

# **Grenzen einer digitalen Absicherung des Produktionsanlaufs**

## ***Limitations of Digital Ramp-Up Validation***

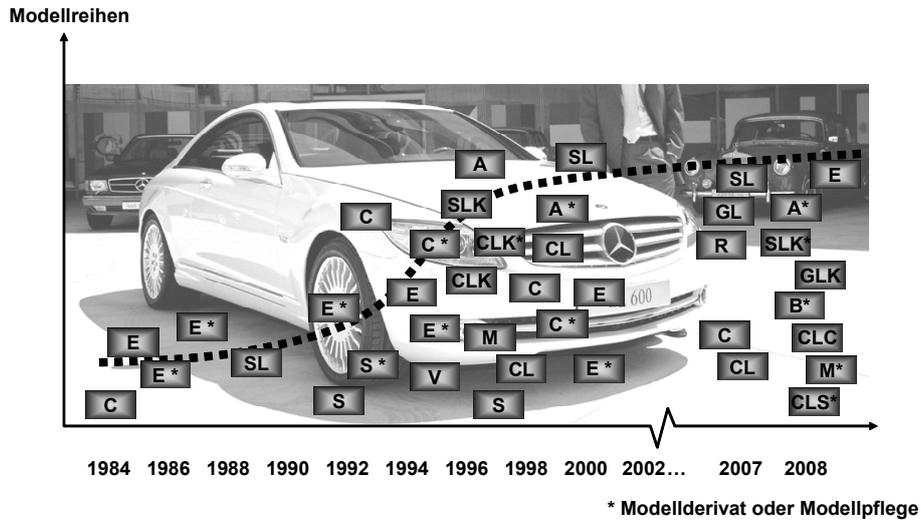
Karl-Josef Wack, Thomas Bär  
Daimler AG, Ulm (Germany)  
karl-josef.wack@daimler.com, thomas.baer@daimler.com

Steffen Straßburger  
Technische Universität Ilmenau, Ilmenau (Germany)  
steffen.strassburger@tu-ilmenau.de

**Abstract:** The resulting competitive situation in automotive industry and increasing market demands necessarily lead to higher complexity in product development, production planning and ramp-up processes. Longer production lifecycles based on flexible manufacturing systems with a rising number of integration processes during the running production call for new challenges, especially in the field of production engineering. One key challenge for gaining important time and cost potentials in production engineering projects is an early digital validation of the ramp-up. Under the premise to reduce physical prototypes, the following work critically presents requirements, solutions and challenges of a complete digital ramp-up validation focussed on assembly in automotive industry.

## **1 Einleitung**

Steigende Variantenzahlen, u.a. bedingt durch neue Antriebskonzepte und kürzere Produktlebenszyklen (BÄR 2008), führen neben kürzeren Innovationszyklen zu vermehrten Produktionsanläufen in der Automobilindustrie (vgl. Abb. 1). Die durchschnittliche Anzahl der Serienanläufe bei dem deutschen Automobilhersteller Mercedes-Benz Cars hat sich beispielsweise in den letzten 20 Jahren pro Jahr mehr als verdreifacht. Längere Produktionslebenszyklen durch Re-Use von Produktionsanlagen sowie flexible und wandlungsfähige Produktionssysteme (ELMARAGHI 2009) führen dazu, dass die Anzahl der zu integrierenden Prozesse während einer laufenden Produktion zunehmen (BÄR 2008).



**Abbildung 1:** Zunahme der Modellwechsel und Produktoffensiven am Beispiel Mercedes-Benz Cars (ROOKS 2009)

Empirische Studien verdeutlichen zudem, dass ca. 40 % aller notwendigen Änderungsmaßnahmen erst ab der Nullserienphase und somit erst nach Erstellung von Serienwerkzeugen bzw. während der Phase des Serienanlaufs durchgeführt werden (ASSMANN 2000). Effiziente Produktionsanläufe gewinnen daher zunehmend an Bedeutung und bieten für die Unternehmen hohes Einsparpotenzial (FLEISCHER u.a. 2005).

Die Absicherung des Produktionsanlaufs in Bezug auf manuelle Montageumfänge erfolgt bei Mercedes-Benz Cars in der so genannten Phase der Produktionsvorbereitung physisch, d.h. durch einen realen, stationsweisen Aufbau von physischen Fahrzeugprototypen. Diese dienen neben der Verifikation des Produktes auch dazu, einen effizienten Produktionsanlauf sicherzustellen. Mit physischen Fahrzeugprototypen sind jedoch sehr hohe Kostenaufwände verbunden. Durch unterschiedliche Ansätze wird daher versucht, die Anzahl der physischen Fahrzeugprototypen möglichst gering zu halten. Hierzu zählen beispielsweise Methoden, welche zur Optimierung der Auslastung physischer Fahrzeugprototypen beitragen (CLAUSEN, WEBER 2006) oder aber auch die Verlagerung von Absicherungsumfängen in eine frühere, digitale Phase des Produktentstehungsprozesses. Ziel einer digitalen Absicherung ist es hierbei, frühzeitig Fehler zu identifizieren und zu beheben, bevor erste Hardware gefertigt oder erste Produktionsanlagen beauftragt werden.

Die Vision einer Absicherung von Produkt und Produktion unter einem vollständigem Verzicht auf physische Fahrzeugprototypen wird seit etlichen Jahren verfolgt (vgl. FUSCH, KRESS 2001), ist jedoch bis heute in der Praxis nur teilweise umgesetzt. Fortschritte bei Simulationen ermöglichen bei einem digitalen Fahrzeugprototyp zwar die Absicherung verschiedener Fahrzeugfunktionen, wie beispielsweise Betriebsfestigkeit, Crashverhalten oder Aerodynamik (BREITLING u.a. 2009). Im Hinblick auf eine vollständig digitale Absicherung des Produktionsanlaufs, analog zur bisherigen physischen Absicherung im Rahmen der Produktions-

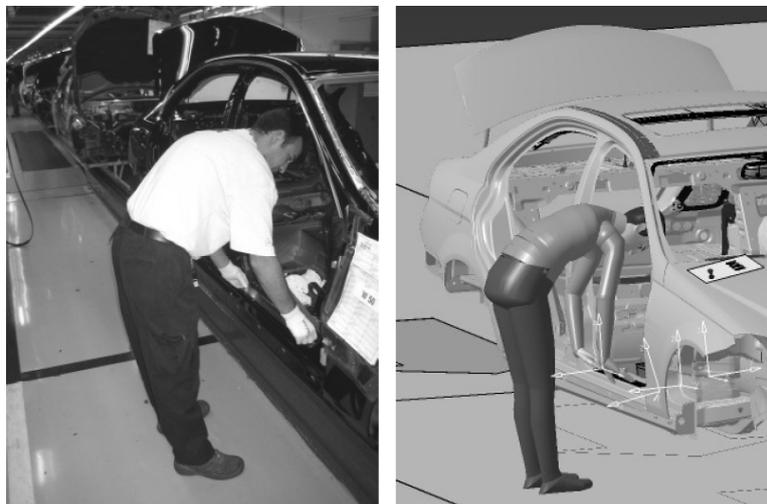
vorbereitung, bieten aktuelle Simulationsmethoden jedoch nur bedingt Möglichkeiten für eine ganzheitliche Bewertung und Optimierung der Produktion. Die durchgängig digitale Sicherstellung eines effizienten Produktionsanlaufes ist somit bislang noch nicht möglich.

Vor dem Hintergrund eines vollständigen Verzichts auf physische Prototypen werden in dem Beitrag, die Anforderungen und Grenzen digitaler Absicherungen und Simulationsmethoden des Produktionsanlaufs aufgezeigt. Der Hauptfokus liegt hierbei auf manuellen Montagevorgängen.

## 2 Physische Absicherung des Produktionsanlaufs

Digitale Absicherungen sind in den einzelnen Planungsbereichen der Automobilindustrie bereits gut etabliert und werden frühzeitig angewandt. Oftmals kommen digitale Absicherungen durch unterschiedliche Simulationsmethoden, wie beispielsweise Materialflusssimulation, Simulation von Ein- und Ausbaupfaden oder aber auch Ergonomiesimulation zum Einsatz. Die Bestätigung und finale Freigabe der Produktion findet aber weiterhin auf Basis von physischen Absicherungen statt.

Im Rahmen so genannter Produktionsvorbereitungswshops werden sowohl die physische Baubarkeit als auch produktionsrelevante Kriterien real überprüft und gegebenenfalls optimiert. Der Aufbau von physischen Fahrzeugprototypen ist hierfür eine geläufige Methode. Stationsweise werden in interdisziplinären Workshops mit Vertretern aus der Entwicklung und den einzelnen Bereichen der Produktionsplanung physische Fahrzeugprototypen nach entsprechenden Arbeitsvorgängen montiert, analysiert und bewertet (siehe Abb. 2). Auch Aspekte der Logistik werden hierbei überprüft. Durch dieses interdisziplinäre Vorgehen wird der zukünftige Produktionsablauf realitätsnah bewertet und somit ein effizienter Produktionsanlauf sichergestellt.



**Abbildung 2:** Physische und digitale Absicherung von Montageumfängen im Vergleich

### 3 Absicherungskriterien des Produktionsanlaufs

Die physische Produktionsvorbereitung (vgl. Kap. 2) integriert die einzelnen Planungsbereiche. Dadurch werden Kriterien der einzelnen Gewerke, wie beispielsweise Logistik und Montage zusammen überprüft. Zudem werden die Kennzahlen Engineering Hours Per Vehicle (EHPV) und Hour Per Vehicle (HPV) betrachtet. EHPV sowie HPV wurden von der Harbour Consulting Group in deren Harbour Report (HARBOUR CONSULTING 2006) geprägt, welche mehr als 50 Produktionen aus dem Bereich Automotive auf Produktivität untersucht haben. EHPV umfasst den konstruktivbedingten Arbeitsinhalt eines Fahrzeuges, wohingegen HPV eine Kennzahl für die Produktivität des Personals darstellt. HPV beschreibt somit alle Arbeitsstunden von direkten und indirekten Werkern bzw. Angestellten je Produkt.

Im Rahmen der physischen Produktionsvorbereitung wird das Produkt und die Produktion typischer Weise durch die folgenden vier Bereiche abgesichert:

- **Produktionsbezogene Produktabsicherung:** Absicherung von Produktaspekten im Hinblick auf die Produktion, wie beispielsweise die Baubarkeit des Produktes.
- **Produktbezogene Prozessabsicherung:** Absicherung aller wertschöpfenden Prozesse, welche zur Montage des Produktes verwendet werden. Hierzu zählen insbesondere Themen mit EHPV-Relevanz.
- **Produktionsbezogene Prozessabsicherung:** Absicherung aller Produktionsprozesse, auch nicht wertschöpfende Montageprozesse, wie beispielsweise Wege des Werkers am Band. Nicht wertschöpfende Themen sind besonders für die Ermittlung des HPV relevant.
- **Ressourcenabsicherung:** Absicherung der verwendeten Ressourcen, wie beispielsweise Ladungsträger, Handlingsgeräte oder Montagewagen.

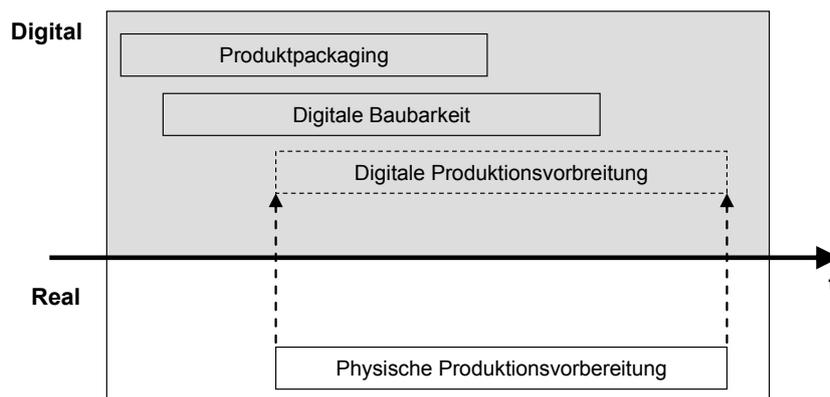
Betrachtet man nun ein Beispiel eines Arbeitsvorgangs "Verschraubung eines Anbauteils", werden in der produktionsbezogenen Produktabsicherung beispielsweise die *Montagereihenfolge* oder aber auch *Ein- und Ausbaupfade* überprüft. Zur Absicherung der produktbezogenen Prozesse zählen in diesem Fall die Überprüfung des *Fügekonzepts* inkl. Betrachtung von *Toleranzeinflüssen*, eine *Zugänglichkeit von Verbindungselementen mit Standardwerkzeugen* der Serie (z.B. Schraubwerkzeug Winkelschrauber) sowie die *Zeitermittlung wertschöpfender Montagevorgänge*. Die produktionsbezogene Prozessabsicherung prüft bei diesem Arbeitsvorgang die *Zeitermittlung für alle Montagevorgänge* und bewertet die *Ergonomie*. Im Rahmen der Ressourcenabsicherung werden letztlich die *Ladungsträger* und deren Bereitstellung in der *Materialzone* am Band abgesichert. Hierzu zählt auch die Überprüfung spezifischer Betriebsmittel, wie beispielsweise *Handlingsgeräte* oder *Hochzeitsstationen*. Die nachfolgende Tabelle 1 verdeutlicht die für eine Absicherung des Produktionsanlaufs mit dem Schwerpunkt manuelle Montage in der Automobilindustrie typischen Absicherungskriterien der einzelnen Gewerke.

<b>Gewerk</b>	<b>Kriterium</b>	<b>Beispiel</b>
<b>Montage</b>	Zugänglichkeit von Ressourcen	Zugänglichkeit von Verbindungselementen durch entsprechende Werkzeuge sichergestellt
	Identifikation Schrauber- und Schraubeneigenschaften (z.B. Drehmoment)	Korrekte Werkzeuge beim Montagevorgang zur Verfügung gestellt, insbesondere bei Sicherheitsrelevanz
	Identifikation Sonderwerkzeuge	Zusätzlich zu Standardressourcen benötigte Werkzeuge
	Optimierung Werkzeugauswahl	Bereitstellung von Standardressourcen und Reduktion von Sonderwerkzeugen
	Ergonomie von Montagevorgängen	Bewertung von Zugänglichkeit, Körperhaltung und Belastung, Ermittlung der Bearbeitungszeiten
	Montagereihenfolge	Überprüfung und Optimierung der festgelegten Montagereihenfolge
<b>Logistik</b>	Materialbereitstellung	Vermeidung langer Wege für den Werker
	Ladungsträger	Optimalen Ladungsträgerinhalt ermittelt
	Logistikkonzept	Bereitstellung am Band entsprechend sichergestellt (JIT, JIS, ...)
<b>Fabrik</b>	Wege	Wege für Montage und Belieferung geprüft und optimiert
	Flächenbedarf	Flächen für Bandabschnitte und Materialbereitstellung sowie Lagerorte sind ausreichend

*Tabelle 1: Kriterien einer Absicherung für den Produktionsanlauf*

#### 4 Methodisches Vorgehen zur digitalen Absicherung

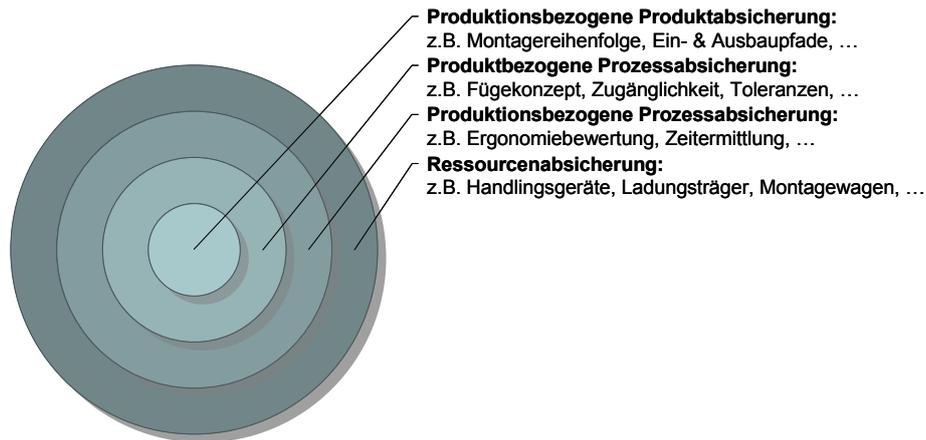
Die digitale Absicherung des Produktionsanlaufs hat zum Ziel, die bislang physische Produktionsvorbereitung von der realen in die digitale Phase zu verlagern (vgl. Abb. 3), um so wertvolle Zeit- und Kostenvorteile zu erzielen.



*Abbildung 3: Vision – Verlagerung der physischen Produktionsvorbereitung in die digitale Phase*

Um diese Vision umsetzen und möglichst alle Absicherungsumfänge berücksichtigen zu können, wird ein vierstufiges Schalenmodell für digitale Absicherungen vorgeschlagen (vgl. Abb. 4).

Das Schalenmodell differenziert, wie bereits im vorherigen Beispiel "Verschraubung eines Anbauteils" (vgl. Kap. 3) zu erkennen ist, nach vier Bereichen. Ausgehend von der produktionsbezogenen Produktabsicherung folgt die produktbezogene Prozessabsicherung, bevor dann die produktionsbezogene Prozessabsicherung und abschließend die Ressourcenabsicherung durchgeführt wird.



*Abbildung 4: Schalenmodell für digitale Absicherungen*

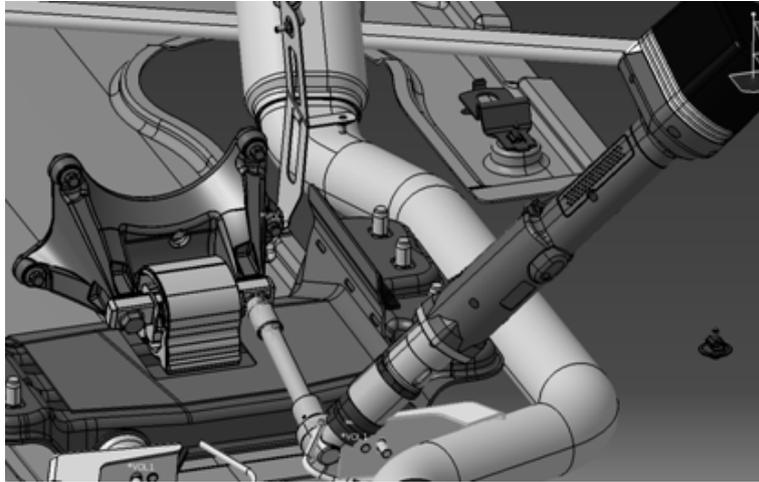
Durch diese Aufgliederung ist gewährleistet, dass alle Aspekte für eine digitale Absicherung eines Produktionsanlaufs berücksichtigt werden können. Das nachfolgende Kapitel zeigt jedoch auf, dass bislang nicht alle Kriterien digital abgesichert werden können.

## 5 Grenzen digitaler Absicherungen

Trotz der in den vergangenen Jahren gestiegenen Rechenleistung und bereits gut etablierten umfangreichen digitalen Methoden zur Optimierung und Absicherung von Produkt und Produktion (siehe Abb. 5) gibt es an einigen Stellen weiterhin Handlungsbedarf und auch Grenzen von digitalen Absicherungen, welche nachfolgend erläutert werden.

Die physische Absicherung des Produktionsanlaufs erfolgt in einem interdisziplinären und interaktiven Workshop. Um diesen Workshop digital entsprechend interaktiv durchführen zu können, spielt das Absichern und Simulieren in Echtzeit eine bedeutende Rolle. Absicherungsergebnisse müssen schnell visualisiert und Änderungen entsprechend interaktiv durchgeführt werden können. Sehr effiziente Simulationsmethoden (u.a. verteilte Simulation) sind vorhanden, dennoch bestehen weiterhin Handlungsbedarfe bei Echtzeitfähigkeit zur Realisierung von interaktiven Simulationen. Diese sind für eine effiziente Absicherung des Produktionsanlaufs

und anderen kollaborativen Absicherungsthemen mit enormen Zeitvorteilen verbunden, u.a. bei der Visualisierung und Erstellung von Simulationsmodellen.



*Abbildung 5: Digitale Absicherung der Werkzeugzugänglichkeit*

Als ebenso relevant kann an dieser Stelle der Insellösungscharakter vieler Simulationswerkzeuge gesehen werden. So lassen sich einzelne Kriterien zwar in jeweiligen Spezialwerkzeugen simulieren und absichern, zur übergreifenden Absicherung, ihrer Kombination und ggf. existierender Wechselwirkungen fehlen oft adäquate Werkzeuge oder entsprechende Schnittstellen.

Ein weiterer Aspekt ist die Simulation des Materialverhaltens. Starre Körper stellen im Vergleich zu flexiblen Bauteilen keine Herausforderung mehr dar. Die Simulation von Toleranzen bei Dichtungen, das Simulieren von Dämmmatten oder von Kabeln und Schläuchen mit all ihren physikalischen Eigenschaften hingegen ist derzeit nur ansatzweise realisierbar. Auch die Simulation von Montageabläufen, wie beispielsweise das Fädeln von Kabeln ist derzeit nicht darstellbar.

Wertvolle Informationen über das Produktverhalten, wie beispielsweise Gewicht, Verformung oder auch die haptische Wahrnehmung durch den Werker während einer Montagesimulation sind derzeit nur bedingt digital realisierbar. Vor dem Hintergrund einer vollständig digitalen Absicherung eines Produktionsanlaufes in der Automobilindustrie sind dies jedoch wichtige Aspekte, die es zu berücksichtigen gilt. Als Beispiel seien hier Montagevorgänge genannt, welche das Anbringen von Clipsen beinhalten.

Abschließend zu erwähnen ist die prozessuale Verankerung digitaler Absicherungen mit den entsprechenden Verbindlichkeiten im Gesamtprozess. Diese ist neben dem Schaffen neuer technischer Möglichkeiten zwingend erforderlich, um den Entwicklern und Produktionsplanern zudem eine mit physischen Absicherungen vergleichbare Aussagekraft bei digitalen Absicherungen zu ermöglichen.

## 6 Zusammenfassung & Ausblick

Ausgehend von der bisherigen physischen Absicherung in der Produktionsvorbereitung wurden Kriterien vorgestellt, welche durchgängig digital abgesichert werden müssen, um einen Produktionsanlauf in der Montage digital sicherstellen zu können. Die methodische Vorgehensweise für digitale Absicherungen unterstützt bei der Identifikation relevanter Kriterien. Die Grenzen digitaler Absicherungen bei der Simulation von manuellen Montagevorgängen wurden ebenfalls aufgezeigt. Insbesondere bei der Simulation flexibler Bauteile sowie des Materialverhaltens von mehrdimensionalen Körpern und deren Handhabung während einer Montage, wie beispielsweise beim Fädeln von Kabeln, sind neue Methoden notwendig. In Forschung und Entwicklung müssen daher neue Lösungen und effiziente Simulationsmethodiken erarbeitet werden, welche die derzeit kritischen Absicherungsumfänge in einer effizienten Art und Weise validieren können.

## 7 Literatur

- ASSMANN, Gert: Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung. Hrsg.: LINDEMANN, U. München: Herbert Utz Verlag, 2000.
- BÄR, Thomas: Flexibility Demands on Automotive Production and their Effects on virtual Production Planning. In: Proceedings of the 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS). Toronto, Canada, 2008, S. 16-28.
- BREITLING, Thomas; GROSSMANN, Theodor; ZÖLLER, Albrecht: Digitale Prototypen unterstützen Entwicklung. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) extra, Wiesbaden, (2009)1, S.162-171.
- CLAUSEN, Uwe; WEBER, Jörg: Prototypenplanung im Nutzfahrzeugbau. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Wiesbaden, 108(2006)9, S. 740-744.
- ELMARAGHY, Hoda A.: Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer-Verlag, 2009.
- FLEISCHER, Jürgen; WAWERLA, Marc; ENDER, Thomas; NYHUIS, Peter; HEINS, Michael; GROSSHENNING, Patrick: Digitaler Serienanlauf beschleunigt den Markteintritt. In: Intelligenter produzieren, Frankfurt a. M., (2005)1, S. 36-37.
- FRITZSCHE, Lars: Work Group Diversity and Digital Ergonomic Assessment as New Approaches for Compensating the Aging Workforce in Automotive Production. Dresden: Technische Universität, Dissertation, 2010.
- FUSCH, Thomas, KRESS, Marcel: Strategien und Nutzen der virtuellen Produktion. In: Maschinenmarkt, Würzburg, (2001)42, S. 54-58.
- HARBOUR CONSULTING: The Harbour Report. Harbour Consulting, Troy, MI, 2006.
- ROOKS, Tobias: Rechnergestützte Simulationsmodellgenerierung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung bei der Fahrzeugneutypplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik. Aachen: Shaker Verlag, 2009.