

Vergleich von FE-Lösungsmethoden für die Simulation von Schneid- und Reißprozessen

Prumbohm, M.; Lohrengel, A.

Das am IMW entwickelte Verfahren zur maschinellen Zerlegung von Bauteilen mit Blechhülle funktioniert im Wesentlichen durch die beiden Teilprozesse „Schneiden“ und „Reißen“. Um diese mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) zu simulieren, kommen entsprechend der Literatur zwei dynamische Lösungsverfahren in Frage (implizit und explizit). Diese werden für beide Teilfunktionen mit analytisch berechneten Werten sowie mit der statisch-mechanischen Lösungsmethode verglichen. Auf Basis der Ergebnisse wird jeweils eine Methode für die Berechnung des jeweiligen Teilprozesses ausgewählt.



A method developed at the IMW for the mechanical dismantling of components with sheet metal shells is essentially performed by the two sub-processes "cutting" and "tearing". Two dynamic (implicit and explicit) solution methods are available to represent these with finite element methods (FEM). These are compared for both sub-functions with formula values and with the static-mechanical solution method. Based on the results, one method is selected for the calculation of the respective sub-process.

Einleitung

Produkte werden am Ende ihres Lebenszyklus herkömmlich, z.B. mit einem Shredder, zerkleinert oder manuell demontiert. Das übergeordnete Ziel ist eine zugleich effiziente und wirtschaftlich lohnenswerte Rohstoffrückgewinnung. Beide herkömmlichen Verfahrensansätze weisen hinsichtlich der Effizienz und des Umfangs der möglichen Rohstoffrückgewinnung Vor- und Nachteile auf. So ist die manuelle Demontage hinsichtlich der Trennung und Menge an wiedergewonnenen Rohstoffen eher im Vorteil. Zugleich ist die Effizienz sowohl in technischer, als auch wirtschaftlicher Hinsicht beim maschinellen Zerkleinern deutlich höher. Beides ist natürlich stark von den zu zerlegenden Zielprodukten und den darin verbauten Wertstoffen abhängig.

Für Bauteile, die während ihrer Nutzung von einer Blechhülle versehen waren, ist ein am IMW entwickeltes, maschinelles Zerlegungsverfahren Gegenstand der Forschung. Das Verfahren, das auf dem Prinzip von Profilwalzenreißern basiert, zielt in die Lücke zwischen den beiden genannten Herangehensweisen /1/. Dabei rotieren zwei mit Werkzeugen besetzte, parallel positionierte Walzen. In den Spalt

zwischen den Walzen werden die zu zerlegenden Bauteile gegeben, die Werkzeuge schneiden in die Blechhülle ein, greifen in die duktile Blechhülle und zerlegen im Zuge der Rotation das Bauteil. Die Bestandteile der damit aufgelösten Bauteilstruktur lassen sich anschließend einfacher weiterverarbeiten. Ziel ist ein effizientes Verfahren, sowohl aus Sicht der Wertstoffrückgewinnung, als auch aus wirtschaftlicher Betrachtung.

Die Analyse des Prozesses identifiziert die Hauptfunktion „Zerlegen“. Diese lässt sich wiederum in die beiden Teilfunktionen bzw. -prozesse „Schneiden“ und „Reißen“ gliedern /2/. Zur Erfüllung der Hauptfunktion müssen die Werkzeuge jeweils die beiden Teilfunktionen in kurzer zeitlicher Abfolge auf den rotierenden Walzen erfüllen. Zu Beginn muss die Blechhülle mit einer möglichst geringen Schneidkraft F_S durchdrungen werden, um anschließend eine möglichst große Widerstandskraft F_R beim Ausreißen zu erreichen. Dies bildet einen Zielkonflikt bzw. technischen Widerspruch in der Werkzeuggestaltung. Aufgrund der Vielzahl der einflussnehmenden Parameter und möglicher Gestaltungsvarianten, bietet sich die computergestützte Simulation aus Gründen der Zeit- und Kosteneffizienz an. Aufgrund der dynamischen Prozesse mit großen Verformungen, bei zugleich langsamer Prozessgeschwindigkeit, ist die Auswahl eines geeigneten FE-Lösungsansatzes verhältnismäßig komplex. Die verschiedenen FE-Methoden, die zur Abbildung beider Teilfunktionen in Frage kommen, werden im Folgenden betrachtet und die Vor- und Nachteile hinsichtlich der Modellierung verglichen.

Explizite oder implizite Dynamik?

Die Kombination der beiden Teilfunktionen „Schneiden“ und „Reißen“ legen eine Simulationsmethode nahe, die das Werkstoffversagen der beiden Vorgänge jeweils abbilden vermag. Durch die nichtlinearen Verformungen während der beiden Teilprozesse und die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die es im Rahmen einer Parameterstudie zu untersuchen gilt, kommt eine statisch-mechanische Simulation weniger in Frage. Um den Umfang der Nichtlinearität bei einer geringen zeitlichen Abhängigkeit aus Sicht der Simulation zu überprüfen und damit diese Aussage zu stützen, erfolgt sowohl die Berechnung, als auch der Vergleich mit einem statischen Modell. Ein möglicher Nutzen der statischen Betrachtung ist die Möglichkeit der Simulation von Werkstoffversagen mittels Rissvorhersage, wie sie vor allem in statischen Berechnungsverfahren erfolgen kann.

Die angesprochene, im Prozess auftretende starke Verformung des Bleches sowohl beim Schneiden, als auch beim Reißen, legt die Lösung mittels der expliziten Dynamik nahe /3/, /4/ und /5/. Allerdings sind die Ergebnisse einer explizit dynamisch berechneten Simulation vor allem für hohe Geschwindigkeiten bzw. kurze Zeitabschnitte aussagekräftig. Langsame Prozesse bzw. Betrachtungen über einen längeren Zeitraum müssen stark beschleunigt dargestellt werden, falls dennoch die explizite Dynamik zur Anwendung kommen soll. Die maschinelle Zerlegung lässt sich, im Vergleich mit anderen Zerkleinerungsprozessen, als langsam laufender Prozess einordnen. Mit Drehzahlen im Bereich von max. 10 U/min lässt sich für die Teilfunktion „Schneiden“ auf Basis von Messungen eine

Prozesszeit mit etwa 0,1 - 0,6 s annehmen. Die große Spanne resultiert aus einer starken Abhängigkeit der Schneiddauer neben Drehzahl, insbesondere auch von der Nachgiebigkeit der Blechteile. Für den Vergleich wird die kurze Prozesszeit von 0,1 s gewählt. In dieser Zeitspanne erfolgt weniger Blechverformung, die Schneidkraft ist geringer und nach der Erfahrung erster Tests, wird die Berechnung mit expliziter Dynamik stabiler erfolgen. Nach dem erfolgten Einschnitt der möglichst scharfen Werkzeugspitze, soll der übrige Werkzeugschaft für die Funktion „Reißen“ so stumpf wie möglich sein. Eine geringe Drehzahl begünstigt eine große Verformung der Bleche und bewirkt so ein spätes Ausreißen. Aus den Versuchen sind Ausreißdauern von 0,5 - 1 s bekannt. Um konsistent zur Auswahl der Schneidzeit zu bleiben, wird auch für das Reißen die kurze Zeitspanne von 0,5 s angenommen. Angemerkt sei, dass diese Zeitspannen, die von Parametern wie unter anderem der Umdrehungsgeschwindigkeit der Antriebswalzen, der Art des Blechwerkstoffes und der Blechstärke abhängig sind, zu den Untersuchungen weiterführender Studien gehören.

Die Simulation beider Teilfunktionen in einem Berechnungsmodell ist theoretisch möglich. Um die angesprochenen Parameterstudien durchführbar zu gestalten, müssen unverhältnismäßig lange Rechenzeiten vermieden werden. Als Lösungsansatz wird der Zerlegungsprozess analysiert und die beiden Teilprozesse „Schneiden“ und „Reißen“ werden in separaten Modellen berechnet. Die Abbildung der Werkzeugbewegung zwischen diesen beiden Teilfunktionen verlängert die Rechenzeiten in einer durchgehenden Simulation erheblich. Um die Frage nach dem jeweils am besten geeigneten Lösungsverfahren zu klären, werden die beiden Teilfunktionen mit den möglichen Verfahren simuliert und die Lösungen verglichen.

Parameter und Modelle

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird für beide Teilfunktionen je ein Modell erstellt und anschließend mit den drei Verfahren transient-dynamisch, explizit-dynamisch und statisch-mechanisch berechnet, siehe Abbildung 1.

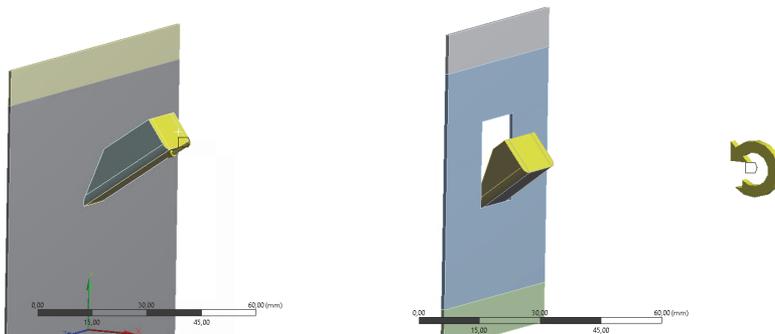


Abbildung 1: Ausgangsmodelle: links: „Schneiden“; Rechts: „Reißen“. Die eingefärbten Bereiche im Blech sind als Einspannung des Bleches definiert

In Abbildung 1 sind die Verschiebungsrichtungen mit Wirkung auf das Werkzeug (gelb gefärbt) erkennbar. Aufgrund der stabileren Modellierung mit linearen Verschiebungen, wurden diese für das Schneiden ausgewählt. Für das Ausreißen (rechte Bildhälfte, Abbildung 1) werden bis auf die explizite Dynamik, die Modelle mit einer Rotation berechnet. Die übrigen Parameter der Vergleichsmodelle sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Einzelne Einstellungen variieren aufgrund der unterschiedlichen Lösungsmethoden.

Tabelle 1: Feste Parameter für alle Vergleichsmodelle

Blech		
Blechstärke s	0,8	mm
Blechwerkstoff	Baustahl / NL	
Zugfestigkeit R_m	460	N/mm ²
Streckgrenze R_e	250	N/mm ²
Werkzeug		
Werkstoff	Edelstahl / NL	
Zugfestigkeit R_m	650	N/mm ²
Streckgrenze R_e	210	N/mm ²
Schneidlänge l_s (ohne Seiten)	12	mm
Schneidenradius $r_{\text{Haupts.}}$	0	mm
Radius Seitenkanten r_{Seiten}	2	mm
Geschwindigkeit / Verschiebung		
Verschiebung Werkzeug in Blech	x = 3 mm; y = 2 mm	Result.: 3,6 mm
ω_{real}	0,63	1/s
ω_{explizit} (aufgrund der hohen Rechendauer)	$2 \cdot \omega_{\text{real}} = 1,26$	1/s
Anstellwinkel Schneiden α_s	35	°
Anstellwinkel Reißen α_R	45	°

Um die Werkzeuggestaltung zur Erfüllung der beiden Teilfunktionen einschätzen und vergleichen zu können, wird die Kraft auf das Blech, die beim Schneiden oder Reißen nach einem definierten Weg bzw. Drehwinkel durch das Werkzeug aufgebracht wird, betrachtet. Ausgehend von /6/, /7/, /8/ lässt sich die Schneidkraft F_S folgendermaßen überschlägig ermitteln:

$$F_S = l_s \cdot s \cdot 0,8 \cdot R_m \quad 1$$

Der Faktor von 0,8 berücksichtigt dabei den spezifischen Schneidwiderstand. Das Musterwerkzeug ist mit abgerundeten Seitenkanten am Schaft mit einem Radius von $r_{\text{Seiten}} = 2$ mm versehen. Die Schneidlänge verringert sich bei einer Breite des Werkzeugkorpus von 15 mm auf $l_s = 11$ mm. Dies ergibt sich im Modell durch die Geometrie und wird in der Berechnung entsprechend übernommen. Die Ergebnisse der Schneidkraftberechnungen sind in Tabelle 2 angegeben.

Für den Vergleichswert der Reißkraft, also die Kraft, die auf die Einspannung des Bleches im Zuge der Rotation wirkt, wird die Rückzugskraft aus dem Bereich der Stanztechnik berücksichtigt. Diese wird in der Literatur mit einem Bereich von 10 % bis 40 % der Schneidkraft angenommen /6/, /8/. In Anlehnung an erste, nicht-repräsentative Messwerte wird für den Vergleich der FE-Lösungsmethoden zum Einen eine Ausreißkraft F_{R1} von 20 % der Schneidkraft im unteren Bereich der Spanne aus der Literatur angenommen. Zum anderen wird mit 40 % der Schneidkraft für eine Ausreißkraft F_{R2} der höhere Bereich aus der Literatur miteinbezogen. Eine Betrachtung der Werkzeuggestalt geht in diese überschlägige Berechnung nicht ein, auch Anstellwinkel und Anlagenparameter, wie die Drehzahl, werden nicht berücksichtigt. Die Aussagekraft ist daher lediglich für die beabsichtigte qualitative Einordnung der Lösungsmodelle sinnvoll.

Ergebnisse und Vergleich

Die Ergebnisse der Simulationen werden mit den Ergebnissen der herkömmlichen Schneidkraftberechnung aus der Literatur verglichen. Je Teilfunktion wird anhand dieses Vergleichs die am besten geeignete Lösungsmethode ausgewählt und im Rahmen weiterer Arbeiten für die Optimierungsstudien der Werkzeuggestalt verwendet.

Die Abweichungen zwischen den Elementgrößen der einzelnen Modelle liegen überwiegend an der gewollten Nähe der Netzknoten von Blech und Werkzeug, was im Modellaufbau für das Schneiden mit unterschiedlichen Elementgrößen leichter zu erreichen ist. Die Netzgröße für das „Reißen“ bezieht sich in der expliziten Dynamik auf den Kontaktbereich und ist mit Rücksicht auf die Rechenzeit verhältnismäßig groß gewählt.

Tabelle 2: Ergebnisübersicht

Schneiden	Netzelementgr. Blech / Werkz. in mm	Rechenzeit in min.	Kraft in kN	Diff. von $F_{i,Lit.}$
stat.-mech.	1,5 / 1	5	2,915	9,9
transient	1,25 / 1,5	56	2,954	8,7
explizit- dynamisch	2,25 / 1,5	101 ($\omega_{real}: 350$)	0,517 (0,432)	84 (86,6)
Literaturwert $F_{S,Lit.}$	-	-	3,238	-
Reißen				
stat.-mech.	0,5 / 0,5	10	5,561	758
transient	0,5 / 0,5	349	1,222	$F_{R1}: 88,6$ $F_{R2}: 5,6$
explizit- dynamisch	2 / 2	400	1,076	$F_{R1}: 66,1$ $F_{R2}: 16,9$
Literaturwert $F_{R,Lit.}$	-	-	$F_{R1} = 0,712$ $F_{R2} = 1,295$	-

Für die Teilfunktion „Schneiden“ haben sowohl die transiente Dynamik, als auch die statisch-mechanische Lösungsmethode eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit dem berechneten Literaturwert $F_{S,Lit.}$. Die explizite Dynamik wird für die beabsichtigte Parameterstudie, aufgrund der starken Abweichung der berechneten Ergebnisse vom Sollwert, für die Teilfunktion „Schneiden“ nicht berücksichtigt. Im Vergleich mit der transienten Dynamik erlaubt die statisch-mechanische Lösungsmethode deutlich kürzere Berechnungszeiten. Damit ist die Möglichkeit von Parameterstudien zur Gestaltoptimierung binnen kurzer Zeit gegeben und wird daher weiterverfolgt. Die Gründe für die außergewöhnlich große Abweichung des Ergebnisses des statisch-mechanischen Lösungsansatzes für das „Reißen“, lässt sich mit stark nicht-linearen Modellbestandteilen, wie der starken Verformung, begründen. Diese Methode ist für die Modellierung der Teilfunktion „Reißen“ entsprechend ungeeignet. In Abhängigkeit von der Größe der berechneten Reißkraft weisen sowohl die explizite, als auch die transiente Dynamik hohe Abweichungen im Ergebnis auf. Auch wenn erste Versuchswerte auf eine geringere Reißkraft hindeuten, so sprechen beide Modellansätze eher für eine Reißkraft, die im Bereich von 40 % der notwendigen Schneidkraft liegt. Hier sind entsprechend belastbare Versuche durchzuführen. Für die Parameterstudien zur Gestaltoptimierung der Werkzeuge wird die transiente Dynamik gewählt. Die Gründe liegen zum einen in der höheren Übereinstimmung mit dem Formelwert, aber auch in den Vorteilen gegenüber der expliziten Dynamik. Diese sind kürzere Berechnungsdauern im Bereich der vorliegenden Geschwindigkeiten, der Berücksichtigung von Verformbarkeit von Blech und Werkzeug, einer Rotationsverschiebung und der Auswertungsmöglichkeit der resultierenden Kräfte am Blech. Der Vorteil der

Methode der expliziten Dynamik, die Darstellung der Elemente-Erosion, sprich des Werkstoffversagens im Modell, wiegt die Vorteile der Berechnung mittels transienter Dynamik nicht auf.

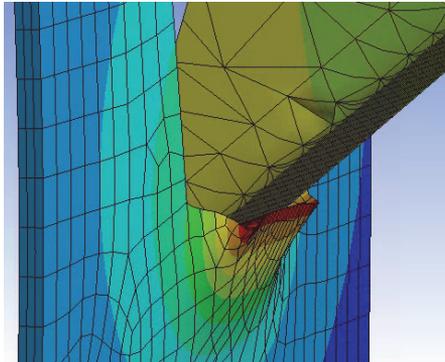


Abbildung 2: „Reißen“: Simulationsergebnis, maximale Verformung, transiente Dynamik

Ausblick

Von dem vorgestellten Vergleich ausgehend, werden Parameterstudien zur Optimierung der Werkzeuggestalt erfolgen, die von praktischen Versuchen zur Absicherung der Simulationsergebnisse begleitet werden. Neben den Werkzeugparametern, wie der Schneidlänge und dem Radius der Seitenkanten, sind unter anderem die Fragen nach unterschiedlichen Werkstoffen und dem Einfluss des Schneidwinkels und der Anlagengröße von Interesse. Darüber hinaus wird die Nutzung des SMART-Rissvorhersage-Tools des verwendeten FE-Programms ANSYS für den statisch-mechanischen Ansatz bei der Modellierung der Teilfunktion „Schneiden“ geprüft.

Zusammenfassung

Um die beiden Teilprozesse „Schneiden“ und „Reißen“ eines Zerlegungsverfahrens für Blechbauteile mittels FEM zu simulieren, werden explizit und transient dynamische, sowie eine statisch-mechanische Lösungsmethode anhand eines Mustermodells mit Literaturwerten verglichen. Im Ergebnis ergibt sich die Möglichkeit, das „Schneiden“ mittels des statisch-mechanischen Lösungsansatzes mit sehr kurzen Rechenzeiten realistisch zu beschreiben. Das „Reißen“ lässt sich im Vergleich am besten mittels einer transienten Dynamik berechnen. Insbesondere die Ergebnisse der Teilfunktion „Reißen“ müssen durch ausstehende Versuche bestätigt werden.

Literatur

- /1/ Prumbohm, M.; Lohrengel, A.: Zerlegen statt Zerkleinern, lohnt sich das?, Institutsmitteilung Nr. 44, IMW Clausthal, 2019
- /2/ Prumbohm, M.; Lohrengel, A.: Zerlegen als Aufgabe eines Pre-Shred-Prozesses. In: 5. Symposium Rohstoffinnovationen und Rohstoffeffizienz, 9. Mai 2019, Fraunhofer ICT, Pfinztal, S. 99-107
- /3/ Gebhardt, C.: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Hanser Verlag, 1. Auflage, 2011, ISBN: 978-3-446-42517-0
- /4/ Prumbohm, M.: Simulation eines Schneidvorgangs mittels expliziter Dynamik, Institutsmitteilung Nr. 42, IMW Clausthal, 2017
- /5/ Prumbohm, M.: Neuartiges Verfahren zur Zerlegung blechumhüllter Elektroteile. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaften "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" sowie „Werkstoffe, Konstruktion, Lebensdauer“ 2017, 20.11.2017, Würzburg
- /6/ Romanowski, W.P.: Handbuch der Stanzereitechnik, VEB Verlag Technik, 5. Aufl. Berlin 1965
- /7/ Feldhusen, J. (Hrsg.); Grote, K.-H. (Hrsg.): Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau. 23. Aufl., Berlin: Springer-Verlag, 2011
- /8/ Oehler, G.; Kaiser, F.: Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge. 8. Auflage, Berlin, Springer, 2001