

teneinzug für drei Blechvarianten dargestellt. Diese realen Abpressergebnisse dienen als Grundlage zur Verifikation der FEM-Prozesskette mit Reibungsberücksichtigung. Bei der FE-Analyse mit der Software PAM-STAMP 2G lässt sich der Platineinzug an denselben Stützpunkten extrahieren und den realen Werten gegenüberstellen, um die Abbildungsgenauigkeit zu bewerten.

Bei der zurzeit gültigen Standardsimulation der Abteilung ME Tool & Die Operations der Adam Opel AG mit konventioneller konstanter Reibungszahl (blaue Kurve) liegen im Bereich B mit dem höchsten Kanteinzug die FE-Werte nahe bei den Realwerten, an allen übrigen Stellen jedoch deutlich entfernt. Zur Optimierung wurden verschiedene Werte der konstanten Reibungszahl gewählt, um an den anderen Stellen näher an die Realität zu kommen. Mit Änderung der Reibungszahl wurde jedoch der Materialfluss in allen Bereichen in die gleiche Richtung beeinflusst. Bei Reibzahlerhöhung verschob sich in einigen Bereichen der zu hohe Einzug näher an die Realwerte, während er sich an den Stellen mit zu niedrigem Einzug weiter von den Realwerten entfernte. Mit einer angepassten Reibungszahl ließ sich also nur eine begrenzte Verbesserung der Abbildungsgenauigkeit erreichen.

Hier schafft die FEM mit Reibkennfeld (RKF) aus der Software FRICIONgenerator eine Verbesserung, wie im rechten Diagramm von Bild 3 zu erkennen ist. Zum einen liegen die Kanteinzüge näher an den Realwerten als bei der konventionellen Standardsimulation. Zum anderen ist an den signifikanten Stellen A und B ein ähnlicher Unterschied des Einzugs zwischen den 3 Blechen identifizierbar wie bei den Realversuchen (orangene Zonen zu grünen Zonen), und die Rangfolge der Bleche stimmt überein. Im folgenden Bild ist die verbesserte FE-Genauigkeit beim Blech 2 als Abweichung des Kanteinzugs vom Realversuch dargestellt. Fast ausnahmslos liegen die Werte der Simulation mit Reibkennfeld (orangene Balken) erkennbar näher an der Realität als bei der Standardsimulation mit konstanter Reibungszahl (blaue Balken).

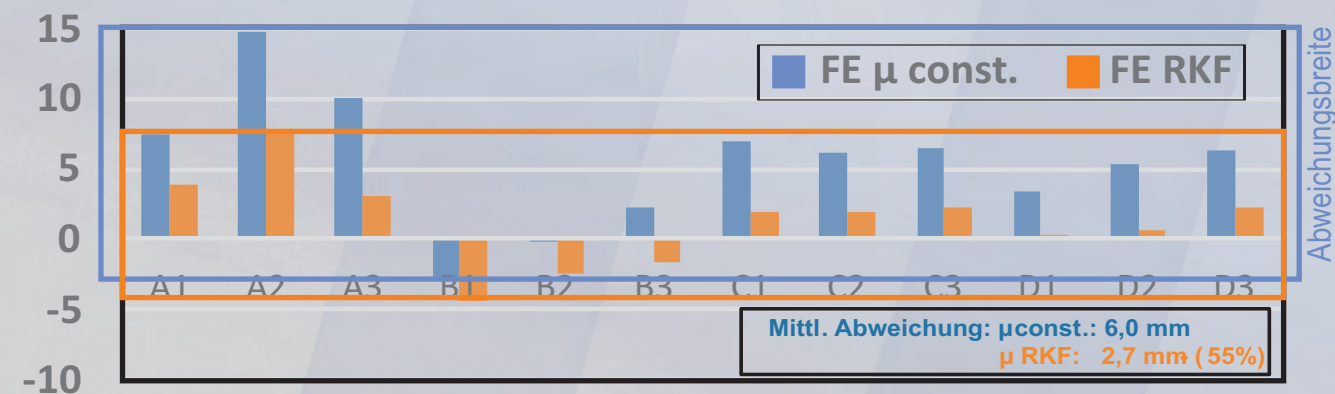


Bild 4: Abweichung des Kanteinzugs in der FEM vom realen Kanteinzug [mm]

Zur Quantifizierung der verbesserten Simulationsgenauigkeit wurde die mittlere und maximale Abweichung vom Realversuch über alle Messpunkte sowie die maximale Abweichungsbreite als Abstand von minimaler zu maximaler Abweichung ausgewertet:

Tabelle 1: Vergleich der Abweichungen vom Realversuch

	Blech 1			Blech 2			Blech 3		
	μ const.	mit RKF	Verbesserung	μ const.	mit RKF	Verbesserung	μ const.	mit RKF	Verbesserung
mittlere Abweichung	5,5	4,6	17%	6,0	2,7	55%	4,3	3,3	23%
maximale Abweichung	11,4	10,0	12%	14,7	7,6	48%	7,4	5,5	26%
Abweichungsbreite	15,9	14,3	10%	17,7	12,1	32%	11,9	10,2	14%

Bei Blech 1 ist die geringste Verbesserung zu beobachten, sie ist dennoch als deutlich zu bewerten. Die mittlere Abweichung geht von 5,5 auf 4,6 mm bzw. um 17 % zurück. Während die minimale Abweichung (Stelle B1) fast identisch ist, nimmt die maximale Abweichung (Stelle A2) durch Verwendung des Reibkennfeldes von 11,4 auf 10,0 mm ab. Die Abweichungsbreite geht von 15,9 mm auf 14,3 mm zurück, was einer Genauigkeitsverbesserung von 10,1 % entspricht. Bei Blech 3 ergibt sich ein ähnliches Bild, die mittlere Abweichung verbessert sich um 23 %. Die Abweichungsbreite geht von 11,9 auf 10,2 mm zurück, die Genauigkeitssteigerung liegt bei ca. 14 %.

Bei Blech 2 wurde die höchste Genauigkeitsverbesserung erzielt. Die mittlere Abweichung liegt bei Verwendung des Reibkennfeldes um deutliche 55 % niedriger. Auch die Abweichungsbreite geht von 17,7 auf 12,1 mm zurück, was einer Genauigkeitsverbesserung von fast 32 % entspricht.

FRICION generator sheet metal forming

Software-Tool zur Berücksichtigung variabler Reibung in der FEM

Zusammenfassung

Die vorgestellte Methodik der Berücksichtigung der variablen Reibung baut auf dem bewährten Streifenziehversuch der TU Darmstadt auf, der gemäß VDA-Richtlinie 230/213 spezifiziert und nach ISO 9001:2015 zertifiziert ist. Mit der vorgestellten Reibungssoftware kann eine Vielzahl an Tribosystemen ausgewählt und verwaltet werden, weitere Tribosysteme sind implementierbar. Ein industrielles Anwendungsbeispiel zeigt, dass die Reibungsberücksichtigung mit Hilfe des Software-Tools die Simulationsgenauigkeit um bis zu 55 % erhöht, das reale Presswerkerggebnis damit besser abbildet und folglich für alle Simulationsziele von der Bauteilqualität und Fertigbarkeit bis zur Prozessfähigkeit relevant ist.

* Auszug aus der Veröffentlichung „Filzek, J.; Schröder, H.; Dietrich, F. - Software-Tool zur Berücksichtigung variabler Reibung in der FEM“ zum 36. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung, Fellbach 2016

1 Reibung in der FEM

Bei der Umformung verändern die auftretenden Reibschubspannungen den lokalen Stofffluss, somit werden die mechanische und geometrische Bauteilqualität sowie die Verfahrensgrenzen des Bauteils beeinflusst. Die wirkenden Reibverhältnisse hängen global vom Tribosystem, aber auch lokal von den technologischen Lastparametern ab, so dass sie sowohl zeitlich als auch örtlich variieren. Für eine genaue FEM-Abbildung des Umformprozesses stellt die Reibung eine fundamentale Eingangsgröße dar. Aber noch heute werden die Reibverhältnisse häufig nur durch Verwendung konstanter Reibungszahlen berücksichtigt, was einer physikalischen Ungenauigkeit entspricht und damit die Vorhersagegenauigkeit beeinträchtigt.

2 Software zur Berücksichtigung variabler Reibung

Die im Folgenden vorgestellte Software FRICTIONgenerator basiert auf dem empirischen Ansatz. Es liegen experimentelle Reibdaten zugrunde, die mit dem etablierten flachen Streifenziehversuch (Kontaktfläche 140x70 mm²) der TU Darmstadt ermittelt werden. Dazu wurde ein standardisiertes Prüfprozedere entwickelt, das in der VDA-Richtlinie 230/213 spezifiziert ist. Diese Prüfmethodik ist nach ISO 9001:2015 zertifiziert und QM-optimiert. So kann für verschiedenste Tribosysteme der Einfluss von Flächenpressung, Gleitgeschwindigkeit und Werkzeugtemperatur auf die entstehenden Reibkräfte ermittelt werden. Für die weitere Nutzung in der Software werden die Reibkurven mittels mathematischer Regression geglättet, um einen stetigen Verlauf zu gewährleisten.

Für eine exakte Beschreibung dieser örtlich und zeitlich variierenden Reibung schafft die Software FRICTIONgenerator Abhilfe, indem sie das Reibverhalten in Form von Kennfeldern der wirkenden Reibung (RKF) beschreibt. Neben der Export-Funktion für die FEM ist die Software insbesondere auch für die tribologische Analyse ausgelegt, indem sie in einem Grafik-Modul über verschiedene Analyse-Möglichkeiten mit graphischer Aufbereitung und Reporting verfügt.

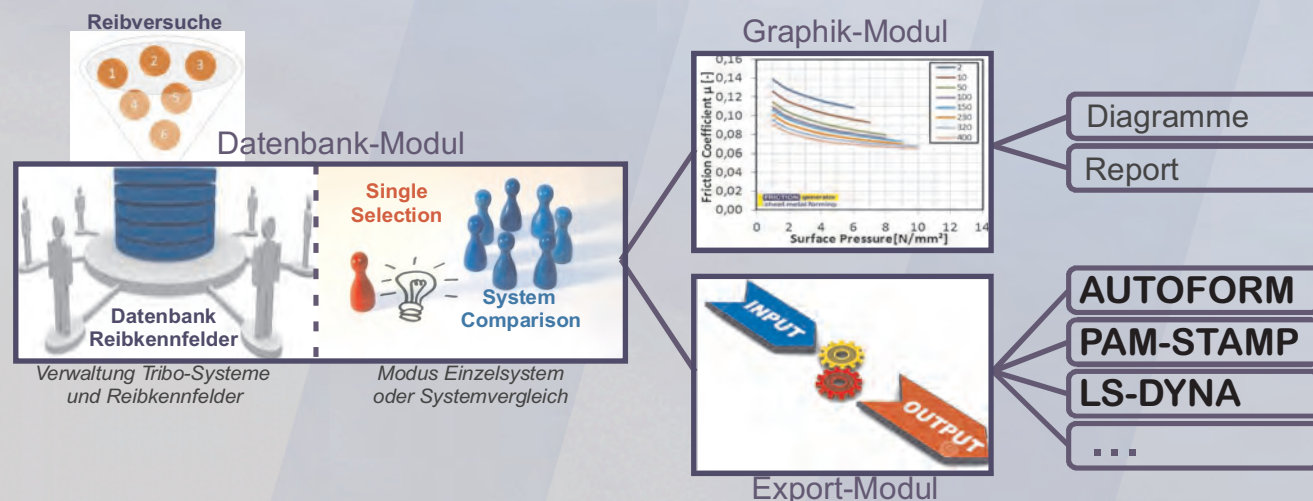


Bild 1: Aufbau der Software FRICTIONgenerator

Mittels der beschriebenen Prüfmethode lassen sich verschiedenste Tribosysteme und Lastkollektive in die Software implementieren. In der Grundversion enthält die Software verschiedene Kombinationen von Blech, Werkzeug und Schmierstoff. Zusätzliche Systeme sind einfügbar. Die Software verwaltet die verschiedenen Tribo-Systeme mit Such- und Filterfunktionen, um Systeme individuell auszuwählen und darzustellen. Es stehen die im folgenden Bild aufgelisteten Tribo-Parameter zum Filtern und Eingrenzen der Vielzahl an Tribosystemen zur Verfügung.

Prinzipiell ist die Software im Modus „Einzelsystem“ oder „Systemvergleich“ zu betreiben. Das untere Detailfenster listet zusätzliche Parameter auf wie Materialkennwerte ($R_{p0,2}$, R_m), Oberflächenkennwerte (R_a , RP_c , W_a), Werkzeugrauheit oder -härte, Viskosität und Dichte von Waschöl oder Schmierstoff. Zusätzlich wird eine Vorschau des Reibkennfeldes oder des System-Vergleiches dargestellt, die Weiterverarbeitung erfolgt im Grafik- oder Export-Modul.

Im Grafik-Modul werden die Reibergebnisse der ausgewählten Tribosysteme individuell weiterverarbeitet, die grafische Darstellung erfolgt in Form von Reibkurven der wirkenden Reibungszahl. Druck, Geschwindigkeit und Temperaturabhängigkeit können individuell auf der x-Achse und als Scharparameter dargestellt werden. Anwendungsbeispiel hierfür wäre ein druck- und geschwindigkeitsabhängiges Reibkennfeld bei einer festen Temperatur von 25 °C (Produktionsstart) oder 40 °C (stationärer Produktionslauf). Zum Reporting können Diagramme oder Berichte ausgedruckt werden.

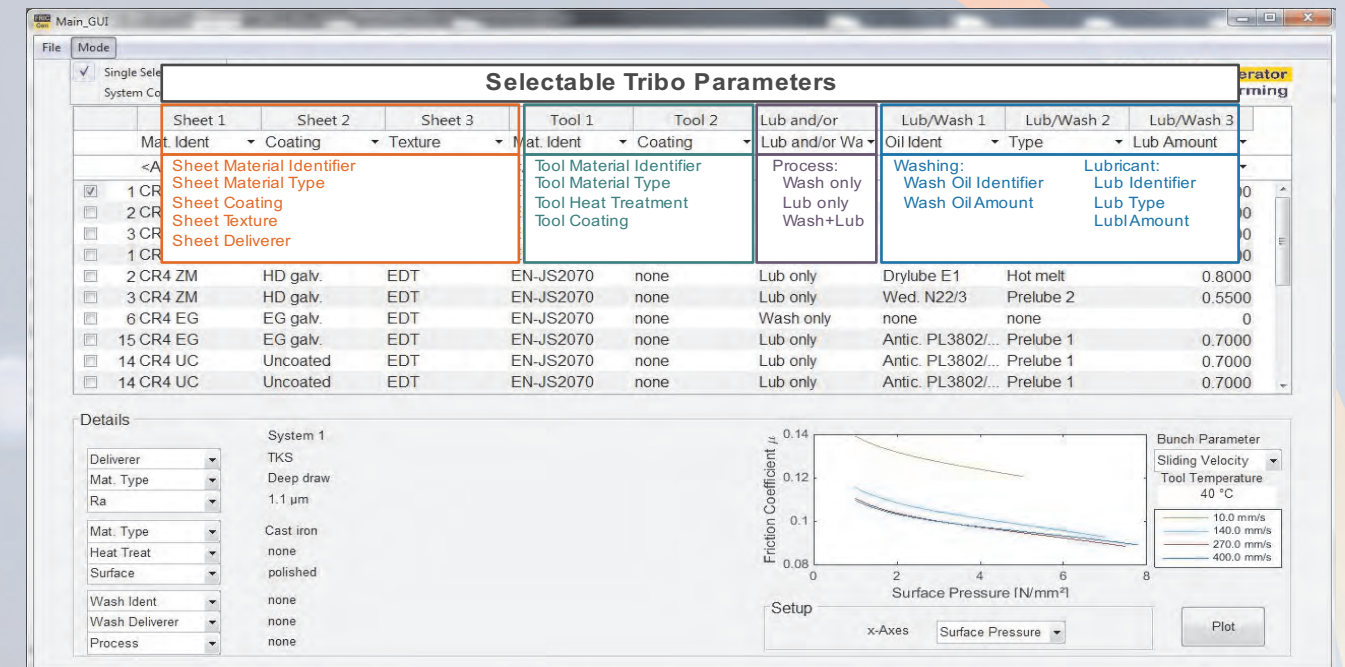


Bild 2: Grund-Modul Datenbank der Software FRICTIONgenerator

Der zweite Modus Systemvergleich ermöglicht im Vorfeld einer FEM-Optimierung die Analyse von Reibunterschieden an ausgewählten Systemen. Für Prozessoptimierungen können mögliche Veränderungen von Tribo-Parametern (Schmierstoff, Schmiermenge, ...) zur Reibungsbeeinflussung untersucht werden. Ebenso kann für Robustheitsanalysen das Ausmaß von Reibunterschieden aufgrund streuender Produktionsparameter analysiert werden. Die Verarbeitung und Darstellung ist prinzipiell ähnlich, ein Parameter von dreien kann als variable Größe auf der x-Achse ausgewählt werden. Als Scharparameter werden die verschiedenen Tribosysteme in Form von Reibkurven gegenübergestellt wie z. B. verschiedene Schmierstoffe, Schmiermengen und / oder Blechbeschichtungen.

Die ausgewählten Reibdaten können in unterschiedlichen Text-Formaten exportiert werden, um sie in die verschiedenen FE-Programme einzubinden. So lässt sich ähnlich einer Materialdatenbank mit verschiedenen Reibkarten eine Reibdatenbank erstellen. Für die Software Pamstamp zum Beispiel importiert ein Zusatz-Tool die Text-Datei des FRICTIONgenerator als „look-up table“.

3 Industrielles Anwendungsbeispiel

Im Anwendungsbeispiel der Adam Opel AG wurde die vorgestellte FEM-Reibungsberücksichtigung durch Gegenüberstellung von Abpress- und Simulationsergebnis am Beispiel der Reserveradmulde des Opel Adam verifiziert. Im Werk Kaiserslautern wurden je 1.500 Bauteile von drei Versuchscoils (CR4 GI) mit unterschiedlichen Texturen hergestellt. Je 50 Bauteile wurden bei verschiedenen Pressgeschwindigkeiten und Wärmezuständen entnommen, an denen mit einer eigens angefertigten Messlehre die Bauteilgeometrie in Bezug auf den Materialeinzug analysiert wurde.

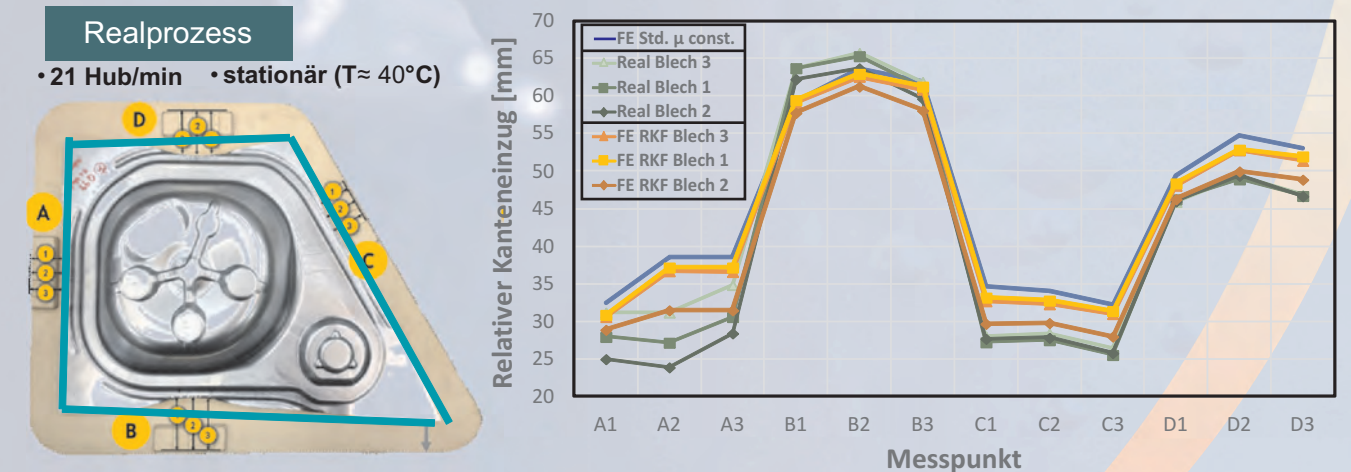


Bild 3: Messlehre sowie Gegenüberstellung des Kanteneinzugs aus Abpressversuch und FE-Simulation

Der Kanteneinzug ist hier eine sinnvolle Größe, da er eine resultierende Größe des gesamten Materialflusses darstellt. In Bild 3 sind zunächst die Messlehre mit verschiedenen Messstellen und der Kan-