

# Vom Kugelschreiber über das Automobil bis zum Flugzeug

## SIMULATIONEN IN DER FERTIGUNGSTECHNIK HELFEN

Die Fertigungstechnik beschäftigt sich mit der Herstellung beliebiger Produkte: vom Kugelschreiber über das Automobil bis zu Flugzeugen. Zur Unterstützung der Fertigungstechniker wird verstärkt auf Simulation zurückgegriffen.

Die Anwendungen, die das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen erforscht, reichen von der mikroskopischen Betrachtung der Spanantstehung über die Bewegungssimulation von Maschinen bis hin zur Bearbeitungssimulation unter Einsatz von Techniken der Virtuellen Realität.

### Simulation in der Fertigungstechnik

Bereits seit Jahrhunderten werden Werkstücke aus Metall und anderen technischen Werkstoffen gefertigt. Zuerst erfolgte dies in mühevoller Handarbeit, seit der industriellen Revolution werden Maschinen eingesetzt. Mittlerweile haben Rechner auch in der Fertigungstechnik zum einen in computergesteuerten Fertigungsanlagen und zum anderen durch den Einsatz von Softwaresystemen in planenden und vorbereitenden Fertigungsbereichen verstärkt Einzug gehalten.

Das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Erforschung und Erprobung spanender Fertigungsverfahren sowie der Entwicklung, Konstruktion und Realisierung neuartiger Maschinentypen. Weiterhin sind die Konzeption und Einführung innovativer Organisationskonzepte sowie die durchgängige Nutzung von Simulationstechniken im Fertigungsumfeld Gegenstand seiner Arbeit.

In diesem Beitrag wird ein Einblick in unsere vielfältigen Simulationsaktivitäten gegeben, die wir als Gründungsmitglied in das Forschungszentrum für Integrierte Simulation (CIS) einbringen werden.

### Prozesssimulation: Späne virtuell erzeugen

Unter Fertigungsprozessen versteht man Prozesse, bei denen mit geometrisch bestimmter Schneide (zum Beispiel Bohrer oder Fräser) oder mit geometrisch unbestimmter Schneide (zum Beispiel eine Schleifscheibe, die mit einer Vielzahl an Schleifkörnern besetzt ist) durch den Eingriff der Schneiden des Werkzeugs in das Werkstück Material abgetragen wird: Es entstehen Späne, das Werkstück wird zerspannt.

Während dieses Zerspanprozesses kommt es zu teilweise starken Temperaturentwicklungen, wodurch sowohl das Werkstück als auch das Werkzeug erhitzt werden. Beides hat negative Auswirkungen, da eine Erhitzung des Werkstücks zu Gefügeänderungen in der Werkstückoberfläche, der sogenannten Randzone, führen kann. Dies kann bewirken, dass das Werkstück seine gewünschten mechanischen Eigenschaften – wie eine erforderliche Härte oder eine notwendige Zähigkeit – verliert und während des Einsatzes versagt. Eine zu starke Erwärmung des Werkzeuges resultiert in einem höheren Verschleiß, das heißt, das Werkzeug wird zu schnell unbrauchbar.

Daneben entstehen während des Zerspanprozesses hohe Prozesskräfte. Diese Kräfte implizieren Eigenspannungen im Werkstück. Bei zu hohen Eigenspannungen können

Spaltenrisse auftreten, wodurch das Bauteil unbrauchbar wird.

Da sehr hohe Ansprüche an die Werkstückqualität gestellt werden, müssen die zu erwartenden Temperaturen und Kräfte möglichst gering gehalten werden.

Um bei der Entwicklung und Optimierung spanender Fertigungsprozesse den experimentellen Aufwand zur Bestimmung optimaler Prozessparameter, zum Beispiel einer idealen Eingriffstiefe des Werkzeugs, zu reduzieren, werden verschiedene Methoden zur Modellierung von Fertigungsprozessen angewendet.

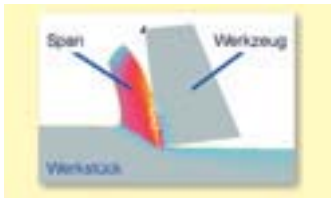
Neben empirischen Methoden, zu denen die systematische Durchführung und Auswertung von Zerspanversuchen zählt, werden analytische und numerische Methoden angewendet, um den Prozess zu modellieren und zu simulieren.

Analytische Methoden basieren auf physikalischen Zusammenhängen in der Wirkzone, das heißt dort, wo Werkzeug und Werkstück aufeinander treffen. Sie sind aufgrund vereinfachter Modellannahmen oft nur in einem begrenzten Parameterbereich anwendbar. Zu den numerischen Methoden zählt die Simulation mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM).

Mit der FEM lassen sich die Vorgänge im Bereich der Wirkzone zwischen Werkzeug und Werkstück bei der Spanbildung simulieren.

Als Ausgangsgrößen der Simulation ergeben sich die Verteilungen von Spannungen, Dehnungen und Temperaturen in der Wirkzone und die geometrische Ausbildung des Spans, so dass sich die mechanischen und thermischen Belastungen von Werkzeug und Werkstück für die Prozessauslegung bestimmen lassen.

Abbildung 1 zeigt als Ausschnitt einer solchen Simulation die zu erwartende Tempe-



raturverteilung in Werkzeug, Werkstück und abfließendem Span.

Als Eingangsgrößen dienen die Geometrie, die mechanischen und thermischen sowie die tribologischen (reibenden, verschleißenden) Materialeigenschaften von Werkzeug und Werkstück.

Weitere Eingangsgrößen sind die Einstellbedingungen wie zum Beispiel Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Vorschub des spanenden Fertigungsprozesses.

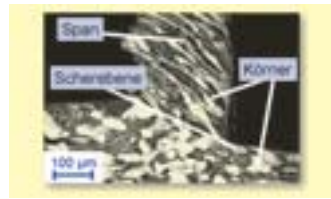
Die Güte der Simulation, das heißt die Vergleichbarkeit der Simulation mit dem realen Experiment, hängt stark von der Qualität der zur Verfügung stehenden Eingangsdaten ab.

Derzeitige Arbeiten beschäftigen sich in hohem Maße mit der Entwicklung geeigneter konstitutiver (bedingender) Materialgesetze. Diese beschreiben insbesondere das plastische Verhalten der Werkstoffe in den für den Zerspanprozess relevanten Bereichen von Verformung, Verformungsgeschwindigkeit und Temperatur.

Damit soll die Güte der durchgeführten Simulationen des Zerspanprozesses und somit die Vergleichbarkeit mit

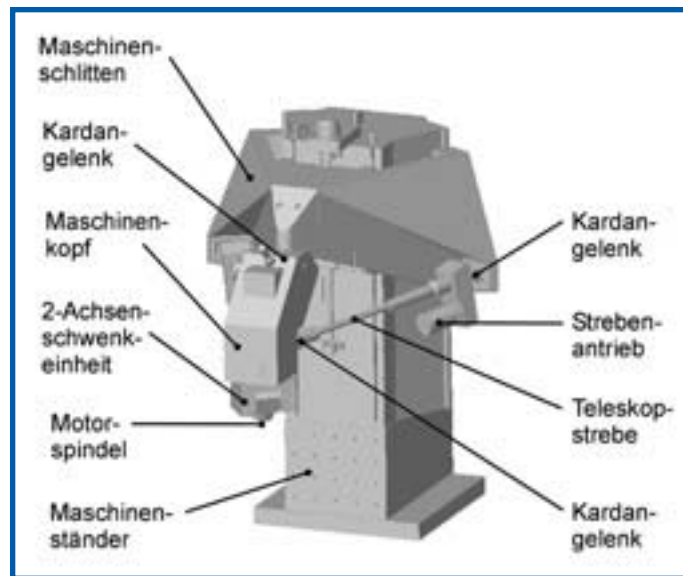
experimentellen Untersuchungen erhöht werden.

Abbildung 2 zeigt das Schlibbild einer Werkstückprobe, bei der beispielsweise anhand der Verformung einzelner Körner (helle Flecken) im Span auf die Verformung des Werkstoffes bei der Spanentstehung geschlossen werden kann. Weiterhin kann die vermessene Länge der Spanwurzel mit der simulierten Spanwurzel verglichen werden, wodurch wei-



tere Aussagen über die Qualität des Simulationsmodells möglich sind.

Aufgrund hoher Anforderungen an die Rechenleistung wird der Zerspanprozess derzeit meist nur zweidimensional betrachtet.



Mit weiteren Fortschritten in der Datenverarbeitung, beispielsweise durch den Einsatz paralleler Rechner, wird eine dreidimensionale Modellierung von Zerspanprozessen mit vertretbarem Aufwand zukünftig möglich sein.

### Simulation zur Unterstützung der Maschinenentwicklung

Die Bearbeitung der Werkstücke erfolgt im industriellen Zeitalter nicht mehr von Hand: Hierfür gibt es Maschinen.

Am Beispiel einer speziellen transportablen Bearbeitungseinheit, die am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Universität Hannover (IFW) konzipiert, entwickelt und gebaut wurde, werden mögliche Einsatzfelder der Simulation bei der Maschinenentwicklung aufgezeigt. Diese Bearbeitungsmaschine zeichnet sich durch ein neuartiges Maschinenkonzept aus, das speziell für die Reparatur von Großwerkzeugen im Karosseriebau, wie sie beispielsweise zur Herstellung von Blechteilen beim Auto benötigt werden, entwickelt wurde.

Abbildung 3 zeigt ein Computermodell dieser Maschine.

Abbildung 1  
Ausschnitt einer Prozesssimulation

Abbildung 2  
Schlibbild einer Werkstückprobe

Abbildung 3  
Transportable Bearbeitungseinheit mit hybridkinematischer Struktur

Abbildung 4  
FE-Simulation der transportablen Bearbeitungseinheit

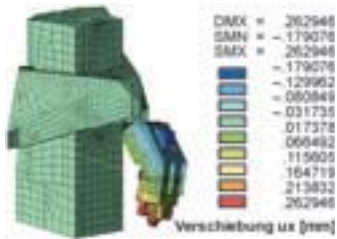


Abbildung 5  
Foto der transportablen Bearbeitungseinheit



1 CAD: Computer Aided Design  
CAM: Computer Aided Manufacturing  
2 NC: numerical control

Abbildung 6  
Beispiel für die virtuelle Bearbeitung eines Werkstückes mit zwei unterschiedlichen Fräsern



trägt eine 2-achsige Schwenkeinheit mit integrierter Hochfrequenz-Motorspindel.

Mit dieser transportablen Bearbeitungseinheit soll die automatisierte Reparatur von Gesenken in unmittelbarer Produktionsumgebung ermöglicht werden.

Parallel zum Ausbau des beschädigten Großwerkzeugs aus der Produktionsanlage wird die Maschine direkt neben der Fertigungslinie aufgestellt.

Durch mechanische Abtastung oder optische Systeme wird die Oberfläche des Gesenks im Bereich der Schadensstelle aufgenommen.

Durch Digitalisierung, Flächenrückführung und CAD/CAM<sup>1</sup>-Verarbeitung können schließlich NC<sup>2</sup>-Programme für die automatisierte Schweiß- und Fräsbearbeitung erstellt werden. Manuelle Nacharbeiten werden dabei auf ein Minimum reduziert.

Während der Entwicklung der Maschine wurde zunächst ein mathematisches Modell ihrer Kinematiken, das heißt ihrer Bewegungsmöglichkeiten erzeugt, wodurch der theoretische Arbeitsraum ermittelt wurde. Dies ist wichtig, da hiermit abgeschätzt werden kann, ob mit dieser Maschine überhaupt die erforderlichen Arbeiten ausgeführt werden können.

Abbildung 4 zeigt Ergebnisse der nachfolgenden Finite-Elemente-Analyse der Steifigkeit. Damit wird ermittelt, ob diese Bearbeitungseinheit die notwendige Genauigkeit erzielt.

Abbildung 5 zeigt ein Foto des Prototypen dieser Maschine, mit dem derzeit erste Zerspanversuche durchgeführt werden.

### Bauteile virtuell bearbeiten

Damit eine Maschine ein Werkstück automatisch fertigen kann, muss ihr in einem sogenannten NC-Programm mitgeteilt werden, welche Verbirgbewegungen sie mit dem Werkzeug auszuführen hat (Abbildung 6).

Zur Erstellung dieser NC-Programme gibt es bereits eine Reihe kommerzieller Softwaresysteme, die allerdings alle davon ausgehen, dass sich Maschine, Werkzeug und Werkstück bei der Bearbeitung ideal verhalten. Dies bedeutet, dass vorgegebene Positionen genau angefahren würden. In der Realität trifft dies nicht immer zu.

Große Umformgesenke, wie sie zur Herstellung von Karoseriebauteilen im Automobilbau verwendet werden (siehe auch vorherigen Abschnitt), bestehen aus hochfesten Stählen (zum Beispiel Vergütungsstahl 40CrMnMo7 – 1.2311), damit sie zur Umformung von Stahlblechen überhaupt verwendet werden können.

Die Rohform dieser Gesenke wird gegossen. Diese gegossene Form ist noch sehr ungenau. Deshalb wird sie spanend bearbeitet, denn sie muss bis auf einige Mikrometer genau sein. Speziell bei der Feinbearbeitung werden häufig dünn, weit auskragende Fräswerkzeuge eingesetzt. Trifft nun ein dünnes, langes Werkzeug auf ein hochfestes Material, so wird dieses Werkzeug durch die hohen Prozesskräfte durchgebogen oder abgedrängt. Resultat ist ein Umformgesenk, das von seiner Sollkontur abweicht, da nicht genügend Material abgetragen wurde. Erschwerend ist, dass die Höhe dieses nicht abgetragenen Materials (Restaumaß) nicht konstant ist, sondern je nach Eingriffsbedingungen stark variieren kann.

Zur Kompensation dieser Fräserabdrängung wird am IFW ein System entwickelt, mit dem zunächst die Fertigung des Bauteils simuliert wird.

Im Gegensatz zu den einleitenden Ausführungen über die Prozesssimulation werden nicht die mikroskopischen Vorgänge bei der Spanentstehung simuliert.

In einer selbst programmierten Simulationsumgebung wird das Werkzeug mit dem Werkstück an jeder Position des NC-Programms verschnitten, wodurch sich als Schnittmenge der zu erwartende Span ergibt. Mit Hilfe der simulativ ermittelten Spangeometrie und den ein-

gestellten Bearbeitungsparametern werden die Zerspankräfte berechnet. Zusammen mit experimentell ermittelten Werkstoffkennwerten und den Maschinen- und Werkzeugsteifigkeiten kann nun die zu erwartende Abdrängung ermittelt werden. Zur Kompensation dieser Abdrängung wird der Werkzeugweg so angepasst, dass das Werkzeug bei idealen Bedingungen zu viel Material abtragen würde. Dies tut es aufgrund seiner Durchbiegung aber nicht.

Mit diesem System werden zukünftig die Bearbeitungszeiten und damit die Herstellungskosten für große Umformgesenke stark reduziert werden können, da dann bereits mit einer Schlichtbearbeitung die geforderte Genauigkeit erreicht werden kann.

Eine weitere Anwendung modernster Simulationstechnik zeigt sich bei der Nutzung von Techniken der Virtuellen Realität für die NC-Programmierung.



Abbildung 7  
Haptisches 3D-Eingabegerät und stereoskopischer Monitor zur Unterstützung der NC-Programmierung

In der NC-Programmierung werden technologische und geometrische Informationen über die konventionellen Medien Tastatur und Maus eingegeben.

Dieses Medien fehlt jedoch die räumliche Interaktivität. Daher muß die Programmierung von Werkzeugwegen mit Hilfe von geometrischen Hilfsobjekten erfolgen. Dies ist bei komplexen Freiformgeometrien sehr schwierig.

In diesem neuen Vorhaben soll untersucht werden, wie sich Methoden und Geräte der Virtuellen Realität zur direkten Eingabe von Werkzeugwegen nutzen lassen.

Die Prozessumgebung wird räumlich dargestellt (3-D-Bildschirm mit stereoskopischer Ausgabe) und zusätzlich über Krafrückkopplung in sechs Achsen mit einem haptischen Eingabegerät erfühlbar gemacht (Abbildung 7).

Hierdurch bekommt der Benutzer nicht nur einen tatsächlich räumlichen Eindruck des Werkstücks, sondern er kann es im virtuellen Raum anfassen und berühren.

Abbildung 8 zeigt, wie die Bearbeitung eines Bauteils schrittweise programmiert werden kann.



Abbildung 8  
Verschiedene Bearbeitungszustände eines Beispielbauteils mit Fertigteilgeometrie (rot) und Restmaterial (blau)



**Dipl.-Ing. Michael Zwick** arbeitet seit 1996 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und spanende Werkzeugmaschinen, wo er seit 1999 den Bereich Fertigungsorganisation leitet. Im Rahmen seiner Dissertation beschäftigt er sich mit der integrierten Produkt- und Prozessmodellierung von Fertigungseinrichtungen. [zwick@ifw.uni-hannover.de](mailto:zwick@ifw.uni-hannover.de)

Institut für Fertigungstechnik und spanende Werkzeugmaschinen, Schloßwender Straße 5, 30159 Hannover  
[www.ifw.uni-hannover.de](http://www.ifw.uni-hannover.de)