

**FAT-Richtlinie »Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation«**

FAT-Guideline »Dynamic Material Properties for Crashsimulations«

**Kurzfassung:**

Die FAT-Richtlinie [1] ist zur zuverlässigen Bestimmung von crashrelevanten, dehn-ratenabhängigen Werkstoffkennwerten für Crashsimulationen im Automobilbereich entwickelt und durch Crashtests mit Demonstrator-Bauteilen und Crashsimulationen validiert worden. Die Festlegungen in dieser Richtlinie ermöglichen es, in unterschiedlichen Laboratorien mit Hochgeschwindigkeits-Zugversuchen Einsatz-bezogene, Werkstoffmodell-orientierte Crashkennwerte als Eingangsdaten für Crashsimulationen und für den Aufbau von Materialdatenbanken in einheitlicher, standardisierter Weise zu ermitteln und eine abgesicherte Datenbasis für Automobilwerkstoffe zu erstellen. Die entwickelte Richtlinie trägt damit zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit künftiger Crashsimulationen und so auch zur Verkehrssicherheit bei.

**Abstract:**

The FAT-guideline [1] was developed to reliably determine crash-relevant, strain-rate dependent material properties as required by the automotive industry for crash simulations. The application was verified by crash tests and crash simulations of an automotive structural component. The specifications of this guideline enable different laboratories to determine unique, standardised crash-properties by high rate tensile tests for materials under operational conditions. These qualified data can be used as input data for crash simulations and to establish a validated database for automotive materials. Therefore, the guideline contributes to the predictive accuracy of future crash simulations and thus to the safety of traffic participants.

## Einleitung

Viele im Fahrzeugbau verwendete Werkstoffe zeigen eine Abhängigkeit ihrer mechanischen Eigenschaften von der Beanspruchungsgeschwindigkeit, meist einen Anstieg der Fließspannung und Ab- oder Zunahme der Bruchdehnung mit zunehmender Dehnrates. Solche Effekte sind eine Folge der jeweiligen Mikrostruktur des Werkstoffs und der Beweglichkeit von Versetzungen (siehe z.B.: [2]) und hängen damit außer von der chemischen Zusammensetzung von der gesamten Herstellungs- und Verarbeitungsgeschichte, dem Wärmebehandlungszustand und der Temperatur ab.

Die Kenntnis und quantitative Beschreibung des Werkstoffverhaltens bei Bauteilen unter Crash-Belastung ist wichtig für die Bewertung der Crashesicherheit, insbesondere z.B. des Energieabsorptionsvermögens von Fahrzeugstrukturen [3]. Die Crashesicherheitsbewertung erfolgt in der Automobilindustrie heute zunehmend anhand von numerischen Methoden [3-5], um die Anzahl von zeit- und kostenintensiven Automobil-Crashtests zu reduzieren. Die Crashsimulation benötigt hierfür als Eingabedaten für die eingesetzten Werkstoffe im endgefertigten Zustand Kennwerte und Fließkurven für alle Bereiche von elastischer Verformung bis zum Versagen. Diese Werkstoffdaten sind bei niedrigen quasistatischen Dehnrates von etwa  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  bis hin zu hohen, crashrelevanten Dehnrates von bis zu  $1000 \text{ s}^{-1}$  in Hochgeschwindigkeits-Zugversuchen zu ermitteln (siehe z.B.: [6-12]).

Zur Vereinheitlichung dieser Hochgeschwindigkeitsversuche sind inzwischen unterschiedliche Prüfeempfehlungen wie ESIS-P7 [13] und das STAHL-EISEN-Prüfblatt SEP1230 [14] unter maßgeblicher Mitwirkung des Fraunhofer IWM erstellt und teilweise in Ringversuchen überprüft worden (siehe z.B.: [15,16]). Darauf aufbauend und in Erweiterung dieser Richtlinien wurde vom Freiburger Kompetenzzentrum *crashMAT*, der Kooperation der beiden Fraunhofer Institute IWM und EMI, in einem von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) betreuten AiF-Projekt die FAT-Richtlinie „Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation“ [1] erstellt. Sie ermöglicht eine standardisierte Ermittlung dynamischer, d.h. crashrelevanter Zugversuchs-Kennwerte sowie von Spannungs-Dehnungs-Kurven und Fließkurven bis zum Bruch für metallische Automobil-Werkstoffe (Halbzeuge und Bauteile), unter besonderer Berücksichtigung von Bauteilen im endgefertigten Einsatz-Zustand.

Nachfolgend werden einige Besonderheiten und wichtige Festlegungen dieser FAT-Richtlinie sowie die Überprüfung der Anwendbarkeit der Richtlinie anhand von automobil-nahen Demonstrator-Bauteilen aus H260LAD dargestellt.

## **Die FAT-Richtlinie**

In der FAT-Richtlinie [1] werden die notwendigen Schritte von der Erfassung der Werkstoff-, Bauteil- und Einsatz-orientierten Eingangsprüfung, der Ableitung der erforderlichen Versuchsmatrix, der Festlegung der Probenabmessungen von Rund- oder Flach-Zugproben, der Wahl hochgeschwindigkeitsgeeigneter Versuchs- und Messtechnik über die Auswertung der Rohdaten bis hin zur Dokumentation der Ergebnisse und dem Transfer in geeignete Materialdatenbanken detailliert dargestellt. Die Richtlinie ermöglicht es, die Versuchsbedingungen, die Messungen und die Dokumentation so zu gestalten, dass sie nachvollziehbar und auch von unterschiedlich eingerichteten Labors durchgeführt werden können. Dies ist Voraussetzung für den Datenaustausch zwischen Automobilherstellern, Werkstofflieferanten, Forschungsinstituten und Prüfinstitutionen, für die Erstellung von Crash-Datenbanken, für Auslegung und Werkstoffwahl und für die Quantifizierung von Sicherheitsmargen in Crashberechnungen sowie zur Schaffung einer hohen Vergleichbarkeit von Aussagen zur Crashesicherheit.

Dabei wurden die Prüfeempfehlungen ESIS P7 [13] für Rundzugproben sowie SEP 1230 [14] für Flachzugproben in der FAT-Richtlinie nicht nur zusammengeführt sondern auch erheblich ergänzt, wodurch die Vergleichbarkeit von Ergebnissen von Hochgeschwindigkeits-Zugversuchen mit unterschiedlichen Probengrößen und -formen wesentlich verbessert worden ist. Dies wurde erreicht durch ergänzende und neue Festlegungen für die Eingangsprüfungen, für die erforderliche Prüfmatrix, für die Anforderungen sowohl an die Probenentnahme aus Bauteilen und an die Probengeometrie als auch an die Versuchseinrichtungen und die Prüf- und Messtechnik, sowie durch die Festlegungen zur Datendokumentation. Im Anhang enthält die Richtlinie Hinweise zur Berücksichtigung von mehrachsiger Beanspruchung und Anisotropie auf das Verformungs- und Versagensverhalten, wobei hier künftig speziell für die Hochgeschwindigkeitsprüfung noch Erweiterungen erforderlich sind.

## Beispiele aus der FAT-Richtlinie

Insbesondere ist in dieser Richtlinie berücksichtigt, dass Proben nicht nur aus hinreichend großen Blechen im urgeformten Zustand sondern insbesondere auch aus durch Stranggepresen, Umformen oder Gießen hergestellten Bauteilen lokal zu entnehmen sind, um auch lokale Crasheigenschaften der Endkonstruktion im Einsatz-Zustand zu ermitteln. Da zur lokalen Bauteilcharakterisierung im allgemeinen nur kleine Proben entnommen werden können, sind in der FAT-Richtlinie allgemeine Festlegungen für die Prüfteilabmessungen formuliert und konkret auch Abmessungen für Mini-Flach- und Mini-Rund-Zugproben angegeben worden, siehe Bild 1. Die Festlegungen betreffen vor allem den unmittelbaren Prüfteilbereich, während die Gestaltung des Einspannbereichs ebenso wie die zu verwendende Hochgeschwindigkeits-Prüfeinrichtung dem Anwender überlassen bleibt.

Weiterhin werden Empfehlungen für die Kraft- und Dehnungsmessung gegeben, um auch bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten bzw. Dehnraten verlässliche Ergebnisse zu ermöglichen. Dabei wurden neue Kriterien zur Beurteilung der Qualität unterschiedlicher globaler, quasi-lokaler und lokaler Kraftmesstechniken entwickelt, die auf der Bewertung Schwingungsamplituden der Kraftmessungen beruhen (siehe Bild 2), die üblicherweise bei der schlagartigen Krafteinkopplung bei Hochgeschwindigkeitsversuchen auftreten und möglichst zu minimieren sind.

Außerdem wurde eine Differenzierung unterschiedlich definierter Dehnraten erarbeitet und daraus ein Vorschlag zur Festlegung der in Hochgeschwindigkeits-Zugversuchen tatsächlich erzielten „charakteristischen“ Dehnraten abgeleitet, der inzwischen auch in SEP 1230 übernommen wurde. Die Definitionen von unterschiedlichen Dehnraten wie nomineller, mittlerer oder mittlerer plastischer Dehnraten werden angegeben. Es wird empfohlen, bei jedem Versuch den ohnehin nicht exakt konstant einstellbaren, sondern in der Regel zeitabhängigen Dehnratenverlauf,  $d\varepsilon/dt(t)$ , im direkten Vergleich zum Kraftverlauf darzustellen (siehe Bild 3). Dieser Dehnratenverlauf soll zwischen Fließbeginn und Zugfestigkeit in einem Toleranzbereich von  $\pm 30\%$  liegen. Daraus ist dann als Mittelwert die so genannte mittlere plastische Dehnratenrate zu bestimmen und als „charakteristische“ Dehnratenrate anzugeben.

Die Richtlinie enthält auch Hinweise zur Signalaufbereitung mit Rauschfiltern und Glättungsverfahren. Wegen den bei Hochgeschwindigkeitszugversuchen anfänglich angeregten Schwingungen ist die Bestimmung der Fließkurve im Anfangsbereich schwierig. Für technische Anwendungen wird in der Richtlinie eine einheitliche Bestimmung der 0,2 % Dehngrenze  $R_{p0,2}$  durch die Festlegung erreicht, dass der für die Kurvenglättung zu verwendende Datenbereich genau bei dem Datenpunkt beginnen soll, bei dem das Messsignal erstmals den Wert des nachfolgenden ersten Minimums der Kurve erreicht, wie dies in Bild 4 skizziert ist.

Bei Rundzugproben ist die Auswertung wahrer Spannungs-Dehnungskurven bis zum vollständigen Versagen durch Vermessen des Einschnürbereichs z.B. mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsfotografie grundsätzlich möglich, aber aufwändig [6]. Für Flachzugproben werden in der FAT-Richtlinie für technische Anwendungen Möglichkeiten zur näherungsweisen Auswertung bzw. „Konstruktion“ von wahren Spannungs-Dehnungskurven aufgezeigt (siehe Bild 5). Dabei ist zu entscheiden, ob die bei hohen, crashrelevanten Dehnraten wegen adiabatischer Erwärmung auftretende reduzierte Entfestigung (siehe [6,7,18]) berücksichtigt, oder wie in heutigen, isothermen Crashsimulationen vernachlässigt werden soll.

### **Anwendung der FAT-Richtlinie**

Zum Nachweis der Anwendbarkeit dieser Richtlinie bei Automobil-Komponenten wurden als Demonstrator-Bauteile von Volkswagen AG zehn axiale Stauchproben (Rechteck-Hohlprofil, siehe Bild 6) aus gewalztem, verzinktem und abgekanteten Blech aus H260LAD mit Lasernaht-angeschweißter Rückseite zur Verfügung gestellt. Die Werkstoffcharakterisierung wurde im IWM entsprechend der FAT-Richtlinie durchgeführt und dabei die Richtlinie auch iterativ optimiert. Die Bestimmung der dehnratenabhängigen Crashkennwerte erfolgte mit Mini-Flachzug-Proben, die direkt aus den Demonstrator-Bauteilen entnommen wurden, wie dies für die Längsorientierung beispielhaft in Bild 6 gezeigt ist.

Dabei zeigen die bis zu Dehnraten von  $1000 \text{ s}^{-1}$  ermittelten Festigkeitskennwerte einen deutlichen Anstieg mit zunehmender Dehnraten (Bild 7). Ein einfacher empirischer

Potenzansatz in der Form  $y = ax^m$ , mit „m“ als Dehnratenempfindlichkeitsfaktor, liefert eine oft schon ausreichende Genauigkeit zur Beschreibung dieser Ergebnisse. Aber beim hier untersuchten Werkstoff ist bei niedrigen Dehnraten, also im Bereich thermisch aktivierbarer Verformungsvorgänge (siehe z.B.: [2,7]), der Anstieg der Festigkeitswerte zunächst geringer, steigt dann aber oberhalb von etwa  $20 \text{ s}^{-1}$  deutlich steiler an (Bild 7), vermutlich aufgrund von Effekten wie innerer Reibung. In diesen Fällen empfiehlt sich ein Bi-Potenzansatz bzw. eine Fallunterscheidung: der Bereich niedrigerer Dehnraten ist im Crashfall für weniger beanspruchte Strukturbauteile wichtig, der Bereich höherer Dehnraten dagegen für stark beanspruchte, versagensgefährdete Bereiche relevant.

Die ermittelten und in Bild 8 dargestellten technischen Spannungs-Dehnungskurven dokumentieren bis zu Dehnraten von  $500 \text{ s}^{-1}$  ebenfalls den Anstieg der Festigkeiten mit zunehmender Dehnraten. Die Bruchdehnung, also die Länge der Kurven, nimmt bis zu Dehnraten von  $50 \text{ s}^{-1}$  zunächst zu. Bei weiterem Anstieg der Dehnraten bleibt die Bruchdehnung dann weitgehend konstant bzw. nimmt sogar wieder ab. Dies ist wegen der sehr schnellen Verformung durch adiabatische Temperaturerhöhung im Einschnürbereich bedingt (siehe [6,7,18]), so dass es dann sogar zur Überschneidung der technischen Spannungs-Dehnungskurven kommt. Bei den wahren Spannungs-Dehnungskurven zeigt sich hier noch keine Überschneidung (Bild 9).

## Validierung

Zur Validierung wurden mit den Stauchproben (Bild 6) im IWM zwei quasistatische Stauchversuche mit einer Belastungsgeschwindigkeit von  $5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  durchgeführt, und vier dynamische Stauchversuche wurden an der Komponenten-Crashanlage im EMI mit einer Masse von 500 kg und mit Geschwindigkeiten bis zu 9,1 m/s belastet [1]. Die nominellen Dehnraten betragen dabei quasistatisch  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  und bei 9 m/s in der Komponenten-Crashanlage  $18 \text{ s}^{-1}$ .

Die in Bild 10 als Kraft-Weg-Diagramme dargestellten Ergebnisse zeigen den für Stauchversuche charakteristischen Kurvenverlauf. Zu Versuchsbeginn ist ein Kraftmaximum zu erkennen, das mit dem Beginn des Faltvorgangs korreliert, sowie ein

daran anschließender, um Werte von etwa 100 kN oszillierender Kraftverlauf. Die Ergebnisse der Versuche an der Komponenten-Crashanlage liefern, wegen der 20000-fach höheren Belastungsgeschwindigkeit, erwartungsgemäß mit rund 350 kN eine höhere Maximalkraft, als bei quasistatischer Belastung mit nur 190 kN. Eine Abschätzung der dynamischen Maximalkräfte aufgrund der gemessenen quasistatischen Maximalkraft und der Dehnratenabhängigkeit der  $R_{p0,2}$ -Werte nach Bild 7 würde für den Crashtest zu 250 kN bzw. zu 300 kN bei Bi-Potenzansatz führen und damit nicht ganz die gemessenen 350 kN voraussagen können, so dass zusätzlich auch materialunabhängige, strukturbedingte Einflüsse von Trägheitseffekten bei der dynamischen Faltenbildung zu berücksichtigen sind, wie es in Crashsimulationen mit Berücksichtigung von Massenträgheitskräften auch geschieht.

Zum Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen wurden bei Volkswagen AG für die axialen Stauchversuche Crashsimulationen mit PamCrash durchgeführt und dabei die für H260LAD nach dieser Richtlinie bestimmten, dehnratenabhängigen Werkstoffkennwerte verwendet. Die in der Simulation ermittelten Bauteilverformungen, die beispielhaft unter Verwendung von quasistatisch bzw. dynamisch bestimmten Werkstoffeigenschaften erzielt wurden, zeigen schon qualitativ große Unterschiede (siehe Bild 11). Die Berechnung für die statische Belastung unter Verwendung der quasistatisch bestimmten Kennwerte liefert - bei gleicher Energieeinbringung - eine wesentlich größere Verformung als die Berechnungen für den Crashtest mit den dynamischen Kennwerten und mit feinen Netzen (2,5 mm Kantenlänge). Insgesamt liefert die Berechnung mit den richtigen, den jeweiligen Dehnraten entsprechenden Kennwerten eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Kraftverläufen (Bild 10). Insbesondere wird für die Stauchversuche das erste Kraftmaximum (abgesehen von Aufschlagimpulsen) in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen berechnet, sofern die für die jeweilige Belastungsgeschwindigkeit relevanten, nach der FAT-Richtlinie bestimmten Werkstoffkennwerte in der Simulation verwendet werden (Bild 10).

## **Zusammenfassung**

Zur zuverlässigen Bestimmung von crashrelevanten, dehnratenabhängigen Werkstoffkennwerten für Crashsimulationen im Automobilbereich ist eine Richtlinie entwickelt und durch die Untersuchung von Demonstrator-Bauteilen validiert worden. Diese Richtlinie berücksichtigt und ergänzt verfügbare Prüfblätter für die Hochgeschwindigkeitsprüfung wie z.B. das Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1230 und ermöglicht es, in unterschiedlichen Laboratorien mit Hochgeschwindigkeits-Zugversuchen Einsatzbezogene und Werkstoffmodell-orientierte Crashkennwerte sowohl als Eingangsdaten für Crashsimulationen als auch für den Aufbau von Materialdatenbanken in einheitlicher, standardisierter Weise zu ermitteln und so eine abgesicherte Datenbasis für Automobilwerkstoffe zu erstellen. Die entwickelte Richtlinie trägt damit zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit künftiger Crashsimulationen bei. Für komplexe Beanspruchungen in realen Crashsituation ist diese Richtlinie künftig noch zu erweitern in Bezug auf die Berücksichtigung des Verformungs- und Schädigungsverhaltens unter mehrachsiger Beanspruchung, wie z.B. Druck- und Scherbeanspruchung.

## **Danksagung**

Die beteiligten, Fraunhofer-Institute IWM und EMI, danken der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), Dr. Preißer, für die Bereitstellung der finanziellen Förderung des Forschungsvorhabens, die aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto-von-Guericke“ e. V. (AiF) erfolgte. Gedankt wird auch den Mitgliedern des FAT-Arbeitskreises AK27 FE-Simulation, UA Crash und Insassensimulation, für die wissenschaftliche und organisatorische Begleitung des Forschungsvorhabens sowie den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses: Dr. H. Liebertz (Volkswagen AG), Dipl.-Ing. R. Franke und Dipl.-Ing. A. Zovi (Aluminium Rheinfelden GmbH), Dr. H. Werner (BMW AG), Dr. M. Hörmann (CAD-FEM GmbH), Dr. M. Feucht und Dipl.-Ing. Th. Frank (DaimlerChrysler AG), Dr. Th. Münz (DYNAmore GmbH), Dr. P. Du Bois (Ing. Büro Du Bois), Dr. H. Gese (MATFEM) für das Engagement und die gewährte Unterstützung. Unser besonderer Dank gilt Herrn Dr. Liebertz (Volkswagen AG) für die zur Verfügung gestellten Demonstratorbauteile und die detaillierten Crashsimulationen dazu.



## Literatur

- [1] W. Böhme, M. Luke, J.G. Blauel, D.-Z. Sun, I. Rohr, W. Harwick: FAT-Richtlinie „Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation“, Fraunhofer IWM und Fraunhofer EMI, IWM-Bericht W 1/2007 bzw. EMI-Bericht I25/07 (2007)
- [2] E. Macherauch, O. Vöhringer: Das Verhalten metallischer Werkstoffe unter mechanischer Beanspruchung, Z. für Werkstofftechnik (1978) Bd. 9, S. 370-391
- [3] H. Liebertz, S.-P. Scholz: Einfluss von Werkstoffkennwerten auf die Simulation von Bauteilbeanspruchungen, 1. Freiburger Workshop zum Material- und Strukturverhalten bei Crashvorgängen am 24./25.04.2001, Tagungsband *crashMAT* (2001)
- [4] H. Werner, E. Gholami: Einsatz von Materialien in der Crashsimulation - Stand der Technik und Herausforderungen für die Zukunft, 1. Freiburger Workshop zum Material- und Strukturverhalten bei Crashvorgängen am 24./25.04.2001, Tagungsband *crashMAT* (2001)
- [5] M. Feucht, D.-Z. Sun, T. Frank: Regularized damage modelling for failure prediction of automotive steel components under crash loading, Proceedings 5th Int. Conference on Computation of Shell and Spatial Structures, Salzburg, Austria, Eds.: E. Ramm, W.A. Wall, K.-U. Bletzinger, M. Bischoff (2005)
- [6] W. Böhme, D. Z. Sun, W. Schmitt, A. Hönig: Application of Micromechanical Material Models to the Evaluation of Charpy Tests, ASME Symposium: Advances in Local Fracture/Damage Models For The Analysis of Engineering Fracture Problems, Scottsdale, Arizona, April 28 - May 1, 1992, Eds.: J. H. Giovanola and A. J. Rosakis, AMD Vol. 137, Book No. H00741 (1992) pp. 203-216
- [7] W. Dahl: Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf Festigkeit und Bruchverhalten von Stählen, 24. Sitzung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge: Bruchvorgänge unter hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten, Aachen, Tagungsband, DVM, Berlin, (1992) S. 7-31
- [8] W. Böhme, J.G. Blauel: Werkstoffkennwerte für die rechnerische Simulation von Crashtests, Fraunhofer IWM, Freiburg, Jahresbericht (2001)

- [9] E. Roos, U. Mayer: Ermittlung von Fließkurven an Blechen bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten, Materialprüfung 44 (2002) S. 176-178
- [10] W. Böhme, M. Luke: Dynamische Kennwertermittlung und Bauteil-Crashtests, Fraunhofer IWM, Freiburg, Jahresbericht (2003)
- [11] W. Bleck, P. Larour, A. Bäumer, J. Noack: Einflüsse der Messtechnik auf die Ergebnisse von Hochgeschwindigkeitszugversuchen, Tagungsband Werkstoffprüfung 2004, Neu-Ulm, DGM, Ed.: M. Pohl, Werkstoffinformationsgesellschaft, Frankfurt (2004) S. 45-54
- [12] R. Häcker, P. Wossidlo: Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit im Zugversuch auf die Anforderungen an die Messtechnik und auf das Probenverhalten, Tagungsband Werkstoffprüfung 2004, Neu-Ulm, DGM, Ed.: M. Pohl, Werkstoffinformationsgesellschaft, Frankfurt (2004) S. 61-66
- [13] ESIS P7-00, Procedure for Dynamic Tensile Tests, European Structural Integrity Society, ESIS Procedures and Documents (2000)
- [14] SEP 1230, STAHL-EISEN-Prüfblatt 1230, Ermittlung von mechanischen Eigenschaften an Blechwerkstoffen bei hohen Dehnraten im Hochgeschwindigkeitszugversuch, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2006)
- [15] W. Böhme, M. Borsutzki, T. Döpmeier, R. Häcker, P. Larour, U. Mayer, St. Geisler: Ergebnisse eines VDEh-Ringversuchs zum Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1230 „Hochgeschwindigkeitszugversuche“, Tagungsband Werkstoffprüfung 2005, DVM, Berlin (2005) S. 181-188
- [16] W. Böhme, M. Borsutzki, R. Häcker, P. Larour, U. Mayer, St. Geisler: Zuverlässige Ermittlung von Kennwerten an Stählen bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten, Tagungsband DVM-Tag 2006, Berlin (2006) S. 53-62
- [17] W. Böhme, M. Hug: Vorrichtung zur schwingungsarmen Kraftmessung bei schnellen, dynamischen Zugversuchen an Werkstoffproben, Deutsches Patent: DE 10 201 861, Anmeldetag: 18.01.2002; Europäisches Patent: EP 1 466 157 B1, Veröffentlichungstag 03.08.2005 (2002)
- [18] E. El-Magd: Beschreibung des Fließverhaltens und der Versagensgrenzen, Tagungsband Werkstoffprüfung 2006, Bad Neuenahr, DVM, Berlin (2006) S. 1-6

# Bilder

Bild 1:

Beispiele für Rund- und Flachzugproben für Hochgeschwindigkeits-Zugversuche nach [1]

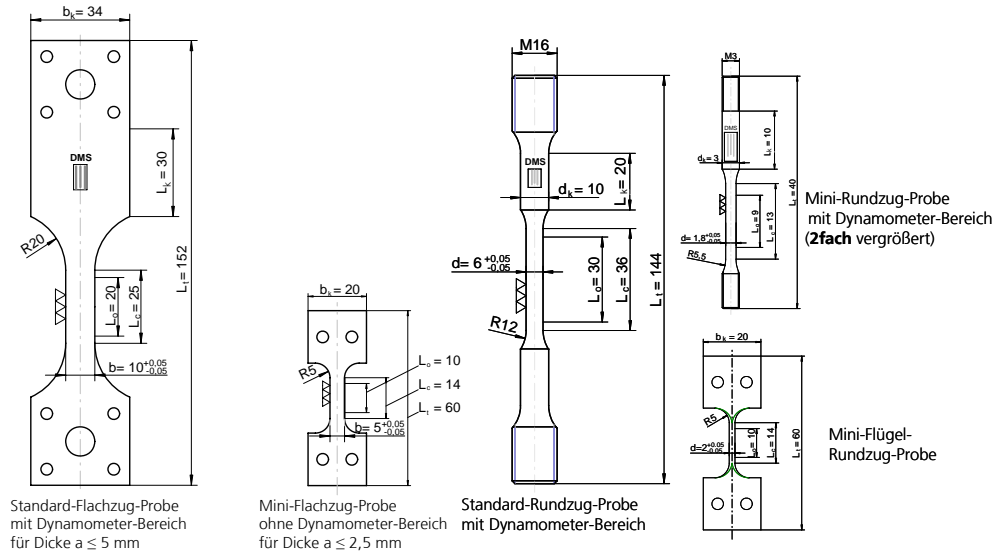


Bild 2:

Lokale, quasi-lokale und globale Kraftmessungen nach [10,17]

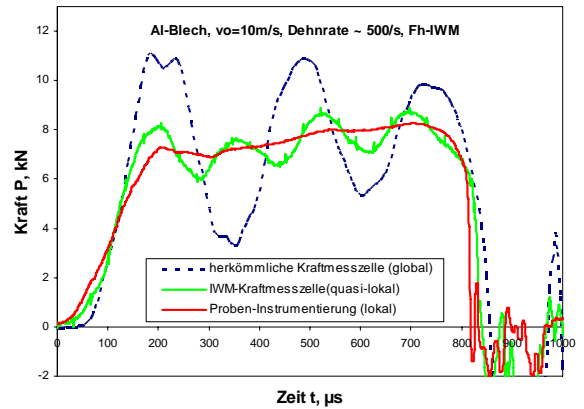
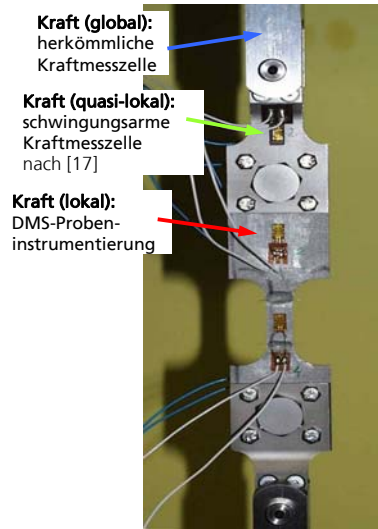


Bild 3:

Beispiel für eine im Hochgeschwindigkeitszugversuch bei einer Soll-Dehnrates von  $250 \text{ s}^{-1}$  bestimmte technische Spannungs-Dehnungskurve und der ermittelte Dehnratenverlauf für einen Dualphasen-Stahl; IWM-Beitrag zu SEP1230 (siehe auch: [15,16])

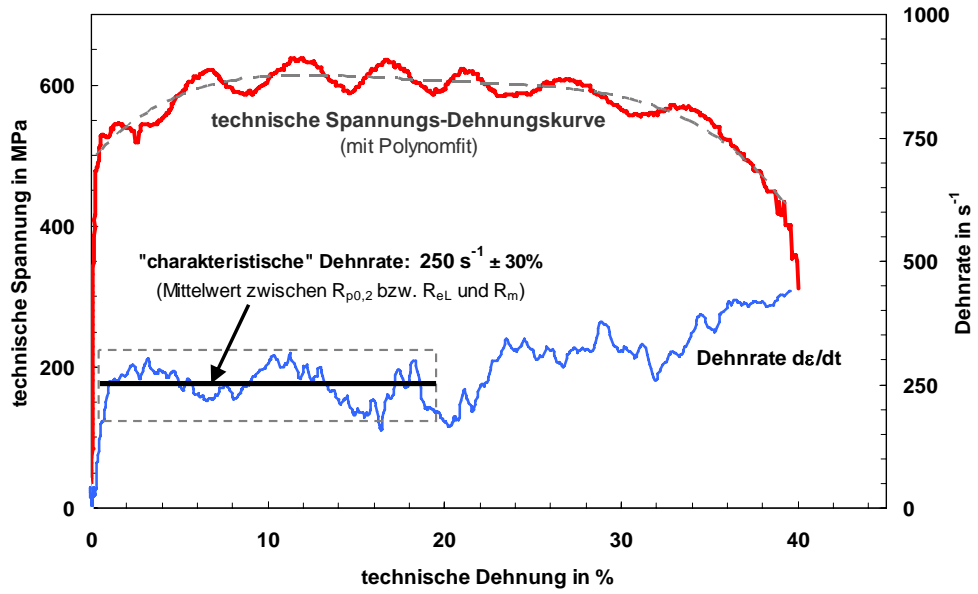


Bild 4:

Näherungsweise Bestimmung des  $R_{p0,2}$ -Wertes nach [1]

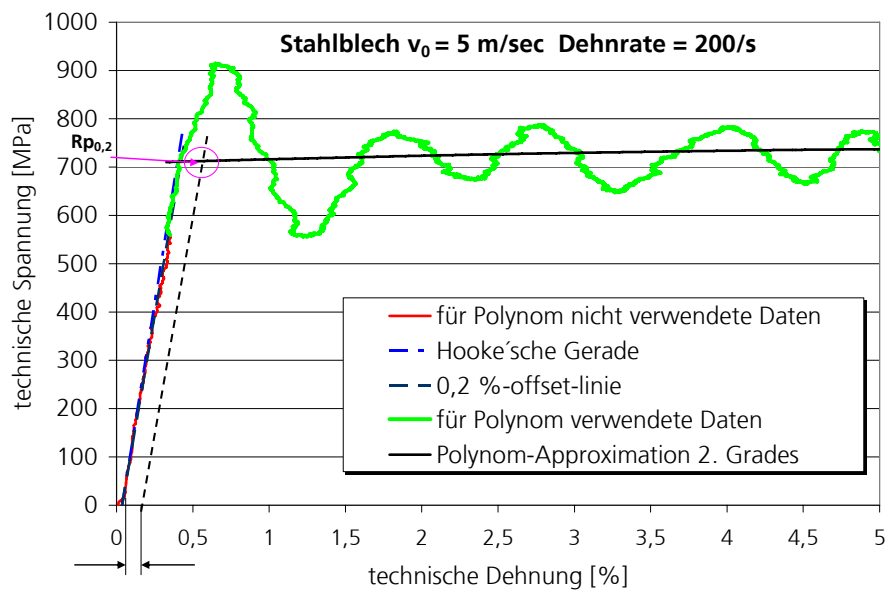


Bild 5:

Vorschläge zur Ermittlung vollständiger wahrer Spannungs-Dehnungskurven bei Flachzugversuchen nach [1]:

a) Interpolation zwischen Kraftmaximum und Kennwerten bei Bruch:

- - - quasistatisch  
 - - - dynamisch

b) Parallelverschiebung der quasistatischen Kurve zur (isothermen) Beschreibung des dynamischen Lastfalls: - - - -

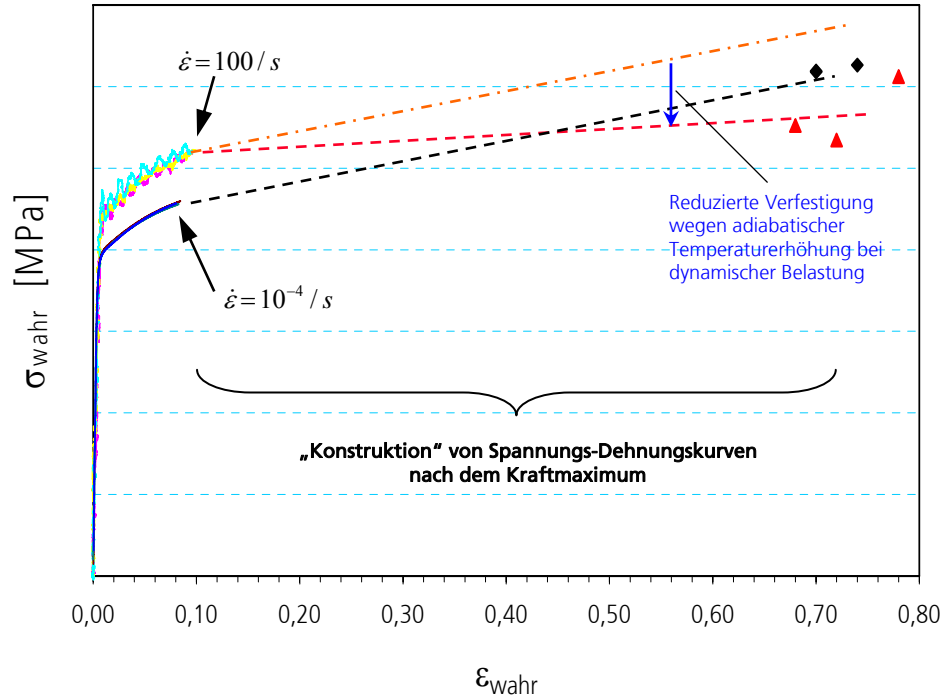


Bild 6:

Demonstrator-Bauteil für Crashtests und Entnahmepan für Mini-Flachzugproben für Hochgeschwindigkeitszugversuche nach [1]

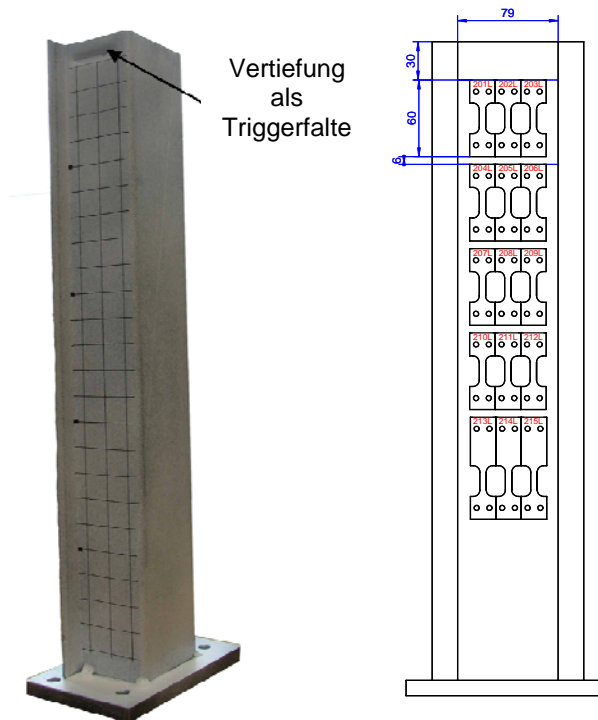


Bild 7:

Dehnratenabhängigkeit der Festigkeitskennwerte für H260LAD

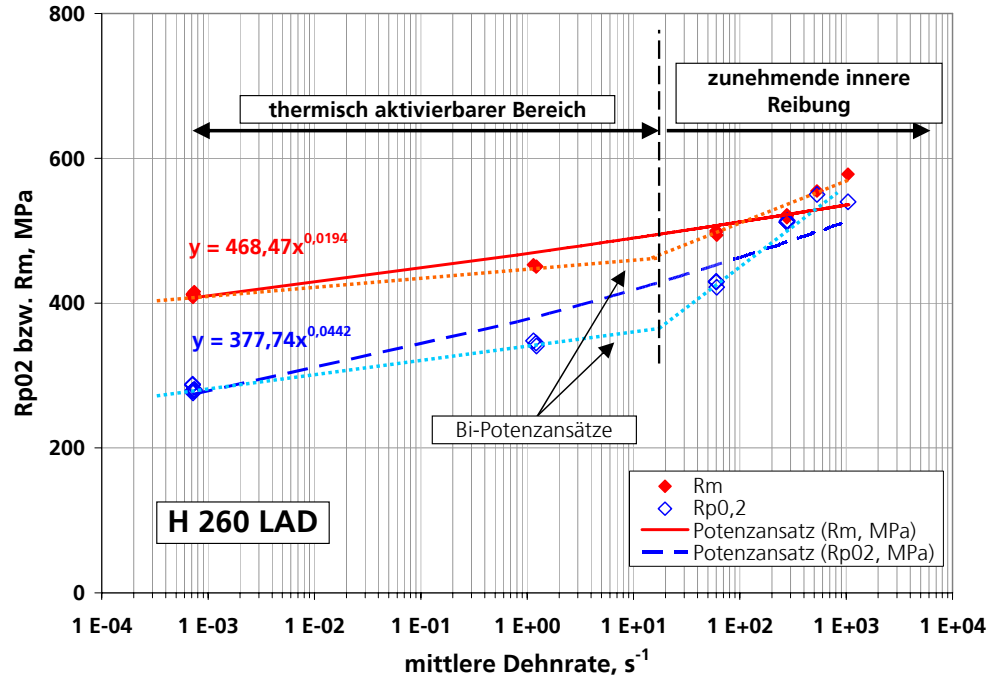


Bild 8:

Technische Spannungs-Dehnungs-Kurven für H260LAD

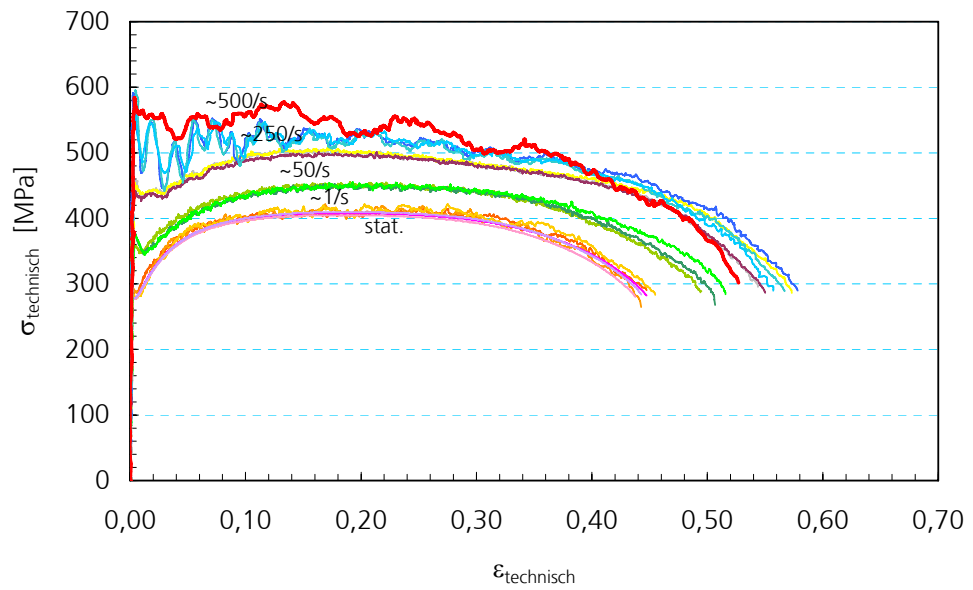


Bild 9:

Wahre Spannungs-Dehnungs-Kurven für H260LAD, hier mit linearer Interpolation zwischen  $R_m$  und dem Bruchpunkt

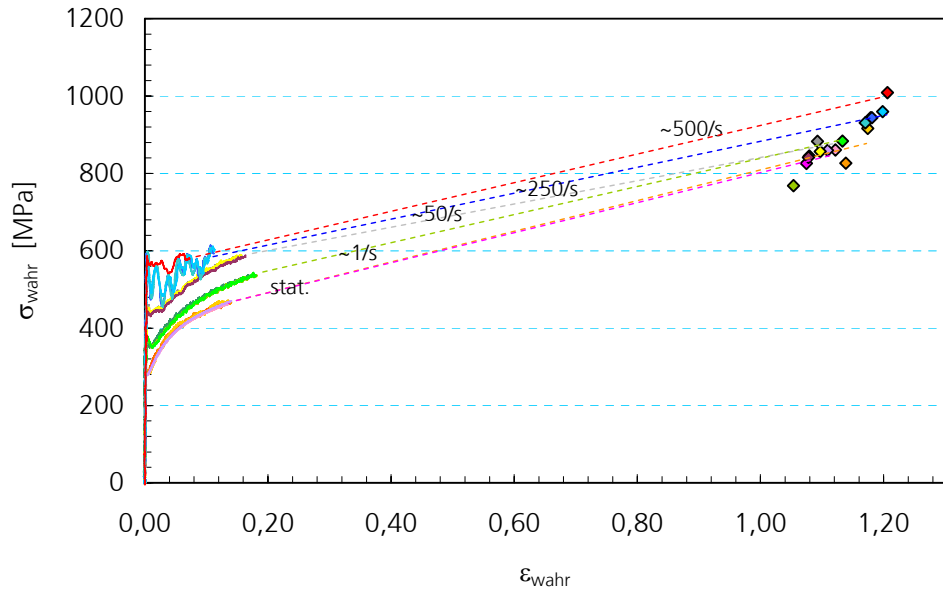


Bild 10:

Gemessene Kraftverläufe der quasistatischen und dynamischen Stauchversuche und Vergleich mit Ergebnissen von Crashtestsimulationen

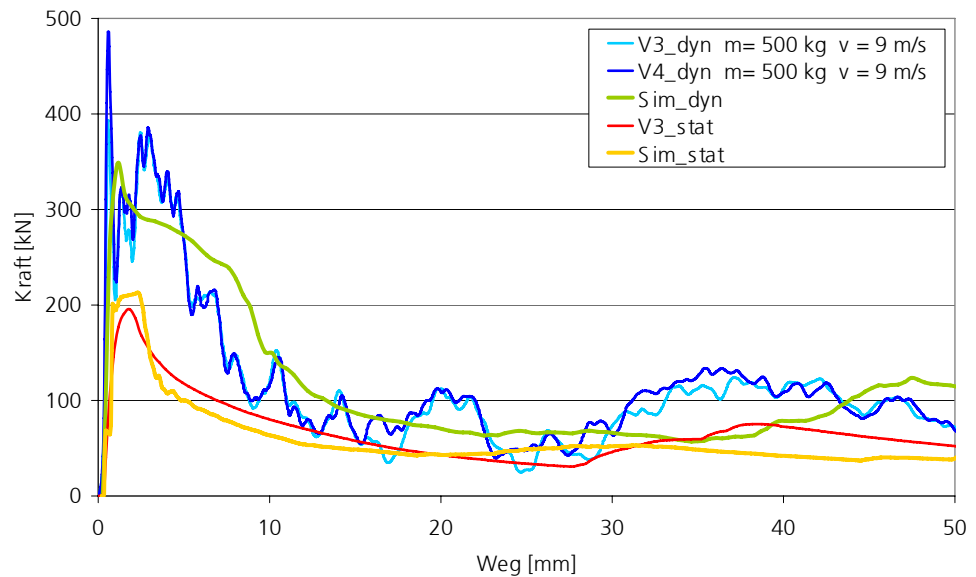


Bild 11:

Ergebnisse von Crashtestsimulationen mit quasistatischen bzw. dynamischen Werkstoffkennwerten und Vergleich mit dem Ergebnis eines dynamischen Stauchversuchs bzw. Crashtests bei 9 m/s

