



Ralph Stelzer (Hrsg.)

# ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung  
und Konstruktionstechnik



Ralph Stelzer (Hrsg.) **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016  
Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik



Ralph Stelzer (Hrsg.)

# **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** 2016

Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung  
und Konstruktionstechnik

Dresden · 30. Juni – 1. Juli 2016

## **Programmkomitee Virtuelle Produktentwicklung und Konstruktionstechnik**

Prof. Dr. Ralph Stelzer, TU Dresden

Prof. Dr. Michael Abramovici, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. Reiner Anderl, TU Darmstadt

Prof. Dr. Martin Eigner, Universität Kaiserslautern

Prof. Dr. Detlef Gerhard, TU Wien

Prof. Dr. Jivka Ovtcharova, KIT Karlsruhe

Prof. Dr. Rainer Stark, TU Berlin

Prof. Dr. Sandor Vajna, Universität Magdeburg

Prof. Dr. Sandro Wartzack, Universität Erlangen

Entwickeln – Entwerfen – Erleben 2016.  
Beiträge zur Virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik  
Herausgeber: Ralph Stelzer

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind  
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche  
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the  
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-062-0

© 2016 w.e.b. Universitätsverlag & Buchhandel  
Eckhard Richter & Co. OHG  
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden  
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19  
<http://www.tudpress.de>

TUDpress ist ein Imprint von w.e.b.

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.  
Layout und Satz: Technische Universität Dresden.  
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration © 2016 TU Dresden  
Printed in Germany.

Erscheint zugleich auf QUCOSA der SLUB Dresden  
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-203878>





# KOMPLEXITÄT DREHT SICH IMMER NUR IM KREIS.



# EINFACH TRIFFT ENTSCHEIDUNGEN.

Komplexität bremst Ihr Business aus. Denn je gewaltiger die Informationsflut, desto schwieriger die Entscheidungsfindung. SAP arbeitet daran, Dinge zu vereinfachen. Damit aus Daten Wissen und aus Wissen fundierte Entscheidungen werden, die Ihr Unternehmen weiterbringen. Finden Sie heraus, wie gemeinsam einfach möglich wird auf [sap.de/runsimple](http://sap.de/runsimple)



Run Simple



# Wissensbasierter Aufbau konstruktions-begleitender Finite-Elemente-Analysen durch ein FEA-Assistenzsystem

Philipp Kestel · Sandro Wartzack

## 1 Einleitung

Aufgrund der wachsenden Produkthanforderungen bei gleichzeitig immer kürzeren Entwicklungszeiten gewinnen computergestützte Simulationsverfahren, wie die Finite-Elemente-Analyse (FEA), in der Produktentwicklung zunehmend an Bedeutung [Müller 2009]. Für eine effiziente Nutzung der FEA muss diese jedoch frühzeitig in der Produktentwicklung angewendet werden. Darüber hinaus wird für einen erfolgreichen Einsatz umfangreiches Expertenwissen vorausgesetzt. Dieses Wissen konzentriert sich in den Unternehmen hauptsächlich auf erfahrene Berechnungsingenieure, die aufgrund zeitlicher Engpässe Simulationen meist nur zur Nachrechnung bereits ausdetaillierter Produktmodelle durchführen. Konstruktionsbegleitende Simulationen werden hingegen zu selten eingesetzt oder sind nicht aussagekräftig genug, wenn diese nicht von Berechnungsexperten erstellt werden. Um den steigenden Anforderungen an die Produktentwicklung gerecht zu werden, muss das erforderliche Simulationswissen daher auch weniger erfahrenen Benutzergruppen, wie Konstruktionsingenieuren, zugänglich gemacht werden. Darüber hinaus müssen wiederkehrende Arbeitsschritte für den Simulationsaufbau standardisiert und automatisiert werden, um die Qualität der Berechnungsergebnisse abzusichern und diese Prozesse zu beschleunigen.

Vor diesem Hintergrund wird ein wissensbasiertes FEA-Assistenzsystem entwickelt. Durch dieses Assistenzsystem sollen Konstruktionsingenieure in die Lage versetzt werden, Produkteigenschaften durch verlässliche strukturelle mechanische Analysen frühzeitig abzusichern. Dabei wird sowohl der Aufbau des Simulationsmodells im Rahmen des Pre-Processings als auch die Auswertung der Simulationsergebnisse im Post-Processing unterstützt (Kestel & Wartzack 2015, Sprügel & Wartzack 2016). Das hierzu erforderliche Simulationswissen wird durch Experteninterviews sowie anhand von Berechnungsberichten und -modellen bereits durchgeführter und validierter

Simulationen erfasst und in einer Wissensbasis strukturiert und rechnerverarbeitbar zusammengetragen. Hierbei kommen zur Analyse der Berichte und Modelle automatisierte Akquisitionsprozesse aus dem Bereich des Knowledge Discovery in Databases (KDD), wie Data- und Text-Mining, zum Einsatz (Fayyad et al. 1996, Heyer et al. 2006). Diese automatisierten Wissensakquisitionsprozesse und die resultierende Wissensbasis des FEA-Assistenzsystems wurden bereits in (Breitsprecher et al. 2015, Kestel & Wartzack 2015, Kestel et al. 2015a, 2015b) vorgestellt.

Der Schwerpunkt dieser Veröffentlichung liegt auf der effizienten Anwendung des akquirierten Simulationswissens sowie dem automatisierten Aufbau entsprechender FEA. Der wissensbasierte Aufbau der Simulationen erfolgt hierbei ausgehend von der bestehenden CAD-Arbeitsumgebung (Computer-aided Design) des Konstruktionsingenieurs. Hierzu wird ein Feature-basierter Ansatz bei der Umsetzung des FEA-Assistenzsystems verfolgt. Nach der VDI 2218 handelt es sich bei einem Feature um die Aggregation von Geometrieelementen und/oder Semantik. Die zu entwickelnden CAE-Features (Computer-aided Engineering) werden als integrierte Produktdatenmodelle nicht nur für die Konstruktion von Bauteilen oder Gestaltungselementen eingesetzt, wie zum Beispiel CAD-Features zur Erstellung von Gewindebohrungen, sondern auch für die Verknüpfung der CAD-Repräsentation eines Bauteils mit wiederkehrenden Berechnungsmodellen und -methoden.

In der vorliegenden Veröffentlichung wird dieser Ansatz für die Unterstützung strukturmechanischer Analysen von verschraubten und geschweißten Stahlbaukonstruktionen veranschaulicht. Im Anschluss an eine kurze Einführung über wissensbasierte Assistenzsysteme und den bisherigen Einsatz integrierter Produktdatenmodelle wird ein Einblick in den Aufbau des FEA-Assistenzsystems gegeben. Des Weiteren werden die Grundlagen der automatisierten Akquisition sowie der strukturierten und rechnerverarbeitbaren Bereitstellung von Simulationswissen in einer zentralen Wissensbasis erläutert. Vor diesem Hintergrund wird schließlich im dritten Kapitel der Einsatz von CAE-Features für den Simulationsaufbau und effiziente Nutzung der in der Wissensbasis zusammengetragenen Modellierungsregeln und -methoden für Stahlbaukonstruktionen vorgestellt. Neben der Kopplung der Konstruktions- und Simulationsumgebungen sowie Qualitätssicherung von Simulationen wird auch die Automatisierbarkeit wiederkehrender Arbeitsschritte im Pre-Processing durch das Assistenzsystem behandelt.

## 2 Stand der Technik und Grundlagen

Im Folgenden werden die bisherige Anwendung von Konstruktionsassistenzsystemen und der Einsatz von Features als integrierte Produktdatenmodelle geklärt. Des Weiteren wird der aktuelle Stand des FEA-Assistenzsystems sowie der zugehörigen Akquisitionsprozesse für den Aufbau einer Wissensbasis vorgestellt.

### 2.1 Wissensbasierte Assistenzsysteme und integrierte Produktdatenmodelle

Für eine effiziente Anwendung des akquirierten Simulationswissens baut das FEA-Assistenzsystem auf den Konstruktionsassistenzsystemen mfk und Slassy auf. In Anlehnung an die Vorgehensweise eines Konstruktionsingenieurs unterstützen diese Assistenzsysteme die Produktentwicklung im Rahmen der Synthese (Definition ausschlaggebender Bauteilmerkmale) sowie Analyse (Festlegung der Bauteileigenschaften und der Fertigbarkeit) von Dreh-, Blech- und Gussteilen sowie von Bauteilen, hergestellt durch Blechmassivumformung (Meerkamm & Hochmuth 1998, Wartzack 2001, Breitsprecher & Wartzack 2012). Der Austausch relevanter Informationen, z. B. von Durchmessern für Wellenfestigkeitsberechnungen, wird durch CAD-Features ermöglicht, die als gemeinsame Produktdatenmodelle dienen. Der Syntheseteil des FEA-Assistenzsystems bezieht sich hingegen auf den Aufbau aussagekräftiger Simulationsmodelle (Kestel & Wartzack 2015) und der Analyseteil auf die Plausibilitätsprüfung und Interpretation der Berechnungsergebnisse (Sprügel & Wartzack 2016). Der Austausch der erforderlichen Geometrie- und Simulationsdaten zwischen der CAD-Arbeitsumgebung des Konstruktionsingenieurs und der Simulationsumgebung wird ebenfalls von integrierten Produktdatenmodellen, den CAE-Features, ermöglicht.

Die Grundlagen für die Anwendung von durchgängigen Datenmodellen zur Kopplung der CAD- und FEA-Umgebungen wurden von Deng et al. (2002) gelegt. Damit wirkte er Problemen bezüglich der Kompatibilität und begrenzten Assoziativität dieser Systeme entgegen, die in (Peak 2003) beschrieben werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Feature entwickelt, das erforderliche Informationen bezüglich Konstruktions- und Simulationsparametern für Spritzgussbauteile bereitstellt. Weitere Feature-basierte Werkzeuge, welche den Austausch von Modellen sowie den zugehörigen Parameterinformationen zwischen den Konstruktions- und Simulationssystemen ermöglichen werden in (Zeng et al. 2004, Shephard et al. 2004, Lee 2005, Cao et al. 2009) beschrieben. Diese Werkzeuge unterstützen darüber hinaus die Unterteilung und Vereinfachung der übertragenen Modelle, um diese für Simulationen vorzubereiten. Jedoch sind die darin beschriebenen Features

nicht an eine umfangreiche Wissensbasis zur kontextsensitiven Bereitstellung von Modellierungsregeln sowie zur Automatisierung des Aufbaus aussagekräftiger Simulationen angebunden.

Das in (Gujarathi & Ma 2010) beschriebene Produktdatenmodell ist an eine Wissensbasis angebunden und wird zur Kopplung der CAD- und FEA-Umgebungen eingesetzt. Der Schwerpunkt liegt jedoch in der Unterstützung von Konstruktionszyklen und der Anwendung von Konstruktionswissen. In diesen Konstruktionszyklen werden Geometrieinformationen sowie grundlegende, für die mechanische Analyse erforderliche Parameter, wie Materialeigenschaften, sowohl für das CAD- als auch CAE-System genutzt. Es werden jedoch keine umfassenden Modellierungsregeln in der Wissensbasis bereitgestellt, um den Simulationsaufbau zu unterstützen. Die in der Veröffentlichung von Gujarathi & Ma (2010) beschriebenen Parameter zur Wahl der Elementtypen unterscheiden ausschließlich zwischen zwei Detaillierungsstufen für die konzeptionelle Auslegung sowie die Ausarbeitung von Druckbehältern. Die hierfür bereitgestellten Mittelflächen- und Volumenmodelle eines Druckbehälters sind auf die gegebene Zusammenstellungen beschränkt. Werden neue Komponenten oder Gestaltungselemente in das Modell eingefügt, lassen sich daraufhin keine geeigneten, lauffähigen Simulationen automatisch generieren.

## 2.2 Aufbau des FEA-Assistenzsystems

Das Konzept des FEA-Assistenzsystems wurde in (Kestel & Wartzack 2015) vorgestellt und in Abbildung 1 ist der Aufbau dargestellt. Gemäß Rude (1998) und VDI-EKV & GI (1992), enthält das Assistenzsystem eine Wissensakquisitionskomponente, eine Wissensbasis sowie ein Steuersystem, das sich aus der Problemlösungs-, Erklärungs- und Dialogkomponente zusammensetzt. Durch die Akquisitionskomponente wird zum einen die manuelle Akquisition von Simulationswissen unterstützt, unter anderem durch Experteninterviews. Diese Akquisitionsprozesse sind jedoch sehr zeitintensiv und Berechnungsingenieure können, aufgrund der hohen Arbeitsauslastung, nur begrenzt für Interviews eingesetzt werden. Daher werden automatisierte KDD-Prozesse entwickelt und angewendet, um das erforderliche Simulationswissen zu akquirieren. Diese Prozesse dienen dazu, im Unternehmen bereits vorhandene Modelle zu durchgeführten und validierten Simulationen sowie aus unstrukturierte, textbasierte Berechnungsberichte zu analysieren. Die Problemlösungskomponente wertet schließlich das zusammengetragene Wissen für gegebene Anwendungsfälle aus und bestimmt geeignete FEA-Modelle durch Inferenzmechanismen (Wartzack 2001). Darüber hinaus wird die Nachvollziehbarkeit der gefundenen Lösungen über die Erklärungskomponente für den Anwender sichergestellt. Die

Dialogkomponente navigiert den Anwender durch den Modellerstellungsprozess im Rahmen des Pre-Processings und unterstützt ihn bei der Interpretation und Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse (Katona et al. 2014, Spruegel et al. 2015) im Post-Processing. Die Benutzerinteraktion findet jedoch hauptsächlich nur im Post-Processing in der FEA-Umgebung statt. Da das FEA-Assistenzsystem auf Konstruktionsingenieure zugeschnitten ist und in deren bestehende Arbeitsumgebung integriert wird, erfolgt die Definition berechnungsrelevanter Informationen, wie Lasten und Lagerungen, hauptsächlich im CAD-System. Hiermit wird eine verbesserte Bedienbarkeit und erhöhte Akzeptanz für das Assistenzsystem sichergestellt.

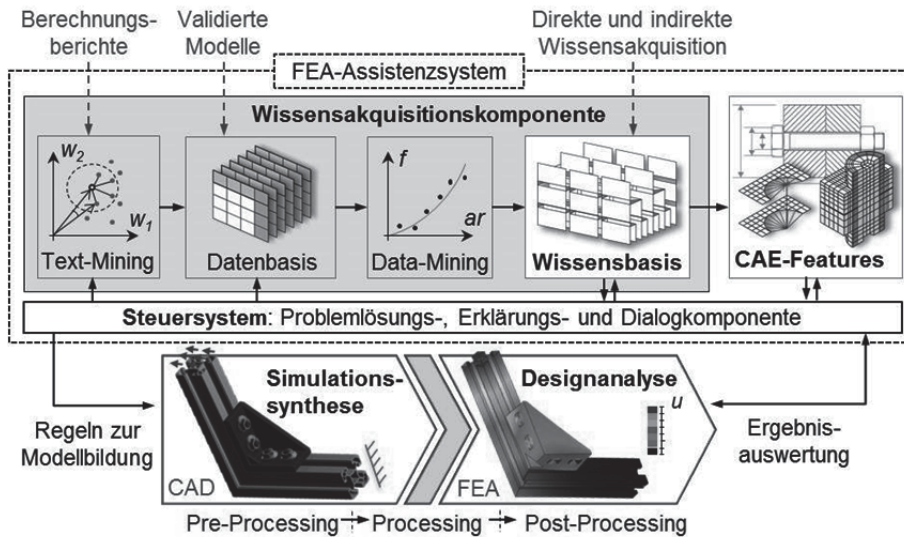


Abbildung 1: Aufbau des FEA-Assistenzsystems  
nach Rude 1998, VDI-EKV & GI 1992, Kestel & Wartzack 2015.

Wie bereits genannt, dienen CAE-Features der Kopplung der CAD- und CAE-Systeme sowie zur Verwaltung der erforderlichen Konstruktions- und Simulationsparameter. Ergänzend zur CAD-Repräsentation eines Bauteils werden wiederkehrende Berechnungsmodelle und -methoden in das durchgängige Produktdatenmodell, in Verbindung mit semantischen Informationen, integriert. Anhand semantischer Informationen wird für Geometrielemente definiert, um welche Bauteile es sich handelt, beziehungsweise die Lage von Kontaktflächen und relevanten Bereichen festgelegt. Die gekennzeichneten Bereiche werden im Modell automatisch erkannt und, abhängig vom

Anwendungsfall und dem geforderten Detailgrad, gezielt für eine Simulation vorbereitet.

## 2.2 Automatisierte Akquisition und Repräsentation von Simulationswissen

Für die Akquisition von Simulationswissen aus validierten Simulationsmodellen und -berichten, welche häufig umfangreiches Expertenwissen enthalten, kommen Data- und Text-Mining-Prozesse zum Einsatz. Das wesentliche Ziel von Data-Mining ist die computergestützte Identifikation von Mustern und Zusammenhängen in Datenbeständen (Fayyad 1996). Bisher fanden diese Prozesse im Bereich der wissensbasierten Produktentwicklung zur Ableitung von konstruktionsrelevantem Fertigungswissen Anwendung, wie z. B. für die neue Fertigungstechnologie der Blechmassivumformung (Breitsprecher & Wartzack S. 2012). Die Datenbestände müssen jedoch strukturiert vorliegen, um diese durch Data-Mining zu analysieren. Falls bereits zahlreiche validierte Simulationsmodelle vorhanden sind, lassen sich diese strukturierten Datensätze für nachfolgende Data-Mining-Prozesse mit wenig Aufwand generieren. Um unstrukturierte, textbasierte Berechnungsberichte zu analysieren müssen diese jedoch zunächst aufbereitet und in geeignete Strukturen überführt werden. Um diese Schritte zu automatisieren kommen Textklassifikation und Informationsextraktion aus dem Bereich des Text-Minings zum Einsatz (Weiss 2005, Heyer et al. 2006). Diese Prozesse werden bisher in Suchmaschinen (Baeza-Yates 1999) sowie im Marketing und Customer Relationship Management angewandt (Hippner 2001) und für das FEA-Assistenzsystem adaptiert und erweitert.

Die entwickelten Akquisitionsprozesse werden auf zahlreiche Berechnungsberichte und -modelle von Industriepartnern sowie Datensätze aus umfangreichen Parameterstudien angewendet, um daraus übergeordnete Zusammenhänge und Modellierungsregeln abzuleiten (Breitsprecher et al. 2015, Kestel & Wartzack 2015). Neben dem Modellaufbau dienen die erfassten Zusammenhänge auch der Plausibilitätsprüfung nachfolgender Simulationen. Die vorliegende Veröffentlichung bezieht sich jedoch auf die Simulationssynthese und die Anwendung entsprechender Modellierungsregeln. Der Analyseteil des FEA-Assistenzsystems für die Plausibilitätsprüfung und Interpretation der Simulationsergebnisse wird hingegen in (Sprügel et al. 2015, Sprügel & Wartzack 2016) ausführlich behandelt.

Zur Veranschaulichung der Akquisitionsprozesse dient eine Parameterstudie über die Modellierung einer Schraubenverbindung (siehe Abbildung 2). In dieser Parameterstudie werden die Schraubenabmessungen (Attribut  $dxP$  in Abbildung 2), erforderlichen Berechnungsergebnisse und -bereiche ( $K_1$  für Attribut  $\quad$  entspricht z. B. der Flächenpressung unter dem Schraubenkopf)

sowie Lasten (z. B. Querbelastung  $F_y$  und Klemmkraft  $F_p$ ) und Lagerungen variiert. Zudem werden unterschiedliche Netz- und Kontakteinstellungen vorgegeben. In Abbildung 2 beziehen sich diese auf die Elementgrößen  $S$ , Elementtypen  $T$  (z. B. Modellierung einer Schraubenverbindung mit Solid- oder Schalenelementen) und Kontakteinstellungen  $K$  (wie fester Verbund, Reib- oder Gewindegkontakt). Darüber hinaus erfolgt ein Abgleich der Simulationsergebnisse mit zuvor durchgeführten, ausdetaillierten Simulationen, analytischen Vergleichsrechnungen oder experimentellen Untersuchungen. Durch den Abgleich der Ergebnisse soll die Genauigkeit der untersuchten Modelle ermittelt werden. Damit kann eine Aussage darüber getroffen werden, welche Auswirkungen eine Vereinfachung mit Ersatzmodellen hat oder welche kritischen Bereiche in den untersuchten Bauteilen feiner vernetzt werden müssen. Aus den betrachteten spezifischen Fällen und diskreten Werten werden durch Data-Mining daraufhin übergeordnete Zusammenhänge abgeleitet. In Abbildung 2 werden Regeln in Form von Klassifikationsbäumen abgeleitet, um zu entscheiden für welche Last- und Anwendungsfälle die unterschiedlichen Modellvarianten einer Schraubenverbindung zulässig sind. Beispielsweise können für hauptsächlich axiale Belastungen Balken- und Schalenelementen mit vereinfachten Kontakten ausreichend sein, um die Schraubenverbindungen in umfangreichen Baugruppen zu modellieren. Wohingegen ein Solidmodell mit Reib- und Gewindegkontakt erforderlich ist, um die vollständige Spannungsverteilung in querbelasteten Schraubenverbindungen zu berechnen. Des Weiteren werden die untersuchten, diskreten Simulationsdaten durch polynomiale Regressionsfunktionen kontinuierliche beschrieben. Durch die in Abbildung 2 dargestellte Kurvenfunktion wird exemplarisch der Zusammenhang zwischen den Abmessungen einer Schraubenverbindung und den geeigneten Balkenquerschnitten und Materialeigenschaften eines Ersatzmodells abgebildet. Darüber hinaus werden Künstliche Neuronale Netze sowohl zur Regression als auch Klassifikation eingesetzt und eignen sich zur Modellierung von komplexen, nichtlinearen Zusammenhängen (VDI 3550). Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Klassifikationsbäumen und Regressionsfunktionen sind deren Lösungen für den Nutzer des Assistenzsystems jedoch nicht nachvollziehbar. Die aus den Data-Mining-Prozessen resultierenden Vorhersagemodelle, die sogenannten Metamodelle, werden schließlich genutzt, um für gegebene Geometrieparameter und Lastfälle sowie erforderliche Berechnungsergebnisse geeignete Simulationseinstellungen, wie Vernetzungs- und Kontakteinstellungen, vorherzusagen (siehe Abbildung 2). (VDI 2230, Tan et al. 2005, Han et al. 2012)

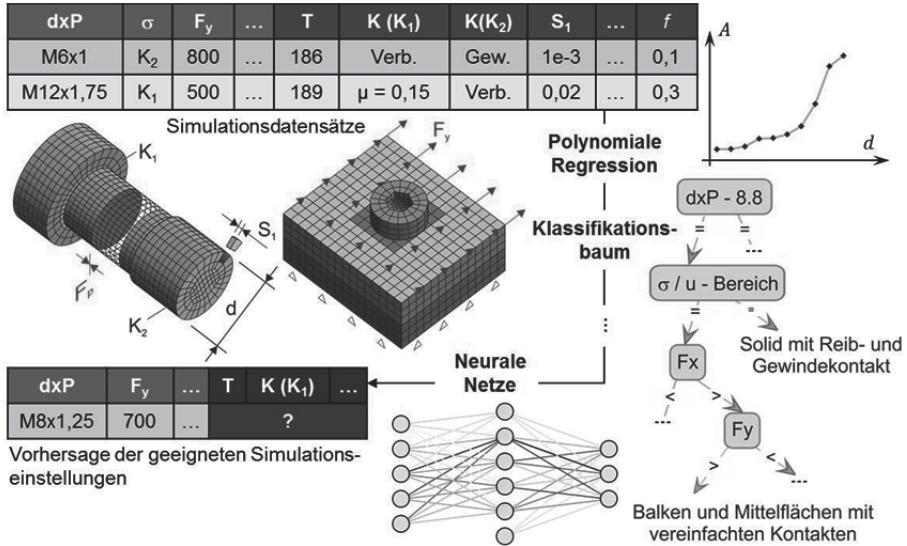


Abbildung 2: Analyse von Simulationsdaten und Ableitung von Simulationswissen durch Data-Mining nach (Kestel & Wartzack 2015)

Wie in (Kestel et al. 2015a, 2015b) beschrieben, wird die Wissensbasis und das Steuersystem zur Bereitstellung und Verarbeitung des akquirierten Simulationswissens im objektorientierten und webbasierten SPDM-System (Simulation Process and Data Management) ANSYS EKM (Engineering Knowledge Manager) umgesetzt. Somit müssen die Metamodelle, die in den Data-Mining-Umgebungen von RapidMiner und MathWorks MATLAB erstellt wurden, in konsistente und in EKM ausführbare Datenstrukturen überführt werden. Diese Aufbereitungsschritte werden über Skripte in MATLAB ebenfalls automatisiert. Regelbasierte Metamodelle, wie z. B. Klassifikationsbäume, werden als bedingte Anweisungen in der Wissensbasis hinterlegt und Regressionsergebnisse Constraint-basiert als mathematische Gleichungen (Spur 1997). Des Weiteren werden Analyseergebnisse, wie die Neuronalen Netze, die sich nicht direkt als Regeln oder Gleichungen abbilden lassen, in ihrer ursprünglichen Form in der Wissensbasis abgelegt. Zur Verarbeitung dieser Wissensinhalte, lassen sich Applikationen wie RapidMiner als externe Anwendungen in EKM aufrufen. Darüber hinaus werden die betrachteten Bauteile, Verbindungs- und Subelemente, erforderlichen Ein- und Ausgabeparameter sowie die vorliegenden Arbeitsschritte und Rahmenbedingungen im Entwicklungsprozess als Metadaten an die Inhalte in der Wissensbasis angehängt.



### 3 Unterstützung des Aufbaus konstruktionsbegleitender FEA

In dieser Veröffentlichung wird ein Feature-basierter Ansatz und die entwickelten Softwaredemonstratoren für den automatisierten Aufbau qualitativ hochwertiger FEA vorgestellt. Dabei soll der wissensbasierte Aufbau der Simulationen ausgehend von der gewohnten CAD-Arbeitsumgebung eines Konstruktionsingenieurs erfolgen. Jedoch bieten CAD-integrierte FEM-Anwendungen nicht die volle Funktionalität eigenständiger, von Berechnungsingenieuren eingesetzter CAE-Systeme. Daher dienen die zu entwickelnden Features zum einen dazu, gängige CAD-Umgebungen mit den in den Berechnungsabteilungen etablierten Simulationssystemen zu koppeln. Zum Anderen ermöglicht der im Rahmen unserer Forschungsarbeit entwickelte Ansatz die gezielte Anwendung des in der Wissensbasis bereitgestellten Expertenwissens von Berechnungsingenieuren sowie den automatisierten Aufbau entsprechender Simulationsmodelle. Dabei ist die Simulationssynthese jedoch nicht auf die Bauteilebene oder vordefinierte Zusammenstellungen beschränkt. Ziel ist es, Simulationen für individuelle, beliebig zusammengestellte Baugruppen wissensbasiert zu unterstützen und zu automatisieren.

#### 3.1 Feature-basierter Ansatz zur Wissensanwendung und Automatisierung

Damit der Aufbau aussagekräftiger Simulationen bereits in der Arbeitsumgebung des Konstruktionsingenieurs erfolgen kann, werden die betreffenden Konstruktions- und Simulationsumgebungen gekoppelt und die Funktionalität des CAD-Systems erweitert. Des Weiteren müssen zusätzliche simulationsrelevante Geometrieelemente, wie beispielsweise Mittelflächen (für vereinfachte Simulationen) und Kontaktflächen, an die Feature-Modelle angehängt werden. Darüber hinaus sind für die Anwendung des akquirierten Simulationswissens die betreffenden Bauteile, Geometrieinstellungen, Lastfälle sowie gewünschten Berechnungsergebnisse als Eingabeparameter für die Vorhersagemodelle erforderlich (siehe Datensatz in Abbildung 3). Über semantische Informationen müssen zudem relevante Bereiche der CAD- und FEA-Modellgeometrie gekennzeichnet werden, damit diese durch das Assistenzsystem identifiziert werden können, wie z. B. die Schrauben, Profilverbinder und Kontaktflächen in Abbildung 3 (siehe linkes Modell).

Die Geometrie- und Materialkenndaten sowie die erforderlichen Berechnungsergebnisse (in Abbildung 3 betreffen diese die Flächenpressung unter dem Schraubenkopf,  $K_1$ ) sollen im CAD-System bestimmt werden. Falls das Modell, wie in dem dargestellten Beispiel, nicht nur aus einem der in den Parameterstudien untersuchten Bauteile besteht und die Randbedingungen nicht in den gleichen Bereichen vorliegen, muss zudem der Kraftfluss durch

das Modell ermittelt werden. Hierzu können u. a. vorangehende, vereinfachte Simulationen aus Mittelflächen mit starren Kontakten dienen. Auf diese Weise können die resultierenden Kräfte an den Schnittstellen der Feature-Modelle bestimmt werden. Ein Beispiel für diese Schnittstellen ist Fläche  $K_1$ , welche über die verknüpften semantischen Informationen in dem Modell (siehe zweites Modell in Abbildung 3) identifiziert werden kann. In den Parameterstudien in Abbildung 2, werden die Lasten auf die Fläche  $K_1$  zur Analyse der Schraubenverbindungen und Ableitung entsprechender Vorhersagemodelle eingepreßt und variiert. Durch die Berechnung der dort vorliegenden Kräfte anhand vereinfachter Simulationen, lässt sich der erforderliche Eingabeparameter  $F_y$  (vergleiche Abbildung 2 und 3) bestimmen und kann durch die in der Wissensbasis hinterlegten Metamodelle verarbeitet werden. Schließlich lassen sich durch die Metamodelle geeignete Simulationseinstellungen vorhersagen und verlässliche Simulationsmodelle erstellen, unter Nutzung der angehängten semantischen Informationen.

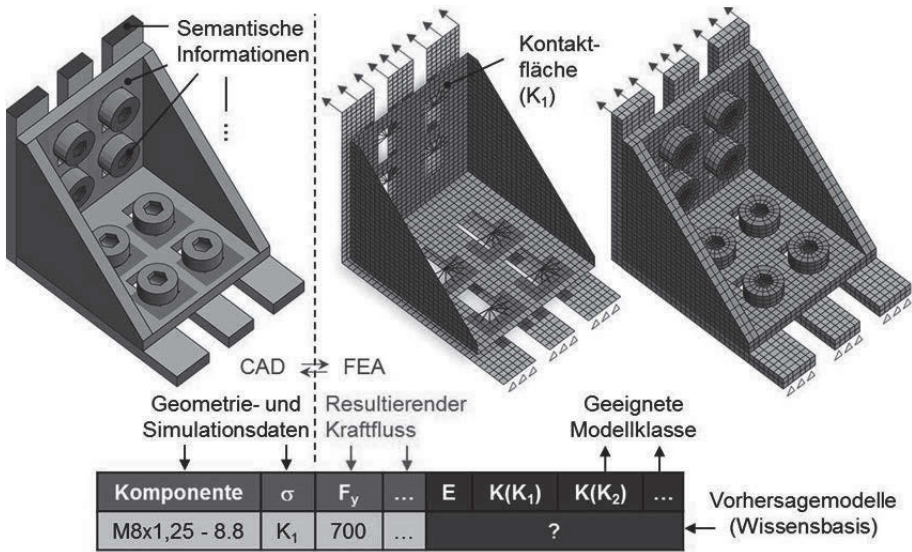


Abbildung 3: CAD-FEA-Kopplung und Auswertung von Simulationwissen nach Kestel et al. 2016.

### 3.2 Umsetzung einer CAE-Feature-Bibliothek für das FEA-Assistenzsystem

Das FEA-Assistenzsystem wird im CAD-Systems PTC Creo Parametric und dem CAE-System ANSYS Workbench, in Kooperation mit B&W Software und ANSYS Germany umgesetzt. Die Implementierung des Assistenzsystems in der Konstruktionsumgebung erfolgt in der Programmierumgebung

von SmartAssembly durch die Erweiterung von Zusatzapplikationen für Creo: IFX (Intelligent Fastener Extension), bisher eingesetzt für die effiziente CAD-Modellierung von Schrauben- und Stiftverbindungen, und AFX (Advanced Framework Extension) für die Feature-basierte Gestaltung von Profilkonstruktionen. Die Simulationsprozesse werden in MATLAB, zur Implementierung der CAD-FEA-Schnittstelle, und ANSYS APDL (ANSYS Parametric Design Language) automatisiert. Darüber hinaus wird ANSYS ACT (Application Customization Toolkit) genutzt, um die Benutzerschnittte des Assistenzsystems in der FEA-Umgebung umzusetzen. Der Fokus liegt auf Strukturmechanischen Analysen verschraubter und geschweißter Blech- und Profilkonstruktionen und der Entwicklung einer entsprechenden CAE-Feature-Bibliothek. In Abbildung 4 besteht die untersuchte Baugruppe aus CAE-Features für Blech- und Profilhauteile sowie für Schrauben- und Schweißverbindungen.

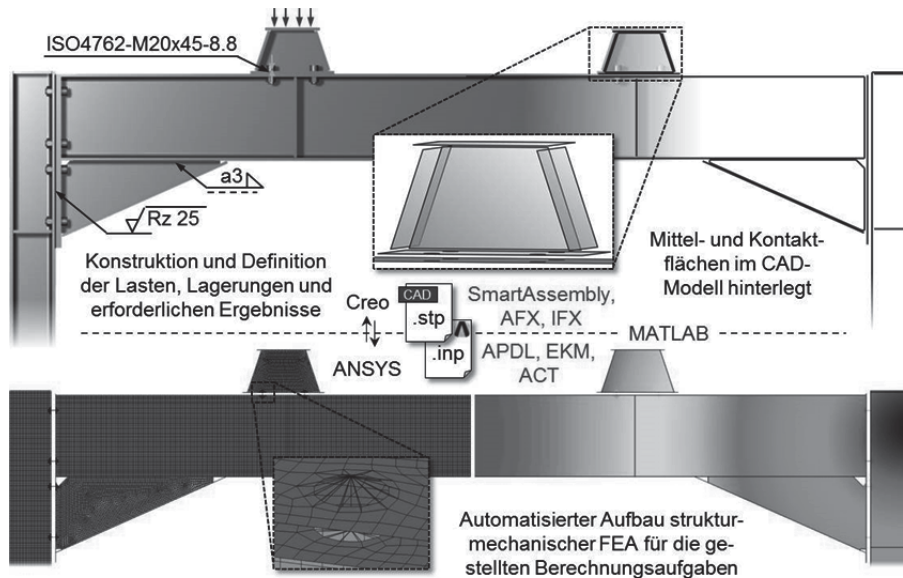


Abbildung 4: Umsetzung von CAE-Features für Profilkonstruktionen

Baugruppen werden sich in wenigen Schritten aus den Features im CAD-System zusammenstellen und dimensionieren lassen. Darüber hinaus sollen bereits die Randbedingungen und erforderlichen Berechnungsergebnisse in Creo definiert werden. Des Weiteren werden Kontakt- und Mittelflächen bereits in den Feature-Modellen integriert sein, unter Nutzung der Parametrik und Assoziativität des CAD-Systems. Wie in Abbildung 4 dargestellt,

sind die Ziele unserer Forschungsarbeit die Geometrie der Baugruppen sowie die gegebenen Simulationsparameter und zugehörigen Koordinaten entsprechender Modellbereiche in einer neutralen STEP-Datei (standard for the exchange of product model data, ISO 10303) auf das CAE-System ANSYS zu übertragen. Ausgehend von den übertragenen Geometrie- und Simulationsdaten in der STEP-Datei und in Verbindung mit den zugehörigen Modellierungsregeln und -methoden aus der Wissensbasis, können daraufhin APDL-Simulationsskripte in MATLAB generiert werden. Anhand dieser Simulationsskripte werden schließlich aussagekräftige Simulationen in Abhängigkeit von den gestellten Berechnungsaufgaben erstellt. In Abbildung 4 werden exemplarisch die Mittelflächen an den Schweißnähten verknüpft und mit Schalenelementen vernetzt, die Schrauben werden mit Balkenelementen modelliert.

Das Potential dieser CAE-Features zur Kopplung und Erweiterung der CAD- und FEA-Umgebungen von Creo und ANSYS, die Anwendung von in der Wissensbasis bereitgestellten Modellierungsregeln sowie der automatisierten Aufbau lauffähiger Simulationen wurde bereits für eine Fallstudie herausgestellt. In dieser Fallstudie (Kestel et al. 2016) wurden verschiedene Lastfälle und Berechnungsgrößen für eine Baugruppe aus Profilträgern, Verbindern und Schraubenverbindungen im CAD-System vorgegeben und geeignete Simulationsmodelle durch das FEA-Assistenzsystem erstellt. Diese Untersuchungen werden für erweiterte, industrielle Fallstudien fortgesetzt, wie z. B. das Maschinenbett, das als Ausschnitt in Abbildung 4 dargestellt ist. Die Anwendbarkeit und Erweiterbarkeit der vorgestellten Feature-Technologie ist dabei lediglich auf wiederkehrende und standardisierbare Bauteile und Gestaltungselemente beschränkt, die sich über eine begrenzte Anzahl an Geometrieparametern definieren und kombinieren lassen.

#### **4 Zusammenfassung und Ausblick**

Aufgrund der zunehmenden Anforderungen in der Produktentwicklung wird ein wissensbasiertes FEA-Assistenzsystem entwickelt, um weniger erfahrene Simulationsanwender in Konstruktionsabteilungen bei der Durchführung qualitativ hochwertiger numerischer Simulationen zu unterstützen. Durch dieses Assistenzsystem wird das erforderliche Wissen von Berechnungsexperten effizient akquiriert und rechnerverarbeitbar in einer zentralen Wissensbasis bereitgestellt. Um die akquirierten Modellierungsregeln und -methoden kontextsensitiv anzuwenden und den Aufbau entsprechender strukturmechanischer Analysen ausgehen von der CAD-Arbeitsumgebung des Konstruktionsingenieurs zu automatisieren, werden CAE-Features entwickelt. Diese Features unterstützen und beschleunigen nicht nur die

Konstruktion von Bauteilen sondern verknüpfen die CAD-Repräsentation dieser Bauteile mit wiederkehrenden Berechnungsmethoden und -modellen. Mittels semantischer Informationen lassen sich die Bauteile und relevanten Modellbereiche durch das Assistenzsystem identifizieren und gezielt für lauffähige FEA vorbereiten. Der Schwerpunkt liegt auf der Analyse verschraubter und geschweißter Blech- und Profilkonstruktionen in den Umgebungen von ANSYS Workbench und Creo Parametric. Ausgehend von ersten CAE-Features und Untersuchungen wird eine umfangreiche Wissensbasis und Feature-Bibliothek für industrielle Anwendungsfälle aufgebaut und das FEA-Assistenzsystem für diese Anwendungsfälle eingesetzt und evaluiert.

## Danksagung

Das hier vorgestellte Vorgehen ist Bestandteil des BFS Forschungsverbunds FORPRO, „Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation“ (AZ 1071-13). Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsförderung BFS, den Gutachtern des Verbunds und den Industriepartnern ANSYS Germany, B&W Software und Federal-Mogul Nürnberg für die finanzielle und projektbegleitende Unterstützung.

## Literaturverzeichnis

- Breitsprecher, T. & Wartzack, S. 2012: Architecture and realization of a self-learning engineering assistance system for the use within sheetbulk metal forming. In: Kyvsgård Hansen, P. (Hrsg.): Proceedings of the 9th Norddesign, 79-86, Aalborg
- Breitsprecher, T., Kestel, P., Küstner, C., Sprügel, T. & Wartzack, S. (2015): Einsatz von Data-Mining in modernen Produktentstehungsprozessen. In: ZWF – Zeitschrift für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 11, 744-750
- Cao, B.-W., Chen, J.-J., Huang, Z.-G. & Zheng, Y. 2009: CAD/CAE integration framework with layered software architecture. In: Proceeding of 11th IEEE International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics, Huangshan, 410-415
- Deng, Y.-M, Britton, G.A., Lam, Y.C., Tor, S.B. & Ma, Y.-S. (2002): A feature-based CAD-CAE integration model for injection molded product design. In: International Journal of Production Research, 40(15)
- Fayyad, U. Piatetsky-Shapiro G., & Smyth, P. (1996): From Data Mining to Knowledge Discovery in Data-bases. In: AI Magazine, 17
- Gujarathi, G. P. & Ma, Y.-S. 2010: Generative CAD and CAE Integration Using Common Data Model. In: Proceedings of the 6th annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Toronto
- Han, J., Kamber, M. & Pei, J. 2012: Data mining: Concepts and techniques. Waltham: Morgan Kaufmann

- Heyer, G., Quasthoff, U. & Wittig, T. 2006: Text Mining: Wissensrohstoff Text: Konzepte, Algorithmen, Ergebnisse. Herdecke: W3L.
- Katona, S., Kestel, P., Koch, M. & Wartzack, S. 2014: Vom Ideal- zum Realmodell: Bauteile mit Fertigungsabweichungen durch automatische FE-Netzadaption simulieren. In: Stelzer, R. (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben, Dresden: TUDPress
- Kestel, P. & Wartzack, S. 2015: Konzept für ein wissensbasiertes FEA-Assistenzsystem zur Unterstützung konstruktionsbegleitender Simulationen. In: Krause, D., Paetzold, K., Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X - Beiträge zum 26. DfX-Symposium, Herrsching
- Kestel, P., Schneyer, T. & Wartzack, S. 2016: Feature-based approach for the automated setup of accurate, design-accompanying Finite Element Analyses. In: Marjanovic, D., Culley, S., Lindemann, U., McAlloone, T., Weber, C. (Hrsg.): Proceedings of the 14th International Design Conference, Dubrovnik
- Kestel, P., Sprügel, T. C., Katona S. & Wartzack, S. 2015a: Konzept zur Umsetzung einer zentralen Wissensbasis für Simulationswissen im ANSYS Engineering Knowledge Manager. In: ANSYS Conference & 33th CADFEM Users' Meeting, Bremen
- Kestel, P., Sprügel, T. C., Katona, S.; Lehnhäuser, T. & Wartzack, S. 2015b: Concept and Implementation of a Central Knowledge Framework for Simulation Knowledge. In: NAFEMS European Conference: Simulation Process and Data Management, Munich
- Lee, S. H. (2005): A CAD-CAE integration approach using feature-based multi-resolution and multi-abstraction modeling techniques. In: Computer-Aided Design, 37 (9), 941-55
- Meerkamm & H., Hochmuth, R. 1998: Integrated Product Development Based on the Design System mfk. In: Proceedings of the 5th International Design Conference, 31-38, Dubrovnik
- Müller, G. 2009: Die Finite Elemente Methode: Vierzig Jahre in der Produkt-entwicklung. Berlin: Springer-Verlag
- Peak, R.S. 2003: Characterizing fine-grained associativity gaps: a preliminary study of CAD-CAE model interoperability. In: Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Chicago
- Rude, S. 1998: Wissensbasiertes Konstruieren, In: Berichte aus dem Maschinenbau. Aachen: Shaker.
- Shephard, M.S., Beall, M.W., O'Bara, R.M. & Webster, B.E. (2004): Toward simulation-based design, Finite Elements in Analysis and Design, 40(12), 1575-1598
- Sprügel, T. C. & Wartzack, S. 2016: Das FEA-Assistenzsystem – Analyseteil FEdeIM. In: Stelzer, R. (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben – Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Dresden: TUDPress
- Sprügel, T. C.; Hallmann, M. & Wartzack, S. 2015: A Concept for FE Plausibility Checks in Structural Mechanics. In: Proceedings of the NAFEMS World Congress 2015, San Diego
- Spur, G. & Krause, F.-L. 1997: Das virtuelle Produkt. München: Hanser
- Tan, P.-N., Steinbach, M. & Kumar, V. 2005: Introduction to data mining. Boston: Pearson Addison Wesley

- VDI 2218 (2003): Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung - feature-Technologie, Berlin: Beuth Verlag
- VDI 2230 (2014): "Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen", Berlin: Beuth Verlag
- VDI 3550 (2003): Computational Intelligence. Berlin: Beuth Verlag
- VDI-EKV & GI 1992: Wissensbasierte Systeme für Konstruktion und Arbeitsplanung. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Wartzack, S. 2001: Predictive Engineering – Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte. VDI Verlag: Düsseldorf
- Weiss, S. M.: Text mining 2005: Predictive methods for analyzing unstructured information. New York: Springer-Verlag
- Zeng, S., Peak, R.S., Xiao, A. & Sitaraman, S. (2004): ZAP: a knowledgebased FEA modeling method for highly coupled variable topology multi-body problems. Engineering with Computers, 24(4), 359-381

## **Kontakt**

Dipl.-Ing. Philipp Kestel, Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack  
Friedrich-Alexander University Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
Martensstraße 9  
91058 Erlangen  
<https://www.mfk.uni-erlangen.de>

