

Bewertungsmöglichkeiten und Grenzen der Werkstoffcharakterisierung für den Crash mit Hilfe von exemplarischen Crashprobekörpern

Bader, Mirko; Röttger Rolf

ThyssenKrupp Stahl AG, Duisburg, Deutschland

Abstract:

Zur Bewertung des Werkstoffverhaltens unter Lastbedingungen des Crashes wurden und werden in großem Umfang Fallturnversuche an verschiedenen Crashprobekörpern durchgeführt. Die Überführung dieser Versuchsergebnisse in eine skalare, werkstoffbezogene, jedoch geometrieunabhängige Bewertungsgröße ist seit langem Wunsch der Werkstoffentwickler und der Konstrukteure von Karosseriestrukturen.

In der vorliegenden Untersuchung wurde eine Bewertungsgröße mit einer zugehörigen, beschreibenden Funktion hergeleitet. Die Arbeit gliederte sich in eine teilanalytische Betrachtung, eine Parameterstudie mittels der FEM und der Auswertung einer größeren Versuchsdatenmenge. Anhand der teilanalytischen Betrachtung und der Simulationen wurde ein vereinfachter, technisch-anwendbarer, funktioneller Zusammenhang hergeleitet.

Die FEM bietet in diesem Zusammenhang die notwendige Voraussetzung, den komplexen Deformationsvorgang im Faltenbeulen nachzuvollziehen.

Um die Tragfähigkeit der Bewertung mittels Simulation überprüfen zu können, wurden einerseits die Einflussparameter aus Simulation und Versuch bewertet und andererseits Unterschiede zwischen Versuch und Simulation eingeschätzt.

Die Beurteilung der Einflussgrößen innerhalb der FEM zeigen, dass der Beschreibung des Materials ein wichtige Bedeutung zukommt, jedoch haben weitere Parameter, wie Elementansatz, Abbildung der Geometrie, Elementgröße und Blechdicke signifikante Einflüsse.

Mit Abschluss der Untersuchungen wird eine Crash-Last-bezogene Bewertungsgröße vorgestellt, der das Crash-Energie-Transformationsvermögen (kurz CET-Wert) beschreiben kann.

Die Bewertungsgröße ist entsprechend der Betrachtungen für Crashboxsysteme anwendbar.

Keywords: Crash, Werkstoffbeschreibung

1 Einleitung

Die Werkstoffcharakterisierung anhand von Bewertungsgrößen, richtet sich an dem Bedürfnis aus, komplexe Zusammenhänge vereinfacht darzustellen und nachvollziehbare Klassifizierungen zu ermöglichen. Ein Beispiel ist die Verwendung der technischen Streckgrenze $R_{p0.2}$, die den Übergang vom rein-elastischen zum elastisch-plastischen Fließen beschreibt. Tatsächlich liegt schon bei einem Spannungswert von $R_{p0.2}$, bedingt durch die Definition des Wertes, eine plastische Dehnung im Material vor. Für eine Festigkeitsbetrachtung liefert dieser Wert eine erste Auswahl von möglichen Werkstoffen. Sind im betreffenden Lastfall jedoch größere, plastische Dehnungen möglich, ist eine weiterführende nichtlineare FEM-Analyse unter Verwendung der Fließkurve notwendig. Für die Einschätzung der Crash-Energie-Absorptionsfähigkeit oder besser der Crash-Energie-Transformationsfähigkeit eines Werkstoffes zum Beispiel für ein Crashbox-System liegen bisher unterschiedlich definierte Bewertungsgrößen vor. Ein Beispiel dafür ist die Nutzung des Fließkurvenintegrals nach Formel (1). Die Verknüpfung dieser Bewertungsgröße mit den Versuchswerten aus den Fallturmversuchen wie der mittleren Stauchkraft „ \bar{F} “ oder dem absolvierten Stauchweg „ s “, sind teils gut und teils widersprüchlich.

$$I_{Ws} = \int_0 \sigma(\varphi) d\varphi \quad I_{Ws} : \text{Integralwert eines Werkstoffes (Ws)} \quad (1)$$

Bei der Verwendung des Fließkurvenintegralansatzes ergeben sich zudem mehrere Fragen, wie z.B.:

- Wie wird die Dehnratenverfestigung bewertet?
- Wie ist die obere Integrationsgrenze zu definieren?
- Wie ist die eigentliche statistische Dehnungsverteilung am deformierten Crashkörper?

Anhand der Fragen ist nachzuvollziehen, dass die Nutzung des Fließkurvenintegrals eingeschränkt ist. Allen Beteiligten ist jedoch klar, dass der zu beschreibende Vorgang äußerst komplex ist, und dass eine möglicherweise zielführendere Bewertungsgröße von hohem Nutzen sein kann. Es wäre zum Beispiel eine verbesserte Werkstoffauswahl für den Crashbox-Bereich möglich, d.h. für Bereiche mit axialen Crashbelastungen, wodurch wir unsere Kunden deutlich besser im Entwicklungsprozess oder in Optimierungsprojekten (Kosten, Gewicht) unterstützen könnten.

Diese Arbeit soll einen Beitrag leisten, eine entsprechende Bewertungsgröße für das Faltenbeulen im Axialcrash zu entwickeln.

2 Vorgehen

Das Faltenbeulen eines Crashkörpers verläuft sehr komplex, weshalb die Untersuchung in drei spezielle Arbeitsabschnitte unterteilt wurde, um die Zusammenhänge zu entflechten und analysieren zu können:

1. Teilanalytische Betrachtung
2. Parameterstudie an verschiedenen Crashkörpermodellen
3. Vergleich zwischen Versuch und Simulation

Zusätzlich wurden in Punkt 3 verschiedene Materialmodelle analysiert und insbesondere die Dehnratenbeschreibungen mit den vorliegenden Materialdaten abgeglichen. In einer Übersicht in *Bild 1* wird die Verknüpfung der einzelnen 3 Arbeitsgebiete dargestellt.

Anhand der Versuche wurden einerseits die FE-Modelle abgeleitet und andererseits ein Ansatz für die teilanalytische Betrachtung gewonnen. Die FE-Modelle bildeten im Weiteren die Basis für die Parameterstudie. In der Parameterstudie wurde die vereinfachte Beschreibung des Crashversuchsergebnis überprüft und die einzelnen Koeffizienten bestimmt.

Zur Absicherung der Parameterstudie wurden einzelne Versuche mit Hilfe der vorhandenen FE-Modelle nachsimuliert und die Ergebnisse verglichen.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend Versuchsdaten mit Hilfe des funktionalen Zusammenhangs bewertet und die werkstoffspezifischen Bewertungsgrößen für den Axialcrash berechnet.

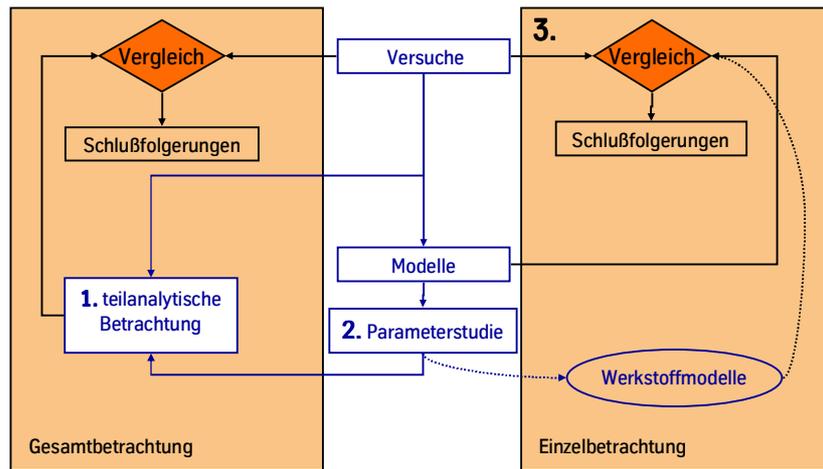


Bild 1 Struktur des Untersuchungsplanes mit den markierten drei Hauptaktionsfeldern

2.1 Teilanalytische Betrachtung

Seit ca. 30 Jahren wird an der teilanalytisch-empirischen Beschreibung der Ergebnisse von Crashversuchen an geschlossenen Profilen gearbeitet. Als wesentliche Basisarbeit ist die Veröffentlichung von Wierzbicki und Abramowicz [1] zu nennen. Einen guten Überblick liefert zudem die Veröffentlichung von Adam [2]. Ausgehend von dem vorliegenden Kenntnisstand wurde die Energieumwandlung als Basis für die Betrachtung gewählt, wobei der Fokus auf den Gesamtstauchweg gelegt wurde. Das hat den großen Vorteil, dass Schwingungseffekte, die zum Beispiel in der Stauchkraftmessung vorliegen, komplett ausgeblendet werden können.

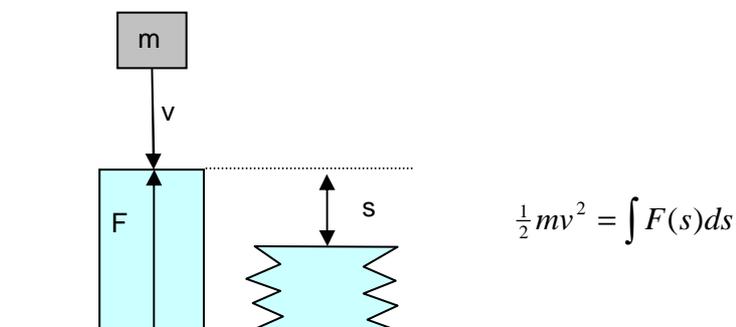


Bild 2 Physikalische Bezugsgrößen im Crash eines Probekörpers

Im Crashversuch wird die Energieumwandlung im Wesentlichen durch Deformationsvorgänge erzielt. Diese laufen unter verschiedenen Dehnraten, Dehnungspfaden und Temperaturen (durch Selbsterwärmung) ab. Da das Zusammenspiel der einzelnen Vorgänge sehr komplex ist, wurde der Versuch unternommen eine sehr einfache Betrachtungsweise anzuwenden. Dabei wurde die durchschnittliche Stauchkraft „ \bar{F} “ durch eine multiplikative Verkettung von Geometrie- und Werkstoffbeschreibung dargestellt:

$$\bar{F} = k_{ws}^* \cdot k_{Geo}^* \cdot t^p \quad (4)$$

Die Geometriebeschreibung wurde weiterhin in einen Formkoeffizient des Crashkörpers „ k_{Geo}^* “ und in eine Blechdickenbeschreibung „ t^p “ aufgegliedert. Der Exponent „ p “ ist von der Crashkörperform abhängig. Der Werkstoff wird durch den Koeffizienten „ k_{ws}^* “ beschrieben.

Mit Hilfe der teilparametrisierten FE-Modelle konnten ausgewählte Crashversuche zum Vergleich nachsimuliert werden.

2.3 Vergleich von Versuch und Simulation

Für den Vergleich wurden einzelne Vierkant- und Achtkant-Versuche ausgewählt und mit identischen Randbedingungen in den entsprechenden FE-Modellen nachgestellt. Diese Versuche wurden alle am hausinternen Fallturm durchgeführt. Neben den Kraft-Weg-Zeit-Daten wurden alle Versuche mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Erst durch den Vergleich von Filmaufnahme und Simulationsablauf war es möglich, Unterschiede korrekt zu analysieren.



Bild 4 Fallturm am Standort Dortmund der ThyssenKruppStahl AG; Im Vordergrund mit Aufzeichnungseinheit und Hochgeschwindigkeitskamera

Der erste Vergleich zeigte eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den Faltungskonturen und den Kraft-Weg-Verläufen zum Beispiel in den *Bildern 5 und 6*.

Es stellte sich jedoch weiter heraus, dass die FE-Simulationen mit den vordefinierten Standardeinstellungen gegenüber den Experimenten zu längeren Stauchwegen führten. Hierfür wurde ein Erklärungsversuch unternommen, der nachfolgend im Kapitel 3.5 kurz erläutert wird.

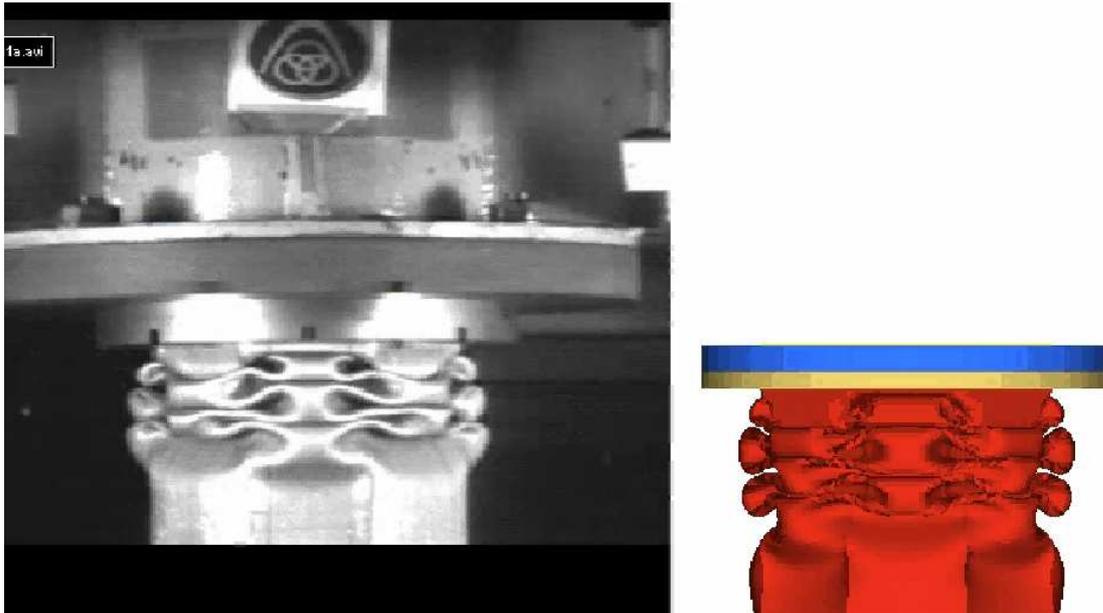


Bild 5 Vergleich zwischen den Faltungszustand des Versuchs und der Simulation für das Achtkant

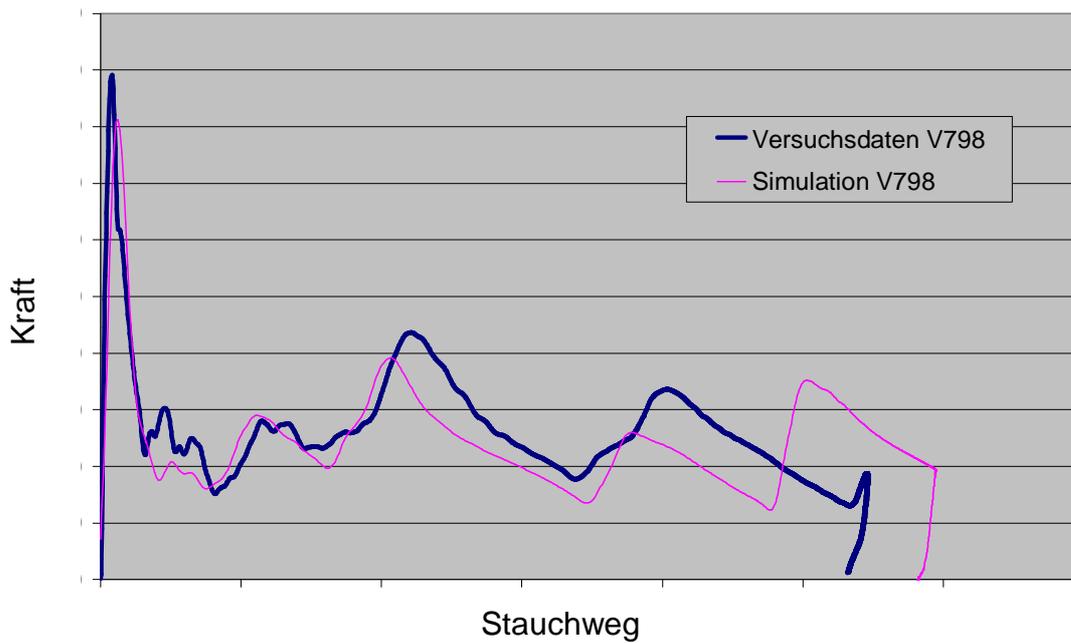


Bild 6 Vergleich zwischen Versuch und Simulation für einen Vierkant-Crashkörper

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden nur einzelne Aspekte der Untersuchungsergebnisse beispielhaft vertieft betrachtet.

3.1 Vergleich teilanalytische Betrachtung und Simulation

Auf Grundlage der Parameterstudie wurden die einzelnen Koeffizienten, wie Form- und Werkstoffkoeffizienten für die Formel (5) ermittelt. Die Abweichungen für die geometrischen Formkoeffizienten lagen bei ca. 3%. Für die Materialkoeffizienten wurden teilweise niedrigere Streuungen ermittelt. Der geometrieabhängige Blechdickenexponent „ p “ liegt für die verschiedenen, geschlossenen Probekörper zwischen 1.74 und 1.99. Damit wird ein fast quadratischer Einfluss der Blechdicke beschrieben. Wie gut die Übereinstimmung der Vorhersagen nach Formel (5) mit den Simulationsergebnissen ist, ist in *Bild 7* zu sehen. In dieser Abbildung sind absichtlich die Wertepaare im nichtlogarithmischen Diagramm dargestellt, um die geringen Abweichungen noch mehr zu verdeutlichen. Es ist zu betonen, dass für alle untersuchten Werkstoffe eine vergleichbare Übereinstimmung gefunden wurde.

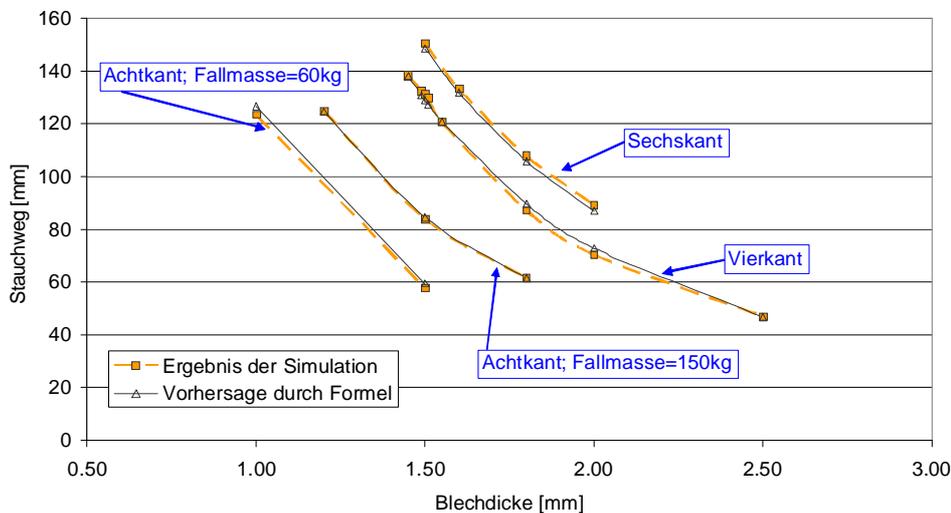


Bild 7 Vergleich zwischen der vorausberechneten Stauchhöhe und der Stauchhöhe aus der Simulation für den höherfesten Mehrphasenstahl RA-K 40-70

3.2 Interpretation von Versuchsergebnissen

Bisher war es relativ schwierig, Versuchsergebnisse unterschiedlicher Materialien oder Materialzustände bei ebenso unterschiedlichen Blechdicken zielgerichtet zu interpretieren. Nicht zu vernachlässigen ist dabei der statistische Streueffekt des Fallturnversuches, der eine formalistische Deutung der Ergebnisse erschwert hat. Unter Anwendung von Formel (5) wurde eine größere Menge an Versuchsdaten genutzt, um die werkstoffspezifischen Koeffizienten zu berechnen. Die darüber hinaus notwendigen Geometrie-Koeffizienten („ k_{Geo}^* “, „ p “) lieferte die voran beschriebene Parameterstudie. Nach der Bestimmung der Koeffizienten wurden die Versuchsergebnisse mit Hilfe von Formel (5) nachberechnet. Wie der Vergleich in *Bild 8* an zwei Materialzuständen zeigt, ist das Verfahren zielführend anwendbar. Die Ergebnisse werden hinreichend gut nachvollzogen und die Unterschiede im Werkstoffverhalten können quantifiziert werden.

Im Beispiel wird gezeigt, dass der IHU-(Innen-Hochdruck-Umformung)-umgeformte und damit relativ gleichmäßig vorverfestigte DP-K34/60 ein besseres Crashenergieabsorptionsvermögen aufweist als seine Ausgangsvariante. Dieses Ergebnis ist nicht unerwartet. Jetzt ist es aber möglich den Effekt der Vorverfestigung zu quantifizieren und das neue Niveau mit anderen, zum Beispiel höherfesten Güten, vergleichen.

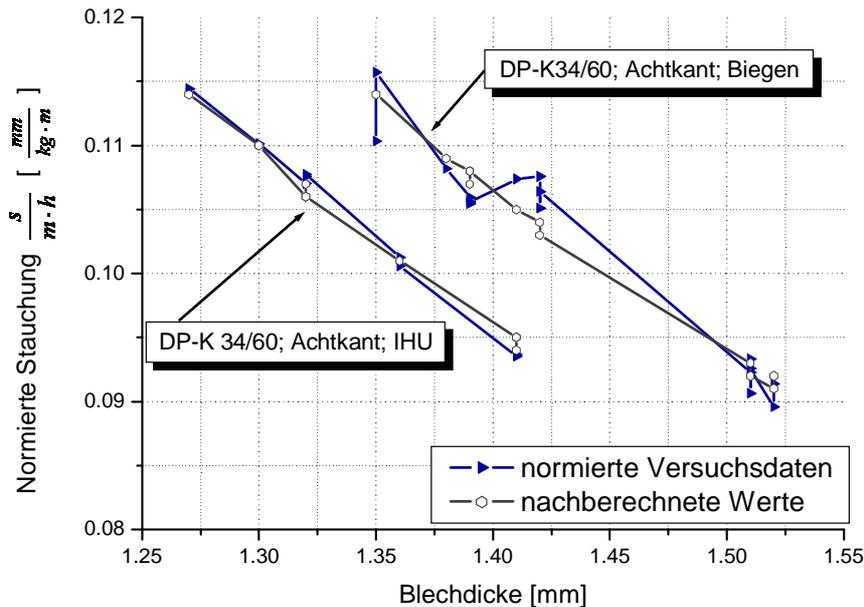


Bild 8 Versuchsdaten und deren Bewertung mit Formel (6); der Stauchweg ist um die Fallmasse und die Fallhöhe normiert; die Probekörper wurden mittels Biegen oder IHU (Innen-Hochdruck-Umformung, d.h. Erzielung einer höheren Vorverfestigung) hergestellt

An diesem Beispiel wird deutlich, dass auch der Werkstoffzustand, das heißt im Speziellen der Verfestigungsgrad, im werkstoffspezifischen Koeffizient mit abgebildet wird. Dieser Koeffizient, in Formel (6) noch mit „ k_{ws} “ bezeichnet, wird intern auch als CET-Wert bezeichnet. CET steht dabei für die **C**rash-**E**nergie-**T**ransformation - ein Maß, das die Effizienz der Energieumwandlung von kinetischer Energie in Wärmeenergie über Verformungsarbeit beschreibt.

3.3 Die Stauchgerade

Durch die ersten, positiven Erfahrungen mit der Bewertung von Versuchsergebnissen mit Hilfe der Formel (5) bzw. Formel (6) wird vorgeschlagen, mit Hilfe des sogenannten Stauchgeradendiagramms ein optimierte Werkstoffauswahl und Blechdicke bezüglich Crashlastfällen durchzuführen. Diese Bewertungen sind für Betrachtungen von crashenergieabsorbierende Bereichen zum Beispiel Crashboxsysteme und relevante Längsträgerbereiche anwendbar.

Im Stauchgeradendiagramm, wie in *Bild 9* schematisch dargestellt, kann entlang einer waagerechten Linie überprüft werden, wie sich eine Materialsubstitution auf die notwendige Blechdicke auswirkt. Es ist dem gegenüber auch ein entgegengesetztes Vorgehen möglich, das heißt, welches Material könnte ausgewählt werden, wenn ein bestimmter Spielraum für die Blechdicke vorliegt.

Weiterhin kann durch das Entlanglaufen an einer Werkstoffkurve überprüft werden, wie sich eine Blechdickenschwankung auf den resultierenden Stauchweg auswirkt.

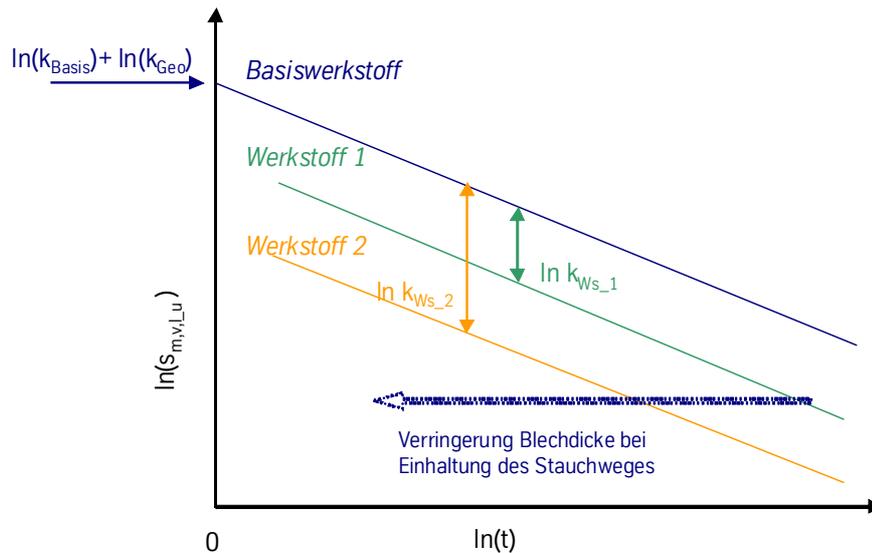


Bild 9 Verwendung des Stauchgeradendiagramms zur Optimierung der Werkstoffauswahl

3.4 Einfluss der Randbedingungen (FEM und Versuch)

Innerhalb von Materialkonzeptbewertungsphasen stellt sich immer wieder die Frage nach dem Einfluss einer Materialsubstitution, wobei oft die genutzten FE-Modelle in irgendeiner Weise nicht mehr im vollen Umfang dem Status entsprechen oder das schon fertige Produkt aus verschiedenen Gründen leichte Unterschiede zum FE-Modell aufweist. Aus diesem Grund wurde genauer analysiert, in welcher Wertigkeit die verschiedenen Parameter Einfluss auf das Berechnungsergebnis nehmen. Ein Parameter ist die Darstellung der Dehnratenabhängigkeit des Materials im FE-Materialmodell. Dabei sind mehrere Varianten möglich:

- ohne Dehnratenverfestigung
- mit Dehnratenverfestigung mit einem Interpolationsansatz
- mit Dehnratenverfestigung mit einem Interpolationsansatz und Dämpfungsfunktion in der Dehnratenrate (Viscoplasticity-Option in „Mat 24“)
- mit Dehnratenverfestigung mit einem Modellansatz nach Cowper-Symond

Die Berechnungen zeigten, dass dehnratensensitive Werkstoffe unbedingt mit einer Dehnratenverfestigung beschrieben werden müssen. Gleichzeitig ist der Wechsel der Verfestigungsbeschreibung vom Interpolationsverfahren zum Cowper-Symond-Modell genau zu überprüfen, da im Interpolationsverfahren die Fließkurve mit der höchsten Dehnratenrate die maximale Dehnratenverfestigung vorgibt, wogegen im Status des Cowper-Symond-Modells keine Dehnratenbegrenzung vorliegt. Ebenso ist die Korrektheit der Cowper-Symond-Beschreibung für höhere Dehnraten nicht nachgeprüft.

Die Verwendung der Viscoplasticity-Option stellt einen Sonderfall dar und wird vor allem zur Unterdrückung von numerischen Effekten genutzt. In der Studie zeigte sich ein deutlicher Einfluss dieser Option, wobei der Stauchweg verkürzt wurde.

In der Praxis wird oft das Interpolationsverfahren für die Dehnratenverfestigung genutzt. Im Materialmodell „Mat 24“ erfolgt diese Interpolation linear. Neben der linearen Interpolation ist auch eine logarithmische Interpolation denkbar. Aufschluss über die optimale Interpolationsvariante für die einfachen, hoch- und höchstfesten Feinstahlgüten gibt die Bewertung der Linearität der realen dehnratenabhängigen Kurven mit logarithmischer oder mit linearer Abszisse (Bild 10 und 11).

Es zeigt sich, dass die Werkstoffe im Bereich von $0.0005s^{-1}$ bis $10s^{-1}$ sehr dehnratensensitiv sind und deshalb in logarithmischer Darstellung die Dehnratenabhängigkeit hinreichend linear dargestellt werden. Oberhalb von $10s^{-1}$ ist eine rein lineare Interpretation der Abhängigkeit die zutreffendere. Beide Bereiche sind in den Abbildungen (Bild 10 und Bild 11) eingegrenzt. Dieses Ergebnis spricht für ein getrenntes Interpolationsverfahren. Bietet der Solver nicht diese Möglichkeit, ist eine vorangehende Generierung von Fließkurven zum Beispiel durch eine logarithmische Interpolation anwendbar

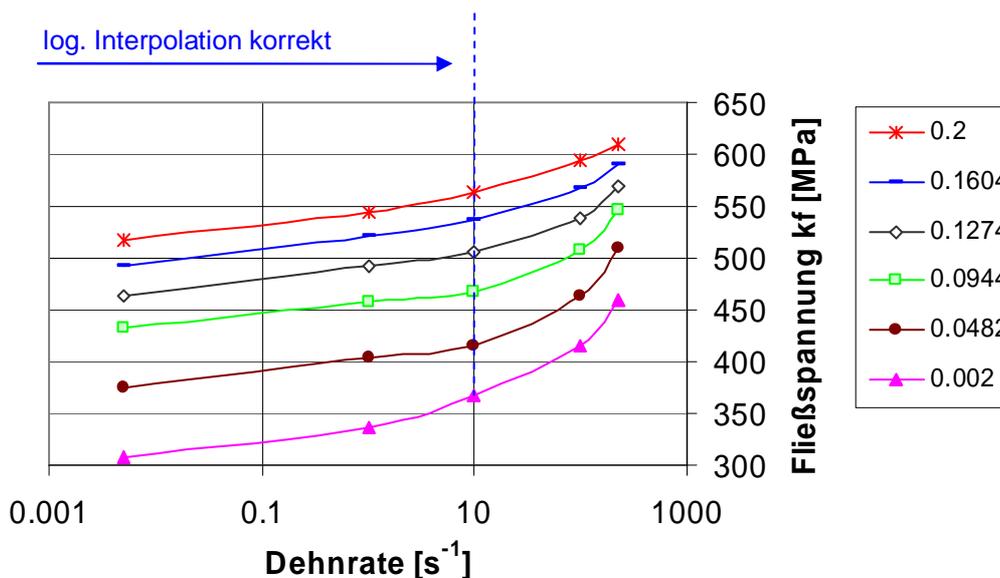


Bild 10 Einzelne Dehnratenabhängigkeiten für bestimmte, plastische Dehnungen, die als Bezeichnungen für die Kurven dienen. Die Daten stammen vom mikrolegierten H300LAD. Die Dehnrate ist logarithmisch aufgetragen.

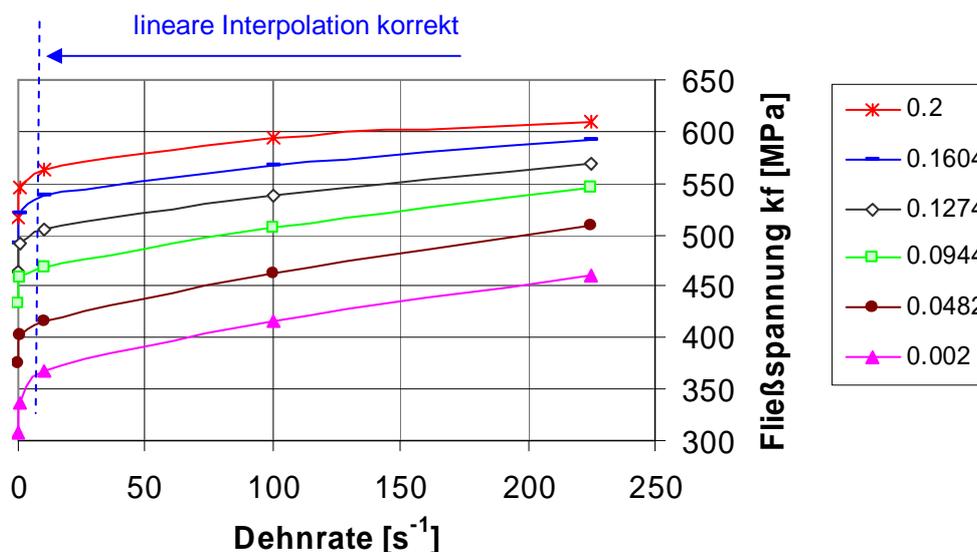


Bild 11 Einzelne Dehnratenabhängigkeiten für bestimmte, plastische Dehnungen, die als Bezeichnungen für die Kurven dienen. Die Daten stammen vom mikrolegierten H300LAD. Die Dehnrate ist linear aufgetragen.

Neben dem Dehnrateneinfluss wurden weitere Parameter untersucht, wie zum Beispiel, die Elementgröße, der Elementtyp, die Veränderung der Kantenradien der Crashkörper, Blechaufdickungen im Kantenbereich durch den Biegeprozess, Materialsubstitution und Blechdickenveränderung.

Es zeigt sich, dass die Festigkeit des Materials einen hohen Einfluss hat, jedoch zeigt die Blechdicke den stärksten Einfluss. Wird davon ausgegangen, dass die Blechdicke unverändert bleibt, ist trotzdem darauf zu achten, dass alle weiteren FE-Modellparameter nicht unzulässig verändert werden, wie die Beschreibung der Dehnratensensitivität, Ausblendung der Dehnrate, Nutzung spezieller Materialmodelloptionen, Elementkantengrößen, andere Kantenradien (reale Daten) und weitere.

Ein Beispiel ist der voran beschriebene Wechsel der Beschreibung der Dehnratensensitivität von einem Interpolationsverfahren zu einer Modellbeschreibung. Die qualitative Wertigkeit der Parameter ist zusammenfassend in *Bild 12* dargestellt.

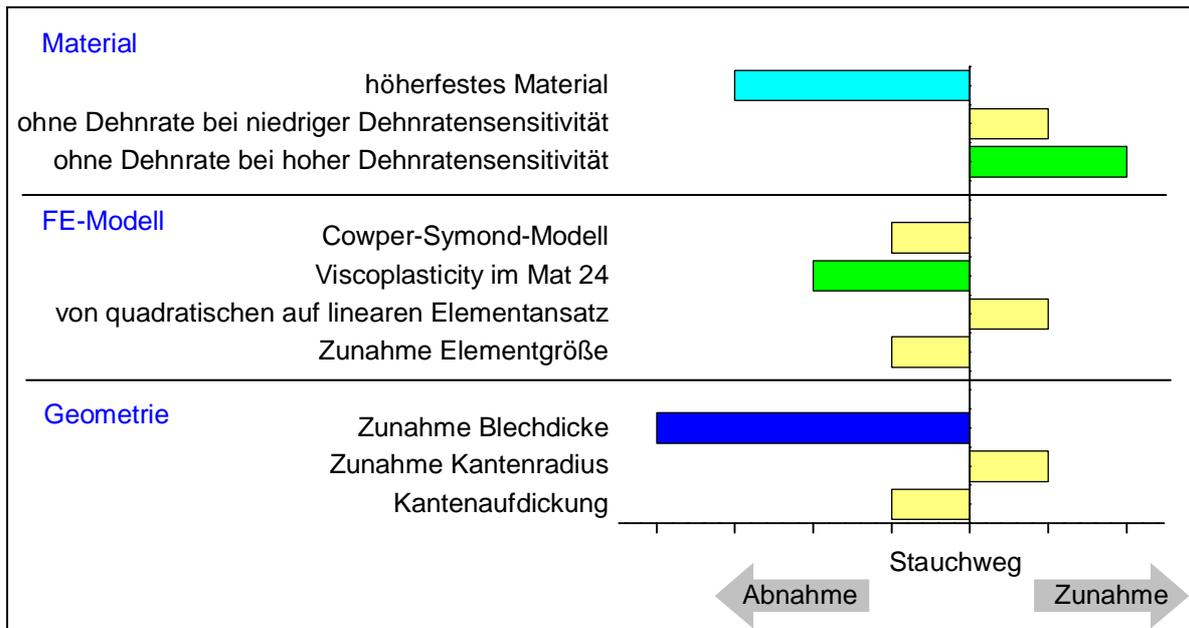


Bild 12 Wertigkeiten der verschiedenen Einflussgrößen auf den Gesamtstauchweg gegenüber einer Basisvariante (Elementgröße 3mm, Typ 16, Materialmodell 24, Dehnratenfließkurven bis 250s^{-1})

3.5 Grenzen der Simulation

Es zeigte sich im Vergleich von Versuch und Simulation, dass eine geringe Differenz in der Darstellbarkeit der Falte durch die FE-Simulation auftritt. Dieser Unterschied ist in erster Näherung vernachlässigbar, führt jedoch in der Summe tendenziell zu einer erhöhten Stauchwegberechnung. Durch die Verwendung des vollintegrierten, quadratischen Shell-Elementes Typ 16 und einer Elementkantenlänge von ca. 3mm wurde eine bestmögliche Abbildung des Problems vorgenommen. Nichtsdesto trotz wurden FE-Modelle mit noch kleineren Elementen erzeugt, um der These nachzugehen, dass allein die Elementgröße die Endform der Falte bestimmt. Diese These konnte jedoch so nicht bestätigt werden.

Durch die Anwendung eines ideal-plastischen Werkstoffverhaltens wurde ein signifikanter Effekt offensichtlich. Die Faltung des FE-Modells mit ideal-plastischen Werkstoffverhalten entsprach in der geometrischen Kontur wesentlich besser der Realität, natürlich unter Vernachlässigung des Gesamtstauchweges und Ausblendung des Kraftverlaufs.

Das heißt, wenn in einer Simulation korrekte Werkstoffdaten (mit plastischer Verfestigung) verwendet werden, werden in den Falten mit abnehmendem Faltenradius zunehmend zu hohe Spannungswerte berechnet. In stark deformierten Falten werden dadurch zu hohe Verfestigungen ausgewiesen, die wiederum die Faltenneubildungen begünstigen und die „komplette“ Ausformung der Falte behindern. Möglicherweise wird dadurch die Erhöhung des Stauchweges herbeigeführt.

4 Zusammenfassung

Innerhalb der Untersuchung ist es gelungen eine Bewertungsgröße und dessen beschreibende Funktion für das Crashenergieabsorptionsverhalten von Werkstoffen herzuleiten.

Für diese Bewertungsgröße wurde ein einfacher Zusammenhang zwischen dem Gesamtstauchweg und der Geometrie und dem Werkstoff gebildet. Mit Hilfe einer Parameterstudie wurde anschließend die Tragfähigkeit der vereinfachten Beschreibung des Axialcrashergebnisses an geschlossenen Profilen belegt, wichtig war dabei auch die Bewertung der Einflussgrößen aus Modell, Geometrie, Werkstoff und Werkstoffbeschreibung.

Für die Überführung der Modellbeschreibung erfolgte weiterhin ein Vergleich zwischen Versuch und FE-Simulation, wobei die Grenzen der Simulation offensichtlich wurden. Unter dem Gesichtspunkt dieser Grenzen ist es wichtig, eine komplette Einwertung der Werkstoffe für die Bewertungsgröße

nicht ausschließlich mit Hilfe von FE-Ergebnissen durchzuführen. Vielmehr zeigte es sich, dass es möglich ist, Versuchsergebnisse anhand des beschriebenen formellen Zusammenhangs zu analysieren und die werkstoffspezifische Bewertungsgröße zu bestimmen. Diese Bewertungsgröße kennzeichnet das Crash-Energie-Transformationsvermögen (CET) eines Werkstoffes unter den Bedingungen des Axialcrashs.

Die Methode ist erfolgreich für einzelne Werkstoffe an entsprechenden Fallturmversuchsergebnissen angewendet worden.

Mit dem formellen Zusammenhang ist es deshalb zukünftig in verbesserter Form möglich, Werkstoffsubstitutionen und Blechdickenveränderungen an Crashbox-verbunden Systemen durchzuführen.

5 Literatur

- [1] Wierzbicki, Tomasz; Abramowicz, Wlodek: „The mechanics deep plastic collapse of thin-walled structures“; Structural Failure; 1989
- [2] Adam, Henrik: „Untersuchungen zur Optimierung der Vorhersagbarkeit der Energieabsorptionseigenschaften von Karosseriestrukturen“; Schriftenreihe ika; Aachen; 1996