

Untersuchungen zur Ermittlung der Dehnratenabhängigkeit von modernen Karosseriestählen

Investigations concerning the strain rate behaviour of modern sheet steels for autobody applications

W. Bleck¹, A. Frehn¹, P. Larour¹, G. Steinbeck²

In einem Projekt, das gemeinsam von der Automobil- und Stahlindustrie durchgeführt wurde, stand u. a. die Ermittlung der dynamischen Eigenschaften von Karosseriestählen im Mittelpunkt. Hierfür wurden 20 Stähle für Feinblech in dynamischen Zugversuchen bei unterschiedlichen Temperaturen (-40, 23 und 100 °C) und Dehnraten (1, 20, 250 und 500 s⁻¹) im Anlieferungszustand und zusätzlich in verschiedenen Vorverformungs- und Wärmebehandlungszuständen untersucht. Es zeigte sich eine unterschiedlich stark ausgeprägte Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit für einzelne Stahlgruppen. Niedrig legierte ferritische Stähle offenbarten bei niedrigen Prüftemperaturen in Kombination mit hohen Prüfungsgeschwindigkeiten ein deutlich reduziertes Verfestigungspotenzial. Andererseits wiesen Mehrphasen-Stähle dieses Verhalten nicht auf; auch bei dieser Parameterkonstellation wurde eine erhebliche Verfestigungsneigung festgestellt. Die Untersuchungen haben gezeigt, wie wichtig experimentell ermittelte Daten für die FEM-Crashsimulation sind. Dabei bleibt es unerlässlich, die Daten in dynamischen Zugversuchen im relevanten Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich zu ermitteln, da eine Interpolation der Daten aus dem quasistatischen Zugversuch zu erheblichen Fehlinterpretationen des Werkstoffverhaltens führen kann.

Schlüsselworte: Dynamische Zugversuche, mechanische Eigenschaften, Crashverhalten, Dehnratenabhängigkeit, Temperaturempfindlichkeit, Energieabsorption, Streckgrenzenverhältnis, TRIP-Stähle, austenitische nicht rostende Stähle, Dualphasen-Stähle, Complexphasen-Stähle, niedrig legierte ferritische Stähle

In a research project, which was commonly carried out by the steel and automotive industry, the determination of dynamic properties and thus a description of the material behaviour at high speed testing were performed. For this, 20 sheet steels have been investigated in dynamic tensile tests at different testing temperatures (-40, 23 and 100 °C) and different strain rates (1, 20, 250 and 500 s⁻¹). Besides the starting materials, selected steels with a defined pre-deformation and heat treatment were tested. The results indicated that different steel groups exist which show a varying temperature and strain rate dependence. Low alloyed ferritic steels revealed a strongly reduced strain hardening potential at low temperatures and high strain rates. On the other hand multiphase steels did not show this behaviour. Still using this parameter combination, considerably higher strain hardening values could be obtained. These investigations showed how important reliable data for FEM-crash simulation seem to be. For this, it is essential to determine these data in the relevant temperature and strain rate range to avoid misinterpretations concerning the material behaviour on the basis of the data from the quasistatic tensile test.

Keywords: Tensile testing, dynamic properties, crash behaviour, strain rate and temperature sensitivity, energy absorption, ratio of yield stress to tensile strength, TRIP steels, austenitic stainless steels, Dual phase steels, Complex phase steels, low alloyed ferritic steels

1 Einleitung

In der Vergangenheit wurden von der Automobilindustrie und Forschungseinrichtungen diverse Testverfahren entwickelt, um das Crashverhalten von Kraftfahrzeugen vorherzusagen und beurteilen zu können. Dabei müssen unterschiedliche Lastfälle berücksichtigt werden, damit die passive Sicherheit für die Fahrzeuginsassen durch konstruktive Maßnahmen oder entsprechende Materialauswahl verbessert werden kann [1, 2, 3]. *Bild 1* zeigt die abgeschätzten maximalen Dehnraten, die in den unterschiedlichen Karosseriebereichen eines PKW im Falle eines Frontal-Zusammenstoßes mit einer verformbaren Barriere (40 % Überlappung und 64 km/h Aufprallgeschwindigkeit gemäß EuroNCAP) auftreten können [4]. Im Bereich der Crashbox werden Dehnraten von bis zu

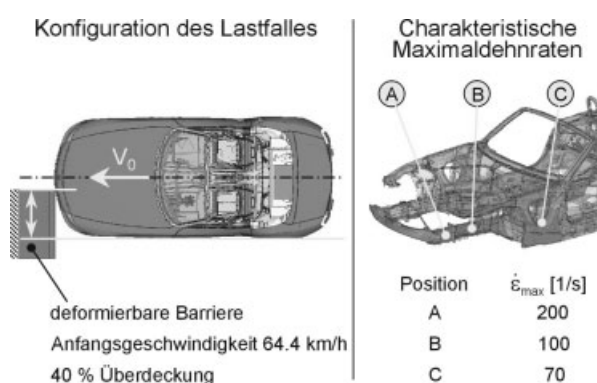


Bild 1. Crashsimulation: Einfluss der Dehnratenabhängigkeit (hier: Lastfall EuroNCAP Front Offset)

Figure 1. Crash simulation: Influence of strain rate dependency (here: EuroNCAP front offset crash)

¹ Institut für Eisenhüttenkunde IEHK der RWTH Aachen

² Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

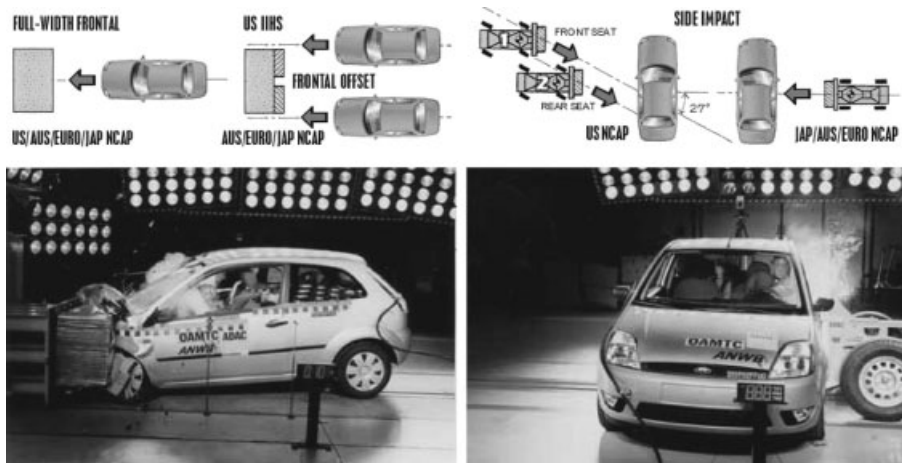


Bild 2. EuroNCAP-Crashtest; Links: Frontalcrash, Rechts: Seitencrash

Figure 2. EuroNCAP-test; left: front offset, right: side impact

200 s⁻¹ beobachtet, während am Längsträger Dehnraten von bis zu 100 s⁻¹ auftreten. An der A-Säule betragen die Dehnraten hingegen 70 s⁻¹. Bei einem Seiten-Crashtest, ebenfalls mit einer verformbaren Barriere durchgeführt, können Dehnraten von bis zu 30 s⁻¹ in der A- und B-Säule im Bereich der Türen auftreten. *Bild 2* zeigt Beispiele für einen Frontal- und Seiten-Crashtest [5].

Im Hinblick auf die passive Sicherheit sind die (Form-) Stabilität der Fahrgastzelle, des Türrahmens und der A-Säule sowie eine hohe Steifigkeit der Bodengruppe nur einige der Kriterien, die es bei der Entwicklung neuer Fahrzeugtypen zu beachten gilt. Die Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften bei der Entwicklung von Fahrzeugen ist notwendig, um eine befriedigende Korrelation von Simulationsrechnung und experimentellen Befund zu erzielen.

Im Rahmen des gemeinschaftlichen Projektes der Stahl- und Automobilindustrie mit dem Titel „Erarbeitung werkstoff- und verarbeitungsgerechter Kennwerte für Feinbleche aus normal und höherfesten sowie nicht rostenden Stählen“, über das in allgemeiner Form bereits in [6] berichtet wurde, wurden in dynamischen Zugversuchen Werkstoffkennwerte an 20 Stählen für Feinblech ermittelt. Über die wichtigsten Ergebnisse wird im Folgenden berichtet.

2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Der Versuchsplan für die dynamischen Zugversuche ist in *Bild 3* dargestellt. Neben Prüfungen des Ausgangsmaterials wurden dynamische Zugversuche an vorverformten und wärmebehandelten Proben ausgewählter Stähle durchgeführt. Zusätzlich wurde neben der Dehnrates auch die Versuchstemperatur variiert. Die Stähle lagen als industriell gefertigtes Feinblech in einer Dicke von 1 mm bzw. als Warmband-Abschnitte in Dicken von 1,6 bis 3,0 mm vor. Die Angabe der chemischen Zusammensetzung und zusätzlicher Werkstoffparameter erfolgte in [6]. Weitere Informationen zu der vor der Prüfung aufgetragenen Vorverformung und Wärmebehandlung finden sich ebenfalls in dieser Veröffentlichung.

Alle Versuche wurden an den in *Bild 4* gezeigten Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschinen am Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen durchgeführt. Die servohydraulische Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine Schenck S56 ermöglicht Kolbenabzugsgeschwindigkeiten von 0,01 bis 5000 mm s⁻¹ bei einer Maximalkraft von 100 kN. Durch eine Temperaturkammer konnten an dieser Maschine die Versuche bei -40 und 100 °C realisiert werden. Auf der servohy-

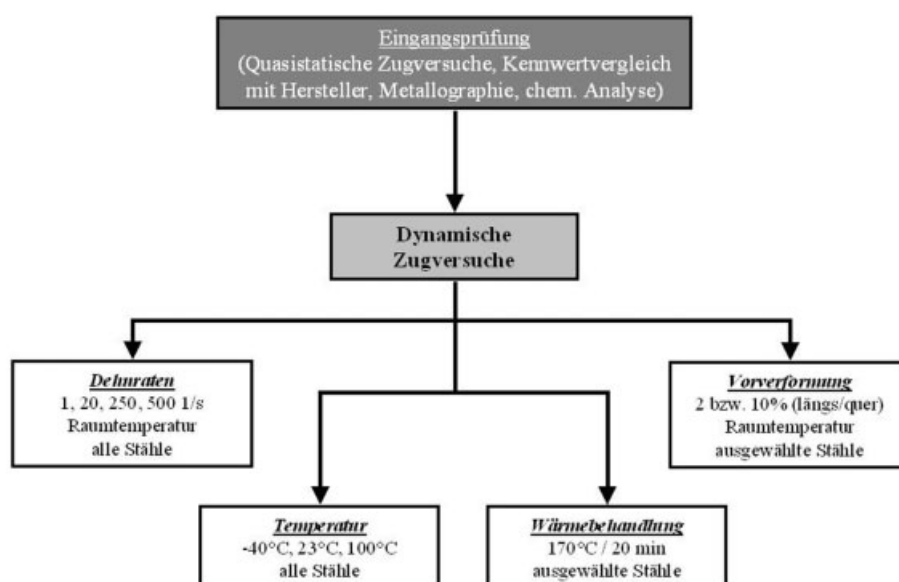


Bild 3. Schematischer Versuchsplan zur Aufnahme plastischer Werkstoffkennwerte in dynamischen Zugversuchen

Figure 3. Experimental planning to obtain characteristic plastic values in dynamic tensile tests



$v_{\max} = 4 \text{ m/s}$, $F_{\max} = 100 \text{ kN}$
 $d\varepsilon/dt_{\max} = 200 / \text{s}$
 $-180^\circ\text{C} < \vartheta < +400^\circ\text{C}$

$v_{\max} = 12 \text{ m/s}$, $F_{\max} = 20 \text{ kN}$
 $d\varepsilon/dt_{\max} = 600 / \text{s}$
 $\vartheta = \text{Raumtemperatur}$

Bild 4. Servohydraulische Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschinen am IEHK der RWTH Aachen

Figure 4. Servohydraulic high speed tensile testing machines at IEHK of RWTH Aachen

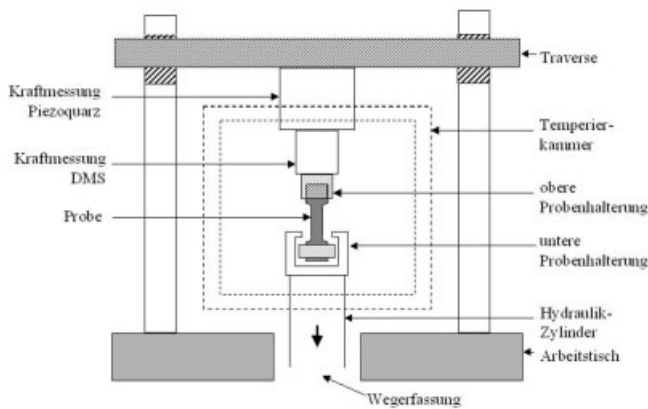


Bild 5. Versuchsaufbau zur Durchführung von Hochgeschwindigkeitszugprüfungen

Figure 5. Experimental set up for high speed tensile testing

draulischen Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine der Firma Roell-Amsler (Typ HTM2012), die eine Maximalkraft von 20 kN und maximalen Kolbenabzugsgeschwindigkeiten von bis zu 12000 mm/s aufweist, wurden die Versuche bei der höchsten Dehnrates (500 s^{-1}) durchgeführt. Die Versuche beschränkten sich hier jedoch auf Raumtemperatur.

Bild 5 zeigt schematisch den Versuchsaufbau an der Schenck-Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine, wobei der Versuchsaufbau an der Roell-Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine nahezu identisch ist. Während des Versuchs wird die Kraft kontinuierlich über einen Dehnungsmessstreifen, der auf der Kraftmessdose aufgebracht ist, und einen Piez Quarz aufgenommen. Bei Kolbenabzugsgeschwindigkeiten größer als 100 mm/s wird das Kraftsignal des Dehnungsmessstreifens benutzt; bei niedrigeren reicht der Piez Quarz aus, um ein Signal mit möglichst geringen Schwingungsanteilen zu erhalten. Die Messsignale Kraft, Zeit und Weg werden während des Versuchs mit Hilfe eines Transientenrekorders (Messfrequenz: 1 MHz) aufgenommen, auf einem angeschlossenen PC gespeichert und dienen als Basis für die weitere Auswertung, die zu konventionellen und wahren Spannung-Dehnung-Kurven sowie zu den charakteristischen Kennwerten Streckgrenze $R_{p0,2}$, Zugfestigkeit R_m , Gleichmaßdehnung A_g und Bruchdehnung A_{L20} führt.

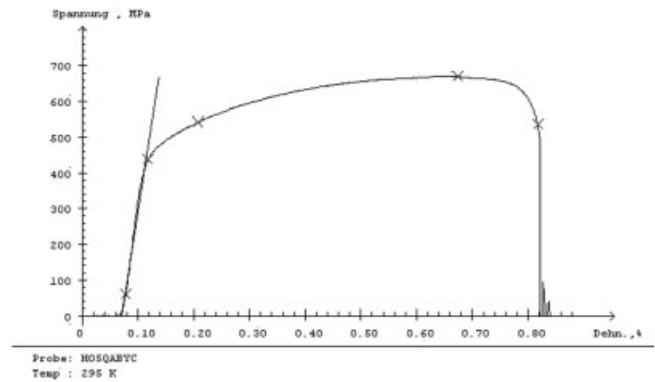


Bild 6. Konventionelle Spannung-Dehnung-Kurve bei einer Dehnrates von 1 s^{-1} ; Auswertung ohne Splinefunktion

Figure 6. Engineering stress-strain curve at a strain rate of 1 s^{-1} ; Evaluation without using the spline curve

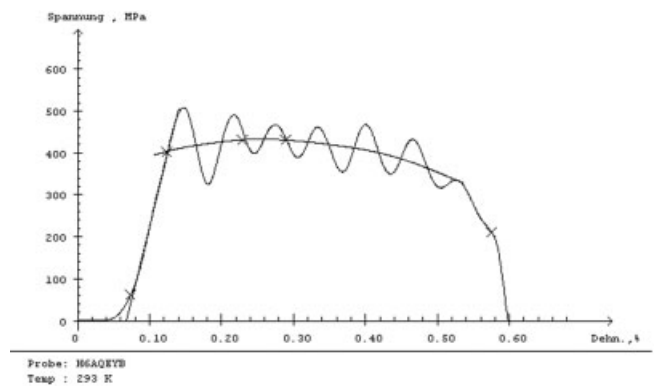


Bild 7. Konventionelle Spannung-Dehnung-Kurve bei einer Dehnrates von 500 s^{-1} ; Auswertung mit Splinefunktion

Figure 7. Engineering stress-strain curve at a strain rate of 500 s^{-1} ; Evaluation by using the spline curve

Die Bilder 6 und 7 zeigen beispielhaft die bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten auftretenden Schwingungen im Messsignal. Diese ergeben sich vornehmlich bei hohen Prüfgeschwindigkeiten durch das Auftreffen des Kolbens auf die untere Einspannung nach der Anfangsbeschleunigung. Bei niedrigen Prüfgeschwindigkeiten (Bild 6) kann die Auswertung direkt am Messsignal vorgenommen werden, während bei höheren Dehnrates (Bild 7) wegen der Schwingungen im Kraftsignal mit Hilfe einer Splinefunktion Ausgleichskurven generiert werden müssen. Diese werden für die weitere Auswertung genutzt.

Derzeit existiert keine nationale oder internationale Norm für die eigentliche Durchführung des Versuchs, wodurch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Prüfstellen erschwert wird. Ein erster Schritt in Richtung Normung ging in jüngster Vergangenheit von der European Structural Integrity Society (ESIS) aus [7]. Im Rahmen dieses Projektes wurden in der sogenannten Prüf- und Dokumentationsrichtlinie die Prüfparameter und die Auswerteprozedur festgelegt [6]. In dieser wurde gleichsam die zu nutzende Probengeometrie fixiert. Für die Versuche wurden Zugproben mit einer Länge von 80 mm und einer Messlänge von 20 mm benutzt, Bild 8. Die Messlänge von 20 mm ermöglichte eine maximale Dehnrates von 250 s^{-1} an der Schenck- bzw. 600 s^{-1} an der Roell-Amsler-Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine.

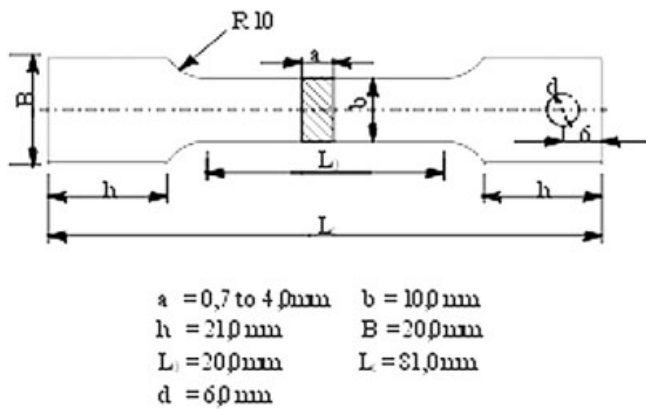


Bild 8. Probengeometrie der Flachzugprobe für dynamische Zugversuche

Figure 8. Geometry of the flat tensile samples for high speed tensile testing

Die in diesem Projekt angewandte Messtechnik zur Erfassung der Kraft-Weg-Signale in den dynamischen Zugversuchen ist als Kompromiss zwischen zwei Standpunkten zu verstehen. Auf der einen Seite könnte die Genauigkeit dieser Größen durch weiteren messtechnischen Aufwand deutlich gesteigert werden. So können beispielsweise die Schwingungen im Kraftsignal durch die Applikation eines Dehnungsmessstreifens auf dem Probenkopf deutlich verringert werden. Zusätzlich erbringt die Benutzung eines optoelektronischen Extensometers, wie es am IEHK der RWTH Aachen eingesetzt wird, eine Verbesserung der Dehnungsmessung. Nachteil dieser Maßnahmen ist allerdings ein deutlich größerer Prüf- bzw. Zeitaufwand. Für große Prüfserien (wie beispielsweise in diesem Projekt mit über 800 Einzelversuchen) musste demnach ein Kompromiss zwischen Prüfgenauigkeit und Prüfaufwand gefunden werden, der sich in der fixierten Prüfvorschrift wieder finden lässt.

3 Ergebnisse

Der Einfluss der Dehnrates auf die Festigkeitskennwerte $R_{p0,2}$ und R_m ist in den folgenden Bildern für verschiedene untersuchte Stähle im Dehnratenbereich von $0,005 \text{ s}^{-1}$ (quasi-statischer Zugversuch) bis 500 s^{-1} aufgetragen. In den Bildern sind jeweils die Kennwerte für die drei Prüftemperaturen -40 , 23 (entspricht Raumtemperatur) und 100°C dargestellt.

Alle Stähle zeigen im Allgemeinen eine Zunahme der Streckgrenze $R_{p0,2}$ sowie der Zugfestigkeit R_m mit steigender Dehnrates und eine Abnahme dieser Festigkeitskennwerte mit steigender Versuchstemperatur. Dabei fallen die Veränderungen je nach Legierungskonzept des Stahls unterschiedlich aus.

So zeigt der niedrig legierte ferritische Tiefziehstahl DC04 in Bild 9 mit steigender Dehnrates eine sehr viel größere Steigerung der Streckgrenze $R_{p0,2}$ als der Zugfestigkeit R_m . Dies führt vor allem bei niedrigen Prüftemperaturen dazu, dass die Werte des Streckgrenzenverhältnisses $R_{p0,2}/R_m$ mit steigender Dehnrates deutlich zunehmen und bei höheren Prüfgeschwindigkeiten Werte nahe Eins erreichen. Dies führt zu der Einschätzung, dass sich das Verfestigungsverhalten dieses Stahls bei niedrigen Prüftemperaturen und hohen Dehnrates gegenüber quasistatischer Prüfgeschwindigkeit drastisch ändern muss.

Bild 10 liefert dazu die konventionellen Spannung-Dehnung-Kurven der Stahlsorte DC04 bei Raumtemperatur und -40°C , wobei jeweils die Dehnrates 1 s^{-1} und 20 s^{-1} dargestellt sind. Es handelt sich bei den Kurven um die Original-Messwertkurven, in diesem Fall wurde keine Ausgleichsfunktion benutzt. Bei Raumtemperatur und einer Dehnrates von 1 s^{-1} ist nach einer leichten Spannungsüberhöhung, die jedoch nicht mit einer ausgeprägten Streckgrenze gleichgesetzt werden darf, sondern vielmehr auf die elastischen Eigenschaften der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine bzw. minimale Einspannungseffekte zurückgeführt werden kann, zum Beginn des plastischen Bereiches noch ein leichter Anstieg der Spannung-Dehnung-Kurve zu beobachten. Dieser fällt bei derselben Dehnrates aber abgesenkter Prüftemperatur (-40°C) deutlich geringer aus. Zudem wird die am Ende des elastischen Bereiches auftretende Spannungsüberhöhung bereits deutlich größer. Bei hoher Dehnrates von 20 s^{-1} und gleichzeitig niedriger Prüftemperatur von -40°C wird die größte Spannungsüberhöhung beobachtet. Zudem ist bei die-

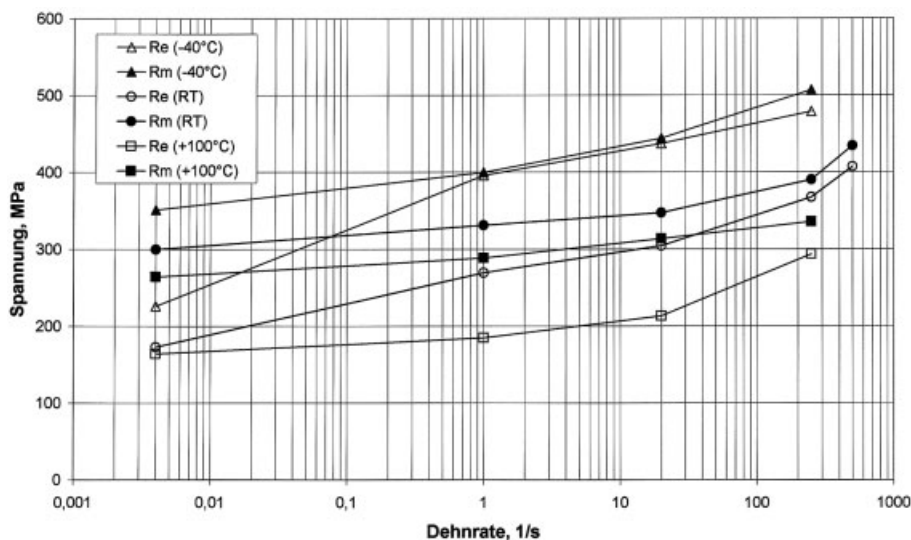


Bild 9. Festigkeitskennwerte der Stahlsorte DC04 in Abhängigkeit von der Dehnrates für verschiedene Prüftemperaturen

Figure 9. Strength values of steel DC04 dependent on the strain rate for different testing temperatures

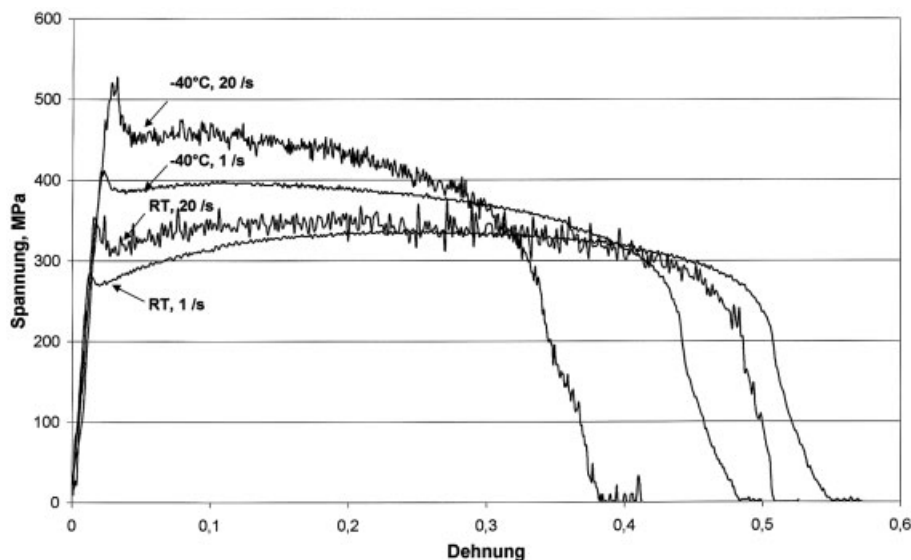


Bild 10. Konventionelle Spannung-Dehnung-Kurven der Stahlsorte DC04 für verschiedene Dehnraten und Prüftemperaturen

Figure 10. Engineering stress-strain curves of steel DC04 at different strain rates and testing temperatures

ser Parameterkonstellation kein Ansteigen der Spannung-Dehnung-Kurve im plastischen Bereich mehr sichtbar. Der Stahl verfestigt somit nicht mehr, sondern beginnt direkt nach der Spannungsüberhöhung zu entfestigen. Zudem ergeben sich sehr geringe Werte für die Gleichmaßdehnung. Nach der Auswertung wurden die entsprechenden Proben im Hinblick auf ihr Bruchverhalten untersucht. Es zeigte sich, dass die Proben, die bei -40°C geprüft wurden, ein deutlich anderes Bruchverhalten aufwiesen als die Proben, die bei erhöhten Temperaturen geprüft wurden. Diese Ergebnisse führten zu der Annahme, dass es bereits kurz nach Fließbeginn zu einer Lokalisierung der Verformung kommt.

Bei den Mehrphasen-Stählen H300X und TRIP700Z in den Bildern 11 und 12 tritt dieses Phänomen nicht auf. Zwar kommt es auch bei diesen beiden Stählen zu einem Anstieg der Festigkeitskennwerte mit steigender Dehnrates, wobei sich die Temperaturabhängigkeit der Streckgrenze $R_{p0.2}$ als weitaus geringer darstellt als die der Zugfestigkeit R_m , doch sind die Werte für die Streckgrenze $R_{p0.2}$ für alle drei Prüftemperaturen vor allem bei der Stahlsorte TRIP700Z in Bild 11 nahezu gleich, während der Temperatureinfluss auf die Zugfestigkeit R_m sehr viel deutlicher sichtbar ist. Als Kon-

sequenz wird damit das Streckgrenzenverhältnis mit sinkender Prüftemperatur immer geringer, woraus ein immer größer werdendes Verfestigungspotenzial resultiert. Gleiches gilt für den Dualphasen-Stahl H300X in Bild 12.

Bild 13 zeigt die Entwicklung der Festigkeitskennwerte über der Dehnrates für den austenitischen nicht rostenden Stahl X8CrMnNi19-6-3 (1.4376). Aufgrund der andersartigen Kristallstruktur und der Umwandlung größerer Mengen von Austenit in α -Martensit, die verformungsinduziert nach Erreichen der Streckgrenze eintritt, ist der Unterschied zwischen Zugfestigkeit und Streckgrenze im Vergleich zu den niedrig legierten Stählen sehr viel größer.

Für ausgewählte Stähle wurde vor der Hochgeschwindigkeitsprüfung zudem eine 20-minütige Wärmebehandlung bei 170°C (W170), kombiniert mit einer längs bzw. quer zur Walzrichtung durchgeführten Vorverformung, durchgeführt. Bild 14 zeigt beispielhaft die ermittelten wahren Spannung-Dehnung-Kurven für die Stahlsorte CP900 bei einer Dehnrates von 20 s^{-1} . In diesem Bild ist die wahre Spannung-Dehnung-Kurve der vorverformten und danach wärmebehandelten Variante um den Betrag der Vorverformung (2 %) versetzt. Es wird deutlich, dass durch eine Vorverformung

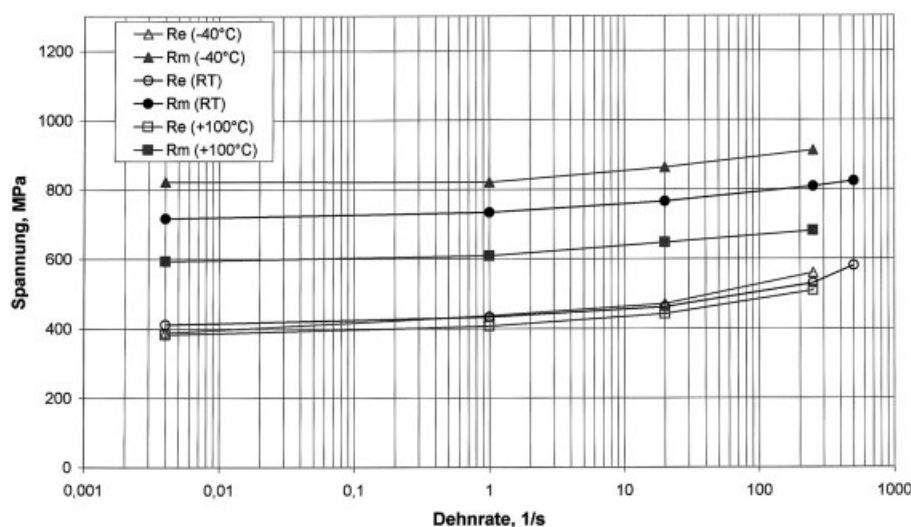


Bild 11. Festigkeitskennwerte der Stahlsorte TRIP700Z in Abhängigkeit von der Dehnrates für verschiedene Prüftemperaturen

Figure 11. Strength values of steel TRIP700Z dependent on the strain rate for different testing temperatures

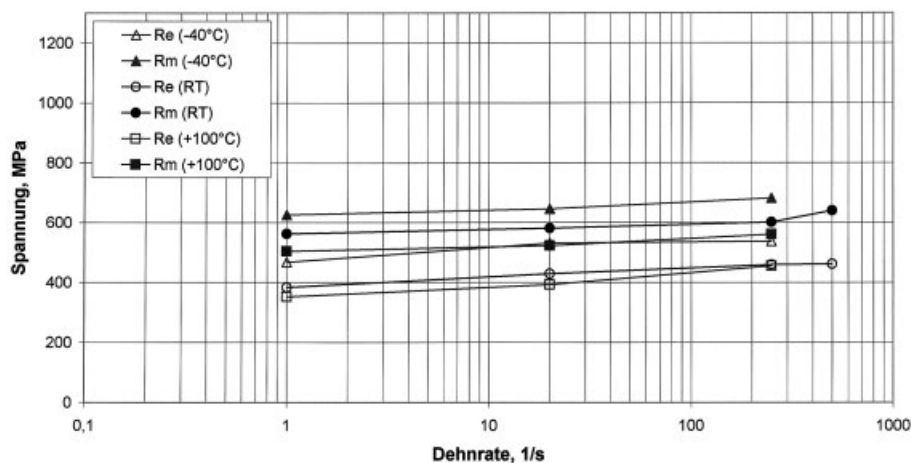


Bild 12. Festigkeitskennwerte der Stahlsorte H300X in Abhängigkeit von der Dehnrate für verschiedene Prüftemperaturen

Figure 12. Strength values of steel H300X dependent on the strain rate for different testing temperatures

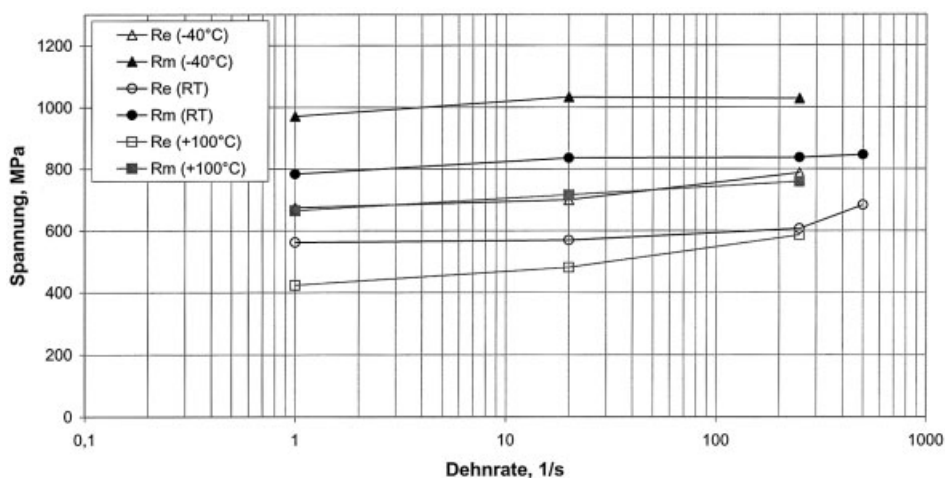


Bild 13. Festigkeitskennwerte der Stahlsorte X8CrMnNi19-6-3 in Abhängigkeit von der Dehnrate für verschiedene Prüftemperaturen

Figure 13. Strength values of steel X8CrMnNi19-6-3 dependent on the strain rate for different testing temperatures

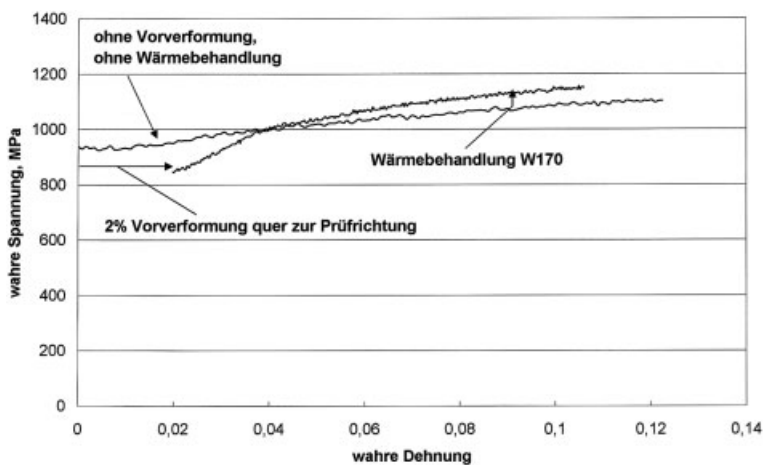


Bild 14. Wahre Spannung-Dehnung-Kurven der Stahlsorte CP900 für unterschiedliche Zustände

Figure 14. True stress-true strain curves of steel CP900 for different conditions

längs zur Walzrichtung bei einer Prüfung quer zur Walzrichtung der Bauschinger-Effekt zum Tragen kommt, so dass im Vergleich zum nicht vorverformten und nicht wärmebehandelten Zustand niedrigere Werte für die wahre Spannung im Bereich der Streckgrenze beobachtet werden können. Die Wärmebehandlung bewirkt zudem eine erhöhte Verfestigung, die sich in einer höheren wahren Spannung, aber leicht reduzierten Gleichmaßdehnungen äußert.

Bild 15 zeigt die wahren Spannung-Dehnung-Kurven für den Dualphasen-Stahl H300X für drei unterschiedliche Zustände jeweils bei einer Dehnrate von 20 s^{-1} . So sind in dem Bild sowohl die Kurve für den Ausgangszustand als auch die Kurven für die quer zur Walzrichtung vorverformten (2 und 10 %) und zusätzlich wärmebehandelten (W170) Varianten eingetragen. Die Kurven für die vorverformten Proben sind wiederum um den Betrag der Vorverformung verschoben. Durch die Vorverformung in Prüfrichtung und die anschlie-

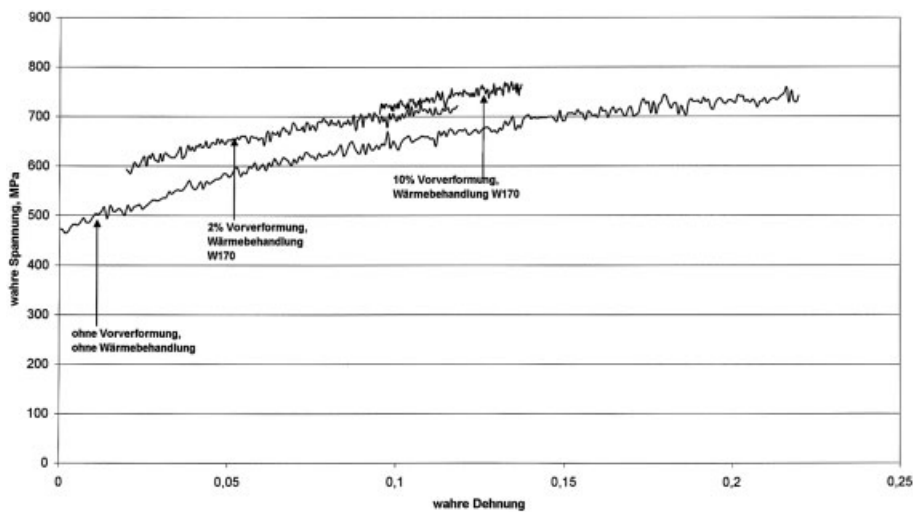


Bild 15. Wahre Spannung-Dehnung-Kurven der Stahlsorte H300X für unterschiedliche Zustände

Figure 15. True stress-true strain curves of steel H300X for different conditions

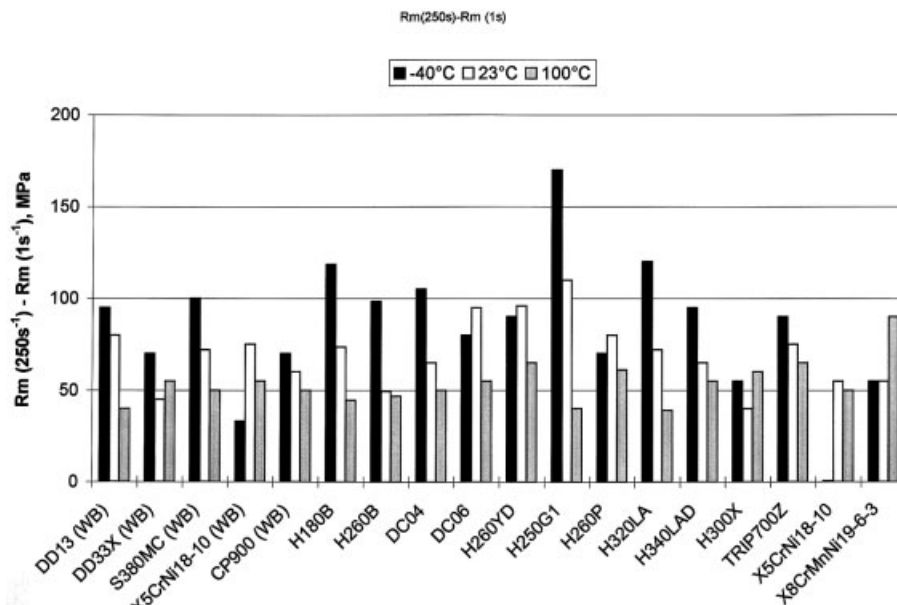


Bild 16. Zugfestigkeitsanstieg R_m (250 s⁻¹) - R_m (1 s⁻¹) in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

Figure 16. Increase of the UTS value R_m (250 s⁻¹) - R_m (1 s⁻¹) dependent on the testing temperature

ßende Wärmebehandlung ergeben sich erwartungsgemäß infolge des Bake-Hardening-Effektes erhöhte Spannungswerte im gesamten Dehnungsbereich. Die erreichten Gleichmaßdehnungen nehmen gleichzeitig mit dem Vorverformungsgrad ab.

Die bisher gezeigten Ergebnisse stellen Einzelergebnisse, ausgewählt aus über 800 Versuchen, dar. In den folgenden Bildern wird nun der Versuch unternommen, die Ergebnisse in Übersichtsbildern zu strukturieren.

Bild 16 zeigt die Differenz der bei den Dehnraten 250 s⁻¹ und 1 s⁻¹ ermittelten Zugfestigkeiten. Die Zugfestigkeit und die beiden Prüfgeschwindigkeiten wurden deshalb gewählt, weil sich dieser Werkstoff- und diese Prüfparameter mit großer Reproduzierbarkeit erfassen lassen. Bei der Streckgrenze ergeben sich vor allem bei hohen Prüfgeschwindigkeiten Unsicherheiten bei der Auswertung durch auftretende Schwingungen im Messsignal. Die höchste Dehnrates von 500 s⁻¹ wird zudem teilweise erst nach einer Einlaufphase erreicht, die auch vom Werkstoff abhängig sein kann. Es ist zu beobachten, dass der geschwindigkeitsbestimmte Festigkeitsanstieg mit sinkender Prüftemperatur im Allgemeinen stark zu-

nimmt. Ausnahmen stellen die austenitischen nicht rostenden Stähle X5CrNi18-10 und X8CrMnNi19-6-3, die beiden Dualphasen-Stähle DD33X und H300X sowie der mit Phosphor legierte höherfeste IF-Stahl H260YD und die mit Phosphor legierte Stahlsorte H260P dar. Bei -40°C sind der isotrope Stahl H250G1 mit einem besonders hohen Wert und die austenitischen nicht rostenden Stähle mit besonders niedrigen Werten für die Zugfestigkeitsdifferenz auffällig.

Bild 17 zeigt die Streckgrenzenverhältnisse $R_{p0,2}/R_m$ für nahezu alle untersuchten Stähle, ermittelt bei einer Dehnrates von 20 s⁻¹ für alle drei Prüftemperaturen. Wie bereits bei Betrachtung der Einzelergebnisse beschrieben, besitzen die weichen Stahlsorten, d.h. DC04, DC06, H250G1 oder H180B bei einer Prüftemperatur von -40°C sehr hohe Streckgrenzenverhältnisse, die nahezu den Wert Eins erreichen. Diese hohe Streckgrenzenverhältnisse verringern sich mit zunehmender Prüftemperatur. Die Dualphasen-Stähle DD33X und H300X liegen dagegen auf mittlerem Niveau und zeigen praktisch keine Temperaturabhängigkeit. Die niedrigsten Streckgrenzenverhältnisse, die ein hohes Verfestigungspotenzial bedeuten, erreichen die Stähle mit TRIP-Effekt, so der Stahl TRIP700Z,

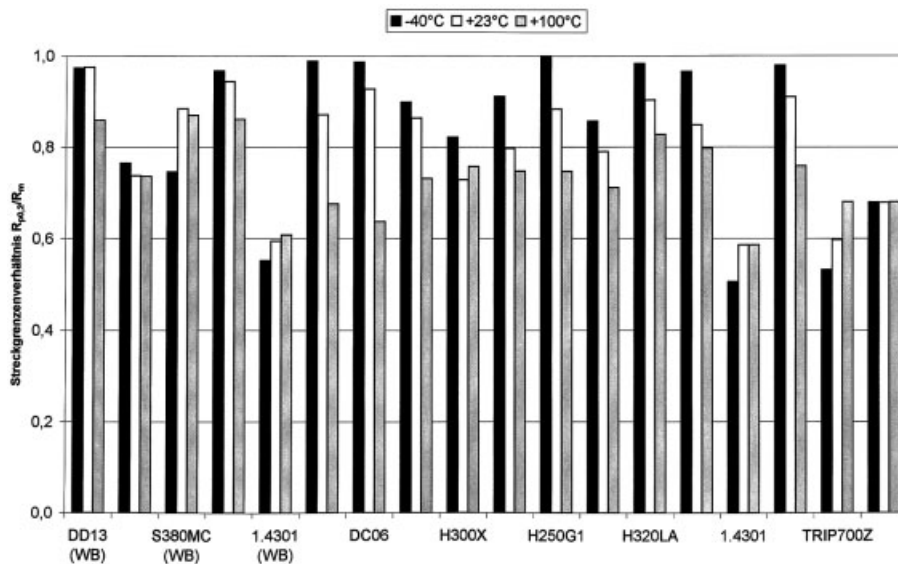


Bild 17. Abhängigkeit des Streckgrenzenverhältnisses $R_{p0.2}/R_m$ von der Prüftemperatur bei einer Dehnrage von 20 s^{-1}

Figure 17. Dependence of the ratio of yield and tensile strength $R_{p0.2}/R_m$ on the testing temperature at a strain rate of 20 s^{-1}

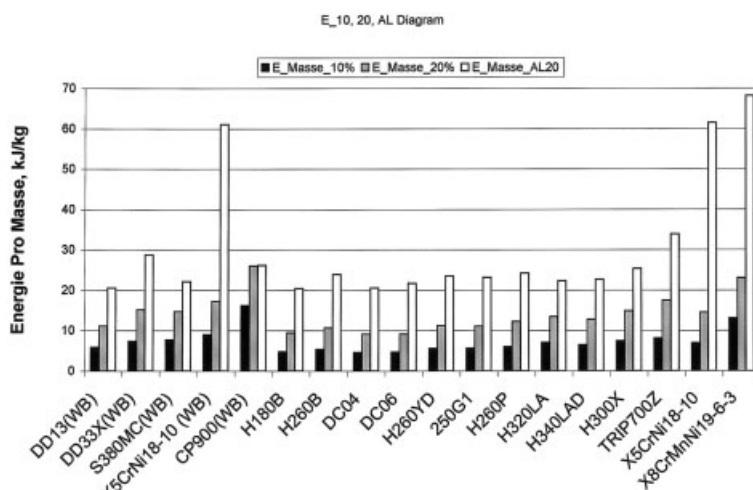


Bild 18. Energieabsorptionswerte, ermittelt bei Raumtemperatur und einer Dehnrage von 20 s^{-1}

Figure 18. Energy absorption values, obtained at room temperature and at a strain rate of 20 s^{-1}

die beiden Varianten des austenitischen nichtrostenden Stahls X5CrNi18-10 sowie der Stahl X8CrMnNi19-6-3. Während der TRIP-Stahl und die beiden Varianten des Stahls X5CrNi18-10 eine Steigerung des Streckgrenzenverhältnisses mit steigender Prüftemperatur zeigen, bleibt das Streckgrenzenverhältnis des austenitischen nicht rostenden Stahls X8CrMnNi19-6-3 nahezu konstant. Es ergeben sich somit signifikante Unterschiede zwischen den einphasigen ferritischen Stählen einerseits und den Mehrphasen-Stählen sowie den austenitischen nicht rostenden Stählen andererseits. Wie bereits zuvor angesprochen, ist eine entsprechende Parameterkombination, d. h. höhere Dehnraten und niedrige Prüftemperaturen, für die einphasigen ferritischen Stähle aufgrund des verringerten Verfestigungspotenzials als besonders kritisch zu werten, während die Mehrphasen-Stähle sowie die austenitischen nicht rostenden Stähle auch bei dieser Parameterkonstellation ein hohes Verfestigungsvermögen aufweisen.

Abschließend zeigt *Bild 18* die in den Versuchen bei einer Dehnrage von 20 1/s und Raumtemperatur ermittelten Energieabsorptionswerte nahezu aller untersuchten Stähle. Die Energieabsorption wird durch das Integral unterhalb der berechneten konventionellen Spannung-Dehnung-Kurve beschrieben, wobei in diesem Fall die Integralberechnung bis

zu plastischen Dehnungen von 10 bzw. 20 % sowie dem Punkt der Bruchdehnung A_{L20} erfolgte. Bei den bis zu einer plastischen Verformung von 10 % ermittelten Energieabsorptionswerten spielt die Streckgrenze der geprüften Stähle eine entscheidende Rolle. Demnach zeigen der phosphorlegierte Stahl H260P und die mit geringeren Mengen an Phosphor legierten Stahlsorten H260B und H260YD höhere Energieabsorptionswerte als die Stahlsorten H180B, DC04 und DC06. Eine weitere Steigerung kann bei den mikrolegierten Stählen H320LA und H340LAD beobachtet werden. Mehrphasen-Stähle, d. h. Dualphasen- und TRIP-Stähle weisen sehr hohe Energieabsorptionswerte auf. Die beiden Varianten des austenitischen nicht rostenden Stahls X5CrNi18-10 zeigen ähnliche Werte, während der Stahl X8CrMnNi19-6-3 aufgrund der durch die Legierungselemente Stickstoff und Mangan erzeugten Mischkristallverfestigung deutlich erhöhte Streckgrenzen und daraus resultierend auch deutlich höhere Energieabsorptionswerte aufweist. Die größte Energieabsorption aller untersuchten Stähle wird beim Warmband des Complexphasen-Stahls CP900 ermittelt. Diese Reihenfolge ändert sich bei der Berechnung des Integrals bis zu einer plastischen Dehnung von 20 % nicht. Wird die Energieabsorption hingegen bis zur Bruchdehnung A_{L20} ermittelt, spielen nicht nur die

Streckgrenzen, sondern auch die Dehnungseigenschaften der Werkstoffe eine wichtige Rolle. Daher kommt es zu signifikanten Änderungen der Energieabsorptionseigenschaften der untersuchten Stähle. Während die austenitischen nicht rostenden Stähle ihr hohes Verfestigungspotenzial, das mit hohen erreichbaren Bruchdehnungen verbunden ist, ausspielen, fällt der Stahl CP900 auf das Niveau der Dualphasen-Stähle DD33X und H300X zurück. Erklärbar ist dies durch die nur geringfügig oberhalb einer plastischen Dehnung von 20 % liegenden Bruchdehnungswerte. Neben den austenitischen nicht rostenden Stählen besitzt der TRIP-Stahl TRIP700Z deutlich höhere Energieabsorptionswerte als alle anderen ferritischen Stähle. Während die mikrolegierten Stahlsorten H320LA und H340LAD bei der Bestimmung der Energieabsorption bis zu einer plastischen Verformung von 10 bzw. 20 % in der Gruppe der einphasigen ferritischen Stähle die höchsten Werte erreichen, zeigen diese bei der Bestimmung bis zur Bruchdehnung einen weniger deutlichen Anstieg als beispielsweise der phosphorlegierte Stahl H260P, der härteste IF-Stahl H260YD und der Bake-Hardening-Stahl H260B. Die weichen Stähle erreichen wiederum die niedrigsten Werte.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Beurteilung der Werkstoffe im Hinblick auf deren Eignung für die Verarbeitung in crashrelevanten Bauteilen mit Hilfe dieses Kennwertes durchaus sinnvoll ist. Allerdings muss dabei bedacht werden, dass durch eine veränderte Integralweite auch der Einfluss der Streckgrenze bzw. der Bruchdehnung auf diesen Kennwert stark variieren kann.

4 Diskussion

Die Untersuchung von 20 Stählen für Feinblech im Hinblick auf deren Eigenschaften in dynamischen Zugversuchen erbrachte generelle Unterschiede zwischen einzelnen Stahlgruppen. So zeigten die weichen Stahlsorten, u.a. DC04, DC06 oder H180B, eine starke Zunahme der Streckgrenzenwerte bei hohen Dehnraten und niedrigen Prüftemperaturen. Außerdem fielen diese Stähle durch ein reduziertes Verfestigungspotenzial und deutlich geringere Gleichmaßdehnungen bei dieser Parameterkonstellation auf. Die Proben zeigten eine Lokalisierung der Verformung und damit ein geändertes Bruchverhalten.

Dagegen zeigten die härtesten phosphor- und mikrolegierten Stähle, alle Mehrphasen-Stähle sowie die austenitischen nichtrostenden Stähle eine geringere Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften, vor allem der Streckgrenze. Besonders bei den Mehrphasen-Stählen kam es zu einer Abnahme des Streckgrenzenverhältnisses bei tiefen Temperaturen, sodass im Gegensatz zu den gerade ange-

sprochenen weichen Stählen das Verfestigungspotenzial noch größer wurde.

Die Untersuchungen haben gezeigt, wie wichtig verlässliche Daten für die FEM-Crashsimulation sind. Dabei bleibt es unerlässlich, die Daten in dynamischen Zugversuchen im relevanten Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich zu ermitteln, da eine Interpolation der Daten aus dem quasistatischen Zugversuch zu erheblichen Fehlinterpretationen des Werkstoffverhaltens führen kann.

Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung zur Durchführung der Arbeiten wird den beteiligten Unternehmen aus der Stahl- und Automobilindustrie gedankt.

Frau Dr. Nicklas (zur Zeit der Untersuchung IEHK der RWTH Aachen) sei an dieser Stelle für die Koordination der Arbeiten der Arbeitsgruppe „Plastische Kennwerte“ mit den anderen Arbeitsgruppen des Gemeinschaftsprojektes gedankt. Ferner sei den Herren Dr. Breidohr (Stahlwerke Bremen GmbH), Dr. Liebertz (Volkswagen AG), Dr. Scholz (Volkswagen AG) und Dr. Werner (BMW AG), die Mitglieder dieser Arbeitsgruppe waren, für ihre Beiträge gedankt.

9 Schrifttum

1. H. Tateno, Y. Hishida, K. Shibata, *SAE Paper* 980953 **1998**, 31.
2. M. Brede, H. Hoppe, B. Plutka, B.O. Reinders, *Stahl und Eisen* **1999**, 119 Nr. 9, 115.
3. C. Schendera, A. Ockewitz, D.Z. Sun, B. Grosser, A. Hamann, Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Crashsimulation von Magnesium-Automobil-Komponenten, Tagungsband „Anwendungen der Bruch- und Schädigungsmechanik“, 20.-21.02.2001, Paderborn, 235.
4. H. Werner, H. Gese, Zur Bedeutung dehnratenabhängiger Werkstoffkennwerte in der Crashsimulation, Tagungsband „Werkstoffprüfung 2002-Kennwertermittlung für die Praxis“, 05.-06.12.2002, Bad Nauheim, 139.
5. www.euroncap.com.
6. W. Bleck, B. Engl, A. Frehn, D. Nicklas, G. Steinbeck, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **2004**, 35, .
7. ESIS-Normentwurf: Proposed standard method for dynamic tensile tests, Draft 3a, März **1997**.

Korrespondenzautor: Dipl.-Ing. A. Frehn, Institut für Eisenhüttenkunde, RWTH Aachen, Intzestraße 1, 52072 Aachen, e-mail: andreas.frehn@iehk.rwth-aachen.de

Eingangsdatum für endgültige Form: 31.3.04 [T 767]