

Optimierung multipler Qualitätsmerkmale mit statistischen Methoden bei der FE-Simulation von Hochdruck-Blech-Umformprozessen

S. KUHNT, CH. KLIMMEK, U. GATHER, M. KLEINER

Zusammenfassung: Erste Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „Methoden zur Prozess- und Werkzeugoptimierung für die Blechformteilefertigung mit statistischer Versuchsplanung und Finite-Elemente-Simulation“ werden in diesem Beitrag präsentiert. Für ein ausgewähltes Modell wird die optimale Einstellung von Prozessparametern zur Erreichung gesetzter Qualitätsziele anhand von Daten aus FE-Simulationen eines Hochdruck-Blechumform-Prozesses angestrebt. Dies geschieht mit Hilfe eines neuen Ansatzes für ein Robustes Parameter Design bei multiplen Qualitätsmerkmalen.

1 Einleitung

Die Optimierung von Fertigungsprozessen in der Planungsphase, also im Vorfeld der eigentlichen Produktion, ist schon seit einiger Zeit Gegenstand intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (Abromovici, 1996; Arabashi et al., 1993; Danzberg et al., 1997; Hora et al., 2000; Taguchi et al., 1984). Mit dem Ziel der effizienten Prozessoptimierung bei der Hochdruck-Blechumformung werden in dieser Arbeit neue Methoden der statistischen Versuchsplanung mit der Finite-Elemente-Simulation verknüpft.

Die Hochdruck-Blechumformung, kurz HBU, gehört zu den wirkmedienbasierten Blech-Umformverfahren. Hierbei wird im Vergleich zum konventionellen Tiefziehen der starre, formgebende Stempel durch ein Wirkmedium (Öl-Wasser-Emulsion) substituiert. Das Blech wird bei diesem Verfahren durch den hohen Druck des Wirkmediums in die Matrize umgeformt (siehe Abbildung 3). Auf diese Weise können Werkzeugkosten eingespart und die Umformung gezielt beeinflusst werden. Der gesamte Umformprozess nimmt jedoch an Komplexität zu (Kleiner et al., 1999; Kleiner et al., 2000; Homberg, 2000).

Die Qualität HBU-gefertigter Bauteile wird durch eine Vielzahl von Prozessparametern bestimmt, die auch in Wechselwirkung zueinander stehen können. Um die technologischen Vorteile dieses neuen Verfahrens nutzen zu können, ist die optimale Wahl von

Einstellungen der Prozessparameter von großer Bedeutung. Hier wird zur Methodenplanung die Prozesssimulation mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) erfolgreich eingesetzt, um den Versuchsaufwand zu minimieren.

Die Suche nach Einstellungen kontrollierbarer Prozessparameter mit dem Ziel, eine gute Qualität des Produktes zu erreichen und gleichzeitig den Einfluss nicht kontrollierbarer Größen zu minimieren, ist auch Aufgabe des Robusten Parameter Designs. Die zentralen Ideen dieser Methode basieren auf Arbeiten des japanischen Ingenieurs Taguchi. Dieser Ansatz und weitergehende Entwicklungen beziehen sich jedoch bisher überwiegend auf ein einziges zu optimierendes Qualitätsmerkmal (vgl. z.B. Taguchi und Phadke, 1984; Kackar, 1985; Leon et al., 1987; Box, 1988; Grize, 1995).

Bei der Entwicklung von Hochdruck-Blech-Umformprozessen ist aber die Optimierung mehrerer Qualitätsmerkmale gefordert, so dass eine Erweiterung der Methoden des Robusten Parameter Designs auf mehrdimensionale Zielgrößen notwendig ist. Erste Ansätze in dieser Richtung (Pignatiello, 1993; Tsui, 1999) werden nachfolgend weiterentwickelt und auf Daten aus FE-Simulationen des HBU-Prozesses angewendet.

2 Planung der Versuchsreihen

Das für die FE-Simulation benutzte Modell wurde nach folgenden Kriterien aufgestellt: Die Komplexität des FE-Modells wird in diesen ersten Untersuchungen gering gehalten, um die Ergebnisse der statistischen Analysen anhand von Erfahrungswissen aus langjährigen Untersuchungen zur HBU am Lehrstuhl für Umformtechnik der Universität Dortmund beurteilen zu können. Dabei ist die Reduktion der Komplexität des FE-Modells so maßvoll zu gestalten, dass kein triviales System beschrieben wird, welches keine aussagekräftigen Daten mehr liefert.

Für die Erfassung umformtechnisch relevanter Merkmale, wie

- die Blechdickenreduzierung und
- die Form- und Maßhaltigkeit,

ist für die erste Modellierung ein Streifenmodell gewählt worden (siehe Abbildung 1). Dieser Streifen soll ein Segment aus einem größeren Blechformteil darstellen. Durch die Nutzung von Randbedingungen an den Begrenzungsknoten des Streifens, kann der Berechnungsaufwand minimiert werden.

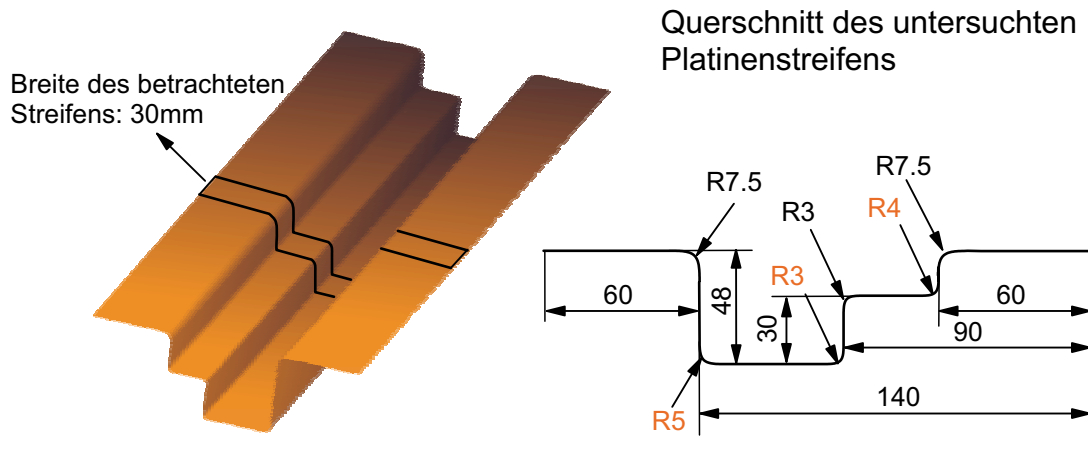


Abbildung 1: Konzeption des FE-Modells

Der stufenartige Aufbau der formgebenden Matrize trägt dazu bei, dass unterschiedliche Umformgradverteilungen in dem umgeformten Platinenstreifen erzielt werden. Weiterhin sind gezielt verschiedene Innenradien (R3,R4,R5) bei der Gestaltung der Matrize berücksichtigt worden, um die Ausformung des Platinenstreifens in Abhängigkeit von den Prozessparametern zu verdeutlichen.

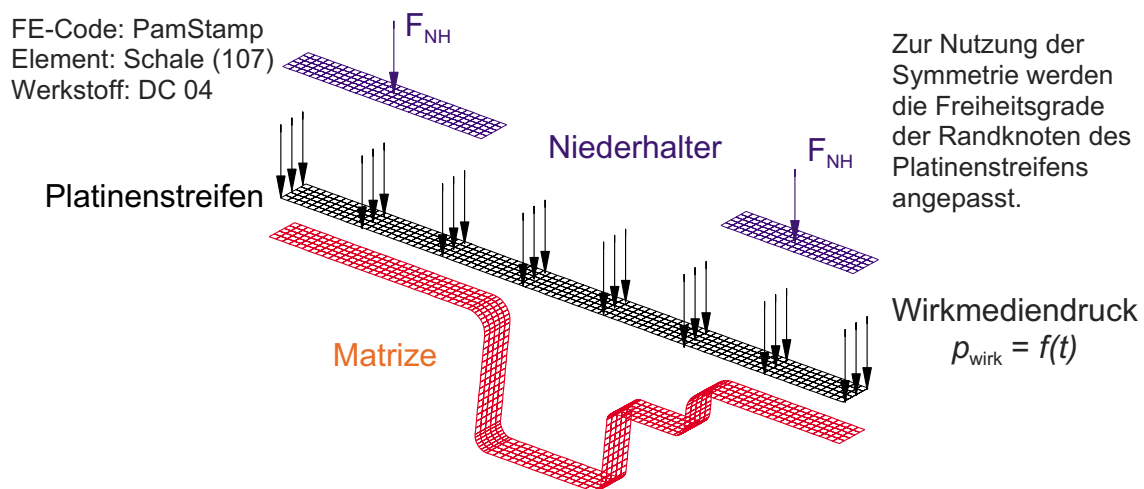


Abbildung 2: Definition der Bauteilgeometrie

Die Werte für die Prozessparameter (Wirkmediendruck und Niederhalterkraft) richten sich nach realen Verfahrensgrößen von Umformmaschinen (siehe Tabelle 1).

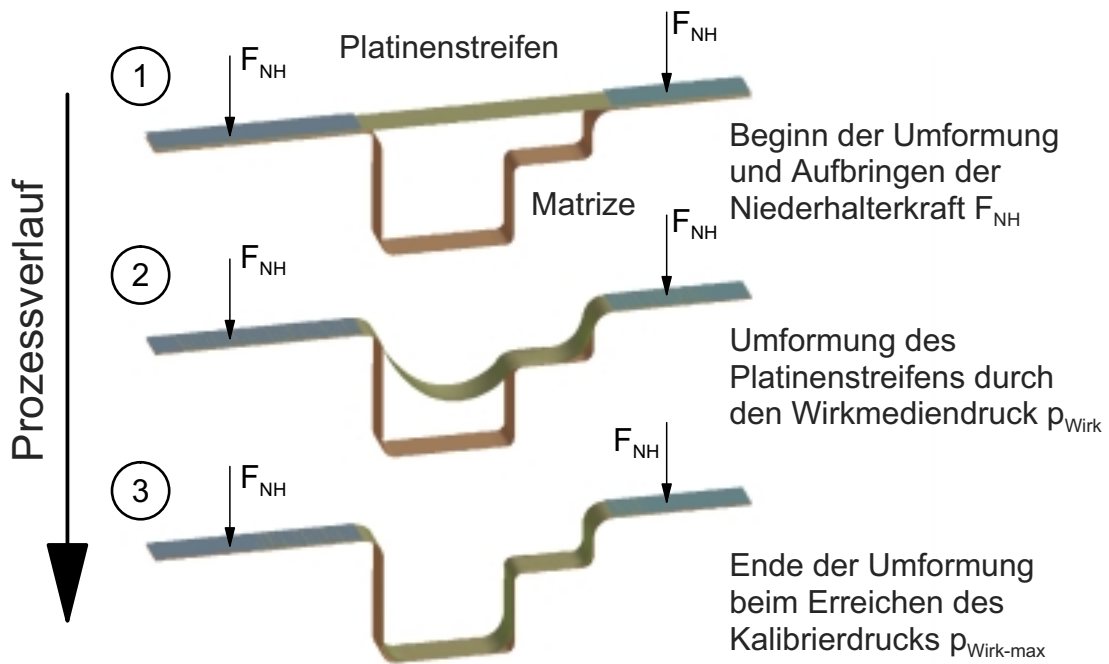


Abbildung 3: Verlauf des Umformprozesses

Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei der FE-Simulation um ein rein deterministisches System handelt. Bei der tatsächlichen Produktion wird die Qualität des Werkstücks jedoch sowohl von produktionsbedingten Ungenauigkeiten wie auch von nicht kontrollierbaren Störgrößen mitgeprägt. Bei den durchgeführten Simulationen wurden gezielt Störgrößen variiert, die systembedingten Schwankungen ausgesetzt sind. Zu diesen Größen sind hier Reibkoeffizienten an den Werkzeugwirkflächen und die Ausgangsblechdicke zu zählen. Deren Schwankungen werden in den Simulationen dadurch nachgeahmt, dass definierte Änderungen um den Anfangswert (Idealwert) angenommen und in diskreten Schrittwerten in den Versuchsplan aufgenommen werden. In späteren Untersuchungen ist eine stochastische Verteilung dieser Parameter denkbar.

Der Verlauf des Umformprozesses ist in Abbildung 3 dargestellt. Im Prozessverlauf (mittlere Darstellung) ist zu erkennen, wie in der zweiten Abstufung der Matrize das Blech noch frei umgeformt wird, während es sich im oberen Bereich bereits an die Kontur der Matrize formt. Die unterste Darstellung stellt den Umformprozess bei maximalem Wirkmediendruck (Kalibrierdruck) dar.

Zur Festlegung von Zielwerten für die Auswertung der Simulationsergebnisse werden

Tabelle 1: Einstellungen der Parameter und Kodierungen

		Kodierung	
		-1	1
Designparameter	Niederhalterkraft in kN	5.27	6.57
	Wirkmediendruck in MPa	22.9	37.1
Störparameter	Reibung	0.065	0.075
	Ausgangsblechdicke in mm	0.72	0.88

die Form- und Maßhaltigkeit und die Blechdickenreduzierung am umgeformten Blechstreifen herangezogen. Um für die Form- und Maßhaltigkeit eine eindeutig und quantitativ erfassbare Größe zu erhalten, ist für dieses Modell die folgende Definition gewählt worden. Die Form- und Maßhaltigkeit wird anhand der Ausformung des umgeformten Blechstreifens an den drei Innenradien R3, R4 und R5 bestimmt. Dabei gilt die aufgespannte Fläche zwischen der Werkstückkontur (Blechstreifen) und der Werkzeugkontur (Matrize) als Maß.

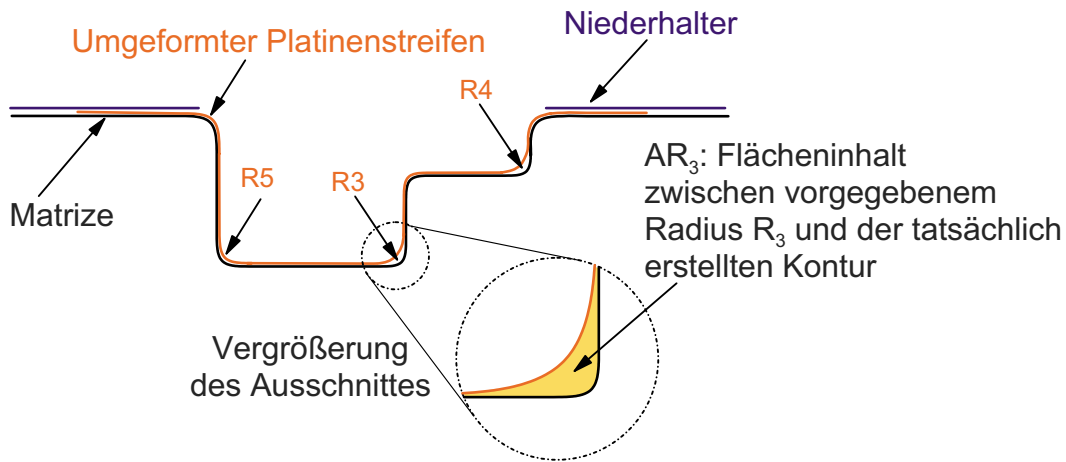


Abbildung 4: Flächensegmente an den Radien

Das krummlinige Flächensegment wird durch die Berührungspunkte des Blechstreifens mit der Matrize begrenzt (Abbildung 4). Dabei stellen kleine Flächeninhalte eine konturnahe Ausformung und große Werte eine nicht konturnahe Ausformung der Radienbereiche dar.

Für die Auswertung der Blechdickenreduzierung wird der Bodenbereich herangezogen, für den eine relative Blechdickenabnahme von 5% angestrebt wird. Als Qualitätsmerkmal wird die minimale Blechdicke in diesem Bereich in mm gemessen. Diese sollte bei der angestrebten Ausgangsblechdicke von 0.8 mm somit 0.76 mm betragen.

Tabelle 2: Produktversuchsplan mit Ergebnissen der FE-Simulationen
(Kodierung siehe Tabelle 1)

Niederhalterkraft	Wirkmediendruck	Reibung	Ausgangsblechdicke	Flächeninhalt R4	Flächeninhalt R3	Flächeninhalt R5	minimale Blechdicke
-1	-1	-1	-1	11.65	18.30	3.71	0.67
-1	-1	1	-1	11.04	21.94	4.71	0.67
-1	-1	-1	1	12.71	18.18	4.22	0.84
-1	-1	1	1	13.06	24.64	6.26	0.84
-1	1	-1	-1	0.05	0.39	0.53	0.68
-1	1	1	-1	1.18	6.77	1.18	0.66
-1	1	-1	1	2.06	4.38	2.06	0.83
-1	1	1	1	6.74	11.78	2.84	0.82
1	-1	-1	-1	14.14	20.31	4.19	0.68
1	-1	1	-1	11.08	21.99	5.53	0.68
1	-1	-1	1	12.18	20.15	4.45	0.85
1	-1	1	1	15.42	21.77	7.31	0.85
1	1	-1	-1	0.98	5.62	1.39	0.67
1	1	1	-1	6.02	11.95	2.39	0.66
1	1	-1	1	5.76	10.67	2.70	0.82
1	1	1	1	12.25	15.90	2.89	0.81

Die beschriebenen Flächeninhalte und die minimale Blechdicke werden als Ergebnisse von Simulationen festgehalten, denen als statistischer Versuchsplan ein Produktplan (Product Array, vgl. Kackar, 1985) zugrundeliegt (siehe Tabelle 2). Dieser setzt sich aus 2²-faktoriellen Versuchsplänen sowohl für die Einstellungen der Designparameter im inneren Plan (Inner Array) als auch für die Einstellungen der Störgrößen im äußeren Plan (Outer Array) zusammen.

3 Statistische Auswertung

Ziel des Robusten Parameter Design ist es, bereits im Stadium der Planung eines Produktionsprozesses Einstellungen der kontrollierbaren Prozessparameter zu finden, die den Einfluss nicht kontrollierbarer Parameter bei gleichzeitiger Erreichung einer guten Qualität des Produktes minimieren. Die vorliegende Problemstellung entspricht einem statischen Parameter Design Problem (vgl. Taguchi und Phadke, 1984). Dabei beeinflussen Designparameter x und Störgrößen z das Ergebnis Y des Produktionsprozesses: $Y = f(x, z)$. Der durch die Störgrößen gegebene Teil ist stochastisch und entsteht zum Beispiel durch nicht kontrollierte Einflussparameter und Messfehler. Bei den für diese Analyse mit Hilfe der FE-Simulation ermittelten Daten wurden wie bereits erläutert die Störparameter Reibung und Ausgangsblechdicke variiert. Die Designparameter Niederhalterkraft und Wirkmediendruck seien im folgenden mit K bzw. D bezeichnet. Die aus Simulationsergebnissen berechneten Flächeninhalte werden mit AR_4 , AR_3 , AR_5 und die minimale Blechdicke mit BD abgekürzt.

Es werden optimale Einstellungen der Designparameter in Bezug auf ein gegebenes Qualitätskriterium gesucht. Bei Vorliegen eines Idealwertes t für das Ergebnis Y bildet der Verlust $L(Y(x, z))$, der durch die Abweichung des Produktionsergebnisses von diesem Wert entsteht, ein solches Qualitätskriterium. Taguchi empfiehlt die quadratische Verlustfunktion

$$L(Y) = c(Y - t)^2,$$

wobei c eine geeignete Konstante bezeichnet. Für die Fälle einer angestrebten Maximierung bzw. Minimierung von Y werden $L = c(\frac{1}{Y})^2$ bzw. $L = cY^2$ verwendet.

Ziel des Parameter Designs ist es, Einstellungen x^* der Designparameter zu finden, die den erwarteten Verlust $E_z(L(Y(x)))$ minimieren. Generell seien durch $E(\cdot)$ und $Var(\cdot)$ Erwartungswert und Varianz bezeichnet. Für die obige Verlustfunktion kann diese Aufgabe aufgrund des Zusammenhanges

$$E(L) = E(L(Y(x))) = E(c(Y(x) - t)^2) = c(E(Y(x)) - t)^2 + cVar(Y(x))$$

auch als die Suche nach Einstellungen, welche die Varianz minimieren und den Erwartungswert auf den Zielwert bringen, formuliert werden. Falls sich die Designparameter

weiter aufteilen lassen in Adjustierungsparameter x_a , welche nur den Erwartungswert beeinflussen und Kontrollparameter x_d , die auch einen Einfluss auf ein geeignet gewähltes Dispersionsmaß P haben, so kann dieses Problem in zwei Schritten gelöst werden: Bestimmung von Einstellungen x_d^* , die P optimieren und anschließende Adjustierung des Erwartungswertes auf den Sollwert durch geeignete Werte x_a^* . Für die von Taguchi (vgl. Taguchi et al., 1984) eingeführten Signal-to-Noise-Ratios wird bei Leon et al. (1987) gezeigt, für welche funktionalen Zusammenhänge f zwischen Einfluss- und Zielgrößen ihre Verwendung tatsächlich zu einer Minimierung des erwarteten Verlustes führt. Für allgemeine Funktionen f werden zudem Performance Measures Independent of Adjustment (PerMIA) als zunächst zu optimierende Maße eingeführt. Box(1988) schlägt alternativ eine Transformation der Zielgröße Y vor, so dass die Varianz der transformierten Größe unabhängig vom Erwartungswert und einem Teil der Einflussgrößen ist und somit für eine zweistufige Optimierung verwendet werden kann.

Sollen, wie in dem vorliegen Problem, optimale Einstellungen bezüglich mehrerer Qualitätsmerkmale gleichzeitig gefunden werden, so bietet sich eine Erweiterung des bisher beschriebenen Ansatzes auf Zielvektoren $\mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_n)'$ an. Als mögliche Verlustfunktion kann dann die quadratische Funktion

$$L(\mathbf{Y}(x)) = (\mathbf{Y}(x) - \mathbf{t})'C(\mathbf{Y}(x) - \mathbf{t})$$

verwendet werden, wobei C eine positiv definite Matrix bezeichnet (vgl. Pignatiello, 1993; Tsui, 1999; Vining, 1999). Durch die Wahl der Matrix C ist es möglich, den verschiedenen Qualitätsmerkmalen unterschiedliche Gewichte zuzuweisen. Es gilt

$$E(L(\mathbf{Y}(x))) = \text{Spur}(C\Sigma) + (E(\mathbf{Y}(x)) - \mathbf{t})'C(E(\mathbf{Y}(x)) - \mathbf{t}),$$

wobei Σ die Kovarianzmatrix von \mathbf{Y} bezeichnet, so dass sich der erwartete Verlust aus einer Kovarianzkomponente und einer quadratischen Fehlerkomponente zusammensetzt.

Ziel ist es nun wie im univariaten Fall, Designparametereinstellungen zu finden, die den erwarteten Verlust minimieren. Neben mehreren anderen Wegen zur Lösung dieses Problems beschreibt Pignatiello (1993) auch eine zweistufige Prozedur auf Basis einer Aufteilung der Designfaktoren in Adjustierungs- und Kontrollparametern. Im ersten Schritt werden die Einstellungen x_D^* gesucht, die die $\text{Spur}(C\Sigma(x_d))$ minimieren, im

zweiten Schritt Einstellungen x_a^* , so dass $(E(\mathbf{Y}(x_d^*, x_a)) - t)'C(E(\mathbf{Y}(x_d^*, x_a)) - t)$ minimal wird.

Für das vorliegende Parameter Design Problem ist weder eine Aufteilung der Parameter Niederhalterkraft und Wirkmediendruck in Adjustierungs- und Kontrollparameter bekannt, noch deuten Analysen der Simulationsergebnisse eine solche an (vgl. Skotarzik, 2000). Ein Optimierungsproblem in zwei Variablen läßt sich zudem einfach analytisch lösen. Eine Analyse der Daten aus Tabelle 2 unter Einbeziehung weiterer Simulationsergebnisse durch Schätzung von Wirkungsoberflächen (Response Surface Approach, vgl. Grize, 1995) ist bei Skotarzik (2000) zu finden.

Hier soll der erwartete Verlust direkt modelliert werden. Für eine separate Betrachtung der vier Zielgrößen wird an den Designpunkten der erwartete Verlust aus den jeweils vier aus dem Inner Array resultierenden Beobachtungen durch

$$\hat{E}(L) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (y_i - t)^2$$

geschätzt. Dabei gilt für die drei Flächeninhalte $t = 0$ und für die minimale Blechdicke $t = 0.76$. Die Konstante c ist hier gleich 1 gesetzt worden.

Tabelle 3: Schätzungen des erwarteten Verlustes

K	D	AR4	AR3	AR5	BD
-1	-1	147.38	438.47	23.20	0.00692
-1	1	12.78	50.96	3.49	0.00709
1	-1	177.21	444.10	30.33	0.00642
1	1	55.10	135.26	5.83	0.00596

Bezüglich der Flächeninhalte unter den Radien als Qualitätsmerkmal (AR4, AR3, AR5) führt die niedrige Einstellung der Niederhalterkraft und die hohe Einstellung des Wirkmediendrucks zu dem kleinsten Schätzwert des erwarteten Verlustes. Demgegenüber ist für die minimale Blechdicke (BD) als Qualitätsmerkmal der geschätzte erwartete Verlust für die hohe Einstellung beider Designparameter kleiner als bei den anderen drei Einstellungskombinationen.

Mit diesen Schätzungen an den Designpunkten wird der erwartete Verlust jeweils durch

ein Lineares Modell approximiert:

$$\hat{E}(L(AR4)) = 15.7149 + 2.3692K - 11.0522D - 1.1969KD$$

$$\hat{E}(L(AR3)) = 267.1987 + 22.4808K - 174.0868D + 19.6667KD$$

$$\hat{E}(L(AR5)) = 98.1167 + 18.0377K - 64.1768D + 3.1228KD$$

$$\hat{E}(L(BD)) = 0.0066 - 0.0001K - 0.0004D - 0.0002KD.$$

Da sowohl die Designparameter Niederhalterkraft und Wirkmediendruck als Haupteffekt als auch deren Wechselwirkung in das Modell einbezogen werden,

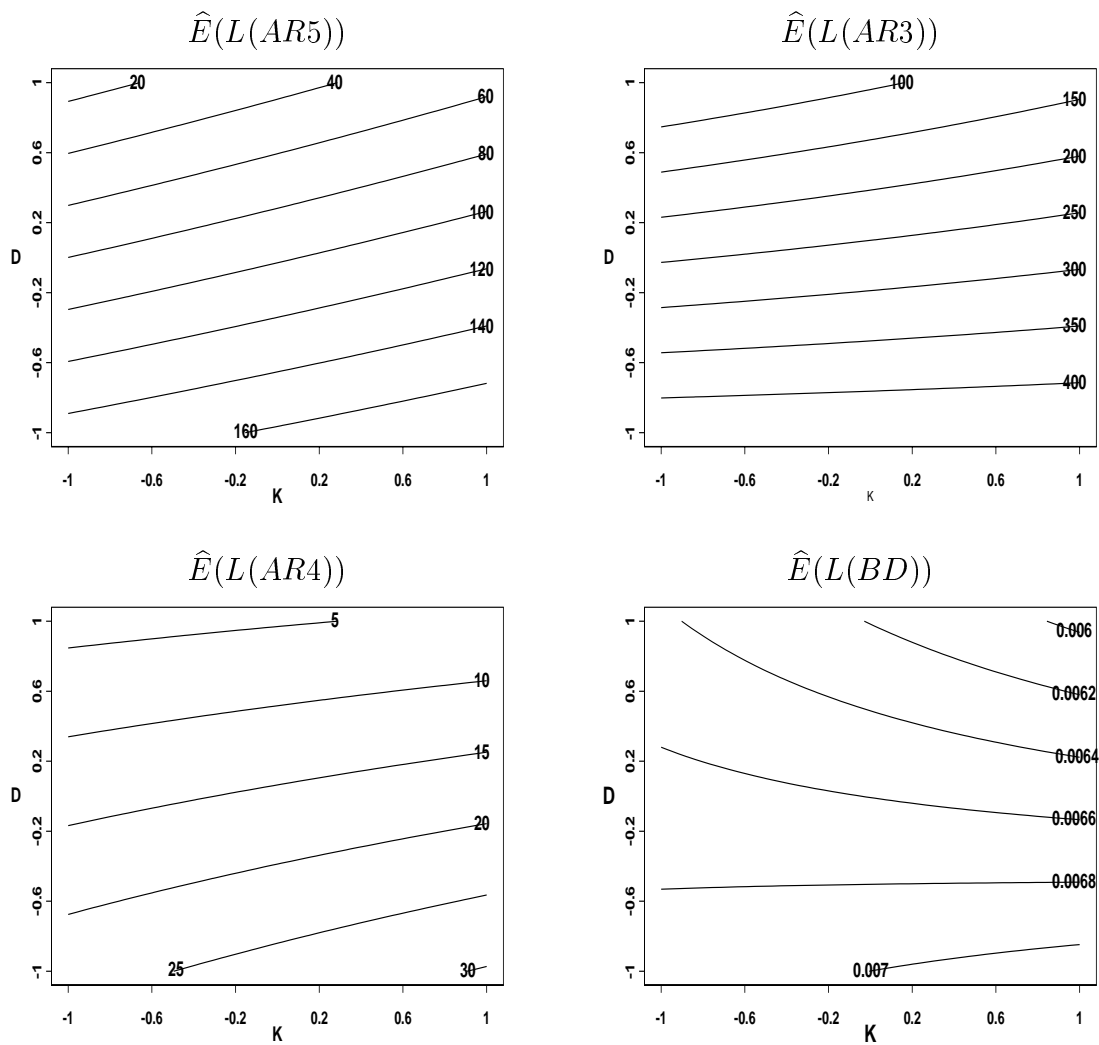


Abbildung 5: Kontur-Plot der geschätzten erwarteten Verlustfunktionen

bleiben keine Freiheitsgrade für eine Fehlerschätzung und das Modell entspricht an den Designpunkten den Beobachtungen.

Abbildung 5 enthält Höhenliniendarstellungen der geschätzten Funktionen für den erwarteten Verlust, Punkte auf derselben Linie entsprechen demselben vorhergesagten erwarteten Verlust. Auch der vorhergesagte erwartete Verlust wird für die Flächeninhalte mit zunehmendem Wirkmediendruck und abnehmender Niederhalterkraft kleiner, erreicht aber im beobachteten Bereich keinen Minimalwert. Entsprechendes gilt für zunehmenden Wirkmediendruck und zunehmende Niederhalterkraft bei der minimalen Blechdicke.

Diese separate Betrachtung der Qualitätsmerkmale kann zunächst jeweils nur zur Optimierung bezüglich eines Merkmals herangezogen werden. Die einzelnen Analysen deuten dabei bereits darauf hin, dass es in diesem Fall nicht möglich sein wird, die Flächen-Qualitätsmerkmale und die minimale Blechdicke gleichzeitig zu optimieren, sondern eine Kompromisseinstellung der Designparameter gefunden werden muss. Für eine gleichzeitige Optimierung der vier Qualitätsmerkmale wird der oben beschriebene Ansatz zur Erweiterung der Verlustfunktion auf den vorliegenden Datensatz angewandt. Als Gewichtsmatrix C sei zum einen eine Diagonalmatrix C_1 mit den Kehrwerten der empirischen mittleren Abweichung vom Zielwert als Elemente der Hauptdiagonalen verwendet. Diese Matrix dient der Normierung, da die Qualitätsmerkmale unterschiedliche Größenordnungen aufweisen können. Die Matrix C_1 impliziert eine Gleichgewichtung der untersuchten Qualitätsmerkmale. Daher sei zum anderen eine Diagonalmatrix C_2 betrachtet, die die minimale Blechdicke stärker gewichtet. Diese Matrix unterscheidet sich von der Matrix C_1 durch den Faktor 100 in der Komponente c_{44} .

Vergleichbar zum Vorgehen im univariaten Fall wird der erwartete Verlust für jede der beiden Matrizen an den Designpunkten durch Verwendung der empirischen Kovarianzmatrix und des arithmetischen Mittels geschätzt:

$$Spur(CS(\mathbf{Y}(x))) + (\bar{\mathbf{Y}}(x) - \mathbf{t})'C(\bar{\mathbf{Y}}(x) - \mathbf{t}).$$

Dabei bezeichnet $S(\mathbf{Y}(x))$ die empirische Kovarianzmatrix und $\bar{\mathbf{Y}}(x)$ das arithmetische Mittel, d.h. $\bar{\mathbf{Y}}(x) = (A\bar{R}4(x), A\bar{R}3(x), A\bar{R}5(x), B\bar{D}(x))'$.

Tabelle 4: Schätzungen des erwarteten Verlustes bei Gewichtsmatrizen C_1 und C_2

K	D	C_1	C_2
-1	-1	6.05	144
-1	1	1.89	130
1	-1	6.87	149
1	1	2.70	120

Der erwartete Verlust wird wieder durch lineare Modelle angenähert:

$$\hat{E}(L(\text{AR4}, \text{AR3}, \text{AR5}, \text{BD}; C_1)) = 4.3797 + 0.4086K - 2.0804D - 0.0041KD$$

$$\hat{E}(L(\text{AR4}, \text{AR3}, \text{AR5}, \text{BD}; C_2)) = 135.7553 - 1.3602K - 10.755D - 3.4829KD.$$

Die Verwendung der Gewichtsmatrix C_1 führt zu einer geschätzten erwarteten Verlustfunktion, die durch hohe Werte für den Wirkmediendruck und geringe Werte für die Niederhalterkraft minimiert wird. Die univariaten Auswertungen zeigen, dass damit vorrangig die Flächeninhalte optimiert werden. Dagegen resultiert die Gewichtsmatrix C_2 wie angestrebt in einer erwarteten Verlustfunktion, die durch Werte minimiert wird, die das Qualitätsmerkmal minimale Blechdicke optimieren (hoher Wirkmediendruck und hohe Niederhalterkraft, vgl. Abbildung 6).

$$\hat{E}(L(\text{AR4}, \text{AR3}, \text{AR5}, \text{BD}; C_1))$$

$$\hat{E}(L(\text{AR4}, \text{AR3}, \text{AR5}, \text{BD}; C_2))$$

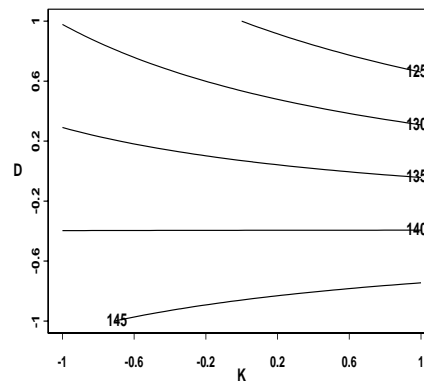
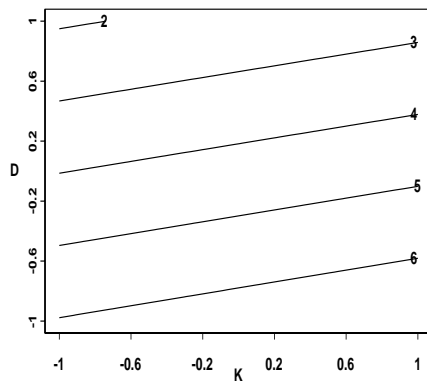


Abbildung 6: Kontur-Plots der geschätzten erwarteten Verlustfunktionen

Die geschätzten erwarteten Verlustfunktionen deuten darauf hin, dass optimale Einstellungen der Designparameter außerhalb des untersuchten Bereiches liegen. Generell wären als nächstes neue Simulationen gemäß eines Versuchplans in Richtung der angedeuteten optimalen Einstellungen durchzuführen und auszuwerten. Für dieses recht einfache FE-Modell werden lediglich Bestätigungsexperimente mit sinnvollen Maximalwerten der Designparameter durchgeführt. Als untere Grenze für die Niederhalterkraft werden hierbei 5 kN und als obere Grenze für den Wirkmediendruck 40 MPa eingesetzt. Diese Einstellungen entsprechen den Kodierungen $-\sqrt{2}$ bzw. $\sqrt{2}$.

Tabelle 5: Bestätigungsexperimente

Niederhalterkraft	Wirkmediendruck	Reibung	Ausgangsblechdicke	Flächeninhalt R4	Flächeninhalt R3	Flächeninhalt R5	minimale Blechdicke
$-\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$	-1	-1	0.09	0.31	0.34	0.68
$-\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$	1	-1	0.22	2.46	0.95	0.67
$-\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$	-1	1	0.95	1.95	2.06	0.83
$-\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$	1	1	2.92	7.49	2.84	0.83

Die Ergebnisse der FE-Simulationen mit diesen Einstellungen für die Kombinationen der Störgrößen bestätigen, dass damit kleinere Flächeninhalte $AR5$, $AR3$ und $AR4$ erreicht werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde aufgezeigt, wie neue statistische Methoden des Robusten Parameter Designs in Verbindung mit FE-Simulationen von wirkmedienbasierten Blech-Umformprozessen optimale Parametereinstellungen liefern können. In zukünftigen Untersuchungen soll die hier zunächst gering gehaltene geometrische Komplexität des FE-Modells schrittweise erhöht werden. Gleichzeitig wird eine Weiterentwicklung der statistischen Methoden angestrebt. Neben der Formulierung und Untersuchung weiterer Verlustfunktionen für multiple Qualitätsmerkmale bietet es sich bei einer sehr hohen Anzahl gleichzeitig zu optimierende Merkmalen an, Methoden zur Dimensionsreduktion vorzuschalten.

Literatur

- Abramovici M. (1996). *Informationsmanagement und -logistik mit Engineering-Data-Management*. Anwendung und Weiterentwicklung von CAD/CAM-Technologie, VDI-Bericht Nr. 1289, pp. 303-322. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Arabashi S., Barton D.C., Shaw N.C. (1993). *Step towards CAD-FEM Integration*. Engineering with Computers, Vol. **9**, pp. 17-26.
- Bates D.M., Watts D.G. (1987). *A generalized Gauss-Newton procedure for multiresponse parameter estimation*. SIAM, J. Sci. Stat. Computers, Vol. **8**, pp. 49-57.
- Boshoff F. (1997). *Integration von FEM-Berechnungen in den CAD-gestützten Konstruktionsprozess durch bidirektionalen automatischen Geometrieaustausch*. Dissertation, RWTH Aachen. Shaker Verlag, Band 19/97, Aachen.
- Box G. (1988). *Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria, and Transformations*. Technometrics, Vol. **30**, No. 1, pp. 1-17.
- Danzberg J., Hora P., Reissner J. (1997). *Effizienzsteigerung bei der rechnergestützten Methodenplanung*. Bänder Bleche Rohre, Vol. **10**, pp. 22-25.
- Farin G. (1988). *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design*. Academic Press Inc.
- Grize Y.L. (1995). *Review: A Review of Robust Process Design Approaches*. Journal of Chemometrics, Vol. **9**, pp. 239-262.
- Homberg W. (2000). *Untersuchungen zur Hochdruckblechumformung und deren Verfahrenskomponenten*. Dissertation, Universität Dortmund.
- Hora P., Danzberg J., Skrikerud M., Reissner J. *Einsatz von integrierten Planungs- und Simulationssystemen in der Umformtechnik und ihr Beitrag zur Prozessoptimierung*. 18th CAD-FEM Users Meeting, International Congress on FEM-Technology, 20-22. Sept. Friedrichshafen. Conference Proceedings, Vol. **2**, S.2.11.5.
- Janzen H., Krause G. (1992). *Die Kopplung von CAD- und FEM-Systemen*. CAD-CAM Report, Vol. **9**, pp. 130-137.

- Kacker R.N. (1985). *Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method*. Journal of Quality Technology, Vol. **17**, No. 4, pp. 176-188
- Kleiner M., Hellinger V., Homberg W., Klimmek C. (1999). *Möglichkeiten der wirkmedienbasierten Blechumformung*. Konferenz-Einzelbericht: Hydroumformung von Rohren, Strangpressprofilen und Blechen. Internat. Konf. Hydroumformung, 12-13. Okt. 1999 Stuttgart, Bd. **1**, pp. 291-303.
- Kleiner M., Homberg W., Beerwald C. (2000). *Aspekte der wirkmedienbasierten Blechumformung*. 7. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, 24-25. Okt. 2000. Leichtbau durch Umformtechnik, Bd. **10**, pp. 439-444, Verlag Wissenschaftlicher Umformtechnik.
- Kriedler V. (1995). *CAD-CAM-CNC-Integration – Based on Non Uniform Rational B-Splines NURBS*. ISATA, 28th International Symposium on Automotive Technologies and Automation, Mechatronics – Efficient Compute Support for Engineering, Manufacturing, Testing and Reliability, 18-22. Sept. 1995 Stuttgart, pp. 233-247.
- Leon R.V., Shoemaker A.C., Kacker R.N. (1987). *Performance Measures Independent of Adjustment*. Technometrics, Vol. **29**, No. 3, pp. 253-265.
- Marczyk J. (1997). *Meta-Computing and Computational Stochastic Mechanics*. Marczyk J. (Ed.): Computational Stochastic Mechanics in a Meta-Computing Perspective, pp. 1-18.
- Pignatiello J.J. (1993). *Strategies for Robust Multiresponse Quality Engineering*. IIE Transactions, Vol. **25**, No. 3, pp. 5-15.
- Reuter R., Gärtner T. (1999). *Stochastische Crashsimulationen mit LS-DYNA am Beispiel des Kopfaufpralls nach FMVSS 201*. 17th CAD-FEM Users Meeting, Sonthofen 1999.
- Reuter R., Hülsmann J. (2000). *Achieving Design Targets Through Stochastic Simulation*. 8th Madymo Users Conference, Paris.

- Schönbach T. (1996). *Einsatz der Tiefziehsimulation in der Prozesskette der Karosserie*. Effiziente Anwendung und Weiterentwicklung von CAD/CAM-Technologie, VDI-Bericht Nr. 1264, pp. 405-421. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Skotarzik M. (2000). *Statistische Methoden der multivariaten Qualitätsplanung*. Diplomarbeit, Fachbereich Statistik, Universität Dortmund.
- Taguchi G., Phadke M.S. (1984). *Quality Engineering Through Design Optimization*. Proceedings of GLOBECOM 84 Meeting, Piscataway, NJ: IEEE Communication Society, pp. 1106-1113.
- Tsui K.L. (1999). *Robust Design Optimization for Multiple Characteristic Problems*. International Journal of Production Research, Vol. **37**, No. 2, pp. 433-445.
- Vining G.G. (1998). *A Compromise Approach to Multiresponse Optimization*. Journal of Quality Technology, Vol. **30**, No. 4, pp. 309-313.