

# Finite-Elemente-Modelle zur Simulation des Zerspanens von zellularen metallischen Werkstoffen

Dipl.-Ing. Rafael Guerra

## 1 Einleitung

Neue Varianten zellulärer metallischer Werkstoffe unterliegen einer ständigen Entwicklung und sind damit auch für neue mögliche Einsatzgebiete zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ist die Bearbeitbarkeit von diesen neuen Materialien entscheidend.

Zerspanverfahren können mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode analysiert werden [MAC-03]. Die Finite-Elemente-Methode wird auch zur Analyse zellulärer metallischer Werkstoffe verwendet [DEG-02].

Die Entwicklung eines Finite-Elemente-Modells für die Simulation des Zerspanens von zellularen metallischen Werkstoffen soll dazu beitragen, das Verständnis über die Zerspanung und die dazugehörigen physikalischen Phänomene zu erklären. Daraus sollen Empfehlungen zur Optimierung der Bearbeitung zellulärer metallischer Werkstoffen abgeleitet werden.

## 2 Entwicklung des Finite-Elemente-Modells

### 2.1 Geometrische Darstellung

Die Zellgröße und die charakteristische Längen bzw. die Schnitttiefe bewegen sich in der Größenordnung von Millimetern. Deswegen muss die Struktur des Materials auf der Mesoebene modelliert werden. Die Anwendung von Homogenisierungsverfahren bzw. ein mögliches Kontinuumsmodell, wurde verworfen.

Zwei unterschiedliche 2D-Modelle des Werkstoffes wurden entwickelt. Das erste Modell basiert auf dem hexagonalen Modell. Bei dieser Variante wurden die geraden Seiten des Hexagons durch Bogen ersetzt. Die Krümmung der Seiten ist unregelmäßig, damit die Unordnung der Mesostruktur besser dargestellt wird (Abb. 1.1, links).

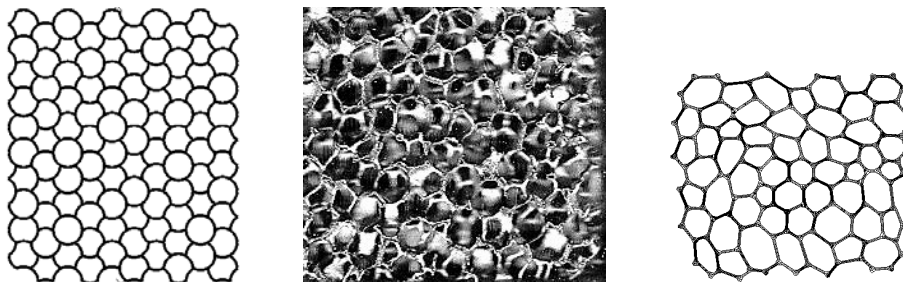


Abb. 1.1: Hexagonales Modell, gescanntes Bild der Probe und polygonales Modell [GUE-10]

Das zweite Modell basiert auf Bildern des Materials (Abb. 1.1, zentral). Eine Probe des Werkstoffes (Edelstahl 314L, Abmessungen: 14x14x10mm) wurde gescannt und analysiert, indem visuell die Oberfläche der Probe ausgewertet wurde. Eine grobe Auswertung der folgenden Geometrieparameter wurde vorgenommen: Form und Größe der Zellen, Anzahl der Nachbarzellen, Stegform, Ausrichtung der Zellen,

Verteilung der Zellen, Anzahl der gefüllten Zellen und der fehlenden Stege. Mit Hilfe dieser Information wurde das polygonale Modell (Abb. 1.1, rechts) entwickelt.

## 2.2 Materialeigenschaften

Information über die Charakterisierung des Materials in Zellwänden von zellularen Werkstoffen aus Edelstahl steht in der Literatur nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund werden die mechanischen Eigenschaften des Hauptmaterials AISI 314L verwendet ( $E=2,1 \times 10^{11}$  Pa;  $\nu=0,3$ ;  $\rho=7800$  kg/m<sup>3</sup>) und das Materialverhalten wird durch ein Spannung-Dehnung-Diagramm dargestellt.

## 3 Implementierung des Finite-Elemente-Modells

Für die Implementierung der 2D-Modelle kommt das Finite-Element-Programm ABAQUS/CAE V.6.5 zum Einsatz [HIB-01]. Die Diskretisierung der Modelle wurden mit 2D-ebene-Verzerrung Elemente (*Plain strain elements*) (Abb. 3.1) vorgenommen. Diese Elemente ermöglichen die Modellierung von großen Verformungen und Versagen des Materials. Wegen der großen Verformung, die während der Simulation entsteht, wurde die adaptive Generierung verwendet, um Konvergenzprobleme während der Simulation zu vermeiden. Der Kontakt zwischen den Zellwänden wurde mit dem Coulombschen Reibungsgesetz modelliert. Dieses Modell soll eine gute Näherung ermöglichen, da keine Daten über die Reibungsverhalten des Materials verfügbar ist.

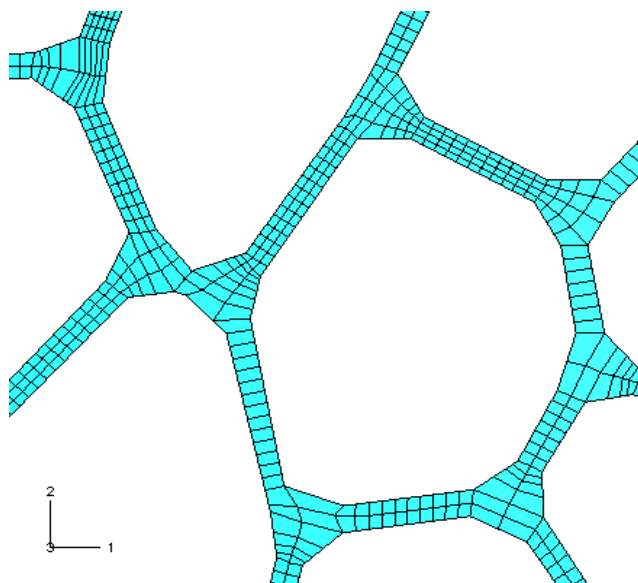


Abb. 3.1: Diskretisierung einer Region (polygonales Modell)

## 4 Verifizierung des Materialmodells

Simulationen von Druckversuchen wurden durchgeführt, um das makroskopische Verhalten des Modells zu bewerten. Die Ergebnisse der Simulationen wurden mit Daten von Druckversuchen der Metallschäume aus Edelstahl verglichen [IFA-09].

Druckversuche mit unterschiedlichen Varianten des Bogenmodells wurden simuliert. Varianten 1, 2 und 3 unterschieden sich von einander durch Größe der Probe, Dichte des Werkstoffes und Anordnung der Zelle (Tabelle 4.1). Die Sub-Varianten a, b, c, d des Modells 2 unterscheiden sich in der Krümmung einiger Stege (Abb. 4.1). Die Größe der Probe und Dichte bleiben unverändert.

Die Änderung der Dichte wurde durch die Verringerung der Dicke von Wänden erzielt. Die Platten wurden als starre Körper modelliert. Die Verschiebung der Druckplatten wurde als Randbedingungen eingegeben (Abb. 4.2). Die Simulationen der Modelle wurden mit Hilfe von ABAQUS/Standard durchgeführt.

Tab. 4.1: Anzahl von Zellen und Dichte für die Varianten des Bogenmodells

Bogenmodell	Anzahl von Zellen	Dichte ( $\text{g/cm}^3$ )
1	14	1,38
2a, 2b, 2c, 2d	14	0,89
3	100	1,38

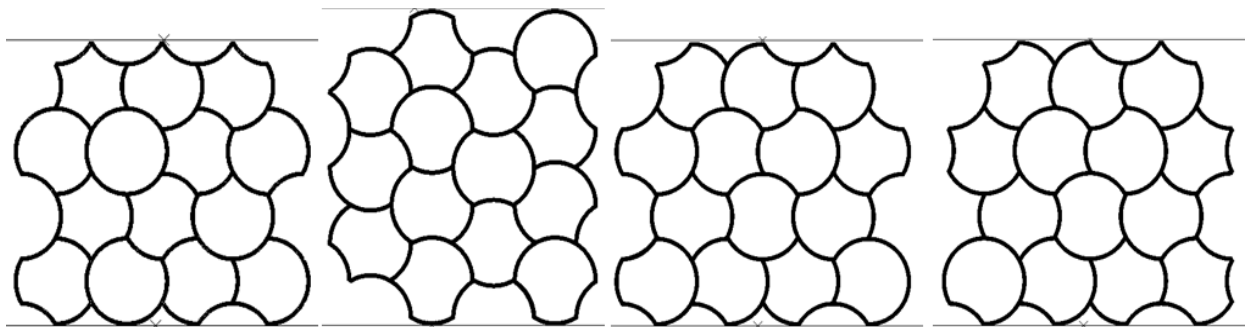


Abb. 4.1: Sub-Varianten vom Bogenmodell 2 (Dichte  $0,79\text{g/cm}^3$ )

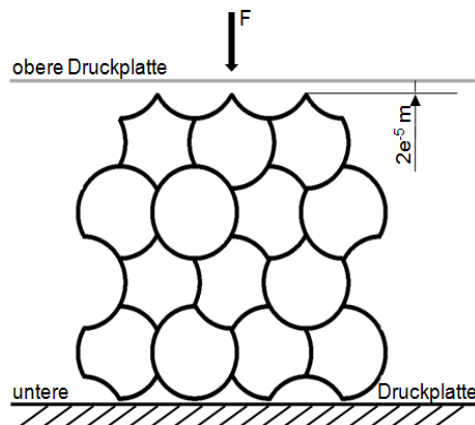


Abb. 4.2: Implementierung des Druckversuches für eine Variante des Modells 2

### Ergebnisse der Verifizierung

Die Verformung des Modells (Abb. 4.2), die auf die Knickung der Stege zurückzuführen ist, stellte sich gut sichtbar ein. Der Bruch der Stege wurde bei der Implementierung nicht betrachtet, da kein Modell zum Materialversagen bei ABAQUS/Standard vorhanden ist.

Für Varianten 1 und 2 (2a-2d) ist das voraussichtliche Plateau im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bemerkbar (Abb. 4.3), obwohl sich die Werte der Spannung bei Entstehung des Plateaus in Simulation und Experimente merklich unterscheiden. Andererseits sind Modell 2 und die experimentelle Ergebnisse für  $\rho=0,89\text{g/cm}^3$  im Elastizitätsbereich ähnlich.

Wenn Varianten 1 und 2 (2a-2d) verglichen werden, kann man eine Senkung des Elastizitätsmoduls erkennen. Dieses Verhalten wurde auch in den experimentellen Ergebnissen beobachtet, wenn die Dichte des Werkstoffes geringer wurde.

Der Einfluss von einzelnen Zellen kann durch die Sprünge des Diagramms ausgewiesen werden. Die unterschiedliche Länge der Kurven ist auch auf die Anordnung der Zellen zurückzuführen, da besondere Krümmung von einzelnen Stegen Konvergenzprobleme auslösen können. Die Ergebnisse für das polygonale unterschieden sich nicht bedeutend von diesen des orthogonalen Modells.

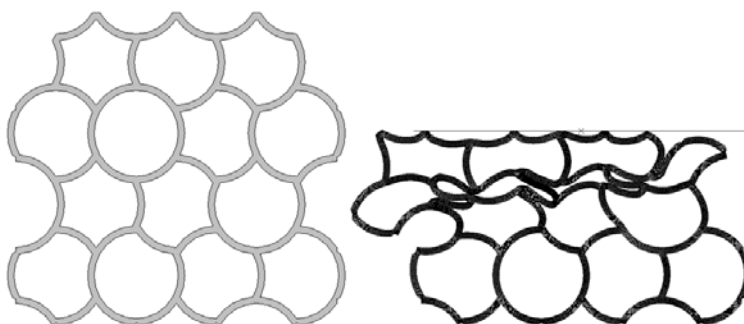


Abb 4.2: Modell 1, vor und nach der Simulation des Druckversuchs [KAL-10]

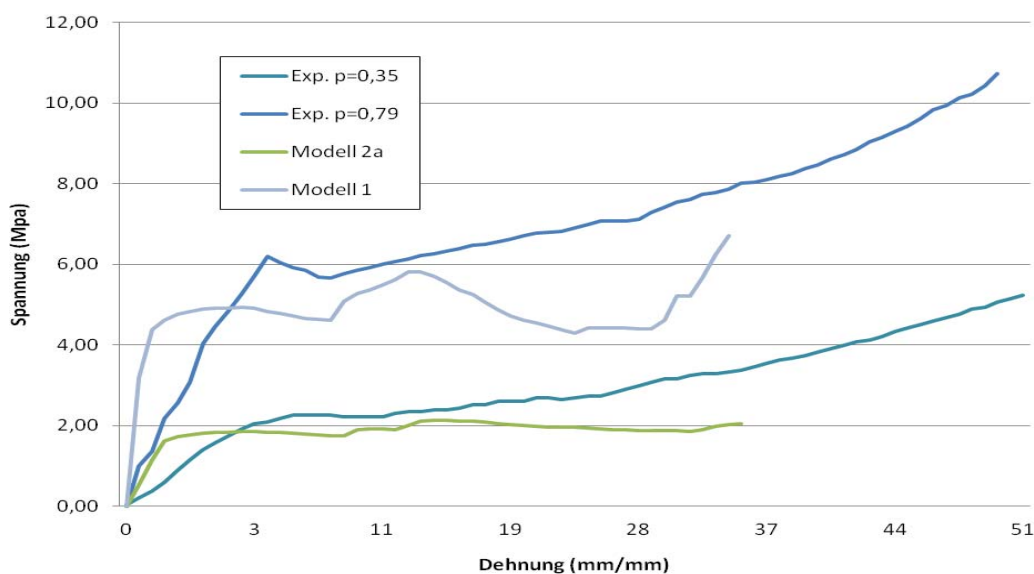


Abb. 4.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von experimentellen und numerischen Druckversuche

## 5 Simulation des orthogonalen Zerspanvorganges

Erste Simulationen des orthogonalen Zerspanvorganges wurden erprobt (Abb. 5.1). Das Versagensmodell wurde erprobt, indem überbelastete Elemente vom Modell entfernt werden. Die neue Diskretisierung des verformten Modells (Remeshing) wurden getestet. Die Simulationen für die Modelle wurden mit Hilfe ABAQUS/Explicit ausgeführt.

Folgende Schnittparameter wurden bei der Simulation verwendet:  $v_c = 60$  m/min;  $a_p = 2,0$  mm;  $r_\xi = 0,2$  mm;  $\gamma = 22^\circ$ ;  $\alpha = 7^\circ$ .

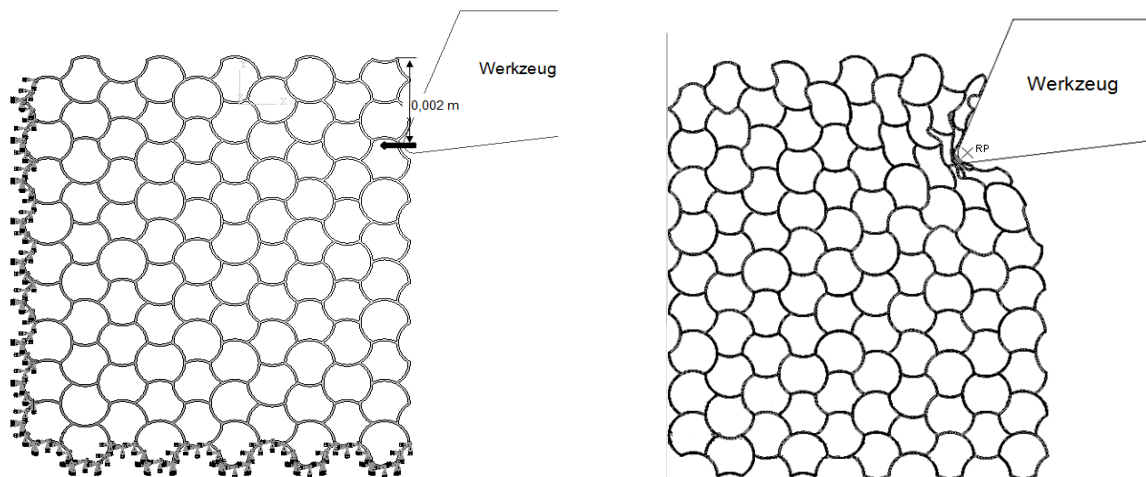


Abb. 5.1: Modell des orthogonalen Zerspanvorganges mit Randbedingungen und Verformte Modelle nach 2mm Verschiebung [KAL-10b]

### Ergebnisse der Simulation

Die plastische Verformung bzw. der Einsturz der Struktur wurde erreicht, eine Spanbildung noch nicht. Die Ergebnisse für das polygonale Modell unterschieden sich nicht bedeutend von denen des orthogonalen Modells.

Eine neue Diskretisierung des verformten Modells (Remeshing) wurde ebenfalls getestet. Obwohl die Methode zur Simulation der Spanbildung bereits Anwendung fand, wurde in diesem Fall das Remeshing von der komplizierten Struktur des Materials verhindert.

## 6 Zusammenfassung

Die 2D-Modelle haben Einschränkungen gezeigt, besonders bei der Simulation zur Spanbildung. Aufgrund der Relevanz des Bruchs von Stegen bei der Spanbildung soll diese Einschränkung der vorliegenden Modelle überwunden werden. Keine Spanbildung ist möglich ohne den Zusammenbruch des Materials.

Zukünftig sollen auch 3D-Modelle untersucht werden. Die Weaire-Phelan Struktur, die auf Dodekaeder und Tetrakishexaeder basiert, soll als Basis für die Entwicklung eines neuen Modells dienen.

### Literatur

- /MAC-03/ Mackerle, J.: Finite element analysis and simulation of machining: an addendum A bibliography (1996-2002); International Journal of Machine Tools & Manufacture, (43) 2003, pp. 103-114.
- /DEG-02/ Degisher, H.; Kriszt, B.: Handbook of Cellular Metals: Production, Processing and Applications; Wiley-VCH, 2002, ISBN 3527303391.
- /GUE-10/ Guerra, N.: Forschungsbericht, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, August 2010.
- /HIB-01/ ABAQUS. Theory Manual and User's Manuals, Version 6.4; Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 2001.

- /IFA-09/ [http://www.ifam-dd.fraunhofer.de/fhg/ifam\\_dd/gebiete/schaum/eigenschaften/index.jsp](http://www.ifam-dd.fraunhofer.de/fhg/ifam_dd/gebiete/schaum/eigenschaften/index.jsp)
- /KAL-10a/ Kalchunkova, N.: Entwicklung von Finite-Element-Modellen zur Simulation der Zerspanbarkeit von zellularen metallischen Werkstoffen: Bachelorarbeit, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden, 2010.
- /KAL-10b/ Kalchunkova, N; Guerra, R.; Teicher, U.; Nestler, A.: Numerical Models of Metal Foam for the Simulation of Machining. EUFOAM 2010, Borovets, Bulgarien, July 4-7, 2010.