

Untersuchung der Vorhersagegenauigkeit empirischer Modelle zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens über große Dehnratenbereiche

K. Dahmen, Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen, Aachen; Deutschland

W. Bleck, Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

B. Reichert, Faurecia Autositze GmbH, Stadthagen, Deutschland

Abstract:

FEM simulation to assess formability and crash performance is used increasingly in automobile industry in order to reduce development time of complete new vehicle models and platforms. The simulations give the finite deformation answer to loading conditions typically not only for forming but also for crash conditions. Reliable material data is one input covering description of mechanical behaviour under dynamic loading as well as in certain temperature ranges. Empirical derived models are used to extrapolate material data determined by experiment to ranges of strain, strain rate and temperature needed for the FEM simulations.

The potentials and limitations to represent strain rate dependence of flow curves over wide strain rate ranges of selected empirical derived models will be discussed for some typical steel grades in automobiles.

Keywords:

Fließkurvenmodellierung, große Dehnratenbereiche, Dualphasenstähle
Flow curve modelling, large ranges of strain rate. Dual Phase steels

1 Einleitung

Der quasistatische Zugversuch stellt ein Standardverfahren in der Werkstoffprüfung dar. Er ist unumstritten, wenn es darum geht, die elastischen und plastischen Eigenschaften eines Werkstoffes zu ermitteln. Im Zuge von immer weiter verkürzten Entwicklungszeiten neuer Modelle und Plattformen steigt in der Automobilindustrie der Bedarf an FEM-Simulationen. Sie dienen der Abschätzung des Verhaltens von einzelnen Strukturen oder ganzen Fahrzeugen unter Crashbelastung. Für eine möglichst realitätsnahe Vorhersage des Werkstoffverhaltens im Crash, werden verlässliche Informationen über die verwendeten Werkstoffe und ihr Verhalten unter dynamischer Beanspruchung benötigt. Dieses Thema ist Gegenstand intensiver aktueller Forschungen.

Ein großer Nachteil des quasistatischen Zugversuches ist, dass er in seiner Aussagefähigkeit für Fließkurven bis zur Gleichmaßdehnung beschränkt ist. Diese liegt je nach Werkstoff bei einer wahren plastischen Dehnung von etwa 0,3. Dahingegen benötigt die FEM aussagefähige Fließkurven bis mindestens eins. Dies ist nur durch die Verwendung von mathematischen Modellen möglich. Allerdings hat sich gezeigt, dass die Aussagegenauigkeit der Simulation signifikant von der Vorhersagegenauigkeit des verwendeten Modells abhängt. In der Fließkurvenmodellierung können zwei Arten unterschieden werden:

Empirische Modelle: Sie basieren auf einer rein mathematischen Beschreibung des beobachteten makroskopischen Werkstoffverhaltens mittels mathematischer Gleichungen, also auf a posteriori gewonnenen Erkenntnissen. Es fließen keine a priori Überlegungen zu metallphysikalischen Hintergründen der Beobachtungen in die Berechnung ein.

Mikrostrukturbasierte Modelle: Bei metallphysikalisch basierten Modellen hingegen werden a priori Überlegungen zu den Grundmechanismen des beobachteten Prozesses angestellt. Messungen werden lediglich zum Zweck des Ausgleichs von Unsicherheiten in der mathematischen Beschreibung, wie zum Beispiel der Selbstorganisation von Versetzungen, durchgeführt.

In diesem Beitrag geht es primär um die Modellierung des Werkstoffverhaltens über große Dehnratenbereiche mittels empirischer Modelle. Als untersuchte Modelle werden die Modelle von Johnson-Cook, Cowper-Symonds, Tanimura und FOSTA verwendet.

2 Dualphasenstähle

Dualphasenstähle zählen zu den mehrphasigen Werkstoffen. Sie bestehen aus einer weichen ferritischen Matrix, in der Martensit inselartig eingelagert ist. Auf Grund der Kombination einer harten Phase in einer weichen Matrix zeichnen sie sich durch eine gute Kombination zwischen Festigkeit und Umformvermögen aus. Diese Stähle werden beispielsweise in [Tho09] näher beschrieben.

3 Empirische Fließkurvenmodelle zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens über große Dehnratenbereiche

3.1 Johnson-Cook

Johnson und Cook entwickelten ihr empirisches Modell zu Fließkurvenberechnung im Jahre 1983. Es handelt sich hierbei um eines der bekanntesten und am weitesten verbreitete Modell. Mit Hilfe dieses Modells ist es möglich, sowohl Fließkurven in Abhängigkeit von der Temperatur oder der Dehnraten als auch aus der Kombination von beidem zu beschreiben. Ursprünglich wurde es entwickelt um das Verhalten oberhalb großer Temperaturen ($T > 0.5 \cdot T_m$) in einem breiten Dehnratenbereich zu beschreiben. Insbesondere zeichnet es sich durch seinen modularen Aufbau aus. Es kann wahlweise die Dehnraten- oder Temperaturabhängigkeit oder aber auch die Kombination aus beidem berechnet werden. Es basiert im Gegensatz zu vielen anderen Modellen auf einem multiplikativen Ansatz und nimmt ein lineares Verfestigungsverhalten an [Joh83], [Kha99].

$$\sigma_w = \left(A_J + B_J \varepsilon_w^{n_J} \right) * \left(1 + C_J \ln \dot{\varepsilon}^* \right) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_J^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (2)$$

mit:	A_J	= Fließgrenze
	B_J, C_J	= Materialkonstanten
	n_J, m_J	= Exponenten
	$\dot{\varepsilon}_J^*$	= dimensionslose plastische Dehnrate
	$\dot{\varepsilon}_0$	= quasistatische Referenzdehnrate

3.2 Tanimura

Im Gegensatz zu anderen mathematischen Modellen berücksichtigt das von Tanimura im Jahre 1992 [Tan92] formulierte Modelle Phänomene, wie eine negative Dehnratenabhängigkeit oder eine mit zunehmender Dehnung abnehmende bzw. konstante Verfestigungsrate. Bei der Entwicklung dieses Modells sollte das Verfestigungsverhalten präzise beschrieben werden, auch wenn dabei keine lineare Funktion zugrunde liegt. Dies erklärt den komplexeren Aufbau im Gegensatz zu den anderen hier beschriebenen Modellen. Es wurde speziell für große Dehnraten- und Temperaturbereiche entwickelt. Es soll laut seinem Verfasser auch Gültigkeit für schlagartige Beanspruchungen haben.

$$\sigma = (A_T + B_T * \varepsilon^{n_T}) + (C_T - D_T * \varepsilon^{m_T}) * \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) + (E_T * \dot{\varepsilon}^{k_T}) \quad (3)$$

mit:	A_T	= Fließgrenze
	B_T, C_T, E_T	= Materialkonstanten
	n_T, m_T, k_T	= Exponenten
	$\dot{\varepsilon}_0$	= quasistatische Referenzdehnrate

Die weiteren Terme beschreiben das Verhalten bei Raumtemperatur. Der Einfluss der Temperatur auf die Fließspannung wird durch die multiplikative Ergänzung eines Temperaturterms berücksichtigt, auf den an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird [Tan92].

3.3 Cowper-Symonds

Mit Hilfe des von Cowper und Symonds im Jahr 1958 postulierten Modells können dehnratenabhängige Fließkurven vorhergesagt werden. In der ursprünglichen Form ist kein Temperaturterm vorgesehen [Cow58].

$$\sigma_W(\dot{\varepsilon}) = (A_{CS} + B_{CS} * \varepsilon^{n_{CS}}) * \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{D_{CS}}\right)^{p_{CS}} \quad (4)$$

mit:	A_{CS}	= Fließgrenze
	B_{CS}, C_{CS}	= Materialkonstanten
	n_{CS}, p_{CS}	= Exponenten

3.4 FOSTA-Modell

Das im Rahmen des VDEh2 und 3 Projektes (P603 und P744) entwickelte Modell ist ebenfalls in der Lage eine temperatur- und dehnratenabhängige Fließkurve zu berechnen. Allerdings basiert die quasistatische Beschreibung nicht auf der Ludwik-Gleichung, sondern auf einer Gleichung des VOCE-Typs. Das FOSTA-Modell basiert spezifisch auf den Ansätzen von Mecking und Kocks [Mec81] bzw. Estrin und Mecking [Est84] und wurde von El-Magd et al durch das empirische Glied $C_2 \cdot \dot{\varepsilon}$ ergänzt [Sal07].

$$\sigma = C_1 + C_2 \cdot \dot{\varepsilon} + C_3 \left[1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{C_4}\right) \right]^n \quad (5)$$

mit: C_1 = Fließgrenze

$C_2; C_3, C_4$ = Materialkonstanten

n = Exponent (Hier wird durchgängig $n=1$ angenommen)

Die Dehnratenabhängigkeit wird durch Addition des folgenden Terms beschrieben.

$$C_g (\dot{\varepsilon}^m - \dot{\varepsilon}_0^m) \quad (6)$$

mit: C_g = Materialkonstante

$\dot{\varepsilon}_0$ = quasistatische Referenzdehnrate

m = Exponent

4 Ergebnisse und Diskussion

Den ersten drei Modellen ist gemein, dass die Beschreibung der quasistatischen Fließkurven über die von Ludwik im Jahre 1909 aufgestellte Gleichung beschrieben wird. Im FOSTA-Modell wird eine Gleichung des VOCE-Typs verwendet. Zunächst wird auf die Ergebnisse der Modellierung mittels des jeweiligen Originalmodells eingegangen. Die Anpassung erfolgt im ersten Schritt mit Hilfe des Newtonschen Tangentenverfahrens unter Minimierung der Summe der kleinsten Fehlerquadrate lediglich an die quasistatische Fließkurve. Im Anschluss daran werden unter gleichwertiger Gewichtung die drei höheren Dehnraten unter Anpassung der dynamischen Parameter gefittet. Die quasistatischen Kurven werden dabei nicht verändert! Anschließend erfolgt eine Substitution der quasistatischen Beschreibung durch Swift, Hockett-Sherby und FOSTA.

Als Werkstoff wird der HXT600X verwendet. Die Nennprüfdehnraten betragen 0,001, 1, 20 und 200s⁻¹. In Bild 1 sind die experimentellen Ergebnisse dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Fließkurve aus dem quasistatischen Zugversuch und die bei einer Dehnrate von 1s⁻¹ sehr dicht beieinander liegen.

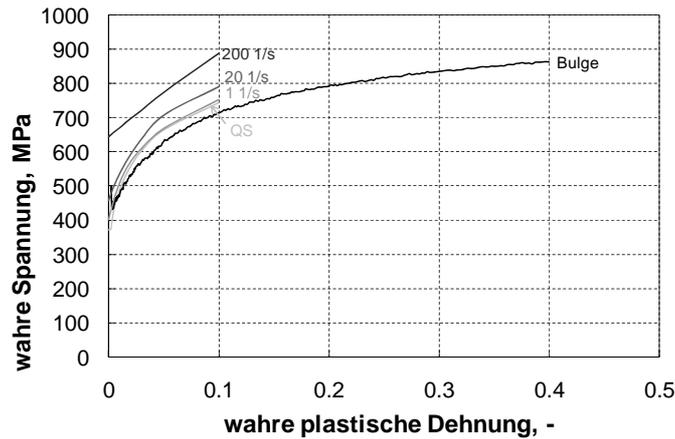


Bild 1: Experimentell ermittelte Fließkurven aus dem quasistatischen und dynamischen Zugversuch

Die nachfolgenden Bilder (Bild 2 bis Bild 5) zeigen die Modelle in ihrer Originalfassung.

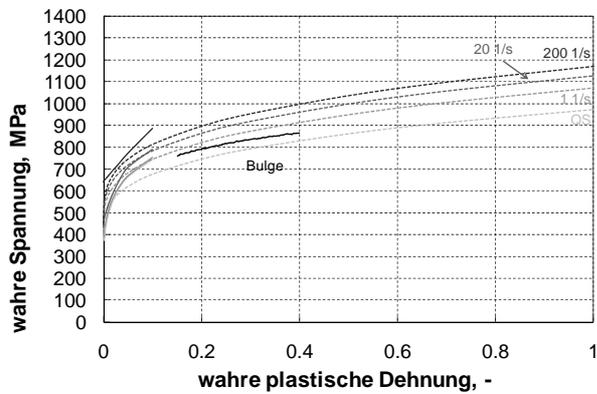


Bild 2: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach Johnson-Cook in der Originalfassung

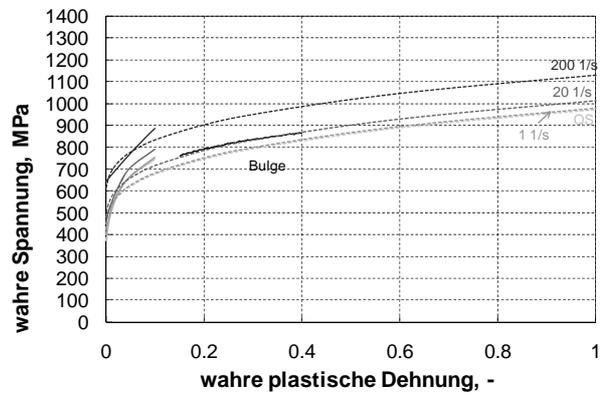


Bild 3: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach Tanimura in der Originalfassung

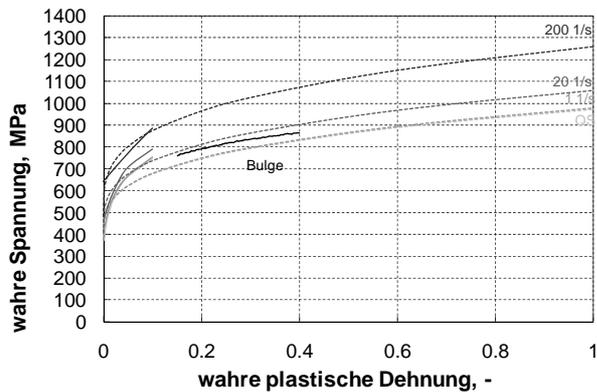


Bild 4: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach Cowper-Symonds in der Originalfassung

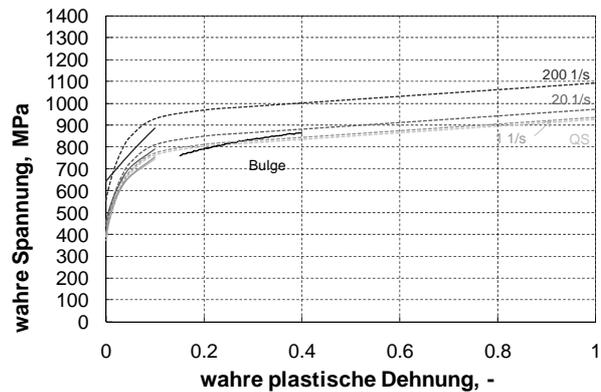


Bild 5: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach FOSTA in der Originalfassung

Eine Vorhersage des Werkstoffverhaltens mittels der vier Originalmodelle ist möglich. Auffällig ist, dass die unterschiedlichen Modelle das Verfestigungsverhalten unterschiedlich vorhersagen. Allerdings zeigt sich hier bereits, dass es allen Modellen schwer fällt, die quasistatische Fließkurve und die bei Dehnraten 1s^{-1} zu fitten. Dies ist allerdings auch nicht weiter verwunderlich, denn die Modelle würden eine positive Dehnratenabhängigkeit erwarten, die hier bei diesen beiden Dehnraten nicht erkennbar ist. Der Werkstoff folgt keiner modellhaften Logik, so dass dies auch im Fit mit zum Teil direkt beieinanderliegenden Kurven erkennbar ist. Tanimura weist die geringste Abweichung auf

und es gelingt mit diesem Modell auch die nicht modellhafte Logik der beiden geringsten Dehnraten zu fitten. Dies gilt auch für das FOSTA-Modell und Cowper-Symonds.

Mittels Johnson Cook gelingt noch eine leichte Auffächerung der Dehnraten. Allerdings gelingt es hier nicht, das dicht bei einander liegende Niveau zwischen den beiden langsamen Dehnraten wiederzugeben. Cowper-Symonds fächert die dynamischen Kurven deutlich weiter auf.

Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse für eine Substitution der Ludwik-Gleichung durch Swift (Bild 6 bis Bild 9) und Hockett-Sherby (Bild 10 bis Bild 14) für alle vier Modelle dargestellt. Die Beschreibung der Dehnratenabhängigkeit erfolgt über das jeweilige Originalmodell.

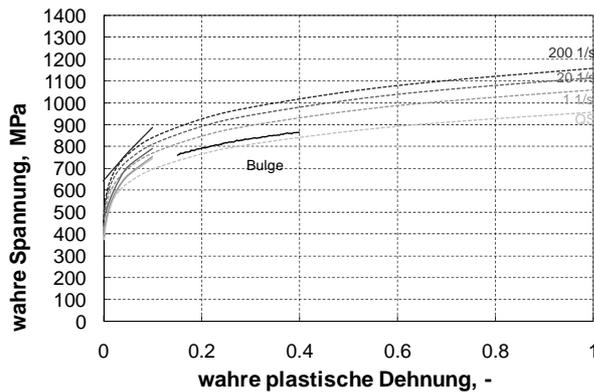


Bild 6: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach Johnson-Cook in Kombination mit Swift

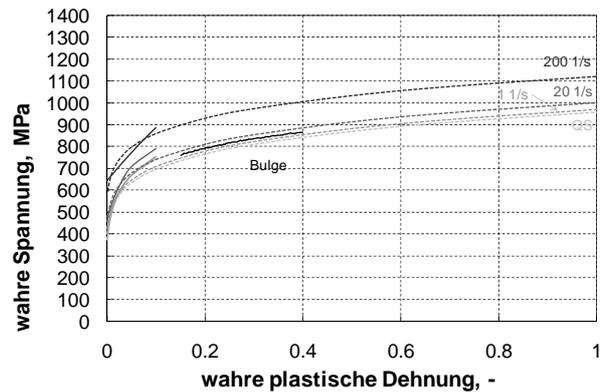


Bild 7: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach Tanimura in Kombination mit Swift

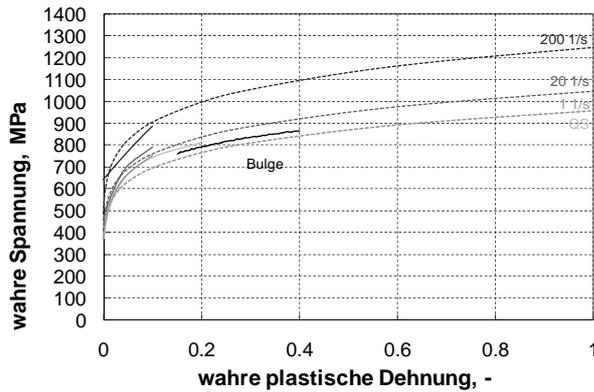


Bild 8: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach Cowper-Symonds in Kombination mit Swift

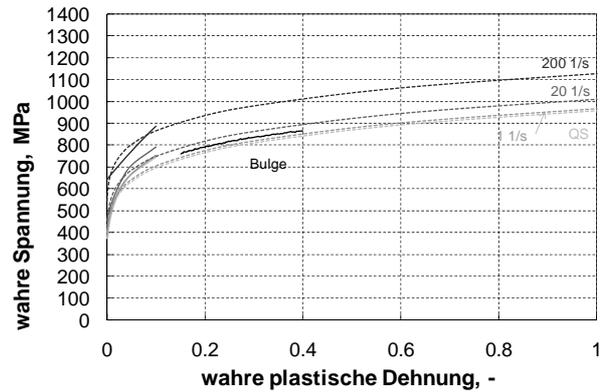


Bild 9: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach FOSTA in Kombination mit Swift

Auch in diesem Fall ist zu erkennen, dass mit Tanimura der beste Fit gelingt. Ansonsten zeigt sich, bis auf die Tatsache, dass der QS Zugversuch und der Bulgetest besser getroffen werden, ein ähnliches Bild wie bei den Originalmodellen. Auf Grund der hohen Anzahl an Parametern gelingt auch hier mit Tanimura der beste Fit. Hier zeigt sich insgesamt ein ähnlicher Verlauf wie bei Verwendung der Ludwik-Gleichung, da beide auf einem Potenzansatz basieren. Das Verfestigungsverhalten wird mehr oder weniger in höhere Dehnraten kopiert.

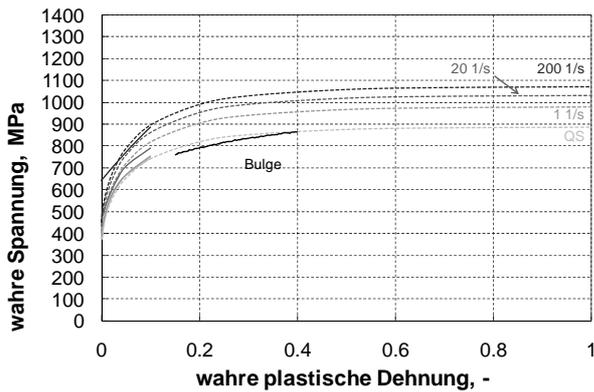


Bild 10: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach Johnson-Cook in Kombination mit Hockett-Sherby

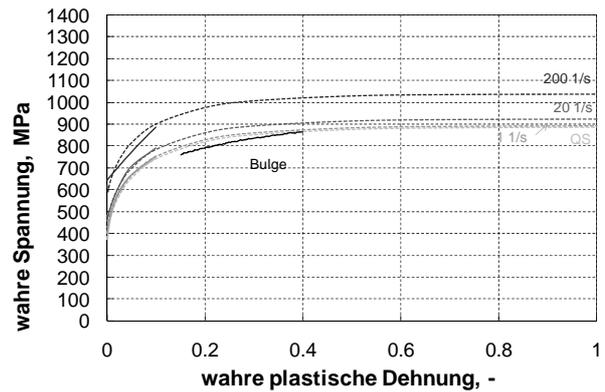


Bild 11: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach Tanimura in Kombination mit Hockett-Sherby

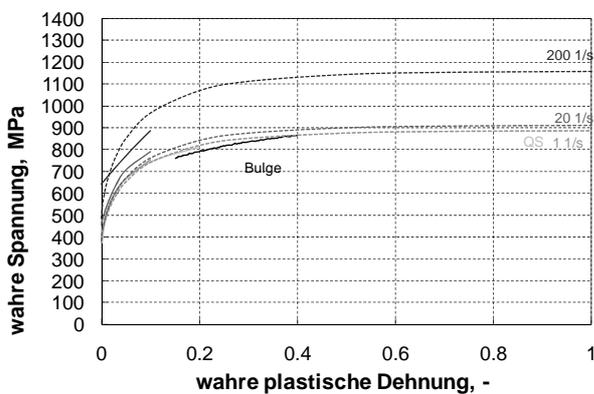


Bild 12: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach Cowper-Symonds in Kombination mit Hockett-Sherby

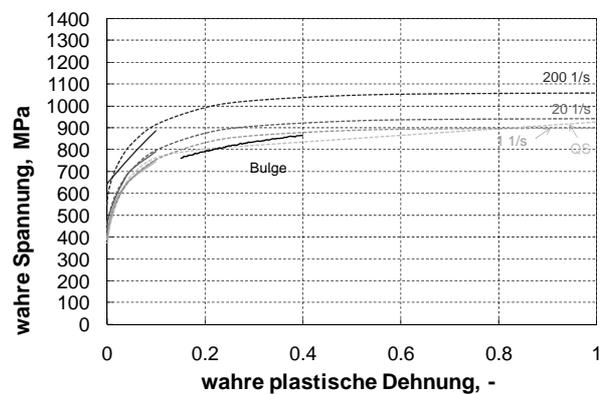


Bild 13: Experimentelle und berechnete Fließkurven für den Stahl HXT600X nach FOSTA in Kombination mit Hockett-Sherby

Für eine Kombination aus Hockett-Sherby und dem dynamischen Originalmodell zeigt sich hier, dass die quasistatische Fitfunktion zu einem flacheren Verfestigungsverhalten führt. Auch hier wird das quasistatische Verfestigungsverhalten annähernd zu höheren Dehnraten kopiert. Im Gegensatz zu Ludwik oder Swift liegt mit Hockett-Sherby ein Exponentialansatz vor.

Bei der Kombination aus Hockett-Sherby und FOSTA kommt es zu einem Kreuzen zwischen der quasistatischen Fließkurve und bei einer Dehnrates von 1s^{-1} . Solche Kurven stellen die FEM Programme vor Probleme.

5 Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass es mit Hilfe von empirischen Modellen möglich ist, die Dehnratenabhängigkeit eines Werkstoffes hinreichend genau zu beschreiben. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Vorhersagegenauigkeit rapide mit steigender Dehnrates abnimmt. Meist werden die ersten beiden Dehnrates noch gut berechnet. Vor allem bei der Crashberechnung ist aber auch die höchste hier untersuchte Dehnrates von Bedeutung. Tanimura liefert die genauesten Fits auch für die höchste Dehnrates. Die Ursache hierfür ist in der großen Anzahl Parameter zu sehen. Diese ermöglicht unter genauer Vorauswahl der Startwerte eine hohe Anpassungsgüte. Dazu sind allerdings geeignete Startwerte zu wählen.

6 Literatur

- [Cow58] Cowper, G. R., Symonds, P. S.: „Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams“, Brown University, applied mathematics report, 1958.
- [Est84] Estrin, Y., Mecking, H.: „A Unified Phenomological Description of work Hardening and Creep Based on One-Parameter Models“, Acta Metallurgica Volume 32 (1984), S. 57-70.
- [Sal07] Salomon, R. et al.: „Ermittlung des Werkstoffverhaltens und des Beschichtungseinflusses durch rechnerische Methoden zur Verkürzung der Entwicklungszeiten im Fahrzeugbau mit Stahl“, FOSTA Abschlussbericht; Düsseldorf, 2007.
- [Joh83] Johnson, G.H.; Cook, W.H.; Proc. 7th Int. Symp. of Ballistics The Haag (1983), S. 541.
- [Kha99] Khan, A. S.; Riqiang L.: „A critical review of experimental results and constitutive Models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures“, International Journal of Plasticity, Vol. 15 (1999), S. 963-980.
- [Mec81] Mecking, H. and Kocks, U.F.: „Kinetics of Flow and Strain-Hardening“, „ Acta Metallurgica Volume 29 (1981), S. 1865-1875.
- [Sal07] Salomon, R. et al.: „Ermittlung des Werkstoffverhaltens und des Beschichtungseinflusses durch rechnerische Methoden zur Verkürzung der Entwicklungszeiten im Fahrzeugbau mit Stahl“, FOSTA Abschlussbericht; Düsseldorf, 2007.
- [Tan92] Tanimura, S.: Proc. of Int. Symp. on Impact Engng. Vol. 1 (1992), S 17-26.
- [Tho09] Thomser, C.: „Modelling of the mechanical properties of Dual Phase steels based on microstructure“, Dissertation am IEHK der RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2009.