

---

# Einsatz wissensbasierter Methoden in frühen Phasen des Brückenentwurfs

Dominic Singer

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation · Leonhard Obermeyer  
Center · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München ·  
dominic.singer@tum.de

## Zusammenfassung

Für den Entwurf und die Konstruktion von Ingenieurbauwerken wie Tunnel und Brücken stehen dem Bauingenieur umfangreiche (parametrische) Computer-Aided Design (CAD) Werkzeuge zur Verfügung. Mit diesen Planungswerkzeugen ist es nur schwer möglich, die Expertise und Erfahrung der Ingenieure abzubilden und bei ähnlichen Problemstellungen wiederzuverwenden. Durch die Anwendung von wissensbasierten Methoden (Knowledge-based Engineering, kurz KBE) in frühen Entwurfsphasen der Brücken- und Tunnelplanung können repetitive Planungsprozesse automatisiert werden, indem das Ingenieurwissen erfasst, gespeichert und für ähnliche Planungsaufgaben erneut herangezogen wird. In diesem Paper stellen wir einen Ansatz zur Anwendung von wissensbasierten Methoden in frühen Phasen des Brückenentwurfs vor.

## Abstract

For the design and construction of civil engineering structures such as tunnels and bridges engineers use (parametric) Computer-Aided Design (CAD) tools. Within these planning tools, it is not possible to capture the expertise and experience of engineers and reuse this knowledge for similar design tasks. Using knowledge-based engineering (KBE) methods in early design phases of bridge and tunnel design, repetitive planning processes can be automated by capturing and storing this engineering knowledge and reusing it for similar tasks. In this paper we introduce an approach for the application of knowledge-based engineering methods in early stages of bridge design.

## 1 Einführung und Motivation

Im Rahmen der Planung von Ingenieurbauwerken wie Tunnel und Brücken nutzen Bauingenieure CAD-Systeme für die Erstellung von 2D-Zeichnungen und - bis zu einem gewissen Grad - 3D-Modelle. Allerdings ermöglichen es die gängigen CAD-Systeme nicht, das Ingenieurwissen zu erfassen, zu speichern und für ähnliche Fragestellungen wiederzuverwenden (La Rocca 2012; Verhagen et al. 2012). Es ist daher wünschenswert mit Hilfe von Softwaresystemen, dieses Know-how einzelner Experten innerhalb einer Firma zu erfassen, zentral zu speichern und bei ähnlichen Planungsaufgaben anderen Ingenieuren zur Verfügung zu stellen. In einem generellen Ansatz wurden dazu bereits seit den 1980er Jahren so genannte Wissensbasierte Systeme erforscht, um Expertenwissen digital abzulegen und wiederzuverwenden. Unter wissensbasierten Systemen (englisch Knowledge-based Systems, KBS) versteht

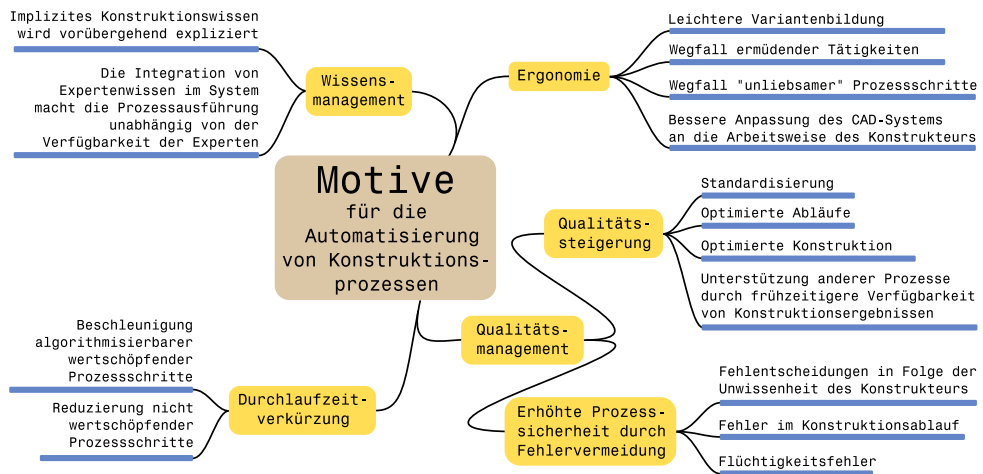
man Softwaresysteme, die mittels einer Wissensdatenbank sowie durch Inferenz (logische Schlussfolgerungen auf Basis von Fakten), analog zu menschlichen Experten, komplexe Aufgaben lösen. Deren Anwendung im Bereich des CAD nennt man Knowledge-based Engineering (kurz KBE). Zur Unterstützung des gesamten Designprozesses von Ingenieurprodukten wird Ingenieurwissen durch formale computerinterpretierbare Regeln abgebildet, welche dann im Rahmen der geometrisch-semantischen Modellierung Berücksichtigung finden. Man spricht daher auch von Wissensintegration (Liese 2003).

Methoden zur wissensbasierten Konstruktion wurden bereits intensiv in anderen Domänen wie der Automobilbranche (Chapman et al. 2001), der Luft- und Raumfahrttechnik (La Rocca et al. 2009) oder dem Schiffsbau (Zimmermann et al. 2007) untersucht. In der von Klein- und Mittelständischen Unternehmen (Lovett et al. 2000) geprägten Bauindustrie werden, wenige Arbeiten ausgenommen (Voss et al. 2012), wissensbasierte Methoden noch nicht flächendeckend eingesetzt. Als logische Konsequenz bieten die typischen CAD-Systeme derzeit nur selten KBE Funktionalitäten an.

Derzeit durchläuft die Baubranche durch die Einführung von Building Information Modelling (BIM) einem tiefgreifenden technologischen Wandel. Während Bauwerke traditionell mit Hilfe von 2D-Zeichnungen geplant werden, setzt BIM auf einen vollständig digitalisierten Planungsprozess (Borrmann et al. 2015; Eastman et al. 2011). Im Mittelpunkt steht dabei ein 3D-Bauwerksmodell (Eastman 1999), welches neben geometrischen und topologischen auch semantische Informationen beinhaltet und über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks genutzt wird.

Im Kontext von BIM ist die Überprüfung von erstellten digitalen Bauwerksmodellen (z.B. einem IFC-Modell) hinsichtlich einzuhaltender Normen, Richtlinien und Regeln bereits unter den Begriffen Code Compliance Checking (Yang et al. 2004) und Rule Checking (Eastman et al. 2009) bekannt. KBE-Systeme basieren auf einem fundamental anderen Ansatz: Regeln werden bereits während des Modellierens berücksichtigt, weshalb man auch von einem *generativen Charakter* dieser Systeme spricht.

Die Motive für die Automatisierung von Konstruktionsprozessen sind vielschichtig. Wesentlich ist die Übernahme von unterfordernden Konstruktionsaufgaben bzw. die Unterstützung des Ingenieurs bei der Bewältigung komplexer Aufgaben. Abbildung 1 zeigt eine umfangreiche Übersicht verschiedener Motive für die Automatisierung von Konstruktionsprozessen aus (Abulawi 2012).



**Abb. 1:** Motive für die Automatisierung von Konstruktionsprozessen nach (Abulawi 2012)

### 3 Wissensbasierte Modellierung

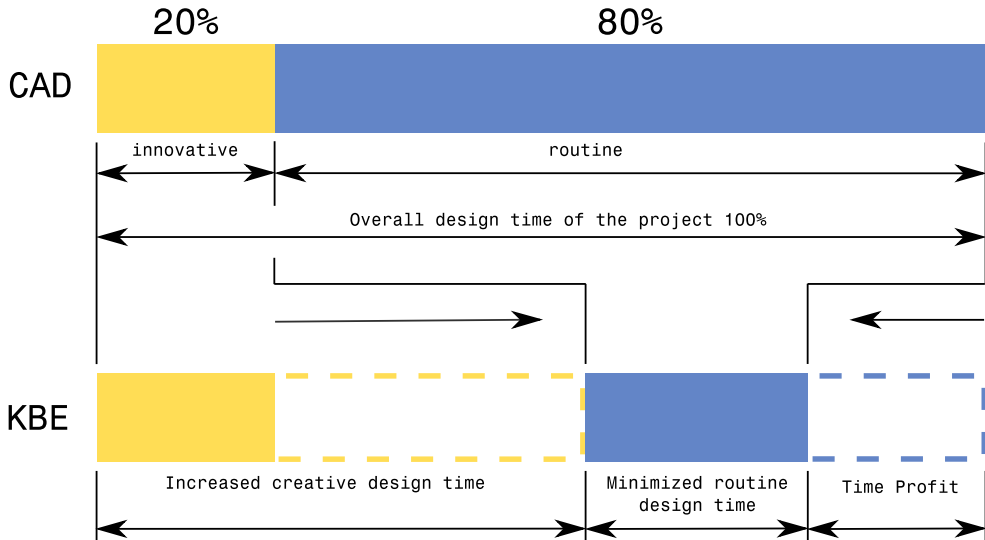
#### 3.1 Vorteile der wissensbasierten Modellierung

Methoden der wissensbasierten Konstruktion können immer dann nutzbringend eingesetzt werden, wenn ein „maßgeblicher Anteil der Konstruktionsentscheidungen durch das automatische Auswerten von Konstruktionsregeln eindeutig gefällt werden kann“ (Abulawi 2012). Dies ist insbesondere zutreffend für Produkte,

- die unter einzelnen Versionen einen hohen Grad an Ähnlichkeiten aufweisen,
- die eine große Anzahl an Anpassungsmöglichkeiten besitzen,
- die eine große Anzahl an Konstruktionsprozessen aufweisen,
- die viele konkurrierende oder widersprüchliche Anforderungen erfüllen müssen,
- in deren Konstruktion viele unterschiedliche Wissensquellen genutzt und berücksichtigt werden,
- deren Konstruktion von vielen Disziplinen beeinflusst wird,
- bis zu deren finalen Entwurf viele Iterationszyklen notwendig sind,
- die ein hohen Anteil sich wiederholender, zeitintensiver aber zugleich primitiver Planungsaufgaben besitzen,
- während deren Planungsprozesses viele Entscheidungen getroffen werden müssen.

KBE ermöglicht eine schnelle und dynamische Untersuchung von Entwurfsvarianten innerhalb des Planungsprozesses. Der planende Ingenieur kann dadurch eine Vielzahl an „wenn-dann“ Szenarien berücksichtigen und in wesentlich kürzerer Zeit zu einem Entwurfsergebnis gelangen. Außerdem werden zusätzliche Freiräume für die kreative Lösung entscheidender technischer Problemstellungen gewonnen. In (Stokes 2001) wurde der Einfluss der Anwendung von KBE auf die Produktentwicklungszeit gegenüber traditionellem CAD untersucht,

siehe Abbildung 2. Stokes stellt fest, dass der Anteil wiederholende Tätigkeiten an allen Planungsaufgaben ca. 80% beträgt. Dieser Anteil kann durch Anwendung von KBE deutlich reduziert und damit Zeit zur Reduzierung der Gesamtproduktentwicklungszeit oder für die tatsächlichen technischen Herausforderungen gewonnen werden.



**Abb. 2:** Vergleich von KBE und traditionellem CAD nach (Stokes 2001)

### 3.2 Potential für die Planung von Ingenieurbauwerken

Die Anwendung von wissensbasierten Methoden zur Planung von Ingenieurbauwerken birgt angesichts der großen Anzahl ähnlicher Planungsaufgaben großes Potential. Bei gleichzeitig steigender Planungsqualität besteht auch in diesem Anwendungsfeld enormes Einsparpotential. Insbesondere der Umstand einer hohen Anzahl an Regelwerken, Richtlinien, Richtzeichnungen und Technischen Vorschriften, die enorme Zahl möglicher Varianten, die Verwendung vieler Standardbauteile und die geringe Gestaltungsfreiheit der Ingenieure sind geradezu prädestiniert für die Anwendung von wissensbasierten Methoden. Zusammengefasst liegt Wissen also bereits stark formalisiert vor.

Im Brückenentwurf ist beispielsweise die Konstruktion eines Brückenwiderlagers ein immer wiederkehrender Planungsprozess. Die Anforderungen an dieses Bauteil sind dabei stets dieselben. Zudem ist die Geometrie des Widerlagers in Normen und Richtlinien umfassend standardisiert. Konstruktionsvarianten entstehen lediglich im Kontext weiterer Brückenkomponenten oder des Geländes. Dies gilt in gleicher Weise für andere Brückenbauteile wie Überbau, Pfeiler oder Gründung oder andere Ingenieurbauwerke wie Tunnel, Schleusen, Wasserkraftwerke oder Talsperren. Andere Anwendungsfelder von KBE im Bauwesen ergeben sich bei stark reglementierten bzw. gegliederten Bauwerken wie Industriehallen, Bahnhöfen und Bahnsteigen, Seilbahnen, Offshore-Anlagen, Wasserversorgungs- und Entsorgungssystemen oder Leitungstrassen.

## 4. Ansatz

Heute existieren für alle bekannten CAD-Systeme entsprechende KBE Module, wie Knowledge Fusion für Siemens NX oder Autodesk Intent für Autodesk Inventor. Diese Module werden oft für ihre enge Verzahnung in die entsprechenden CAD-Systeme kritisiert. Das Ingenieurwissen wird dort in einem proprietären Softwaresystem formalisiert und ist damit außerhalb dieser Umgebungen nicht verfügbar. Weiter existieren unabhängige Open Source KBE-Systeme wie Genworks, deren deklarative Programmiersprachen häufig kompliziert zu handhaben und zu erlernen sind, auch für Experten mit Programmierkenntnissen.

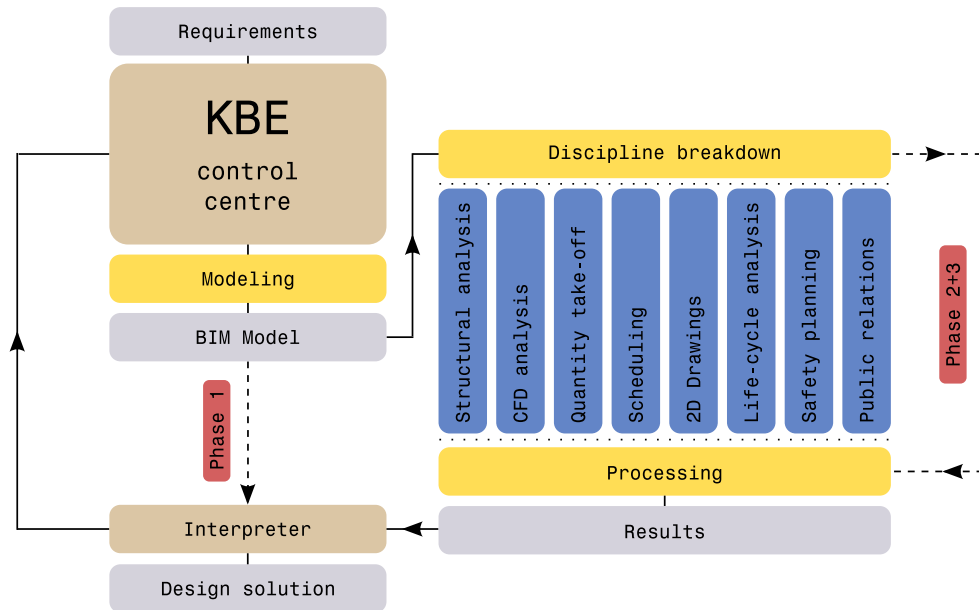
Um diese Nachteile zu überwinden und die spezifischen Anforderungen der Planung von Ingenieurbauwerken zu berücksichtigen, besteht unser Ansatz aus folgenden wesentlichen Punkten:

- Trennung von Wissensbasis, Wissensverarbeitung und Produktmodellierung, im Gegensatz zu proprietären KBE Systemen
- Verwendung von Produktionsregeln mit Inferenzeigenschaften und Entscheidungsbäumen sowie eines Graph-basierten Regeleditors
- Einsatz von visuellen Programmiersprachen für die Modellierung des Datenmodells, der Definition von Design-Regel und der Modellierung der digitalen Bauwerksmodelle
- Verwendung von La Rocca's high-level primitives und capability modules und Adaption des Multi-Model Generator für AEC Bedürfnisse
- Durchführung eines „Discipline Breakdown“, also das regelbasierte Aufschlüsseln des digitalen Bauwerksmodells in Fachmodelle
- Verwendung des offenen Datenformats IFC zur Übergabe der Fachmodelle an nachfolgende Simulationswerkzeuge

Zu Beginn des iterativen Konstruktionsprozesses werden die Anforderungen an das zu entwerfende Bauwerk durch den Ingenieur definiert. Dies sind in der Regel Randbedingungen auf grober Ebene wie die Trassierung und das Gelände oder die Art der Konstruktion. Ausgehend von diesen Fakten übernimmt das KBE Control Center die zentrale Steuerung des gesamten KBE Systems. Es beinhaltet die getrennten Einheiten Wissensdatenbank und Rule Engine. Ausgehend von den definierten Anforderungen werden mit Hilfe der Rule Engine durch Anwendung des in der Wissensdatenbank hinterlegten Regelsatzes weitere detailliertere Parameter festgelegt. Zur Verwaltung der Regeln in der Wissensdatenbank steht ein graph-basierter Rule Editor zur Verfügung, wodurch die enthaltenen Regeln einfach verwaltet und erweitert werden können. Außerdem sind im KBE Control Center Funktionalitäten zur Versionsverwaltung der Entwürfe enthalten.

Nach Festlegung der Parameter im KBE Control Center folgt die geometrisch-semantische Modellierung des Bauwerksmodells durch die Verwendung einer vom KBE System entkoppelten, frei wählbaren Visuellen Programmiersprache (Dynamo oder andere). Diese Architektur stellt die Unabhängigkeit von einem konkreten CAD System sicher, erfordert aber Kommunikationskanäle zum Austausch der Parameter. Ergebnis der Modellierung ist ein BIM Modell in verschiedenen Detaillierungsgraden.

Wie in Abbildung 3 dargestellt, ist die Weiterverarbeitung des BIM Modells abhängig von der Phase der Anwendung des KBE Systems. Dazu werden drei Phasen, die KBE Development Levels eingeführt:



**Abb. 3:** KBE Systemarchitektur

**Phase 1** - Interpretation des Models auf Basis von Handrechnung: Vollständig automatisierte und regelbasierte Anpassung der Modellparameter durch die Rule Engine im KBE Control Center. Es wird kein Discipline Breakdown, also keine Ableitungen und Simulation von und an Fachmodellen durchgeführt, wodurch die Zeitdauer eines einzelnen Iterationszyklus sehr kurz ist.

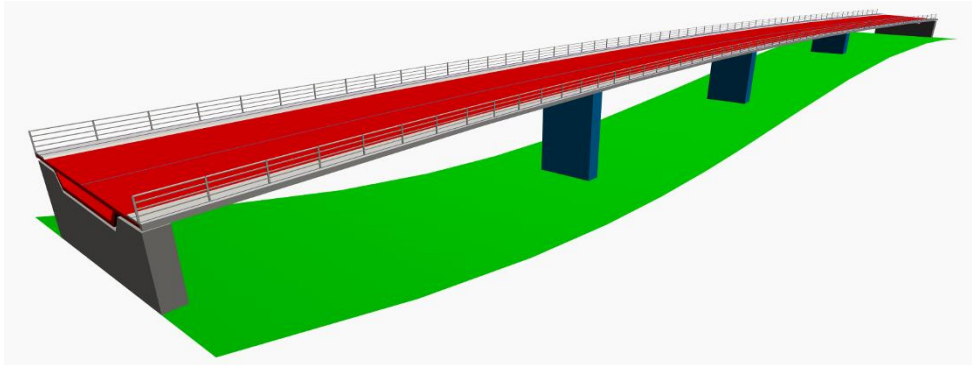
**Phase 2** - Manueller Discipline Breakdown: Ableitung von Teilmodellen für die Fachdisziplinen / Simulationen aus dem generierten BIM Modell. Manuelle Interpretation der Simulationsergebnisse und Anpassung der Parameter durch den Anwender. Aufgrund der langen Simulationszeiten entstehen lange Iterationszyklen.

**Phase 3** – Automatisierter Discipline Breakdown: Wie Phase 2, aber automatisierte Interpretation der Simulationsergebnisse. Geeignet für langfristige Optimierungen des Entwurfs im Serverbetrieb.

## 5. Implementierung

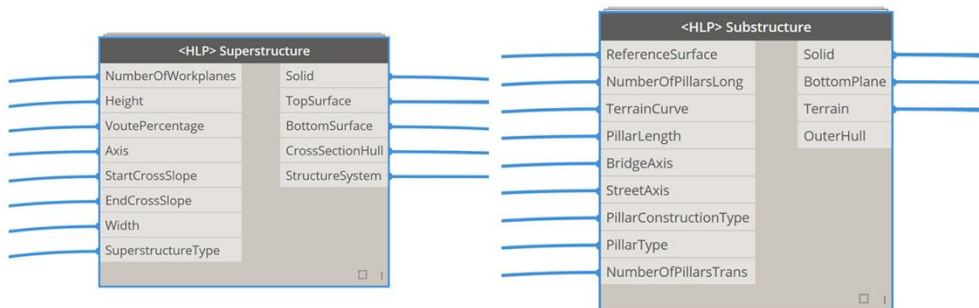
Als ersten Schritt zur Umsetzung des vorgestellten Ansatzes, haben wir die geometrisch-semantiche Modellierung innerhalb der VPL-Umgebung Dynamo implementiert. Diese Implementierung dient als Basis für den Aufbau der Wissensdatenbank und die Integration des KBE Control Centers in das System. Mit den momentan implementierten Funktionen ist es möglich, ein digitales Bauwerksmodell einer Brücke auf Basis weniger Parameter zu generieren. Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein mit Hilfe abstrakter Parameter wie Achse, Gelände, Verkehrsart, Regelquerschnitt, Brückentyp, Überbautyp, Anzahl der Pfeiler in Längs-

und Querrichtung, Pfeilertyp, Voutung, Gründungsart, Widerlagertyp, uvm. generiertes Brückenmodell.



**Abb. 4:** Generiertes Brückenmodell

Die Parameter werden aktuell vom Nutzer per Hand festgelegt, was in einem weiteren Schritt durch das KBE Control Center erfolgen soll. Auf Basis dieser Parameter übernehmen im Anschluss die Module innerhalb von Dynamo die Modellierung der einzelnen Brückenbauteile Überbau, Pfeiler, Widerlager und Fundamente. Abbildung 5 zeigt exemplarisch zweier dieser Module.



**Abb. 5:** Implementierung von Modulen zur Modellierung der einzelnen Brückenkomponenten in der VPL Umgebung Dynamo, zu sehen Überbau und Unterbau

## 6. Zusammenfassung

In diesem Paper wurde ein Ansatz zur (teil-) Automatisierung von Konstruktionsprozessen in frühen Phasen des Brückenentwurfs durch Anwendung wissensbasierter Methoden vorgestellt. Dazu wurde zunächst in die Thematik durch Verweis auf bisherige Arbeiten in anderen Domänen und Rule-Checking von BIM-Modellen eingeführt. Nach Aufführung der Vorteile der Anwendung wissensbasierter Methoden für die Konstruktion von Ingenieurprodukten und Feststellung des Potentials für die Planung von Ingenieurbauwerken, wurde unser Ansatz eines KBE-Systems vorgestellt. Es folgten Einblicke in erste Implementierungen am Beispiel einer Balkenbrücke in Massivbauweise.

## Literatur

- ABULAWI, J. (2012), Ansatz zur Beherrschung der Komplexität von vernetzten 3D-CAD-Modellen (Dissertation), Universität der Bundeswehr Hamburg.
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C. & BEETZ, J. (2015), Building Information Modeling. Technologische Grundlagen Und Industrielle Anwendungen. Vieweg + Teubner Verlag.
- CHAPMAN, C. & PINFOLD, M. (2001), The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure, *Advances in Engineering Software*, 32, 12, 903–912.
- EASTMAN, C., LEE, J.-m., JEONG, Y.-s. & LEE, J.-K. (2009), Automatic rule-based checking of building designs, *Automation in Construction*, 18, 8, 1011–1033.
- EASTMAN, C. M. (1999), Building product models. Computer environments supporting design and construction. CRC press, Boca Raton, Fla.
- EASTMAN, C. M., TEICHOLZ, P., SACKS, R. & LISTON, K. (2011), BIM handbook. A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. Wiley, Hoboken, NJ.
- LA ROCCA, G., VAN TOOREN, L. & MICHEL, J. (2009), Knowledge-Based Engineering Approach to Support Aircraft Multidisciplinary Design and Optimization, *Journal of Aircraft*, 46, 6, 1875–1885.
- LA ROCCA, G. (2012), Knowledge based engineering: Between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design, *Advanced Engineering Informatics*, 26, 2, 159–179.
- LIESE, H. (2003), Wissensbasierte 3D-CAD-Repräsentation (Dissertation), TU Darmstadt.
- LOVETT, P., INGRAM, A. & BANCROFT, C. (2000), Knowledge-based engineering for SMEs - a methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, 107, 1-3, 384–389.
- STOKES, M. (2001), Managing engineering knowledge. MOKA: methodology for knowledge based engineering applications. Professional Engineering Pub., London.
- VERHAGEN, W., BERMELL-GARCIA, P., VAN DIJK, R. & CURRAN, R. (2012), A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges, *Advanced Engineering Informatics*, 26, 1, 5–15.
- VOSS, E. & OVEREND, M. (2012), A Tool that Combines Building Information Modeling and Knowledge Based Engineering to Assess Façade Manufacturability, *Advanced building skins 14* | 15 June 2012, 169–178.
- YANG, Q. Z. & XU, X. (2004), Design knowledge modeling and software implementation for building code compliance checking, *Building and Environment*, 39, 6, 689–698.
- ZIMMERMANN, M. & BRONSART, R. (2007), Application of knowledge-based engineering methods for standardization and quality assurance in ship structural design. In: *World Maritime Technology Conference in London, UK*.