

*Integrationsaspekte der Simulation:
Technik, Organisation und Personal*
Gert Zülch & Patricia Stock (Hrsg.)
Karlsruhe, KIT Scientific Publishing 2010

Integrierte Lackierprozess-Simulation am Digitalen Prototyp "Numerische Simulation von Tauchprozessen"

***Paint Process Simulation of the Digital Prototype
"Numerical Simulation of Dip-Processes"***

Uwe Bracht
Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit,
TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld (Germany)
uwe.bracht@imab.tu-clausthal.de

Frank Pfluger, Sebastian Roller
Mercedes-Benz Cars, Sindelfingen (Germany)
frank.pfluger@daimler.com, sebastian.roller@daimler.com

Abstract: To ensure the highest level of quality at ramp up of new models, the automotive industry employs modern planning approaches within the departments of development and production planning. One approach is the concept of the digital factory. It allows modelling, simulating and visualizing of production processes with the aid of physical simulations long before the construction of vehicle prototypes. This paper describes how paint processes can be simulated and optimized by methods from the field of numerical fluid dynamics. The simulation of dip-applications in the pretreatment stage for the electrodeposition coating is covered in detail. The fluid calculation yields the loads applied to the car body while submerged. These loads are transferred to a FE-simulation, where the resulting strains and stresses are calculated.

1 Einleitung

Bei den deutschen Fahrzeugherstellern ist eine Produktentwicklung ohne digitale Prototypen nicht mehr denkbar. Die Abbildung funktions- und sicherheitsrelevanter Fahrzeugeigenschaften in numerischen Simulationen erlaubt deren Optimierung lange bevor Fahrzeugprototypen in Hardware zur Verfügung stehen. Hierdurch werden eine kürzere Entwicklungszeit bis zur Markteinführung und ein deutlich höherer Reifegrad, besonders in frühen Phasen der Fahrzeugentwicklung erreicht.

Durch die verkürzte Zeit bis zum Produktanlauf und die geringere Anzahl an Hardware-Prototypen werden auch in der Fabrik- und Prozessplanung neuartige Planungs- und Arbeitsweisen nötig. Das Konzept der Digitalen Fabrik ist hierfür ein geeignetes Werkzeug (vgl. BRACHT, MASURAT 2005). So wird auch in den Planungsbereichen eine digitale Arbeitsweise ermöglicht. In der Definition der Digitalen Fabrik nach VDI-Richtlinie 4499 wird die digitale Planung bis auf die Detaillierungsebene des eigentlichen physikalischen Produktionsprozesses betrachtet. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Virtuellen Produktion (vgl. ZÄH, PATRON, FUSCH 2003). Durch den Einsatz von digitalen Simulationsmethoden wird es möglich, Produktionsprozesse zu modellieren, zu berechnen und zu visualisieren. Produktionsprozesse können so schon digital bewertet und optimiert werden, bevor Fahrzeugprototypen zur Verfügung stehen.

In diesem Beitrag wird beschrieben, wie durch eine hinreichend genaue numerische Simulation Lackierprozesse abgebildet werden können. Als Beispiel wird die Simulation von Tauchprozessen in der Vorbehandlung zur kathodischen Elektrotauchlackierung (KTL) gewählt. Weitere Lackierprozesse, die im Rahmen der digitalen Absicherung von Fahrzeug-Prototypen bei Mercedes-Benz betrachtet werden, sind die Simulation der KTL- und der Decklackbeschichtung (vgl. KURZ, BRACHT 2006, S. 45 ff.), die Trocknung aufgebrachtener Lackschichten (vgl. BRACHT, ROLLER 2009) und die Bestrahlung UV-aushärtender Klarlackmaterialien.

2 Beschreibung des betrachteten Lackierprozesses

Wichtigstes Ziel der Lackierung ist es, die Karosserie zuverlässig und dauerhaft vor Umwelteinflüssen wie zum Beispiel Korrosion, Steinschlag oder starker Sonneneinstrahlung zu schützen. Durch die Beschichtungsprozesse werden heutzutage nacheinander bis zu vier verschiedene Schichten Lack auf das Fahrzeug aufgetragen: Grundierung, Füller, Basislack und Klarlack. In der kathodischen Elektrotauchlackierung wird die Karosserie zunächst mit einer Grundierung versehen. Danach gleicht die Schicht des Füllers Unebenheiten der Oberfläche aus und gibt dem Metall zusätzlichen Schutz. Als dritte Schicht wird auf die Karosserie der farbgebende Basislack aufgebracht, den der kratzbeständige Klarlack abschließend versiegelt.

Die zuerst auf die Karosserie aufgebrauchte kathodische Tauchlack-Schicht dient vornehmlich dem Korrosionsschutz. Der Auftrag erfolgt durch einen elektrolytischen Prozess. Vor dem eigentlichen KTL-Beschichtungsprozess durchläuft die noch unlackierte Rohbaukarosserie die Vorbehandlung. Hierbei handelt es sich um eine Folge von Prozessen zum Reinigen und Phosphatieren, in denen die Karosserie in Tauchbecken voll eingetaucht oder durch Spritzsysteme von allen Seiten mit Prozessmedien beaufschlagt wird (vgl. STREITBERGER, DÖSSEL 2008, S. 66 ff.).

Zum Transport der Fahrzeugkarosserien durch Vorbehandlung und Tauchlackierung kommen neben dem klassischen Pendelförderer in den letzten Jahren zunehmend moderne Rotations-Fördersysteme wie das RoDip-System von Dürr und das Vario-Shuttle von Eisenmann zum Einsatz. Diese ermöglichen eine von der Pendelbahn losgelöste Auslegung der Tauchbahnen (vgl. THOMER 2000).

Eines der Ziele beim Eintauchen der Karosserie in ein Prozessbecken ist eine vollständige Durchflutung aller Hohlräume, um Luftblasen die zu Beschichtungsfehl-

stellen führen, zu vermeiden. Hierzu ist eine frühzeitige Absicherung des Systems, bestehend aus Fahrzeug und Tauchverfahren notwendig. Bei Mercedes-Benz wird das Ein- und Austauschverhalten neuer Fahrzeuge im Rahmen der Absicherung von Digitalen Prototypen simuliert. Die Ergebnisse fließen direkt in die Produktentwicklung mit ein. In der Vergangenheit kam hierzu vor allem das Simulationsprogramm ALSIM (vgl. ZOHLHUBER 2006) zum Einsatz. Allerdings ist es mit diesem Programm nicht möglich, Fließgeschwindigkeiten zu berechnen. Es konnte daher nicht ermittelt werden, mit welcher Geschwindigkeit ein Tauchprozess ablaufen muss, um vollständiges Fluten und Leerlaufen von Hohlräumen zu gewährleisten.

In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, bei der die Tauchprozesse in einer numerischen Strömungssimulation abgebildet werden. Dadurch lässt sich der Vorgang des Flutens der Hohlräume beim Eintauchen und das Abfließen der Prozessflüssigkeiten beim Austauschen volltransient darstellen und visualisieren. Mit dieser Methode können sowohl Luftblasen, die sich beim Eintauchen bilden, als auch Pfützen, die nach dem Austauschen im Fahrzeug verbleiben, bestimmt werden. Das Hauptziel der Methode ist jedoch die Ermittlung von Kräften die während des Tauchprozesses auf die Karosserie einwirken:

Durch das Tauchen im Rahmen der Reinigungs- und Lackierprozesse wirken zum Teil erhebliche Kräfte auf die Rohbaukarosserie. Der Pegelunterschied, welcher beim Ein- bzw. Austauschen beobachtet werden kann, resultiert in einer Differenz des hydrostatischen Druckes. Karosserieteile, die als Grenzflächen zwischen Gebieten mit verschiedenen Pegelständen fungieren, werden deshalb mit einer Druckdifferenz belastet. Weiterhin kommt es aufgrund der Bewegungen in getauchtem Zustand zu Trägheitskräften. Diese entstehen, wenn das mit mehreren Tonnen Wasser geflutete Fahrzeug abgebremst oder beschleunigt wird. Um eine bessere Durchspülung des Fahrzeugs zu erreichen, wird es im getauchten Zustand durch die Rotationssysteme mehrfach geschwenkt. Hierbei treten aufgrund der Überlagerung von Rotations- und Translationsbewegung zum Teil hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen auf, welche zu großen Trägheitskräften führen. Diese Kräfte belasten vor allem die Karosserieteile, die große Volumina, wie zum Beispiel den Innenraum, umschließen. Besonders beansprucht sind hierdurch PKW-Dächer oder bei LKW die Rückwand der Fahrerkabine. Sehr hohe Belastungen treten auch an den Skidaufnahmen auf, wo alle auf das Fahrzeug wirkenden Strömungskräfte in die Fördertechnik eingeleitet werden.

3 Simulationsgrundlagen

Die Tauchprozesse bei der KTL-Vorbehandlung sind – wie auch fast alle anderen Lackierschritte – Produktionsprozesse, welche von einem komplexen Strömungsfeld dominiert werden. Um sie abzubilden, kommt eine numerische Strömungssimulation (engl. Computational Fluid Dynamics (CFD)) zur Anwendung. Im vorliegenden Fall wird die Software *StarCD* von CD-adapco (vgl. CD-ADAPCO 2010) eingesetzt. Das Programm verwendet eine Finite-Volumen (FV) Beschreibung der geltenden Transportgleichungen (vgl. FERZIGER, PERIC 2002, S. 4 ff.). Um die problemspezifischen Eigenschaften der Tauchsimulation zu berücksichtigen, wurde das Programm durch eigene Programmteile – sogenannte *User-Functions* – erweitert.

Zur Modellierung der Turbulenz findet ein Wirbelviskositätsmodell Anwendung. Als bester Kompromiss aus Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit hat sich das k - ε -Modell nach JONES, LAUNDER (1972) erwiesen. Weiterhin muss bei der Simulation von Tauchprozessen die Oberfläche zwischen den Phasen Wasser und Luft numerisch beschrieben werden. Hierzu kommt in StarCD ein *Volume of Fluid* (VOF) Modell zum Einsatz. Die Verteilung der einzelnen Phasen wird dabei durch eine Transportgleichung für einen Skalar beschrieben (vgl. CD-ADAPCO 2008, S. 14-1 ff.).

Um die mechanischen Beanspruchungen der Bauteile zu bestimmen, wird die durch die Strömungssimulation bestimmte Druckverteilung auf eine Finite Elemente (FE) Berechnung übertragen. Da eine plastische Verformung bereits im Produktionsprozess als Versagensfall zu bewertet ist, genügt ein linear-elastischer Ansatz zur Bestimmung der Beanspruchungen.

4 Modellbildung und Rechnung

4.1 Strömungssimulation

Als Geometriebasis des Fahrzeugs dient für die Simulationen eine Finite-Elemente-Diskretisierung, welche bei allen Prozesssimulationen aus dem Lackierbereich durchgängig zur Anwendung kommen kann. Dies ist besonders erstrebenswert, da für die Prozesssimulation eine sehr aufwendige Vernetzung benötigt wird, die auch kleinste Details berücksichtigt. Im Gegensatz zu anderen Berechnungsdisziplinen wird keine ausschließlich funktionale Repräsentation des Fahrzeugs benötigt, sondern eine geometrisch exakte. Blechbauteile werden aus diesem Grund nicht als zweidimensionale Schalenelemente abgebildet, sondern als dreidimensionale Bauteile. Hierdurch wird gewährleistet, dass auch kleinste Löcher, durch welche Flüssigkeiten und Luft in die Karosserie eindringen oder diese verlassen können, berücksichtigt werden. Neben dem Fahrzeug muss auch das Tauchbecken modelliert werden. Dazu wird die Umgebung des Fahrzeugs mit finiten Volumen aufgefüllt. Hierfür kommt ein speziell entwickeltes Verfahren zur Erstellung eines Hybridnetzes zum Einsatz. In Fahrzeughöhe wird ein Tetraedernetz verwendet, das in der Lage ist, auch komplizierte Geometrien abzubilden, während in geringem Abstand von der Karosserieoberfläche bereits auf ein Hexaedernetz mit sehr gutem Raumfüllungsvermögen gewechselt wird, um das übrige Anlagenvolumen zu vernetzen.

Zur Abbildung der zum Teil recht komplexen Bewegungen der Karosserie wird ein bewegtes Netz (engl. Moving Mesh) verwendet. Abbildung 1 zeigt wie durch Ändern der Topologie und Geometrie der Zellen alle hier möglichen kinematischen Freiheitsgrade, die beim Tauchen auftreten, vom Netz wiedergegeben werden können. Als Ausgangsbasis dient die reelle Bahnkurve der Anlage. Durch eine User-Function werden die sich aus dem Anlagenprogramm ergebenden Stützpunkte in die Simulation eingelesen, durch einen kubischen Spline interpoliert und anschließend durch Verschiebung der Netzknoten auf das Berechnungsnetz übertragen.

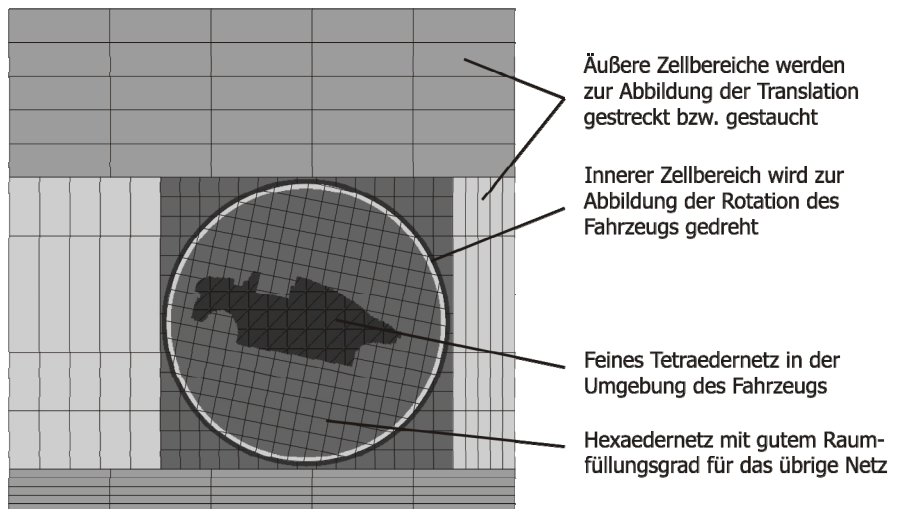


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Finite-Volumen-Berechnungsnetzes der Tauchsimulation

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Simulation von Tauchprozessen ist die Wahl der richtigen Zeitschrittweite. Die Strömungsverhältnisse variieren während des Prozesses sehr stark. So muss zum Beispiel der Druckstoß, der sich aufgrund eines schnellen Stoppens in getauchtem Zustand ergibt, zeitlich feiner aufgelöst werden als eine quasistationäre Fahrt. Es kommt daher eine User-Function zur Anwendung, welche die Zeitschrittweite stets den Strömungsbedingungen anpasst. Mit diesen Voraussetzungen ergibt sich eine Zeitschrittweite zwischen 1 und 1/1000 Millisekunde. Erfahrungsgemäß folgt daraus eine Rechenzeit für die Strömungssimulation von ungefähr 20–30 Tagen, auf einem High Performance Computing (HPC) Cluster mit 128 Prozessoren, um einen Vorbehandlungsprozess von 90 Sekunden Länge abzubilden. Im Allgemeinen genügt es jedoch, lediglich die Vorgänge von Interesse, wie das Ein- und Austauchen oder das Schwenken in getauchtem Zustand, zu betrachten.

4.2 Simulation der mechanischen Beanspruchung

Als Modell für die FE-Berechnung wird ein Netz der Betriebsfestigkeit verwendet. Durch *Mapping* werden auf dieses die Druck- und Scherkräfte aus der Strömungssimulation zu den Zeitpunkten, an denen die höchsten Belastungen auftreten, übertragen. Anschließend werden mit einer linearen FE-Simulation die Beanspruchungen und Verzerrungen der einzelnen Karosseriebauteile bestimmt. Die Rechenzeit hierfür beläuft sich in *Nastran* auf circa 20 Minuten.

5 Ergebnisse und Visualisierung

Die vorgestellte Methode findet bei Mercedes-Benz sowohl zur Absicherung digitaler Prototypen, als auch zur Bewertung neuer Konzepte in Produktentwicklung und Prozessplanung Anwendung. Hier sollen zwei Beispiele beschrieben werden.

5.1 Beispiel 1: Absicherung Aluminium-Dach

Um das Gewicht eines Fahrzeugs zu verringern und einen tieferen Schwerpunkt zu realisieren, bietet es sich an, das Dach aus einem leichten Material wie Aluminium zu bauen. Da dieses jedoch aufgrund der unterschiedlichen Temperaturdehnungen von Stahl und Aluminium erst nach dem KTL-Trockner fest mit der Karosserie verklebt werden darf, muss es in einem vorfixierten Zustand durch die KTL-Anlage transportiert werden. Dadurch wird das Dachblech während des Tauchvorgangs noch nicht durch die Dachspriegel versteift.

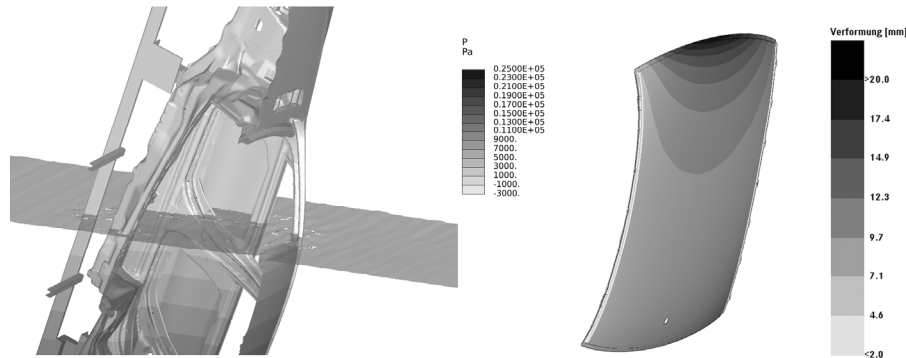


Abbildung 2: Simulation des Austauschprozesses eines Fahrzeugs der Oberklasse mit Aluminium-Dach

In Abbildung 2 ist links der simulierte Austauschvorgang eines Fahrzeugs der Oberklasse mit Aluminium-Dach in einer geplanten RoDip-Anlage abgebildet. Dargestellt ist neben der freien Oberfläche die Druckverteilung über der Karosserie. Beim Austauschen muss die Flüssigkeit aus dem Fahrzeug ablaufen. Hierdurch ergibt sich ein höherer Pegel im Innenraum des Fahrzeugs gegenüber außen, der das Dach durch hydrostatischen Druck belastet. Abbildung 2 rechts zeigt die in der FEM-Rechnung ermittelte Verformung des Dachs aufgrund dieses Pegelunterschieds. Die Rechnung dient der Absicherung eines eventuellen Umbaus der KTL-Anlage im Werk Sindelfingen. Die Simulationsergebnisse werden zur Planung der Anlage und zur Entwicklung neuer Dachkonzepte verwendet.

5.2 Beispiel 2: Absicherung Skid-Aufnahmen

Alle während des Tauchprozesses auftretenden Kräfte werden letztendlich über die Skid-Aufnahmepunkte des Fahrzeugs in die Fördertechnik eingeleitet. Diese müssen so ausgelegt sein, dass sie die maximal auftretenden Kräfte aufnehmen können. Um den Zeitpunkt der maximalen Belastung bei der VarioShuttle Anlage im Mercedes-Benz PKW-Werk in Rastatt zu ermitteln, wurde der gesamte KTL-Prozess simuliert. In Kooperation mit dem Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit der TU Clausthal wurde eine Visualisierung erstellt, in der die Ergebnisse der Tauchsimulation gemeinsam mit den Ergebnissen der KTL-Beschichtungssimulation dargestellt werden. Diese ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung und Optimierung des KTL-Prozesses.



Abbildung 3: Simulation der Tauchbahn für ein Fahrzeug der Kompaktklasse

Abbildung 3 links zeigt einen Ausschnitt aus dem erstellten Video. Es wurde ermittelt, dass der Augenblick der maximalen Belastung beim Stoppen der Eintauchbewegung auftritt. In Abbildung 3 rechts sind die resultierenden Beanspruchungen an den vorderen (oberes Bild) und hinteren (unteres Bild) Skid-Aufnahmepunkten zu diesem Zeitpunkt dargestellt.

Aufgrund dieses Ergebnisses konnte die Bahn der VarioShuttle-Anlage gezielt geglättet werden, wodurch die Belastung auf das Fahrzeug verringert wurde. Zusätzlich konnten die Skid-Aufnahmepunkte der Nachfolgebaureihe bezüglich der benötigten Steifigkeit optimiert werden. Durch den Einsatz geringerer Blechstärken wird das Gewicht des Fahrzeugs reduziert, wodurch der Verbrauch und der CO₂-Ausstoß gesenkt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Konzept der Digitalen Fabrik ermöglicht die Absicherung von Produktionsprozessen an Digitalen Prototypen, lange bevor teure Hardware-Prototypen für Versuche und Messungen zur Verfügung stehen. Durch moderne numerische Berechnungsmethoden wird es möglich, Prozesse einschließlich der physikalischen Vorgänge abzubilden.

In diesem Beitrag wird gezeigt, wie durch numerische Strömungssimulation Lackierprozesse berechnet, visualisiert und optimiert werden können. Die Simulation von Tauchprozessen in der Vorbehandlung zur kathodischen Tauchlackierung wird dazu detailliert betrachtet. Aus der CFD-Simulation erhält man die während des Tauchvorgangs auf das Fahrzeug wirkenden Belastungen. Diese werden in eine FEM-Simulation übertragen, wo dann die Beanspruchungen der einzelnen Karosseriebauteile ermittelt werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse können sowohl in der Produktionsplanung zur Optimierung von Prozessen und Anlagen als auch in der Produktentwicklung zur Absicherung neuer Konzepte und Baureihen verwertet werden. In Zukunft wird es mit Hilfe der vorgestellten und weiteren numerischen Berechnungsmethoden der Prozesssimulation möglich sein, eine Vielzahl von Fertigungsprozessen im Produktentstehungsprozess von Fahrzeugen frühzeitig zu optimieren und abzusichern. So

werden durch diese Methoden der Digitalen Fabrik Markteinführungszeiten verkürzt und die Serienreife erhöht.

Literatur

- BRACHT, U.; MASURAT, T.: The Digital Factory between Vision and Reality. In: Computers in Industry, Amsterdam u.a., 56(2005)5, S. 325-333.
- BRACHT, U.; ROLLER, S.: Virtuelle Prozessabsicherung in der Automobilindustrie – Berechnung des Aufheizverhaltens von Rohbaukarosserien in Lackiertrocknern im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, München, 104(2009)01-02, S. 16-21.
- CD-ADAPCO: Methodology, Star-CD Version 4.06, 2008.
- CD-ADAPCO: Automated Flow, Thermal, and Stress Simulation Software and Services for CFD and CAE Solutions. <http://www.cd-adapco.com/>. Stand: 26.07.2010.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M.: Computational Methods for Fluid Mechanics. Berlin: Springer-Verlag, 3. Auflage 2002.
- JONES, W. P.; LAUNDER, B. E.: The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence. In: International Journal of Heat and Mass Transfer, Amsterdam u.a., 15(1972)2, S. 301-314.
- KURZ, O.; BRACHT, U. (Hrsg.): Virtuelle Fertigungsprozessabsicherung und -optimierung : Einsatzpotentiale numerischer Berechnungsmethoden im Rahmen der digitalen Fabrik. Aachen: Shaker Verlag, 2006.
- STREITBERGER, H. J.; DÖSSEL, K. F.: Automotive Paints and Coatings. Weinheim: Wiley-VCH, 2. Auflage 2008.
- THOMER, K. W.: Durch kontinuierliches Rotationstauchen Oberflächenqualität verbessern. In: besser lackieren! Die Oberflächen-Zeitung, Hannover, 2(2000)13, S. 4.
- VDI-Richtlinie 4499, Blatt 1: Digitale Fabrik Grundlagen. Februar 2008.
- ZÄH, M. F.; PATRON C.; FUSCH, T.: Die Digitale Fabrik, Definition und Handlungsfelder. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, München, 98(2003)3, S. 75-77.
- ZOHLHUBER, E.: ALSIM Drain simulation – dip painting. Online verfügbar. 2006. http://www.alsim.at/ftp/documentation/ALSIM_Homepage_p.pdf, Stand: 11.07.2010.