



BHM (2016) Vol. 161 (11): 515–519
 DOI 10.1007/s00501-016-0545-8
 © Der/die Autor(en) 2016. Dieser Artikel ist auf
 SpringerLink mit Open Access verfügbar

BHM Berg- und
 Hüttenmännische
 Monatshefte

LEAN PANEL BENDER – Einige mechanische Aspekte der Modellierung in Echtzeit für Produktion in Losgröße 1

Christian Zehetner¹, Franz Hammelmüller¹, Wolfgang Kunze², Helmut J. Holl³ und Hans Irschik³

¹Linz Center of Mechatronics GmbH, Linz, Österreich

²Salvagnini Maschinenbau GmbH, Ennsdorf, Österreich

³Institut für Technische Mechanik, Johannes Kepler Universität Linz, Linz, Österreich

Eingegangen 30. September 2016; angenommen 7. Oktober 2016; online publiziert 24. Oktober 2016

Zusammenfassung: Nachfolgend werden einige wissenschaftliche Aspekte der Echtzeit-Materialerkennungsstrategie MAC diskutiert, die in der neuen Maschinenfamilie LEAN PANEL BENDER der Firma Salvagnini Maschinenbau realisiert ist und die eine hochpräzise und hocheffiziente Herstellung von komplex geformten Blechprodukten sowohl bei Losgröße 1 als auch in der Serie erlaubt.

Schlüsselwörter: Industrie 4.0, Echtzeit, Materialerkennung, Losgröße 1, Nicht-lineare FE-Methoden, Ähnlichkeitsmechanik

LEAN PANEL BENDER – Some Mechanics Aspects of Real-time Modelling for Single-slot Production

Abstract: In this paper, we discuss some scientific aspects of the real-time material detection strategy MAC, which is realized in the novel LEAN PANEL BENDER generation of the company Salvagnini Maschinenbau GmbH and which allows the production of complex metal devices in a highly efficient and accurate manner for both, single-slot production and production in series.

Keywords: Industry 4.0, Real-time, Material detection, Single-slot production, Non-linear FE-Methods, Similarity formulations

1. Einleitung

Das Konzept "Industrie 4.0" setzt unter anderem voraus, dass das physische Verhalten mechatronischer Maschi-

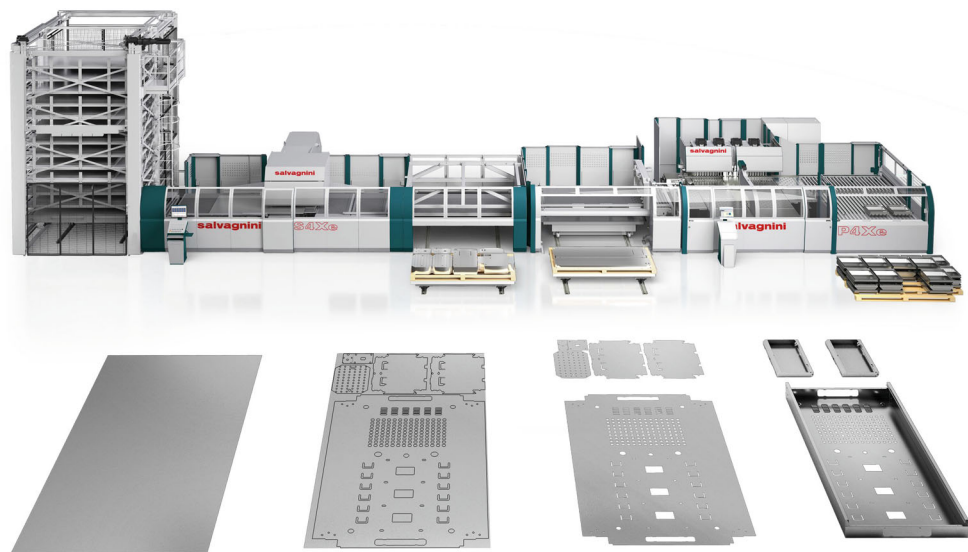
nenkomponenten durch Computerprogramme in Echtzeit („real-time“) beschrieben wird. Die Komponenten müssen mit Sensoren ausgestattet sein, und die gemessenen Informationen müssen in die Echtzeit-Computerprogramme Eingang finden. Dann kann das physische Verhalten durch Aktoren im Rahmen geschlossener Echtzeit-Regelkreise beeinflusst werden. Die Strategie bezieht sich auf die computergestützte Interaktion einer Menge („swarms“) mechatronischer Komponenten, welche im „Internet der Dinge (Internet of Things)“ zu „Cyber-Physikalischen Systemen (Cyber-Physical Systems, CPS)“ zusammengefasst werden. Eine moderne Produktionsmaschine kann, wie im vorliegenden Beitrag, für sich ein CPS bilden, aber das Konzept geht bis zur Zusammenarbeit verschiedener Maschinen in einer Fabrik und zur Interaktion verschiedener Fabriken weltweit. Für Literatur zu "Industrie 4.0" siehe z.B. [1, 2].

Was die echtzeitfähige Beschreibung industrieller Maschinen durch Computerprogramme betrifft, sind mehrere Aspekte wesentlich: Zunächst muss die Maschine in Entsprechung mit der Physik und der Erfahrung durch mathematische Beziehungen charakterisiert werden. Man spricht von Modellbildung und den daraus resultierenden Modellen. Für deren Lösung werden geeignete mathematische Methoden benötigt, wobei die Computerprogramme rechenzeit-effizient programmiert sein sollten. Es ist somit klar, dass die Anwendung des Konzepts Industrie 4.0 auf komplexe Maschinen und Produktionsprozesse neue ingenieurwissenschaftliche Fragen aufwirft, in den Computerwissenschaften sowie bei Maschinenbau und Mechatronik. Im Folgenden soll speziell über die mechanische Modellbildung für die computergestützte Beschreibung automatischer Blechbiegeautomaten in Echtzeit mit dem Ziel der Losgröße 1 Produktion berichtet werden.

Wir beziehen uns dabei auf eine neue Generation von automatischen Blechbiegeautomaten, die LEAN PANEL BENDER der Firma Salvagnini Maschinenbau Ges.m.b.H. in Ennsdorf, NÖ, siehe [3] und Abb. 1.

o. Univ.-Prof. DI Dr. Dr. hc. H. Irschik (✉)
 Institut für Technische Mechanik,
 Johannes Kepler Universität Linz,
 Altenbergerstraße 69,
 4040 Linz, Österreich
 hans.irschik@jku.at

Abb. 1: Salvagnini LEAN PANEL BENDER: Von der Platine automatisch, ohne Unterbrechung, zum fertigen Produkt, siehe [3]



Die LEAN PANEL BENDER Generation wurde von Salvagnini Maschinenbau schon im Lichte von Industrie 4.0 entworfen. Die Maschinen ermöglichen hochpräzise und hochflexible Produktion sowohl von komplex geformten Blechteilen in Serie als auch für Losgröße 1. Höchste Produktivität wird durch die Vermeidung von Rüst- und Standzeiten erreicht. Gewichtsoptimierte Konstruktion und ein fortschrittliches dezentrales Antriebskonzept führen in Kombination mit kraftsparenden Biegevorgängen zu besonderer Energieeffizienz. Ökologische Aspekte sind durch hohe Energie- und Materialeinsparung vorbildlich erfüllt. Elektrische Antriebe der Maschinen und vollständig abgeschlossene Zylinder vermeiden ölhydraulische Komponenten bei dramatischer Maschinenölsparsnis. Der hohe Automatisierungsgrad bietet anspruchsvolle und gefährdungsfreie Arbeitsplätze für das Bedienungspersonal.

Die LEAN PANEL BENDER der Firma Salvagnini Maschinenbau erkennen und kompensieren aus ihrem eigenen Verhalten Schwankungen in den Materialeigenschaften der bearbeiteten Bleche in Echtzeit. Diese neuartige Materialerkennung, genannt „MAC“, ermöglicht Losgröße 1 sowie eine konstant hohe Qualität bei der Serienproduktion in großen Stückzahlen. Neu ist auch das Konzept des Condition Monitorings der Maschinen und ihrer Teile, welches eine vorbeugende Wartung ermöglicht. Die neue Modulbauweise der LEAN-Maschinenfamilie von Salvagnini erlaubt flexible Produktion in Kommunikation mit anderen Maschinen und stellt auch in dieser Hinsicht eine industrielle Vorreiterin des Konzepts Industrie 4.0 dar.

Nachfolgend werden Aspekte der Lösung eines zugehörigen wissenschaftlichen Problems skizziert, welches im Rahmen einer Kooperation der Firma Salvagnini Maschinenbau mit dem „Linz Center of Mechatronics (LCM)“ und dem Institut für Technische Mechanik der Johannes Kepler Universität (JKU Linz) behandelt wurde und wird. Es geht um die Frage, wie bei den gegenständlichen Biegevorgängen, die durch Schwankungen vieler Material- und Geometrieparameter beeinflusst werden können und bei denen an die Berechnung höchste Genauigkeitsanforderungen

gestellt werden, eine computergestützte Modellierung und Materialerkennung in Echtzeit, und somit eine Losgröße 1 Produktion, überhaupt möglich ist. Zunächst wird der hohe Aufwand an Rechenzeit beschrieben, welcher unter Berücksichtigung von modernsten Möglichkeiten des wissenschaftlichen Rechnens benötigt wird, um einen spezifischen Biegevorgang mit der erforderlichen Genauigkeit zu beschreiben. Nach einem kurzen Ausflug in die konstitutive Modellierung der umzuformenden Bleche wird erklärt, wie Theoreme der Ähnlichkeitsmechanik herangezogen werden können, um Echtzeitfähigkeit zu erreichen. Der vorliegende Artikel liefert eine zusammenfassende Beschreibung der zugehörigen Strategie; für Details siehe die Beiträge zur internationalen Konferenzreihe „Computational Plasticity“ ([4-8]).

2. Finite Element Modellierung des Blechbiegevorgangs

Für eine computergestützte Modellierung des Biegevorganges bei Blechbiegeautomaten bietet sich die Methode der Finiten Elemente (FE) an: die Maschine und das umzuformende Blech werden in kleine, endlich große Elemente zerlegt, die dann nach Grundsätzen der Mechanik zu einem FE-Gesamtmodell verbunden werden. Dies ergibt ein großes lineares oder nichtlineares Gleichungssystem, welches effizient zu lösen ist. Auch wenn im vorliegenden Fall die Verformungen der Maschine klein bleiben, führen die Kantschwinge und die Antriebe beim Umformvorgang große Bewegungen aus, und das ursprünglich ebene Blech wird stark und bleibend verformt. Weiters treten beim Umformvorgang relative Verschiebungen zwischen Blech und Maschinenteilen auf. Es müssen daher nichtlineare FE-Verfahren herangezogen werden, welche sehr aufwändig sind, die aber auf Grund neuer Forschungsergebnisse laufend erweitert werden, um die Rechenzeit zu senken und die Genauigkeit zu erhöhen. In der vorliegenden Studie wurde das kommerzielle FE-Programm ABAQUS herangezogen [9].

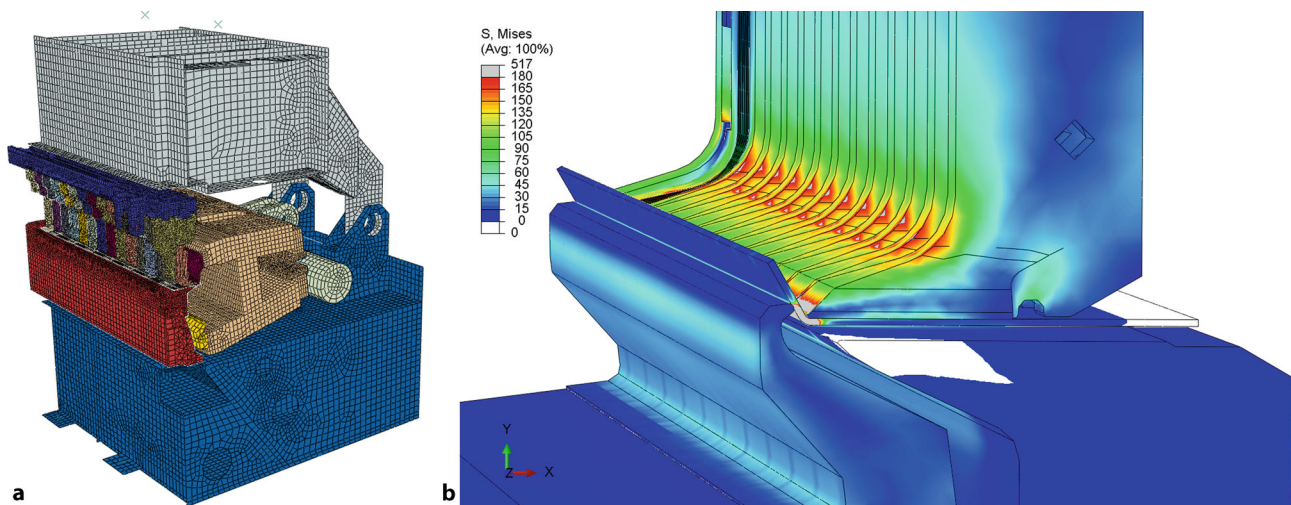


Abb. 2: (a) Dreidimensionales nichtlineares FE-Modell; (b) v.Mises Spannungen im Niederhalter, siehe [4] und [5]

Abb. 3: (a) Dimensionsbehaftete Umformkraft über den Biege­winkel; (b): Dimensionslose Formulierung, siehe [6] und [8]

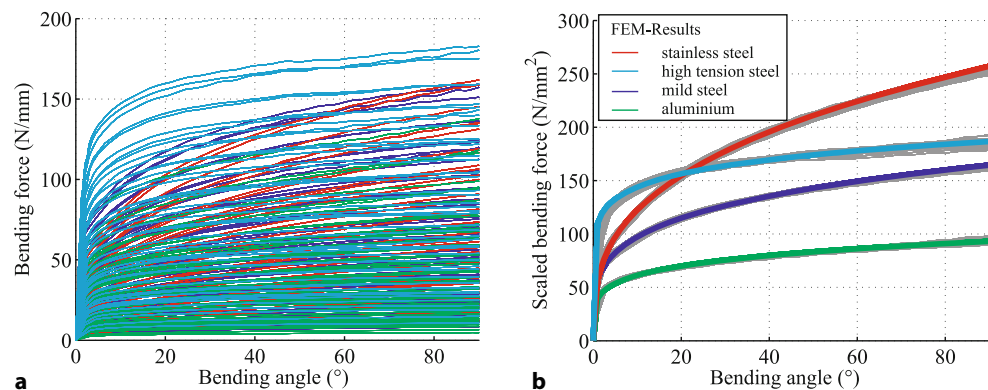


Abb. 2(a) zeigt exemplarisch das dreidimensionale FE-Modell eines Blechbiegeautomaten, siehe [5].

Weil die Dicke des umzuformenden Blechs im Vergleich zu den Abmessungen der Maschine klein ist, muss für eine konvergierte Lösung eine große FE-Zahl verwendet werden. In [5] wird berichtet: „This complete three-dimensional FE model has a total number of 5117118 variables, and finally we got a computation time with ABAQUS of $t_c = 410153s$ (about 114h) using eight CPUs.“ Die Rechenzeit dafür ist also viel größer als die Dauer des einzelnen Umformvorganges im Zehntel-Sekundenbereich; von Echtzeit-Fähigkeit ist keine Rede. Solche dreidimensionalen Modelle werden aber z.B. benötigt, um in exemplarischen Studien die hohe Beanspruchung in den komplex geformten Maschinenteilen genau vorherzusagen (siehe Abb. 2(b) für die v.Mises-Vergleichspannungen in Elementen des Niederhalters) sowie um eine genaue Abschätzung für die Verformung des umgeformten Blechs zu erhalten.

Was eine raschere computergestützte Vorhersage von Größen betrifft, die für den Umformvorgang insgesamt charakteristisch sind, z.B. Umformkräfte, Biege­winkel und Schenkellängen des Blechs (vor und nach dem Ausspannen aus der Maschine), liefert die Modell-Reduktion einen ersten Ansatz. Zunächst kann in Vorstudien abgeschätzt werden, in welchen Bereichen die Trägheitskräfte vernachlässigbar sind, sodass weniger aufwändige quasi-statische

Berechnungen ausreichend genau erscheinen. In [5] und [7] wird zudem über die Reduktion auf zweidimensionale Maschinenmodelle und eindimensionale nichtlineare Balkenmodelle für das umzuformende Blech berichtet. Bei diesen reduzierten Modellen sinkt die Rechenzeit in den Minutenbereich ab. Allerdings können die Einflüsse der Blech- und Maschinenabmessungen quer zur Blechdicke nur im Wege von Homogenisierungsbetrachtungen berücksichtigt werden. Solche reduzierten Modelle erlauben zwar immer noch keine Beschreibung des Biegevorgangs in Echtzeit, es können aber umfangreichere Parameterstudien durchgeführt werden. Die dreidimensionalen Modelle werden dabei zur exemplarischen Bestätigung herangezogen. Um die verwendeten Eingangsparameter und deren mögliche Schwankungen realitätsnah zu berücksichtigen, benötigt man weiters experimentelle Messungen.

3. Konstitutive Modellbildung für das umzuformende Blech

Für die computergestützte Modellierung des Blechbiegevorgangs unter Verwendung von FE-Programmen (siehe Abschnitt 2 oben) benötigt man zunächst die eindimensionale Fließkurve des umzuformenden Materials. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannungs- und

Dehnungsmaßen im Zugversuch. Dafür wurden verschiedenste in der Biegepraxis häufig verwendete Materialien wie Aluminium, rostfreie und hochfeste Stähle und deren Schwankungen in ausführlichen Versuchsreihen getestet. Es zeigt sich, dass eine auf Ludvik [10] zurückgehende Formulierung für die bleibende Verformung des Blechs in weiten Bereichen des Biegevorgangs ausreichend genau ist (siehe [4] und [6]). Diese Erkenntnis ist eine wichtige Voraussetzung für eine einheitliche Materialerkennung durch die Maschine in Echtzeit (MAC). In den FE-Programmen werden die zwei- und dreidimensionalen konstitutiven Beziehungen aus den eindimensionalen Fließkurven automatisch generiert. Als weitere Information muss der Einfluss der durch die Blechherstellung entstehenden Anisotropie berücksichtigt werden [6]. Als charakteristisches Ergebnis zeigt Abb. 3(a) den mittels zweidimensionaler FE-Berechnungen ermittelten Verlauf der Umformkraft über den Biegewinkel in einem Abkantautomaten für verschiedene Blechmaterialien, Blechdicken und Anfangsabstände des Werkzeugs. Eine weite Streuung mit recht unübersichtlich erscheinenden Verläufen ist ersichtlich.

4. Ähnlichkeitsmechanische Modellbeschreibung und Losgröße 1 Produktion

Die auf dem Buckingham-Pi-Theorem beruhende Ähnlichkeitsmechanische Modellbeschreibung mechanischer Vorgänge ist besonders aus der Strömungslehre bekannt [11, 12], hat aber auch in die Festkörperdynamik Eingang gefunden [13]. Das Theorem besagt, dass die Lösung eines Problems, welches durch eine bestimmte Zahl von dimensionsbehafteten Parametern beschrieben wird, in geeigneter Formulierung durch eine um (höchstens) drei verminderte Zahl dimensionsloser Parameter charakterisiert wird; alle Probleme mit den gleichen Werten der dimensionslosen Ähnlichkeitskennzahlen haben dann die gleiche dimensionslose (skalierte) Lösung. Das Theorem gilt auch für Systeme, bei denen Parameter bekannt sind [14]. Im vorliegenden Fall können Maschinenabmessungen genau gefertigt werden, oder Parameter sind messbar, z.B. die Blechdicke. Damit reduziert sich stark die Zahl der Parameter, welche nicht bekannt sind, und die Verringerung um zwei oder drei Größen wird praktisch bedeutsam. Im vorliegenden Fall konnte gezeigt werden, dass die vielen Kurven in Abb. 3(a) für die verschiedenen Klassen von Blechmaterialien sehr genau auf jeweils eine einzige dimensionslose (skalierte) Kurve zusammengefasst werden können, siehe Abb. 3(b) sowie [4–8]. Die grauen Kurven in Abb. 3(b) zeigen die skalierten FE-Ergebnisse, welche sich nur wenig voneinander unterscheiden. Die farbigen Kurven zeigen deren zusammenfassende exponentielle Regression. Um das Konzept anschaulich zu demonstrieren, wurden in [8] auch vereinfachte Probleme, wie der „drop test“ aus [13], behandelt.

Diese theoretischen Erkenntnisse können für die Produktion mit Losgröße 1 verwendet werden, was verlässliche Einzelfertigung zu Massenfertigungskosten erlaubt. Die wirklichen Umformkräfte beim Biegevorgang können nämlich aus den von Sensoren gemessenen Zylinderkräften genau ermittelt werden. Dann gelingt es der Maschine in

Echtzeit, durch Vergleich mit FE-Ergebnissen, z.B. Abb. 3(b), zu erkennen, zu welcher Materialklasse das gerade in Umformung befindliche Blech gehört, sodass die Bahn des umformenden Werkzeugs in Echtzeit korrigiert werden kann und kein Materialausschuss entsteht. Durch erweiterte Untersuchungen konnte erreicht werden, dass auch Schwankungen innerhalb einer Materialcharge rechtzeitig erkannt und ausgeglichen werden können. Die Ergebnisse dieser theoretischen Ergebnisse wurden von Salvagnini Maschinenbau in programmieretechnisch leistungsfähiger Form im Materialerkennungssystem MAC der LEAN PANEL BENDER Familie realisiert. So konnte erreicht werden, dass bei Serienproduktion immer das exakt gleiche Endprodukt entsteht, unabhängig von der Stückzahl, der Blechdicke oder der Materialqualität.

Danksagung. Diese Arbeit wurde im Rahmen eines österreichischen COMET-K2 Programms im Rahmen der Linz Center of Mechatronics GmbH (LCM) durchgeführt.

Open access funding provided by Johannes Kepler University Linz.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Literatur

- Xia, F.; Yang, L. T.; Wang, L.; Vinel, A.: Editorial: Internet of Things, International Journal of Communication Systems, 25 (2012), pp 1101–1102
- Thoben, K.-D.; Busse, M.; Denkena, B.; Gausemeier, J.: Editorial: System-integrated Intelligence - New Challenges for Product and Production Engineering in the Context of Industry 4.0, Procedia Technology, 15 (2014), pp 1–4
- www.salvagninigroup.com (25.09.2016)
- Kunze, W.; Zehetner, C.; Hammelmueller, F.; Cojocar, E. C.; Holl, H. J.; Irschik, H.: Industrial application of advanced adaptive concepts for automatic panel benders, in: Oñate, E.; Owen, D. R. J.; Peric, D.; Chiumenti, M. (eds.): Proceedings of COMPLAS XII, Spain, Barcelona: CIMNE, 2013, pp 1222-1229
- Hammelmueller, F.; Zehetner, C.; Pechstein, A. S.; Kunze, W.; Holl, H. J.; Irschik, H.: Advanced mechanical simulation models for automatic panel benders, in: Oñate, E.; Owen, D. R. J.; Peric, D.; Chiumenti, M. (eds.): Proceedings of COMPLAS XII, Spain, Barcelona: CIMNE, 2013, pp 1165-1174
- Zehetner, C.; Kunze, W.; Heuer, R.; Irschik, H.: On the influence of material properties in sheet bending processes, in: Oñate, E.; Owen, D. R. J.; Peric, D.; Chiumenti, M. (eds.): COMPLAS XII: Proceedings of COMPLAS XII, Spain, Barcelona: CIMNE, 2013, pp 1258-1266
- Hammelmueller, F.; Zehetner, C.: Increasing Numerical Efficiency in Coupled Eulerian-Lagrangian Metal Forming Simulations, in: Oñate, E.; Owen, D. R. J.; Peric, D.; Chiumenti, M. (eds.): Proceedings of COMPLAS XIII, Spain, Barcelona: CIMNE, 2015, pp 727-733
- Zehetner, C.; Hammelmueller, F.; Irschik, H.; Kunze, W.: Similarity methods in elasto-plastic beam bending, in: Oñate, E.; Owen, D. R. J.; Peric, D.; Chiumenti, M. (eds.): Proceedings of COMPLAS XIII, Spain, Barcelona: CIMNE, 2015, pp 906-915
- <http://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/abaqus/> (25.09.2016)
- Ludvik P.: Elemente der Technologischen Mechanik, Berlin: Springer, 1909

-
11. Buckingham E.: On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations, *Physical Review*, 4 (1914), pp 345-376
 12. Spurk, J. H.: *Dimensionsanalyse in der Strömungslehre*, Berlin: Springer, 1992
 13. Baker, W. E.; Westine, P. S.; Dodge, F. T.: *Similarity Methods in Engineering Dynamics, Theory and Practice of Scale Modeling*, London: Elsevier, 1991
 14. Sonin, A. A.: A generalization of the Pi-theorem and dimensional analysis, *PNAS*, 101 (2004), pp 8525–8526