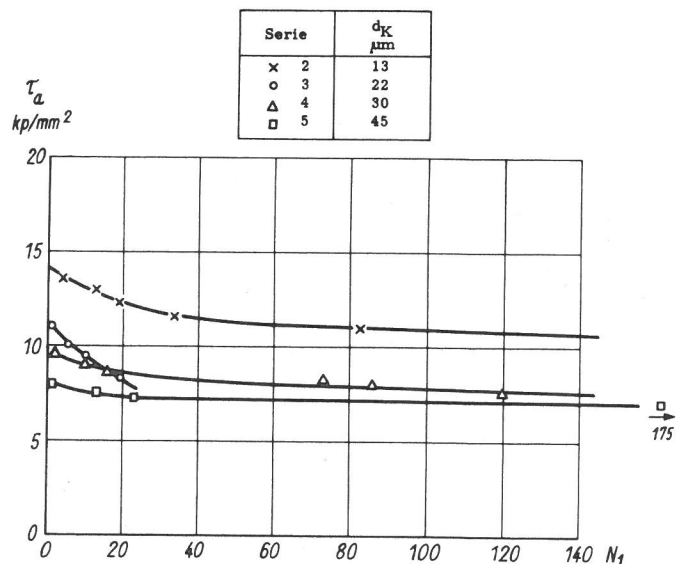


Bild 55
Darstellung der den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung charakterisierenden, für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,1$ ermittelten Lastwechselzahl N_1 in Abhängigkeit der aufgetragenen Spannungsamplitude τ_a (Darstellung entsprechend der Wöhlerkurve)

St 52-3

Serie	d_K μm
x 2	13
o 3	22
Δ 4	30
\square 5	45

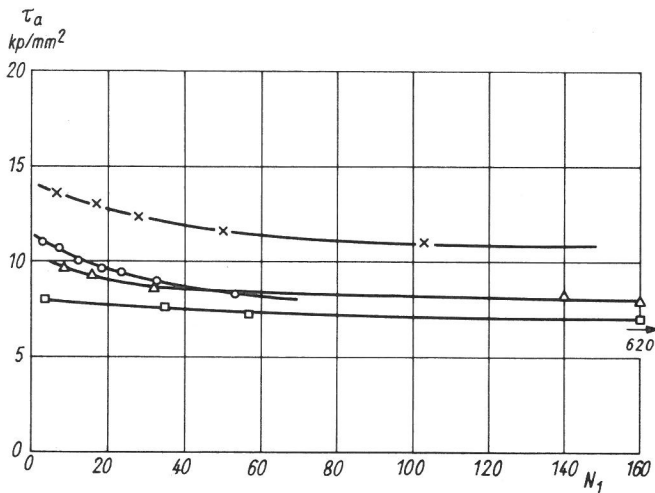


Bild 56
Darstellung der den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung charakterisierenden, für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,5$ ermittelten Lastwechselzahl N_1 in Abhängigkeit der aufgetragenen Spannungsamplitude τ_a .
(Darstellung entsprechend der Wöhlerkurve)

St 52-3

berechnen, die über τ_a den dazugehörigen N_1 -Werten zugeordnet sind (vgl. Tabelle 6). Die Darstellung von $N_1 = f(\tau_{va0})$ für $n = 0,1$ in Bild 57 und für $n = 0,5$ in Bild 58 zeigt, daß alle Kurven mit kleiner werdendem N_1 einem von der Korngröße unabhängigen Wert für τ_{va0} zustreben. Da für kleine N_1 -Werte $\tau_i \approx \tau_{i0}$ ist, also entsprechend Gl. (12) und (13) $\tau_{va} \approx \tau_{va0}$ gilt, so geht daraus hervor, daß Gl. (12) offenbar die Korngrößenabhängigkeit von τ_{va} richtig wiedergibt und

Serie	d_K μm
x 2	13
o 3	22
Δ 4	30
\square 5	45

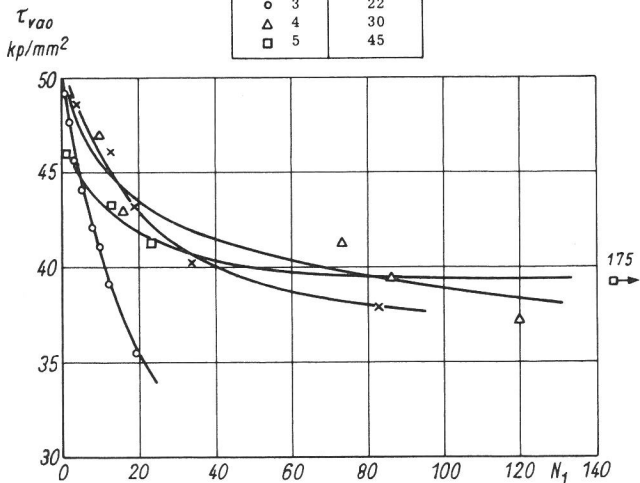


Bild 57
Darstellung der den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung charakterisierenden, für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,1$ ermittelten Lastwechselzahl N_1 in Abhängigkeit der Spannungsamplitude τ_{va0} .
(Darstellung entsprechend der Wöhlerkurve)

St 52-3

Korngröße	Vers.- Nr.	σ_a kp/mm ²	$\tau_a^*)$ kp/mm ²	τ_{va0} kp/mm ²	N_1 n=0,1	N_1 n=0,5
$d_K = 13 \mu\text{m}$	174	40,7	13,6	48,6	4	7
	173	38,9	13,0	46,1	13	17
	177	36,8	12,3	43,2	19	27
	178	34,9	11,6	40,3	34	50
	179	32,9	11,0	37,9	83	103
	180	30,9	10,3	35,0	215	275
	181	28,9	9,6	32,1	350	480
$d_K = 22 \mu\text{m}$	182	27,0	9,0	29,6	480	750
	239	32,9	11,0	49,2	1	3
	251	32,1	10,7	47,7	2	7
	233	30,9	10,3	45,6	3	8
	252	30,1	10,0	44,1	5	12
	234	29,0	9,6	42,1	8	18
	253	28,1	9,4	41,1	10	23
$d_K = 30 \mu\text{m}$	235	27,0	9,0	39,1	12	33
	236	24,9	8,3	35,5	19	53
	245	29,3	9,7	49,3	2	8
	197	28,0	9,3	47,0	10	16
	196	25,9	8,6	43,0	16	37
	193	24,9	8,3	41,3	73	140
	195	23,9	8,0	39,5	86	160
$d_K = 45 \mu\text{m}$	194	22,8	7,6	37,3	120	230
	216	23,9	8,0	46,1	1	4
	214	22,8	7,6	43,3	13	35
	215	21,8	7,3	41,3	23	57
213	20,8	7,0	39,2	175	620	

*) $\tau_a = 1/3 \sigma_a$ gesetzt [55]

Tabelle 6

Zusammenstellung der für die aufgetragenen Spannungsamplituden σ_a bzw. τ_a errechneten τ_{va0} -Werte und der aus den Versuchsergebnissen für die Verhältnisse der Kornanteile von $n = 0,1$ sowie $n = 0,5$ ermittelten N_1 -Werte

Serie	d_K μm
x 2	13
o 3	22
Δ 4	30
\square 5	45

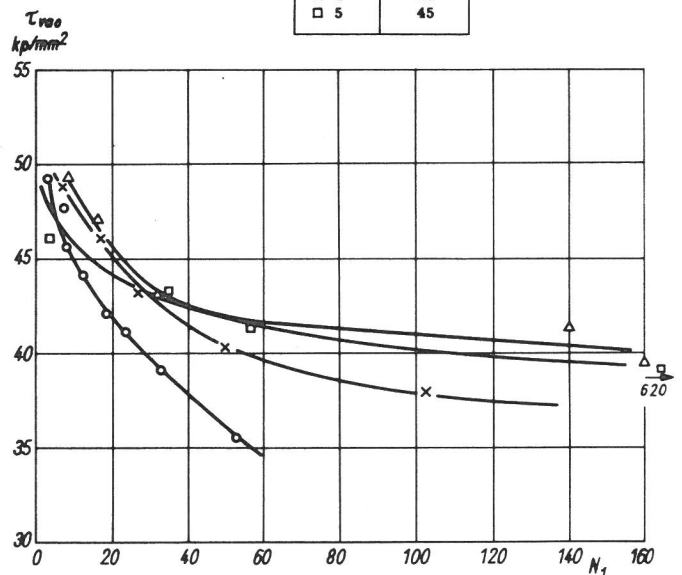


Bild 58

Darstellung der den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung charakterisierenden, für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,5$ ermittelten Lastwechselzahl N_1 in Abhängigkeit der Spannungsamplitude τ_{va0} .
(Darstellung entsprechend der Wöhlerkurve)

St 52-3

ein Gl. (9) entsprechender Zusammenhang zwischen N_1 und τ_{va} besteht. τ_{va0} unterscheidet sich von τ_{va} dadurch, daß bei τ_{va0} das Anwachsen der Reibspannung τ_i von τ_{i0} ausgehend in Abhängigkeit von τ_a und N unberücksichtigt bleibt. Deshalb ist τ_{va0} stets größer als das entsprechende τ_{va} und auch größer als ein Wert $\bar{\tau}_{va}$, der sich nach Gl. (12) für den Mittelwert von τ_i über N_1 , nämlich $\bar{\tau}_i > \tau_{i0}$, ergibt. Demnach sollte die nach Gl. (9) für alle Korngrößen gemeinsam geltende Kurve $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ steiler über N_1 abfallen als die für die einzelnen Korngrößen ermittelten Kurven $N_1 = f(\tau_{va0})$ und der Verlauf von $N_1 = f(\tau_{va0})$ durch den mit der Korngröße wachsenden Einfluß von $\bar{\tau}_i$ bestimmt werden. Aus dem ähnlichen Verlauf von $N_1 = f(\tau_{va0})$ für die Korngrößen $13 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ und $45 \mu\text{m}$ im Bereich kleiner N_1 (vgl. Bilder 57 und 58) geht hervor, daß sich hier die Reibspannungserhöhung ungefähr gleich auswirkt, d. h. entsprechend Gl. (12) führt das stärkere Anwachsen von τ_i durch ein größeres τ_a bei kleinerem Korndurchmesser zu einem ungefähr gleich großen $\bar{\tau}_{va}$ wie eine geringere Erhöhung von τ_i durch ein kleineres τ_a bei einem größeren Korndurchmesser. Im Bereich größerer N_1 wird erkennbar, daß die Kurven für die genannten Korngrößen um so flacher verlaufen, je größer der Korndurchmesser ist (vgl. Bild 57). Das kann damit erklärt werden, daß hier aufgrund des kleiner werdenden Unterschiedes der τ_a -Werte der die Wirkung von τ_i auf τ_{va} bestimmende Korngrößeneinfluß nicht mehr durch die mit wachsendem τ_a zunehmende Erhöhung von τ_i ausgeglichen wird.

Bild 55 zeigt, daß τ_a über N_1 bei der 3. Serie im Vergleich zu den Kurven für die drei anderen Serien wesentlich steiler abfällt, also die Plastizierung neuer Körner im frühen Stadium des Plastizierungsprozesses hier leichter erfolgt als bei den anderen Serien. Aus dem Zusammenlaufen der entsprechenden Kurve $N_1 = f(\tau_{va0})$ mit den übrigen Kurven bei hohen τ_{va0} -Werten (vgl. Bild 57 und 58) geht hervor, daß der die Plastizierung begünstigende Einfluß bei kleinem τ_a am größten ist und dann mit wachsendem τ_a abnimmt. Der wesentlich flachere Verlauf von $N_1 = f(\tau_a)$ und $N_1 = f(\tau_{va0})$ für $n = 0,5$ als für $n = 0,1$ zeigt außerdem, daß von der begünstigten Plastizierung vorwiegend die zuerst plastizierten Körner betroffen werden. Die geschilderten Beobachtungen werden als Hinweis dafür angesehen, daß bereits im Ausgangszustand vorhandene Spannungskonzentrationen bei der 3. Serie zusätzlich zu den Spannungserhöhungen τ_{va} durch die primär plastizierten Körner bei niedrigen äußeren Spannungsamplituden wesentlich mehr zur Plastizierung beitragen als bei den anderen Serien. Da bei kleinem τ_a innerhalb des ersten Lastwechsels nur wenige Spannungskonzentrationen durch die Plastizierung einzelner Körner (primär plastizierter Körner) abgebaut werden und außerdem τ_{va} klein ist, sollten hier die Spannungskonzentrationen den größten Einfluß auf den Plastizierungsprozeß haben, indem in Abhängigkeit der Lastwechselzahl zunächst vorwiegend Körner mit Unterstützung der Spannungskonzentrationen plastiziert und diese dadurch abgebaut werden. Mit wachsendem τ_a verringern sich die nach dem ersten Lastwechsel noch vorhandenen Spannungskonzentrationen, nimmt die Anzahl der primär plastizierten Körner entsprechend zu und wird τ_{va} größer, es ist deshalb zu erwarten, daß die Wirkung der Spannungskonzentrationen auf den Plastizierungsprozeß mit größer werdender äußerer Spannungsamplitude zurückgeht.

Nach den bisherigen Überlegungen ist anzunehmen, daß der einer merklichen Erhöhung der Verformungswegamplitude zugrunde liegende Plastizierungsprozeß neuer, zu Versuchs-

beginn sich noch elastisch verhaltender Körner mit der Erzeugung freier Versetzungen durch die Aktivierung von Versetzungsquellen hauptsächlich in den unmittelbar an die primär plastizierten Körner angrenzenden Körnern beginnt. Dementsprechend zeigen Hinweise aus den Versuchsergebnissen, daß eine durch ein Verhältnis aus der Anzahl der neu plastizierten Körner zur Anzahl der primär plastizierten Körner definierte Lastwechselzahl N_1 sich offenbar der aus Versetzungsaufstauungen an den Korngrenzen der primär plastizierten Körner resultierenden Spannungsamplitude τ_{va} nach Gl. (12) bzw. ihrem über N_1 gemittelten Wert $\bar{\tau}_{va}$ zuordnen läßt. Nach Gl. (12) geht daraus hervor, daß bei einer gegebenen Spannungsamplitude τ_a der Korndurchmesser d_K und die Erhöhung der Reibspannung $\tau_i = f(\tau_a, N)$ infolge der in den primär plastizierten Körnern stattfindenden Verfestigung die Lastwechselzahl N_1 und damit den Beginn einer merklichen Probenplastizierung beeinflussen sollten.

Bisher ist noch ungeklärt, wie die Aktivierung der Versetzungsquellen im einzelnen abläuft und welcher funktionelle Zusammenhang zwischen N_1 und τ_{va} bestehen könnte. Aus zwei Gründen wird die Befreiung der blockierten Versetzungen von ihren bewegungshemmenden Teilchen durch spannungsinduzierte Diffusion als eine Möglichkeit angesehen, den Aktivierungsvorgang der Versetzungsquellen zu beschreiben. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die Aktivierung neuer Versetzungsquellen in Abhängigkeit der beim Prozeß wirksamen Spannungsamplitude τ_{va} eine bestimmte Lastwechselzahl, also bei einer vorgegebenen Lastwechselzahl eine entsprechende Zeit erfordert. Außerdem ist die Erzeugung einer größeren Anzahl freier Versetzungen auch bei äußeren Spannungsamplituden, die weit unterhalb der Streckgrenze liegen, mit Hilfe der spannungsinduzierten Diffusion vorstellbar. Je nach Art der Behinderung der Versetzungsbewegung durch die Teilchen kommen zwei Möglichkeiten für die Wirkung der spannungsinduzierten Diffusion in Frage (vgl. unter 1.2). Für die weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, daß bei den untersuchten Stählen Teilchen u. a. direkt an den im Ausgangszustand vorhandenen Versetzungen, wahrscheinlich bevorzugt im Zugspannungsfeld der Versetzung, ausgeschieden wurden. Eine solche Teilchenanordnung, die als mögliche Ursache für die Versetzungsverankerung anstelle der Cottrell-Bilby-Kohlenstoff-Kondensation vorstellbar ist [90], sollte nach Lütjering und Hornbogen [89] besonders dann erwartet werden, wenn im Gitter gelöste Substitutionsatome die Löslichkeit der Einlagerungsatome herabsetzen, wie das z. B. bei Nickel und Mangan der Fall ist. Die bevorzugt entlang einer Stufenversetzung statistisch verteilt angelagerten Teilchen gliedern Versetzungsstücke, z. B. eine Netzwerklänge L_N des im gegliederten Zustand zu erwartenden, räumlich angeordneten Versetzungsnetzwerkes (vgl. unter 4.1.5) in unterschiedliche lange Versetzungsschleifen $L_{c1}^0 \dots L_{ci}^0 \dots L_{cn}^0$ (vgl. Bild 59). Wirkt in einer Gleitebene, in der ein solcher Versetzungsabschnitt liegt, eine Schubspannung, die noch nicht zum Losreißen der Versetzung von ihren Veranke-

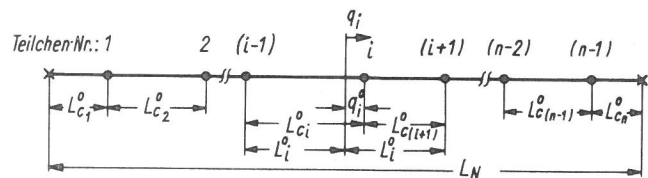


Bild 59
Schematische Darstellung der durch $(n-1)$ Teilchen an der Netzwerklänge L_N sich ergebenden Schleifenlängen $L_{c1}^0 \dots L_{ci}^0 \dots L_{cn}^0$

rungsstellen führt, aber ausreicht, um die Gitterreibspannung zu überwinden, so bauchen sich die einzelnen Schleifen aus. Die dadurch auf die Teilchen wirkenden Kräfte können eine „Driftbewegung“ der Teilchenatome hervorrufen. Bei einer Wechselbeanspruchung ist die über einen Lastwechsel gemittelte, senkrecht zur Versetzungslinie wirkende Kraftkomponente gleich Null, dagegen kehrt die parallel zur Versetzungslinie wirkende Kraftkomponente ihre Richtung innerhalb eines Lastwechsels nicht um, so daß ihr Mittelwert stets von Null verschieden ist, solange ein Längenunterschied benachbarter Schleifen besteht. Nach den von Alefeld [73] und Bauer [75] abgeleiteten Beziehungen beträgt die durch eine zeitabhängige Schubspannung $\tau_D(t)$ in Richtung der Versetzungslinie wirkende Kraft $K_i(t)$ am i -ten Teilchen, das sich zwischen zwei Schleifen mit den zeitlich veränderlichen Längen $L_{c_i}(t)$ und $L_{c_{i+1}}(t)$ befindet,

$$K_i(t) = \frac{\tau_D^2(t) b^2}{8 E_L} \left\{ \left[L_{c_i}(t) \right]^2 - \left[L_{c_{i+1}}(t) \right]^2 \right\} \quad (14)$$

(E_L = Linienspannung der Versetzung, b = Beitrag des Burgersvektors).

Mit der Einstein-Beziehung ergibt sich daraus die „Driftgeschwindigkeit“ $v_i(t)$ des i -ten Teilchens zu

$$v_i(t) = \frac{D}{k T} K_i(t) \quad (15)$$

(D = Diffusionskonstante an der Versetzung, k = Boltzmann-Konstante, T = absolute Temperatur).

$K_i(t)$ und damit $v_i(t)$ sind so gerichtet, daß die potentielle Energie der Doppelschleife ($L_{c_i} + L_{c_{i+1}}$) durch eine „Driftbewegung“ des i -ten Teilchens abnimmt, also stets das Wachsen der größeren Schleife gefördert wird. Da das Teilchen als Ganzes kaum entlang der Versetzung wandern kann, wird es wahrscheinlich durch das Diffundieren einzelner Teilchenatome in den Versetzungsschlauch entweder nach und nach aufgelöst oder so weit verkleinert, bis das Losreißen der Versetzung gelingt. Die einzelnen Teilchenatome können sich entsprechend der Wirkung von $K_i(t)$ im Versetzungsschlauch bewegen und schaffen dadurch mit der Zeit größere, freie Versetzungsabschnitte, d. h. die Verankerung der Versetzung wird schwächer werden.

Mit dem nachfolgenden Berechnungsmodell, bei dem vereinfachend angenommen wird, daß die Teilchen sich direkt entlang der Versetzung bewegen können, sollen Hinweise auf die zwischen der Schleifenverlängerung, der Beanspruchungszeit und der Spannungsamplitude bestehenden Beziehung erhalten werden. Von einer zur Zeit $t = 0$ vorgegebenen Schleifenanordnung $L_{c_1}^0 \dots L_{c_i}^0 \dots L_{c_n}^0$ (der obere Index gibt die zeitliche Zuordnung an) ausgehend (vgl. Bild 59), kann die Bewegung des sich in der Doppelschleife ($L_{c_i}^0 + L_{c_{i+1}}^0$) befindlichen i -ten Teilchens längs der Versetzungslinie über die schrittweise Integration der Gl. (15) nach der Zeit ermittelt werden. Dazu wird dem i -ten Teilchen eine Weg-Koordinatenachse q_i so zugeordnet, daß ihr Ursprung die Gesamtlänge der Doppelschleife ($L_{c_i}^0 + L_{c_{i+1}}^0$) in zwei gleich große Längen L_i^0 aufteilt. Für die Betrachtung eines kleinen Zeitintervalls zwischen $t = 0$ und $t = t_1$, das so klein zu wählen ist, daß L_i^0 sich aufgrund der Bewegung der Teilchen ($i-1$) und ($i+1$) während dieser Zeit nicht wesentlich ändert, darf entsprechend Gl. (15) in Verbindung mit Gl. (14) geschrieben werden:

$$v_i(t) = \frac{dq_i(t)}{dt} = \frac{D b^2 \tau_D^2(t)}{2 E_L k T} L_i^0 q_i(t) \quad (16)$$

Aus der Integration von Gl. (16) ergibt sich unter Berücksichtigung der Randbedingung, daß das i -te Teilchen zur Zeit $t = 0$ sich an der Stelle $q_i = q_i^0$ befand, die Ortskoordinate des i -ten Teilchens nach der Zeit t_1

$$[q_i]_{t_1} = q_i^0 \exp \left(\frac{D b^2}{2 E_L k T} L_i^0 \int_0^{t_1} \tau_D^2 dt \right) \quad (17)$$

Der vom i -ten Teilchen nach der Zeit t_1 zurückgelegte Weg Δq_i^1 beträgt

$$\Delta q_i^1 = [q_i]_{t_1} - q_i^0 \quad (18)$$

also mit Gl. (17)

$$\Delta q_i^1 = q_i^0 \left[\exp \left(\frac{D b^2}{2 E_L k T} L_i^0 \int_0^{t_1} \tau_D^2 dt \right) - 1 \right] \quad (19)$$

Aus den Δq_i^1 -Werten und den $L_{c_i}^0$ -Werten läßt sich die neue Schleifenanordnung nach der Zeit t_1 , nämlich $L_{c_1}^1 \dots L_{c_i}^1 \dots L_{c_n}^1$, durch die Beziehung

$$L_{c_i}^1 = L_{c_i}^0 + (\Delta q_i^1 - \Delta q_{i-1}^1) \quad (20)$$

und dann L_i^1 sowie q_i^1 (vgl. Bild 59) zur Berechnung von Δq_i^2 nach einem weiteren Zeitschritt von t_1 nach t_2 bestimmen. Allgemein dargestellt ergibt sich daraus die Schleifenanordnung $L_{c_1}^j \dots L_{c_i}^j \dots L_{c_n}^j$ nach der Zeit t_j durch das Gleichungssystem

$$L_{c_i}^j = L_{c_i}^{j-1} + (\Delta q_i^j - \Delta q_{i-1}^j) \quad (21 a)$$

mit

$$\Delta q_i^j = q_i^{j-1} \left[\exp \left(\frac{D b^2}{2 E_L k T} L_i^{j-1} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \tau_D^2 dt \right) - 1 \right] \quad (21 b)$$

wobei

$$q_i^{j-1} = \frac{1}{2} \left(L_{c_i}^{j-1} - L_{c_{i+1}}^{j-1} \right) \quad (21 c)$$

$$L_i^{j-1} = \frac{1}{2} \left(L_{c_i}^{j-1} + L_{c_{i+1}}^{j-1} \right) \quad (21 d)$$

und i von 1 bis $(n-1)$ innerhalb jedes Zeitschrittes $\Delta t_j = (t_j - t_{j-1})$ zu variieren ist. Aus Gl. (21 b) geht hervor, daß u. a. der Ablauf des Prozesses stark durch die an der Versetzung wirksame Spannung τ_D , die den Exponenten der e-Funktion mit der zweiten Potenz beeinflusst, wesentlich durch die mittlere Schleifenlänge L_i^{j-1} , die sich ebenfalls auf den Exponenten auswirkt, und durch den Schleifenlängenunterschied q_i^{j-1} bestimmt wird. Es ist zu erwarten, daß die von Anfang an größten Schleifen auf Kosten ihrer kleineren Nachbarn mit um so größerer Geschwindigkeit anwachsen, wahrscheinlich mit exponentiellem Verlauf, je gravierender der Längenunterschied wird. Extreme Längenunterschiede benachbarter Schleifen werden so nach kurzer Zeit durch das Verschwinden der kleineren Schleifen ausgeglichen.

Für die weitere Besprechung der beim Plastizierungsprozeß ablaufenden Vorgänge mit Hilfe der spannungsinduzierten Diffusion längs einer durch Teilchen verankerten Versetzung ist zu diskutieren, wie und wann die während der Wechselbeanspruchung sich ändernde Schleifenanordnung innerhalb einer Netzwerklänge zur Erzeugung neuer Versetzungen führt. Für die untersuchten Stähle sollte das Losreißenmodell der Versetzungs-Dämpfungs-Theorie nach Granato und Lücke

[50, 51, 91] weniger in Betracht kommen, weil ihm ein thermisch aktivierbarer Prozeß zugrunde liegt, verschiedene Untersuchungen an Eisen und Stahl anhand der Hall-Petch-Beziehung jedoch darauf hinweisen [92, 93], daß die Erzeugung freier Versetzungen an der unteren Streckgrenze über einen kaum thermisch aktivierbaren Prozeß erfolgt. Cottrell und Fisher [57] schlagen deshalb für nach dem Abschrecken stark gealterte Stähle, bei denen k_V ebenfalls temperaturunabhängig zu sein scheint, vor, daß das Losreißen der vermutlich durch Teilchen verankerten Versetzungen eine Zugspannung erfordert, die proportional dem E-Modul und umgekehrt proportional dem Teilchenabstand ist. In Anlehnung an diese Vorstellung wird die Loslöseschubspannung τ_k durch die Beziehung

$$\tau_k \cong \frac{G b}{L_{\max}} \quad (22)$$

definiert, wobei L_{\max} der größte Teilchenabstand innerhalb der Netzwerklänge L_N ist. τ_k nach Gl. (22) entspricht der kritischen Schubspannung für die Aktivierung einer Versetzungsquelle der Länge L_{\max} , wenn man für die Linienspannung $E_L \approx \frac{1}{2} G b^2$ einsetzt. Aus Gl. (22) ergibt sich die größte erforderliche Schleifenlänge L_L , die bei einer Spannungsamplitude τ^* zum Ausbruch führt, zu

$$L_L \cong \frac{G}{\tau^*}, \quad (23)$$

wobei L_L in Einheiten des Burgersvektors auszudrücken ist.

Mit dem Gleichungssystem (21 a) ÷ (21 d) und Gl. (23) ist für eine vorgegebene, dem Versuchsbeginn entsprechende Schleifenanordnung nach Bild 59 die Abschätzung der Dauer bis zur Aktivierung der Netzwerklänge L_N als Versetzungsquelle prinzipiell möglich. Soll z. B. die Aktivierungsdauer einer Versetzungsquelle ermittelt werden, die in einem sich noch elastisch verhaltenden Korn in der Nähe der gemeinsamen Korngrenze mit einem primär plastizierten Korn liegt, so ist für $\tau_D(t)$ in Gl. (21 b) die aus der Überlagerung von $\tau(t)$ und $\tau_G(t)$ (vgl. Bild 50) resultierende Spannungsfunktion $\tau_V(t)$ einzusetzen. Aus dem Vergleich der nach den einzelnen Zeitschritten innerhalb der Schleifenanordnung sich ergebenden größten Schleifenlänge $L_{\max}(t)$ mit der Ausbruchlänge L_L nach Gl. (23), in die für τ^* die zu $\tau_V(t)$ gehörende Spannungsamplitude τ_{va} nach Gl. (8) einzuführen ist, kann der Zeitpunkt, in dem $L_{\max}(t) = L_L(t)$ wird und damit die Zeit bis zum Losreißen der Versetzung von den Teilchen ermittelt werden. Da $\tau_V(t)$ und damit auch τ_{va} von $\tau_i = f(\tau_a, N)$ abhängen, diese Funktion jedoch weder durch Versuchsergebnisse noch durch theoretische Ansätze bisher zu beschreiben ist, soll für die weiteren Betrachtungen $\tau_i = f(\tau_a, N)$ durch ein so über die Lastwechselzahl gemitteltes $\bar{\tau}_i = f(\bar{\tau}_a)$ ersetzt werden, daß dadurch das Losreißen der Versetzung nach der gleichen Zeit erfolgt wie unter der Wirkung von $\tau_i = f(\tau_a, N)$. Die mit der Einführung von $\bar{\tau}_i$ aus $\tau_V(t)$ sich ergebende Funktion $\bar{\tau}_V(t)$ hat eine von der Lastwechselzahl unabhängig verlaufende Kurvenform, d. h. der Mittelwert von $(\bar{\tau}_V)^2$ über eine halbe Lastwechselperiode $\theta/2$

$$S_E = \frac{2}{\theta} \int_0^{\theta/2} (\bar{\tau}_V)^2 dt \quad (24)$$

ist ebenfalls von der Lastwechselzahl und damit bei einer vorgegebenen Lastwechselfrequenz von der Zeit unabhängig. Werden alle Zeitschritte $\Delta t_j = (t_j - t_{j-1})$ gleich groß aber genügend klein gewählt, nämlich $\Delta t_j = \Delta t$, so kann für Gl. (21 b) geschrieben werden:

$$\Delta q_i^j = q_i^{j-1} \left[\exp \left(\frac{D b^2}{2 E_L k T} L_i^{j-1} S_E \Delta t \right) - 1 \right]. \quad (25)$$

Mit $E_L \approx G b^2$ und der Vorschrift, daß alle q_i^j und L_i^j in Einheiten des Burgersvektors einzusetzen sind, erhält man aus Gl. (25)

$$\Delta q_i^j = q_i^{j-1} \left[\exp (L_i^{j-1} A) - 1 \right], \quad (26)$$

dabei ist

$$A = \frac{D b}{2 k T G} S_E \Delta t. \quad (26 a)$$

Wie Gl. (26) zeigt, wird der innerhalb eines Zeitintervalls Δt vom i-ten Teilchen zurückgelegte Weg Δq_i^j bei einer vorgegebenen Anfangsverteilung der Teilchen durch den Parameter A bestimmt. Daraus geht hervor, daß die für das Losreißen der Versetzung von ihren Teilchen interessierende größte Schleifenlänge L_{\max} unabhängig von den in Gl. (26 a) enthaltenen Versuchsparametern für einen frei wählbaren A-Wert, durch dessen Größe die Genauigkeit der Rechnung festgelegt wird, über die Gl. (26), (21 a), (21 c) und (21 d) als Funktion einer Rechenschrittzahl R, die der Anzahl der Zeitschritte entspricht, berechnet werden kann. In Bild 60 ist $L_{\max} = f(R)$ für verschiedene Ausgangsanordnungen der Schleifen dargestellt. Den Berechnungen, die auf einer Rechenanlage vom Typ „Zuse 23“ durchgeführt wurden, liegt ein A-Wert von $5 \cdot 10^{-6}$ zugrunde, der so gewählt wurde, daß sich auch für die Anordnung mit der größten mittleren Schleifenlänge noch eine genügend große Anzahl von Rechenschritten ergab. Die Ausgangsanordnung der Schleifen wurde durch drei für die Rechnung wesentliche Parameter charakterisiert, nämlich durch einen Mittelwert aller Schleifen innerhalb der Netzwerklänge L_N , für die entsprechend dem bereits früher gewählten Beispiel ein Wert von 4000 b angenommen wurde, durch die Angabe der größten und kleinsten Schleife und durch die Längenabstufung zwischen den einzelnen Schleifen. Die gerechneten Beispiele zeigen, daß die größte Schleifenlänge L_{\max} mit wachsendem R zunächst langsamer und dann schneller zunimmt. Die Geschwindigkeit, mit der sich die größte Schreife ausbreitet, hängt, wie es nach Gl. (26) zu erwarten ist, von der mittleren Schleifenlänge und dem Schleifenlängenunterschied im Ausgangszustand ab, wobei die mittlere Schleifenlänge einen wesentlich größeren Einfluß auf die Wachstumsgeschwindigkeit hat als der Längenunterschied innerhalb der Anordnung. Aus der schrittweisen Verfolgung des Rechenprozesses geht hervor, daß am Anfang ein Wettlauf zwischen den größeren Schleifen stattfindet. Die Schleife, die für ihre Vergrößerung die günstigste Umgebung hat, gewinnt zunächst einen Längenvorsprung, der jedoch rasch wieder verlorengehen kann, wenn sie nach der Annexion kleinerer Schleifen auf eine größere Schleife trifft, die selbst wächst. Unter weiterer Verringerung der Schleifenanzahl durch das Wachsen der längeren Schleifen gelingt es schließlich einer Schleife, sich gegenüber den übrigen so weit zu vergrößern, daß sie nacheinander alle anderen Schleifen mit einer zum Steilanstieg der Kurve $L_{\max} = f(R)$ führenden Geschwindigkeit annekieren kann.

Zur Erläuterung der Versuchsergebnisse anhand der abgeleiteten Beziehungen interessiert der Zusammenhang zwischen der zum Losreißen der Versetzung notwendigen Lastwechselzahl N_1 und der Rechenschrittzahl R_1 , bei der für eine vorgegebene Anfangsanordnung der Schleifen die Ausbruchlänge L_{L1} von der größten Schleife L_{\max} erreicht wird. Nach der getroffenen Vereinbarung entspricht R_1 einer Zeit

$$t_{L1} = R_1 \Delta t \quad (27)$$

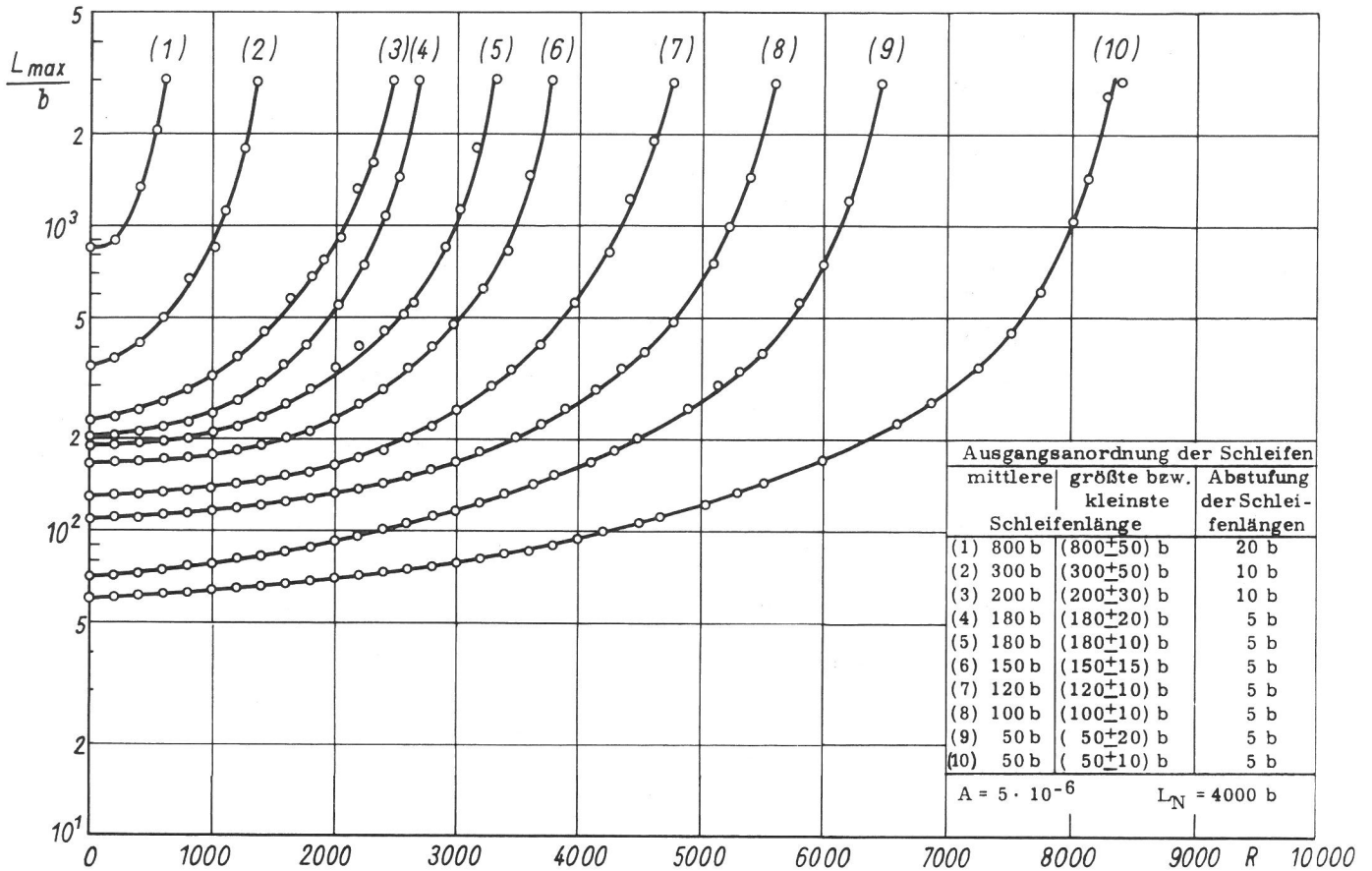


Bild 60
 Nach dem Berechnungsmodell ermittelte Abhängigkeit der größten an der blockierten Versetzung auftretenden Schleifenlänge L_{max} von der Rechenschrittzahl R für verschiedene Ausgangsanordnungen der Schleifen innerhalb der Netzwerklänge L_N

und damit für eine Lastwechselfrequenz f einer Lastwechselfrequenz

$$N_1 = R_1 f \Delta t \quad (28)$$

Durch die Substitution von Δt über Gl. (26a) erhält man

$$N_1 = \frac{2 k T G A f R_1}{b D S_E} \quad (29)$$

Die Abhängigkeit der Lastwechselfrequenz N_1 von der an der Versetzung wirksamen Spannung $\bar{\tau}_v(t)$ wird in Gl. (29) direkt durch S_E nach Gl. (24) und indirekt durch $R_1 = f(L_{L1})$ über L_{L1} nach Gl. (23), in die für τ^* der Amplitudenwert von $\bar{\tau}_v$, nämlich $\bar{\tau}_{va}$ einzusetzen ist, wiedergegeben. Wie Gl. (29) weiter zeigt, wächst N_1 linear mit der Beanspruchungsfrequenz f , wenn D und S_E frequenzunabhängig sind. Im Widerspruch dazu geht aus den Versuchsergebnissen in Bild 48 hervor, daß eine Verdoppelung der Belastungsgeschwindigkeit keinen merklichen Einfluß auf den Beginn und den Ablauf der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung hat. Zur Beantwortung der Frage, ob dieses Verhalten durch die spannungsinduzierte Diffusion längs der Versetzungslinie erklärbar ist, wird zunächst in einem wesentlich erweiterten Rechenprogramm zu überprüfen sein, inwieweit die in bezug auf einen erträglichen Rechenaufwand mit der Einführung von S_E nach Gl. (24) vorgenommene Vereinfachung des Berechnungsganges zur Unterdrückung einer Frequenzabhängigkeit führen kann. Außerdem wäre in weiteren Untersuchungen zu klären, ob durch die mit der Frequenz wachsende Belastungsgeschwindigkeit eine Erhöhung der Diffusionskonstanten zu erwarten ist.

Durch ein Zahlenbeispiel soll der aus Gl. (29) sich ergebende funktionelle Zusammenhang zwischen N_1 und $\bar{\tau}_{va}$ den Versuchsergebnissen gegenübergestellt werden. Dazu wird zunächst der nach Gl. (24) zu bildende Mittelwert S_E des dreieckförmigen Verlaufes von $\bar{\tau}_v(t)$ (vgl. Bild 50) über eine halbe Periode durch

$$S_E = \frac{1}{3} (\bar{\tau}_{va})^2 \quad (30)$$

angenähert. Mit Gl. (30) und den folgenden Werten $[k T]_{300^\circ K} = 4,14 \cdot 10^{-20} \text{ cm} \cdot \text{kp}$, $G = 8,2 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$, $b = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$, $A = 5 \cdot 10^{-6}$ ergibt sich dann aus Gl. (29)

$$N_1 = k_D \frac{f R_1}{D (\bar{\tau}_{va})^2} \quad (31)$$

mit $k_D = 0,41 \cdot 10^{-10} \text{ kp}^2/\text{cm}^2$. Die Festlegung der die Rechenschrittzahl R_1 mitbestimmende Ausgangsanordnung der Schleifen (vgl. Bild 60) hängt von der größten in Betracht zu ziehenden Spannungsamplitude $\bar{\tau}_{va}$ ab. Werden die gleichen Zahlenwerte wie für die Berechnung von τ_{va0} in Tabelle 6 gewählt, so sind die Maximalwerte von τ_{va0} gleichzeitig als obere Grenzen für $\bar{\tau}_{va}$ anzusehen. Aus Tabelle 6 ergibt sich ein Höchstwert von $\tau_{va0} \approx 49 \text{ kp/mm}^2$ und damit nach Gl. (23) die dazugehörige zum Losreißen der Versetzung führende Schleifenlänge von $L_L \approx 170 b$. Deshalb wird R_1 nach Kurve (6) in Bild 60 bestimmt, der eine Ausgangslänge der Schleifen von $(150 \pm 15) b$ zugrunde liegt. Für die Berechnung von $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ nach Gl. (31) im Bereich $\bar{\tau}_{va} \leq 49 \text{ kp/mm}^2$ sind noch die Parameter f und D festzulegen. Da weder die tatsächlich wirksame Spannungsamplitude $\bar{\tau}_{va} = f(\tau_a, \bar{\tau}_i)$ noch Anhaltspunkte für $\bar{\tau}_i = f(\tau_a)$ zur Berechnung von $\bar{\tau}_{va}$ über τ_a aus dem Versuch gegeben sind, kann der Vergleich der abgeleiteten Funktion $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ mit dem Experiment nur anhand der aus den Versuchswerten darstellbaren Grenzkurven erfolgen. Deshalb läßt sich auch die

$\tau_{va0}, \bar{\tau}_{va}, \tau_a$
kp/mm²

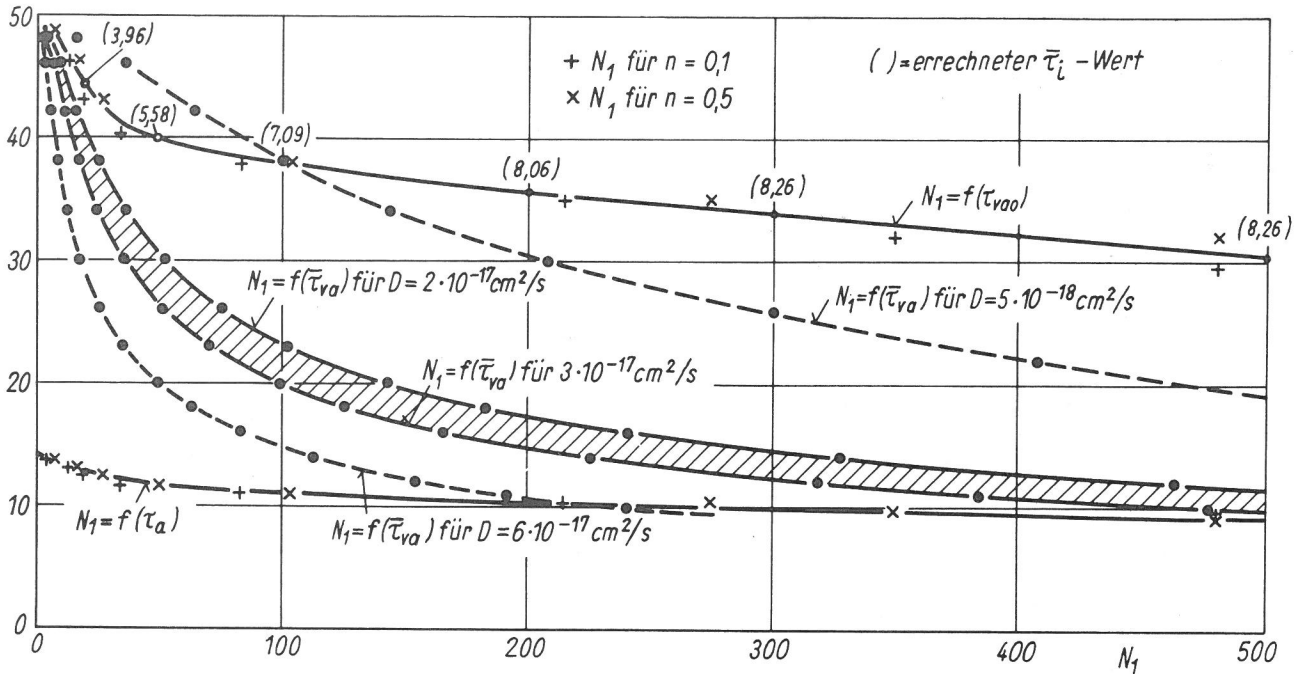


Bild 61

Zuordnung der berechneten Funktion $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ zur oberen Grenzkurve $N_1 = f(\tau_{va0})$ und unteren Grenzkurve $N_1 = f(\tau_a)$

St 52-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$

Frequenz f , die durch die Versuchseinrichtung bedingt, sich im betrachteten Spannungs-Amplitudenbereich τ_a von $0,07 \div 0,13$ Hz ändert, für die Berechnung von $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ nicht in Abhängigkeit von $\bar{\tau}_{va}$, sondern nur als Mittelwert von $f \approx 0,1$ Hz berücksichtigen. Die damit in Gl. (31) nur noch frei wählbar verbleibende Größe D sollte sich aus der Zuordnung des berechneten Kurvenverlaufes zu den Grenzkurven ergeben. Die aus den Versuchswerten für $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ ableitbaren Grenzkurven sind die Funktionen $N_1 = f(\tau_{va0})$ in Bild 57 und 58 sowie $N_1 = f(\tau_a)$ in Bild 55 und 56. $N_1 = f(\tau_{va0})$ stellt die obere Grenzkurve dar, weil hier die Reibspannungserhöhung in den primär plastizierten Körnern unberücksichtigt bleibt. $N_1 = f(\tau_a)$ ist als die untere Grenzkurve anzusehen, da τ_a nach Gl. (12) als $\bar{\tau}_{va}$ für die Bedingung $\bar{\tau}_i = \tau_a$ aufgefaßt werden kann, d. h. es wird eine so extreme Reibspannungserhöhung vorausgesetzt, daß keine Spannungserhöhung durch Versetzungsaufstauungen in den primär plastizierten Körnern mehr zustande kommt.

Für den Vergleich der nach dem Berechnungsmodell zu erwartenden Ergebnisse mit dem Experiment eignen sich besonders die Grenzkurven aus den Versuchswerten für die 2. Serie von St 52-3, weil hier N_1 über einen genügend großen Bereich bekannt ist. Mit den bisher vereinbarten Werten und einer Diffusionskonstante von $D = (2 \div 3) \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{s}$, die gut mit dem Wert von $D = 2,2 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{s}$ für die Diffusion des Kohlenstoffes im Ferrit vergleichbar ist [94], kann eine den bisherigen Überlegungen entsprechende Zuordnung des aus Gl. (31) resultierenden Kurvenverlaufes $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ zu den Grenzkurven erreicht werden, wie das Bild 61 zeigt. Die damit sich zunächst ergebende Frage, ob die ermittelte Diffusionskonstante der Diffusion von Teilchenatomen im Versetzungsschlauch zuzuschreiben ist und dafür ihrer Größe nach in Betracht kommt, oder unter Umständen angenommen werden muß, daß sich D auf die Dif-

fusion der Teilchenatome von den Teilchen in den Versetzungsschlauch bezieht, kann ohne weitere Anhaltspunkte über die unter den gegebenen Versuchsbedingungen ablaufenden Vorgänge an der Versetzung nicht eindeutig beantwortet werden. Nach den bisherigen Ausführungen ist die zweite Möglichkeit nur dann vorstellbar, wenn die Diffusionskonstante im Versetzungsschlauch wesentlich größer als im Gitter. Würde der Argumentation von Friedel [95] gefolgt werden, daß sich Zwischengitteratome an der Versetzung weniger leicht bewegen können als im ungestörten Gitter, weil dort infolge der vorhandenen Gitterbaufehler günstigere Raumverhältnisse zu stabileren Anordnungen führen, so müßte der erhaltene Wert für die Diffusion an der Versetzung als zu hoch angesehen werden. Dazu wäre die Frage zu klären, inwieweit bei der Wechselbeanspruchung in Analogie zu Überlegungen für eine statische Belastung [96, 97] ein Anwachsen der Diffusionskonstante mit der Spannungsamplitude zu erwarten ist.

Nach der Definition der oberen Grenzkurve $N_1 = f(\tau_{va0})$ charakterisiert die für gleiche N_1 zwischen $N_1 = f(\tau_{va0})$ und $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ auftretende Spannungs-Amplitudendifferenz die bis zum Erreichen des betreffenden N_1 stattfindende Erhöhung der Reibspannung in den primär plastizierten Körnern. Aus dem Vergleich der in Bild 61 dargestellten Funktionen $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ und $N_1 = f(\tau_{va0})$ geht demnach hervor, daß die Reibspannung im Bereich des Steilabfalles von $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ zunächst stark zunimmt, dann mit größer werdendem N_1 langsamer anwächst und sich schließlich nur noch wenig ändert. Die beispielsweise dazu über Gl. (12) aus τ_a und $\bar{\tau}_{va}$ für die mit $D = 2 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{s}$ sich ergebende Kurve $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ ermittelten $\bar{\tau}_i$ -Werte, die im Diagramm als geklammerte Zahlwerte über $N_1 = f(\tau_{va0})$ eingetragen sind, zeigen, wie dafür $\bar{\tau}_i$ mit N_1 zunimmt und dann einem Wert von ungefähr $8,3 \text{ kp/mm}^2$ zustrebt, der in der Nähe der aus der Grenzspannungsamplitude σ_{aG} für die 2. Serie resultierenden Schubspannung von $\tau_{aG} = 8,1 \text{ kp/mm}^2$ liegt (vgl. Tabelle 4).

Serie	d_K μm
○ 3	22
△ 4	30
□ 5	45

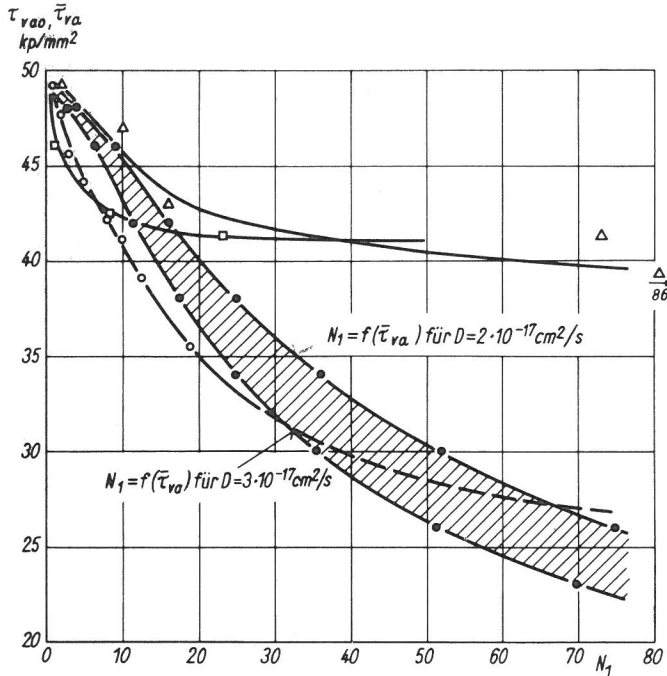


Bild 62

Zuordnung der berechneten Funktion $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ zu den oberen Grenzkurven $N_1 = f(\tau_{vao})$ mit N_1 für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,1$

St 52-3

Die Zuordnung der oberen Grenzkurven $N_1 = f(\tau_{vao})$ für die Serien 3 ÷ 5 von St 52-3 zu den berechneten Kurven $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ ist für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,1$ aus Bild 62 und für $n = 0,5$ aus Bild 63 zu ersehen. Für $n = 0,1$ (vgl. Bild 62) fallen die oberen Grenzkurven für die Serien 3 und 5 bei kleinen N_1 -Werten im Vergleich zu den berechneten Kurven zu steil ab, d. h. die Aktivierung neuer Versetzungsquellen erfolgt leichter als das die Rechnung ergibt. Dafür kommen im wesentlichen zwei Ursachen in Frage, nämlich die Ausgangsanordnung der Schleifen enthält größere Schleifenlängen als angenommen wurde, oder die tatsächlich wirksame Spannung wurde nicht richtig erfaßt. Die mittlere Schleifenlänge im Ausgangszustand sollte vor allem durch die Abkühlungsgeschwindigkeit nach dem Glühen bestimmt werden. Demnach müßten mindestens die Serien 2 und 3 (Luftabkühlung) sowie die Serien 4 und 5 (Ofenabkühlung) annähernd gleiche Schleifenanordnungen haben. Da die berechneten Kurven sich den oberen Grenzkurven sowohl der 2. Serie (vgl. Bild 61) als der 4. Serie zuordnen lassen, so geht daraus hervor, daß die Schleifenanordnungen der vier Stähle nicht wesentlich voneinander abweichen. Es ist deshalb anzunehmen, daß bei den Serien 3 und 5 im Ausgangszustand vorhandene höhere Spannungskonzentrationen, die bereits in bezug auf die Bilder 57 und 58 für die 3. Serie erörtert wurden, durch den starken Einfluß der Spannung auf den Aktivierungsprozeß zu einer bevorzugten Aktivierung der Versetzungsquellen im sehr frühen Stadium des Plastizierungsprozesses führen. Bild 63 zeigt dazu, daß mit dem allmählichen Abbau der Spannungskonzentrationen durch die Plastizierung der von diesen Spannungskonzentrationen betroffenen Körner eine wesentlich bessere Übereinstimmung zwischen den berechneten Kurven und den oberen

Serie	d_K μm
○ 3	22
△ 4	30
□ 5	45

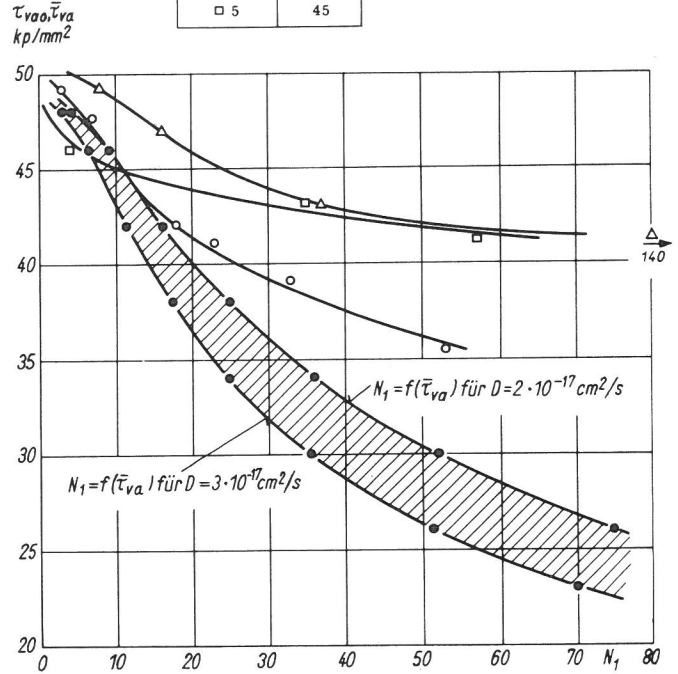


Bild 63

Zuordnung der berechneten Funktion $N_1 = f(\bar{\tau}_{va})$ zu den oberen Grenzkurven $N_1 = f(\tau_{vao})$ mit N_1 für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,5$

St 52-3

ren Grenzkurven der Serien 3 und 5 auch im Bereich kleiner N_1 -Werte eintritt.

Entsprechend den bisherigen Ausführungen wird für die weitere Erörterung des Plastizierungsprozesses davon ausgegangen, daß die Plastizierung von den primär plastizierten Körnern benachbarten, sich elastisch verhaltenden Körnern, die als Kornfolge 1 bezeichnet werden sollen (vgl. Bild 64), durch die Spannung $\tau_v(t)$ (vgl. Bild 50) nach einer Lastwechselzahl N_1 in der bereits beschriebenen Weise durch die Aktivierung von Versetzungsquellen in den günstig orientierten Körnern beginnt. Während der Zeit bis N_1 erreicht wird, findet an den Versetzungen aller anderen sich noch elastisch verhaltenden Körner infolge der spannungsinduzierten Diffusion durch die aufgebrachte Spannung $\tau(t)$ (vgl. Bild 50) ebenfalls eine Verlängerung der für den Ausbruch dieser Versetzungen interessierenden größten Schleifenlänge statt. Wird für das Berechnungsmodell die größte Schleifenlänge nach N_1 Lastwechseln mit L_2 bezeichnet, so läßt sich ihr über die Kurven $L_{\max} = f(R)$ in Bild 60 entsprechend der Ausgangsanordnung der Schleifen eine Rechenschrittzahl R_2 zuordnen, für die in Analogie zu Gl. (31)

$$R_2 = \frac{D}{k_D f} \tau_a^2 N_1 \quad (32)$$

gilt. Die Verlängerung der größten Schleifen an den Versetzungen der nur durch $\tau(t)$ beanspruchten Körner führt dazu, daß für den Beginn der Plastizierung einer zweiten Kornfolge, nämlich von sich bisher elastisch verhaltenden Körnern, die den Körnern der ersten Kornfolge benachbart sind (vgl. Bild 64), von N_1 aus gerechnet nur noch eine Lastwechselzahl $\Delta N_2 < N_1$ erforderlich ist. Wird zur Darstellung des

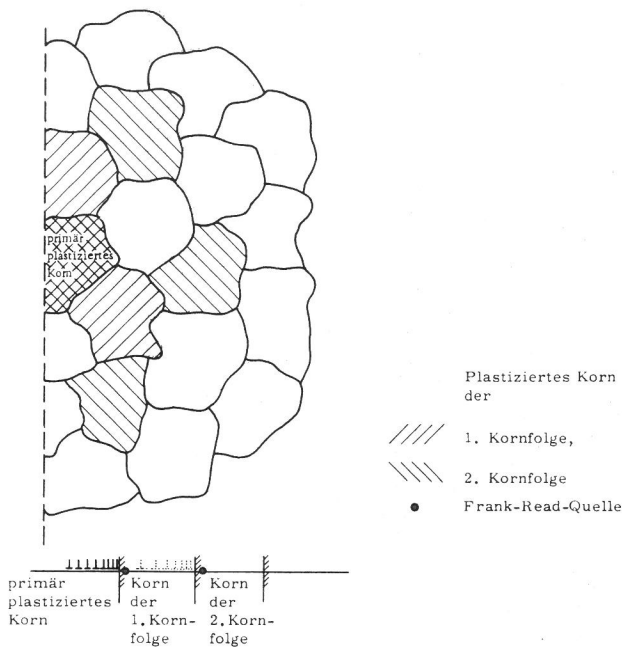


Bild 64
Schematische Darstellung der Entstehung plastisch deformierter Bezirke durch die von einem primär plastiziertem Korn ausgehende sukzessive Plastizierung von Kornfolgen

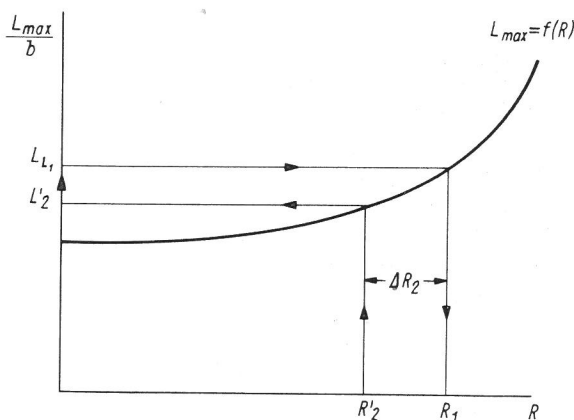


Bild 65
Schematische Darstellung einer Kurve $L_{max} = f(R)$ zur beispielsweise Ermittlung der Rechenschrittzahl ΔR_2

prinzipiellen Ablaufes zunächst vernachlässigt, daß $\bar{\tau}_i$ über ΔN_2 kleiner sein wird als über N_1 , also $\bar{\tau}_{va}$ größer über ΔN_2 als über N_1 , so kann die ΔN_2 entsprechende Rechenschrittzahl ΔR_2 aus dem Diagramm für $L_{max} = f(R)$ (vgl. Bild 60) über die sich aus Bild 65 ableitbare Beziehung

$$\Delta R_2 = R_1 - R_2' \quad (33)$$

ermittelt werden. Mit R_2' nach Gl. (32), R_1 über Gl. (31) und ΔR_2 in Analogie zu Gl. (32) ergibt sich aus Gl. (33)

$$\Delta N_2 = N_1 \left[1 - \left(\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \right)^2 \right] \quad (34)$$

und damit die Lastwechselzahl

$$N_2 = N_1 + \Delta N_2, \quad (35)$$

nach der die zweite Kornfolge sich zu plastizieren beginnt, zu

$$N_2 = N_1 \left\{ 1 + \left[1 - \left(\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \right)^2 \right] \right\}. \quad (36)$$

Zur Ermittlung der Lastwechselzahl N_3 , bei der die dritte Kornfolge, also sich noch elastisch verhaltende Nachbarkörner der zweiten Kornfolge anfangen sich zu plastizieren, ist sinngemäß dem bisherigen Vorgehen zu berücksichtigen, daß diese Körner bis zum Beginn der Plastizierung der zweiten Kornfolge bei N_2 bereits durch $\tau(t)$ beansprucht wurden. Mit Gl. (31) folgt dann in Analogie zu den Gl. (32) ÷ (35) und durch die Substitution von N_2 über Gl. (36)

$$N_3 = N_1 \left\{ 1 + \left[1 - \left(\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \right)^2 \right] + \left[1 - \left(\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \right)^2 \right]^2 \right\}. \quad (37)$$

Aus dem Aufbau der Gl. (36) und (37) läßt sich unmittelbar die für den Beginn der Plastizierung der m-ten Kornfolge zu erwartende Lastwechselzahl N_m ableiten, nämlich

$$N_m = N_1 \sum_{i=1}^m \left[1 - \left(\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \right)^2 \right]^{i-1}. \quad (38)$$

N_m ist die Summe aller zwischen den Zeitpunkten des Beginns der Plastizierung der einzelnen Kornfolgen liegenden Lastwechselzahlen

$$\Delta N_i = N_1 \left[1 - \left(\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \right)^2 \right]^{i-1}. \quad (39)$$

Die Summanden ΔN_i sind Glieder einer geometrischen Reihe, deshalb kann für Gl. (38) auch geschrieben werden

$$N_m = N_1 \frac{1 - \left[1 - \left(\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \right)^2 \right]^m}{1 - \left[1 - \left(\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \right)^2 \right]}$$

oder

$$N_m = N_1 \left(\frac{\bar{\tau}_{va}}{\tau_a} \right)^2 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \right)^2 \right]^m \right\}. \quad (40)$$

Aus Gl. (39) geht zunächst hervor, daß für den in Betracht zu ziehenden Fall $\tau_a < \bar{\tau}_{va}$, also $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} < 1$, ΔN_i mit wachsendem i kleiner wird, d. h. die Anzahl der plastizierten Körner nimmt nach dem merklichen Beginn des Plastizierungsprozesses bei N_1 während des weiteren Versuchsablaufes beschleunigt zu. Der Vorgang schreitet um so schneller fort, je größer sowohl das Verhältnis $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ als auch die Spannungs-

amplitude $\bar{\tau}_{va}$ selbst ist, die nach Gl. (31) N_1 wesentlich beeinflusst. Dazu folgt aus Gl. (8) bzw. Gl. (12), daß τ_{va} mit dem Korndurchmesser d_K wächst, wenn dieser als charakteristische Größe für die Aufstaulänge L_V der Versetzungen betrachtet wird, während die über $\tau_i = f(\tau_a, N)$ sich auswirkende Verfestigung in den bereits plastizierten Körnern eine Verminderung von τ_{va} hervorruft. Dementsprechend nimmt für vergleichbare Spannungsamplituden τ_a das $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ -Verhältnis mit kleiner werdendem d_K und wachsendem $\bar{\tau}_i = f(\tau_a, N_1)$ zu. Über Gl. (40) kann die Anzahl m der plastizierten Kornfolgen als Funktion der normierten Lastwechselzahl $\frac{N_m}{N_1}$ dargestellt werden, wie das Bild 66 beispielsweise für drei Ver-

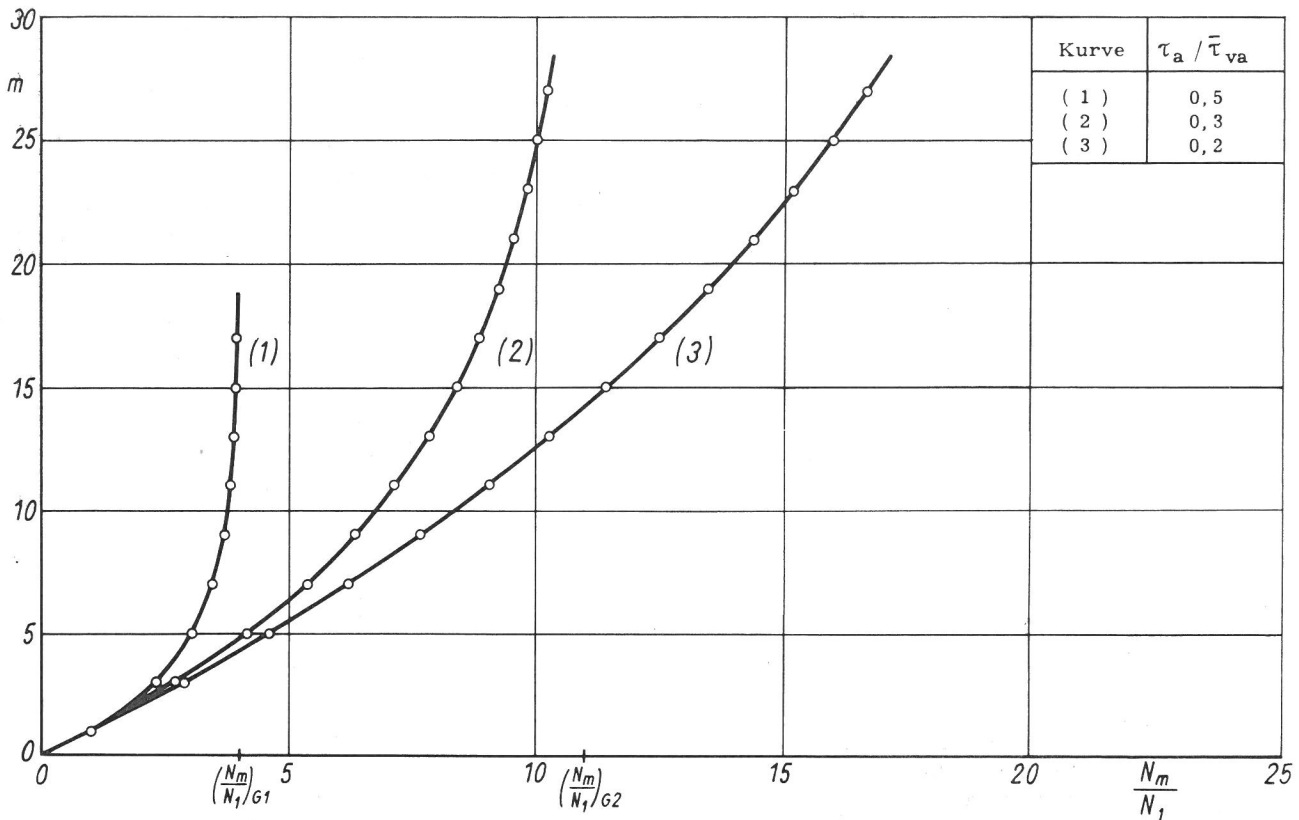


Bild 66
Anzahl der plastizierten Kornfolgen m in Abhängigkeit der normierten Lastwechselzahl N_m/N_1 für verschiedene $\tau_a/\bar{\tau}_{va}$ -Verhältnisse

hältnisse $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ zeigt. Daraus ist zu ersehen, daß die ständige Beschleunigung des Plastizierungsprozesses beim Erreichen des Grenzwertes

$$\left(\frac{N_m}{N_1}\right)_G = \left(\frac{\bar{\tau}_{va}}{\tau_a}\right)^2 \quad (41)$$

zu einer katastrophalen Plastizierung aller bis dahin sich noch elastisch verhaltenden Körner führt. Aus dem nahezu senkrechten Anstieg der Verformungswegamplitude bei jeweils der höchsten mit den Korngrößen $13 \mu\text{m}$, $22 \mu\text{m}$ und $30 \mu\text{m}$ gefahrenen Spannungsamplitude σ_a (vgl. Bild 33 ÷ 35) geht hervor, daß hier die nach dem Berechnungsmodell zu erwartende katastrophale Plastizierung tatsächlich stattgefunden hat, indem innerhalb weniger Belastungszyklen vorwiegend während der Zugbelastungsphasen, wie das die Probenverlängerung zeigt (vgl. Bild 38), der größte Teil des mit der höchsten Nennspannung beanspruchten Probenvolumens plastiziert wurde. Beim $45 \mu\text{m}$ -Korn (vgl. Bild 35) trat kein Steilanstieg der Verformungswegamplitude auf, obwohl hier τ_{va} annähernd ebenso hoch gewesen sein dürfte wie bei den anderen Korngrößen. Da im Bereich hoher $\bar{\tau}_{va}$ -Werte, wo die Reibspannungserhöhung innerhalb N_1 noch gering ist (vgl. Bild 61 ÷ 63), das $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ -Verhältnis mit wachsender Korngröße abnimmt und dementsprechend nach Bild 66 bis zum Einsetzen der katastrophalen Plastizierung um so mehr Kornfolgen plastiziert werden müssen je größer der Korndurchmesser wird, könnte das besondere Verhalten beim $45 \mu\text{m}$ -Korn damit erklärt werden, daß hier aufgrund des kleinen $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ -Verhältnisses die Anzahl der zu plastizierenden Kornfolgen für

das Eintreten einer katastrophalen Plastizierung nicht mehr ausreicht.

Mit den bereits für die Berechnung von τ_{va0} gewählten Zahlenwerten läßt sich zunächst für jeweils die höchste bei den einzelnen Korngrößen gefahrene Spannungsamplitude σ_a das $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ -Verhältnis abschätzen, indem unter Vernachlässigung der Reibspannungserhöhung innerhalb N_1 $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} \approx \frac{\tau_a}{\tau_{va0}}$ gesetzt wird. Das $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ -Verhältnis kann außerdem nach Gl. (41) direkt aus den Kurven der Verformungswegamplitude in den Bildern 33 ÷ 36 ermittelt werden, wenn N_1 bekannt ist und ein Steilanstieg der Verformungswegamplitude auftritt. Die Gegenüberstellung der aus den Versuchsergebnissen mit den N_1 -Werten für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,1$ sich ergebenden $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ -Verhältnisse und der entsprechenden $\frac{\tau_a}{\tau_{va0}}$ -Werte in Tabelle 7 zeigt, daß die aus dem Experiment τ_{va0} und aus dem Berechnungsbeispiel resultierenden Zahlen unter Berücksichtigung der erwähnten Vernachlässigung der Reibspannungserhöhung gut übereinstimmen. Für die weiteren Erörterungen werden deshalb die N_1 -Werte für $n = 0,1$ verwendet. Aus der damit durchgeführten Darstellung der Kurven der Bilder 33 ÷ 36 als Funktionen $\delta(N)/\delta(N=1) = f\left(\frac{N}{N_1}\right)$ in den Bildern 67 ÷ 70 ist bei hohen Spannungsamplituden für die Korngrößen $13 \mu\text{m}$, $22 \mu\text{m}$ und $30 \mu\text{m}$ der durch Gl. (40) beschriebene und in Bild 66 aufgezeichnete Plastizierungsverlauf bereits erkennbar. Aus Bild 67 und 69 geht hervor, daß mit kleiner werdender Spannungsamplitude σ_a das $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ -Verhältnis zunächst zunimmt, wie das die Verschiebung des Steilanstieges der Kurven nach kleiner werdenden $\frac{N}{N_1}$ -Werten hin zeigt (vgl. Bild 66). Als Ursache dafür ist nach der über Gl. (12) ableitbaren Beziehung

Serie	d_K μm	σ_a kp/mm^2	τ_a kp/mm^2	Aus dem Versuch		Berechnungsbeispiel
				$\left(\frac{N}{N_1}\right)_G = \left(\frac{\bar{\tau}_{va}}{\tau_a}\right)^2$	$\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$	$\left[\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}\right]_{\tau_{i0}} = \frac{\tau_a}{\tau_{va0}}$
2	13	40,7	13,6	11	0,30	0,28
3	22	32,9	11,0	15	0,26	0,23
4	30	29,3	9,7	19	0,23	0,20

Tabelle 7

Vergleich der $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ aus den Versuchsergebnissen und dem Berechnungsbeispiel für die höchsten Spannungsamplituden σ_a der Serien 2, 3 und 4 sich ergebenden $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ -Verhältnisse

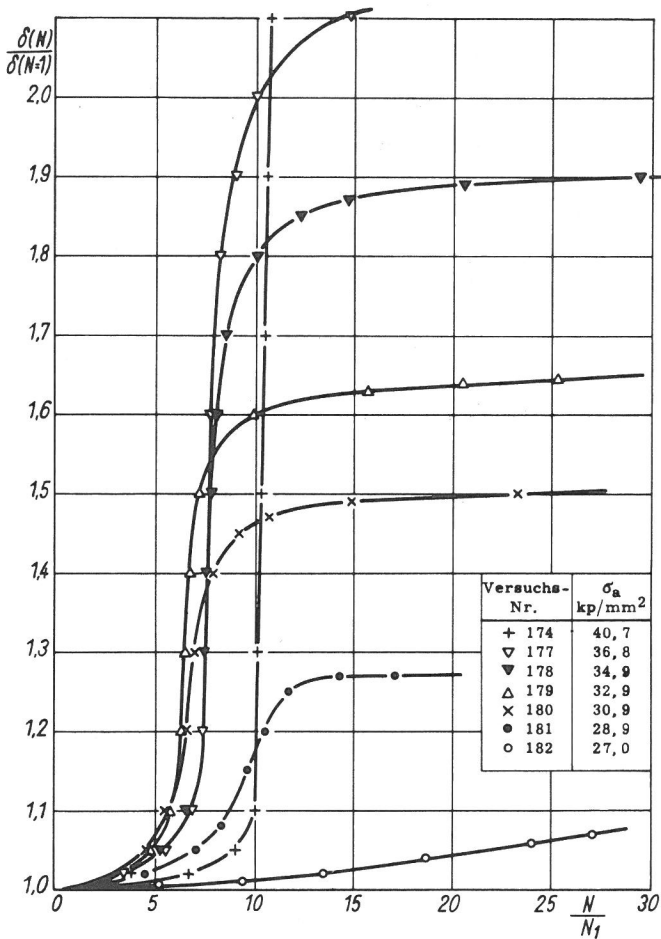


Bild 67

Darstellung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ in Abhängigkeit der normierten Lastwechselzahl N/N_1 mit N_1 für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,1$

St 52-3 Serie 2 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$

$$\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\bar{\tau}_i}{\tau_a}\right) \sqrt{c_K d_K + 1}} \quad (42)$$

in Übereinstimmung mit den Ergebnissen nach dem Berechnungsmodell in Bild 61 die Erhöhung der Reibspannung $\bar{\tau}_i$ mit kleiner werdendem τ_a , d. h. zunehmenden N_1 anzusehen.

Der mit abnehmendem σ_a in Bild 68 und bei kleineren Werten ebenfalls in den Bildern 67 und 69 feststellbare flacher werdende Verlauf der Verformungsweg-Amplitudenfunktion

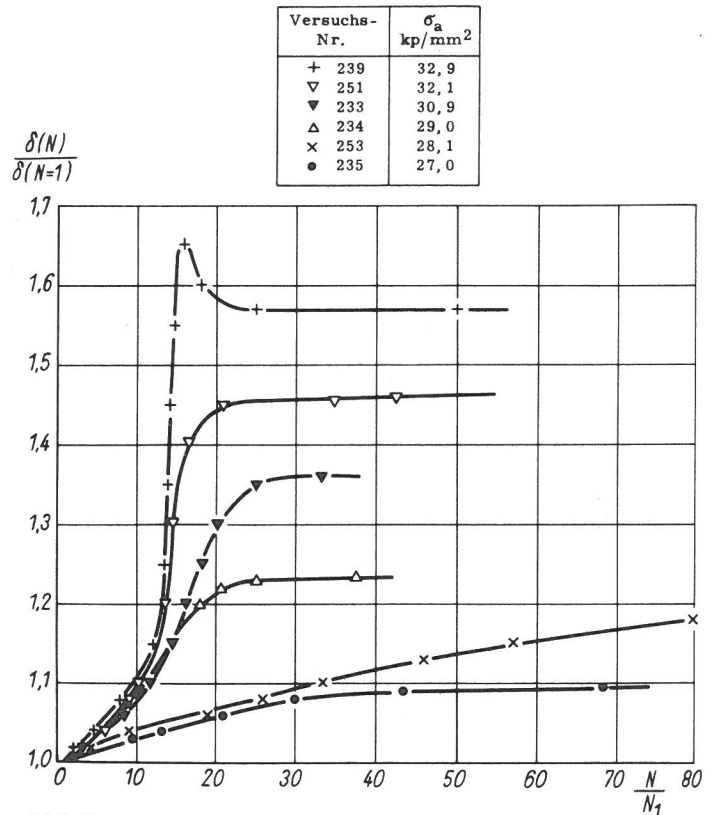


Bild 68

Darstellung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ in Abhängigkeit der normierten Lastwechselzahl N/N_1 mit N_1 für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,1$

St 52-3 Serie 3 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 22 \mu\text{m}$

läßt sich mit der zu erwartenden Änderung des $\frac{\tau_a}{\bar{\tau}_{va}}$ -Verhältnisses nicht mehr ohne weiteres erklären.

Da die dem Berechnungsmodell entsprechende Zuordnung der Kurven zueinander von der Genauigkeit der Bestimmung von N_1 aus den Versuchsergebnissen abhängt, soll zunächst erörtert werden, wie gut die ermittelten Zahlen die N_1 -Werte des Berechnungsmodells zu charakterisieren vermögen. Aus der Besprechung der Bilder 55 ÷ 58 in bezug auf das Resultat bei der 3. Serie von St 52-3 ergab sich hierzu bereits der Hinweis, daß im Ausgangszustand vorhandene Spannungs-konzentrationen [61, 85], wie sie z. B. auch an Perlitinseln entstehen können (vgl. Bild 27 c), mit kleiner werdendem τ_a vermutlich einen wachsenden Einfluß auf die Plastizierung neuer Körner im ersten Stadium des Plastizierungsprozesses gewinnen und dadurch eine merkliche Erhöhung der Verformungswegamplitude bereits nach kleineren Lastwechselzahlen erfolgen kann als das durch die Wirkung von $\tau_v(t)$ zu

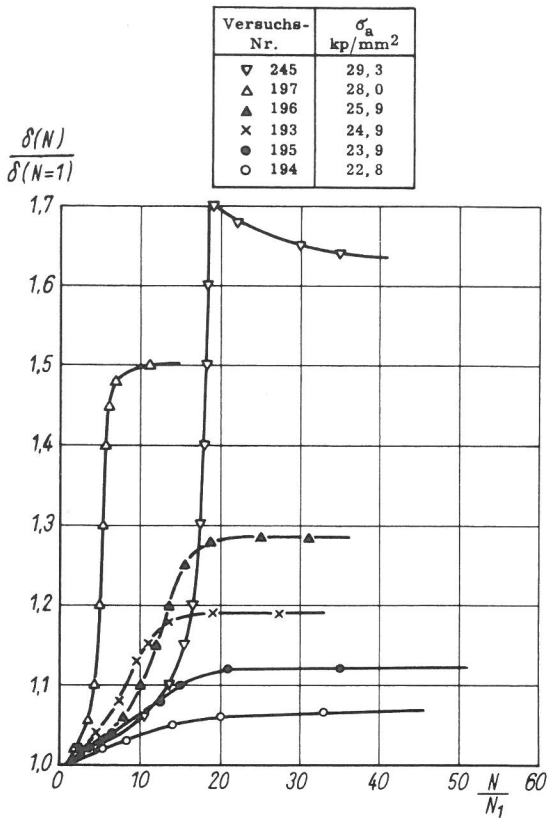


Bild 69
Darstellung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ in Abhängigkeit der normierten Lastwechselzahl N/N_1 mit N_1 für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,1$
St 52-3 Serie 4 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 30 \mu\text{m}$

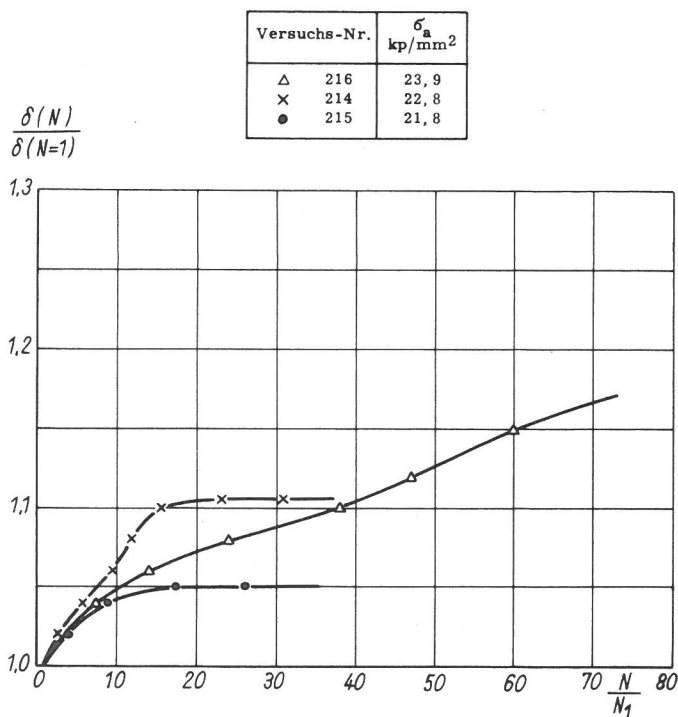


Bild 70
Darstellung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ in Abhängigkeit der normierten Lastwechselzahl N/N_1 mit N_1 für ein Verhältnis der Kornanteile von $n = 0,1$
St 52-3 Serie 5 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 45 \mu\text{m}$

erwarten wäre. Nach den bisherigen Überlegungen sollte dieser Fall dann eintreten, wenn Spannungskonzentrationen zusammen mit $\tau(t)$ die Aktivierung einer größeren Anzahl sich elastisch verhaltender Körner stärker zu fördern vermag als $\tau_v(t)$. Die Anzahl der durch $\tau_v(t)$ innerhalb von N_1 plastizierbaren Körner hängt von der Anzahl der primär plastizierten Körner ab, steigt also mit τ_a an (vgl. unter 5.1), während die Anzahl der mit Unterstützung von Spannungskonzentrationen plastizierbaren Körner mit kleiner werdendem τ_a zunehmen sollte, weil um so mehr Spannungskonzentrationen im Werkstoff verbleiben, je weniger Körner bereits im ersten Lastwechsel plastiziert wurden. Da bei den höchsten gefahrenen Spannungsamplituden das dazugehörige $\tau_v(t)$ ausreicht, nach wenigen Lastwechseln neue Körner zu plastizieren, sollte angenommen werden, daß hier τ_{va} nicht viel kleiner als die für die Plastizierung von Körnern im ersten Lastwechsel erforderliche Quellen-Aktivierungsspannung ist, also nur wenige Körner durch das Zusammenwirken von $\tau(t)$ mit noch vorhandenen Spannungskonzentrationen früher plastiziert werden als die durch $\tau_v(t)$ beanspruchten Körner. Mit kleiner werdendem τ_a wächst jedoch der Unterschied zwischen der genannten Quellen-Aktivierungsspannung und τ_{va} und damit auch die Anzahl der nach dem ersten Lastwechsel sich noch elastisch verhaltenden Körner, die durch eine Spannungskonzentration einer größeren maximalen Spannung ausgesetzt sind als τ_{va} , also für ihre Plastizierung nur noch eine geringere Schleifenverlängerung durch den Diffusionsprozeß benötigen als die durch $\tau_v(t)$ beanspruchten Körner. Die Spannungskonzentrationen bewirken außerdem in diesen Körnern, da sie in bezug auf die zyklische Beanspruchung eine Erhöhung der Mittelspannung bedeuten, auch bei gleichbleibendem äußeren Spannungsverlauf $\tau(t)$ eine Vergrößerung der mittleren, für die Diffusion längs der Versetzungslinie maßgebenden Spannung (vgl. Bild 71), d. h. die Schleifenverlängerung kann in diesen

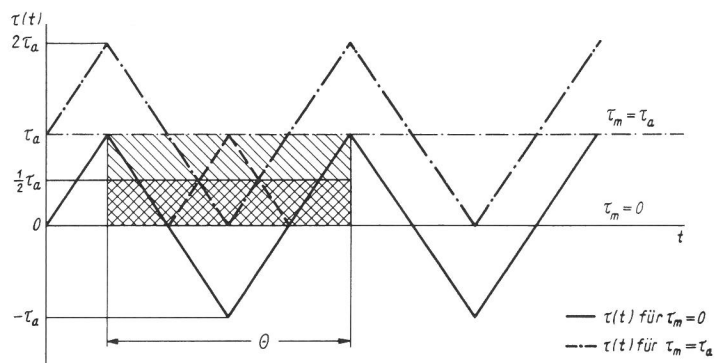


Bild 71
Schematische Darstellung der aus der Änderung des Verlaufes $\tau = f(t)$ durch die Mittelspannung $\tau_m = \tau_a$ resultierenden Erhöhung der mittleren, bei der spannungsinduzierten Diffusion längs der Versetzungslinie wirksamen Spannung von $1/2 \tau_a$ auf τ_a

Körnern erheblich schneller ablaufen als in den nur durch $\tau(t)$ belasteten, sich elastisch verhaltenden Körnern. Die genannten Gesichtspunkte sprechen dafür, daß mit abnehmendem τ_a eine wachsende Anzahl sich elastisch verhaltender Körner, die nicht $\tau_v(t)$ ausgesetzt sind, infolge der im Ausgangszustand vorhandenen Spannungskonzentrationen früher plastiziert werden als die durch $\tau_v(t)$ beanspruchten Körner. Der mit kleiner werdendem σ_a entgegen der Erwartung nach dem Berechnungsmodell flacher werdende Verlauf von $\delta(N)/\delta(N=1) = f\left(\frac{N}{N_1}\right)$ könnte demnach darauf zu-

rückgeführt werden, daß die aus den Versuchsergebnissen ermittelten N_1 -Werte, da sie den Beginn des Plastizierungsprozesses charakterisieren ($n = 0,1$), mit abnehmendem τ_a weniger stark zunehmen als die dem Berechnungsmodell zugrunde liegenden, nur auf die Wirkung von $\tau_v(t)$ bezogenen N_1 -Werte.

Aus dem nahezu linearen Anwachsen der Verformungswegamplitude über $\frac{N}{N_1}$ bei kleinem σ_a (vgl. Bild 67 ÷ 69) geht hervor, daß hier die Plastizierung der Körner mit annähernd konstanter Geschwindigkeit fortschreitet. Nach der bisher entwickelten Vorstellung zum möglichen Ablauf des Plastizierungsprozesses bedeutet dieses Verhalten, daß $\tau(t)$ bei allen sich elastisch verhaltenden Körnern, bevor sie Nachbarn bereits plastizierter Körner werden, nicht mehr zur Schleifenvergrößerung beiträgt. Dieser Fall sollte eintreten, wenn τ_a selbst in den günstig orientierten Körnern eine für die spannungsinduzierte Diffusion längs der Versetzungslinie erforderliche Mindestspannung τ_c unterschreitet. Während für $\sigma_a = 28,9 \text{ kp/mm}^2$ in Bild 67, für $\sigma_a = 29,0 \text{ kp/mm}^2$ in Bild 68 und für $\sigma_a = 24,9 \text{ kp/mm}^2$ in Bild 69 wahrscheinlich aufgrund des Orientierungsunterschiedes der Körner der Übergang vom beschleunigten zum mit konstanter Geschwindigkeit ablaufenden Plastizierungsprozeß innerhalb des Versuches noch erkennbar ist, wird bei den nächstniedrigen gefahrenen Spannungsamplituden σ_a , die mit σ_{ac} bezeichnet in Tabelle 8 zusammengestellt sind, τ_c in den sich

Serie	d_K μm	σ_{ac} kp/mm^2	Bemerkung
2	13	27,0	aus Bild 67
3	22	28,1	aus Bild 68
4	30	23,9	aus Bild 69

Tabelle 8

Grenz-Spannungsamplitude σ_{ac} für den Übergang zum linearen Anwachsen der Verformungswegamplitude mit der normierten Lastwechselzahl $\frac{N}{N_1}$ für die Serien 2 ÷ 4 von St 52-3

elastisch verhaltenden Körnern, die nur durch $\tau(t)$ beansprucht werden, bereits nicht mehr erreicht. Aus der ziemlich guten Übereinstimmung der σ_{ac} -Werte für die Serien 2 und 3 sowie aus dem kleineren Wert für die 4. Serie, in dessen Nähe auch der Wert für die 5. Serie liegen dürfte, geht hervor, daß die Grenz-Spannungsamplitude σ_{ac} für den Übergang zum linearen Anwachsen der Verformungswegamplitude mit $\frac{N}{N_1}$ offenbar wie σ_{aG} (vgl. Tabelle 4) von der Abkühlungsgeschwindigkeit nach dem Glühen (vgl. Tabelle 2) abhängt. Da die Höhe von τ_c durch die Bedingung bestimmt werden sollte, daß die mittlere potentielle Energie der ausgebauchten Versetzungsschleifen, die mit dem Quadrat der Spannungsamplitude und der dritten Potenz der mittleren Schleifenlänge wächst [73, 74], ausreicht, die Bindung der Teilchenatome an die Teilchen zu überwinden und die Bewegung der Teilchenatome im Versetzungsschlauch zu ermöglichen, könnten die niedrigeren σ_{ac} -Werte bei den Serien 4 und 5 auf einen etwas größeren, durch die langsamere Abkühlungsgeschwindigkeit (Ofenabkühlung) bedingten mittleren Teilchenabstand an den Versetzungen zurückgeführt werden.

Im Bereich $\sigma_a < \sigma_{ac}$ ist eine Schleifenverlängerung durch die spannungsinduzierte Diffusion längs der Versetzungslinie

nur noch in den sich elastisch verhaltenden Körnern zu erwarten, die einer höheren Spannung als $\tau(t)$ ausgesetzt sind. Dazu gehören zunächst im wesentlichen die den primär plastizierten und den aufgrund von Spannungskonzentrationen etwas später plastizierten Körnern benachbarten, sich elastisch verhaltenden Körner. In diesen Körnern erfolgt eine Schleifenverlängerung durch $\tau_v(t)$ solange τ_{va} größer als das jeweilige der augenblicklichen mittleren Schleifenlänge entsprechende τ_c ist. Da durch die mit der Verfestigung in den plastizierten Körnern verbundenen Erhöhung der Reibspannung $\tau_i = f(\tau_a, N)$ nach Gl. (8) bzw. (12) τ_{va} bei gegebenem τ_a mit wachsendem N kleiner wird, kann eine Plastizierung weiterer Körner nur dann eintreten, wenn τ_{va} solange größer als τ_c bleibt bis die τ_{va} entsprechende Ausbruchslänge L_L sich ausgebildet hat. Neben der kritischen Diffusionspannung τ_c sollte demnach auch das Verfestigungsverhalten in den durch die Spannungskonzentrationen plastizierten Körnern die Höhe der Grenz-Spannungsamplitude σ_{aG} für das Eintreten einer Verformungsweg-Amplitudenerhöhung bestimmen. Aus der Differenz zwischen σ_{ac} und σ_{aG} von ungefähr $3 \div 4 \text{ kp/mm}^2$ (vgl. Tabelle 4 und 8), die ja die bis zur Unterschreitung von τ_c weitere mögliche Erniedrigung von σ_a infolge des Unterschiedes zwischen τ_a und τ_{va} kennzeichnet, kann dazu über Gl. (12) mit den Werten für $\sqrt{c_K d_K}$ aus Tabelle 6 abgeschätzt werden, daß zum Zeitpunkt $\tau_{va} < \tau_c$ die Spannungsdifferenz ($\tau_a - \tau_i$) nur noch etwa $0,3 \text{ kp/mm}^2$ beträgt, also die Versetzungsaufstauungen in den plastizierten Körnern nicht mehr wesentlich zur Spannungserhöhung beitragen. Damit wird verständlich, warum die Grenz-Spannungsamplitude σ_{aG} für das Eintreten einer merklichen Erhöhung der Verformungswegamplitude kaum durch die Korngröße beeinflusst wird. Das Anwachsen von σ_{aG} mit der Abkühlungsgeschwindigkeit nach dem Glühen (vgl. unter 4.2.1) dürfte wie bei σ_{ac} auf die Erhöhung von τ_c infolge der Verringerung des Teilchenabstandes an den Versetzungen zurückzuführen sein, der hier weniger als 10 % zu betragen hätte. Inwieweit auch das Verfestigungsverhalten, d. h. die Änderung von τ_i in Abhängigkeit von τ_a und N durch die Abkühlungsbedingungen beeinträchtigt wird, läßt sich aus den σ_{aG} -Werten nicht feststellen. Nach Bild 16 ergibt sich für die 1. Serie von St 37-3 ein σ_{aG} -Wert von ungefähr 13 kp/mm^2 gegenüber einem Wert von $\sigma_{aG} \approx 24 \text{ kp/mm}^2$ für die 1. Serie von St 52-3. Da beide Serien in Luft abgekühlt wurden (vgl. Tabelle 2) ist anzunehmen, daß vor allem durch den geringeren Mn-Gehalt bei St 37-3 (vgl. Tabelle 1) ein größerer Teilchenabstand an den Versetzungen entsteht als bei St 52-3 und dadurch τ_c entsprechend kleiner wird.

Bei höherem σ_a innerhalb des Bereiches zwischen σ_{ac} und σ_{aG} werden wahrscheinlich noch alle Körner des mit der höchsten Nennspannung beanspruchten Probenvolumens plastiziert. Mit weiter abnehmendem σ_a wird jedoch aufgrund des Orientierungsunterschiedes in einer wachsenden Anzahl von Körnern $\tau_{va} < \tau_c$, bevor die Ausbruchslänge L_L erreicht worden ist. Bei genügend kleinem $\sigma_a > \sigma_{aG}$ kann es deshalb zum Abbruch des Plastizierungsprozesses kommen, ohne daß alle Körner plastiziert wurden. Damit läßt sich erklären, warum in den mit den niedrigsten Spannungsamplituden gefahrenen Versuchen bei den Serien 2 und 5 von St 52-3 sich ein Maximum der Verformungswegamplitude einstellte (vgl. Bild 33 und 36), obwohl nach dem Abschluß der Wechselbeanspruchung noch eine ausgeprägte Streckgrenze auftrat (vgl. Bild 39 und 42). Unterhalb σ_{aG} findet eine Änderung der Schleifenlängen durch die spannungsinduzierte Diffusion im wesentlichen nur noch in den Nachbarkörnern der durch Spannungskonzentrationen plastizier-

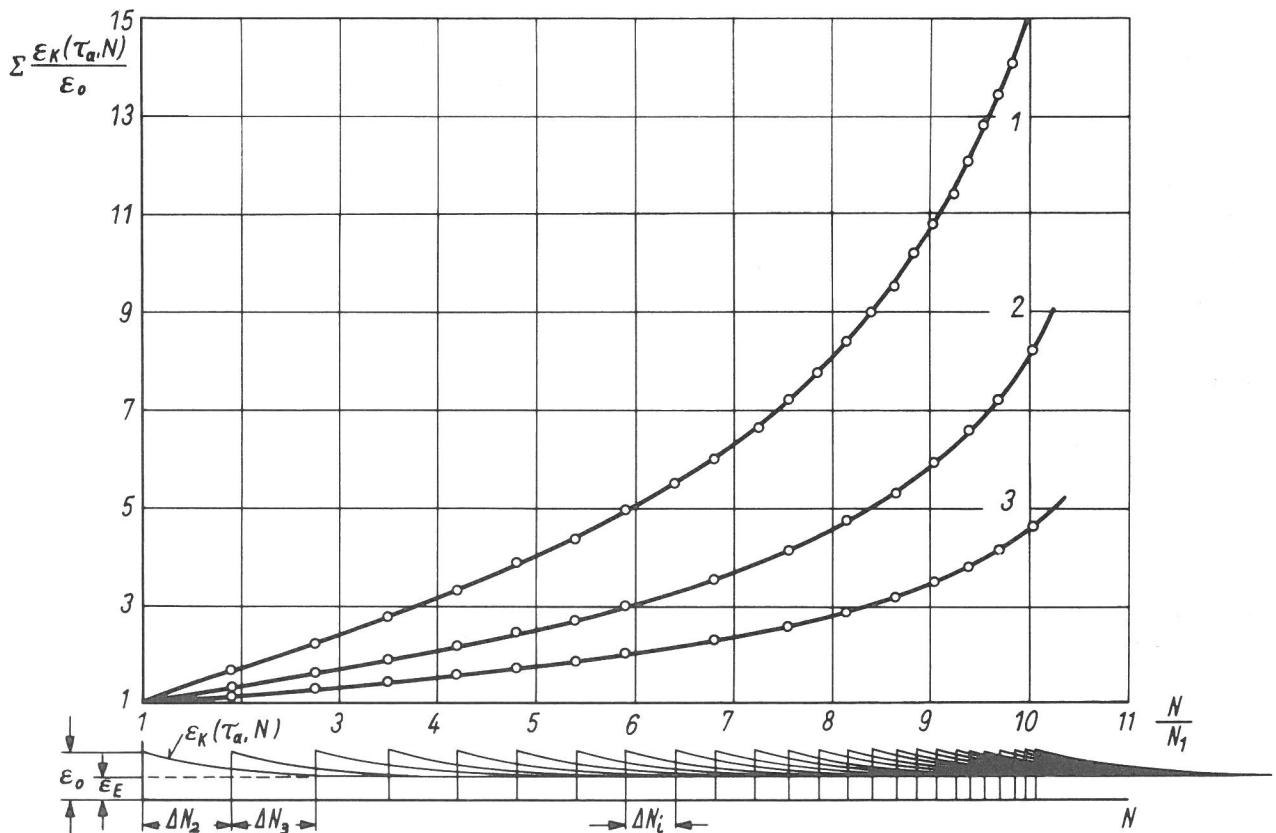
ten Körner statt bis dort ebenfalls $\tau_{va} < \tau_c$ wird. Die bis dahin sich einstellende größte Schleifenlänge reicht zwar dann noch nicht aus, in diesen Körnern durch σ_a Versetzungsquellen zu aktivieren, die Schleifenverlängerung sollte aber zu einer Erniedrigung der Loslöseschubspannung in diesen Körnern führen und könnte deshalb mit als Ursache für den durch eine Wechselbeanspruchung mit $\sigma_a < \sigma_{aG}$ hervorgerufenen, aus den Bildern 43 ÷ 45 erkennbaren Abfall der ausgeprägten Streckgrenze und die Verminderung der Lüdersdehnung angesehen werden.

Aus dem durch Gl. (40) beschriebenen Vorgang der Probenplastizierung und unter Berücksichtigung der in den einzelnen Körnern nach ihrer Plastizierung eintretenden Verfestigung folgt, daß die während des Dehnungs-Amplitudenanstieges sich augenblicklich einstellende Dehnungsamplitude aus den Beiträgen der bereits plastizierten, in verschiedenen weit fortgeschrittenen Stadien der Verfestigung stehenden Kornfolgen zusammensetzt. Wird vereinfachend angenommen, daß die Körner einer Kornfolge alle ziemlich gleichzeitig plastiziert werden und jede Kornfolge zu diesem Zeitpunkt im Mittel einen plastischen Anteil ϵ_0 zur Dehnungsamplitude beiträgt, so sollte die Größe von ϵ_0 durch die mittlere Anzahl der Körner pro Kornfolge und deshalb im wesentlichen durch die Anzahl der primär plastizierten Körner, durch die anfangs die Versetzungsbewegung bewirkende Spannungsdifferenz ($\tau_a - \tau_{i0}$) und durch den mittleren Laufweg der Versetzungen, der vom Korndurchmesser ab-

hängen kann, bestimmt werden. Durch die Verfestigung der plastizierten Körner nimmt ϵ_0 mit wachsender Lastwechselzahl ab und erreicht schließlich einen Sättigungswert ϵ_E (vgl. Bild 1 b), der durch die Spannungsdifferenz ($\tau_a - \tau_{iE}$), wobei τ_{iE} die Reibspannung im Sättigungszustand ist, gekennzeichnet sein sollte. Obwohl beim Erreichen der maximalen Verformungswegamplitude sich noch nicht bei allen plastizierten Kornfolgen ϵ_E eingestellt hat, so dürfte doch bereits aus der Gruppierung der Kurven für die 2. und 3. Serie von St 52-3 (Luftabkühlung) sowie der Kurven für die 4. und 5. Serie von St 52-3 (Ofenabkühlung) in Bild 37 hervorgehen, daß ϵ_E kaum durch die Korngröße beeinflusst wird, jedoch bei gleichem σ_a mit größer werdender Abkühlungsgeschwindigkeit abnimmt. Wie Bild 16 zeigt, wirkt sich der höhere Legierungsgehalt bei St 52-3 gegenüber St 37-3 ähnlich auf ϵ_E aus. Es ist zu vermuten, daß in beiden Fällen eine Erhöhung der Sättigungsreißspannung τ_{iE} eintritt. In Bild 72 ist beispielsweise für ein $\frac{\tau_a}{\tau_{va}}$ -Verhältnis von 0,3 dargestellt, wie sich die normierte Dehnungsamplitude $\Sigma \frac{\epsilon_K(\tau_a, N)}{\epsilon_0}$ aus der Superposition der Beiträge der einzelnen Kornfolgen, nämlich $\epsilon_K = f(\tau_a, N)$ mit den charakteristischen Werten ϵ_0 und ϵ_E , entsprechend den durch Gl. (38) bzw. (40) vorgegebenen Plastizierungszeitpunkten der einzelnen Kornfolgen in Abhängigkeit von $\frac{N}{N_1}$ ergibt. Aus der konstruierten Kurve 1 resultieren die Kurven 2 und 3 durch die Änderung des Ordinatenmaßstabes. Damit soll angedeutet werden, wie eine Verringerung der Spannungsdifferenzen ($\tau_a - \tau_{i0}$) bzw. ($\tau_a - \tau_{iE}$) bei gleichem $\frac{\tau_a}{\tau_{va}}$ -Verhältnis sich auf den Kurvenverlauf auswirken kann. Aus dem Vergleich der Kurven, die gut das Verhalten der Verformungswegamplitude für hohe Spannungsamplituden σ_a in den Bildern 67 ÷ 69 charakteri-

Bild 72
Darstellung der aus der Plastizierung der einzelnen Kornfolgen mit ihren Beiträgen $\epsilon_K(\tau_a, N)$ resultierenden normierten Dehnungs-Amplitudenerhöhung $\Sigma \epsilon_K(\tau_a, N)/\epsilon_0$ in Abhängigkeit der normierten Lastwechselzahl N/N_1 für ein τ_a/τ_{va} -Verhältnis von 0,3

Kurve 1: Ordinaten-Maßstab entspricht Ordinaten-Maßstab von $\epsilon_K(\tau_a, N)$
Kurve 2: " " " " 1/2 " " " "
Kurve 3: " " " " 1/4 " " " "



sieren, geht hervor, daß mit abnehmendem σ_a eine größer werdende Anzahl von Kornfolgen plastiziert werden muß, um jeweils gleich große Dehnungsamplituden zu erzielen. Daraus folgt gleichzeitig, daß die nach der Plastizierung aller Körner sich einstellende Dehnungsamplitude mit kleiner werdender Spannungsamplitude abnimmt, wie das die Versuchsergebnisse zeigen.

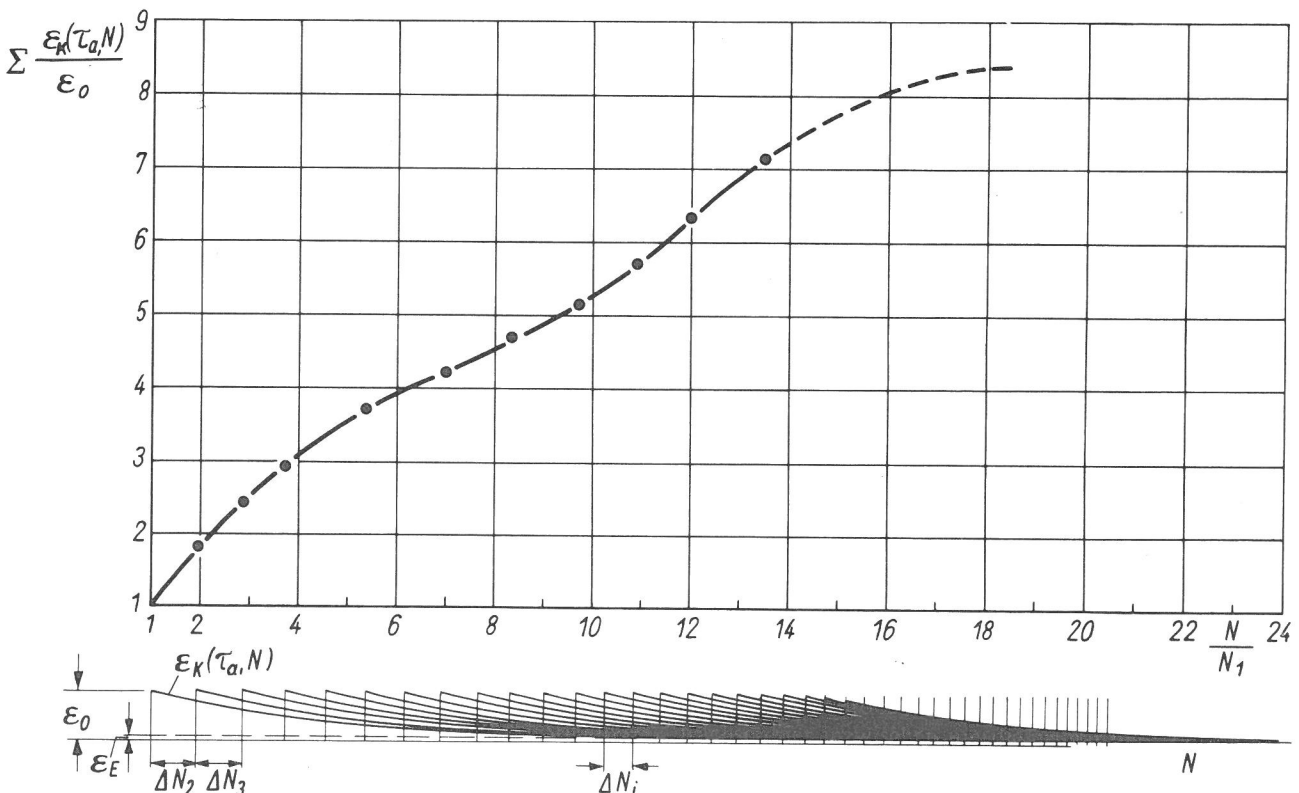
Der für die höchste Spannungsamplitude σ_a bei der 5. Serie von St 52-3 sich ergebende Verlauf der Verformungswegamplitude in Abhängigkeit von $\frac{N}{N_1}$ (vgl. Bild 70) weicht von dem der entsprechenden Kurven der anderen Serien deutlich ab (vgl. Bild 67 ÷ 69). Als Grund für das spezielle Verhalten kann das durch den großen Korndurchmesser von $d_K = 45 \mu\text{m}$ bedingte niedrige $\frac{\tau_a}{\tau_{va}}$ -Verhältnis von ungefähr 0,17 und der bei kleinem τ_a nur langsam vor sich gehende Verfestigungsprozeß angesehen werden, wie das aus dem der Versuchskurve ähnlichen Verlauf der für ein $\frac{\tau_a}{\tau_{va}}$ -Verhältnis von 0,2 und mit einer entsprechend allmählich auf einen kleinen ϵ_E -Wert abklingenden Funktion $\epsilon_K = f(\tau_a, N)$ konstruierten Kurve in Bild 73 ersichtlich ist. Das relativ rasche Anwachsen der Verformungswegamplitude bei kleinem $\frac{N}{N_1}$ ist demnach so zu verstehen, daß infolge des kleinen N_1 in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N die Plastizierung der Kornfolgen dicht aufeinander folgt, jedoch die in jeder plastizierten Kornfolge nur langsam mit der Lastwechselzahl fortschreitende Verfestigung sich bei einer kleinen Zahl plastizierter Kornfolgen noch wenig auswirkt. Da mit jeder neu plasti-

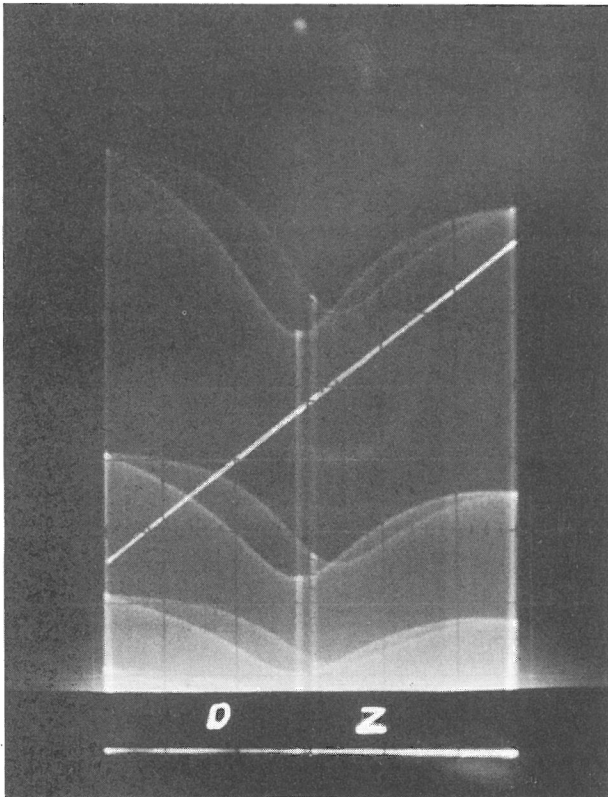
zierten Kornfolge die Zahl der gleichzeitig sich verfestigenden Körner ansteigt, die Plastizierungsgeschwindigkeit aufgrund des kleinen $\frac{\tau_a}{\tau_{va}}$ -Verhältnisses jedoch nur allmählich anwächst, nimmt die Geschwindigkeit der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung zunächst ab. Nachdem die Körner der ersten Kornfolge annähernd ihren Sättigungswert ϵ_E erreicht haben, kann die Geschwindigkeit der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung wieder entsprechend dem $\frac{\tau_a}{\tau_{va}}$ -Verhältnis ansteigen, wie das aus der Versuchskurve noch deutlich zu erkennen ist. Das kurz darauf erneute Abnehmen des Kurvenanstieges sollte in Übereinstimmung mit der Beobachtung bei anderen Versuchskurven (vgl. Bild 67 ÷ 69) auf den Abschluß des wesentlichen Plastizierungsprozesses hinweisen. Als Ursache kommt dafür das im fortgeschrittenen Stadium der Probenplastizierung einsetzende Zusammenwachsen der inzwischen um die primär plastizierten Körner herum entstandenen plastizierten Bezirke in Frage, wodurch die Anzahl der plastizierten Körner pro Kornfolge sich allmählich verringert und damit der Dehnungs-Amplitudenbeitrag einer Kornfolge dementsprechend abnehmen dürfte.

Im Hinblick auf die bisher hauptsächlich aus der Änderung der mechanischen Eigenschaften entwickelten Vorstellung über die Einleitung und den Ablauf des Plastizierungsprozesses während der Wechselbeanspruchung sollen abschließend noch die Ergebnisse der Ultraschall-Schwächungsmessung und der Koerzitivkraft-Bestimmung erörtert werden. Aus der Wechselwirkung zwischen mechanischen und magnetischen Vorgängen in ferromagnetischen Werkstoffen ergibt sich die Koppelung von mechanischer und magnetischer Dämpfung. Bei dem angewandten Impuls-Echo-Verfahren wird aufgrund der kleinen aufgebrauchten Dehnungsamplitude und der hohen Frequenz die Ultraschallabsorption im wesentlichen durch die zu gedämpften Schwingungen angelegten Versetzungsschleifen (Versetzungsdämpfung) und

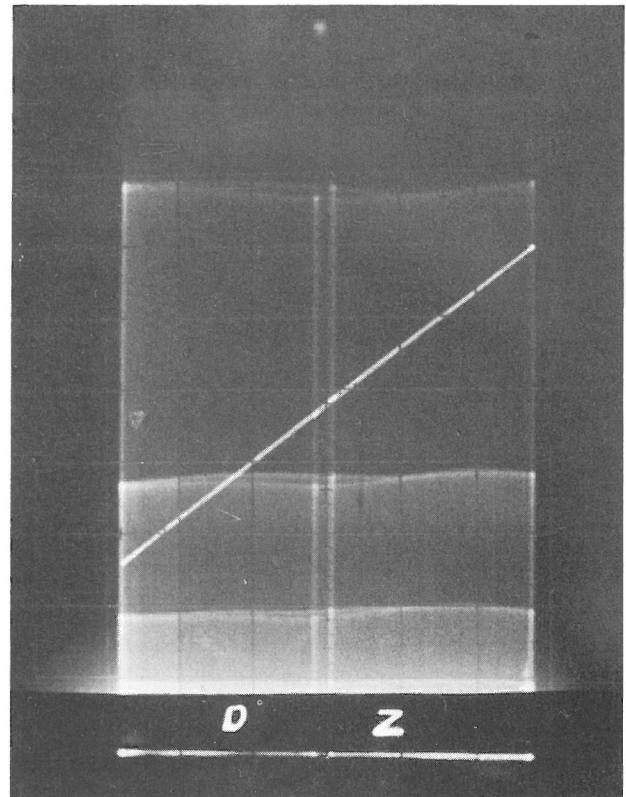
Bild 73

Darstellung der aus der Plastizierung der einzelnen Kornfolgen mit ihren Beiträgen $\epsilon_K(\tau_a, N)$ resultierenden normierten Dehnungs-Amplitudenerhöhung $\sum \frac{\epsilon_K(\tau_a, N)}{\epsilon_0}$ in Abhängigkeit der normierten Lastwechselzahl N/N_1 für ein τ_a/τ_{va} -Verhältnis von 0,2





a



b

Bild 74
Einfluß eines in Beanspruchungsrichtung angelegten Magnetfeldes auf die Ultraschall-Echohöhenänderung in Abhängigkeit des Verformungsweges (Z = Zug-Verformungsbereich, D = Druck-Verformungsbereich) innerhalb eines Belastungszyklus vor der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung

Beispiel: St 37-3, 2. Serie, $\sigma_a = 28,1 \text{ kp/mm}^2$ (Vers.-Nr. 159)
a ohne Magnetfeld b mit Magnetfeld

Blochwände (magnetomechanische Dämpfung) bestimmt. Nach der bereits erwähnten von Granato und Lücke entwickelten Theorie zur Versetzungsdämpfung [50, 51] ist der durch die Versetzungsschleifen zu erwartende Absorptionsanteil

$$\alpha_v \sim \rho l^4 \quad (43)$$

(ρ = Versetzungsdichte, l = mittlere Schleifenlänge), wenn die Durchschallungsfrequenz wesentlich unterhalb der Resonanzfrequenz bzw. der Frequenz für das entsprechende Dämpfungsmaximum liegt. Nach Berechnungen von Becker und Döring sowie von Mason (vgl. [98 ÷ 100]) sollte der hier in Frage kommende durch Mikrowirbelströme in den magnetischen Elementarbezirken entstehende, aus einem Relaxationsvorgang mit der Grenzfrequenz

$$f_o = \text{const.} \frac{R_E}{\chi_a d^2} \quad (44)$$

(R_E = spezifischer elektrischer Widerstand, χ_a = Anfangsuszeptibilität, d = Blochwandabstand) resultierende magnetomechanische Absorptionsanteil

$$\alpha_m \sim \frac{\chi_a}{f_o/f_S + f_S/f_o} \quad (45)$$

(f_S = Ultraschallfrequenz) sein, wobei je nachdem, ob Wandverschiebungen oder Drehprozesse beteiligt sind, für χ_a der entsprechende Wert einzusetzen ist.

Unter der genannten Voraussetzung wird die Versetzungsdämpfung vor dem Versuch nach Gl. (43), vor allem durch die Ausgangslänge der Versetzungsschleifen, das sind bei Stufenversetzungen die Schleifen $L_{c1}^0 \dots L_{c1}^0 \dots L_{cn}$ (vgl. Bild 59) und bei Schraubenversetzungen Schleifenlängen in der Größenordnung der Netzwerklänge L_N , sowie durch die Anfangsversetzungsdichte beeinflusst. Der im Ausgangszustand auftretende magnetomechanische Anteil der Dämpfung, der nach den Ergebnissen von Bratina und Mitarbeitern [101, 102] an Armco-Eisen und Stahl im Megahertzgebiet wesentlich die Anfangsdämpfung mitbestimmt (vgl. auch Bild 74 a mit Bild 74 b), hängt nach Gl. (44) und (45) von der Anfangsuszeptibilität, dem Blochwandabstand und der Durchschallungsfrequenz ab. Aus Bild 11 a ist der Echohöhenverlauf während des ersten Lastwechsels zu ersehen. Der mittlere Kurvenzug im Druckbereich (linke Bildseite) zeigt, daß beim Beginn des Versuches mit zunehmender elastischer Verformung die Echohöhe zunächst abfällt und dann bis zum Erreichen der Verformungsamplitude anwächst. Bei der darauffolgenden Entlastung wird die Echohöhe wieder kleiner (oberer Kurvenzug), durchläuft ebenfalls ein Minimum am Anfang des Zugbereiches und steigt dann wieder bis zu einem Maximalwert bei der höchsten Dehnung an. Während der Zugentlastung wiederholt sich der im Druckbereich beobachtete Vorgang, dabei unterschreitet die Echohöhe noch im Zugbereich die bei der Belastung erreichten Werte und strebt wieder ein Minimum im Druckbereich an. Die Kurven für die erste und zweite Druckbelastung decken sich nicht, das Echohöhenminimum verschiebt sich nach dem ersten Lastwechsel zu einem kleineren Verformungswert hin und ist stärker ausgeprägt als bei der ersten Belastung. Für den Zeitpunkt $t = 0$ ergibt sich dadurch nach dem ersten Zyklus eine geringere Echohöhe als vor dem Versuch. Der beschriebene Echohöhenverlauf entspricht qualitativ der von Bratina und Mitarbeitern festgestellten Dämpfungsänderung im Megahertzgebiet bei einer Zugbeanspruchung im elastischen Bereich an Stahl [102] und ver-

gleichbaren Be- und Entlastungsversuchen an Armco-Eisen [101]. Da durch das Anlegen eines Magnetfeldes in Beanspruchungsrichtung nicht nur die Ultraschallabsorption zurückgeht, sondern auch ihre Abhängigkeit von der elastischen Verformung weitgehend unterdrückt werden kann (vgl. Bild 74 a mit Bild 74 b), schreiben die genannten Autoren das Verhalten ohne Magnetfeld dem Einfluß von inneren Spannungen sowie der aufgetragenen Belastung auf die Beweglichkeit der Blochwände und auf die Bereichsstruktur zu. Die Ausbildung der Dämpfungsmaxima (Echohöhenminima) bei kleinen elastischen Verformungen sollte demnach auf die teilweise Kompensation der im Ausgangszustand vorhandenen inneren Spannungen durch die aufgetragene Belastung und das anschließende Abnehmen der Dämpfung auf die wieder zunehmende Bewegungsbehinderung der Blochwände infolge der mit wachsender äußerer Spannung vom Werkstoff angestrebten Neuordnung der Bereichsstruktur zurückgeführt werden. Diese Interpretation entspricht unter Berücksichtigung, daß die Anfangsuszeptibilität χ_a sich umgekehrt proportional zu der die Beweglichkeit der Blochwände beeinflussenden Spannung verhält [100], den Aussagen der Gl. (45) in Verbindung mit Gl. (44), wenn die Durchschallungsfrequenz kleiner als f_0 ist oder im Bereich um f_0 liegt. Von der gleichen Überlegung ausgehend, könnte die stärkere Ausprägung sowie die Verschiebung des Echohöhenminimums nach dem ersten Belastungszyklus zu einem kleineren Dehnungswert hin (vgl. Bild 11 a) mit dem Abbau von inneren Spannungen durch die Plastizierung einzelner Körner (primär plastizierte Körner) innerhalb des ersten Zyklus erklärt werden. Die in den primär plastizierten Körnern entstehenden neuen Versetzungen, die nach Gl. (43) einen Echohöhenabfall vor allem bei den Amplitudenwerten bewirken sollten, scheinen sich nicht merklich auf die Ultraschallabsorption auszuwirken, wie das aus den gleich großen Echohöhen beim Erreichen der ersten und zweiten maximalen Verformung im Druckbereich hervorgeht.

Nach dem ersten Lastwechsel ändert sich die Form und die Lage der Echohöhenhysterese bis zum Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung nicht mehr wesentlich. Geringe Schwankungen im Verlauf der einzelnen Kurvenzüge dürften durch den nicht immer ganz gleichmäßigen Ablauf hauptsächlich der Wandverschiebungen und unter Umständen von Drehprozessen sowie auf irreversible Vorgänge dieser Art vielleicht im Zusammenhang mit der Verfestigung in den bereits plastizierten Körnern hervorgerufen werden. Da bei hohen Spannungsamplituden die erforderliche Verlängerung der größten Schleifenlänge zur Aktivierung von Versetzungsquellen in den primär plastizierten Körnern benachbarten Körnern keine wesentliche Änderung des Mittelwertes der Schleifenlängen bewirkt und die Versetzungsdichte bis zum Anstieg der Verformungswegamplitude nicht merklich zunimmt, ist hier nach Gl. (43) kein Anwachsen der Versetzungsdämpfung zu erwarten. Aufgrund der mit kleiner werdender Spannungsamplitude zunehmenden erforderlichen Ausbruchslänge könnte die Versetzungsdämpfung bei niedrigen Spannungsamplituden nach höheren Lastwechselzahlen noch vor der merklichen Verformungsweg-Amplitudenerhöhung ansteigen. Aus den Versuchsergebnissen ergibt sich hierzu jedoch kein deutlicher Hinweis.

Der mit der merklichen Erhöhung der Verformungswegamplitude einsetzende Abfall der über einen Belastungszyklus gemittelten normierten Echohöhe (vgl. Bild 19 und 20) ist nach den bisherigen Ausführungen zum Plastizierungsverlauf auf das Anwachsen der Versetzungsdämpfung entsprechend

Gl. (43) durch die Erzeugung von Versetzungen bei der Plastizierung sich bisher elastisch verhaltender Körner und der damit verbundenen Entstehung neuer schwingfähiger Versetzungsschleifen zurückzuführen. Zu Beginn der Plastizierung der einzelnen Körner werden sich zunächst lange Versetzungsschleifen ausbilden können, die zu einer starken Erhöhung der Versetzungsdämpfung beitragen. Mit steigender Versetzungsdichte tritt jedoch infolge der gegenseitigen zunehmenden Bewegungsbehinderung der Versetzungen durch die Entwicklung einer ausgeprägten Versetzungsstruktur (vgl. unter 1.1 und 4.1.5) eine allmähliche Verkürzung der neuen Versetzungsschleifen ein. Dadurch kann der Beitrag eines plastizierten Kornes zur Versetzungsdämpfung im Laufe seiner Verfestigung wieder zurückgehen, indem auch bei weiterer wachsender Versetzungsdichte das Produkt aus Versetzungsdichte und vierter Potenz der mittleren Schleifenlänge kleiner wird. Makroskopisch betrachtet läßt sich mit dieser Vorstellung das Auftreten eines Echohöhenminimums deuten, wie es aus den Bildern 19 und 20 und noch besser vergleichbar aus den Bildern 75 und 76 bei mittleren Spannungsamplituden zu ersehen ist. Während die rasche Zunahme der Anzahl der plastizierten Körner bei der wesentlichen Verformungsweg-Amplitudenerhöhung das allmähliche Abnehmen der Versetzungsdämpfung in den bereits plastizierten Körnern noch überdeckt wird, verringert sich der Zuwachs der Dämpfung deutlich nach dem wesentlichen Anstieg der Verformungswegamplitude (vgl. Bild 77), also nachdem der überwiegende Teil aller Körner sich nunmehr plastisch verformt. Die weitere Verringerung der mittleren Schleifenlänge in den plastizierten Körnern führt schließlich verbunden mit dem Abschluß des Plastizierungsprozesses zur Ausbildung des Echohöhenminimums. Bei St 37-3 (vgl. Bild 75) wächst der Echohöhenabfall bis zum Minimum mit der Spannungsamplitude. Als Ursache dafür ist die relativ langsam vor sich gehende Ausbildung einer ausgeprägten Versetzungsstruktur (Schleifenverkürzung) anzusehen, so daß die mit der Spannungsamplitude in den plastizierten Körnern steigende Versetzungsdichte die Lage des Echohöhenminimums bestimmt. Aus der Verringerung des Echohöhenabfalles mit zunehmender Spannungsamplitude bei St 52-3 (vgl. Bild 76) wäre demnach zu folgern, daß hier die Schleifenverkürzung bei der Entwicklung der Versetzungsstruktur in Abhängigkeit der Spannungsamplitude den Einfluß der mit der Spannungsamplitude wachsenden Versetzungsdichte überdeckt. Die bei diesem Stahl festgestellte rasche Entstehung einer ausgeprägten Versetzungsstruktur während des wesentlichen Anstieges der Verformungsstruktur (vgl. unter 4.1.5) unterstützt diese Deutung. Bei den höchsten gefahrenen Spannungsamplituden mit St 37-3 (Vers.-Nr. 104 und 108) und St 52-3 (Vers.-Nr. 115) fällt die Echohöhe zunächst ebenfalls mit dem Anstieg der Verformungswegamplitude steil ab. Wie die Darstellung in den Bildern 75 und 76 zeigt, schließt sich dem Steilabfall der Echohöhen gleichzeitig mit dem Abschluß der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung ein flacher verlaufender Teil der Echohöhenkurve an, wobei die aus den Bildern 19 und 20 durch die Verzerrung infolge der logarithmischen Auftragung von N deutlich erkennbaren Echohöhenminima hier für den wesentlichen Kurvenverlauf nicht von Bedeutung zu sein scheinen. Es läßt sich deshalb auch nicht beurteilen, ob diese Minima auf die bereits genannten, die Versetzungsdämpfung bestimmenden Vorgänge zurückzuführen sind oder den Einfluß einer Änderung der magnetomechanischen Dämpfung andeuten. Das stetige Abnehmen der Echohöhe über den Zeitpunkt des Verformungsweg-Amplitudenanstieges hinaus kann mit dem weiteren Anwachsen der Ver-

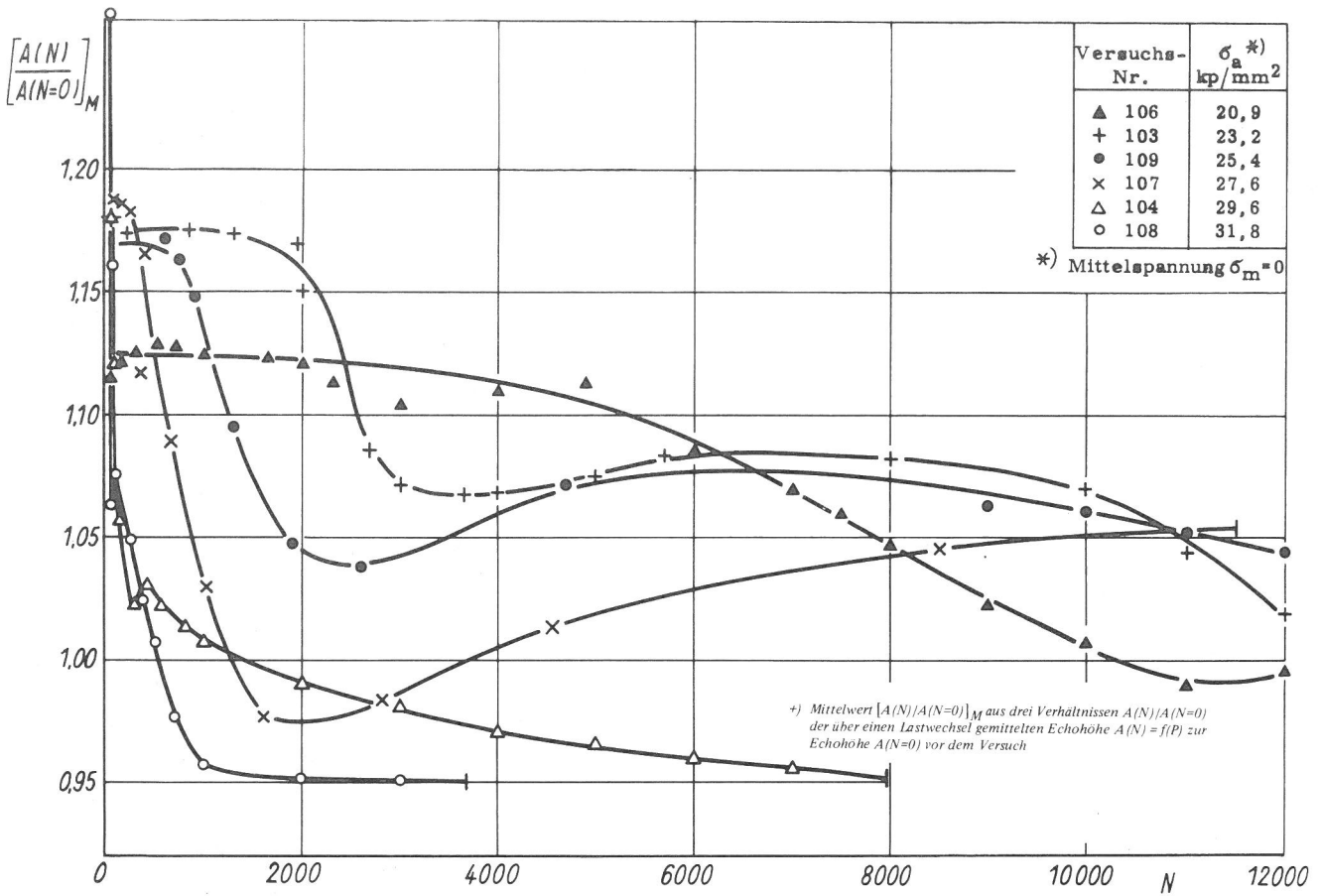
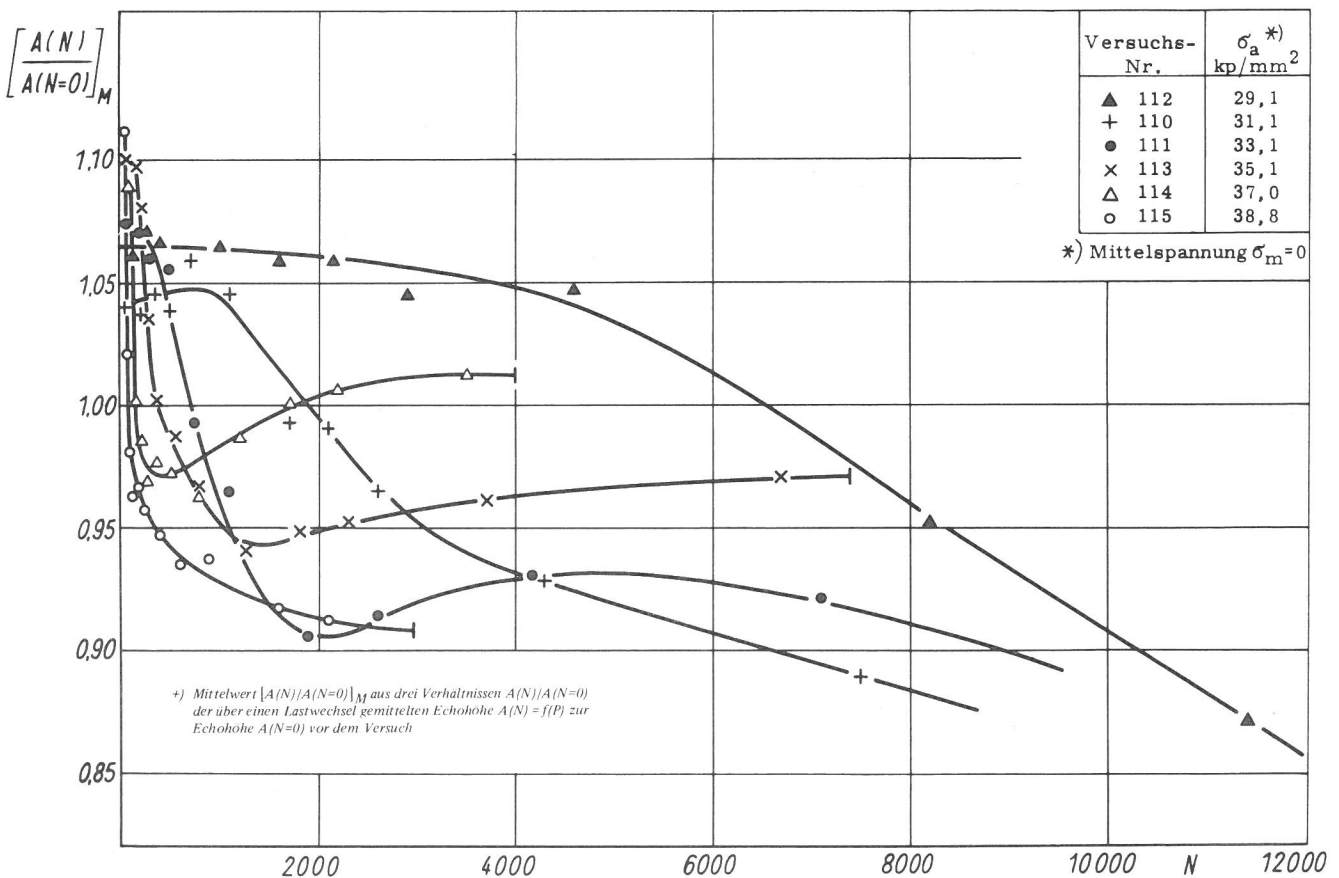


Bild 75
 Normierte Echohöhe $^+ [A(N)/A(N=0)]_M$ der Ultraschallimpulse bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N
 St 37-3 Serie 1 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 16 \mu\text{m}$
 Ultraschallfrequenz 5 MHz

Bild 76
 Normierte Echohöhe $^+ [A(N)/A(N=0)]_M$ der Ultraschallimpulse bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N
 St 37-3 Serie 1 mittlerer Korndurchmesser $d_K = 13 \mu\text{m}$
 Ultraschallfrequenz 5 MHz



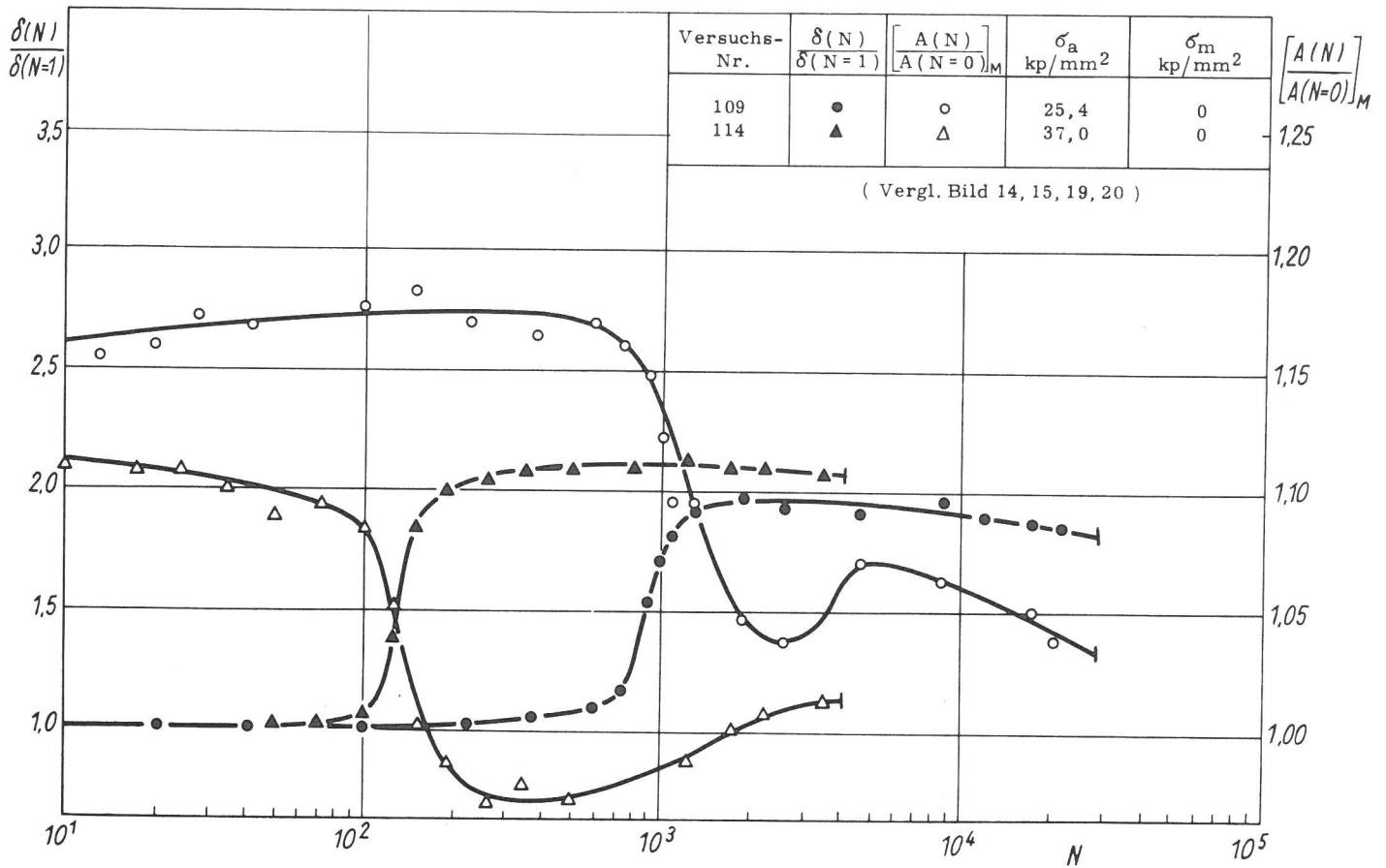


Bild 77

Beispielsweise Gegenüberstellung der normierten Verformungswegamplitude $\delta(N)/\delta(N=1)$ und der normierten Echohöhe $[A(N)/A(N=0)]_M$ bei konstanter Kraftamplitude P_a in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N für St 37-3 (Vers.-Nr. 109) und St 52-3 (Vers.-Nr. 114)

setzungsdichte erklärt werden. Dafür spricht auch das festgestellte Ansteigen der Koerzitivkraft bis zum Bruch (vgl. Bild 22) als Folge der zunehmenden Versetzungsdichte [80, 81]. Daneben ist in diesem Bereich ein zusätzlicher Echohöhenverlust mit der Ribbildung zu erwarten. Beide Ursachen für den Dämpfungsanstieg bis zum Eintreten des Bruches ergeben mit den bisherigen Überlegungen zusammen auch ein verständliches Bild zur Ausbildung eines dem besprochenen Echohöhenminimum folgenden Maximums nach höheren Lastwechselzahlen bei den Versuchen Nr. 103 und 109 in Bild 75 sowie Nr. 111 in Bild 76. Aus dem nahezu linearen Abfall der Echohöhe mit der Lastwechselzahl über einen großen Bereich während und nach dem Verformungsweg-Amplitudenanstieg bei den niedrigsten gefahrenen Spannungsamplituden geht hervor, daß hier der Echohöhenverlust aufgrund der steigenden Versetzungsdichte über den entgegengesetzt wirkenden Einfluß der erwähnten Schleifenverkürzung dominiert. Beim Vergleich des Gesamt-Echohöhenverlustes fällt auf, daß bei niedrigen Spannungsamplituden etwa gleich hohe Werte wie bei den höchsten Spannungsamplituden auftreten. Daraus könnte geschlossen werden, wenn die bis zum Versuchsabschluß sich einstellende Versetzungsdichte mit kleiner werdender Spannungsamplitude zurückgeht, wie das z. B. der Vergleich des Koerzitiv-

ktivkraft-Verhaltens für zwei Spannungsamplituden in Bild 22 zeigt, daß die mittlere sich einstellende Versetzungsschleifenlänge mit abnehmender Spannungsamplitude zunimmt.

Durch das Ansteigen der Versetzungsdichte wird die Blochwandbeweglichkeit herabgesetzt, verringert sich also die Anfangssuszeptibilität χ_a und damit nach Gl. (44) und (45) der magnetomechanische Anteil der Dämpfung, wenn die Durchschallungsfrequenz f_g kleiner als die Relaxationsfrequenz f_0 ist. Da es bei der gegebenen Versuchsanordnung nicht möglich war, die Probe während des Versuches magnetisch zu sättigen, konnte der magnetomechanische Dämpfungsanteil nicht ermittelt werden. Ein Hinweis für die Abnahme der magnetomechanischen Dämpfung während des Verformungsweg-Amplitudenanstieges ergibt sich jedoch aus dem kleiner werdenden Unterschied zwischen den maximalen und minimalen Echohöhen innerhalb eines Lastwechsels (vgl. die Bilder 11 a ÷ c), der, wie der Vergleich der Bilder 74 a und 74 b zeigt, auch durch ein angelegtes Magnetfeld weitgehend unterdrückt werden kann. Weiterhin wurde beobachtet, daß die gesamte Verringerung dieses Unterschiedes während des Versuches um so größer wird, je höher die aufgebrauchte Spannungsamplitude ist. Beide Ergebnisse entsprechen dem zu erwartenden Verhalten nach Gl. (45) in Verbindung mit Gl. (44), wenn in erster Näherung angenommen wird, daß $1/\chi_a$ in Abhängigkeit von N und mit σ_a als Parameter sich ähnlich ändert wie H_c (vgl. Bild 22). Mit der Ausbildung einer ausgeprägten Versetzungsstruktur ist eine zusätzliche Beeinflussung des magnetomechanischen Dämpfungsanteiles durch die Verminderung des Blochwandabstandes vorstellbar.

6. Zusammenfassung

Die bisher hauptsächlich an kubisch-flächenzentrierten Metallen sowohl an Einkristallen als auch mit vielkristallinen Proben durchgeführten Arbeiten zeigen, daß dem Eintreten des Dauerbruches eine Änderung der mechanischen Eigenschaften vorausgeht. Der Ausgangszustand des Werkstoffes, die Versuchstemperatur und die Beanspruchungsamplitude (Spannungs- oder Dehnungsamplitude) sind dafür maßgebend, ob eine Verfestigung oder eine Entfestigung des Materials eintritt. Bei den kubisch-raumzentrierten Metallen werden charakteristische, von den kubisch-flächenzentrierten Metallen abweichende mechanische Eigenschaften während der Wechselbeanspruchung beobachtet. Aus den bisher bekannten Ergebnissen wird in Analogie zum Verhalten bei einsinniger Belastung gefolgert, daß die anfängliche Verankerung von Versetzungen durch geringe Mengen von Verunreinigungen und Legierungselementen auch für die mechanischen Eigenschaften während der Wechselbeanspruchung von Bedeutung sind.

Aus der Analyse der bisherigen Ergebnisse geht hervor, daß der in normalisierten Baustählen bei Spannungsamplituden unterhalb der ausgeprägten Streckgrenze auftretende, auch als Entfestigung bezeichnete Plastizierungsprozeß und die damit verbundenen Folgen als Voraussetzung für das Werkstoffversagen anzusehen sind und deshalb das Verständnis dieses Phänomens für die Beurteilung der Wechselfestigkeit solcher Stähle wesentlich ist. Daraus ergab sich das Ziel der Arbeit, durch die Fortführung der bisherigen Untersuchungen zu einer weiteren Klärung des Plastizierungsprozesses und der daran beteiligten Vorgänge beizutragen.

An normalisierten Proben von St 37-3 und St 52-3 (DIN 17 100) wurde zunächst die Änderung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens über die Änderung der Verformungswegamplitude und des Kraft-Verformungsweg-Verlaufes (mechanische Hysteresisschleife) in Abhängigkeit der Lastwechselzahl für Spannungsamplituden im Bereich von dicht unterhalb der oberen Streckgrenze bis in die Nähe der Wechselfestigkeit bei einer Lastwechselfrequenz von ungefähr 0,1 Hz ermittelt. Es zeigte sich, daß mit wachsender Spannungsamplitude die für eine merkliche Verformungsweg-Amplitudenerhöhung sich ergebende Lastwechselzahl kleiner wird, der Zuwachs der Verformungswegamplitude pro Lastwechsel sich vergrößert und die maximal auftretende Verformungswegamplitude ansteigt. Die Erhöhung der Verformungswegamplitude setzt nach dem Ablauf von einigen Prozent der Lebensdauer ein und ist nach 5 ÷ 10 % der Bruch-Lastwechselzahl beendet. Das Maximum der Verformungswegamplitude ist um so deutlicher ausgeprägt, je höher die Spannungsamplitude gewählt wird, der Abfall der Verformungswegamplitude als Folge der Verfestigung hält bis zum Bruch an. Auch unterhalb der technischen Wechselfestigkeit ist

noch eine Verformungsweg-Amplitudenerhöhung zu erwarten. Die aus der mechanischen Hysteresisschleife ermittelte Dämpfungsarbeit ändert sich gleichsinnig mit der Verformungswegamplitude.

Die an den gleichen Proben untersuchte Ultraschallschwächung nach dem Impuls-Echo-Verfahren zeigt, daß innerhalb eines Lastwechsels eine Echohöhenhysterese auftritt, die auf die Änderung des magnetomechanischen Anteiles der Dämpfung als Funktion der augenblicklich aufgebrachten Spannung zurückzuführen ist. Ein starker Abfall der über einen Lastwechsel gemittelten Echohöhe setzt gleichzeitig mit der wesentlichen Erhöhung der Verformungswegamplitude ein. Zusätzlich vorgenommene Koerzitivkraftmessungen ergaben, daß die Koerzitivkraft parallel zur Verformungswegamplitude zunimmt.

Aus der Zuordnung des sukzessiven Abbaues der ausgeprägten Streckgrenze zum Verlauf der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung bei einer mittleren Spannungsamplitude geht hervor, daß schon nach einem Anstieg der Verformungswegamplitude um etwa 20 % eine deutliche Erniedrigung der oberen und unteren Streckgrenze feststellbar ist und noch vor dem Abschluß der wesentlichen Verformungsweg-Amplitudenerhöhung keine ausgeprägte Streckgrenze mehr auftritt. Elektronenmikroskopische Durchstrahlungsuntersuchungen zeigen dazu ergänzend, daß während der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung die Anzahl der Körner mit einer hohen Dichte neu entstandener Versetzungen zunächst zögernd und dann rasch anwächst, wobei in den bereits plastizierten Körnern sich zuerst mattenförmige und dann zellenförmige Versetzungsanordnungen entwickeln.

Die Untersuchung des Korngrößeneinflusses an St 52-3 für vier durch verschiedene Wärmebehandlungen erzielte Korn-durchmesser ergab, daß die Spannungsamplitude für das Einsetzen einer merklichen Verformungsweg-Amplitudenerhöhung nach jeweils der gleichen Lastwechselzahl mit wachsender Korngröße abnimmt. Der Verlauf der nach dem Abschluß des wesentlichen Plastizierungsprozesses sich einstellenden Verformungswegamplitude in Abhängigkeit der Spannungsamplitude wird offenbar durch die Abkühlungsbedingungen nach dem Glühen bestimmt. Gleiche Verformungswegamplituden werden nach Ofenabkühlung mit wesentlich kleinerer Spannungsamplitude erreicht als nach Luftabkühlung. Dementsprechend ist auch die Grenz-Spannungsamplitude für das Auftreten einer Verformungsweg-Amplitudenerhöhung nach Ofenabkühlung niedriger als nach Luftabkühlung. Mikro-Verformungsmessungen in Abhängigkeit der Spannungsamplitude zeigten, daß die Grenz-Spannungsamplitude, bei der ein plastischer Anteil der Dehnungsamplitude sich feststellen läßt, nicht der Korngröße zugeordnet ist

und weit unterhalb der Grenz-Spannungsamplitude für das Ansteigen der Verformungswegamplitude liegt. Mit wachsender Spannungsamplitude erhöht sich der mikroplastische Anteil der Dehnungsamplitude nach einer parabelförmig gekrümmten Kurve, deren Steilheit mit größer werdendem Korndurchmesser zunimmt.

Bei der Besprechung der Versuchsergebnisse wurde in Analogie zum Mikro-Verformungsverhalten unter einsinniger Belastung davon ausgegangen, daß oberhalb der Grenz-Spannungsamplitude für das Auftreten eines feststellbaren mikroplastischen Anteiles der Dehnungsamplitude bereits im ersten Lastwechsel infolge örtlicher Spannungskonzentrationen vereinzelt Körner sich plastisch verformen. Diese sogenannten primär plastizierten Körner können beispielsweise über Versetzungsaufstauungen in ihnen sich noch elastisch verhaltenden Nachbarkörnern hohe, der Korngröße zugeordnete Spannungen induzieren, wodurch diese Körner für eine Plastizierung besonders begünstigt werden. Unter Berücksichtigung der in den primär plastizierten Körnern stattfindenden Verfestigung läßt sich mit dieser Vorstellung der beobachtete Korngrößeneinfluß auf den Beginn der Verformungsweg-Amplitudenerhöhung erklären.

Die spannungsinduzierte Diffusion längs der Versetzungslinie wurde als eine Möglichkeit erörtert, durch Teilchen

verankerte Versetzungen auch bei äußeren Spannungsamplituden, die weit unterhalb der ursprünglichen Streckgrenze liegen, zu Versetzungsquellen zu aktivieren und damit den Einfluß der Spannungsamplitude, der Korngröße und der in den plastizierten Körnern bei der Verfestigung stattfindenden Reibspannungserhöhung auf den Plastizierungsprozeß zu beschreiben. Es zeigte sich dabei, daß das Verhältnis aus der Spannungsamplitude, die in den sich elastisch verhaltenden Nachbarkörnern der bereits plastizierten Körner zu erwarten ist, und der Spannungsamplitude, die in allen anderen sich elastisch verhaltenden Körnern auftritt, den Verlauf des Plastizierungsvorganges bestimmt. Die Höhe der Grenz-Spannungsamplitude für das Eintreten einer merklichen Verformungsweg-Amplitudenerhöhung ergibt sich aus der Situation, daß infolge der Reibspannungserhöhung in den primär plastizierten Körnern die in den sich elastisch verhaltenden Nachbarkörnern wirksame Spannung nicht mehr ausreicht, die spannungsinduzierte Diffusion bis zur Aktivierung von Versetzungsquellen aufrechtzuerhalten. Die nach dem aufgestellten Berechnungsmodell über ein Zahlenbeispiel für die Bewegung der Teilchenatome ermittelte Diffusionskonstante entspricht ziemlich genau dem Wert für die Diffusion des Kohlenstoffes im Ferrit; es blieb dabei die Frage offen, ob dieser Wert der Diffusion im Versetzungsschlauch oder der Diffusion von der Matrix in dem Versetzungsschlauch zuzuordnen ist.

7. Schrifttum

- [1] Macherauch, E.:
Härtereitechn. Mitt. 22 (1967), S. 103/115
- [2] Fisher, J. C., W. G. Johnston, R. Thomson u. T. Vreeland:
Dislocations and Mechanical Properties of Crystals.
New York, John Wiley & Sons, Inc., 1957
- [3] Rassweiler, G. M. u. W. L. Grube:
Internal Stresses and Fatigue in Metals.
Amsterdam, London, New York, Princeton, Elsevier
Publishing Company, 1959
- [4] Kennedy, A. J.:
Process of Creep and Fatigue in Metals.
Edinburgh, London, OLIVER and BOYD, 1962
- [5] Wadworth, N. J.:
Act. Met. 11 (1963), S. 663/684
- [6] Hartmann, R. J. u. E. Macherauch:
Z. Metallkde. 54 (1963) S. 161/172 u. S. 197/205
- [7] Clark, J. B. u. A. J. McEvily:
Act. Met. 12 (1964), S. 1359/1371
- [8] Hartmann, R. J.:
Z. Metallkde. 55 (1964), S. 221/230
- [9] Hartmann, R. J.:
J. Appl. Phys. 36 (1965), S. 127/137
- [10] Raymond, M. H. u. L. V. Coffin:
Act. Met. 11 (1963), S. 801/807
- [11] Oldroyd, P. W. J., D. J. Burns u. P. P. Benham:
Proc. Instn. Mech. Engrs. 180 Pt 3 I (1965–1966),
S. 392/402
- [12] Kettunen, P. O.:
Act. Met. 15 (1967), S. 1275/1286
- [13] Feltner, C. E. u. C. Laird:
Act. Met. 15 (1967), S. 1621/1632
- [14] Nine, H. D. u. D. Kuhlmann-Wilsdorf:
Can. J. Phys. 45 (1967), S. 865/881
- [15] Lukas, P. u. M. Klesnil:
phys. stat. sol. 21 (1967), S. 717/731
- [16] Snowden, K. U.:
Act. Met. 11 (1963), S. 675/684
- [17] Pratt, J. E.:
J. Mat. 1 (1966), S. 77/88
- [18] Pratt, J. E.:
Act. Met. 15 (1967), S. 319/327
- [19] Grosskreutz, J. C. u. P. Waldow:
Act. Met. 11 (1963), S. 717/724
- [20] Feltner, C. E. u. C. Laird:
Act. Met. 15 (1967), S. 1621/1653
- [21] Feltner, C. E.:
Phil. Mag. 14 (1966), S. 1219/1231
- [22] Kettunen, P. O.:
Phil. Mag. 16 (1967), S. 253/259
- [23] Avery, D. H. u. W. A. Backofen:
Act. Met. 11 (1963), S. 653/661
- [24] Feltner, C. E.:
Phil. Mag. 12 (1965), S. 1229/1248
- [25] Gilman, J. J.:
J. Appl. Phys. 33 (1962), S. 2703/2709
- [26] Cottrell, A. H.:
Dislocations and Plastic Flow.
Oxford, Clarendon Press 1953, S. 111 u. ff.
- [27] Cottrell, A. H.:
Mechanical Properties of Matter.
New York, London, Sidney, J. Wiley & Sons, 1964
- [28] Lukas, P. u. M. Klesnil:
Czech. J. Phys. B 14 (1964), S. 600/607
- [29] Lukas, P., M. Klesnil u. P. Rys:
Z. Metallkde. 56 (1965), S. 109/113
- [30] McGrath, J. T. u. W. J. Bratina:
Phil. Mag. 11 (1965), S. 429/431
- [31] Wei, R. P. u. A. J. Baker:
Phil. Mag. 12 (1965), S. 1005/1020
- [32] Wei, R. P. u. A. J. Baker:
Phil. Mag. 12 (1965), S. 1087/1091
- [33] Lukas, P. u. M. Klesnil:
Kovove Materialy IV (1966), S. 366/375
- [34] Lipsitt, H. A. u. G. T. Horne:
Proc. ASTM 57 (1957), S. 587/599
- [35] Hempel, M. R.:
ASTM Spec. Tech. Rep. 237, S. 52/81
- [36] Enrietto, J. F., G. M. Sinclair u. C. A. Wert:
Columbium Metallurgy. Herausgeber: D. L. Douglas
u. F. W. Kunz, New York, Interscience Publisher
1961, S. 503/537
- [37] Klesnil, M. u. M. Holzmann:
Kovove Materialy II (1964), S. 80/98

- [38] Oates, G. u. D. V. Wilson:
Act. Met. 12 (1964), S. 21/33
- [39] Klesnil, M., M. Holzmann, P. Lukas u. P. Rys:
J. I. S. I. 203 (1965), S. 47/53
- [40] Lazan, B. J. u. T. Wu:
Proc. ASTM 51 (1951), S. 649/678
- [41] Vitovec, F. H. u. B. J. Lazan:
Proc. ASTM 55 (1955), S. 844/862
- [42] Kirschling, G.:
Diss. TU Berlin, 1965
- [43] Klesnil, M. u. P. Lukas:
J. I. S. I. 205 (1967), S. 746/749
- [44] McGrath, J. T. u. W. J. Bratina:
Phil. Mag. 12 (1965), S. 1293/1305
- [45] Sinclair, G. M. u. W. J. Craig:
Trans. A. S. M. 44 (1952), S. 929/948
- [46] Hempel, M. u. E. Hillnhagen:
Arch. Eisenhüttenwes. 39 (1968), S. 283/298
- [47] Hempel, M.:
Arch. Eisenhüttenwes. 38 (1967), S. 446/455
- [48] Schenck, H., E. Schmidtman u. H. Kettler:
Arch. Eisenhüttenwes. 31 (1960), S. 659/669
- [49] Emrich, P.:
Diss. TH Aachen, 1967
- [50] Granato, A. u. K. Lücke:
J. Appl. Phys. 27 (1956), S. 583/593 u. S. 789/805
- [51] Rogers, D. H.:
J. Appl. Phys. 33 (1962), S. 781/791
- [52] Hall, E. O.:
Proc. Phys. Soc. B 64 (1951), S. 742/747
- [53] Petch, N. J.:
J. I. S. I. 174 (1953), S. 25/28
- [54] Cottrell, A. H.:
Trans. AIME 212 (1958), S. 192/202
- [55] Kochendörfer, A.:
Stahl u. Eisen, Sonderberichte H. 5 (1963, 1966)
- [56] Conrad, H.:
Nat. Phys. Lab. Symp. No 15, Vol. II,
Teddington 1963, S. 475/516
- [57] Cottrell, A. H.:
Nat. Phys. Lab. Symp. No 15, Vol. II,
Teddington 1963, S. 456/473
- [58] Li, J. C. M.:
Trans. AIME 227 (1963), S. 239/247
- [59] Macherauch, E.:
Z. Metallkde. 55 (1964), S. 60/82
- [60] Wegner, U., A. Franke u. D. Steinbach:
Arch. Eisenhüttenwes. 39 (1968), S. 463/467
- [61] Suits, J. C. u. B. Chalmers:
Act. Met. 9 (1961), S. 854/860
- [62] Brown, N. u. R. A. Ekvall:
Act. Met. 10 (1962), S. 1101/1107
- [63] Worthington, P. J. u. E. Smith:
Act. Met. 12 (1964), S. 1277/1281
- [64] Carrington, W. E. u. D. McLean:
Act. Met. 13 (1965), S. 493/499
- [65] Eshelby, J. D., F. C. Frank u. F. R. N. Nabarro:
Phil. Mag. 42 (1951), S. 351/364
- [66] Stroh, A. N.:
Proc. Roy. Soc. 223 (1954), S. 404/414
- [67] Stroh, A. N.:
Proc. Roy. Soc. 232 (1955), S. 548/560
- [68] Stroh, A. N.:
Phil. Mag. 6 (1957), S. 418/465
- [69] Gleiter, H.:
Act. Met. 16 (1968), S. 455/464
- [70] Gleiter, H.:
Act. Met. 16 (1968), S. 857/862
- [71] McGrath, J. T. u. W. J. Bratina:
Act. Met. 15 (1967), S. 329/339
- [72] Alefeld, G.:
Phys. Rev. Let. 13 (1964), S. 395/397
- [73] Alefeld, G.:
Phil. Mag. 11 (1965), S. 809/826
- [74] Yamafuji, K. u. Ch. L. Bauer:
J. Appl. Phys. 36 (1965), S. 3288/3294
- [75] Bauer, Ch. L.:
Phil. Mag. 11 (1965), S. 827/840
- [76] Oren, E. C. u. Ch. L. Bauer:
Act. Met. 15 (1967), S. 773/784
- [77] Bode, E.:
Phil. Mag. 13 (1966), S. 493/502
- [78] Bode, E.:
Phil. Mag. 13 (1966), S. 275/287
- [79] Bode, E.:
Phil. Mag. 18 (1968), S. 1247/1258
- [80] Träuble, H. u. A. Seeger:
Z. angew. Phys. 21 (1966), S. 299/322
- [81] Bilger, H.:
phys. stat. sol. 18 (1966), S. 207/219
- [82] White, D. D., C. H. Johnson u. S. Leber:
Prakt. Metallogr. 6 (1960), S. 48/52
- [83] Aurich, D.:
Diss. TU Berlin, 1967
- [84] Kochendörfer, A. u. W. Kayser:
Arch. Eisenhüttenwes. 39 (1968), S. 243/248
- [85] Stein, D. F. u. J. R. Low, Jr.:
J. Appl. Phys. 31 (1960), S. 362/372

- [86] Brown, N. u. K. F. Lukens, Jr.:
Act. Met. 9 (1961), S. 106/111
- [87] Scheil, E.:
Z. anorg. u. allg. Chemie 201 (1931), S. 259/264
- [88] Scheil, E.:
Z. Metallkde. 27 (1935), S. 199/209
- [89] Lütjering, G. u. E. Hornbogen:
Z. Metallkde. 59 (1968), S. 29/46
- [90] Haasen, P.:
Reinststoffprobleme III, Berlin, Akademie-Verlag
1967, S. 387/402
- [91] Lücke, K., A. V. Granato u. L. J. Teutonico:
J. Appl. Phys. 39 (1968), S. 5181/5191
- [92] Fisher, R. M.:
Diss. Univ. Cambridge, 1962
- [93] Behrens, H.:
Diss. TH Aachen, 1965
- [94] Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen
aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Tech-
nik.
Herausgeber: H. Borchers u. E. Schmidt, Berlin,
Göttingen, Heidelberg, Springer-Verlag 1963, IV. Bd.,
2. Teil, Bandteil a, S. 156
- [95] Friedel, J.:
Dislocations. Oxford, London, Edinburgh, New
York, Paris, Frankfurt, Pergamon Press 1964, S. 290
u. ff.
- [96] Girifalco, L. A. u. D. O. Welch:
Point Defects and Diffusion in Strained Metals.
New York, London, Paris, Gordon and Breach,
Science Publishers, Inc., 1967
- [97] Girifalco, L. A. u. H. H. Grimes:
Phys. Rev. 121 (1961), S. 982/991
- [98] Franz, H.:
Z. Metallkde. 53 (1962), S. 27/37
- [99] Bratina, W. J.:
Physical Acoustics, Vol. III – Part A, New York,
London, Academic Press 1966, S. 223 u. ff.
- [100] Kneller, E.:
Ferromagnetismus.
Berlin, Göttingen, Heidelberg, Springer-Verlag 1962
- [101] Bratina, W. J.:
Can. J. Phys. 37 (1959), S. 579/590
- [102] Bratina, W. J., U. M. Martius u. D. Mills:
J. Appl. Phys. 31 (1960), S. 241 S/242 S