

Reproduzierbare Auswertung zur automatisierten Ermittlung der Rückfederung von Hutprofilen

Bernd-Arno Behrens, Anas Bouguecha, Tobias Götze, Tarik Hadifi, Christian Bonk
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
Leibniz Universität Hannover
30823 Garbsen, Deutschland
Email: bonk@ifum.uni-hannover.de

Kurzfassung – Für die Genauigkeit von Umformsimulationen spielt die Kenntnis über das elastische Rückfederungsverhalten von Werkstoffen eine entscheidende Rolle. Beim Tiefziehen von Hutprofilen treten Rückfederungseffekte besonders ausgeprägt auf, daher hat sich dieses Verfahren für die Bewertung des Rückfederungsverhaltens von Werkstoffen bewährt. Die Auswertung der Rückfederung ist bisher nicht standardisiert und unterliegt auch in der Methodik subjektiven Einflüssen durch den Anwender. In diesem Beitrag soll eine Methodik für eine reproduzierbare und automatisierte Auswertung der Rückfederung vorgestellt werden.

Schlüsselwörter: Blechumformung, Rückfederung, Hutprofil, Dualphasenstähle, mikrolegierte Stähle

I. EINLEITUNG

Insbesondere bei der Umformung von modernen hochfesten Stählen, deren Anwendungsbereich stetig wächst, treten hohe Rückfederungen auf. Bei diesen Stählen lässt sich das Rückfederungsverhalten durch eine einmalige Kompensationsberechnung nicht in allen Fällen beherrschen. Die schwankenden Bedingungen in der Produktion und der Herstellung dieser Stähle zwingt die verarbeitende Industrie zu immer ausgefeilteren Produktions- und Prozessauslegungsmethoden. Dabei hat sich die numerische Simulation als ein hervorragendes Werkzeug für die Prozessauslegung bewährt und ist in vielen Bereichen zu einem Standardwerkzeug geworden [1]. Um das Rückfederungsverhalten von Stählen zu bewerten und die Eingangsparameter für die numerischen Modelle zu ermitteln, hat sich das Tiefziehen von Hutprofilen als besonders geeignet erwiesen.

II. AUSWERTEMETHODIK

Für die Auswertung des Rückfederungsverhaltens werden häufig die in Abbildung 1 dargestellten Winkel (β_1 , ϕ_1 , ϕ_2 , ζ_1 , ζ_2) ermittelt. Dabei sind zunächst die repräsentativen Punkte (P_1 - P_{13}) zu ermitteln, welche die Basis für die Berechnung der Geraden g_1 – g_5 bilden. Für die Punkte P_1 , P_3 , P_8 , P_{11} und P_{13} gestaltet sich die Ermittlung einfach. P_1 und P_{13} sind die Anfangs- und Endpunkte der Hutkontur, P_3 , P_8 und P_{11} stellen die zwei Minima und das Maxima dar. Die Ermittlung der übrigen Punkte gestaltet sich schwieriger. Diese Punkte werden üblicherweise durch das Anlegen einer vertikalen Linie ermittelt. Dabei wird die vertikale Linie solange entlang der X-Achse verschoben, bis die augenscheinliche Position erreicht ist. Beispielsweise stellt der Punkt P_2 das Ende des linearen Bereichs im Flansch dar und wird von dem Anwender nach Augenmaß ermittelt.

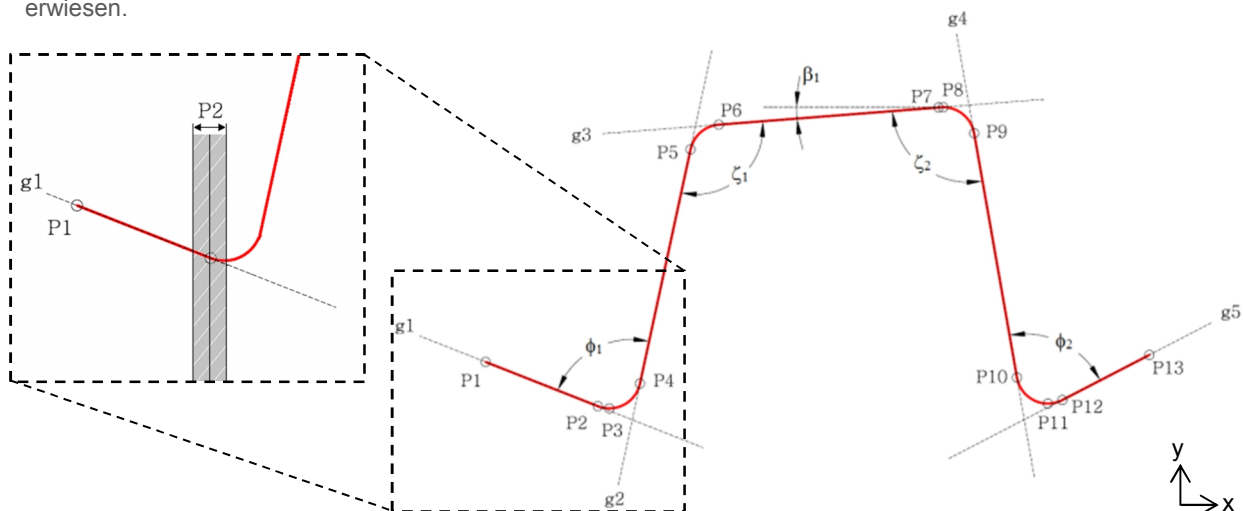


Abbildung 1: Repräsentative Punkte und Winkel für die Auswertung der Rückfederung von Hutprofilen.

Der grau gefärbte Bereich in Abbildung 1 verdeutlicht die Abweichung aufgrund subjektiver Einflüsse durch den Anwender. Somit ist eine reproduzierbare Ermittlung der Geraden bzw. Winkel nicht gewährleistet. Um diese Einflüsse zu umgehen und eine Automatisierung der Auswertung zu ermöglichen wurde am IFUM eine Methodik entwickelt und in Form eines Matlab-Skripts realisiert. Der Arbeitsablauf der Auswertung wird in Abbildung 2 verdeutlicht. Zunächst wird mit Hilfe einer taktilen Koordinatenmessmaschine das Hutprofil vermessen und in Form von X-Y Koordinatenpaaren digitalisiert. Nachfolgend werden die Koordinatenpaare in Matlab eingelesen und ausgewertet, die ermittelten Winkel werden abschließend in einer Excel-Datei gespeichert.

Die Methodik, die zur Ermittlung der Punkte und Winkel angewendet wird, soll an dieser Stelle näher erläutert werden. In Abbildung 3 ist ein typischer Verlauf einer Hutkontur dargestellt. Diese Hutkontur lässt sich mit Hilfe der Punkte P_3 und P_{11} in drei Bereiche einteilen, welche anschließend gesondert betrachtet werden. Für die Ermittlung des Punktes P_2 soll zunächst der Bereich I betrachtet werden, dessen Ende durch den Punkt P_3 definiert ist. Mit Hilfe des arithmetischen Mittels der Steigung im ersten Bereich kann eine sinnvolle Grenze für das Ende des linearen Bereichs im Flansch gefunden werden. Dabei wird eine Abweichung von mehr als 10 % vom arithmetischen Mittel ($\bar{m}_{10\%}$) für die Definition des Punktes P_2 verwendet (Abbildung 4). Dies gewährleistet eine reproduzierbare Ermittlung des Punktes P_2 . Eine analoge Vorgehensweise wird für den Bereich III und den Punkt P_{12} verwendet. Nun sind die repräsentativen Anfangs- und Endpunkte für den linken und den rechten Flanschbereich bekannt, somit kann mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine Gerade (g_1 sowie g_5) gefittet werden. Des Weiteren wird eine mittlere Abweichung der gefitteten Kurve von den Messpunkten berechnet, wodurch auch eine Abschätzung über die Welligkeit des Hutprofils möglich ist.

Zur Ermittlung der übrigen Punkte wird der zweite Bereich ausgewertet. Dabei wird der erste Wendepunkt der ersten Ableitung für die Definition des Punktes P_4 verwendet (Abbildung 5). Der Schnittpunkt einer waagerechten Geraden durch den Punkt P_4 mit dem Graphen der ersten Ableitung bestimmt den Punkt P_5 . Zur Validierung dieser Vorgehensweise wurde die erste Ableitung des Hutprofils für verschiedene Werkstoffe untersucht, diese zeigen alle einen charakteristischen Verlauf auf (Abbildung 6). Die Bestimmung der Punkte P_9 und P_{10} erfolgt auf die gleiche Weise. Das Fitten der Geraden g_2 und g_4 erfolgt wie im vorherigen Absatz für die Geraden g_1 und g_5 beschrieben.

Für die Ermittlung der Punkte P_6 und P_7 wird zunächst die Länge ΔL zwischen den Punkten P_5 und P_9 ermittelt (Abbildung 7). Der Mittelpunkt der Strecke ΔL stellt gleichzeitig den Mittelpunkt der Hutkontur dar, somit kann die Steigung an diesem Punkt der Hutkontur als repräsentativ für den Bodenbereich angenommen werden. Bei einer Abweichung der Steigung im Bodenbereich von 20 % der Steigung im Mittelpunkt werden die Punkte P_6 und P_7 definiert. Diese Vorgehensweise hat sich für alle betrachteten Werkstoffe als geeignet erwiesen.

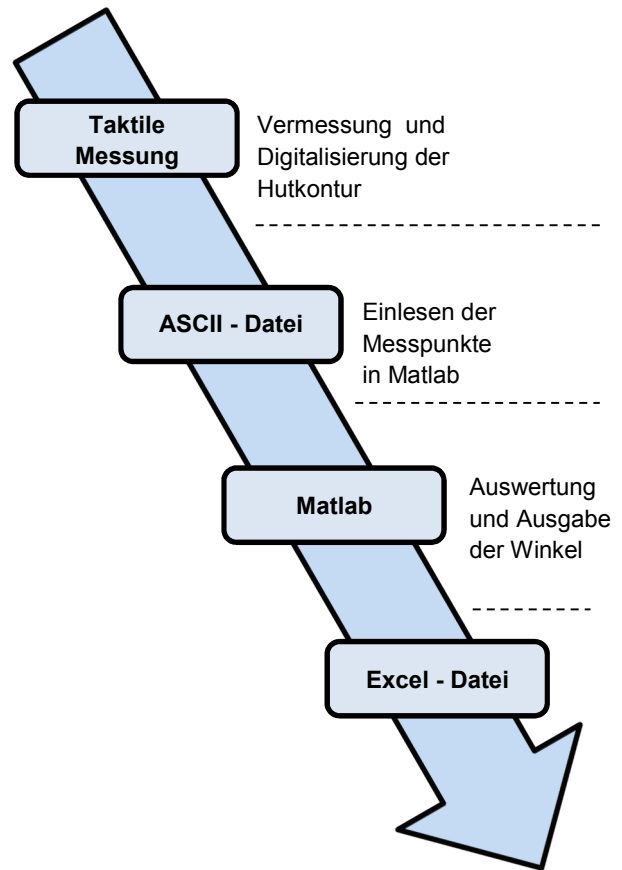


Abbildung 2: Prozessfolge für die automatisierte Auswertung der Rückfederung von Hutprofilen.

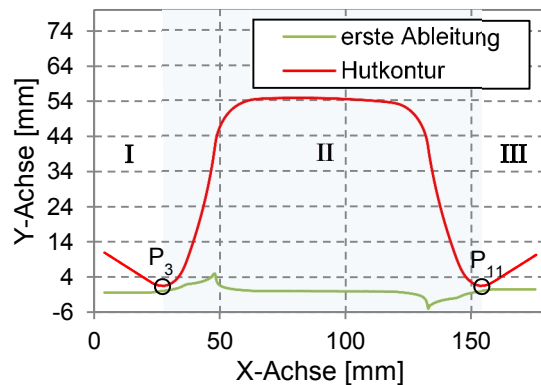


Abbildung 3: Einteilung der Hutkontur in die drei Bereiche I, II, III, sowie die erste Ableitung.

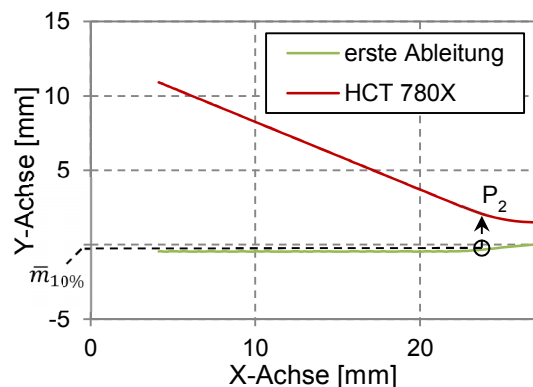


Abbildung 4: Bestimmung des Punktes P_2 im Bereich I.

III. Experimentelle Ergebnisse

Zur Bestimmung von Rückfederungseigenschaften und zur Validierung der Methodik wurden am IFUM Hutprofile tiefgezogen. Dabei wurden die Dualphasenstähle HCT980X, HCT780X, HCT400X, HCT 690T, HT600X, die mikrolegierten Stähle HC 340, HX 420, HX 300 und HX 260 sowie die Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn0,4 betrachtet (Abbildung 8). Dualphasenstähle zeichnen sich durch ihre aufeinander abgestimmten Gefügebestandteile von Ferrit und Martensit aus, wodurch sich eine besondere Eigenschaftskombination von hoher Festigkeit, niedrigem Streckgrenzenverhältnis und guter Kaltumformbarkeit ergibt. Sie eignen sich daher bevorzugt für Kaltumformungen mit höheren Streckziehanteilen. Bei den mikrolegierten Stählen handelt es sich um Stähle mit Titan- und/oder Niob-Legierung von max. 0,22 %. Die definierten Mindestwerte für Streckgrenze und Festigkeit werden durch Ausscheidungshärtung und Kornfeinung erreicht. Mikrolegierte Stähle werden bevorzugt für sicherheitsrelevante Teile eingesetzt [2, 3]. Die Aluminiumlegierung AlMg4,5Mn0,4 ist eine warm- und kaltaushärtbare Legierung mit guter Korrosionsbeständigkeit und erhöhter mechanischer Festigkeit, welche zudem eine gute Schweißbarkeit besitzt [4]. Aufgrund Ihrer guten mechanischen Belastbarkeit kombiniert mit der geringen Dichte, findet diese Legierung im Automobilbau zunehmend Anwendung und trägt dazu bei den Emissionsausstoß durch Gewichtseinsparung zu senken.

Somit wurde die Validierung der Methodik an einer großen Anzahl von Werkstoffen durchgeführt. Die Ziehtiefe betrug für alle Werkstoffe 60mm und die Niederhalterkraft wurde zwischen 90kN und 300kN variiert. Dabei wurde ein Ziehradius von 9mm gewählt. Zur statistischen Absicherung wurden jeweils 3 Versuche pro Parameterpaarung durchgeführt. Tabelle 1 zeigt das arithmetische Mittel sowie die Abweichung für die Rückfederung der einzelnen Winkel ($\beta_1, \phi_1, \phi_2, \zeta_1, \zeta_2$). Aufgrund der Symmetrie zeigen die Rückfederungswinkel für die Winkelpaare ϕ_1 und ϕ_2 sowie ζ_1 und ζ_2 geringe Unterschiede auf. Diese können auf die negativen Maschineneinflüsse wie Kippung und Versatz zurückgeführt werden. In Abbildung 9 ist ein exemplarischer Screenshot der Auswertemaske des selbstentwickelten Matlabtools zu sehen, es zeigt die Auswertung für den Stahl HX 300.

IV. Fazit

Es konnte für verschiedene Werkstoffe gezeigt werden, dass die Methodik zur Ermittlung der Rückfederungswinkel übergreifend anwendbar ist und aufgrund der mathematisch eindeutigen Beschreibung zu einer Reproduzierbarkeit der Auswertung führt. Somit ist eine exakte und vergleichbare Auswertung von Hutprofilen auch werkstoffübergreifend möglich und kann für zukünftige Rückfederungsuntersuchungen eingesetzt werden. Der hohe Automatisierungsgrad und die einfache Bedienung des Skripts führen außerdem zu einer schnelleren Auswertung der Hutprofile.

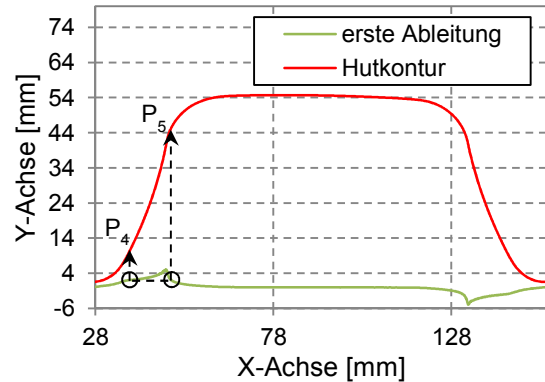


Abbildung 5: Bestimmung der Punkte P_4 und P_5 im Bereich II.

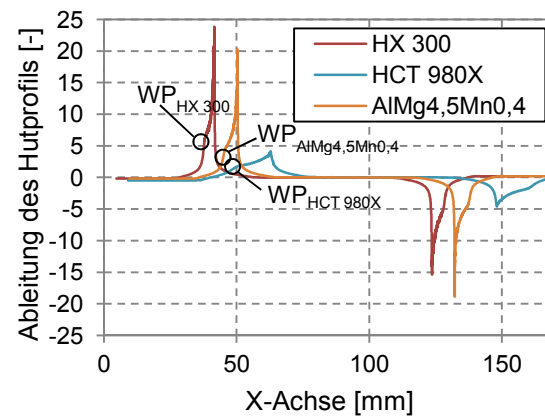


Abbildung 6: Charakteristischer Verlauf der ersten Ableitung einer Hutkontur für verschiedene Werkstoffe.

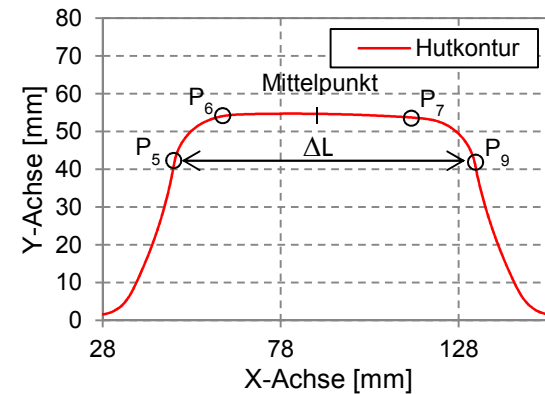


Abbildung 7: Bestimmung der Punkte P_6 und P_7 im Bereich II.

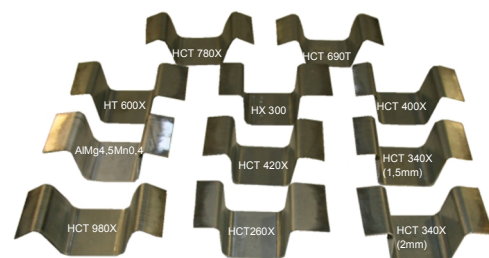


Abbildung 8: Hutprofile div. Werkstoffe, Ziehtiefe 60mm.

Werkstoff	Blechdicke [mm]	Niederhalterkraft [kN]	ϕ_1 [°]	ζ_1 [°]	β_1 [°]	ζ_2 [°]	ϕ_2 [°]
1.0944 (HCT 980X)	1,5	90 kN	79,34 $\pm 1,19$	108,49 $\pm 2,94$	1,12 $\pm 0,07$	111,52 $\pm 3,07$	81,97 $\pm 0,64$
	1,5	300 kN	84,46 $\pm 1,52$	110,52 $\pm 0,08$	0,75 $\pm 0,26$	107,86 $\pm 0,68$	84,61 $\pm 0,91$
1.0943 (HCT 780X)	1,5	90 kN	83,65 $\pm 0,86$	107,17 $\pm 2,32$	0,90 $\pm 0,06$	109,55 $\pm 2,27$	85,16 $\pm 0,69$
	1,5	300 kN	88,20 $\pm 0,46$	105,97 $\pm 0,11$	1,75 $\pm 0,59$	100,54 $\pm 1,76$	86,95 $\pm 0,02$
1.0936 (HT 600X)	1	90 kN	86,07 $\pm 1,24$	106,31 $\pm 1,75$	1,79 $\pm 0,08$	100,91 $\pm 1,41$	84,16 $\pm 2,46$
	1	300 kN	88,80 $\pm 0,23$	98,42 $\pm 1,96$	0,66 $\pm 0,3$	101,21 $\pm 2,04$	88,97 $\pm 0,61$
1.0935 (HX 420)	1,5	90 kN	87,56 $\pm 0,01$	101,34 $\pm 0,04$	1,40 $\pm 0,04$	97,13 $\pm 0,12$	86,32 $\pm 0,07$
	1,5	300 kN	89,91 $\pm 0,16$	96,23 $\pm 0,30$	0,58 $\pm 0,18$	94,33 $\pm 0,29$	89,09 $\pm 0,08$
1.0947 (HCT 690T)	1,5	90 kN	83,24 $\pm 1,55$	101,95 $\pm 1,99$	1,77 $\pm 0,16$	102,52 $\pm 0,11$	84,93 $\pm 1,84$
	1,5	300 kN	88,84 $\pm 1,23$	101,03 $\pm 1,87$	0,20 $\pm 0,05$	100,63 $\pm 0,24$	88,19 $\pm 1,49$
1.0943 (HCT 780X)	1,2	90 kN	87,27 $\pm 0,05$	101,21 $\pm 0,20$	1,24 $\pm 0,01$	97,25 $\pm 0,17$	85,76 $\pm 0,05$
	1,2	300 kN	89,91 $\pm 0,34$	96,23 $\pm 0,06$	0,58 $\pm 0,02$	94,33 $\pm 0,46$	89,09 $\pm 0,39$
1.0548 (HC 340X)	1,5	90 kN	87,88 $\pm 0,39$	99,22 $\pm 2,83$	1,71 $\pm 0,12$	94,41 $\pm 0,36$	86,38 $\pm 0,35$
	1,5	300 kN	87,48 $\pm 0,04$	92,57 $\pm 2,81$	0,99 $\pm 0,60$	98,82 $\pm 2,06$	87,14 $\pm 0,11$
1.0548 (HC 340X)	2	90 kN	87,36 $\pm 0,24$	94,96 $\pm 0,47$	1,16 $\pm 0,11$	98,23 $\pm 0,21$	88,31 $\pm 0,06$
	2	300 kN	89,67 $\pm 0,16$	93,60 $\pm 1,85$	0,36 $\pm 0,06$	94,86 $\pm 1,38$	89,74 $\pm 0,18$
1.0932 (HX 300)	1,5	90 kN	87,05 $\pm 0,16$	95,39 $\pm 0,47$	1,04 $\pm 0,17$	98,59 $\pm 0,01$	87,44 $\pm 0,21$
	1,5	300 kN	89,29 $\pm 0,54$	93,16 $\pm 1,84$	0,01 $\pm 0,46$	93,14 $\pm 0,41$	88,69 $\pm 0,92$
1.0929 (HX 260)	1,5	90 kN	87,47 $\pm 0,21$	97,41 $\pm 1,42$	0,59 $\pm 0,31$	95,47 $\pm 1,42$	87,71 $\pm 0,54$
	1,5	300 kN	89,62 $\pm 0,51$	95,02 $\pm 2,16$	0,49 $\pm 0,14$	92,37 $\pm 1,65$	88,37 $\pm 1,22$
3.3549 (AlMg4,5Mn0,4)	1,5	90 kN	86,66 $\pm 0,22$	97,66 $\pm 0,36$	0,31 $\pm 0,1$	98,87 $\pm 0,59$	88,55 $\pm 0,19$
	1,5	240 kN	87,48 $\pm 0,19$	92,57 $\pm 2,22$	0,99 $\pm 0,65$	93,82 $\pm 2,31$	87,14 $\pm 1,17$

Tabelle 1: Rückfederung von Hutprofilen aus verschiedenen Werkstoffen.

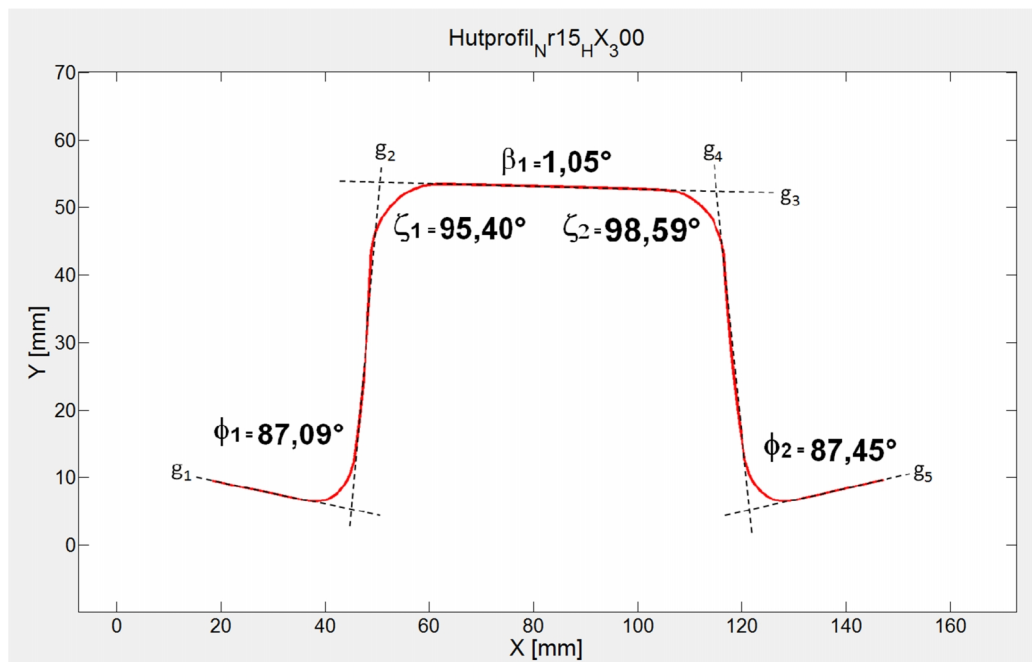


Abbildung 9: Screenshot der Auswertung in Matlab für den Stahl HX 300; Niederhalterkraft 90 kN.

V. Quellverzeichnis

- [1] A. Krasovskyy (06/2005), Dissertation; Verbesserte Vorhersage der Rückfederung bei der Blechumformung durch weiterentwickelte Werkstoffmodelle.
- [2] E. Roos, K. Maile (10/2011), Lehrbuch; Werkstoffkunde für Ingenieure.
- [3] Stahlinstitut VDEh (2012), Broschüre; Warm- und kaltgewalztes Stahlfeinblech - Stahlsorten, Oberflächenbeschichtungen und Weiterverarbeitung.
- [4] Otto Fuchs (2012), Homepage; Adresse:
http://www.ottofuchs.com/fileadmin/user_upload/images/pdf/AS05-06.pdf