

Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das mechanische Verhalten von unlegiertem Baustahl – Teil 1

Die unerwartet schweren Schäden der Erdbeben von Northridge 1994 und Kobe 1995 an entsprechend bemessenen Stahlkonstruktionen haben in Erinnerung gerufen, daß mit einem signifikanten Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das mechanische Materialverhalten von unlegiertem Baustahl gerechnet werden muß.

Mangels entsprechender Grundlagen für erdbebentypische Beanspruchungen wurde im Rahmen eines DFG-Forschungsvorhabens die Geschwindigkeitssensitivität des mechanischen Verhaltens von handelsüblichem Baustahl S 355 umfangreich experimentell untersucht. Wesentliche Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

Chargenunabhängig besteht bei unlegierten Baustählen sowohl bei einmaliger als auch bei wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich in diesem eine signifikante Abhängigkeit des Spannungs-Verzerrungs-Verhaltens von der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Zugleich kann das Auftreten von Relaxations- und Kriechphänomenen bei Raumtemperatur auf den Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit zurückgeführt werden.

Für den Einsatz im Rahmen von FEM-Berechnungen wird auf der Grundlage einer langjährig durch die DFG geförderten Forschungstätigkeit (SFB 319) ein Modell zur konsistenten Beschreibung des komplexen Materialverhaltens unlegierter Baustähle vorgestellt. Vergleichsrechnungen einiger experimenteller Untersuchungen mit dem exemplarisch in ANSYS® implementierten Materialmodell veranschaulichen die Beschreibungsmöglichkeiten der vorgeschlagenen Modellformulierung.

Rate-dependency of structural mild steel. *The unexpected severe damages which earthquake-engineered steel structures suffered from the earthquakes of Northridge 1994 and Kobe 1995 remind of structural mild steel's rate-dependency.*

Due to lack of relevant knowledge for earthquake-loading the rate-dependency of mild steel was investigated within a DFG-financed research. Major results are presented below.

Both for monotonic and repeated inelastic loading structural mild steel shows significant dependency of stress-strain-relation from loading speed. Relaxation and creep phenomena at room temperature result from the materials rate-dependency.

For use in FEA a constitutive model is presented, which is based on long-time DFG-financed research and can describe the complex material behavior of structural mild steel in total.

1 Einleitung

Im Bauwesen werden Einflüsse aus der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das mechanische Verhalten von Baustahl üblicherweise vernachlässigt, sofern nicht wie beispielsweise bei Explosions- oder Anprallbeanspruchung sehr hohe Beanspruchungsgeschwindigkeiten auftreten. Die auf *v. Mises* [1] zurückgehende Idealisierung eines zeit- bzw. geschwindigkeitsunabhängigen Fließbeginns ist weit verbreitet und liegt auch den meisten im Bauwesen verwendeten Berechnungsprogrammen mit nichtlinearen Werkstoffmodellen zugrunde.

In jüngerer Vergangenheit haben beispielsweise die

bebens von Kobe (Japan 1995), welches sich durch nahezu explosionsartige Energiefreisetzung auszeichnete, eine Diskussion um die Problematik des Geschwindigkeitseinflusses aufleben lassen. Schließlich konnte als eine Ursache für die überraschenden Sprödbrüche von als hochduktil eingestuften Schweißverbindungen eine durch hohe Beanspruchungsgeschwindigkeiten charakterisierte Überbeanspruchung identifiziert werden. Diese wurde den Verbindungen in unplanmäßiger Höhe deshalb zugeleitet, weil die angrenzenden Bauteilbereiche aufgrund bei hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit auftretender Überfestigkeiten nicht wie vorgesehen einen Großteil der Energie durch „plastische“ Deformationen dissipiert hatten. Bemerkenswert ist somit, daß die Schadensfälle als eine Folge von **zu gering** angesetzten Stahlfestigkeiten angesehen werden können.

Als Beitrag zur weiteren Klärung des obigen Sachverhalts werden am Beispiel des in Deutschland häufig verwendeten unlegierten Baustahls S 355 J2 G3 (St 52-3 N) [3] nachfolgend die Ergebnisse von Untersuchungen zur Geschwindigkeitssensitivität des mechanischen Verhaltens von Baustahl vorgestellt. Diese wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert und am Institut für Stahlbau der TU Braunschweig durchgeführt.

Der Schwerpunkt dieses zweiteiligen Aufsatzes liegt in der Ermittlung und Beschreibung des Materialverhaltens auf der Grundlage einer hinreichenden statistischen Absicherung. Die nachfolgenden Ausführungen können sich dabei auf rein einachsige Beanspruchungen konzentrieren, da sich das Materialverhalten gemäß weiterer, hier nicht eingehend erläuteter Untersuchungen im allgemeinen Fall einer mehrachsigen Beanspruchung nicht grundlegend anders darstellt.

Im ersten Teil wird ausgehend vom bisherigen Kenntnisstand dargestellt, wie das mechanische Verhalten der unlegierten Baustähle im Bereich der Raumtemperatur in signifikantem Maße sowohl bei einmaliger als auch bei wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich von derjenigen Geschwindigkeit abhängt, mit der die Beanspruchung aufgebracht wird. Zugleich wird ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den im inelastischen Bereich auftretenden Relaxations- bzw. Kriechphänomenen und der Beanspruchungsgeschwindigkeit gefunden und erläutert.

Im zweiten Teil wird auf Möglichkeiten zur mathematisch-rechnerischen Beschreibung des Materialverhaltens unlegierter Baustähle bei wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich eingegangen. Da dieses mit den bislang im Bauwesen gebräuchlichen Werkstoffmodellen in seiner Gesamtheit nicht hinreichend genau beschrieben werden kann, wird ein geeignetes neues Modell vorgeschlagen. Dieses stellt die geschwindigkeits- bzw. zeitabhängige Erweiterung eines im Rahmen des Sonder-

forschungsbereichs 319 [4], [5] entwickelten Modells der klassischen, also zeitunabhängigen Plastizitätstheorie dar. Die neuen Beschreibungsmöglichkeiten werden dann anhand von Vergleichsrechnungen einiger im ersten Teil vorgestellter Experimente diskutiert. Hierzu wurde das Modell exemplarisch in die kommerzielle Software ANSYS® [6] implementiert.

Der Aufsatz schließt mit einer Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse und nimmt eine erste Bewertung des neuen Kenntnisstands zum Materialverhalten aus baupraktischer Sicht vor.

2 Materialverhalten

2.1 Bisheriger Kenntnisstand

Die im Bauwesen relevanten Festigkeitskennwerte eines Werkstoffs (z. B. R_{eH} , R_m) werden heute gewöhnlich mittels eines weg- oder dehnungskontrolliert durchgeführten Zugversuchs bestimmt. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit wird dabei während des gesamten Versuchs in einem von DIN EN 10002 [7] vorgegebenen Bereich gehalten. Sofern aus Gründen der Anschauung wie in Bild 1 das baupraktisch relevante Geschwindigkeitsspektrum am Beispiel der Dehngeschwindigkeit grob eingeteilt wird, so kann der in DIN EN 10002 definierte Geschwindigkeitsbereich den niedrigen Beanspruchungsgeschwindigkeiten zugeordnet werden. Dem Bereich niedriger bis moderater Geschwindigkeiten kann auch die Mehrzahl der im Bauwesen als „gewöhnlich“ anzusehenden Beanspruchungen zugeordnet werden.

Aufbauend auf den frühen Untersuchungen von Ludwik [8] ist beispielsweise aus den bei Raumtemperatur durchgeführten Experimenten von Manjoine [9], Dahl [10], Bruhns [11] und Brandes [12] bekannt, daß das Spannungs-Dehnungs-Verhalten für unterschiedliche Beanspruchungsgeschwindigkeiten bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen unterschiedlich ist. Übereinstimmend wird bei den unlegierten Baustählen auf statistischer abgesicherter Grundlage eine Zunahme der oberen Streckgrenze, der mittleren Spannung des initialen Fließplateaus sowie der Länge des Fließplateaus mit anwachsender Beanspruchungsgeschwindigkeit festgestellt.

Der Geschwindigkeitseinfluß auf die genannten Kennwerte hebt sich, wie Bild 2 am Beispiel der oberen Streckgrenze zeigt, aber erst ab moderaten Geschwindigkeiten (s. Bild 1) deutlich aus dem statistischen Streubereich der Kennwerte heraus. Mit Ausnahme von Anprall- und Explosionsbeanspruchungen, in den meisten Fällen aber auch

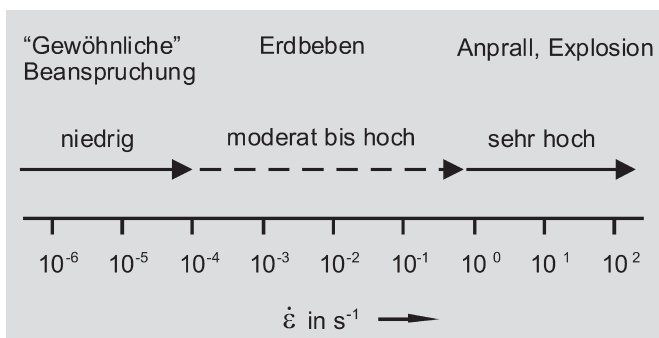


Bild 1. Grobe Einteilung in Geschwindigkeitsbereiche am Beispiel der Dehngeschwindigkeit

Fig. 1. General ranges of strain-rate

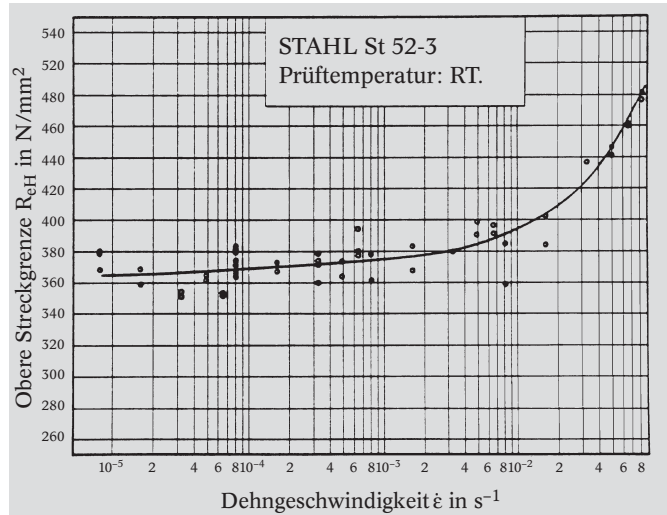


Bild 2. Einfluß der Dehngeschwindigkeit auf die obere Streckgrenze [10]

Fig. 2. Influence of strain-rate on upper yield stress [10]

für Erdbebenbeanspruchungen wurde das Materialverhalten deshalb bisher als geschwindigkeitsunabhängig angesehen.

Neuere Untersuchungen [13], die anhand von mitten im Experiment durchgeführten extremen Geschwindigkeitswechseln (hierzu zählen auch Relaxations- und Kriechversuche) aufgezeigt haben, wie geschwindigkeitssensitiv das Materialverhalten der unlegierten Baustähle bei Raumtemperatur ist, fanden im Bauwesen bis dato kaum Beachtung. Ebenso verhält es sich mit den Postulaten von Ludwik [8], der bereits früh einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitssensitivität und Kriech- und Relaxationsphänomenen bei Eisen vermutete.

Als weitverbreitete Basis zur Charakterisierung des Materialverhaltens bei wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich, wie sie etwa bei erdbebenbeanspruchten Bauteilen auftreten kann, werden vielfach auch ohne entsprechende normative Regelung sog. zyklische Mehrstufenversuche verwendet. Diese werden im Regelfall dehneregelt durchgeführt, wobei die Parameter ϵ_a (Dehnungsamplitude), ϵ_m (Mitteldehnung) sowie deren Reihenfolge und Wiederholungszahl variiert werden (Bild 3).

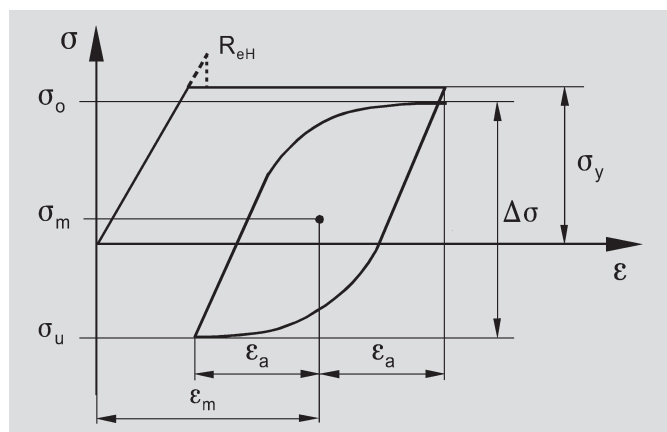


Bild 3. Kennzeichnende Größen des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens bei konstanter Dehngeschwindigkeit

Fig. 3. Characteristics of stress-strain-behavior at constant strain-rate

Die Dehngeschwindigkeiten werden im Regelfall im gleichen Geschwindigkeitsbereich wie beim Zugversuch gemäß DIN EN 10002 [7] gewählt.

In Bild 3 sind:

| | |
|-----------------|---|
| ε_a | Dehnungsamplitude |
| ε_m | Mitteldehnung |
| σ_o | Spannungsmaximum am oberen Umkehrpunkt |
| σ_u | Spannungsminimum am unteren Umkehrpunkt |
| σ_m | Mittelspannung |
| $\Delta\sigma$ | Spannungsdifferenz der Umkehrpunkte |
| σ_y | mittlere Spannung des initialen Fließplateaus |
| R_{eH} | Spannungswert der oberen Streckgrenze |

Auf dieser Grundlage wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die das komplex von Beanspruchungsintensität, Reihenfolge und Wiederholungsanzahl abhängige Materialverhalten beleuchtet haben [4], [5]. Stichpunktartig zusammengefaßt finden sich bei einem dehnregulierten Experiment mit wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich bei konstanter Geschwindigkeit die folgenden Charakteristika, die stets zugleich auftreten:

1. Ausbildung von Hysteresen

Wie in Bild 3 schematisch angedeutet ist, findet man das für unlegierte Baustähle charakteristische ausgeprägte Fließplateau nur bei Erstbeanspruchung bis in den inelastischen Bereich vor. Bei wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich bilden sich Hysteresen aus, die durch einen stetigen Übergang zwischen einem näherungsweise linearelastischen Bereich und einem nichtlinearen inelastischen Bereich gekennzeichnet sind.

2. Verringerung des Proportionalitätsbereichs

In Abhängigkeit der Beanspruchungsintensität verringert sich die Größe des linearelastischen Hysteresenbereichs und in geringerem Maße auch die zugehörige Größe des Elastizitätsmoduls. Die Verringerungen sind bei hohen Beanspruchungsintensitäten starker und plötzlicher Natur, während sie bei geringer Beanspruchungsintensität allmählicher ausfallen. Die Verringerung des linearelastischen Bereichs stellt die Ursache für den bekannten *Bauschinger-Effekt* [14] dar.

3. Zyklische Ver- und Entfestigung

Eine wiederholte Beanspruchung mit geringer Intensität führt zu einer allmählichen betragsmäßigen Verringerung der in Bild 3 dargestellten Spannungswerte der Hysteresenumkehrpunkte σ_o , σ_u , hingegen führt eine wiederholte Beanspruchung mit hoher Intensität zu einer allmählichen Vergrößerung der Spannungswerte der Hysteresenumkehrpunkte. Entsprechend entwickeln sich die Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma$ der Hysteresen. Man spricht im ersten Fall von einem zyklisch entfestigenden und im zweiten Fall von einem zyklisch verfestigenden Materialverhalten.

Einflüsse der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die genannten drei Charakteristika des Materialverhaltens waren vor Beginn der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen nicht hinreichend bekannt.

2.2 Grundlagen der experimentellen Untersuchung

Es wurden drei verschiedene handelsübliche Chargen eines unlegierten Baustahls S 355 J2 G3 gemäß DIN EN 10025 [3] ausgewählt, wobei jeweils der Lieferzustand „normalisierend gewalztes Flacherzeugnis“ vorlag. Hier kann aus Gründen der Übersicht die Betrachtung auf Proben aus

einer stranggegossenen Grobblechtafel vom Werk Salzgitter Stahl AG mit einer Nenndicke von 22 mm beschränkt bleiben, da hinsichtlich der nachfolgenden erläuterten Untersuchungsergebnisse keine entscheidenden Unterschiede zwischen den einzelnen Chargen festgestellt wurden. Angaben zu der chemischen Zusammensetzung des Stahls (Schmelz- und Stückanalyse, metallographisches Schliffbild) finden sich in [15]. Die mittlere Korngröße betrug $d = 31,2 \mu\text{m}$. Auf eine Angabe von werkseitig bestimmten mechanischen Kennwerten (z. B. R_{eH}) wird an dieser Stelle verzichtet, da über die zugrundeliegenden Prüfgeschwindigkeiten nur bekannt ist, daß diese im von DIN EN 10002 [7] vorgegebenen Bereich lagen.

Als Probenform für die einachsigen Untersuchungen wurde eine geschlichtete zylindrische Vollprobe mit abgesetztem Meßquerschnitt gewählt (Bild 4). Diese Probenform hatte sich bereits in früheren Untersuchungen bewährt [4]. Die Probenrohlinge wurden mit Orientierung in Walzrichtung entnommen, bei einer Temperatur von 600 °C spannungsarm gegläht, im Ofen abgekühlt, auf die endgültige Geometrie abgedreht und abschließend unter Schutzgas noch einmal bei 600 °C gegläht.

Die Experimente wurden im Institut für Stahlbau der TU Braunschweig mittels einer einachsigen axialen „MTS® Materials Testing Workstation“ der Genauigkeitsklasse 0.5 durchgeführt. Die Aufnahme der axialen Prüfkraft erfolgte mittels Kraftmeßdose, Wege wurden induktiv gemessen, und die axiale Dehnung ε im Meßquerschnitt der Vollproben wurde mittels eines angeklebten Extensometers bestimmt (Meßbasis $L_0 = 10 \text{ mm}$). Neben Kraft- und Wegregelung war mit dem verwendeten Extensometer (s. Bild 4) ein Betrieb der Prüfmaschine im dehnregulierten Zustand möglich.

Im dehnregulierten Zustand standen ein Geschwindigkeitsbereich von etwa 10^{-7} s^{-1} bis 10^{-2} s^{-1} sowie die Geschwindigkeit Null (Haltephase, $\dot{\varepsilon} = 0$) zur Verfügung. Im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden Versuchszeiten wurden Schwerpunkte bei den um den Faktor 1000 unterschiedlichen Geschwindigkeiten 10^{-5} s^{-1} (niedrig) und 10^{-2} s^{-1} (hoch) gelegt. Mit der gewählten niedrigen Ge-

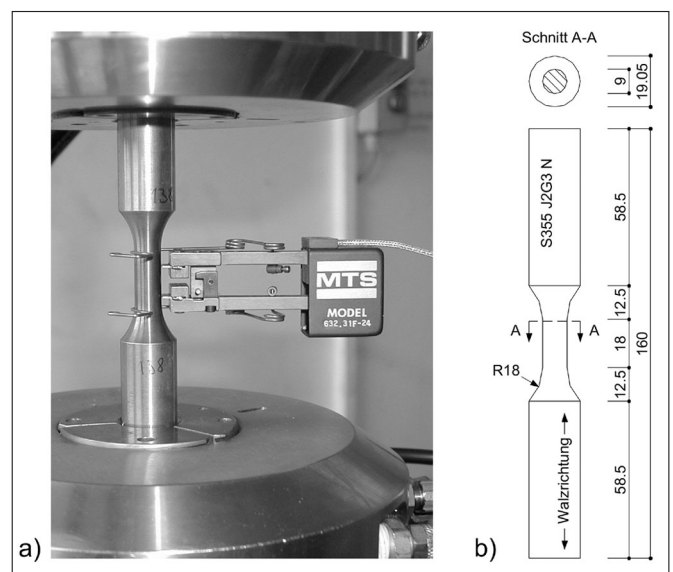


Bild 4. Probekörper; a) mit appliziertem Extensometer in der Prüfmaschine, b) Abmessungen in mm

Fig. 4. Specimen; a) with applied extensometer in material testing workstation, b) Dimensions in mm

geschwindigkeit ist der Standard-Zugversuch nach DIN EN 10002 [7] und mit der hohen Geschwindigkeit eine erdbebentypische Beanspruchung berücksichtigt.

Die Umgebungstemperatur wurde über eine Klimaanlage im Bereich der Raumtemperatur gehalten, wobei hierunter in Anlehnung an DIN EN 10002 [7] ein Temperaturbereich von $(23 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ verstanden sei.

Der grundsätzlichen Problematik einer bei der Untersuchung des Geschwindigkeitseinflusses störenden statistischen Streuung der Materialeigenschaften konnte durch einen hinreichenden Stichprobenumfang in Verbindung mit entsprechender statistischer Auswertung begegnet werden. Alle nachfolgend diskutierten Ergebnisse können daher als statistisch repräsentativ angesehen werden. Einzelheiten zu Stichprobenumfang, Meßdatenerfassung und -auswertung können [15] entnommen werden.

2.3 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

2.3.1 Monotone Beanspruchungen

2.3.1.1 Zugversuche mit konstanten Beanspruchungsgeschwindigkeiten

Die durchgeführten Experimente bestätigen den bereits in Abschn. 2.1 mitgeteilten bisherigen Kenntnisstand. In Bild 5 sind exemplarisch die in Dehnungsregelung bestimmten σ - ϵ -Beziehungen dreier unterschiedlich schneller Zugversuche dargestellt. Es wird deutlich, daß mit zunehmender Geschwindigkeit zugleich die obere Streckgrenze R_{eH} , die mittlere Spannung des initialen Fließplateaus σ_y sowie die Länge des Fließplateaus anwachsen, während der initiale Elastizitätsmodul praktisch nicht geschwindigkeitssensitiv ist.

Trägt man die Mittelwerte von R_{eH} und σ_y aus allen Experimenten über der logarithmierten Dehngeschwindigkeit auf, so wird deutlich, daß sowohl die obere Streckgrenze als auch die mittlere Spannung des Fließplateaus mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit über-

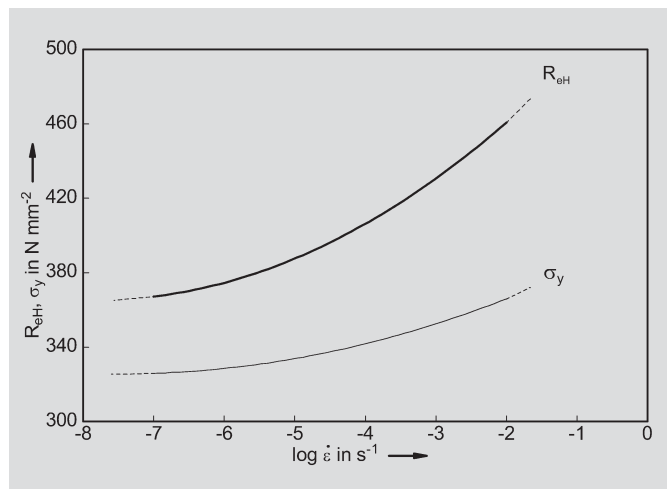


Bild 6. Geschwindigkeitseinfluß auf R_{eH} und σ_y
Fig. 6. Influence of strain-rate on R_{eH} und σ_y

proportional anwachsen. Wie Bild 6 schematisch zeigt, ist der Anstieg bei R_{eH} stärker ausgeprägt als bei σ_y , so daß der Spannungsunterschied zwischen den beiden Größen mit zunehmender Dehngeschwindigkeit wächst.

Auf der Grundlage von Bild 6 kann für den betrachteten Baustahl S 355 die einer Geschwindigkeit von Null zuzuordnende, nachfolgend als Grundwert bezeichnete Größe der oberen Streckgrenze zu etwa 360 Nmm^{-2} bestimmt werden. Für die mittlere Spannung des Fließplateaus liegt dieser Grundwert bei nur etwa 320 Nmm^{-2} . Folglich kann im untersuchten Geschwindigkeitsbereich bis 10^{-2} s^{-1} bezüglich des jeweiligen Grundwerts bei der oberen Streckgrenze von einer Erhöhung um rd. 30 % und bei der mittleren Spannung des Fließplateaus von rd. 15 % ausgegangen werden.

Die zur Verfügung stehende Datenbasis ist insbesondere bei den Geschwindigkeiten von 10^{-5} s^{-1} und 10^{-2} s^{-1} hinreichend für eine statistische Auswertung. Dabei zeigt sich, daß die Streuung der oberen Streckgrenze signifikant größer ist als diejenige der mittleren Spannung des initialen Fließplateaus. Dies belegen die in Tabelle 1 aufgeführten Details der statistischen Auswertung (n Anzahl der ausgewerteten Experimente). Die Streuung der Dehnung am Beginn des Verfestigungsbereichs ϵ_v ist ebenfalls vergleichsweise hoch.

2.3.1.2 Zugversuche mit Wechseln zwischen Geschwindigkeiten größer Null

Anhand von multiplen Geschwindigkeitswechseln im monotonen Zugversuch wird die Geschwindigkeitssensitivität auf einfache Art deutlich. In Bild 7 ist der Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf eines solchen Experimentes mit niedriger Grundgeschwindigkeit von $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ dargestellt, bei dem im inelastischen Bereich mehrfach auf eine 1000-fach höhere Geschwindigkeit von $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ gewechselt wurde. Um eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen

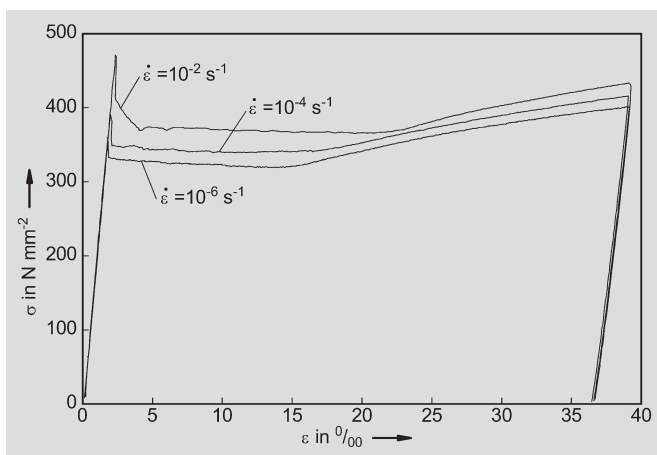


Bild 5. Geschwindigkeitseinfluß im dehnungsregeltem Zugversuch

Fig. 5. Strain-rate sensitivity of tensile tests

Tabelle 1. Einzelheiten der statistischen Auswertung

Table 1. Details of statistical evaluation

| $\dot{\epsilon}$ in s^{-1} | n | $\bar{x}(R_{eH})$ in Nmm^{-2} | $\sigma(R_{eH})$ in Nmm^{-2} | n | $\bar{x}(\sigma_y)$ in Nmm^{-2} | $\sigma(\sigma_y)$ in Nmm^{-2} | n | $\bar{x}(\epsilon_v)$ in % | $\sigma(\epsilon_v)$ in % |
|-------------------------------------|----|--|---------------------------------------|----|--|---|----|----------------------------|---------------------------|
| 10^{-5} | 86 | 396 | 16,2 | 46 | 341 | 8,0 | 10 | 17,0 | 2,5 |
| 10^{-2} | 84 | 470 | 10,7 | 50 | 371 | 8,8 | 15 | 20,3 | 2,4 |

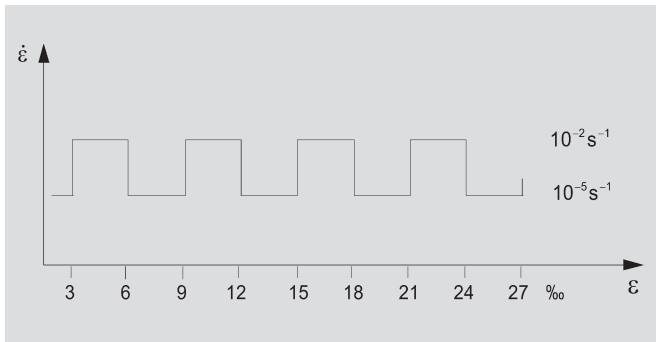


Bild 7. Geschwindigkeitsverlauf im Zugversuch mit multiplen Geschwindigkeitswechseln
Fig. 7. Rate during tensile test with multiple change of rate

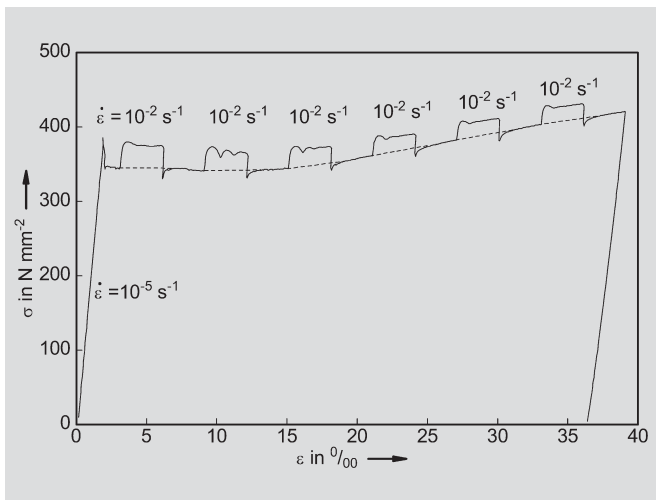


Bild 8. Einfluß multipler Geschwindigkeitswechsel im Zugversuch
Fig. 8. Influence of multiple rate-change in tensile tests

Wechsel zu vermeiden, wurde die Geschwindigkeit jeweils auf Dehnungssegmenten von $\Delta\varepsilon = 3 \text{ ‰}$ konstant gehalten. Man erkennt am zugehörigen, in Bild 8 dargestellten Spannungs-Dehnungs-Verlauf, daß jeder Geschwindigkeitswechsel unmittelbar zu einer deutlichen Änderung der Spannung führt. Der Geschwindigkeitseinfluß auf die Spannungen im Bereich des initialen Fließplateaus ist hier mit bis zu 35 Nmm^{-2} größer als im abgebildeten Teil des Verfestigungsbereichs mit etwa 25 Nmm^{-2} .

2.3.1.3 Zugversuche mit Relaxationsphasen

Der Geschwindigkeitseinfluß auf das Relaxationsverhalten (Sonderfall eines Wechsels auf die Geschwindigkeit Null) wurde anhand von monotonen Zugversuchen mit multiplen Haltephasen des Dehnungswerts von jeweils $t_R = 1800 \text{ s}$ Dauer untersucht. Die Relaxationspunkte lagen bei den Gesamtdehnungen von 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 und 36 ‰. Der gegenseitige Abstand der 11 einzelnen Relaxationspunkte wurde mit $\Delta\varepsilon = 3 \text{ ‰}$ so gewählt, daß eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen war.

In Bild 9 sind zwei Versuche mit um den Faktor 10000 unterschiedlicher Grundgeschwindigkeit gegenübergestellt. Man erkennt beispielsweise am Beginn des Verfestigungsbereichs die schon im Abschn. 2.3.1.1 erläuterten Charakteristika des Geschwindigkeitseinflusses.

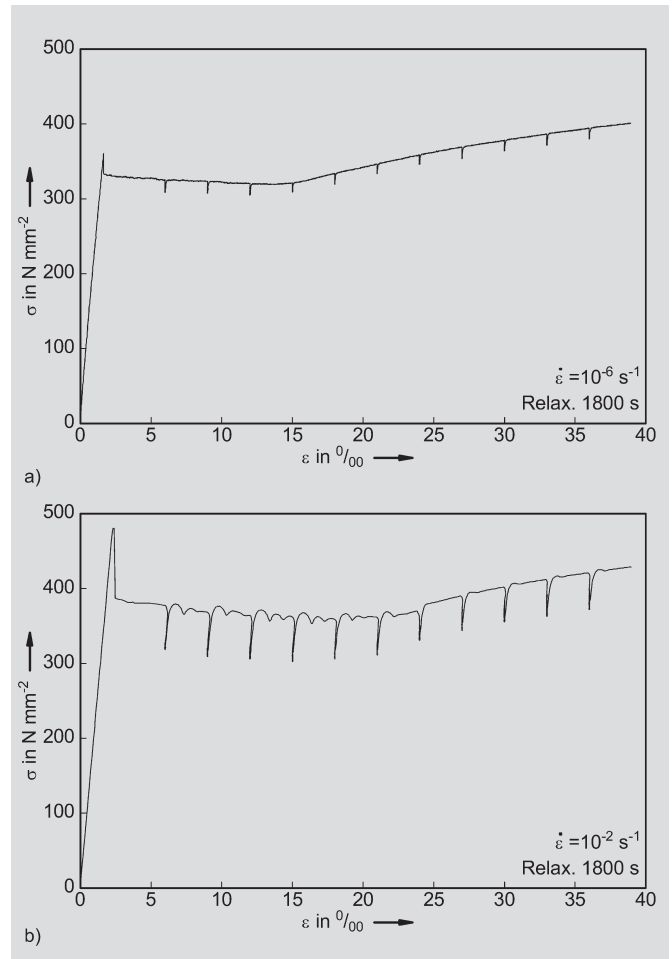


Bild 9. Relaxation im Zugversuch; a) mit niedriger Geschwindigkeit, b) mit hoher Geschwindigkeit
Fig. 9. Relaxation in tensile tests; a) with low strain-rate, b) mit high strain-rate

Legt man den Durchschnitt aus allen 11 Relaxationspunkten zugrunde, so sind trotz gleicher Dauer der Relaxationsphasen die nach 1800 s relaxierten Spannungen bei der hohen Geschwindigkeit von 10^{-2} s^{-1} mit etwa $\Delta\sigma = 55 \text{ Nmm}^{-2}$ deutlich größer als bei der niedrigen Geschwindigkeit von 10^{-6} s^{-1} , wo im Mittel nur $\Delta\sigma = 15 \text{ Nmm}^{-2}$ relaxieren.

Bei genauerer Betrachtung fällt insbesondere im Falle der hohen Geschwindigkeit auf, daß die Relaxation auf dem Fließplateau signifikant stärker ist als im dargestellten Teil des Verfestigungsbereichs. Dies steht im Einklang mit den im Abschn. 2.3.1.2 gewonnenen Erkenntnissen, wo im Bereich des initialen Fließplateaus eine größere Geschwindigkeitssensitivität als im Verfestigungsbereich festzustellen war.

Wesentliche Unterschiede zwischen den geschwindigkeitsbedingt unterschiedlichen Relaxationsverläufen werden bei deren Anfangsphasen beobachtet. Offensichtlich gibt es bei der hohen Geschwindigkeit einen ausgeprägten spontanen Spannungsabfall, bei der niedrigen Geschwindigkeit hingegen nicht. Abgesehen von dem starken Spannungsabfall zu Beginn unterscheiden sich die Relaxationsverläufe der beiden Geschwindigkeiten im weiteren nur geringfügig, sie verlaufen weitgehend parallel und sogar in etwa auf gleichem Spannungsniveau. Dies zeigt Bild 10 anhand von repräsentativen Versuchen aus dem gesamten

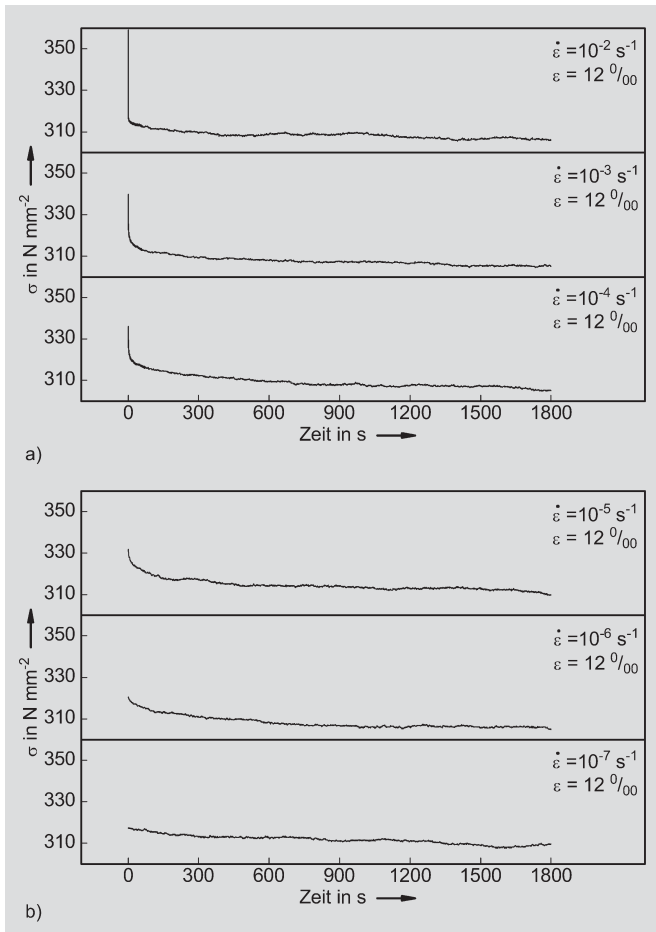


Bild 10. Relaxationsverläufe; a) bei hoher bis mittlerer Grundgeschwindigkeit, b) bei niedriger bis sehr niedriger Grundgeschwindigkeit

Fig. 10. Relaxation starting from; a) high to moderate base-rate, b) low to very low base-rate

untersuchten Geschwindigkeitsbereich, wobei es sich um den Relaxationspunkt $\epsilon = 12 \text{ ‰}$ im Bereich des initialen Fließplateaus handelt. Es ist erkennbar, daß der spontane Relaxationsanteil mit geringer werdender Geschwindigkeit immer weiter abnimmt, bis dieser bei Geschwindigkeiten geringer als 10^{-7} s^{-1} praktisch nicht mehr vorhanden ist.

Eine hier nicht dargestellte Auswertung aller entsprechenden Experimente zeigt eine über dem Logarithmus der unmittelbar vorangegangenen Geschwindigkeit überproportional ansteigende Relaxationsspannung. Mittels Vergleich mit der im Abschn. 2.3.1.1 festgestellten, geschwindigkeitsbedingten Veränderung von R_{eH} bzw. σ_y kann gezeigt werden [15], daß der geschwindigkeitsbedingte Unterschied der relaxierenden Spannungen qualitativ und quantitativ der aus Bild 6 bestimmbarer geschwindigkeitsbedingten Veränderung der mittleren Spannung des initialen Fließplateaus entspricht.

2.3.1.4 Druckversuche

Die zuvor erläuterten Experimente im Zugbereich wurden stichprobenartig durch entsprechende Untersuchungen im Druckbereich ergänzt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse widerlegen nicht die zuvor mitgeteilten, so daß hier vereinfacht auf eine weitere Darstellung verzichtet und mit hinreichender Näherung von einem gleichen Materialverhalten im Zug- und Druckbereich ausgegangen werden kann.

2.3.2 Zyklische Beanspruchungen

2.3.2.1 Zyklische Beanspruchungen mit konstanten Beanspruchungsgeschwindigkeiten

Auf Basis des bisherigen Kenntnisstands erwies sich für den hier verwendeten Baustahl S 355 eine Konzentration auf Dehnungsamplituden von 3, 6, 9, 12 und 15 ‰ sowie die Dehngeschwindigkeiten 10^{-5} s^{-1} und 10^{-2} s^{-1} als sinnvoll. Dabei liegt die Dehnungsamplitude $\epsilon_a = 3 \text{ ‰}$ für alle untersuchten Geschwindigkeiten im zyklisch entfestigenden Bereich, während bei $\epsilon_a = 12 \text{ ‰}$ zyklisch verfestigendes Materialverhalten vorliegt. Die Dehnungsamplitude $\epsilon_a = 6 \text{ ‰}$ markiert in etwa die Grenze zwischen zyklisch entfestigendem und zyklisch verfestigendem Materialverhalten.

Bei den sog. Mehrstufenversuchen wurden die fünf verschiedenen Dehnungsamplituden sowohl in absteigender als auch in aufsteigender Amplitudenfolge hintereinandergereiht untersucht (Tabelle 2). Für Einstufenversuche, auf die hier aus Gründen der Übersicht nicht eingegangen werden soll, wurden aus den genannten Dehnungsamplituden die Amplituden 3, 6 und 12 ‰ ausgewählt. Die für eine bestimmte Dehnungsamplitude jeweils gewählte Zyklenzahl wurde auf der Basis von Voruntersuchungen mit dem Ziel des jeweiligen Erreichens eines scheinbaren Sättigungszustands [4] festgelegt.

Bild 11 zeigt die gemessenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen zweier um den Faktor 1000 unterschiedlich schneller Mehrstufenversuche mit absteigender Amplitu-

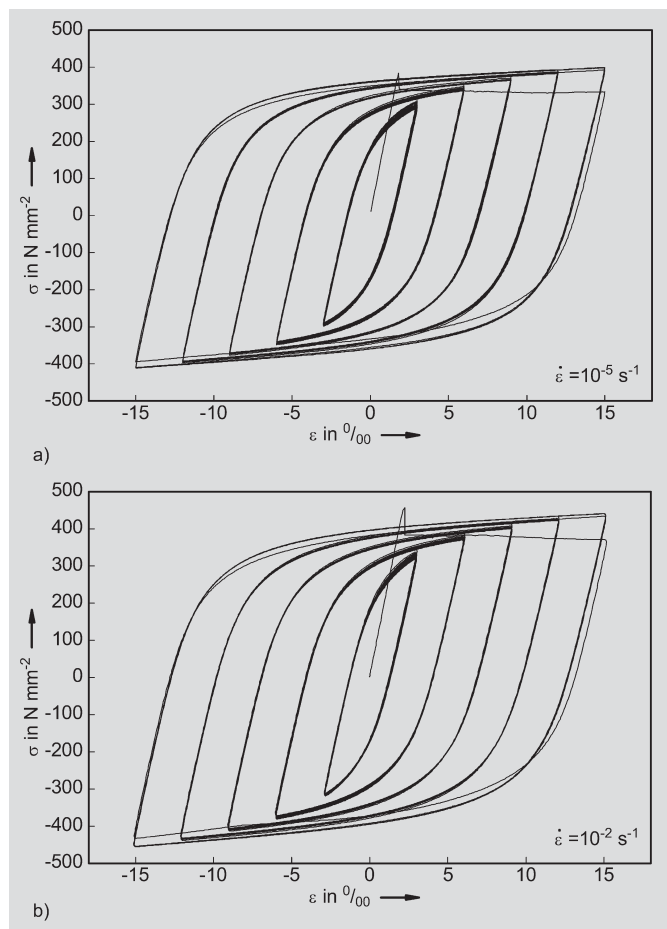


Bild 11. Hysteresen; a) bei niedriger Geschwindigkeit, b) bei hoher Geschwindigkeit

Fig. 11. Hysteresis; a) at low strain-rate, b) at high strain-rate

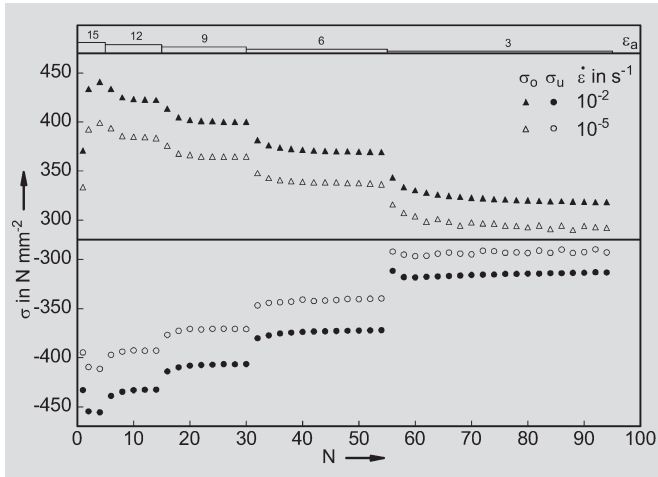


Bild 12. Entwicklung der Umkehrpunktspannungen im Vergleich

Fig. 12. Development of turning point stresses in comparison

Tabelle 2. Einzelheiten der Mehrstufenversuche

Table 2. Details of multiple step tests

| Typ | ϵ_a in ‰ | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 |
|------------|-------------------|-------------|----|----|----|------------|
| | | aufsteigend | | | | ← |
| | | → | | | | absteigend |
| Zyklenzahl | | 40 | 20 | 15 | 10 | 5 |

denfolge. Der Geschwindigkeitseinfluß offenbart sich während des gesamten Beanspruchungsverlaufs im inelastischen Bereich stets an den für einen betrachteten Dehnungswert unterschiedlichen Spannungswerten. Dies zeigt insbesondere der in Bild 12 dargestellte Vergleich der Spannungen der oberen und unteren Hysteresenumkehrpunkte während der 95 Beanspruchungszyklen.

Die in Abschn. 2.1 stichpunktartig aufgeführten Charakteristika finden sich zugleich bei allen untersuchten Beanspruchungsgeschwindigkeiten und können somit qualitativ als geschwindigkeitsunabhängig angesehen werden.

2.3.2.2 Wechsel zwischen Geschwindigkeiten größer Null

Durch Einschub mehrfacher Geschwindigkeitswechsel in ausgewählte Hysteresen einer einstufigen zyklischen Beanspruchung (z. B. $\epsilon_a = 12 ‰$) konnte die Abhängigkeit der Geschwindigkeitssensitivität vom Vorbeanspruchungszustand des Materials untersucht werden. Es zeigte sich, daß die Geschwindigkeitssensitivität des zyklisch im inelastischen Bereich vorbeanspruchten Materials praktisch unabhängig vom Umfang der Vorbeanspruchung und zudem vergleichbar mit der im monotonen Verfestigungsbereich vorgefundenen Sensitivität ist (vgl. Abschn. 2.3.1). Zur Erläuterung soll Bild 13 dienen, in dem ein Experiment mit einer Grundgeschwindigkeit von $10^{-2} s^{-1}$ dargestellt ist, bei dem in der Hysterese des 10. und des 300. Zyklus alle $\Delta\epsilon = 3 ‰$ auf eine 1000fach niedrigere Geschwindigkeit gewechselt wurde. Die unmittelbar vorangegangene, „ungestörte“ Hysterese des 9. bzw. 299. Zyklus ist jeweils gestrichelt dargestellt.

Ein Vergleich der geschwindigkeitsbedingten Spannungsunterschiede im 10. und im 300. Zyklus läßt trotz

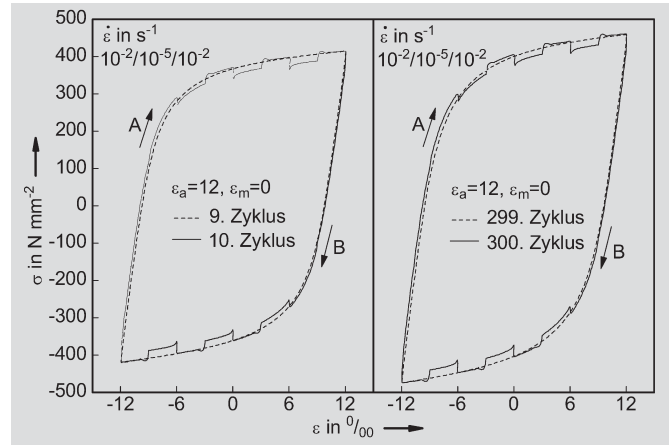


Bild 13. Intrahysteretischer Geschwindigkeitswechsel ausgehend von hoher Grundgeschwindigkeit

Fig. 13. Intrahysteretic rate-change starting from high base-speed

der zwischen den beiden Zyklen liegenden, weiteren zyklischen Verfestigung keine wesentlichen Unterschiede erkennen. Qualitativ ist das Materialverhalten gleich, im 300. Zyklus sind die Spannungsdifferenzen geringfügig größer.

Bemerkungswert ist, daß in den linearelastischen Hysteresenteilen stets keine signifikante geschwindigkeitsbedingte Beeinflussung der Spannungen feststellbar war.

2.3.2.3 Intrahysteretische Relaxation

Mit einem Relaxationsschema analog zu Abschn. 2.3.1.3 wurde auch das intrahysteretische Relaxationsverhalten untersucht. Hierzu wurden im Abstand von $\Delta\epsilon = 3 ‰$ insgesamt 17 Haltephasen des Dehnungswertes von jeweils $t_R = 1800 s$ Dauer in eine geschlossene $\pm 12 ‰$ -Hysterese eingeschoben. Es wurden unterschiedliche Grundgeschwindigkeiten gewählt, mit denen bis zum ersten Relaxationszeitpunkt eine definierte Zyklenzahl mit einer bestimmten Dehnungsamplitude eingestellt und auch zwischen den Relaxationspunkten gefahren wurde.

Im Bild 14 sind zwei Experimente mit um den Faktor 1000 unterschiedlicher Grundgeschwindigkeit dargestellt, bei denen zunächst jeweils der 10. Zyklus einer einstufigen Beanspruchung mit $\epsilon_a = 12 ‰$ durch multiple Relaxationsphasen unterbrochen wurde. Der unmittelbar vorangegangene 9. Zyklus ist gestrichelt dargestellt. Die bereits bekannten, geschwindigkeitsbedingten Unterschiede bei den Hysteresen und bei der nach 1800 s relaxierten Spannung sind deutlich erkennbar.

Analog zu Abschn. 2.3.2.2 ändert sich auch durch eine weitere zyklische Beanspruchung das intrahysteretische Relaxationsverhalten qualitativ und quantitativ praktisch nicht, so daß beispielsweise auch im 300. Zyklus die gleiche Relaxationsneigung wie im hier betrachteten 10. Zyklus festgestellt werden kann.

Bei genauerer Betrachtung fällt weiterhin auf, daß an Relaxationspunkten in den linearelastischen Teilen der Hysteresen gegenüber allen anderen Relaxationspunkten jeweils fast keine Spannung relaxierte. Eine weitergehende Untersuchung mit sehr dicht beieinander liegenden Relaxationspunkten ergab, daß sowohl im initialen linearelastischen Bereich als auch im linearelastischen Bereich des Zugasts oder Druckasts der Hysteresen (hier etwa zwischen

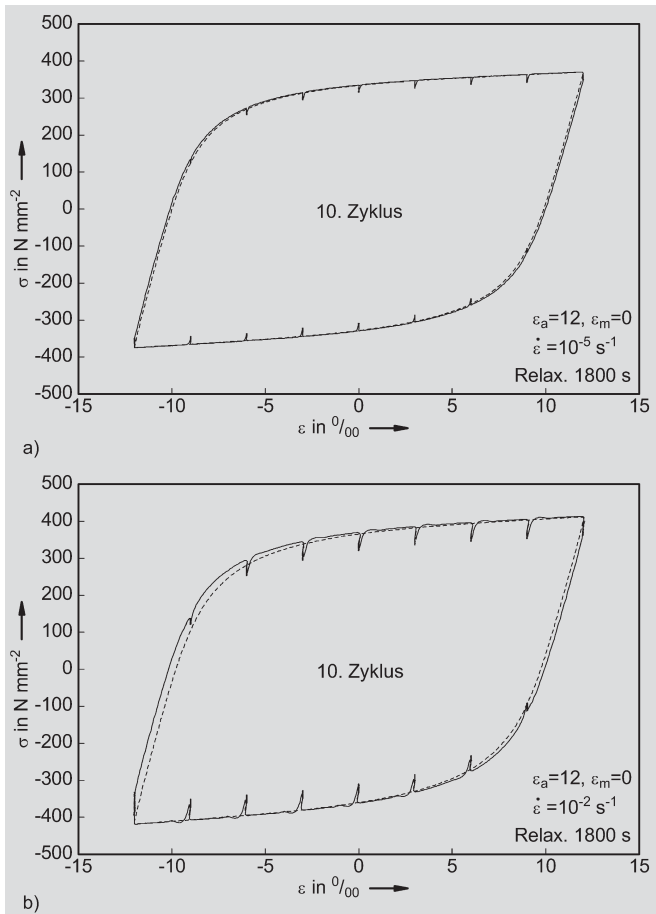


Bild 14. Intrahysteretische Relaxation ausgehend a) von niedriger Grundgeschwindigkeit, b) von hoher Grundgeschwindigkeit
Fig. 14. Intra-hysteretic relaxation starting from a) low base-rate, b) high base-rate

den Umkehrpunkten und $\epsilon = +9 ‰$ bzw. $\epsilon = -9 ‰$) praktisch keine Relaxation beobachtet wird. Hier bestehen signifikante Parallelen zur Spannungsdifferenz als Reaktion auf Wechsel zwischen Geschwindigkeiten größer Null (vgl. Abschn. 2.3.2.2).

2.3.2.4 Intrahysteretisches Kriechen

Das Kriechverhalten (in Kraftregelung) wurde in Interaktion mit einer zyklischen dehnregulierten Beanspruchung anhand von Haltephasen auf verschiedenen Spannungsniveaus von jeweils $t_K = 1800$ s Dauer untersucht. Hier wird auf Experimente eingegangen, bei denen sich die Kriechspannung praktisch als abhängige Größe direkt durch Umschalten aus der Dehnungsregelung bei Erreichen eines definierten Dehnungswerts von $\epsilon = 12 ‰$ ergab. Die Kriechspannung ist somit abhängig von der zum Umschaltzeitpunkt gerade vorliegenden zyklischen Ver- bzw. Entfestigung.

In Bild 15 sind die Hysteresen zweier um den Faktor 1000 unterschiedlich schneller zyklischer Versuche ($\epsilon_a = 12 ‰$, $\epsilon_m = 0 ‰$) mit im 1., 10., 20. und 30. Zyklus am oberen Hysteresenumkehrpunkt eingeschobenen Kriechphasen von $t_K = 1800$ s Dauer dargestellt. Alle Dehnungen rechts der gestrichelten Linie bei $\epsilon = 12 ‰$ sind somit kriechbedingt. Die Größe der jeweiligen Kriechspannung steht in Klammern.

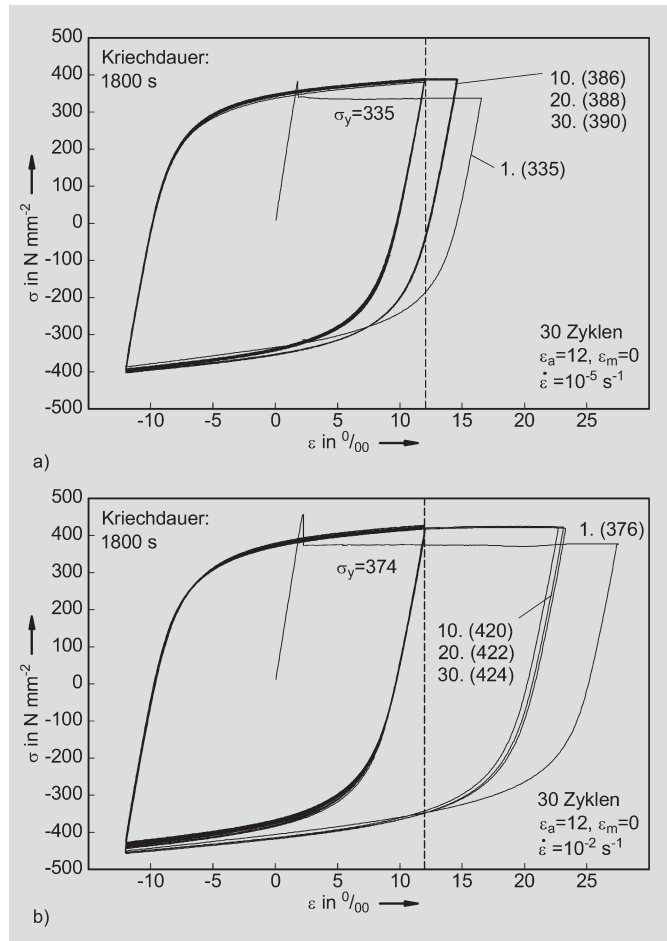


Bild 15. Kriechen am oberen Umkehrpunkt ausgehend a) von niedriger, b) von hoher Grundgeschwindigkeit
Fig. 15. Creep at upper turning point starting from a) low strain-rate, b) high strain-rate

Das Kriechen im 1. Zyklus, also im unmittelbaren Anschluß an die Erstbeanspruchung bis auf $\epsilon = 12 ‰$, ist bei beiden Geschwindigkeiten besonders stark, da das initiale Fließplateau zuvor noch nicht vollständig durchlaufen war und auch keine zyklische Verfestigung vorlag. Als theoretische Grenze für die Kriechdehnung ist deshalb hier der Beginn des monotonen Verfestigungsbereichs zu sehen. Dieser liegt in Bild 15a bei etwa $\epsilon_v = 17 ‰$. Da aber bei hoher Geschwindigkeit die Prüfmaschine wegen der plötzlichen Steifigkeitsänderung nicht in der Lage war, den geforderten Kraftwert exakt zu halten, gehen die Kriechdehnungen – verbunden mit einem leichtem Spannungsanstieg – hier über den Beginn des Verfestigungsbereichs hinaus. In Bild 15b kann unter Berücksichtigung dieser Umstände der Beginn des Verfestigungsbereichs zu etwa $\epsilon_v = 21 ‰$ bestimmt werden. Damit besteht Übereinstimmung mit den in Abschn. 2.3.1.1 im dehnregulierten Zugversuch gefundenen Werten. Im weiteren Verlauf der Beanspruchung, die aufgrund der gewählten Dehnungsamplitude durch zyklische Verfestigung gekennzeichnet ist, spielt sich die Kriechdehnung dann aber auf einen für die jeweilige Geschwindigkeit nahezu konstanten Wert ein, der deutlich geringer ist als im 1. Zyklus. Dies ist umso bemerkenswerter, als daß die kriecherzeugende Spannung infolge der zyklischen Verfestigung inzwischen angewachsen war. Hier zeigt sich der Einfluß der Vorbeanspruchung des Materials.

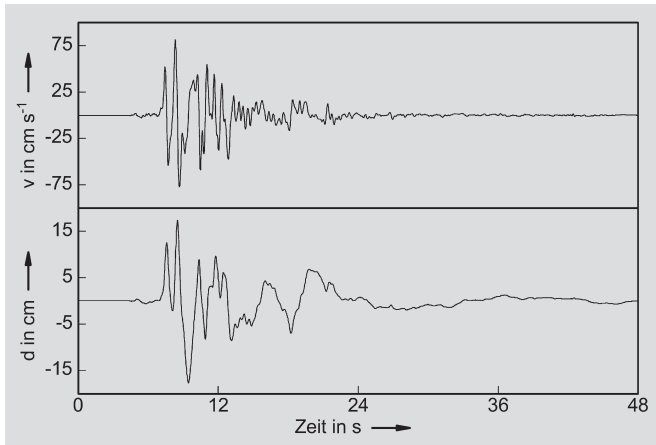


Bild 16. Verwendeter Schrieb des Erdbebens von Kobe 1995
Fig. 16. Used record of Kobe 1995 earthquake

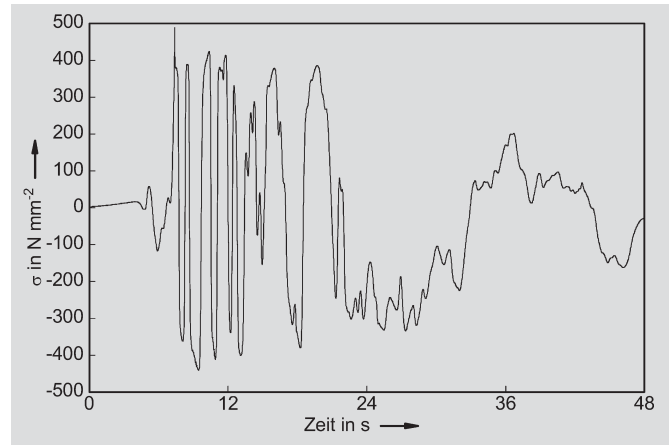


Bild 17. Spannungsverlauf aus Erdbebenschrieb Kobe 1995
Fig. 17. Stress over time for Kobe 1995 earthquake record

2.3.3 Erdbebenbeanspruchungen

Für die spätere Entwicklung und Verifikation eines Materialmodells (vgl. Abschn. 3) erwies sich die Untersuchung von hinsichtlich Intensität, Geschwindigkeit und Verlauf kritischen erdbebenartigen Beanspruchungen als sinnvoll. Hierzu wurde u. a. ein baselinien-korrigierter und gefilterte Bodenverschiebungs-Zeit-Schrieb des für ein Nahbeben charakteristischen Erdbebens von Kobe (Japan 1995, M = 7,2) [2] verwendet. Dabei entsprach im dehneregelten Experiment ein Dehnungswert von $\epsilon = 1 \text{ ‰}$ einem gemessenen Bodenverschiebungswert $d = 1 \text{ cm}$ (Bild 16).

In Tabelle 3 sind die kennzeichnenden Größen des verwendeten Erdbebenschriebs gegenübergestellt. Die Ermittlung der Starkbebendauer erfolgte als diejenige Zeitspanne, die zwischen den 5.-%- und 95.-%-Werten des Gesamtenergieausstoßes liegt.

In den Bildern 17 und 18 sind der in der Prüfmaschine aufgezeichnete Spannungs-Zeit-Verlauf und die zugehörige Spannungs-Dehnungs-Beziehung dargestellt. Es wird zunächst der geradezu explosionsartige Beanspruchungsverlauf zu Beginn des Bebens deutlich, der ein typisches Nahbeben auszeichnet. Man erkennt dabei das geschwindigkeitssensitive Materialverhalten anhand der geschwindigkeitsbedingt hohen Spannungswerte bei vergleichsweise geringen Dehnungen und geringem zyklischen Verfesti-

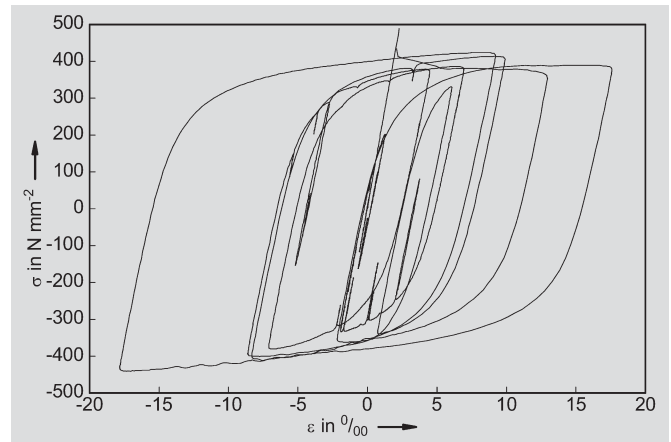


Bild 18. Hysteresen aus Erdbebenschrieb Kobe 1995
Fig. 18. Hysteresis for Kobe 1995 earthquake record

gungszustand sowie anhand der bei fortlaufenden Dehnungen einbrechenden Spannungswerte („abgerundete“ Hysteresen).

2.4 Zusammenfassende Interpretation der experimentellen Ergebnisse

Die vorstehend erläuterten experimentellen Untersuchungen haben bei Raumtemperatur eine erhebliche Geschwindigkeitssensitivität des mechanischen Verhaltens von Baustahl S 355 aufgezeigt, die sowohl bei jungfräulichem wie vorbeanspruchtem Material und unabhängig von der Art der Beanspruchung (weg-, dehnungs- oder spannungsgeregelt) vorhanden ist. Einflüsse aus der Beanspruchungsgeschwindigkeit sind dabei signifikant größer als Einflüsse aus der statistischen Streuung der Materialeigenschaften. Eine Unterscheidung des Materialverhaltens für einachsige Zug- oder Druckbeanspruchung erwies sich als nicht erforderlich.

Im allgemeinen vergrößert sich im inelastischen Bereich die Steifigkeit des Materials mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit, wobei die aus der Art der Beanspruchung resultierenden Charakteristika der Materialantwort qualitativ erhalten bleiben. Im Falle einer deformationsgesteuerten Beanspruchung wachsen daher im wesentlichen die für eine bestimmte Deformation erforderlichen Kräfte bzw. Spannungen an, bei einer kraft- bzw. spannungsgeregelten Beanspruchung verringert sich die aus einer bestimmten Belastung resultierende Deformation. Art

Tabelle 3. Kennzeichnende Größen des verwendeten Erdbebenschriebs

Table 3. Characteristics of used earthquake-record

| Kennzeichnende Größe | Kobe 1995 |
|---------------------------|-------------|
| PGA in g | 0,821 |
| t_{PGA} in s | 8,52 |
| PGV in cm s^{-1} | 81,3 |
| t_{PGV} in s | 8,30 |
| PGD in cm | 17,7 |
| t_{PGD} in s | 9,44 |
| Starkbebendauer in s | 8,4 |
| Gesamtdauer in s | 48,0 |
| Auflösung in s | 0,02 |
| Filter HP/LP in Hz | 0,05/unbek. |

und Umfang einer Vorbeanspruchung bestimmen nicht die Qualität der Geschwindigkeitssensitivität, sondern verringern diese gegenüber jungfräulichem Material nur geringfügig.

Die Antwort des Materials auf eine mechanische Beanspruchung ist offensichtlich nur dann zeitlich invariant, wenn die Beanspruchung mit äußerst niedriger Geschwindigkeit aufgebracht wird. Es ist nachvollziehbar, daß dem Material nur in diesem Fall genügend Zeit für eine Reaktion auf die Beanspruchung gelassen wird.

Bei makroskopischer Betrachtung kann daher die von *Ludwik* [8] bereits im Jahr 1910 axiomatisch vorgeschlagene Definition eines Gleichgewichtszustands für den Fall einer Beanspruchung mit unendlich niedriger Geschwindigkeit bestätigt werden. Das Gleichgewicht wird gemäß *Ludwik* immer dann verlassen, wenn eine Beanspruchung mit von Null verschiedener Geschwindigkeit aufgebracht wird. Hierin ist die Ursache für Relaxations- bzw. Kriechphänomene begründet. Relaxation und Kriechen sind ausschließliche Folge einer unmittelbar vorangegangenen Beanspruchung mit von Null verschiedener Geschwindigkeit und Ausdruck des Materialbestrebens, den Gleichgewichtszustand zu erreichen. Dies wird daran deutlich, daß Kriechen und Relaxation umso stärker sind, je größer die unmittelbar vorangegangene Geschwindigkeit und somit der „Abstand“ vom Gleichgewichtszustand war.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich sowohl aus Experimenten mit konstanter oder wechselnder Geschwindigkeit als auch aus Relaxations- und Kriechuntersuchungen ein einheitliches Bild der Geschwindigkeitssensitivität des Materialverhaltens darstellt. Dieses ist beim jungfräulichem Material gekennzeichnet durch eine besonders starke Sensitivität gegenüber der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Nach jeglicher Art der Vorbeanspruchung bis in den inelastischen Bereich ist die Geschwindigkeitssensitivität demgegenüber quantitativ zwar etwas verringert, aber dennoch von nicht zu vernachlässigender Größe. Innerhalb des initialen linearelastischen Bereichs sowie innerhalb der linearelastischen Teile von Hysterese des vorbeanspruchten Materials liegt keine Geschwindigkeitssensitivität vor.

Insbesondere Experimente mit multiplem Geschwindigkeitswechsel haben gezeigt, daß eine bleibende Materialerinnerung an vorangegangene Beanspruchungsgeschwindigkeiten nicht vorhanden ist. Bei jedem Wechsel zwischen Geschwindigkeiten größer Null stellt sich quasi spontan der zur jeweiligen Geschwindigkeit gehörende Beanspruchungszustand ein.

Die den experimentellen Untersuchungen sowohl innerhalb einer betrachteten Materialcharge als auch chargenübergreifend zugrunde gelegte Statistik läßt den Schluß zu, daß das zuvor beschriebene Materialverhalten charakteristisch für den unlegierten Baustahl S 355 ist. Die Geschwindigkeitssensitivität des mechanischen Verhaltens erweist sich qualitativ wie quantitativ als nahezu unabhängig von eventuellen Unterschieden bei den initialen Festigkeitswerten, die beispielsweise durch die Erzeugnisdicke bedingt sind. Die statistische Streuung der Geschwindigkeitssensitivität kann als gering bezeichnet werden.

Literatur

- [1] *Mises, R. v.*: Mechanik der festen Körper im plastisch deformablem Zustand. Göttinger Nachrichten, mathematisch-physikalische Klasse 1913, S. 582–592.
- [2] *Yamada, M.*: Das Hanshin-Awaji-Erdbeben, Japan 1995. Bauingenieur 71 (1996), S. 15–19, S. 73–80 u. S. 109–116.
- [3] DIN EN 10025 (03.94): Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen – Technische Lieferbedingungen. Deutsches Institut für Normung (DIN) 1994.
- [4] *Scheibe, H.-J.*: Zum zyklischen Materialverhalten von Baustahl und dessen Berücksichtigung in Konstruktionsberechnungen. Dissertation, TU Braunschweig, Bericht Nr. 6314 des Instituts für Stahlbau 1990.
- [5] *Reininghaus, M.*: Baustahl St 52 unter zweiachsiger plastischer Wechselbeanspruchung. Dissertation, TU Braunschweig, Bericht Nr. 6326 des Instituts für Stahlbau 1994.
- [6] ANSYS, Inc.: ANSYS 5.7 Manual. ANSYS, Canonsburg PA, USA 2000.
- [7] DIN EN 10002 (04.91): Zugversuch Teil 1: Prüfverfahren (bei Raumtemperatur). Deutsches Institut für Normung (DIN) 1991.
- [8] *Ludwik, P.*: Über den Einfluß der Deformationsgeschwindigkeit bei bleibenden Deformationen mit besonderer Berücksichtigung der Nachwirkungerscheinungen. Physikalische Zeitschrift 10 (1910), S. 411–417.
- [9] *Manjoine, M. J.*: Influence of Rate of Strain and Temperature in Yield Stresses of Mild Steel. Journal of Applied Mechanics 11 (1944), A211–A218.
- [10] *Dahl, W., Belche, P.*: Kennzeichnung des Stahles durch die statische Streckgrenze bei Verwendung im Hochbau. Bericht SO44, BMFT 1982.
- [11] *Bruhns, O. T.*: Einfluß der Verzerrungsgeschwindigkeit auf das Werkstoffverhalten bei großen inelastischen Formänderungen. Forschungsprogramm 1989–1991, Projekt A5, SFB 151, Ruhr-Universität Bochum 1989.
- [12] *Brandes, K.*: Strain Rate Sensitive Cyclic Behaviour of Steel Bolted Joints Experimental Research. Proc. European Conference on Structural Dynamics, Bochum, Vol. 1, 1990, pp. 175–178.
- [13] *Chang, K.-C., Lee, G. C.*: Strain Rate Effect on Structural Steel under Cyclic Loading. Journal of Engineering Mechanics 113, pp. 1292–1301.
- [14] *Bauschinger, J.*: Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchung. Heft 13 aus dem Mech.-Techn. Labor. der K. Techn. Hochschule München 1886.
- [15] *Böttcher, C.*: Geschwindigkeitssensitivität des mechanischen Verhaltens unlegierter Baustähle bei wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich – experimentelle Untersuchung und Modellierung. Dissertation, TU Braunschweig. Düsseldorf: Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 5, Nr. 654 2002.
- [16] *Dafalias, Y. F., Popov, E. P.*: A Model of Nonlinear Hardening Materials for Complex Loadings. Acta Mechanica 21 (1975), pp. 173–192.
- [17] DIN 18800 T1 (11.90): Stahlbauten. Bemessung und Konstruktion. Deutsches Institut für Normung (DIN) 1990.
- [18] *Scheer, J., Maier, W.*: Zum Einfluß der statischen Streckgrenze auf die Knicklast mittelschlanker Stäbe. Festschrift Roik, Mitt. 84-3 aus dem Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1984, S. 298–315.
- [19] *Scheer, J., Maier, W., Rohde, M.*: Basisversuche zur statischen Streckgrenze. Stahlbau 56 (1987), S. 79–84.

Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Christian Böttcher, Ingenieurbüro Dr. Binnewies GmbH, Alsterterrasse 10a, 20354 Hamburg, Dr.-Ing. Matthias Reininghaus, akademischer Oberrat, Prof. Dr.-Ing. Udo Peil, Universitätsprofessor am Institut für Stahlbau der TU Braunschweig, Beethovenstraße 51, 38106 Braunschweig