

Planning and Control of Sheet Metal Forming Processes using LS-OPT

Christoph Annen*, Martin Wahl*, Pavel Hora**

*AUDI AG, Ingolstadt, Deutschland

**Institut für Virtuelle Produktion, ETH Zürich, Schweiz

Abstract:

Although control parameters of the stamping process are kept constant, remarkable variations in the quality of the stamped parts can be observed during the fabrication of car body parts. This is due to random variations in the material properties as well as instabilities in the stamping process itself.

The present paper about metamodel based procedures used for planning and controlling sheet metal forming processes aims to show how results from stochastic simulations [7] and empirical knowledge about tryout, can be combined in order to develop a progressive process control of the stamping process that helps to prevent scrap production. This implies the layout of sensors and actuators in mechatronic deep drawing tools.

The experimental validation on stamped parts shows the capability of the outlined method.

Keywords:

sheet metal forming, FEM, process planning, process control, mechatronic tools, experimental validation

1 Einleitung

Die größten Herausforderungen bei der Herstellung von Karosseriebauteilen mittels Tiefziehen entstehen aus der Aufgabe, Gewicht des fertigen Produktes sowie den Materialverbrauch in der Produktion zu minimieren. Um diese Ziele zu erreichen, werden eine Reduktion der Blechstärke sowie die Minimierung des Zuschnittes der umzuformenden Platine angestrebt. Zusätzlich soll die Reduktion von Ausschussraten in der Großserienproduktion die Wirtschaftlichkeit steigern. Ein Zielkonflikt entsteht, wenn Maßnahmen zur Senkung des Materialverbrauchs die Robustheit des Prozesses gefährden. So treten in der Produktion unvorhergesehene Veränderungen der Ziehteilqualität auf und es muss manuell in den laufenden Prozess eingegriffen werden. Dies bedeutet, dass der Bediener auf symptomatische Veränderungen der Ziehteileigenschaften, deren Ursachen ihm in der Regel nicht bekannt sind, reagieren muss. Die Prozesseinstellungen werden während der Produktion wiederholt verändert, um die Anzahl an Ausschussteilen zu minimieren. Die Entscheidung über die zu ergreifenden Maßnahmen basiert auf der Erfahrung der Mitarbeiter. Die Nachteile dieser Vorgehensweise liegen einerseits darin, dass die Potentiale moderner Produktionsanlagen nicht voll ausgenutzt werden können. Andererseits ist nicht sichergestellt, dass die anspruchsvollen Prozesse der Zukunft, welche durch komplexere Ziehteilgeometrien und erhöhter Qualitätsanforderungen gekennzeichnet sind, auf diese Weise zu beherrschen sind.

Das zu verarbeitenden Material weist Streuungen der Eigenschaften auf, welche sich in Chargenschwankungen und in veränderte Werkstoffeigenschaften innerhalb eines einzelnen Coils unterscheiden lassen [6], [13].

Prozesseitig können als Einflüsse auf den Prozessverlauf Änderungen der Temperaturverteilung in der Umformpresse, im Umformwerkzeug sowie Pressenwechsel genannt werden. Auf dem Gebiet des Tiefziehens sind mehrere Arbeiten bekannt, welche durch die Online-Überwachung von Prozesskennwerten und den Vergleich derselben mit im Vorfeld eruierten Sollwertverläufen eine Qualifikation des laufenden Prozesses durchführen. Als überwachte Prozesskennwertgrößen werden der Einlaufweg, beziehungsweise die Einlaufgeschwindigkeit der Platinenberandung, die Ziehstempelkraft, der Ziehkraftverlauf und der durch den umgeformten Werkstoff erzeugte Körperschall herangezogen. Zusätzlich wird die Platine vor der Umformung bezüglich der Werkstofffestigkeit, der Blechdicke, der Oberflächenrauheit und der Eigenschaften des Schmierfilms untersucht [4], [9], [10], [11].

Im vorliegenden Beitrag soll eine Methodik aufgezeigt werden, welche der Auslegung und Kontrolle von Ziehprozessen dient. Die Berücksichtigung von Aktorik und Sensorik in mechatronischen Werkzeugen ist in der Betrachtung mit eingeschlossen. Resultate aus der stochastischen Umformsimulation [7] werden mit den Erkenntnissen aus der Werkzeuginbetriebnahme und den Serienabpressungen verknüpft. Der Fokus des Artikels liegt auf der Entwicklung einer Prozessüberwachung, welche eine progressive Prozesssteuerung erlaubt und damit die Ausschusszahlen in der Grosserienfertigung reduziert. Am Beispiel eines seriennahen Versuchswerkzeuges soll der Prinzipnachweis erbracht werden.

1.1 Versuchswerkzeug

Das Ziehwerkzeug Lackfrosch ist ein Versuchswerkzeug, welches zur Erprobung neuer Technologien aufgebaut wurde (Bild 1). Der Ursprung der Bezeichnung „Lackfrosch“ liegt in der Verwendung zur Herstellung von Blechteilen für Lackproben. Der Prototyp dieses „Intelligenten Werkzeuges“ wurde in [15] vorgestellt. Die Stempelgeometrie enthält mit konvex-konkaven Übergängen, Designkanten, Verprägungen und engen Radien die wesentlichen Elemente moderner Karosserieteile die in der Fertigung Herausforderungen darstellen.

Die kritischen Ziehteilbereiche sind:

- Eckradius auf beiden Seiten des Fahrzeughecks (Einschnürung),
- Konkaver Gegenzug mittig des Fahrzeuges (Falte) und
- Vordere Kotflügel (Einschnürung).

Optional kann die Faltenbildung im Flanschbereich zur Charakterisierung der Ziehteilqualität mitbetrachtet werden.

Zur Überwachung des Ziehprozesses ist das Werkzeug mit Sensoren zur Echtzeiterfassung des Flanscheinzugs sowie in Blechhalter und Stempel wirkenden Kräften ausgerüstet [1], [15].

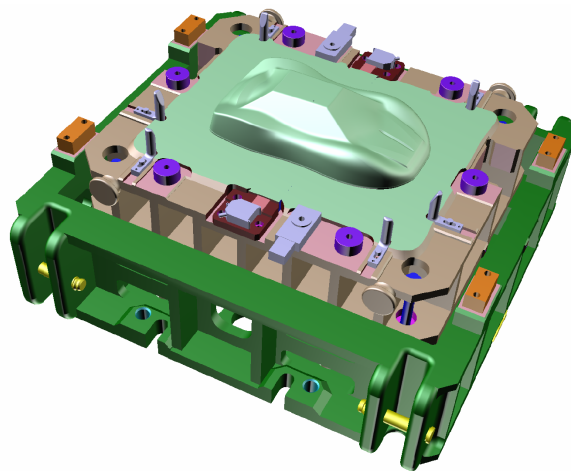


Bild 1: CAD-Modell des Versuchswerkzeugs „Lackfrosch“

2 Prozessauslegung

2.1 Prinzip

Ziel der dargestellten Vorgehensweise ist die quantitative Bestimmung der Ziehteilqualität sowie deren Veränderung im laufenden Produktionsprozess. Die Ziehteilqualität ist dabei eine synthetische Größe aus Riss- und Faltegefahr in Ziehteilbereichen. Durch die frühzeitige Erkennung sich ändernder Prozessbedingungen wird es möglich, den Prozess zwischen den einzelnen Hüben zu beeinflussen, womit im Vergleich zur In-Hub-Regelung der Aufwand für Aktorik und Sensorik im Werkzeug reduziert werden kann.

Die vorgestellte Methodik soll das Prozessfenster nicht durch feste Grenzen in Gutteilbereich und Versagensbereiche aufteilen. Vielmehr wird das Prozessfenster um den gewählten Soll-Betriebspunkt aufgelöst. Das heißt, dass an Gutteilen eine Tendenz zur Faltenbildung oder zu Rissversagen erkannt wird und damit die Möglichkeit besteht frühzeitig einem Abdriften des Prozesses aus dem optimalen Zustand entgegenzuwirken. Die Betrachtung des Prozesszustandes geschieht phänomenologisch am gefertigten Ziehteil respektive an den Wirkflächen des Werkzeuges. Dadurch müssen die Prozessmodelle nach Veränderung der Randbedingungen, wie sie zum Beispiel ein Pressenwechsel verursacht, nicht angepasst werden. So können Maßnahmen zur Verbesserung der Ziehteilqualität ohne die Kenntnis der Ursachen (oder deren Wechselwirkungen) eines veränderten Prozesszustandes, ergriffen werden [1].

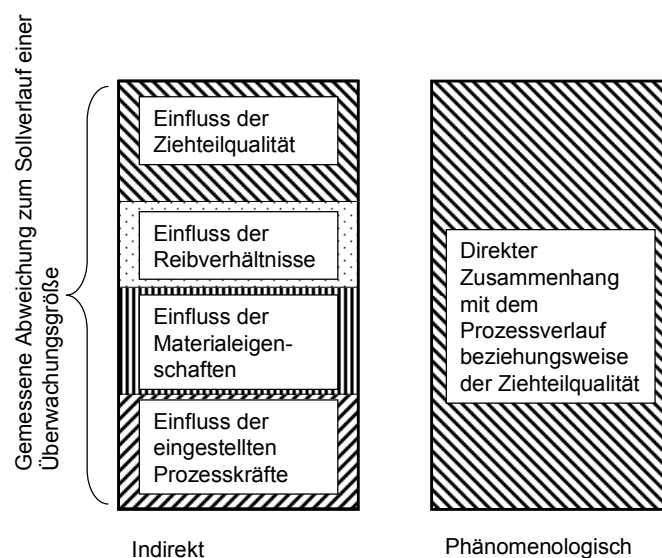


Bild 2: Schematische Darstellung der Komponenten der Prozesszustandsbestimmung

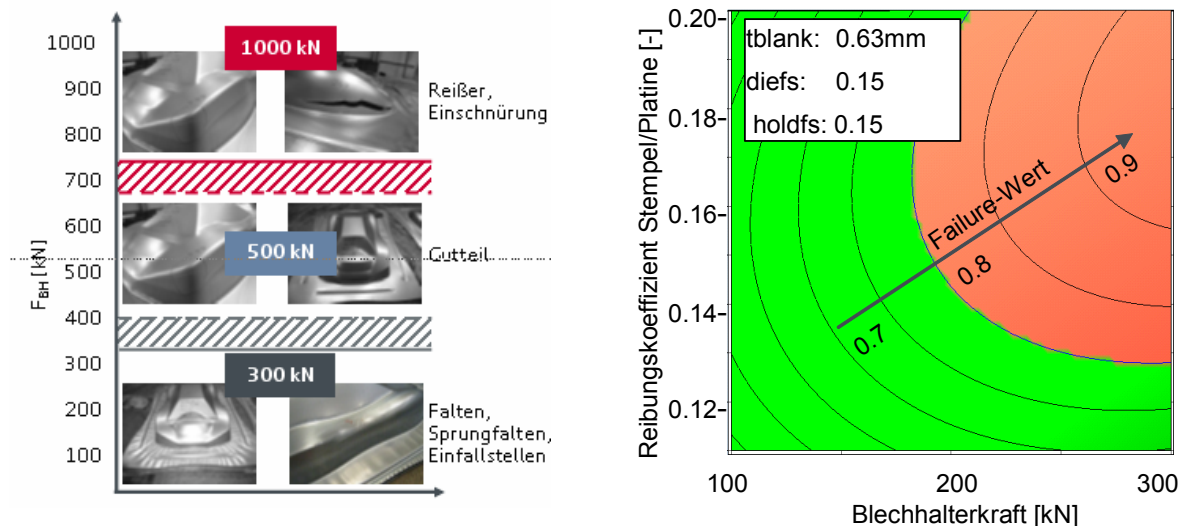
2.2 Auslegung einer Prozesskontrolle

2.2.1 Vorgehensweise

Die Prozessüberwachung hat das Ziel von messbaren Zienteileigenschaften auf den aktuellen Betriebspunkt der laufenden Produktion zu schließen. Der gewählte Ansatz ist phänomenologischer Natur (Bild 2), womit das betrachtete System im Wesentlichen das umzuformende Werkstück umfasst und durch die Wirkflächen der Ziehwerkzeuge begrenzt wird. Diese Betrachtungsweise hat den Vorteil, dass das Werkzeug-Maschinen-System nicht mit abgebildet werden muss, und Maßnahmen direkt und ohne Kenntnis der exakten Ursache eines Phänomens ergriffen werden können. Als statistische Mittel werden die Korrelationsanalyse und Varianzanalyse verwendet. Dabei wird zwischen Einflussgrößen und Ergebnisgrößen unterschieden. Dies bedeutet allerdings nicht zwingend, dass die Ergebnisgrößen direkt gemessen und mit den Einflussgrößen in Zusammenhang gebracht werden können (siehe Abschnitt 2.2.3).

2.2.2 Bestimmung des Prozessfensters

Die Beschreibung des Prozessfensters beim Tiefziehen erfolgt in der industriellen Praxis in Abhängigkeit von Parametern, welche direkt beeinflusst werden können (Blechhalterkräfte, Schmierstoffmenge). Diese Vorgehensweise hat den Nachteil, dass die Versagensgrenzen bei jedem Einbau in die Presse (sowie beim Wechsel zu verarbeitender Blechchargen) neu bestimmt werden müssen und dass der mehrdimensionalen Abhängigkeit der Prozessantwort von Einflussgrößen nicht Rechnung getragen wird. Bild 3a zeigt das Beispiel eines solchen experimentell ermittelten Prozessfensters. In Bild 3b wird ein mit LS-OPT erstelltes Prozessfenster für die selbe Zienteilgeometrie dargestellt.



a) Arbeitsdiagramm der Blechhalterkraft [5]

b) mehrdimensionales Prozessfenster

Bild 3: Prozessfenster

LS-OPT bietet die Möglichkeit mittels der Response Surface Methode (RSM) den Zusammenhang zwischen den variierten Eingangsgrößen und Simulationsergebnissen mit einem Polynom zu approximieren. Wählt man einen quadratischen Ansatz, so kann für den Lackfrosch das Risiko einer Einschnürung im Heckbereich durch den in Gleichung (1) dargestellten Zusammenhang in Abhängigkeit der Prozessparameter beschrieben werden. Dabei wird ein Failure-Wert F größer 0.8 als kritisch, größer 1 als unzulässig beurteilt. Die mittels RSM bestimmten Koeffizienten des Polynoms, welches die Prozessantwort beschreibt, sind in Tabelle 1 dargestellt. Der Ausdruck setzt sich aus den Linearen Anteilen (FL) den Interaktionstermen (FI) sowie den quadratischen Termen (FQ) zusammen. Im Einzelnen stehen die Abkürzungen für die Blechhalterkraft (f_{bh} [N]), die Ausgangsblechstärke (t [mm]) sowie die Reibkoeffizienten zwischen Platine und Matrize (diefs [-]), Platine und Stempel (pnchfs [-]) sowie Platine und Blechhalter (holdfs [-]). Es wird sichtbar, dass kein eindeutiger Rückschluss von der Zienteilqualität auf die Prozesseinstellungen möglich ist womit die Darstellung des Prozessfensters in Abhängigkeit der Prozessgrößen für die Auslegung eines Ziehprozesses, nicht aber für die Onlinekontrolle desselben geeignet ist.

$$F = FL + FI + FQ \quad (1)$$

	FL	FI und FQ				
		fbh	tblank	diefs	pnchfs	holdfs
fbh	0.2208	-0.2246	-0.1673	0.4452	0.2197	-0.05773
tblank	-0.0032		0.1216	-0.2877	-0.06949	-0.08205
diefs	-0.01907			0.03503	0.02965	0.1414
pnchfs	0.3241				-0.3648	0.06586
holdfs	-0.08031					0.06658

Tabelle 1: Regressionskoeffizienten der quadratischen Approximation

2.2.3 Korrelationsanalyse

Ein Maß für die Abschätzung des Zusammenhangs von zwei gemessenen Größen ist die Produktmomenten-Korrelation von Pearson. Der bestimmte Korrelationskoeffizient r_{xy} misst die Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs zwischen X und Y. Nach [14] wird durch die Normalisierung der Messwerte nach Gleichung (3) um den Mittelwert 0 und Standardabweichung 1 sichergestellt, dass der bestimmte Zusammenhang weder von den Maßeinheiten, noch von der Lage der Messskalen der Größen abhängig ist. Dabei bezeichnen sd_i die Standardabweichung (2) und \bar{x} beziehungsweise \bar{y} die Mittelwerte:

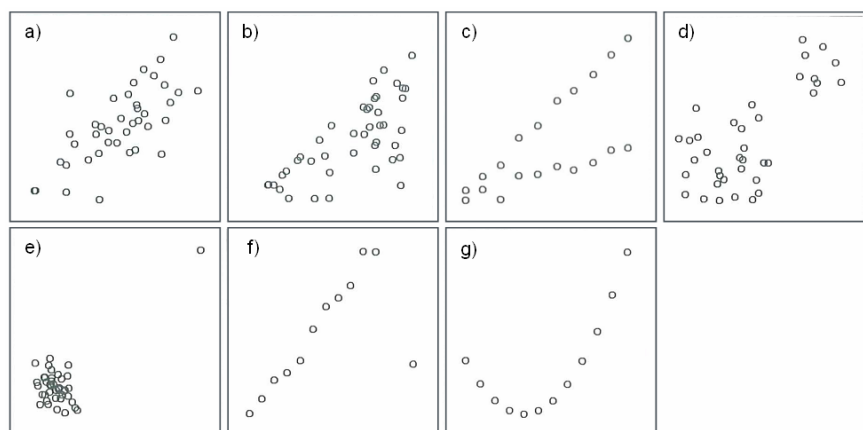
$$sd_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

$$\tilde{x}_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{sd_x}, \quad \tilde{y}_i = \frac{(y_i - \bar{y})}{sd_y}. \quad (3)$$

Die Produktmomenten-Korrelation berechnet sich daraus gemäß dem Zusammenhang (4):

$$r_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i. \quad (4)$$

Es ist zu beachten, dass ein Wert von $r_{xy}=0$ nur auf einen nicht vorhandenen linearen Zusammenhang hinweist, jedoch keine Aussage über gegebenenfalls vorhandene Zusammenhänge höherer Ordnung zulässt. So ergibt sich $r_{xy}=0$, wenn die Punkte der Stichprobe bezüglich einer waagrechten oder senkrechten Geraden symmetrisch sind. Deshalb müssen für eine vollständige Analyse einer Stichprobe auch die Streudiagramme betrachtet werden. In Bild 4 sind prinzipiell mögliche Stichproben mit identischen Korrelationskoeffizienten 0.7 dargestellt.

Bild 4: Streudiagramme von Stichproben mit $r_{xy}=0.7$ [14]

Die Ergebnisse am Lackfrosch ergeben für den Zusammenhang zwischen Einschnürungsgefahr am Heck und den Prozessparametern die in Tabelle 2 dargestellten Korrelationskoeffizienten. Nach [16] werden Zusammenhänge mit Korrelationskoeffizienten $r_{xy} > 0.7$ als starke Korrelationen bezeichnet. Ein direkter (linearer) Zusammenhang zwischen den Prozesseinstellungen und dem Ziehergebnis liegt somit für die untersuchte Ziehteilgeometrie nicht vor.

Parameter	r_{XY}
fbh (Blechhalterkraft)	0.59
tblank (Ausgangsblechstärke)	-0.40
diefs (Reibung zwischen Platine und Matrize)	0.56
pnhfs (Reibung zwischen Platine und Stempel)	0.37
holdfs (Reibung zwischen Platine und Blechhalter)	-0.04

Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten zwischen Versagensgefahr und Prozessparametern

Eine detaillierte Auswertung der Simulationsergebnisse ergibt, dass ein ausgeprägter Zusammenhang zwischen Ziehteilversagen und Materialfluss in der Zarge hergestellt werden kann. Die Korrelation zwischen der Materialverschiebung in der Zarge (in Arbeitsrichtung des Stößelhubes) auf halber Länge der Stempelgeometrie mit der Versagenswahrscheinlichkeit am Heck beträgt 0.9. Das Streudiagramm (Bild 5) bestätigt eine hohe Linearität des Zusammenhanges.

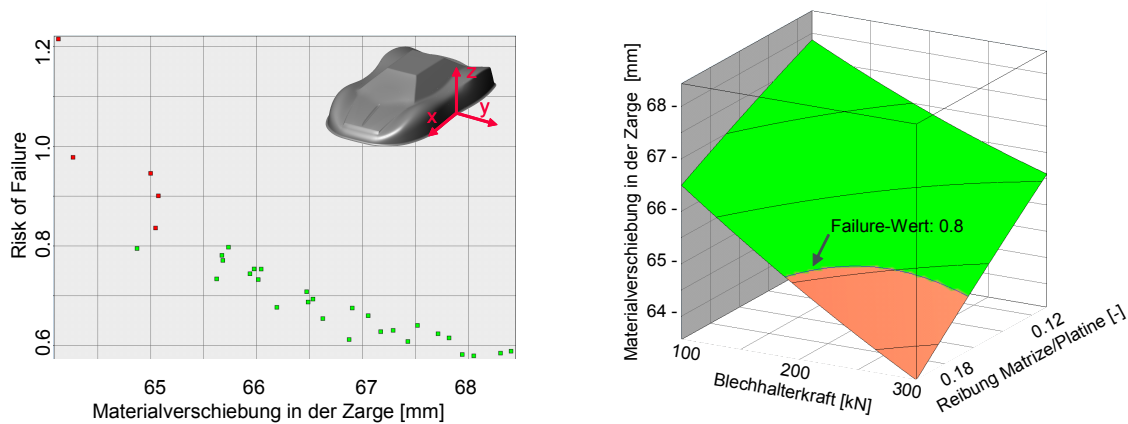


Bild 5: Überwachungsgröße Materialfluss

Die Materialverschiebung wiederum hängt in hohem Maße linear von den Prozessgrößen ab. Dieser Umstand ist in der Darstellung der Antwortfläche in Bild 5 rechts zu erkennen. Dabei sind Bereiche, in welchen Ziehteilversagen zu erwarten ist rot eingefärbt. Diese Erkenntnis deckt sich mit Erfahrungen, aus Experimenten. Bild 6 zeigt Messergebnisse der Materialverschiebung in der Zarge des vorderen Kotflügelbereichs, welche in [1] vorgestellt wurden. Die Grenzen des Prozessfensters wurden zuvor in einem Versuchsplan experimentell ermittelt. Es zeigt sich an den gemessenen Materialverschiebungen, dass die Ziehteileigenschaften unterschiedlich ausfallen können, wenn die Presse automatisch anstatt im manuellen Betrieb gesteuert wird. Diese Erkenntnis ist dahingehend von großer Bedeutung, als dass die ersten Versuchshübe bei der Werkzeuginbetriebnahme im manuellen Betrieb gefahren werden und erst vor der Übergabe an die produzierende Einheit auf automatischen Betrieb umgestellt wird. Für die betrachteten Versuchshübe konnte über die Sensorik des Versuchswerkzeuges nachgewiesen werden, dass die Blechhalterkraft im manuellen Betrieb gegen Ende des Stößelhubes abfällt, so dass eine Tendenz des Ziehteils zur Faltenbildung plausibel wird. Einerseits ist einem solchen Umstand bei der Wahl der Prozesseinstellungen Rechnung zu tragen um zu verhindern, dass ein Werkzeug im manuellen Pressenbetrieb hinsichtlich eines späteren Produktionsbetriebs risskritisch eingearbeitet wird. Andererseits zeigt das Resultat, dass mit der vorgestellten Vorgehensweise kritische Veränderungen in den Prozessbedingungen erkannt werden. So können Gegenmaßnahmen ergriffen werden, bevor Ausschuss produziert wird. Dafür müssen die genauen Ursachen einer verminderten Ziehteilqualität im Einzelnen nicht bekannt sein.

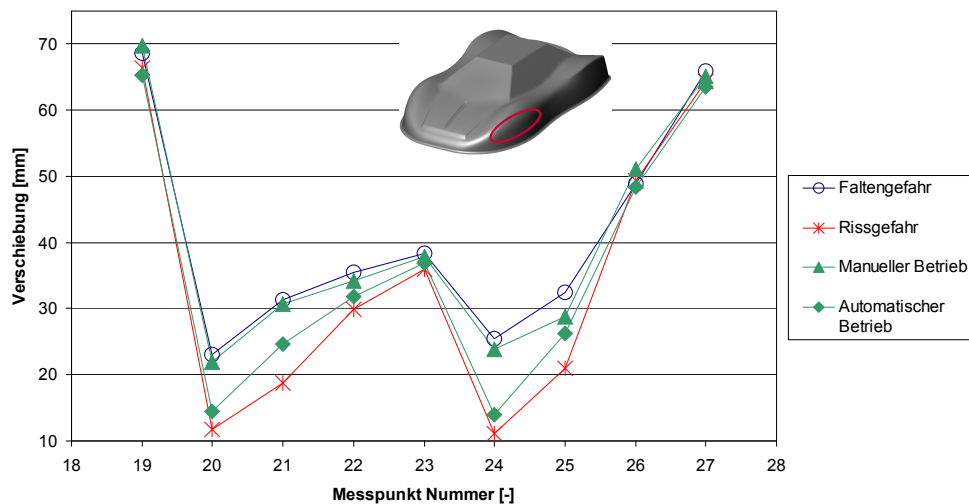


Bild 6: Materialverschiebung am vorderen Kotflügel des Lackfroschs in Abhängigkeit des Pressenbetriebs

2.2.4 Varianzanalyse

Die Varianzanalyse prüft im Zusammenhang mit dem Vergleich mehrerer Stichproben die Nullhypothese "alle Gruppen folgen dem gleichen Modell". Diese lässt sich gemäß dem Ausdruck (5) notieren wobei (6) gilt. Im Folgenden soll der Test dazu verwendet werden, um abzufragen, ob die erstellten Polynome zur Approximation der Prozessantwort genügen.

$$H_0 : F_1 = F_2 = \dots = F_g \quad (5)$$

$$Y_{hi} \sim F_h \quad i=1,2,\dots,n_h; \quad h=1,2,\dots,g \quad \text{alle } Y_{hi} \text{ unabhängig} \quad (6)$$

Das Ziel der Analyse ist eine Teststatistik aufzustellen, welche extreme Werte annimmt, wenn sich die Gruppen in ihrer Lage unterscheiden. Dazu berechnet man das „mittlere Quadrat der Gruppen“ gemäß (7),

$$MS_G = \frac{1}{g-1} \sum_{h=1}^g n_h (\bar{Y}_h - \bar{Y}_{..})^2 \quad (7)$$

wobei die Gruppenmittelwerte nach Ausdruck (8) und das Mittel aller Werte nach (9) bestimmt werden. Die Anzahl der Gruppen wird dabei mit g bezeichnet.

$$\bar{Y}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} Y_{hi} \quad (8)$$

$$\bar{Y}_{..} = \sum_{h,i} \frac{Y_{hi}}{n} \quad (9)$$

Um diese Größe quantitativ zu beurteilen, ist eine Vergleichsgröße erforderlich. Dazu dient das „Mittlere Quadrat des Fehlers“ nach (10), welches die Varianzen innerhalb der Gruppen verrechnet. Es ist eine gute Schätzung der theoretischen Varianz der Beobachtungen Y_{hi} .

$$MS_E = \frac{1}{n-g} \sum_{h,i} (Y_{hi} - \bar{Y}_h)^2 \quad (10)$$

Die Teststatistik für die Nullhypothese wird dann zu:

$$T = \frac{MS_G}{MS_E} \tag{11}$$

Die Verteilung von T hängt nur von der Anzahl der Freiheitsgrade DF_G und DF_E ab (12). Wenn die Fehler E_{hi} normalverteilt sind, dann hat T eine sogenannte F-Verteilung mit DF_G und DF_E Freiheitsgraden.

$$DF_G = g - 1 \quad ; \quad DF_E = n - g \tag{12}$$

Für die Versagenswahrscheinlichkeit am Heck der Lackfroschgeometrie ergibt sich in Abhängigkeit der Wahl des Modells die Teststatistiken gemäß Tabelle 3. Der Wert „Prob>F“ bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, dass ein so hoher Wert für T auch für gleiche Gruppen auftreten würde. Das Bestimmtheitsmaß R^2 nimmt Werte zwischen null und eins an und entspricht dem Anteil der erklärten Streuung an der Gesamtstreuung. Es folgt dem in (13) dargestellten Zusammenhang und entspricht dem Quadrat des Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson [3].

$$R^2 = \frac{SS_G}{SS_G + SS_E} = \frac{SS_G}{SS_T} \quad \text{mit} \quad SS_G = MS_G \cdot DF_G \quad \text{und} \quad SS_E = MS_E \cdot DF_E \tag{13}$$

Modell	T	Prob>F	Bestimmtheitsmaß R^2
Linear	9.47 E-13	1	0.7488
Linear mit Interaktionen	4.6 E-9	0.9999	0.9306
Quadratisch	3.33 E-12	1	0.9890

Tabelle 3: Teststatistik in Abhängigkeit der Modellwahl für FLC1_Heck

Die Vergleichsgröße $F_{\alpha,g-1,n-g}$ kann aus der F-Verteilung bestimmt werden (zum Beispiel [3]) und beträgt für $\alpha=0,95$, und die Freiheitsgrade 1 beziehungsweise 62 den Wert 3.996. Damit zeigen alle Modelle eine gute Übereinstimmung mit den virtuellen Experimenten. Eine graphische Darstellung, in der die für den Versuchsplan bestimmten Werte gegenübergestellt werden (Bild 7) zeigt jedoch eine klare Überlegenheit des quadratischen gegenüber dem linearen Ansatz. Es ist zu erkennen, dass die lineare Approximation die Gefahr des Ziehteilversagens im unkritischen Bereich (Risk of Failure < 0.8) überschätzt, im kritischen Prozessbereich ($0.8 < F < 1.0$) jedoch zunehmend unterschätzt. Diesen Trend soll die unterbrochene Linie in Bild 7 sichtbar machen.

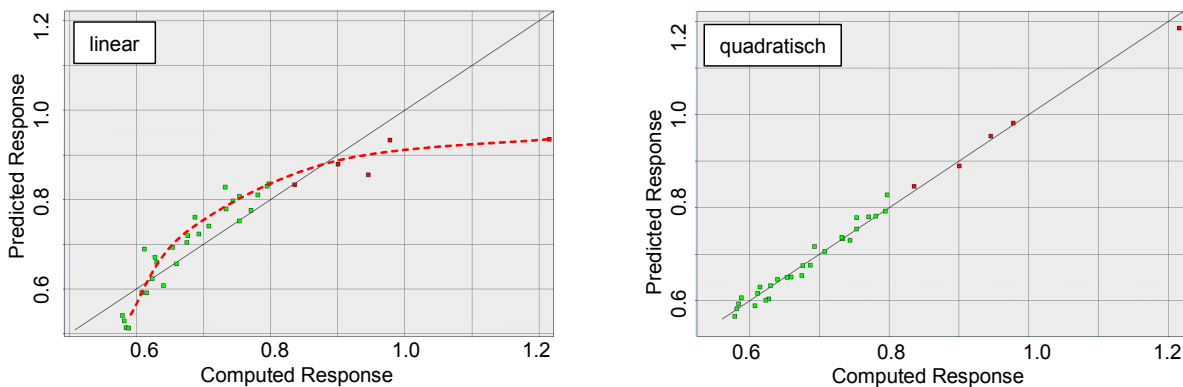


Bild 7: Versagensgefahr im Heckbereich: Modellgenauigkeit in Abhängigkeit des polynomialen Ansatzes

3 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde die virtuelle Machbarkeitsbetrachtung eines Versuchswerkzeugs mit LS-Dyna/LS-OPT vorgestellt. Ziel der Untersuchung war ein Überwachungskonzept für einen Tiefziehprozess herzuleiten, welches eine präventive Nachjustierung der Prozesseinstellungen erlaubt um produzierten Ausschuss auf ein Minimum zu reduzieren. Mit LS-OPT kann die Prozessantwort in Abhängigkeit beliebig vieler Einflussgrößen approximiert und die Modellgenauigkeit überprüft werden. Die Mehrdimensionalität des Prozessfensters des Tiefziehprozesses sowie das Verhalten des Prozesses innerhalb desselben kann einfach graphisch dargestellt werden. Mit Hilfe der Korrelationsanalyse konnten zu überwachende Größen definiert werden, welche einen Rückschluss

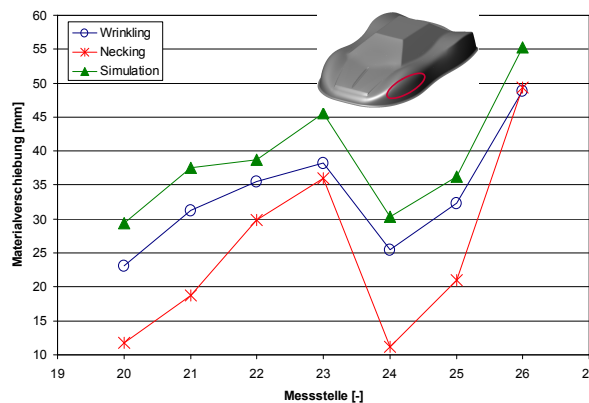


Bild 8: Materialverschiebungen: Vergleich Simulation zu Experimenten

auf den Prozessverlauf respektive Veränderungen der Rissgefahr in den kritischen Bereichen des Ziehteils zulassen. Kombiniert mit den Erkenntnissen aus Sensitivitätsanalysen kann ein konzeptionelles Wirkprinzip für eine Aktorik im Ziehwerkzeug erarbeitet werden, welches den Einflüssen von Störungen entgegenwirkt. Am Beispiel des vorgestellten Versuchswerkzeuges müsste eine Aktorik die Reibkraft zwischen Matrize und Platine in den gefährdeten Bereichen reduzieren um den maximalen Effekt auf die Ziehteilqualität zu erreichen (Tabelle 1). Dies kann zum Beispiel mittels variabler Distanzen, welche lokal die Blechhalterkraft ableiten und dadurch die Blechhalterpressung reduzieren, oder durch eine lokale Schmierung realisiert werden.

Mit Hilfe statistischer Methoden (zum Beispiel dem partiellen F-Test [2], [12]) können nicht-signifikante Parameter aus dem Modell entfernt werden, womit ein effizientes Modell entsteht. Durch diese Reduktion kann der experimentelle Aufwand für folgende Untersuchungen signifikant gesenkt werden.

Zukünftige Untersuchungen sollen aufzeigen wie Vorhersagen über die Prozessfähigkeit des Tiefziehprozesses aus den Modellen abgeleitet und für die Auslegung des Prozesses nutzbar gemacht werden können. Basierend auf diesen Erkenntnissen soll der Nutzen eines Einsatzes von Aktorik und Sensorik im Werkzeug wirtschaftlich quantitativ beurteilt werden können.

4 Literatur

- [1] Annen, C., Pillatsch, P., Hora, P., „Metamodelling based Planning and Control of Sheet Metal Forming Processes“, IDDRG Conference Proceedings, Graz 2010, ISBN 978-3-85125-108-1
- [2] Burkhardt, L., Oberpriller, B., „Sensitivity Analysis of Process and Material Parameters for the efficient Simulation of Hot Forming“, Forming Technology Forum Proceedings, Zurich 2007, ISBN 978-3-033-01150-2
- [3] Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I., Tutz, G., „Statistik“, Sechste Auflage, Springer, ISBN 978-4-540-69713-8, pp. 150-161, 518-528
- [4] DaimlerChrysler AG, 70567 Stuttgart, „Verfahren zum schnellen Regeln von Ziehvorgängen in Pressen und hierzu geeignete Ziehpresse“, Offenlegungsschrift DE 199 54 310 A1
- [5] Hein, C., Interner Statusbericht, AUDI AG, 2010
- [6] Held C., Liewald M., Sindel M., „Untersuchungen zum Einfluss werkstofflicher Schwankungen innerhalb eines Coils auf die Umformbarkeit“, Wt Werkstattstechnik online Jahrgang 99 H.10, S. 732-739, ISSN: 1436-4980, 2009
- [7] Hora P., „Einführung in die Stochastik und Robustheit von Prozessen“, Computational Methods in Stochastics and Optimization, Vorlesungsunterlagen, ETH Zürich, 2007
- [8] Manopulo N., Heingärtner J., Hora. P., „Numerical methods and hardware components for an adaptive robust control during the production of stamped parts“, Numisheet 2008, Interlaken, Switzerland
- [9] Mercedes-Benz Aktiengesellschaft, 70327 Stuttgart, „Verfahren zur selbsttätigen, iterativen Prozessoptimierung von Ziehvorgängen in Pressen“, Patentschrift, DE 42 29 155 C2
- [10] Mercedes-Benz Aktiengesellschaft, 70327 Stuttgart, „Verfahren zum selbsttätigen prozeßoptimalen Regeln von Ziehvorgängen in Pressen und hierzu geeignete Ziehpresse“, Offenlegungsschrift, DE 43 38 828 A1
- [11] Mercedes-Benz Aktiengesellschaft, 70327 Stuttgart, „Verfahren zum Einstellen der Klemmkraft des Niederhalters von Ziehpressen“, Patentschrift DE 42 42 442 C2
- [12] Myers, R. H., Montgomery, D. C., „Response Surface Methodology“ Wiley, ISBN 0-471-58100-3, pp. 27-36
- [13] Schleich R., Sindel M., Liewald M., „Reverse engineered quality limitations of material batches for sheet metal forming processes“, IDDRG Conference 2008, Olofström, Schweden
- [14] Stahel W. A., „Statistische Datenanalyse“, Vieweg Verlag, ISBN 3-528-36653-2, pp. 243-247
- [15] Walzl, H., „Werkzeugsysteme der Zukunft – Anforderungen und Lösungsansätze aus Sicht der Marke Volkswagen“, ISBN: 978-3-937524-93-1; 3rd International Conference on Accuracy in Forming Technology (ICAFT 2009), 2009, Chemnitz, Deutschland
- [16] Will, J., Bucher, C., „Statistische Maße für rechnerische Robustheitsbewertungen CAE gestützter Berechnungsmodelle“, Weimarer Optimierungs- und Stochastiktage 3.0, November 23-24, 2006